

AA2024 Alaşımının Tornalanmasında Nanoakışkan Konsantrasyon Oranı ve MMY Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi

Ayşegül YÜCEL¹, Çağrı Vakkas YILDIRIM^{2,*}

¹Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri, Türkiye

²Erciyes Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Kayseri, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 12.11.2020

Kabul: 17.12.2020

Anahtar Kelimeler:

AA 2024 T3

Nanoakışkan

Molibden disülfür

Yüzey pürüzlülüğü

Kesme sıcaklığı

ÖZET

Kesme sıvıları, talaş kaldırma esnasında soğutma, yağlama ve talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırma gibi çok önemli görevleri yerine getirmektedirler. Ancak, toksik olmaları nedeniyle çevre ve çalışan sağlığı için ciddi bir tehdit oluşturmaktadırlar. Dolayısıyla, işleme verimliliği üzerindeki etkisini azaltmadan klasik kesme sıvısı miktarının azaltılması oldukça önemlidir. Son dönemde bu amaca uygun olarak bazı alternatifler ortaya çıkmıştır. Bu alternatiflerden biri de MMY sistemidir. Ancak, MMY sistemi kendi içerisinde birçok parametreyi barındırmaktadır. Dahası, hafif ve orta ağırlıktaki talaş kaldırma operasyonlarında oldukça etkin olan bu sistemin ağır işleme koşullarındaki etkinliği de artırılmalıdır. Bu çalışmada, debi ve basınç gibi MMY parametreleriyle beraber nano katkı maddesi konsantrasyon oranının MMY sisteminin gelişmesi noktasındaki etkisinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç için üç farklı debi (40, 70 ve 100 ml/s), üç farklı basınç (4, 6 ve 8 bar) ve üç farklı nano katkı maddesi konsantrasyon oranı (hacimce %0.2, %0.6 ve %1.0) kullanılarak bir dizi deney yapılmıştır. Deney tasarımında Taguchi L₉ dikey dizini tercih edilmiştir. Faktörlerin sonuç üzerindeki etkisini göstermek için ANOVA analizi yapılmıştır. Ayrıca gelecekteki benzer çalışmalara yardımcı olması açısından regresyon analizi yapılmış ve tahmin modelleri oluşturulmuştur. Deney sonuçlarına göre ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için optimum sonucu 100 ml/s debi, 8 bar basınç ve %0.6 konsantrasyon oranı kombinasyonu vermiştir.

The Effect of Nanofluid Concentration Ratio and MQL Parameters on Surface Roughness and Cutting Temperature in Turning of AA2024 Alloy

ARTICLE INFO

Received: 12.11.2020

Accepted: 17.12.2020

Keywords:

AA 2024 T3

Nanofluid

Molybdenum disulfide

Surface roughness

Cutting temperature

ABSTRACT

Cutting fluids perform very important tasks during chip removal, such as cooling, lubrication and removing the chip from the cutting zone. However, because cutting fluids are toxic, they pose a serious threat to the environment and employee health. Therefore, it is very important that is reduced the amount of classical coolant without reducing its impact on machining efficiency. Recently, some alternatives have emerged in accordance with this purpose. One of these alternatives is the MQL system. However, the MQL system contains many parameters in itself. Moreover, the effectiveness of this system, which is highly effective in light and medium-weight chip removal operations, should also be increased in heavy processing conditions. In this study, it was aimed to investigate the effect of MQL parameters such as flow rate and pressure as well as the nano additive concentration ratio on the development of the MQL system. For this purpose, a series of experiments were conducted using three different flow rates (40, 70 and 100 ml/s), three different pressures (4, 6 and 8 bar) and three different concentration rates of nano additives (0.2%, 0.6% and 1.0% by volume). Taguchi L₉ vertical sequence was preferred in the experimental design. ANOVA analysis was performed to show the effect of factors on the result. In addition, regression analysis was performed and prediction models were created to help similar studies in the future. According to the results of the experiment, the combination of 100 ml/s flow rate, 8 bar pressure and 0.6% concentration ratio gave the optimum result for average surface roughness and cutting temperature.

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

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bir malzemenin havacılık ve uzay uygulamalarında tercih edilebilmesi için düşük yapısal ağırlık, yüksek hasar toleransı ve yüksek dayanıklılık gereksinimlerini karşılaması gerekir. Bunun için de malzemenin yüksek kırılma tokluğu, yüksek yorulma performansı, yüksek şekillendirilebilirlik ve süperplastiklik gibi çok önemli özelliklere sahip olması gerekir [1]. Alüminyum alaşımları, bu özelliklerin çoğunu barındırması nedeniyle hava ve uzay araçlarının gövde veya kanat gibi bölgelerinde yoğun talep görmektedir. Bunun en büyük nedeni de mukavemet/ağırlık oranının yüksek olmasıdır. Bir başka deyişle, düşük ağırlığı ve gösterdiği yüksek mukavemet özellikleri ile uçak üreticileri için cezbedici bir malzemedir. Örneğin, yoğunluğu çeliğin yaklaşık üçte birine tekabül ederken yüksek yorulma direnci ve mükemmel seviyede tokluk gösterirler [2]. Ayrıca, havadaki oksijenle reaksiyona giren alüminyum, pasif bir alüminyum oksit tabakası oluşturur ve böylece yüksek bir korozyon direncine sahip olur. Ana alaşım elementi bakır olan 2xxx serisi alüminyum alaşımları da, bu genel özellikleri yüksek oranda barındırırlar ve bu nedenle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Buna karşın, alüminyum alaşımların işlenmesi esnasında talaş sürekli, oldukça kalındır ve kolay kırılmamaktadır. Bu durum, alüminyum alaşımlarının talaş kaldırma yöntemiyle şekillendirilmesi sırasında büyük problemlere neden olmaktadır. Dahası, malzemenin sünek olması nedeniyle talaş kesici takıma yapışmakta ve işleme verimliliğini oldukça düşürmektedir [3]. Bütün bu nedenlerden dolayı alüminyum alaşımlarından talaş kaldırılması esnasında çıkan talaşın kesme bölgesinden çok çabuk uzaklaştırılması işleme verimliliği açısından oldukça önemlidir. Talaş kesme bölgesinden uzaklaştırmak için başvurulan yöntemlerin en bilinenlerinden biri de kesme sıvısı kullanımınıdır.

Kesme sıvıları, talaş kaldırma operasyonlarında soğutma, yağlama ve talaş kesme bölgesinden uzaklaştırma gibi işleme verimliliği için önemli olan temel görevleri yerine getirmektedirler. Buna karşın, kesme sıvıları toksiktir ve doğa ve insan sağlığı için tehlikelidir. Bu nedenle kullanılan kesme sıvılarının azaltılması gereklidir. Bunun için günümüzde birçok ülke sıkı bir mevzuatı yürürlüğe koymuştur veya koymak üzeredir [4]. Talaşlı imalat proseslerinde kullanılan kesme sıvısını azaltmak için ya kuru işleme yapılmalı ya da kuru işlemeye yakın alternatifler artırılmalıdır. Günümüzde araştırmacılar alternatif geliştirmek için yoğun çaba harcarken mevcut alternatiflerden birisi de Minimum Miktarla Yağlama (MMY) sistemidir. MMY sistemi, kesme bölgesine çok az miktarda yağlayıcı maddenin yüksek hassasiyetle uygulandığı bir soğutma/yağlama tekniğidir. Geleneksel kesme sıvısı kullanımı ile karşılaştırıldığında kullanılan kesme yağı oranı 1/10000 seviyesindedir [5]. Bu da MMY sistemini çevre ve çalışan dostu bir soğutma/yağlama yöntemi haline getirmektedir. Ancak, kullanılan yağ tipi, basınç, debi, püskürtme açısı, püskürtme mesafesi, nozul tipi, vb. gibi birçok parametre MMY sisteminin etkinliğini etkilemektedir ve bu parametrelerin optimize edilmesi önemlidir. Yıldırım ve ark. [6] yaptıkları çalışmada Waspaloy süper alaşımını frezelerken kesme yağı, nozul tipi, debi, püskürtme mesafesi ve püskürtme yönü gibi parametreleri kullanmış ve farklı MMY parametrelerinin optimizasyonunu yapmıştır. Yine bir başka çalışmada Liu ve ark. [7] Ti-6Al-4V malzemesini frezelerken basınç, debi ve nozul pozisyonu gibi MMY parametrelerinin optimizasyonunu yapmıştır. Bütün bunların yanında, kesmenin zor olduğu, kesme sıcaklığının yüksek olduğu veya talaşın kesiciye yapışma eğilimi gösterdiği talaş kaldırma işlemlerinde soğutma özelliğinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu geliştirme işlemi için uygulanan yöntemlerin başında ise kesme sıvısının içerisine nano katkı maddelerinin katıldığı nanoMMY sistemi gelmektedir.

Nano kesme sıvısı ya da nanoakışkan olarak da bilinen nanoMMY yöntemi, baz kesme sıvısının içerisine nano boyutta (<100 nm) parçacıklar eklenerek MMY sisteminde kullanılan kesme sıvısının ısı transfer ve tribolojik özelliklerini artırma işlemidir. Böylece, kesme sıvısının hem yağlama hem de soğutma yetenekleri artırılmaktadır. NanoMMY çalışmalarında başta titanyum dioksit (TiO₂), fulleren (C₆₀), karbon nano tüp (CNT), alüminyum oksit (Al₂O₃), molibden disülfür (MoS₂), silisyum dioksit (SiO₂), hegzagonal bor nitrür (hBN) ve elmas olmak üzere birçok katkı maddesi kullanılmaktadır [8]. NanoMMY sisteminin talaş kaldırma operasyonları üzerindeki olumlu etkisi birçok araştırmacının dikkatini çekmiş ve üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. Örneğin, Yıldırım ve ark. [9] Inconel 625 alaşımını tornalarken kesme parametrelerinin yanında kuru, saf MMY ve iki farklı konsantrasyon oranında (hacimce %0,5 ve %1) hBN katılı MMY sisteminin takım

ömürü/aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarının analizini yapan araştırmacılar nanoMMY sisteminin daha iyi sonuçlar verdiğini iddia etmişlerdir. Talib ve Rahim [10], farklı oranlardaki (%0, %0.05, %0.1 ve %0.5) hBN katı yağlayıcıyı üç farklı kesme sıvısının içerisine katarak nano yağlayıcıların performansına dair deneysel bir çalışma yapmışlardır. Katkisiz kesme sıvısı olarak modifiye edilmiş jatropha oils kullanan araştırmacılar, deneyler esnasında AISI 1045 çeliğini tornalamışlardır. Sonuçlar, %0.05 oranında nano partikül içeren MJO5a kesme sıvısının daha iyi bir işleme performansı sunduğunu göstermiştir. Bir başka çalışmada Şirin ve Kıvak [11] Inconel X-750 malzemesini frezelerken farklı oranlardaki (%0.25, %0.50, %0.75 ve %1.00) hBN, MoS₂ ve grafit katkılı nanoMMY sistemini saf MMY ile karşılaştırmışlardır. Deneyler sonunda araştırmacılar %0,50 konsantrasyon oranına sahip hBN katkılı sistemin diğer opsiyonlara göre daha iyi sonuçlar verdiğini söylemişlerdir. Marques ve ark. [12] Inconel 718'i tornalarken kuru, saf MMY ve farklı iki nano katkılı kesme sıvılarını kıyaslamışlardır. Katkı maddesi olarak MoS₂ ve grafit kullanan araştırmacılar, MoS₂ katkılı nano kesme sıvısının daha iyi sonuç verdiğini iddia etmişlerdir. Duc ve ark. [13] yaptıkları çalışmada, 90CrSi çeliğini sert tornalarken emülsiyon ve soya yağı temelli kesme sıvılarının içerisine farklı oranlarda (ağırlıkça %1 ve %3) Al₂O₃ ve MoS₂ katkı maddelerini eklemişler ve soğutma/yağlama yönteminin işleme performansı üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Deney sonuçlarının analizini yapan araştırmacılar ağırlıklı olarak soya yağı temelli kesme sıvısının içerisine %3 oranında katılan MoS₂'nin daha iyi sonuç verdiğini söylemişlerdir.

Bu çalışma özelinde yapılan literatür taramasının bazı örnekleri yukarıda paylaşılmıştır. Bu örneklerde de görüldüğü gibi nano katkılı MMY sistemi kuru ve saf MMY sistemine göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Ancak, literatür taraması yapılırken nano katkılı MMY sisteminin ya farklı kesme parametreleriyle ya da diğer soğutma/yağlama yöntemleriyle kıyaslandığı tespit edilmiştir. MMY parametrelerinin kendi içinde kıyaslama yapıldığı çalışmaların ise çok sınırlı kaldığı görülmüştür. Bu yönde yapılacak bir çalışmanın sürdürülebilir imalat açısından literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Bu nedenle, üç farklı debi, üç farklı püskürtme basıncı ve üç farklı katkı maddesi konsantrasyon oranının birbiriyle kıyaslandığı bu çalışma yapılmıştır. Deney çıktısı olarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı seçilmiştir. Deney tasarımı için Taguchi L₉ (3³) dikey dizini tercih edilmiştir. Performans göstergeleri olarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı seçilmiştir. Çalışmaya ait deneysel hazırlık süreci, deney sonuçlarının analizi ve sonuçlara ait değerlendirmeler aşağıda bölümler halinde verilmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. İşparçası, Tezgâh ve Takım Özellikleri (Workpiece, Machine and Tool Properties)

Bu çalışmada, iş parçası malzemesi olarak çapı 65 mm ve boyu 270 mm olan AA 2024 T3 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. İş parçası malzemesine ait kimyasal bileşim Tablo 1'de verilirken mekanik özellikleri Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 1. AA 2024 T3 alüminyum alaşımına ait kimyasal bileşim (Chemical composition of AA 2024 T3 aluminum alloy) (%)

Si	Cu	Mg	Mn	Fe	Ti	Zn	Ni	Al
0.294	4.43	1.47	0.452	0.344	0.062	0.166	0.018	Kalan

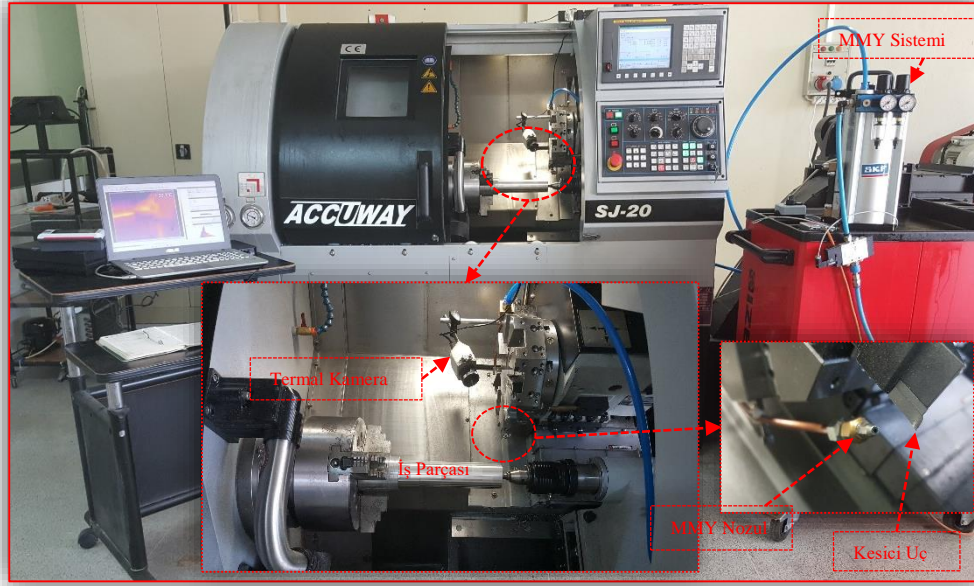
Tablo 2. AA 2024 T3 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri (Mechanical properties of AA 2024 T3 aluminum alloy)

Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
0.294	4.43	1.47	0.452

Talaş kaldırma deneyleri esnasında TaeguTec firması tarafından üretilen 35° uç açısına ve 0.4 mm uç radyüsüne sahip, pozitif eğimli, kaplamasız, VCGT 160404 FL kodlu sementit karbür uçlar

kullanılmıştır. Kullanılan bu kesici uçlar torna tezgâhına bağlanırken yine TaeguTec firması tarafından üretilen SVJCR 2525 M16 kodlu takım tutucu kullanılmıştır.

Talaş kaldırma deneyleri Düzce Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği CNC laboratuvarında yer alan ACCUWAY marka ve JT-150 model CNC torna tezgâhı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Deneyler esnasında kullanılan deney setine ait görüntü Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. CNC torna ve deneysel ekipmanlar (CNC lathe and experimental equipment)





2.2. MMY Sistemi ve Nanoakışkanın Hazırlanması (MQL System and Preparation of the Nanofluids)

Tornalama deneyleri esnasından SKF firmasına ait Vario modeli MMY sistemi kullanılmıştır. Kesme yağı olarak yine SKF firması tarafından üretilen mineral esaslı kesme yağı (viskozite 20°C; 14 cSt, yoğunluk 20°C; 0.930 g/mL, parlama noktası; 180°C) tercih edilmiştir. MMY parametresi olarak; 2 mm nozul çapı, 30 mm püskürtme mesafesi ve 30° püskürtme açısı seçilmiş ve kesme sıvısı dışarıdan uygulanmıştır. Püskürtme işlemi takımın üzerinden tam kesme noktasına olacak şekilde ayarlanmıştır. MMY parametrelerinin seçiminde ön deneyler ve literatür bilgisinden faydalanılmıştır.

Çalışma esnasında nano katkı maddesi olarak MoS₂ kullanılmıştır. Kullanılan MoS₂'ye ait teknik özellikler Tablo 3'te verilmiştir. Nanoakışkanın elde edilebilmesi için iki adımlı karıştırma prosesi kullanılmıştır. Buna göre, MoS₂ daha önceden ön deneyler aracılığıyla belirlenen oranlarda mineral kesme yağının içerisine katılmış ve bir dizi karıştırma prosesine tabi tutulmuştur. Karıştırma prosesine göre mineral kesme yağının içerisine katılan nano partiküller ilk olarak DAIHAN marka ve HS-100D modelindeki mekanik karıştırıcı kullanılarak 60 dakika boyunca 1000 dev/dak ile karıştırılmıştır. Daha sonra, TERMAL marka ve N11150M modelindeki manyetik karıştırıcı kullanılarak 1500 dev/dak devir sayısı ile 60 dakika boyunca karıştırılmıştır. Böylece nano katkı maddelerinin mineral kesme yağı içerisinde homojen olarak dağılması sağlanmıştır. Karıştırma prosesi Şekil 2’de gösterilmiştir. Bu karıştırma prosesi sonucunda elde edilen karışımlar herhangi bir çökme durumuna karşı bekletilmeden kullanılmıştır.

Tablo 3. MoS₂'ye ait teknik özellikler (Technical properties of MoS₂)

Boyut (mm)	Safılık (%)	Yoğunluk (g/cm ³)	Şekil	Görünüş
80	99.90	4.80	Katmanlı	Siyah

1. Adım	2. Adım	3. Adım	4. Adım
			
a)	b)	c)	d)

Şekil 2. Nanoakışkan hazırlama prosesi a) nano katkı maddesi ekleme, b) mekanik karıştırma, c) manyetik karıştırma, d) nanoakışkan (Nanofluid preparation process, a) adding nano additives, b) mechanical mixing, c) magnetic mixing, d) nanofluid)

2.3. Ölçümler (Measurements)

Bu çalışmada, talaş kaldırma sonrasında, yüzey pürüzlülük değerini belirlemek için ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) ana ölçüm parametresi olarak kabul edilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde markası MAHR olan ve modeli MarSurf PS 10 olan portatif yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Ortalama yüzey pürüzlülük ölçümleri esnasında ölçme uzunluğu 4 mm ve örnekleme uzunluğu $0.08 \mu\text{m}$ olarak alınmıştır. Talaş kaldırma deneyi bittikten sonra iş parçası saat yönünde döndürülmüş ve dört farklı bölgeden ölçüm değerleri alınmıştır. Daha sonra bu değerlerin ortalaması alınarak ortalama yüzey pürüzlülüğü ($R_{a_{ort}}$) elde edilmiştir. Her deney için daha önce kullanılmamış bir kesici uç kullanılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı her deney öncesi kalibrasyon bloklarıyla kalibre edilmiştir. Ayrıca, yüzeylerin oksitlenerek ölçüm sonuçlarını etkilemesinden kaçınmak için ölçümler talaş kaldırma işleminin hemen sonrasında, bekletilmeden yapılmıştır.

Maksimum kesme sıcaklığını belirlemek için gerçek zamanlı ölçüm yapan ve termografik görüntüleme sağlayan kızılötesi OPTRIS markasının PI 450 model termal kamerası kullanılmıştır. Talaş kaldırma esnasında aktif hale getirilen kameranın ölçüm aralığı $0-900 \text{ }^\circ\text{C}$ 'lik aralıktaki sıcaklığı ölçebilecek şekilde ayarlanmıştır. Kamera, 80 Hz anlık görüntü almakta ve 382×288 piksel optik çözünürlüğe sahiptir. Termal kamera 250 mm mesafeden kesme alanını tam karşıdan görebilecek ve talaş sıçramasından etkilenmeyecek şekilde konumlandırılmıştır. Optik kamera aracılığıyla elde edilen anlık görüntüleri anlamlandırmak için Optris PI Connect yazılımı kullanılmıştır.

2.3. Deneysel Tasarım (Experimental Design)

Tornalama deneyleri esnasında konsantrasyon oranı, debi ve basınç işleme parametreleri olarak seçilmiştir. İşleme parametrelerine ait seviyeler belirlenirken literatür bilgisi, üretici kataloğu ve ön deneylerden faydalanılmıştır. İşleme parametreleri ve bunlara ait seviyeler Tablo 4'te verilmiştir. Bu çalışmanın amacı katkı maddesi konsantrasyon oranı ve bazı MMY parametrelerinin etkinliğini belirlemek olduğundan deneyler boyunca kesme hızı (400 m/dak), ilerleme (0.2 mm/dev) ve talaş derinliği (1 mm) sabit tutulmuştur.

Tablo 4. Kontrol faktörleri ve seviyeleri (Control factors and their levels)

Kontrol Faktörleri	Sembol	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Konsantrasyon Oranı (% hacimce)	A	0.2	0.6	1.0
Debi (ml/saat)	B	40	70	100
Basınç (Bar)	C	4	6	8

Deneyel çalışmalarda performans karakteristikleri olarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı seçilmiştir. 3 faktör ve 3 seviyeli deney tasarımı için Taguchinin L_9 dikey dizini kullanılmıştır. Taguchi yönteminde, deneysel sonuçlar ayrıca bir sinyal/gürültü (S/N) oranına dönüştürülmektedir. Burada, sinyal (S) üretim sürecinin tasarımında kararlılık için en iyi koşulları seçmek için kullanılırken, gürültü (N) varyasyona neden olan tüm faktörleri temsil etmektedir. Özelliklerin türüne bağlı olarak çeşitli S/N oranları bulunmaktadır. Bunlar, “en yüksek en iyi”, “en düşük en iyi” ve “nominal en iyi” şeklindedir. Hangi seçeneğin kullanılacağı istenen performans karakteristiğinin durumuna bağlı olarak değişmektedir. Örneğin bu çalışmada, yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığında en düşük değer istendiğinden “en düşük en iyi” seçilmiştir ve Formül 1’e göre hesaplanmıştır [14]. Burada y performans karakteristiğine ait sonuçları gösterirken n deney sayısını temsil etmektedir.

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

3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI (EXPERIMENT AND OPTIMIZATION RESULTS)

3.1. S/N Oranlarının Analizi (Analysis of S/N Ratios)

Deneyler sonucunda bulunan ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) ve kesme sıcaklığı (T) değerleri ve bunlara ait S/N oranları Tablo 5’te sunulmuştur. Tabloya göre ortalama yüzey pürüzlülüğü değerlerinin ortalaması 3.2352 μm çıkarken ortalama yüzey pürüzlülüğüne ait S/N oranlarının ortalaması -10.194 dB çıkmıştır. Yine tabloya göre ortalama kesme sıcaklığı değeri 143.31 $^{\circ}\text{C}$ çıkarken kesme sıcaklıklarına ait S/N oranlarının ortalaması değeri -43.149 dB olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Tablo 6’da deney sonuçları için S/N yanıt tablosu verilmiştir.

Tablo 5. Deney tasarımı, sonuçlar ve S/N oranları (Experimental design, results and S/N ratios)

Deney No	Debi (ml/s)	Basınç (bar)	K.O.*	Ra (μm)	S/N Oranı	T ($^{\circ}\text{C}$)	S/N Oranı
1	40	4	0.2	3.446	-10.746	168.2	-44.517
2	40	6	0.6	3.233	-10.192	142.3	-43.064
3	40	8	1.0	3.191	-10.079	140.7	-42.966
4	70	4	0.6	3.272	-10.296	144.6	-43.203
5	70	6	1.0	3.255	-10.251	142.8	-43.095
6	70	8	0.2	3.254	-10.248	143.4	-43.131
7	100	4	1.0	3.234	-10.195	138.4	-42.823
8	100	6	0.2	3.138	-9.933	136.3	-42.690
9	100	8	0.6	3.094	-9.810	133.1	-42.848

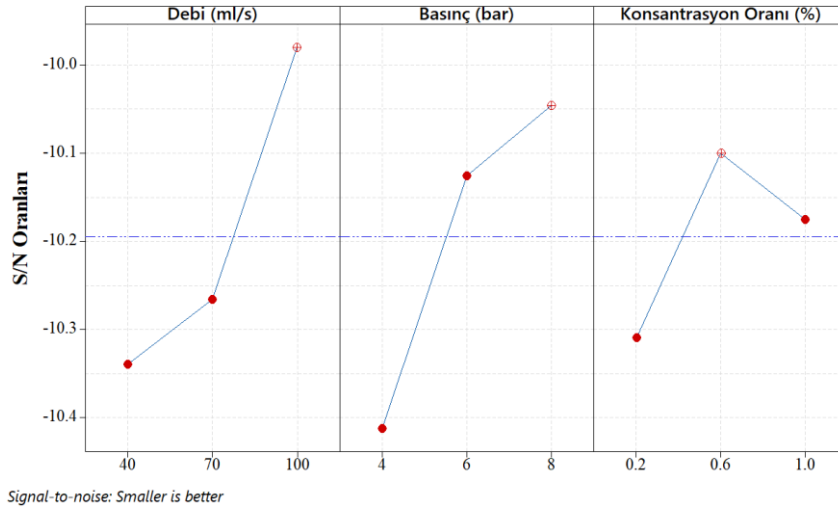
*Konsantrasyon oranı

Tablo 6. S/N yanıt tablosu (S/N response table)

Seviyeler	Yüzey Pürüzlülüğü Kontrol Faktörleri			Kesme Sıcaklığı Kontrol Faktörleri		
	Debi	Basınç	K.O.	Debi	Basınç	K.O.

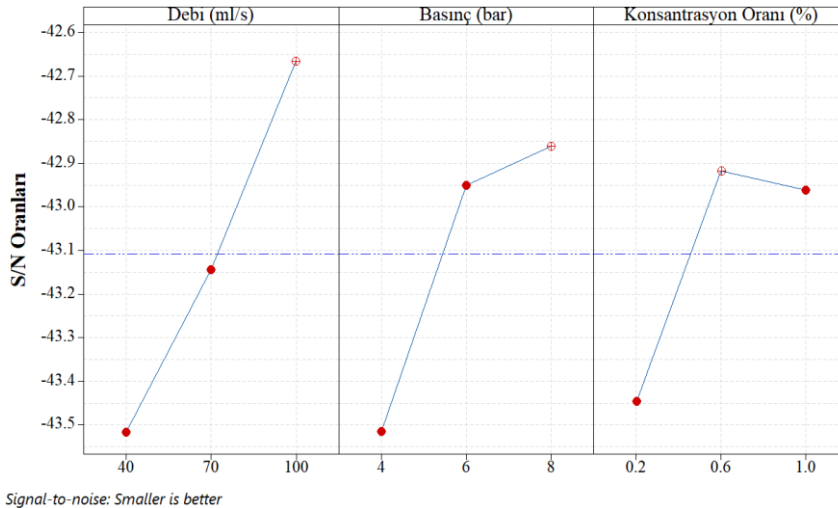
Seviye 1	-10.399	-10.412	-10.309	-43.52	-43.51	-43.45
Seviye 2	-10.265	-10.125	-10.100	-43.14	-42.95	-42.92
Seviye 3	-9.979	-10.046	-10.175	-42.67	-42.86	-42.96
Delta	0.360	0.370	0.210	0.85	0.65	0.53

Şekil 3'te ortalama yüzey pürüzlülüğü için S/N oranları ana etki grafiği görülmektedir. Bu grafiğe göre en üstte yer alan nokta o faktörün optimum seviyesini işaret etmektedir. Buna göre, 1. faktör için optimum S/N oranı -9.979 dB olurken bu durum debi açısından en iyi sonucu 100 ml/s seviyesinin verdiğini göstermektedir. 2. faktör için optimum S/N oranı -10.046 dB olurken bu durum basınç açısından en iyi sonucu 8 bar seviyesinin verdiğini belirtmektedir. 3. ve son faktör için en iyi S/N oranı -10.100 dB olurken bu durum konsantrasyon oranını açısından en iyi oranı hacimce %0.6 oranındaki karışımın verdiğini görülmektedir. Bir başka deyişle, en iyi ortalama yüzey pürüzlülüğü sonucunu 100 ml/s debi, 8 bar basınç ve %0.6 konsantrasyon oranı vermiştir.



Şekil 3. Ra için işleme koşullarının S/N oranına etkisi (effect of machining conditions on S/N ratio for Ra)

Şekil 4'te kesme sıcaklığı için S/N oranları ana etki grafiği görülmektedir. Buna göre, 1. faktör için optimum S/N oranı -42.67 dB olurken bu durum debi açısından en iyi sonucu 100 ml/s seviyesinin verdiğini göstermektedir. 2. faktör için optimum S/N oranı -42.86 dB olurken bu durum basınç açısından en iyi sonucu 8 bar seviyesinin verdiğini belirtmektedir. 3. ve son faktör için en iyi S/N oranı -42.92 dB olurken bu durum konsantrasyon oranını açısından en iyi oranı hacimce %0.6 oranındaki karışımın verdiğini görülmektedir. Bir başka deyişle, kesme sıcaklığı açısından en iyi sonucu 100 ml/s debi, 8 bar basınç ve %0.6 konsantrasyon oranı vermiştir.

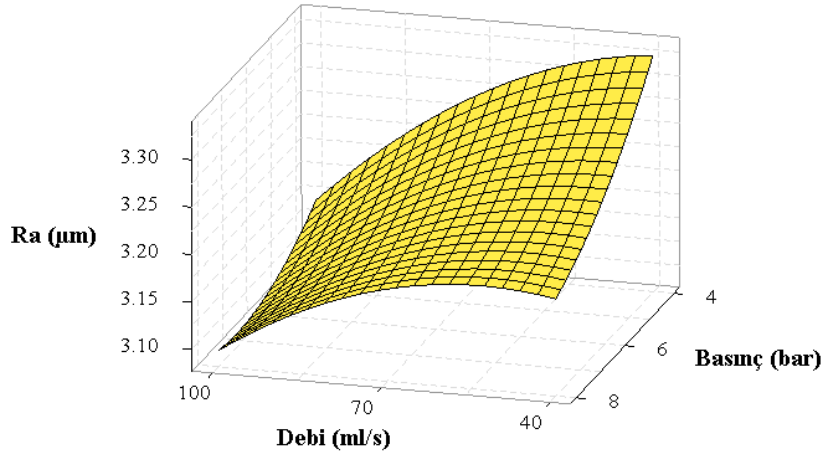


Şekil 4. T için işleme koşullarının S/N oranına etkisi (effect of machining conditions on S/N ratio for T)

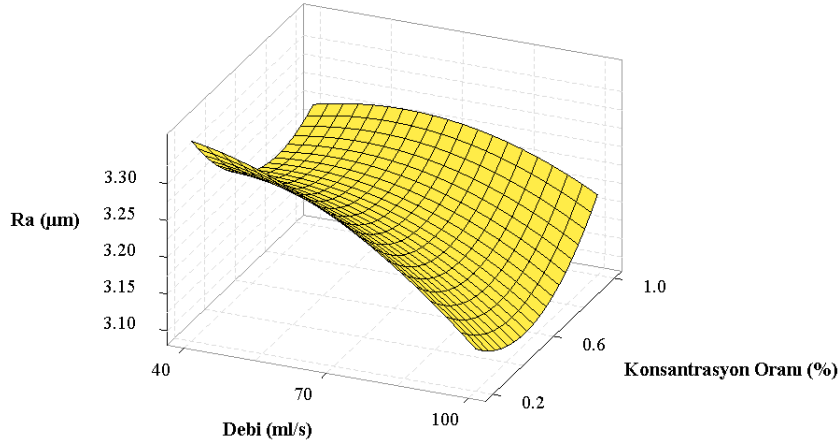
3.2. Bulguların Tartışılması (Discussion of findings)

Tornalama deneylerinde elde edilen ortalama yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına ait 3D yüzey grafikleri Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde, debinin artması ile birlikte Ra değerinin düştüğü görülmektedir. Debi açısından en yüksek Ra değeri 40 ml/s debi ile elde edilirken en küçük Ra değeri 100 ml/s debi ile elde edilmiştir. Debiye bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğünün değişimi oransal olarak incelendiğinde 40 ml/s debi ile yapılan deneylerde Ra değeri ortalama 3.290 μm çıkarken 70 ml/s debide 3.260 μm çıkmıştır. Bir başka deyişle, 40ml/s debi referans alındığında Ra değeri 70 ml/s ve 100 ml/s debilerde sırasıyla %0.92 ve %4.1 oranında iyileşme göstermiştir. Bu durum, debinin artmasıyla birlikte kesme bölgesine daha çok kesme yağı gönderilmesiyle ilişkilendirilmiştir. Kesme bölgesine daha fazla kesme yağının ulaşmasıyla birlikte takım-talaş ara yüzeyinde daha iyi bir film tabakasının oluştuğu ve film tabakasının kalınlaşması ile birlikte sürtünmenin azaldığı düşünülmektedir. Takım-talaş ara yüzündeki sürtünme miktarı kesme bölgesinde oluşan ısı ile doğrudan ilişkilidir. Isının artması kesici takımın aşınma sürecine daha erken girmesine ve dolayısıyla kesme kabiliyetini daha kısa sürede yitirmesine neden olmaktadır. Böylece, talaş kaldırma işlemi esnasında daha yüksek yüzey pürüzlülüğü ortaya çıkmaktadır [6]. Ayrıca, kesme bölgesine gönderilen kesme yağının miktarı kesme sıvısının soğutma özelliğini de doğrudan etkileyebilmektedir [15]. Şekil 5'te görülen bir başka durum ise püskürtme basıncına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğündeki değişimdir. Şekil 5 incelendiğinde, basıncın artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. Ra değerlerinin ortalaması alındığında 4 bar basınçla elde edilen ortalama Ra değeri 3.317 μm çıkarken 6 ve 8 bar basınçla çıkan ortalama Ra değerleri sırasıyla 3.209 μm ve 3.108 μm çıkmıştır. Bir başka deyişle, 4 bar referansında oransal olarak incelendiğinde 6 bar basınçla Ra değerinde %3.26 oranında iyileşme görülürken 8 bar basınçla %6.31 oranında bir iyileşme görülmüştür. Sonuç olarak, basınç değeri arttıkça ortalama yüzey pürüzlülüğü düşmüş ve yüzey kalitesi artmıştır. Bu durum, yüksek basınçla beraber kesme bölgesine gönderilen kesme yağının takım-talaş arayüzüne daha iyi nüfuz etmesiyle ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, kesme sıvılarının temel görevlerinden biri de talaşı kesme bölgesinden uzaklaştırmaktır. Yüksek basıncın bu görevi daha etkin yerine getirmesinde etkili olduğu ve böylece kesme işlemine yardımcı olduğu düşünülmektedir [6].

Şekil 6'da konsantrasyon oranına bağlı olarak ortalama yüzey pürüzlülüğündeki değişim gösterilmektedir. Şekil 6 incelendiğinde, ilk etapta konsantrasyon oranının artmasıyla birlikte yüzey kalitesinin arttığı görülmektedir. Buna karşın, konsantrasyon oranının artmaya devam edilmesiyle birlikte Ra değeri artmış ve yüzey kalitesi düşmüştür. Saf kesme sıvısının içerisine katkı maddesinin eklenmesiyle birlikte sıvı özelliklerinin geliştiği bilinen bir durumdur. Dolayısıyla burada ilk etapta olumlu durumun kesme sıvısının termal iletkenlik katsayısı ve tribolojik özelliklerindeki artışla ilişkili olduğu düşünülmektedir. Ancak, konsantrasyon oranının artmaya devam etmesi kesme yağının viskozitesini çok fazla artırmakta ve çamurlaşmaya neden olmaktadır. Böylece, kesme sıvısı kesme bölgesine etkili bir şekilde nüfuz edememekte ve görevini yerine getirememektedir. Bu durum da kesme verimliliğini düşürmektedir [16,17].



Şekil 5. Basınç ve debinin Ra üzerindeki etkilerini gösteren 3D yüzey grafiği (3D surface plots for effects on Ra of pressure and flow rate)

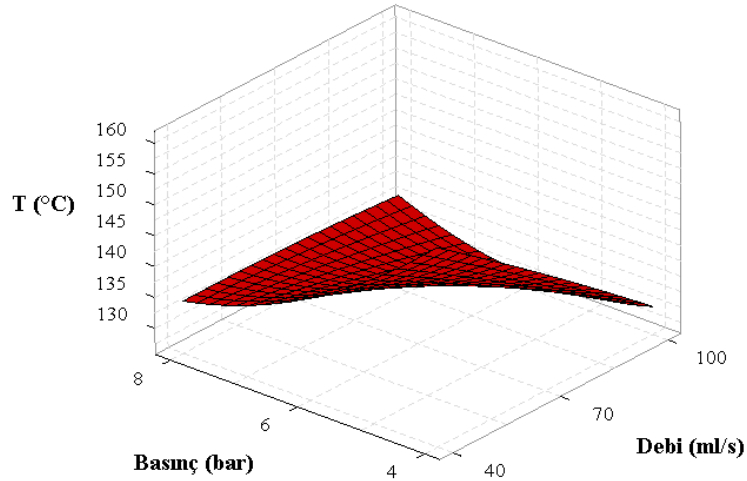


Şekil 6. Debi ve konsantrasyon oranının Ra üzerindeki etkilerini gösteren 3D yüzey grafiği (3D surface plots for effects on Ra of flow rate and concentration ratio)

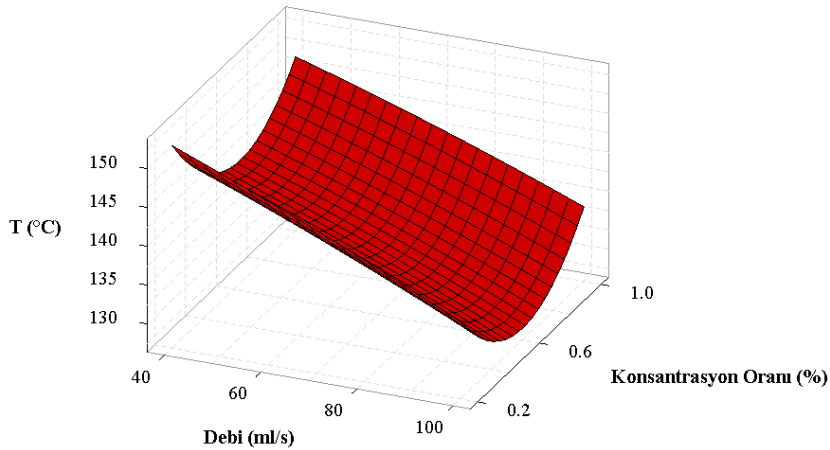
Kesme sıcaklıklarının faktörler ve seviyelerine bağlı değişimi Şekil 7 ve Şekil 8’de verilmiştir. Şekil 7 incelendiğinde, debinin artması ile birlikte kesme sıcaklığının azaldığı görülmektedir. Debi açısından en yüksek değeri 40 ml/s seviyesi verirken en düşük kesme sıcaklığı değerini 100 ml/s seviyesi vermiştir. Öyle ki 40 ml/s debide kesme sıcaklığı ortalama 150.4 °C olurken 70 ml/s debide 143.6 °C olmuş, 100 ml/s debide ise 135.93 °C olarak ölçülmüştür. Bu durum oransal olarak incelendiğinde 40 ml/s debiye göre 70 ml/s debide kesme sıcaklığı ortalama %4.52 oranında azalırken bu azalma oranı 100 ml/s debide %9.62 olmuştur. Bu durum, debinin artmasıyla birlikte kesme bölgesine daha fazla kesme sıvısı iletilmesi ile ilişkilendirilmiştir. Kesme bölgesine gönderilen daha fazla kesme sıvısı hem soğutma hem de yağlama özelliğini daha iyi yapmaktadır. Bilindiği gibi kesme sıcaklıklarını oluşturan ana unsur takım-talaş ve/veya takım-iş parçası arasındaki sürtünmenin seviyesidir [18]. Yine bilindiği gibi, kesme bölgesine gönderilen kesme sıvıları takım-talaş ve/veya takım-iş parçası arasındaki sürtünen yüzeylere nüfuz etmekte, oluşturduğu yağ filmi aracılığıyla bu yüzeyler arasındaki sürtünmeyi azaltmaktadır. Dahası, kesme bölgesinde yer alan kesme sıvıları, termal iletkenlik değerlerine bağlı olarak, kesme esnasında oluşan ısının kesme bölgesi dışına tahliye edilmesine yardımcı olmaktadır [19]. Sonuç olarak, deney sonuçları yukarıda verilen durumlara uygun şekilde çıkmış ve literatürle de paralellik göstermiştir. Şekil 7 incelendiğinde görülen bir başka durum ise püskürtme basıncına bağlı olarak kesme sıcaklığındaki değişimdir. Grafik incelendiğinde püskürtme basıncının artmasıyla birlikte kesme sıcaklığının düştüğü görülmektedir. Püskürtme basıncı açısından en yüksek kesme sıcaklığı değerini 4 bar basınç verirken en düşük kesme sıcaklığı değerini 8 bar basınç vermiştir. Öyle ki 4 bar basınçta kesme sıcaklığı ortalama 150.4 °C olurken 6 bar basınçta 140.47 °C olmuş, 8 bar basınçta ise 139.07 °C olarak ölçülmüştür. Bu durum oransal

olarak incelendiğinde 4 bar basınca göre 6 bar basınçta kesme sıcaklığı ortalama %6.6 oranında azalırken bu azalma oranı 8 bar basınçta %7.53 seviyesinde olmuştur. Bu durum, kesme bölgesine daha yüksek basınç ile gönderilen kesme sıvısının soğutma görevini daha iyi yerine getirmesi olarak düşünülmektedir. Dahası, yüksek basınç ile takım-talaş arayüzüne gönderilen kesme sıvısı kesme bölgesine daha iyi nüfuz etmiş ve soğutma görevinin yanında yağlama görevini de daha iyi yapmıştır. Ayrıca, yüksek basınç talaşı kesme bölgesinden daha etkili bir şekilde uzaklaştırmaktadır. Bu durumun da sonuçlar üzerinde etkili olduğu düşünülmektedir.

Şekil 8, kesme sıvısı içerisinde katılan katı yağlayıcının konsantrasyon oranına bağlı olarak kesme sıcaklığındaki değişimi göstermektedir. Şekil 8 incelendiğinde, konsantrasyon oranının artması ile birlikte kesme sıcaklığının düştüğü, ancak konsantrasyon oranındaki artışın devam etmesiyle birlikte kesme sıcaklığının yeniden yükselme trendine girdiği görülmektedir. %0.2 konsantrasyon oranında kesme sıcaklığı ortalama 149.3°C olarak ölçülürken, bu seviye %0.6 konsantrasyon oranında 140°C ve %1.0 konsantrasyon oranında 140.63°C olmuştur. Bir başka deyişle, konsantrasyon oranının artması bir yere kadar olumlu olurken bir noktadan sonra artması olumlu etkisini azaltmıştır. Bu durum, iki şekilde açıklanabilir. Birinci şekilde saf kesme sıvısının içerisinde katılan katkı maddesi kesme sıvısının termal iletkenlik, viskozite ve ıslanabilirlik gibi değerini artırmaktadır [10]. Böylece, kesme sıvısının hem yağlayıcılık hem de soğutucu yeteneği gelişmektedir. İkinci şekilde ise belli bir oranın üstündeki katkı maddesi kesme sıvısının viskozitesini çok fazla artırmakta ve kesme sıvısı takım-talaş arayüzüne girememektedir [20]. Bir başka deyişle, görevlerini yerine kısmen getirmekte veya hiç getirememektedir. Bu da işleme operasyonu üzerindeki verimliliğini azaltmaktadır. Çalışmanın bu bölümündeki deney sonuçları da bu iki durumla örtüşmektedir.



Şekil 7. Basınç ve debinin T üzerindeki etkilerini gösteren 3D yüzey grafiği (3D surface plots for effects on T of pressure and flow rate)



Şekil 8. Debi ve konsantrasyon oranının T üzerindeki etkilerini gösteren 3D yüzey grafiği (3D surface plots for effects on T of flow rate and concentration ratio)

3.3. Varyans Analizi (Analysis of variance)

Taguchi L₉ dikey dizini aracılığıyla yapılan talaş kaldırma deneylerinde faktörler ve seviyelerinin sonuç üzerindeki etki oranlarının belirlenmesi gerekmektedir. Böylece, hangi faktörün çıktı üzerinde ne kadar öneme sahip olduğu daha kolay anlaşılacaktır. Bu çalışmada, faktörlerin çıktı üzerindeki etki düzeylerini belirlemek için varyans analizi (ANOVA) yapılmıştır. Yapılan ANOVA analizi %95 güven aralığında gerçekleştirilmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı için gerçekleştirilen ANOVA sonuçları sırasıyla Tablo 7 ve Tablo 8’de verilmiştir.

Tablo 7. Yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları (ANOVA results for surface roughness)

Faktörler	SD	KT	KO	F	P	PCR (%)
Debi	2	0.030040	0.015020	4.70	0.175	38.57
Basınç	2	0.031602	0.015801	4.95	0.168	40.58
KO	2	0.009850	0.004925	1.54	0.393	12.65
Hata	2	0.006390	0.003195	-	-	8.20
Toplam	8	0.077882	-	-	-	100

Tablo 8. Kesme sıcaklığı için ANOVA sonuçları (ANOVA results for cutting temperature)

Faktörler	SD	KT	KO	F	P	PCR (%)
Debi	2	314.3	157.15	3.10	0.244	38.96
Basınç	2	229.1	114.54	2.26	0.307	28.40
KO	2	162.0	81.00	1.60	0.385	20.07
Hata	2	101.4	50.69	-	-	12.57
Toplam	8	806.8	-	-	-	100

Tablo 7’de sunulan verilerden yola çıkarak ortalama yüzey pürüzlülüğü için en etkili faktörün basınç (%40.58) olduğu görülürken onu sırasıyla debi (%38.57) ve konsantrasyon oranı (%12.65) takip etmiştir. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için hata oranı da %8.20 seviyesinde gerçekleşmiştir. Tablo 8 incelendiğinde, kesme sıcaklığı için en etkili faktörün %38.96 oranı ile debi olduğu görülürken onu %28.40 ile basınç ve %20.07 ile konsantrasyon oranı takip etmiştir. Kesme sıcaklığı için ise hata oranı %12.57 seviyesinde çıkmıştır. Hem ortalama yüzey pürüzlülüğü hem de kesme sıcaklığı için hata seviyesinin %20’nin altında olması yapılan istatistiksel analizin güvenli olduğunu göstermektedir [21].

3.4. Regresyon Analizi (Analysis of regression)

Regresyon analizi, bağımsız değişkenlerle bağımlı değişkenler arasındaki ilişkiyi göstermek için matematiksel fonksiyon kullanan bir analiz yöntemidir. Regresyon analizlerini uygulayarak bazı denklemler oluşturulur ve bu denklemler sayesinde bağımlı değişkenlerin referansında bağımsız değişkenlerin tahmini yapılabilmektedir. Çalışmanın bu bölümünde bağımlı değişkenler ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığıyken bağımsız değişkenler debi, basınç ve konsantrasyon oranıdır. Ortalama yüzey pürüzlülüğü için elde edilen birinci seviyeden lineer regresyon denklemi Eşitlik 2’de verilmiştir;

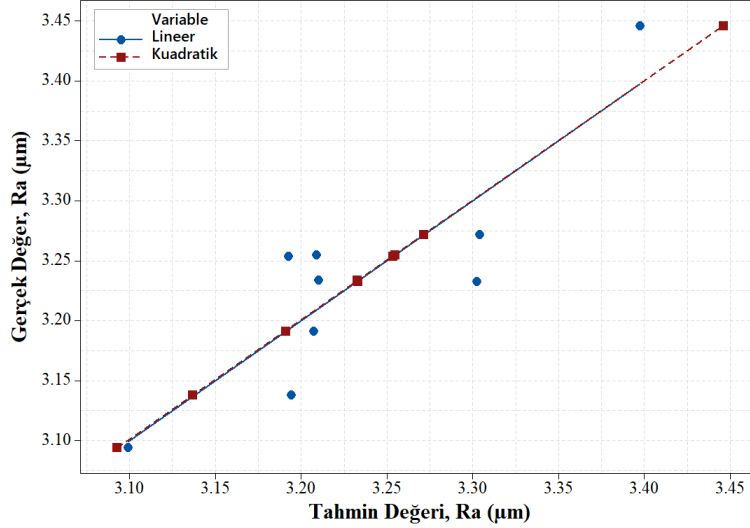
$$Ra (\mu m) = 3.638 - 0.002244 \times \text{Debi} - 0.0344 \times \text{Basınç} - 0.0658 \times \text{KO} \quad (2)$$

Ortalama yüzey pürüzlülüğü için elde edilen lineer denklemin belirleme katsayısı (R^2) 0.7677 çıkmıştır. Bu durum, gerçek değerler ile tahmin değerleri arasındaki doğruluk oranının %76.77 olduğu anlamına gelmektedir. Böyle bir denklem ile yapılan tahminlerin sapma oranı çok yüksek olacaktır. Bu nedenle, faktör etkileşimleri de devreye alınarak ikinci seviyeden bir denklem olan kuadratik denklem oluşturulmuştur ve Eşitlik 3’te verilmiştir. Kuadratik denklem sonucu elde edilen

belirleme katsayısı 1'dir ve gerçek değere çok yakın tahmin değerleri elde edileceği anlamına gelmektedir.

$$Ra (\mu m) = 3.962 - 0.000852xDebi - 0.1127xBasınç - 0.7608xKO - 0.000042xDebixDebi + 0.004958xBasınçxBasınç + 0.4104xKOxKO + 0.000411xDebixBasınç + 0.003333xDebixKO \quad (3)$$

Talaş kaldırma deneyi sonucu elde edilen gerçek sonuçlar ile regresyon analizi ile elde edilen tahmin değerlerinin karşılaştırılması Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9 incelendiğinde denklem belirleme katsayılarına paralel bir sonuç çıktığı ve kuadratik denklemin gerçek değerlere çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Ra için regresyon modellerinin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması (comparing of the regression models with results from the experiment for Ra)

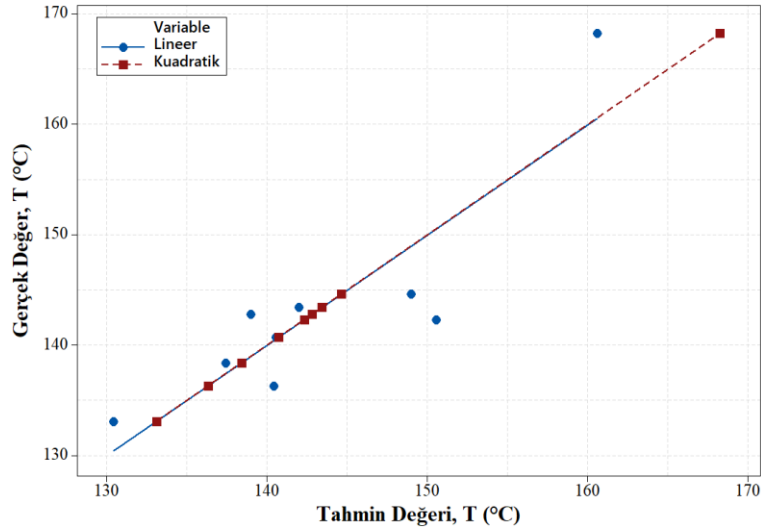
Kesme sıcaklığı için debi, basınç ve konsantrasyon oranını faktör olarak seçip oluşturulan birinci seviyeden lineer denklem Eşitlik 4'te verilmiştir;

$$T (°C) = 183.7 - 0.2411xDebi - 2.83xBasınç - 10.83xKO \quad (4)$$

Kesme sıcaklığı için oluşturulan lineer denklemin belirleme katsayısı (R^2) 0.7676 çıkmıştır. Bu durum, gerçek kesme sıcaklığı değerleri ile tahmin değerleri arasındaki doğruluk oranının %76.76 olduğu anlamına gelmektedir. Böyle bir denklem ile yapılan tahminlerin sapma oranı çok yüksek olacaktır. Bu nedenle, faktör etkileşimleri de devreye alınarak ikinci seviyeden bir denklem olan kuadratik denklem oluşturulmuştur ve Eşitlik 5'te verilmiştir. Kuadratik denklem sonucu elde edilen belirleme katsayısı 1'dir ve gerçek değere çok yakın tahmin değerleri elde edileceği anlamına gelmektedir.

$$T (°C) = 270.2 - 0.8820xDebi - 21.95xBasınç - 69.61xKO - 0.000481xDebixDebi + 0.9625xBasınçxBasınç + 51.87xKOxKO + 0.1111xDebixBasınç + 0.06944xDebixKO \quad (5)$$

Kesme sıcaklığı deneylerindeki gerçek sonuçlar ile regresyon analizi aracılığıyla elde edilen tahmin değerlerinin karşılaştırılması Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 10 incelendiğinde denklem belirleme katsayılarına paralel bir sonuç çıktığı ve kuadratik denklemin gerçek değerlere çok yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 10. T için regresyon modellerinin deney sonuçlarıyla karşılaştırılması (comparing of the regression models with results from the experiment for T)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, AA 2024 T3 alüminyum alaşımı tornalanarak bazı MMY parametreleri ve nano katkı malzemesi konsantrasyon oranının yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Deney tasarımının yapılması ve sonuçların analiz edilmesinde Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Deney sonuçları ve analizler sonucunda elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Çeşitli işleme parametreleri altında yapılan tornalama deneyleri sonucunda parametre kombinasyonlarına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklıklarının farklı oranlarda değiştiği görülmüştür.
- Ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığında en iyi sonucu veren parametre grubu 100 ml/s debi, 8 bar basınç ve %0.6 konsantrasyon oranı olmuştur.
- Ortalama yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametre %40.58 katkı oranı ile basınç olurken kesme sıcaklığı üzerinde en etkili parametre %38.96 katkı oranı ile debi olmuştur.
- Hem yüzey pürüzlülüğü hem de kesme sıcaklığında debi ve basıncın artmasıyla birlikte işleme verimliliği artmıştır. Bu durum kesme bölgesine daha hızlı ve yüksek miktarda kesme yağı gönderilmesinin olumlu etki yapmasıyla ilişkilendirilmiştir.
- Konsantrasyon oranının bir noktaya kadar artması ortalama yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı sonuçlarını olumlu etkilerden konsantrasyon oranındaki artışın devam etmesiyle birlikte verimlilik bir miktar düşmüştür.
- Regresyon analizi ile elde edilen lineer denklemlerdeki belirleme katsayısı ortalama yüzey pürüzlülüğü için 0.7677 çıkarken kesme sıcaklığı için bu değer 0.7676 çıkmıştır. Kuadratik denklemlerin oluşturulmasıyla belirleme katsayısı her iki çıktı değeri için 1 olarak elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje kodu: FYL-2020-10160).

Bu çalışma, Ayşegül Yücel tarafından yazılan “Al 2024 Alaşımının Tornalanmasında Molibden Disülfür Katkılı Nano Kesme Sıvısının İşleme Performansı Üzerindeki Etkisinin Araştırılması” isimli yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Z. Huda, N. I. Taib, T. Zaharinie, Characterization of 2024-T3: an aerospace aluminum alloy, *Materials Chemistry and Physics*, 113(2-3), 515-517, 2009.
2. M. P. Jahan, P. Kakawand, E. L. M. Kwang, M. Rahman, Y. S. Wong, An experimental investigation into the micro-electro-discharge machining behaviour of aluminium alloy (AA 2024), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 78(5-8), 1127-1139, 2015.
3. A. Çakır, AA 7075 ve AA 2024 Alüminyum Malzemelerine Delik Delinmesinde Soğutma Yöntemlerinin İşleme Performansına Etkilerinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2015.
4. Ç. V. Yıldırım, Investigation of hard turning performance of eco-friendly cooling strategies: Cryogenic cooling and nanofluid based MQL, *Tribology International*, 144, 106127, 2020.
5. H. J. Kim, K. J. Seo, K. H. Kang, D. E. Kim, Nano-lubrication: A review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(6), 829-841, 2016.
6. Ç. V. Yıldırım, T. Kivak, F. Erzincanlı, I. Uygur, M. Sarıkaya, Optimization of MQL Parameters Using the Taguchi Method in Milling of Nickel Based Waspaloy. *Gazi University Journal of Science*, 30(2), 173-186, 2017.
7. Z. Q. Liu, X. J. Cai, M. Chen, 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*, 225(8), 1273-1279, 2011.
8. A. Moghadassi, S. Masoud Hosseini, D. Henneke, A. Elkamel, A model of nanofluids effective thermal conductivity based on dimensionless groups, *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 96(1), 81-84, 2009.
9. Ç. V. Yıldırım, M. Sarıkaya, T. Kivak, Ş. Şirin, The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625, *Tribology International*, 134, 443-456, 2019.
10. N. Talib, E. A. Rahim, Performance of modified jatropha oil in combination with hexagonal boron nitride particles as a bio-based lubricant for green machining, *Tribology International*, 118, 89-104, 2018.
11. Ş. Şirin, T. Kivak, Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy. *Tribology International*, 137, 180-192, 2019.
12. A. Marques, M. P. Suarez, W. F. Sales, Á. R. Machado, Turning of Inconel 718 with whisker-reinforced ceramic tools applying vegetable-based cutting fluid mixed with solid lubricants by MQL. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 530-543, 2019.
13. T. M. Duc, T. Q. Chien, Performance evaluation of MQL parameters using Al₂O₃ and MoS₂ nanofluids in hard turning 90CrSi steel, *Lubricants*, 7(5), 40, 2019.
14. M. Sarıkaya, A. Güllü, Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL, *Journal of Cleaner Production*, 65, 604-616, 2014.
15. D. Fratila, 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*, 27 (10), 1123-1128, 2010.
16. M. Amrita, R. R. Srikant, A. V. Sitaramaraju, Performance evaluation of nanographite-based cutting fluid in machining process, *Materials and Manufacturing Processes*, 29(5), 600-605, 2014.
17. R. Padmini, P. Vamsi Krishna, K. M. Rao, Effectiveness of vegetable oil based nanofluids as potential cutting fluids in turning AISI 1040 steel, *Tribology International* 94, 490-501, 2016.
18. S. Yağmur, A. Acır, U. Şeker, M. Günay, Delik delme işlemlerinde kesme parametrelerinin kesme bölgesindeki sıcaklığa etkisinin deneysel incelenmesi, *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(1), 1-6, 2013.

19. O. Öndin, T. Kıvak, M. Sarıkaya, Ç. V. Yıldırım, Investigation of the influence of MWCNTs mixed nanofluid on the machinability characteristics of PH 13-8 Mo stainless steel. *Tribology International*, 148, 106323, 2020.
20. M. Sayuti, A. A. D. Sarhan, F. Salem, Novel uses of SiO₂ nano-lubrication system in hard turning process of hardened steel AISI4140 for less tool wear, surface roughness and oil consumption. *J. Clean. Prod.* 67, 265–276, 2014.
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*, 50 (1), 19-28, 2014.