



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Grafit Parçacık Takviyeli Nano Akışkan Kullanılarak AISI 316'nın Frezelenmesinde Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Sıcaklığının Optimizasyonu

Çağrı Vakkas YILDIRIM ^{a,*}

^a Uçak Gövde Motor Bölümü, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: cvyildirim@erciyes.edu.tr

ÖZET

Minimum miktarda yağlama (MMY) sistemi, kullanılan kesme sıvısı miktarını önemli ölçüde azaltmaktadır. Böylece, konvansiyonel kesme sıvılarının getirdiği çevre, işçi sağlığı ve üretim maliyetlerinin artması gibi bazı dezavantajları ortadan kaldırmaktadır. Ancak, bu sistemde çok az miktarda kesme sıvısı kullanıldığı için soğutma kabiliyetinde azalmalar görülebilmektedir. Bu çalışmanın amacı, kesme sıvısının içerisine nano parçacık takviyesi yaparak MMY sisteminin soğutma kabiliyetini artırmaktır. Bu amaç doğrultusunda üç farklı soğutma/yağlama şartı (saf MMY, %0,5 nano grafit içeren MMY ve %1 nano grafit içeren MMY), üç farklı yağ debisi (40, 60 ve 80 ml/h) ve üç farklı püskürtme basıncı (4, 6 ve 8 bar) işleme parametresi olarak seçilmiştir. Değerlendirme ölçütü olarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı seçilmiştir. Zaman ve maliyetten tasarruf etme adına Taguchi L₉ deney tasarımı tercih edilmiştir. Deney sonuçlarının değerlendirilmesinde S/N analizi dikkate alınmıştır. Faktörlerin etki seviyesini belirlemek adına varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Son olarak da doğrulama deneyi yapılmış ve optimizasyonun geçerliliği test edilmiştir. Deney sonuçları analiz edildiğinde, yüzey pürüzlülüğü için optimum parametre grubu %1 katkılı nano grafit takviyeli kesme yağı, 40 ml/saat debi ve 8 bar püskürtme basıncı çıkarken kesme sıcaklığı adına %1 katkılı nano grafit takviyeli kesme yağı, 80 ml/saat debi ve 8 bar püskürtme basıncı çıkmıştır.

Anahtar Kelimeler: AISI 316, Nano akışkan, MMY, Taguchi, nano grafit

Optimization of Surface Roughness and Cutting Temperature in Milling of AISI 316 Using Graphite Particle Reinforced Nano Fluid

ABSTRACT

The Minimum Quantity Lubrication (MQL) system significantly reduces the amount of cutting fluid. Thus, it removes some of the disadvantages such as the environmental damage, workers health and increased production costs brought by conventional cutting fluids. However, in this system very little cooling is obtained because very little cutting fluid is used. The purpose of this work is to improve the cooling capability of the MQL system by making nanoparticle reinforcement into the cutting fluid. For this purpose, three different cooling/lubrication conditions, three different oil flow rates and three different injection pressures have been chosen as process parameters. Surface roughness and cutting temperature were chosen as the evaluation criteria. In order to save time and cost, Taguchi L₉ experimental design was preferred. S/N analysis was considered for the evaluation of the test results. Analysis of variance (ANOVA) was performed to determine the level of

effect of the factors. Finally, the verification experiment was done, and the validity of the optimization was tested. Experimental results show that the optimum parameter group for surface roughness is 1% nano graphite reinforced cutting oil, 40 ml/h flow rate and 8 bar injection pressure while for cutting the temperature is 1% nano graphite reinforced cutting oil, 80 ml/hour flow rate and 8 bar spray pressure.

Keywords: AISI 316, Nano fluid, MQL, Taguchi, nano graphen

I. GİRİŞ

Kesme sıvısı kullanımı, talaş kaldırma operasyonlarında yağlama ve soğutmayı sağlayarak işleme verimliliğinin artmasına yardımcı olan en bilindik işlemdir. Gri dökme demir, saf alüminyum ve magnezyum alaşımlarının işlenmesi gibi bazı işlemler kesme sıvısı kullanılmadan gerçekleştirilebilse de, talaş kaldırma operasyonlarının büyük bir bölümünde kesme sıvısı kullanımı hayati önem taşımaktadır [1]. Özellikle ağır işleme koşullarında ve işleme esnasında yüksek kesme kuvveti, talaş uzaklaştırmada zorluk, kesici takıma talaş yapışması, kötü yüzey kalitesi ve kesici takımda hızlı aşınma görülen AISI 316 çeliklerinin işlenmesinde bu daha da önemli bir hal almaktadır [2]. Ayrıca, kesme esnasında oluşan ve işleme verimliliği için tehlikeli olan ısıyı da kesme bölgesinin dışına tahliye edebilmek için kesme sıvısı kullanımı oldukça önemlidir [3]. Ancak, bütün bu iyileştirmelere rağmen kesme sıvısına uzun süre maruz kalan işçilerde çeşitli cilt ve solunum hastalıkları ve hatta kanser ortaya çıkabilmektedir. Dahası, yüksek miktardaki kesme sıvılarının tedarik edilmesi, depolanması ve yok edilmesi gibi nedenlerden dolayı çevre ve üretim maliyetleri olumsuz etkilenmektedir [4]. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için çalışan araştırmacılar, birkaç yöntemi ön plana çıkarmışlardır ve bunlardan biri de minimum miktarda kesme sıvısı kullanımını temel amaç olarak gören Minimum Miktarda Yağlama (MMY) sistemidir.

MMY sistemi, hemen hemen tüm metal kesme işleminde işleme verimliliği, çevre ve çalışan sağlığı gibi konularda önemli iyileştirmeler sunmaktadır [5]. Ancak, MMY sistemi daha çok hafif ve orta kesme koşullarında ön plana çıkmaktadır. Bunun sebebi ise kullanılan kesme sıvısı miktarının çok az olması nedeniyle soğutma işleminin yeterince yapılamamasıdır [6]. Bu nedenden ötürü özellikle ağır işleme koşullarında MMY sisteminin performansını geliştirecek araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır ve bu yönde çalışmalar yapılmaktadır. Bu çalışmalardan birisi de nanometre büyüklüğündeki metal, oksit, karbür, nitrit, karbon nano tüp, TiO₂ (Titanyum dioksit), Al₂O₃ (Alüminyum oksit), MoS₂ (Molibden disülfür) ve grafitin MMY sisteminde kullanılan kesme sıvılarının içine katılarak elde edildiği nano akışkan kesme sıvılarıdır. Nano katkı maddeleri sayesinde, kesme sıvılarının termal iletkenliği ve yağlama etkisi artırabilir. Böylece, MMY yönteminin performansı artırabilir [7].

AISI 316 paslanmaz çeliğinin işlenmesinde nano akışkanların test edilmesi ile ilgili yeterli çalışma literatürde bulunmamaktadır. Bu nedenle yapılan benzer çalışmalardan bazıları aşağıda sıralanmıştır. Çiftçi [8] yaptığı çalışmada, AISI 304 ve 316 östenitik paslanmaz çeliklerini CVD kaplamalı kesici takım kullanarak işlemiştir. Deneyler sonucunda araştırmacı, kesme hızı değerinin yüzey pürüzlülüğü üzerine önemli bir etkisinin olduğunu iddia etmiştir. Muthusamy ve arkadaşları [9] AISI 304 paslanmaz çeliğinin frezeleme işleminde TiN kaplamalı takım kullanarak, suda çözünen soğutucu ve nano partikül takviyeli (TiO₂/Etilen Glikol) kesme koşullarında takım aşınma değerlerini incelemiştirlerdir. Takım aşınması yönünden etilen glikol esaslı titanyum dioksit nano akışkanın suda çözünen soğutucudan daha iyi performans gösterdiği anlaşılmıştır. Altınkaya ve Güllü [10], AISI 316

östenitik paslanmaz çeliğini frezelerken, tercih edilen kesici kaplamasının kesme kenarındaki aşınmaya olan etkilerini incelemişlerdir. Üç farklı takım, üç farklı kesme hızının kullanıldığı çalışmada TiAlN kaplanmış takımın diğer kaplama tiplerine göre daha iyi aşınma sonuçları verdiğini ortaya koymuşlardır. Prasad ve Srikant [11] AISI 1040 çeliğini tornalarken nano grafiti değişik oranlarda kesme sıvısının içine katarak kuru ve konvansiyonel işleme ile karşılaştırmışlardır. Sonuçlar, nano grafit katkılı kesme sıvısının yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, kesme sıcaklığı ve kesme kuvveti konularında iyileşme olduğunu göstermiştir. Amrita ve arkadaşları [12] AISI 1040 çeliğini tornalarken nano grafit katkılı kesme sıvısının işleme performansını test etmişlerdir. Sonuçların analizini yapan araştırmacılar, nano katkılı kesme sıvısının yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti, kesme sıcaklığı ve talaş morfolojisi açısından kuru, konvansiyonel işleme ve katkısız MMY sistemine nazaran daha iyi sonuçlar verdiğini iddia etmişlerdir. Hadi ve Atefi [13] yaptıkları çalışmada AISI D3 çeliğini frezelerken farklı oranlarda ilave edilen alüminyum oksit katkılı kesme sıvısının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deney tasarımı Taguchi L₉ dikey dizinini kullanan araştırmacılar, deney sonuçlarının analizi için de Taguchi yönteminden faydalanmışlardır. Deney sonuçlarına göre araştırmacılar, nano katkılı kesme sıvısının yüzey kalitesini artırmada oldukça işlevsel olduğunu iddia etmişlerdir.

Bu çalışmada literatürde yer alan bazı bilgiler özet olarak verilmiştir. Literatür taraması göstermiştir ki nano katkılı kesme sıvılarının AISI 316 üzerinde test edildiği herhangi bir çalışma yoktur. Bu çalışmada AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğine MMY ve NanoMMY (grafit takviyeli hacimce %0,5 ve %1) kesme koşullarında farklı debi (40, 60, 80 ml/saat) ve basınçlarda (4, 6, 8 bar) frezeleme işlemi uygulanmıştır. Frezeleme işlemi sonunda yüzey kalitesi ve kesme sıcaklığı araştırılmış ve Taguchi optimizasyon işlemi uygulanmıştır.

II. DENEYSEL PROSEDÜR

Deneylerde ticari AISI 316 östenitik paslanmaz çeliği kullanılmış olup boyutları 15x100x170 mm ölçülerindedir. Çalışmada Sandvik firmasından temin edilen R300-1032E-MM 2040 kaplamalı karbür kesici takım ve R300-025A20-10M takım tutucu kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan iş parçasına ait kimyasal kompozisyon Tablo 1’de gösterilmiştir.

Tablo 1. AISI 316’nın kimyasal kompozisyonu

ASTM	% C	% Mn	% Si	% P	% S	% Cr	% Ni	% Mo	% Fe
1.4401	0,08	2,0	1,0	0,045	0,03	16-18	10,0-14,0	2,0-3,0	Geriye kalan

Deneyler maksimum devri 10.000 dev/dak olan DELTA SEIKI CNC-1050 A marka CNC dik işleme merkezinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan deneylerde kesme derinliği 0,5 mm, ilerleme değeri 0,10 mm/dev, kesme hızı 120 m/dak olarak sabit alınmıştır. MMY deneylerinin gerçekleştirilmesinde SKF marka Vario model yağlayıcı sistemi kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan kesme yağı ve teknik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Kesme yağı özellikleri

Kesme yağı	Teknik Özellikler		
	Yoğunluk (g/ml)	Kinematik viskozite (cSt)	Parlama noktası (°C)
Bitkisel esaslı yağ	0,895	5	170

Üç farklı kesme koşulunun test edildiği çalışmada bitkisel esaslı yağ içerisine grafit nano partikülleri farklı oranlarda (hacimce %0,5 ve %1) ilave edilmiştir. İlave edilen nano grafit tozuna ait teknik özellikler Tablo 3'te verilmiştir. Nano grafitin yapısı; (%87,5) C, (%2,32) H, (%3,54) N, (%4,72) O, (%0,35) Al, (%0,23) Fe, ($\leq 0,10$) diğer, şeklinde oluşmaktadır.

Tablo 3. Nano grafit tozuna ait teknik özellikler

Renk	Siyah
pH	6,5
Safsızlık	Quartz, Mika ve H ₂ O<0,2%
Su etkileşimi	Hidrofobik
Ortalama Çap	80 nm

Yüzey pürüzlülük değerlerinin ölçülmesinde Mahr Marsurf PS 10 Portatif yüzey pürüzlülüğü ölçme cihazı kullanılmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük değerleri *Ra*, ISO 4287 standardına göre, deneyler sonucu elde edilen yüzeylerdeki pürüzlülük sapmalarının aritmetik ortalamasının alınması sonucu elde edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne ait değerler, deneylerden sonra elde edilen yüzeylerin her birinden başta, ortada ve sonda olmak üzere alınan üç ölçüm değerinin aritmetik ortalamasıyla tayin edilmiştir.

Talaş kaldırma deneyleri esnasında kesme sıcaklığını ölçmek için gerçek zamanlı termografik görüntüleme sağlayan, 80 Hz anlık görüntü alan ve 382x288 piksel optik çözünürlüğe sahip kızılötesi Optris PI 450 kamera kullanılmıştır. Optik kamera aracılığıyla elde edilen anlık görüntüleri anlamlandırmak için Optris PI Connect yazılımı kullanılmıştır. Optris PI Connect yazılımı, istenen verinin seçilen bir doğrultuda veya görüş alanı içindeki istenen geometri alanında çekildiği videolar, anlık resimler ve sıcaklık profillerinin yakalanmasını sağlamaktadır.

III. DENEY TASARIMI

Taguchi yöntemi, mühendislik deneylerinin tasarımında ve analizinde kullanılan güçlü bir optimizasyon yöntemidir. Bu yöntem, Bu yöntem, ortogonal diziler kullanarak testlerin sayısını önemli ölçüde azaltmakta ve kontrol edilemeyen faktörlerin etkilerini en aza indirmektedir. Ayrıca, üretim sürecindeki optimum kesme parametrelerini belirlemek için basit, verimli ve sistematik bir yaklaşım ortaya koymaktadır [14]. Frezeleme deneylerinde optimum kontrol faktörlerinin belirlenmesinde Taguchi optimizasyon metodunun L₉ dikey dizilimi tercih edilmiştir. İşleme koşulları ve parametreler Tablo 4'te yer almaktadır.

Tablo 4. İşleme parametreleri ve deney değişkenleri

MMY Kesme Yağı	Bitkisel esaslı yağ
Kesme Koşulu	MMY - 0,5NanoMMY ve 1NanoMMY
Debi (Q, ml/saat)	40, 60 ve 80
Basınç (p, bar)	4, 6 ve 8
İlerleme (f, mm/dev)	0,1
Kesme hızı (Vc, m/dak)	120
Kesme derinliği (ap, mm)	0,5
Kesici takım	PVD kaplamalı karbür takım, R300-1032E-MM 2040
Takım Tutucu	R300-025A20-10M

Çalışmada AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğine frezeleme işlemi sonrası oluşan yüzeylerdeki pürüzlülük ortalama değerleri (Ra) ve talaş kaldırma esnasında kesme bölgesinde oluşan kesme sıcaklığı için optimizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Hem yüzey pürüzlülük (Ra) değerlerinin hem de kesme sıcaklığı değerlerinin en küçük olması istendiğinden, S/N oranlarının hesaplanmasında “en küçük en iyi” amaç fonksiyonu tercih edilmiş ve buna ait formülazasyon Eşitlik 1’de verilmiştir. Kesme koşulu olarak (MMY, 0,5NanoMMY ve 1NanoMMY), Debi (40, 60, 80 ml/saat) ve basınç (4, 6, 8 bar) belirlenmiştir. Deney tasarımında kullanılan L₉ deney dizisi Tablo 5’te yer almaktadır.

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

Burada, y deney sonucunu, n ise deney sayısını ifade etmektedir [15].

Tablo 5. Taguchi L₉ deney tasarımı

Deney Numarası	Kontrol Faktörü		
	A	B	C
1	1	1	1
2	1	2	2
3	1	3	3
4	2	1	2
5	2	2	3
6	2	3	1
7	3	1	3
8	3	2	1
9	3	3	2

Deney tasarımının ve sonuçlar %95 ($\alpha=0,05$) güvenirlilik düzeyinde gerçekleştirilmiştir. Taguchi yöntemi aracılığıyla yapılan optimizasyon işlemi için Minitab 17 paket programı kullanılmış ve analizler bu şekilde gerçekleştirilmiştir.

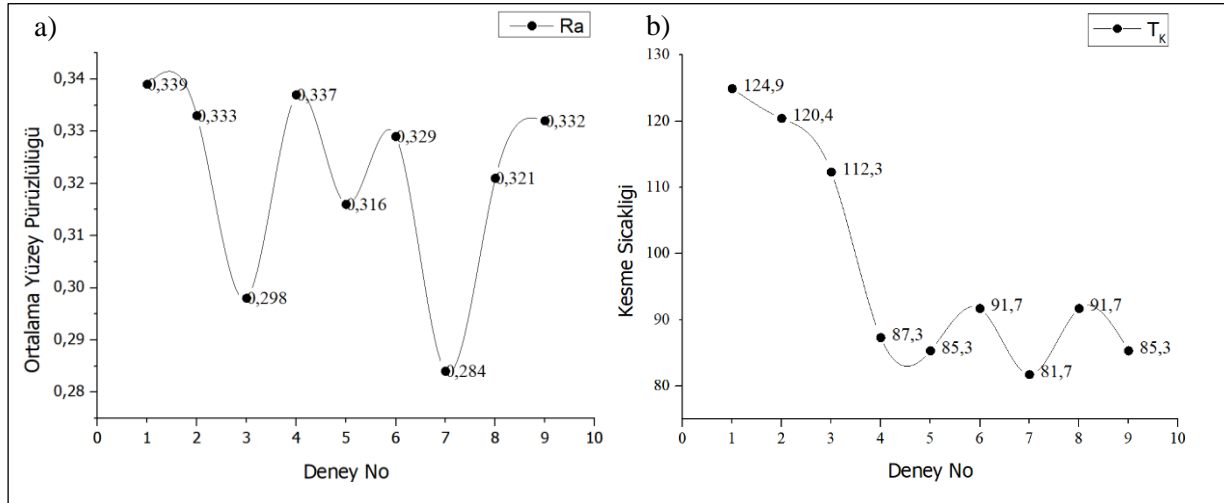
IV. DENEY SONUÇLARININ ANALİZİ

A. S/N ORAN ANALİZİ VE SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

AISI 316 östenitik paslanmaz çeliğinin frezelemesi sonucunda ortaya çıkan ortalama yüzey pürüzlülük değerleri (R_a) ve kesme sıcaklığı değerleri (T_K) ile bunlara ait S/N değerleri Tablo 6'da verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü aritmetik ortalama değeri (T_{Ra}) 0,321 μm olarak hesaplanırken kesme sıcaklığı aritmetik ortalama değeri (T_{TK}) 97,84°C olarak hesaplanmıştır. Ayrıca, Şekil 1'de de deneylere göre ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığındaki değişim verilmiştir.

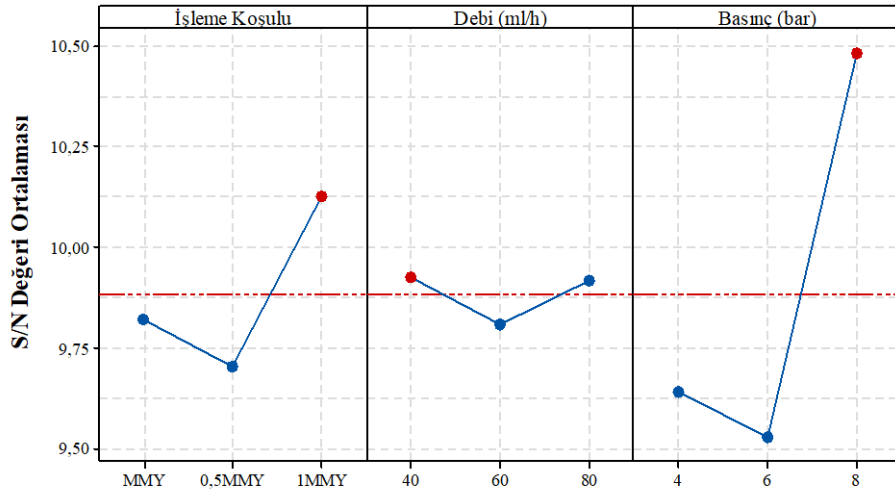
Tablo 6. Deney sonuçları ve bunlara ait S/N değerleri

Deney Numarası	Kontrol Faktörü			Yüzey Pürüzlülük R_a (μm)	Kesme Sıcaklığı T_K (°C)	Ra - S/N oranı (dB)	T_K - S/N oranı (dB)
	A İşleme Koşulu	B Debi	C Basınç				
1	MMY	40	4	0,339	124,9	9,3960	-41,931
2	MMY	60	6	0,333	120,4	9,5511	-41,612
3	MMY	80	8	0,298	112,3	10,5157	-41,008
4	0,5 NanoMMY	40	6	0,337	87,3	9,4474	-38,820
5	0,5 NanoMMY	60	8	0,316	85,3	10,0063	-38,619
6	0,5 NanoMMY	80	4	0,329	91,7	9,6561	-39,247
7	1 NanoMMY	40	8	0,284	81,7	10,9336	-38,244
8	1 NanoMMY	60	4	0,321	91,7	9,8699	-39,247
9	1 NanoMMY	80	6	0,332	85,3	9,5772	-38,619



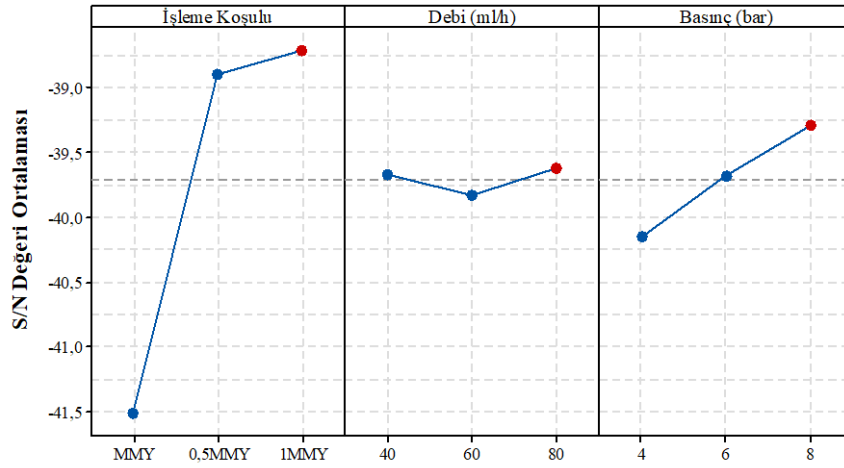
Şekil 1. Deneylere göre sonuçlardaki değişim (a) Ortalama yüzey pürüzlülüğü (b) Kesme sıcaklığı

S/N yanıt tablosundaki en yüksek değer o faktörün optimum değerini vermektedir. Şekil 2 ve Şekil 3'te ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı deneylerine ait S/N değer grafiği verilmektedir. Ayrıca, Tablo 7'de de bu grafiklerin sayısal değerlerini gösteren S/N yanıt tablosu verilmiştir.



Signal-to-noise: Smaller is better

Şekil 2. Ra için ortalama S/N oranları ortalama değerleri



Signal-to-noise: Smaller is better

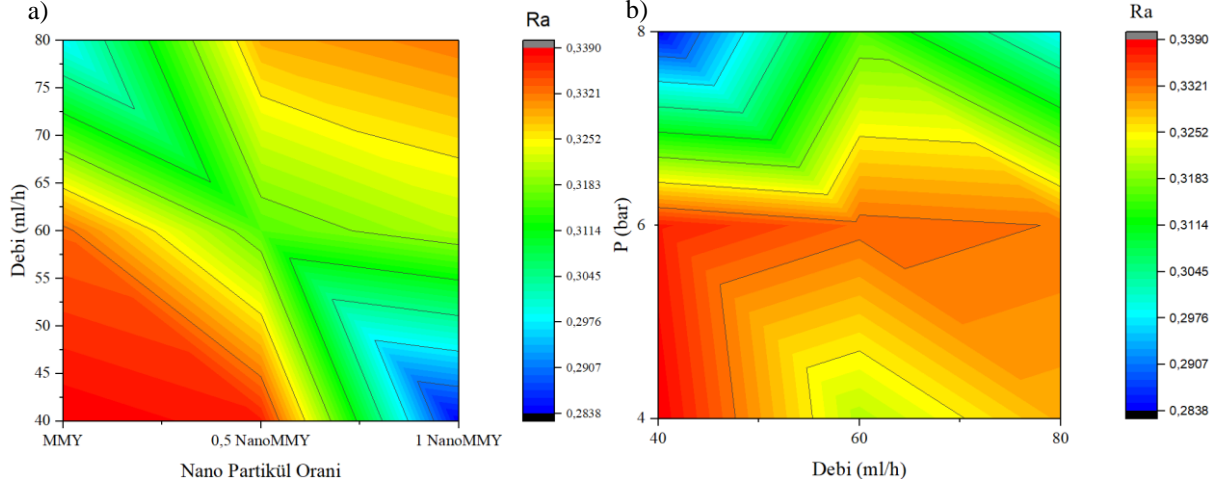
Şekil 3. Tk için ortalama S/N oranları ortalama değerleri

Tablo 7. Deney sonuçlarına ait S/N yanıt tabloları

Seviyeler	Kontrol Faktörleri			Kontrol Faktörleri		
	İşleme Koşulu	Debi	Basınç	İşleme Koşulu	Debi	Basınç
Yüzey Pürüzlülüğü	Kesme Sıcaklığı					
Seviye 1	9,821	9,926	9,641	-41,52	-39,67	-40,14
Seviye 2	9,703	9,809	9,525	-38,90	-39,83	-39,68
Seviye 3	10,127	9,916	10,485	-38,70	-39,62	-39,29
Delta	0,424	0,117	0,960	2,81	0,20	0,85

Şekil 2, Şekil 3 ve Tablo 7 görsel ve sayısal ifadelerde de görüleceği gibi her bir faktör oranının en yüksek olduğu noktalar o parametreye ait optimum değerler olarak tanımlanmaktadır. Bir başka deyişle, ortalama yüzey pürüzlülüğü için optimum işleme parametreleri sırasıyla işleme koşulu için 3. Seviye (%1 nano partikül içeren MMY sistemi, S/N=10,127), debi için 1. Seviye (40 ml/saat, S/N= 9,926) ve aerosolü püskürtme basıncı için 3. Seviye (8 bar, S/N= 10,485) olarak çıkarırken kesme

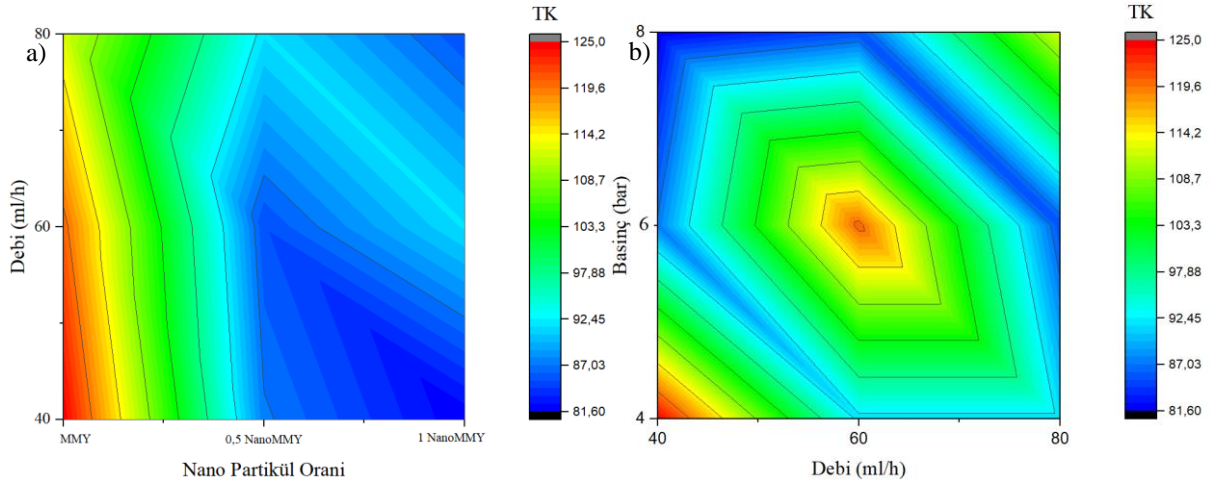
sıcaklığı için optimum işleme parametreleri sırasıyla işleme koşulu için 3. Seviye (%1 nano partikül içeren MMY sistemi, S/N=-38,70), debi için 3. Seviye (80 ml/saat, S/N= -39,62) ve aerosolü püskürtme basıncı için 3. Seviye (8 bar, S/N= -39,29) olarak çıkmıştır. Şekil 4'te farklı işleme parametrelerinin ve bunlara ait kombinasyonların ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini gösteren ısı haritaları verilmiştir.



Şekil 4. İşleme faktörlerinin Ra üzerindeki etkisi (a) Debi-Nano partikül oranı (b) Debi-Basınç

Şekil 4a'da ortalama yüzey pürüzlülüğünün debi ile kesme sıvısının içindeki nano karışım oranına bağlı olarak değişimi verilmiştir. Şekil incelendiğinde, nano karışım oranının sıfır olduğu MMY sistemi ile yapılan talaş kaldırma deneylerinde düşük debilerde yüzey pürüzlülüğünün yüksek çıktığı, debinin artması ile birlikte yüzey pürüzlülüğünün de düştüğü görülecektir. Kesme bölgesine daha fazla kesme yağının iletilmesi ile birlikte yağlama fonksiyonunun artması ve sürtünmenin azalmasının işleme verimliliğinde bir iyileşmeye neden olmaktadır [16]. Kesme sıvısının içerisindeki nano partikül oranının artması ile birlikte yüzey kalitesinde doğal bir iyileşmenin olduğu yine grafiğe bakarak söylenebilir. Dahası, partikül oranının artması ile birlikte düşük debide daha iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. Bu durum, daha az kesme sıvısının takım-iş parçası ara yüzeyine daha iyi nüfuz etmesi ve içerisindeki nano partiküller sayesinde yağ damlacıkları dağılmadığı için kesme sıvısının daha iyi bir film tabakası oluşturmasından kaynaklanmaktadır [17].

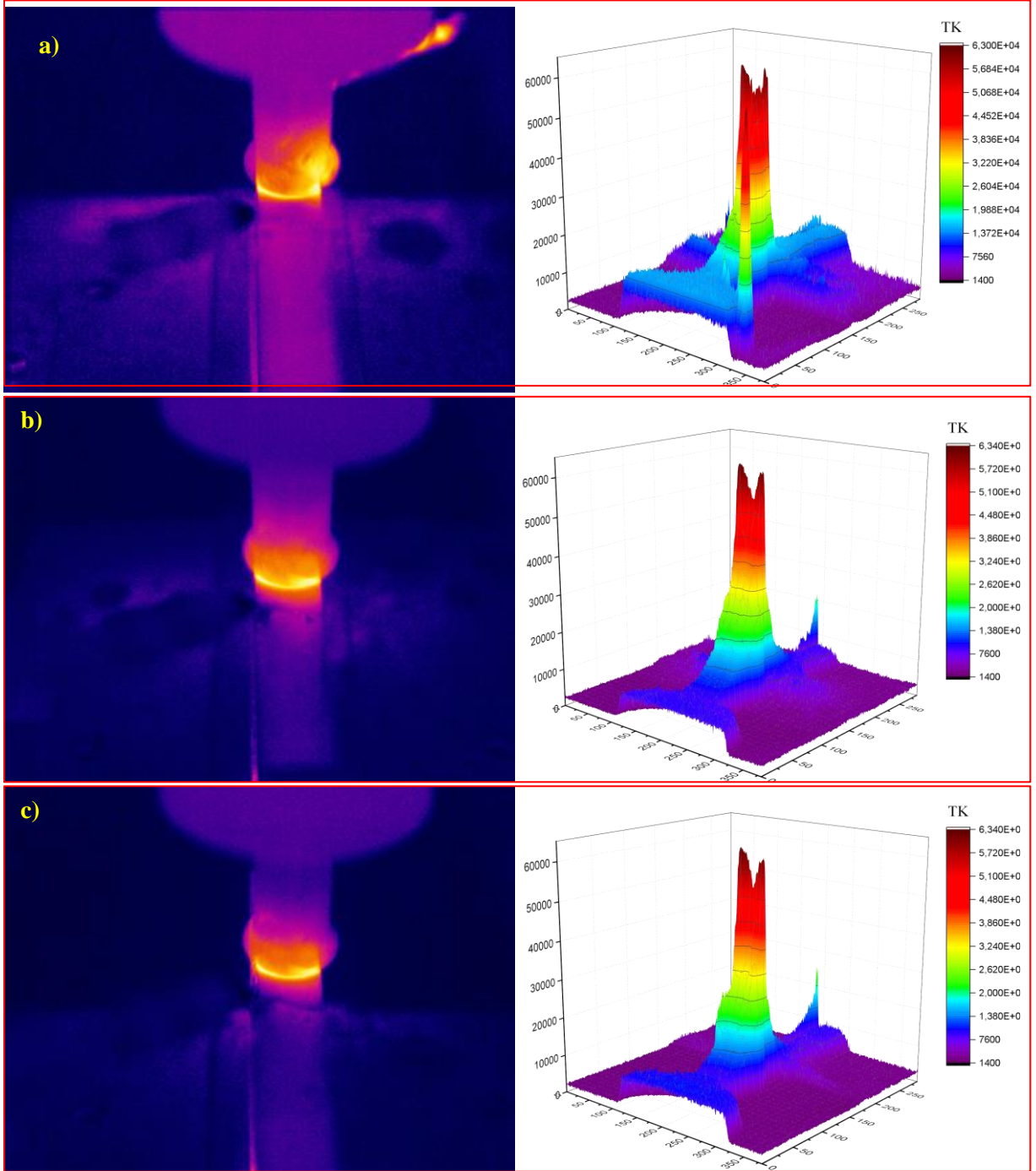
Şekil 4b'de püskürtme basıncı ile debinin ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini gösteren grafik incelendiğinde, yüksek basınçta sonuçların genelde olumlu olduğu, hatta en iyi sonucun en düşük debi ve en yüksek basınçta ortaya çıktığı görülmektedir. Düşük debide az miktarda kesme sıvısı olması ve bu sıvının yüksek basınç yardımıyla takım-iş parçası ara yüzeyine daha iyi nüfuz etmesi bu durumun temel sebebidir [18]. Grafik incelenmeye devam edildiğinde, yüksek basınç altında yapılan bütün deneylerde sonuçların olumlu olduğu görülmektedir. En kötü durum ise düşük debi düşük basınç altında ortaya çıkmıştır ki bu da beklenen bir durumdur. Şekil 5'te farklı işleme parametrelerinin ve bunlara ait kombinasyonların kesme sıcaklığı üzerindeki etkilerini gösteren ısı haritaları verilmiştir.



Şekil 5. İşleme faktörlerinin T_K üzerindeki etkisi (a) Debi-Nano partikül oranı (b) Debi-Basıncı

Şekil 5a'da kesme sıcaklığının debi ile kesme sıvısının içindeki nano karışım oranına bağlı olarak değişimine ait ısı haritası verilmiştir. Şekil incelendiğinde, nano karışım oranının sıfır olduğu MMY sistemi ile yapılan talaş kaldırma deneylerinde düşük debilerde kesme sıcaklığının yüksek çıktığı, debinin artması ile birlikte bir ısı düşüşü olduğu görülecektir. Ancak, kesme sıcaklığındaki asıl iyileşme kesme sıvısı içerisindeki nano karışım oranının artması ile olmuştur. Bu durumun nano partiküllerin içinde bulunduğu kesme sıvısının termal iletkenliğini artırması ve böylece ısıyı kesme bölgesinden daha çabuk tahliye etmesi ile açıklanabilir. Grafığe göre kesme sıvısının içine nano partikül katılması ile birlikte ısıda dramatik bir düşüş yaşanmıştır ve bu da bir önceki cümlede ortaya konulan iddiayı destekler niteliktedir.

Şekil 5b'de püskürtme basıncı ile debinin kesme sıcaklığı üzerindeki etkisini gösteren ısı haritası incelendiğinde, debi düşük olsa bile püskürtme basıncının yüksek olduğu durumda kesme sıcaklığının net bir şekilde düşmeye başladığı görülecektir. Bunun nedeni, püskürtme basıncının artması ile birlikte soğutma kabiliyetinin de artmasıdır. Kaldı ki, en yüksek kesme sıcaklığı en düşük debi ile en düşük püskürtme basıncının olduğu durumlarda ortaya çıkmıştır. Bu durum da bir önceki iddiayı destekler niteliktedir. Şekil 6'da farklı nano partikül katkı oranına sahip MMY sistemi ile talaş kaldırma esnasındaki termal kamera görüntüleri ve bunlara ait üç boyutlu sıcaklık değişim grafikleri verilmiştir. Ayrıca her şeklin sağ tarafında verilen grafikler de sıcaklık noktalarının dağılım durumlarını göstermek açısından destek niteliğinde eklenmiştir. Grafiklerde de görüldüğü gibi sıcaklık kesme noktasında zirveye çıkmakta ve kenarlara doğru azalmaktadır.



Şekil 6. Talaş kaldırma esnasındaki termal kamera görüntüleri (a) MMY-60 ml/saat-6 bar (b) 0,5 nanoMMY-40ml/saat-6bar (c) 1MMY-80 ml/saat-6 bar

Şekil 6'daki kamera görüntüleri nano partikülün sıcaklık seviyesine katkısını göstermek için verilmiştir. Deney tasarımı tam faktöriyel olmadığı için eşit bir değerlendirme yapılamamıştır ancak debi kesme sıcaklığı üzerinde daha en az etkili olduğu için (Tablo 8) sabit değer olarak püskürtme basıncı seçilmiştir ve böylece hata payı azaltılmıştır. Şekil 6 incelendiğinde, en yüksek kesme sıcaklığının katkısız MMY sisteminde ortaya çıktığı (Şekil 6a), katkı oranının artması ile birlikte kesme sıcaklığının da düştüğü görülmektedir.

B. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Deney tasarımında kullanılan kontrol faktörlerin birbiriyle olan etkileşimleri, performans karakteristiği üzerinde etkileri ve parametrelerin farklı seviyelerindeki performans karakteristiğindeki değişimlerin tespitinde varyans analizi kullanılmıştır [19]. Tablo 8'de yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı değerlerine ait ANOVA sonuçları verilmiştir. Tabloda P her bir değişkenin sonuçlar üzerindeki anlamlılık düzeyini gösterirken DF serbestlik derecesini, SS kareler toplamını, MS kareler ortalamasını, F değerleri ve PCR de işlenebilirlik üzerindeki yüzde etki oranlarını vermektedir [20].

Tablo 8. ANOVA tablosu

Faktörler	Serbestlik derecesi [DF]	Kareler top. [SS]	Kareler ort. [MS]	F değeri	P değeri	Etki oranı [PCR] (%)
Yüzey Pürüzlülüğü						
İşleme Koşulu	2	0,000362	0,000181	1,19	0,457	12,7
Debi	2	0,000035	0,000012	0,08	0,925	1,1
Basınç	2	0,002141	0,001070	7,03	0,125	75,5
Hata	2	0,000305	0,000152	-	-	10,7
Toplam	8	0,002832	-	-	-	100
Kesme Sıcaklığı						
İşleme Koşulu	3	2057,50	1028,75	691,47	0,01	93,0
Debi	3	11,00	5,50	3,70	0,213	0,5
Basınç	1	140,31	70,15	47,15	0,21	6,4
Hata	6	2,98	1,49	-	-	0,1
Toplam	15	2211,78	-	-	-	100

ANOVA sonuçlarına göre yüzey pürüzlülüğü üzerinde basınç (%75,5), işleme koşulu (%12,7) ve debi (%1,1) etki oranlarına sahiptir. Analiz hesaplanmasında oluşan hata %10,7 çıkmıştır. Kesme sıcaklığı için ise etki eden kontrol faktörleri sırasıyla; İşleme koşulu (%93,0), basınç (%6,4), ve debi (%0,5) etki oranlarına sahiptir. Analiz hesaplanmasında oluşan hata %0,1 çıkmıştır.

C. REGRESYON ANALİZİ

Regresyon analizi, bir bağımlı değişken ile bir veya daha fazla bağımsız değişken arasındaki bağlantıyı belirlemek için kullanılan istatistiksel bir yöntemdir [15]. Bu çalışmada, bağımsız değişkenler işleme koşulu (İK), debi (D) ve basınç (P) olurken bağımlı değişkenler ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kesme sıcaklığı (TK) olarak belirlenmiştir. Eşitlik 2 ve Eşitlik 3'te sırasıyla Ra ve TK için sadece ana faktörlerin değerlendirilmesi ile oluşturulan doğrusal denklemler verilmiştir;

$$Ra = 0,3780 - 0,00550*İK - 0,000008*D - 0,00758*P \quad (2)$$

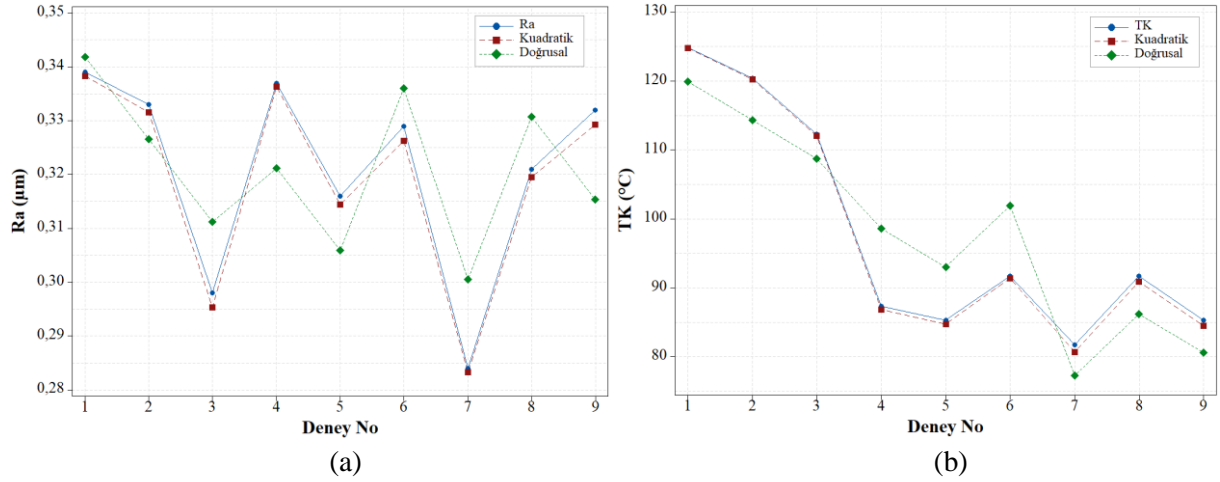
$$TK = 147,6 - 16,48*İK - 0,038*D - 2,42*P \quad (3)$$

Doğrusal denklem aracılığıyla elde edilen R² değerleri Ra ve TK için sırasıyla 0,552 ve 0,802 olarak bulunmuştur. Bu şekilde gerçek değerler ile tahmin değerleri arasındaki farklar fazla olacağından faktör etkileşimlerini de kapsayan kuadratik denklemlerin elde edilmesi gerekmektedir. Ra ve TK için oluşturulan kuadratik denklemler sırasıyla Eşitlik 4 ve Eşitlik 5'te verilmiştir;

$$Ra = 0,2720 + 0,001500*İK - 0,000908*D + 0,03717*P - 0,009500*İK^2 - 0,000005*D^2 - 0,003167*P^2 + 0,000683 İK*D - 0,001667 İK*P \quad (4)$$

$$T_K = 187,6 - 79,15*İK + 0,6308*D - 4,758*P + 14,62*İK^2 - 0,005875*D^2 + 0,1375*P^2 + 0,02833 İK*D + 0,4167 İK*P \quad (5)$$

Kuadratik denklemler aracılığıyla elde edilen R² değerleri Ra ve T_K için sırasıyla 0,991 ve 0,997 olarak bulunmuştur. Şekil 7’de gerçek değerler ile tahmin değerlerinin karşılaştırması verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi gerçek değerlere en yakın tahmin sonucu kuadratik denklemler ile elde edilen değerlerdir.



Şekil 7. Tahmin değerleri ile deney sonuçlarının karşılaştırılması (a) Ra (b) T_K

D. DOĞRULAMA DENEYLERİ

Deney sonuçlarının analizine göre en iyi yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığını veren parametre grubu sırasıyla A₃B₁C₃ ve A₃B₃C₃ şeklinde elde edilmiştir. Taguchi yönteminden faydalanılarak yapılan çalışmalarda optimum deney sonucu bazen yapılan deneylerde çıkarken bazen de deney tasarımının dışında kalan deneylerde çıkmaktadır. Dolayısıyla, optimum değerlerin hesaplanması optimizasyonun başarısının görülmesi açısından son derece önemlidir. Bu çalışmada, optimum yüzey pürüzlülüğünün hesaplanmasında Eşitlik 6 kullanılırken, optimum kesme sıcaklığının hesaplanmasında Eşitlik 7 kullanılmıştır;

$$Ra_{opt} = (A_3 - T_{Ra}) + (B_1 - T_{Ra}) + (C_3 - T_{Ra}) + T_{Ra} \quad (6)$$

$$T_{Kopt} = (A_3 - T_{T_K}) + (B_3 - T_{T_K}) + (C_3 - T_{T_K}) + T_{T_K} \quad (7)$$

Burada, (A₃, B₁, C₃) ve (A₃, B₃, C₃) sırasıyla yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının optimum seviyedeki ortalama değerlerini vermektedir. T_{Ra} ve T_{T_K} değerleri ise deneysel çalışma sonucu elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı değerlerini temsil etmektedir. Sonuç olarak, Ra_{opt} değeri 0,2893 µm olarak bulunurken T_{Kopt} 80,08 °C olarak bulunmuştur.

Optimizasyonun yeterli olup olmadığını kontrol etmek için aşağıdaki eşitlikler kullanılarak tahmini güven aralığı hesaplanmıştır [14].

$$CI = \sqrt{F_{\alpha,1,fe} \cdot V_e \cdot \left[\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{R} \right]} \quad (8)$$

Ve

$$n_{eff} = \frac{N}{1+T_{dof}}$$

(9)

Burada $F_{\alpha,1,fe}$ %95 güvenilirlik oranını, α önem seviyesini, fe 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. Değerlendirmeler sonucunda yüzey pürüzlülüğü için $F_{0.05,1,2}=18,51$ olurken kesme sıcaklığı için $F_{0.05,1,6}=5,987$ olarak bulunmuştur. V_e ; yüzey pürüzlülüğü için; 0,000152, kesme sıcaklığı için; 1,49 olarak bulunmuştur. $R=1$, $N=9$, T_{dof} yüzey pürüzlülüğü için 6, kesme sıcaklığı için 7 ve n_{eff} yüzey pürüzlülüğü için 1,29 bulunurken kesme sıcaklığı için 1,125 olarak bulunmuştur. Elde edilen değerler Eşitlik 8 ve Eşitlik 9'da yerine konularak yüzey pürüzlülüğü deneyleri için güven aralığı $CI_{Ra}=\pm 0,047$, kesme kuvveti için $CI_{TK}=\pm 4,11$ bulunmuştur. %95 güven aralığında tahmini yüzey pürüzlülüğü değeri Eşitlik 10, kesme sıcaklığı değeri Eşitlik 11 ile bulunmaktadır.

$$[Ra_{opt} - CI_{Ra}] < Ra_t < [Ra_{opt} + CI_{Ra}]$$

(10)

$$[TK_{opt} - CI_{TK}] < TK_t < [TK_{opt} + CI_{TK}]$$

(11)

Değerler yerine konulduğunda;

Yüzey pürüzlülüğü;

$$[0,2893 - 0,047] < 0,284 < [0,2893 + 0,047] = 0,2423 < 0,284 < 0,3363$$

Kesme sıcaklığı;

$$[80,08 - 4,11] < 82,1 < [80,08 + 4,11] = 75,97 < 82,1 < 84,19 \text{ şeklinde olur.}$$

Deneyssel olarak elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı değerleri güven aralığı sınırları içerisinde çıkmıştır. Böylece, sistem optimizasyonu Taguchi metodu kullanılarak 0,05 anlamlılık düzeyinde elde edilmiştir.

Kontrol faktörlerine ait doğrulama deneyi optimum seviye ve rastgele seçilen seviyelerle yapılmıştır. Tablo 9'da deney sonuçları ve regresyon denklemleri ile elde edilen tahmin değerlerine ait karşılaştırma verilmiştir. Tablo 9 incelendiğinde, elde edilen sonuçların yeterli olduğu ve optimizasyonunun başarılı olduğu söylenebilir.

Tablo 9. Doğrulama deneyi sonuçları

Seviyeler	Doğrusal denklem			Kuadratik denklem		
	Deneysel	Tahmin	Hata (%)	Deneysel	Tahmin	Hata (%)
Yüzey pürüzlülüğü						
A ₃ B ₁ C ₃ (Optimum)	0,284	0,301	5,99	0,284	0,283	0,35
A ₂ B ₂ C ₃ (Rasgele)	0,316	0,306	3,16	0,316	0,314	0,63
Kesme sıcaklığı						
A ₃ B ₃ C ₃ (Optimum)	82,1	75,76	7,72	82,1	82,13	0,04
A ₁ B ₁ C ₁ (Rasgele)	124,9	119,92	3,99	124,9	124,78	0,10

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada, AISI 316 östenitik paslanmaz çeliği farklı katkı oranlarına sahip MMY sistemi altında frezelenerek, yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı değerleri incelenmiştir. En uygun işleme şartlarının belirlenmesinde Taguchi yöntemi aracılığıyla yapılan optimizasyonun başarılı olduğu görülmüştür. Yapılan deneyler ve analizler sonucunda aşağıdaki çıktılar elde edilmiştir.

- AISI 316 paslanmaz çeliğinin farklı işleme parametreleri altında frezelenmesinde elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı değerleri faktörlerin etkileşimine bağlı olarak değişmiştir.
- Yüzey pürüzlülüğünde optimum parametre grubu hacimce %1 nano grafit içeren MMY sistemi, 40 ml/saat debi ve 8 bar basınç olurken kesme sıcaklığında optimum parametre grubu hacimce %1 nano grafit içeren MMY sistemi, 80 ml/saat debi ve 8 bar basınç olarak elde edilmiştir.
- Yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre basınç (%75,6), en etkisiz parametre ise debi (%1,1) olurken kesme sıcaklığı üzerinde en etkili parametre işleme koşulu (%93,0), en etkisiz parametre ise debi (%0,5) olmuştur.
- Geliştirilen kuadratik regresyon denklemleri gerçek değerler ile tahmin değerleri arasında büyük bir yakınlık göstermiştir (R_a ve T_k için sırasıyla 0,991 ve 0,997).
- CI sonuç ve değerlendirmelerine bağlı olarak optimizasyon başarılı olmuştur.
- Bitkisel esaslı kesme sıvısının için nano grafit katkısı hem yüzey pürüzlülüğü hem de kesme sıcaklığında işleme verimliliğini artırmıştır. Dahası, kesme sıvısının içindeki nano grafit oranı arttıkça hem yüzey pürüzlülüğü hem de kesme sıcaklığı değerleri düşmüştür.
- Basıncın artmasıyla kesme bölgesinden talaş ve ısı daha hızlı uzaklaştığı için yüzey kalitesinde de en önemli faktör basınç olmuştur.

V. KAYNAKLAR

- [1] 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. 1–2, pp. 1201–1208, 2013.
- [2] C. Maranhão and J. P. Davim, "Finite element modelling of machining of AISI 316 steel: numerical simulation and experimental validation," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 18, no. 2, pp. 139–156, 2010.
- [3] M. Kumar, P. K. Sood, and V. S. Sharma, "Optimization of machining parameters and cutting fluids during nano- fluid based minimum quantity lubrication turning of titanium alloy by using evolutionary techniques," *J. Clean. Prod.*, vol. 135, no. 1, pp. 1276–1288, 2016.
- [4] M. Amrita and S. A. Shariq, "Experimental investigation on application of emulsifier oil based nano cutting fluids in metal cutting process," *Procedia Eng.*, vol. 97, no. 1, pp. 115–124, 2014.
- [5] T. K. Nguyen, I. Do, and P. Know, "A tribological study of vegetable oil enhanced by nano-platelets and implication in MQL machining," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 13, no. 7, pp. 1077–1083, 2012.
- [6] D. Setti, S. Ghosh, and P. V. Rao, "Application of Nano Cutting Fluid under Minimum Quantity Lubrication (MQL) Technique to Improve Grinding of Ti – 6Al – 4V Alloy," vol. 6, no. 10, pp. 2107–2111, 2012.
- [7] A. Uysal, F. Demiren, and E. Altan, "Applying minimum quantity lubrication (MQL) method on milling of martensitic stainless steel by using nano Mos2 reinforced vegetable cutting fluid," *Procedia-Social Behav. Sci.*, vol. 195, no. 1, pp. 2742–2747, 2015.
- [8] İ. Çiftçi, "Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools," *Tribol. Int.*, vol. 39, no. 6, pp. 565–569, 2006.
- [9] Y. Muthusamy, K. Kadirgama, M. M. Rahman, D. Ramasamy, and K. V. Sharma, "Wear analysis when machining AISI 304 with ethylene glycol/TiO₂ nanoparticle-based coolant.," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 82, no. 1–4, pp. 327–340, 2016.
- [10] E. Altinkaya and A. Güllü, "AISI 316 Östenitik Paslanmaz Çeliğin İşlenmesinde Kesme Hızının ve Takım Kaplamasının Takım Aşınmasına Etkileri," *Politek. Derg.*, vol. 11, no. 3, pp. 243–247, 2008.
- [11] M. M. S. Prasad and R. R. Srikant, "Performance evaluation of nano graphite inclusions in cutting fluids with MQL technique in turning of AISI 1040 steel," *Int. J. Res. Eng. Technol.*, vol. 2, no. 11, pp. 381–393, 2013.
- [12] M. Amrita, R. R. Srikant, and A. V. Sitaramaraju, "Performance Evaluation of Nanographite-Based Cutting Fluid in Machining Process Performance Evaluation of Nanographite-Based Cutting Fluid in Machining Process," *Mater. Manuf. Process.*, vol. 29, no. 5, pp. 600–605, 2014.
- [13] M. Hadi and R. Atefi, "Effect of Minimum Quantity Lubrication with Gamma-Al₂O₃ Nanoparticles on Surface Roughness in Milling AISI D3 Steel," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 3, pp. 130–135, 2015.
- [14] T. Kivak, "Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts," *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 50, no.

1, pp. 19–28, 2014.

- [15] F. Kara and B. Öztürk, “Comparison and optimization of PVD and CVD method on surface roughness and flank wear in hard-machining of DIN 1.2738 mold steel,” *Sens. Rev.*, 2018.
- [16] D. Fratila and C. Caizar, “Investigation of the influence of process parameters and cooling method on the surface quality of AISI-1045 during turning,” *Mater. Manuf. Process.*, vol. 27, no. 10, pp. 1123–1128, 2010.
- [17] A. Kumar, R. Kumar, A. Rai, and A. Kumar, “Characterization and experimental investigation of Al₂O₃ nanoparticle based cutting fluid in turning of AISI 1040 steel under minimum quantity lubrication (MQL),” *Mater. Today Proc.*, vol. 3, no. 6, pp. 1899–1906, 2016.
- [18] M. H. Sadeghi, M. J. Haddad, T. Tawakoli, and M. Emami, “Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti–6Al–4V titanium alloy,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 44, no. 5–6, pp. 487–500, 2009.
- [19] E. Şirin, Ş. Şirin, Y. Turgut, and İ. Korkut, “Optimization of Surface Roughness Using the Taguchi Method in Milling of AISI D2 Cold Work Tool Steel,” *Düzce Univ. J. Sci. Technol.*, vol. 3, pp. 132–144, 2015.
- [20] M. Günay and E. Yücel, “Application of Taguchi method for determining optimum surface roughness in turning of high-alloy white cast iron,” *Measurement*, vol. 46, no. 2, pp. 913–919, 2013.