

Inconel 625'in Seramik Takımlarla Tornalanmasında Nano Kesme Sıvısının Kesme Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi

*¹Çağrı Vakkas Yıldırım

*¹Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Uçak Gövde-Motor Bakım Bölümü Erciyes Üniversitesi, Türkiye

Özet:

Klasik kesme sıvılarının çevre, işçi sağlığı ve üretim maliyetleri üzerinde olumsuz etkileri vardır. Bu nedenle, günümüzde araştırmacılar ve işletmeler, üretim verimini düşürmeden kesme sıvısı miktarını azaltmak için yoğun bir çaba içerisindeyler. Bu çalışmada, bu amaca hizmet etmek için bazı soğutma/yağlama stratejileri denenmiştir. Bir başka deyişle, içerisinde hacimce %0.5 nano Al₂O₃ katkı maddesi içeren nano kesme sıvısı, saf Minimum Miktarla Yağlama (MMY) ve kuru işlemeyle karşılaştırılmıştır. Ayrıca, soğutma/yağlama yöntemlerinin farklı kesme parametreleri altındaki davranışları merak edildiğinden üç farklı kesme hızı (120, 160, 200 m/dak) ve üç farklı ilerleme (0.05, 0.1, 0.15 mm/dev) seçilmiştir. Deney sayısının belirlenmesinde Taguchi L₉ dikey dizini tercih edilmiştir. Optimum parametrelerin belirlenmesinde Sinyal/Gürültü (S/N) etkili olmuştur. Ayrıca, parametrelerin etki düzeylerinin belirlenmesi için ANOVA analizi yapılmıştır. Deney sonuçlarının analizi sonrasında optimum kesme sıcaklığı hacimce %0.5 Al₂O₃ içeren bitkisel esaslı kesme yağı, 120 m/dak kesme hızı ve 0.05 mm/dev ilerleme değeri kombinasyonu elde edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Inconel 625, tornalama, nano-akışkan, Alüminyum Oksit, kesme sıcaklığı

Effect of Nanofluid on Cutting Temperature in Turning of Inconel 625 with Ceramics Tools

Abstract:

Conventional cutting fluids have an adverse effect on the environment, worker health and production costs. For this reason, researchers and businesses are now working hard to reduce the amount of cutting fluid without reducing production efficiency. In this study, some cooling/lubrication strategies have been tried to serve this purpose. In other words, the nanofluid containing 0.5% by volume nano Al₂O₃ additive was compared with pure Minimum Quantity Lubrication (MQL) and dry processing. In addition, three different cutting speeds (120, 160, 200 m/min) and three different feeds (0.05, 0.1, 0.15 mm/rev) were chosen, as the behavior of the cooling/lubrication methods under different cutting parameters was wondered. The Taguchi L₉ vertical index was preferred for determining the number of experiments. Signal/Noise (S/N) ratio was effective in determining the optimum parameters. In addition, ANOVA analysis was performed to determine the effect levels of the parameters. After the analysis of the test results, the optimum cutting temperature was obtained with a combination of vegetable based cutting oil containing 0.5vol% Al₂O₃, cutting speed of 120 m/min and feed rate of 0.05 mm/rev.

Key words: Inconel 625, turning, nanofluid, aluminum oxide, cutting temperature

1. Giriş

Inconel 625, nikel esaslı bir süper alaşım olup Mo ve Nb elementleri aracılığıyla büyük ölçüde kuvvetlendirilmiştir [1]. Yüksek sıcaklık dayanımı, mükemmel korozyon direnci ve yüksek süneklik gibi özellikleri nedeniyle birçok uygulama alanı için 1960'lerden beri önemli bir malzeme seçeneğidir [2]. Dahası bu malzeme, agresif, yüksek sıcaklığa sahip ortamlara uzun süre maruz kaldığında dahi mükemmel çekme ve sürünme direncine sahiptir [3]. Bu üstün özellikleri nedeniyle havacılık, uzay, denizcilik, kimya ve petrokimya endüstrisi gibi kritik sektörlerde yoğun olarak kullanılmaktadır [4]. Bu kritik malzemenin talaş kaldırma suretiyle şekillendirilmesi uygulama alanları için oldukça önemlidir ve literatürde bu konu ile ilgili çeşitli çalışmalar yer almaktadır. Örneğin; Lotfi ve arkadaşları [5] yaptıkları çalışmada Inconel 625'i farklı kesme parametreleriyle tormalamışlar ve optimum işleme parametresini bulmayı amaçlamışlardır. Çalışma esnasında üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme ve üç farklı kesme derinliğinin değişik kombinasyonlarını deneyen araştırmacılar, kesici takım olarak da kaplamalı karbür ve seramik kesicileri kullanmışlardır. Deney sonunda araştırmacılar, seramik kesicilerin işlenebilirliğe artırdığını iddia etmişlerdir. Ramanujam ve ark. [6] üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme ve üç farklı kesme derinliğini kullanarak Inconel 625'i tormalamışlardır. İşleme çıktısı olarak yüzey pürüzlülüğü, enerji tüketimi ve metal boşaltma oranını tercih eden araştırmacılar, deney sonuçlarının tahmini için Taguchi ve bulanık mantık yönteminin kullanmışlardır. Bir başka çalışmada Jahanbakhsh ve arkadaşları [7] seramik takım kullanarak Inconel 625'i tormalamışlardır. Deneyler esnasında üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme ve üç farklı kesme derinliğini kesme parametresi olarak seçen araştırmacılar, deneyleri kuru işleme altında yapmıştır. Literatürde yer alan ve incelenen bütün çalışmalar da Inconel 625'in zor işlenen bir malzeme olduğunu söylemişlerdir. Bu tür malzemelerin işlenmesinde başvurulan en bilindik yöntem ise kesme sıvısı kullanımudur.

Kesme sıvıları, iş parçası-kesici takım-talaş sisteminin tribolojik özelliklerini geliştirdiği için talaş kaldırma operasyonlarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Kesme sıvısını ilk olarak 1907 yılında su kullanan Taylor, yüksek hız çeliklerinin işlenmesi esnasında %40'a varan bir kesme hızı artışı sağlamıştır [8]. Kesme sıvıları, daha uzun takım ömrü, daha iyi yüzey kalitesi, daha iyi boyutsal hassasiyet, daha düşük kesme kuvveti ve daha az titreşim sağlayarak işleme verimliliğini artırır [9]. Ancak, geleneksel kesme sıvılarının uygulanması bazı tekno-çevre sorunları da beraberinde getirmektedir. Örneğin; yüksek kesme sıcaklığında kesme sıvısının kimyasal olarak parçalanması çevre kirliliği, su kirliliği ve atıkların bertarafı sırasında toprak kirliliği gibi çevreyi tehdit edici sonuçlar doğurabilmektedir. Dahası, klasik kesme sıvısı ile fiziksel temas kurmak zorunda olan operatörlerin dermatolojik ve/veya solunumsal sorunları ciddi bir tehlike olabilmektedir. Son olarak, kesme sıvıların tedarik edilmesi, kullanılması, depolanması ve bertaraf edilmesi gibi etkenler üretim maliyetine önemli yükler yüklemektedir [10]. Bütün bu nedenlerden dolayı konvansiyonel kesme sıvılarının tamamen ortadan kaldırılması ve olabildiğince az kullanılması büyük önem teşkil etmektedir. Kesme sıvısının tamamen ortadan kaldırıldığı sistem olan kuru işleme her ne kadar çevre ve çalışan dostu bir sistem gibi görünse de orta ve ağır işleme koşullarında üretim verimliliğini oldukça düşürmektedir. Bu nedenle son yıllarda, az da olsa kesme sıvısının kullanıldığı minimum miktarda yağlama (MMY) sistemi popülerliğini artırmaktadır.

MMY sistemi, kesme bölgesine çok az miktarda (saatte 10 ile 150 ml arası) kesme yağı gönderilmesini sağlayan bir sistemdir. Bu şekilde, hem kuru kesme hem de konvansiyonel

soğutmanın dezavantajları minimuma indirilmektedir. Bu sistem, tornalama, frezeleme, delme ve taşlama gibi talaş kaldırma operasyonlarında rahatlıkla kullanılabilir [11]. Bu sistem bir atomizer, kesme sıvısı karteri, tahliye başlığı vb. gibi bölümlere sahiptir. Atomizer, soğutucuyu atomize etmek için yüksek basınçlı havanın kullanıldığı bir ejektör olarak çalışır. Atomize soğutucu daha sonra düşük basınçlı bir dağıtım sisteminde hava yardımıyla işleme bölgesine iletilir. Kesme sıvısı ile hava karışım odasında buluşur. Karışım odasından geçen hava, mikron boyutlu parçacıkları kullanarak bir aerosol oluşturur. Bu aerosol, kesme alanına sis olarak püskürtülür. Hem soğutucu hem de yağlayıcı olarak görev yapabilen bu aerosol, kesme bölgesinin derinliklerine kadar nüfuz edebilmektedir [12]. Ancak, yapılan bazı çalışmalarda, özellikle süper alaşımların işlenmesi gibi ağır işleme koşullarında, aerosolün hemen buharlaştığı ve dolayısıyla soğutma/yağlama görevini yeterince iyi yapamadığı iddia edilmiştir [13], [14]. Özellikle, işleme verimliliğini önemli ölçüde etkileyen kesme sıcaklıklarının kontrol edilmesi adına bu durum oldukça önemlidir. Bu nedenle, günümüzde, bu sistemin etkinliğini artırmak adına nano katı yağlayıcı kesme sıvıları ya da nano akışkanlar kullanılmaya başlanmıştır.

Nano akışkan, ortalama boyutu 100 nm'den az olan nano partikülün baz sıvılara katılarak elde edilen kesme sıvılarına verilen genel bir isimdir. Nano boyutlu parçacıklar baz kesme sıvısının içerisine süspansiyon edildiğinde kesme sıvısının termal özelliklerini önemli ölçüde geliştirmektedir. Alüminyum oksit (Al_2O_3), grafit, elmas, hegzagonal bor nitrür (hBN), çok duvarlı karbon nanotüp (MWCNT) ve molibden disülfid (MoS_2) gibi çeşitli nano parçacıklar, sıklıkla katkı maddesi olarak kullanılmaktadır [15]. Literatürde yer alan çalışmalar, özellikle ağır işleme koşullarında, nano sıvıların işleme verimliliğini artırdığını iddia etmektedir. Örneğin; Samuel ve arkadaşları [16] yaptıkları mikro tornalama işleminde nano kesme sıvısı ile klasik kesme sıvısının karşılaştırmışlar ve nano kesme sıvısının kesme sıcaklığı ve kesme kuvveti konularında önemli iyileştirmeler sunduğunu iddia etmişlerdir. Bir başka çalışmada Raju ve arkadaşları [17] EN 31 malzemesini tornalamışlar ve klasik kesme sıvısı ile çok duvarlı karbon nanotüp katkılı kesme sıvısının karşılaştırmışlardır. Deney sonuçlarını analiz eden araştırmacılar, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasında nano kesme sıvısının daha iyi sonuç verdiğini söylemişlerdir. Sharma ve arkadaşları, [18] AISI D2 çeliğinin tornalanmasında nano kesme sıvısı ve saf MMY sistemini karşılaştırmışlardır. Nano katkı maddesi olarak MWCNT kullanan araştırmacılar, yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının geliştirilmesinde nano kesme sıvısının daha iyi performans gösterdiğini söylemişlerdir. Hegab ve Kishawy [19] yaptıkları çalışmada Inconel 718'i işlemişlerdir. Deneyler esnasında kesme parametreleriyle beraber baz kesme sıvısı ve iki farklı nano kesme sıvısının karşılaştırmışlardır. Kalite göstergesi olarak yüzey pürüzlülüğü ve güç tüketimini seçen araştırmacılar her iki durumda da nano kesme sıvısının daha iyi sonuç verdiğini rapor etmişlerdir. Yine bir başka çalışmada Hegab ve arkadaşları [20] Ti-6Al-4V alaşımını işlerken farklı oranlardaki nano kesme sıvısı ile baz kesme sıvısının karşılaştırmışlardır. Sonuçların analizini yapan araştırmacılar, yüksek oranlı nano kesme sıvısının daha iyi sonuç verdiğini iddia etmişlerdir.

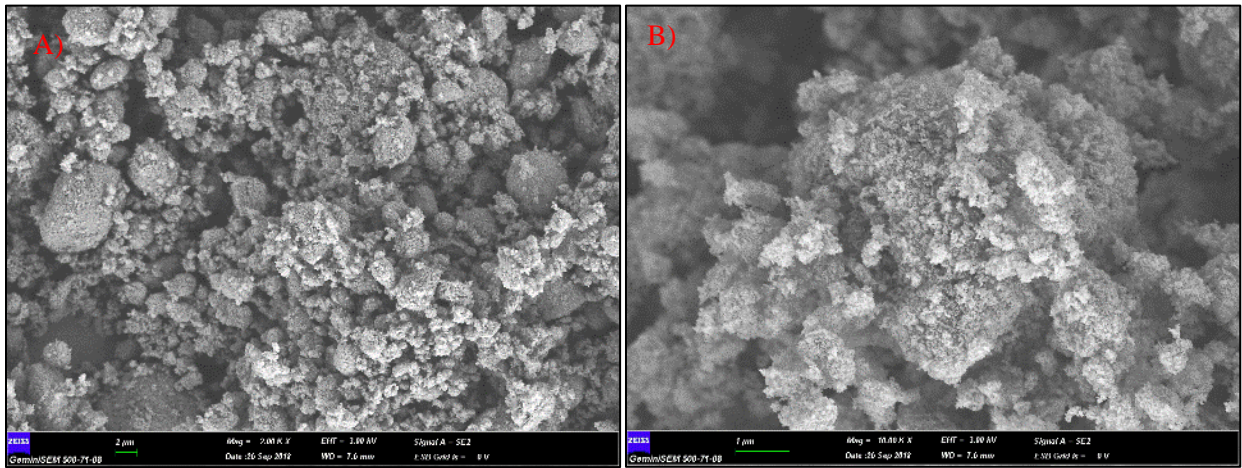
Literatürde yer alan çalışmalardan bazıları yukarıda verilmiştir. Bu örnekler istenildiği takdirde daha da artırılabilir. Ancak, literatür taramasında çalışmaların önemli bir kısmının karbür kesicilerle yapıldığı görülmüştür. Özellikle, seramik kesiciler gibi yüksek hızlarda kesme yapılan talaş kaldırma operasyonlarında doğru soğutma/yağlama stratejisinin belirlenmesi önemli bir gereksinimdir. Bu çalışmanın amacı farklı soğutma/yağlama koşullarının seramik kesicilerin ağır

işleme koşullarındaki performansını incelemektir. Ayrıca, soğutma/yağlama koşullarının farklı kesme parametreleri altındaki etki düzeylerini araştırmak için üç farklı kesme hızı ve üç farklı ilerleme deney sistemine dahil edilmiştir. Materyal metot, deney sonuçlarının analizi ve sonuçlara ait değerlendirmeler aşağıda detaylı olarak sunulmuştur.

2. Deneysel Prosedür

2.1. Nano kesme sıvısının hazırlanması

Nano akışkanların hazırlanmasında tek aşamalı ve iki aşamalı olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Tek aşamalı sistemde, nano partiküllerin üretimi ve temel kesme sıvısı içindeki dağılımı tek bir adımda yapılmaktadır. İki aşamalı yöntemde ise nano partiküller daha önce üretilmekte ve çeşitli manyetik ve/veya mekanik karıştırıcılar kullanılarak kesme sıvısının içerisine homojen bir şekilde katılmaktadır. Gerek maliyet gerekse de zaman tasarrufu açısından iki aşamalı yöntem daha çok tercih edilmektedir [21]. Bu çalışmada da iki aşamalı yöntemi tercih edilmiştir. SEM görüntüleri Şekil 1’de verilen Al_2O_3 nano parçacıkları (Renk: Beyaz, Ortalama çap: 70 nm, Yoğunluk: 3.7 kg/m³, Termal iletkenlik: 30 W/m-K) mekanik ve manyetik karıştırıcılar kullanılarak bitkisel esaslı kesme sıvısının (viskozite 40°C; 10 mm²/s, yoğunluk g/mL 15°C; 0.868, parlama noktası; 200°C) içerisine homojen olarak katılmıştır. Karışımın elde edilmesi esnasında ilk olarak Daihan marka HS-100D model mekanik karıştırıcı ile 700 dev/dak’da 30 dakika karıştırılmış daha sonra Bandelin Sonopuls marka UW-3200 model ultrasonik karıştırıcı yardımıyla 30 dak daha karıştırılmıştır ve nano akışkan elde edilmiştir. Karıştırma anına ait görüntüler Şekil 2’de verilmiştir. Saf bitkisel kesme sıvısı ve nano akışkanın pulverize bir şekilde kesme bölgesine püskürtülmesi için SKF marka ve Vario modelindeki MMY sistemi kullanılmıştır. Deneylerde 2 mm çapında nozul kullanılmıştır. Püskürtme basıncı 8 bar olarak seçilirken püskürtme mesafesi 20 mm, püskürtme açısı 45° ve debi 50 ml/h olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. Nano Al_2O_3 tozunun farklı büyütme altındaki SEM görüntüleri; a) 3.00 kV, b)10.00 kV



Şekil 2. Nano akışkanın hazırlanması

2.2. İş parçası, tezgah ve kesici takım

Tornalama deneyleri esnasında nikel esaslı bir süper alaşım olan Inconel 625 malzemesi kullanılmıştır. Inconel 625 süper alaşımının kimyasal içeriği Tablo 1’de verilirken Tablo 2’de fiziksel özellikleri verilmiştir. Deney malzemesi 70x300 mm ölçülerinde kesilmiştir. İş parçası malzemesinin hazırlanması esnasında sıcaklıktan etkilenmemesi için tel erezyon tezgahı kullanılmıştır. Talaş kaldırma deneylerinde maksimum iş mili devir sayısı 4000 dev/dak olan ACCUWAY JT-150-8 CNC torna tezgahı kullanılmıştır. Inconel 625 süper alaşımı ile yapılan kesme sıcaklığı deneyleri esnasında kesici uç olarak Taegutec firması tarafından üretilen CNGA 120404 kodlu AB2010 (Sertlik: 2530 HV) kalite seramik kesici uçlar kullanılmıştır. Kesici uçları torna tezgahına bağlamak için yine Taegutec firması tarafından üretilen TCLNR 2020 K1204-F kodlu takım tutucu kullanılmıştır.

Tablo 1. Inconel 625 süper alaşımının kimyasal içeriği

Ni	Cr	Fe	Mo	Nb	C	Mn	Si	Al	Ti	Co
58.0	20.0-23.0	5.0	8.0-10.0	3.15-4.15	0.1 max	0.5 max	0.5 max	0.4 max	0.4 max	1.0 max

Tablo 2. Inconel 625 süper alaşımının fiziksel özellikleri

Özgül Ağırlık (g/cm ³)	Erime Noktası (°C)	Genleşme Katsayısı (µm/m°C)	Katılık Katsayısı (kN/mm ²)	Esneklik Katsayısı (kN/mm ²)
8.44	1350	12.8	79	205.8

2.3. Deneysel tasarım ve işleme parametreleri

Bu çalışmada, deneysel tasarımın yapılabilmesi için Taguchi yöntemi kullanılmıştır. Taguchi yöntemi, mühendislik çalışmalarında kullanılan güçlü bir deney tasarım yöntemidir. Bu yöntem,

orthogonal dizinleri kullanmakta ve böylece deney sayısını önemli ölçüde azaltmaktadır. Dahası, deneyler esnasında kontrol edilemeyen faktörleri minimize etmektedir. Bu çalışmada da üç kontrol faktörü ve bu kontrol faktörlerinin üçer seviyesi olmasına rağmen Taguchi yönteminin L₉ dikey dizini kullanılmış ve deney sayısı 9'a düşürülmüştür. Deneyler esnasında kullanılan kontrol faktörleri ve seviyeleri Tablo 3'te verilmiştir. Deneyler esnasında kesme derinliği sabit (0.8 mm) tutulmuştur.

Tablo 3. Kesme sıcaklığı deneylerine ait kontrol faktörleri ve faktörlere ait seviyeler

Kesme hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	Soğutma Şartı
120	0.05	Kuru
160	0.10	MMY
200	0.15	Nano MMY

Taguchi yöntemi, gürbüz faktörlerin etkisini azaltmak için üç farklı formülasyon kullanmaktadır. Bunlar; en küçük en iyi, en büyük en iyi ve nominal en iyi şeklindedir. Yapılan deneyin amacına uygun olarak bunlardan birisi seçilmekte ve analiz esnasında kullanılmaktadır. Bu çalışmanın performans göstergesi kesme sıcaklığı olduğundan ve en küçük kesme sıcaklığı değerinin bulunması amaçlandığından “en küçük en iyi” yaklaşımı kullanılmış ve aşağıdaki formül aracılığıyla hesaplanmıştır.

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

Burada, y_i ; performans yanıtının i . gözlem değerini ve n ; deney sayısını vermektedir [22].

2.3. Kesme sıcaklığı ölçümü

Bu çalışmada, kesme sıcaklıklarının ölçümü için gerçek zamanlı termografik görüntüleme yapabilen Optris PI 450 kamera kullanılmıştır. Kızılötesi Optris PI 450 kamera 80 Hz görüntü almaktadır ve 382x288 piksel optik çözünürlüğe sahiptir. Kameranın sıcaklık ölçme aralığı -20°C ile 1500°C arasında olacak şekilde ayarlanmıştır. Kameraya ait ayarlar ön deneyler neticesinde belirlenmiştir. Kamera aracılığıyla elde edilen görüntüleri anlamlandırmak adına Optris PIX Connect yazılımı kullanılmıştır. Optris PIX Connect yazılımı, istenen verinin seçilen bir doğrultuda veya görüş alanı içindeki istenen geometri alanında çekildiği videolar, anlık resimler ve sıcaklık profillerinin yakalanmasını sağlamaktadır. Şekil 3'te deney düzeneği özet olarak verilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeneği

3. Sonuçlar ve Tartışma

3.1. Sinyal/Gürültü (S/N) oranı analizi

Her işleme parametresi için S/N oranı, S/N analizine dayanarak hesaplanır. Kalite özellikleri kategorisine bakılmaksızın, büyük S/N oranı daha iyi kalite özelliklerine karşılık gelir. Bu nedenle, optimum işlem parametresi seviyesi en yüksek S/N oranının seviyesidir [23]. Tablo 4'te deney sonuçlarıyla beraber S/N oranları verilmiştir. Tornalama deneyleri sonunda, en düşük kesme sıcaklığı değeri 224 °C olarak elde edilirken buna karşılık gelen S/N oranı -47.005 dB olarak bulunmuştur. Ayrıca, kesme sıcaklığı deneyleri aracılığıyla elde edilen sonuçlar S/N oranları kullanılarak optimize edilmiştir.

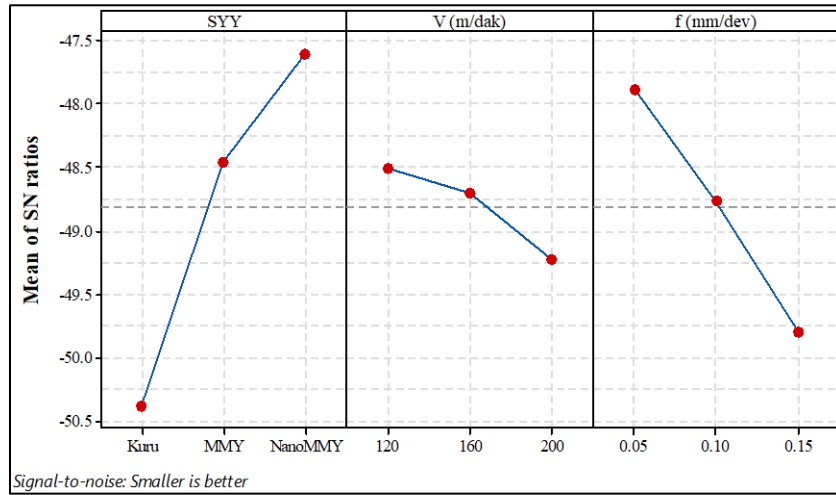
Tablo 4. Kesme sıcaklığı deneylerine ait kontrol faktörleri ve faktörlere ait seviyeler

Deney No	Soğutma/yağlama yöntemi (SYY)	Kesme hızı (m/dak)	İlerleme (mm/dev)	T (°C)	S/N Oranı (dB)
1	Kuru	120	0.05	268	-48.563
2	Kuru	160	0.10	328	-50.344
3	Kuru	200	0.15	409	-52.235
4	MMY	120	0.10	268	-48.563
5	MMY	160	0.15	274	-48.755
6	MMY	200	0.05	253	-48.062
7	Nano MMY	120	0.15	263	-48.399
8	Nano MMY	160	0.05	224	-47.005
9	Nano MMY	200	0.10	234	-47.385

Tablo 5'te S/N yanıt tablosu verilerek kontrol faktörlerine ait optimum seviyeler gösterilmiştir. S/N yanıt tablosunda en yüksek S/N oranı o faktöre ait optimum seviyeyi göstermektedir. Buna göre, en düşük kesme sıcaklığını veren parametre grubu soğutma/yağlama yöntemi için nano MMY, (seviye 3, S/N=-47.60 dB, kesme hızı için 120 m/dak (seviye 1, S/N=-48.51) ve ilerleme için 0.05 mm/rev (seviye 1, S/N=-47.88) olarak elde edilmiştir. Ayrıca, Şekil 4'te S/N oranları ana etki grafiği verilmiştir. Böylece, Tablo 4 ve 5'te verilen sayısal ifadeler grafik ile de desteklenmiştir.

Tablo 5. Kesme sıcaklığı deneyleri için S/N yanıt tablosu

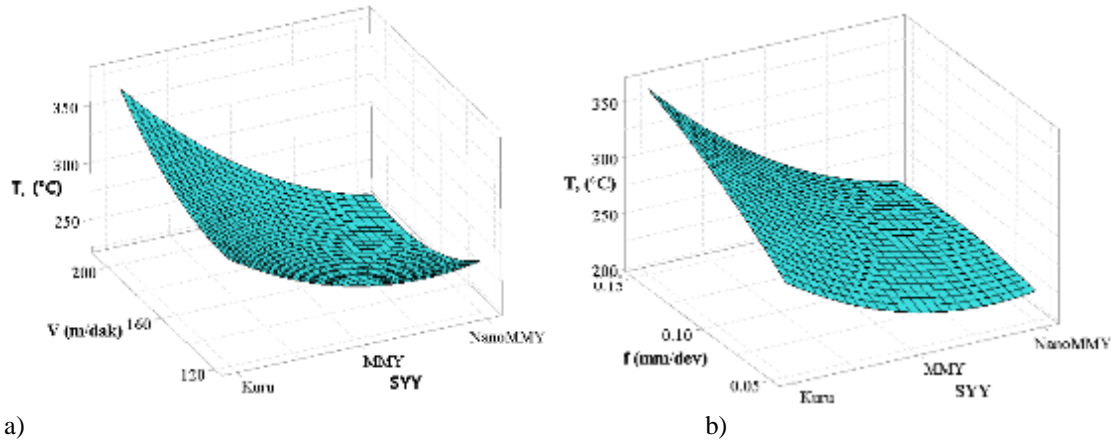
	Kontrol Faktörleri		
	SYY	V	f
Seviye 1	-50.38	-48.51	-47.88
Seviye 2	-48.46	-48.70	-48.76
Seviye 3	-47.60	-49.23	-49.80
Delta	2.78	0.72	1.92



Şekil 4. S/N oranları ana etki grafiği

3.2. Deney sonuçlarının analizi

Inconel 625'in seramik takımlarla tornalanması esnasında işleme parametrelerinin ve parametrelere ait etkileşimlerin kesme sıcaklığı değerleri üzerindeki etkisini gösteren 3D yüzey grafikleri Şekil 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Giriş parametrelerine bağlı kesme sıcaklığı değişimini gösteren 3D yüzey grafikleri; a) soğutma/yağlama yöntemi ve kesme hızı, b) soğutma/yağlama yöntemi ve ilerleme hızı

Şekil 5 soğutma/yağlama yöntemi açısından incelendiğinde, en yüksek kesme sıcaklığı değerinin kuru işleme ile elde edildiği (ort. 335.3 °C) kesme yağının kullanılması ile birlikte kesme

sıcaklığında önemli bir düşüş olduğu görülmektedir. Dahası, nano katkı maddelerinin kesme yağına eklenmesi ile birlikte kesme yağının özellikleri artırılmış ve en düşük kesme sıcaklığı (ortalama 240.3 °C) nano akışkanın kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bir başka deyişle, kuru işleme göre MMY sistemi kesme sıcaklığını %20.97 oranında azaltırken nano katkı maddesinin eklenmesiyle birlikte kesme sıcaklığı ortalama %28.33 oranında azalmıştır. Kesme sıvısının kullanılmasıyla birlikte kesme sıcaklığının düştüğü bilenen bir durumdur [24]. Ancak, nano akışkan kullanılmasıyla birlikte kesme sıcaklığındaki düşüş daha belirgin bir hal almıştır. Bu durum, nano katkı maddelerinin kesme sıvısına ait tribolojik özellikleri geliştirmesi olarak yorumlanmıştır. Ayrıca, Al₂O₃ parçacıkları yağ moleküllerini tutarak kesme bölgesinden buharlaşmasını engellemiştir. Böylece, takım-iş parçası arayüzündeki ince film tabakası daha uzun ömürlü olmuş ve işleme verimini artırmıştır. Dahası, Al₂O₃ parçacıkları baz kesme sıvısının termal iletkenlik özelliklerini artırmaktadır. Böylece, kesme bölgesindeki ısı daha hızlı tahliye edilmiş ve kesme sıcaklığının artması engellenmiştir [14]. Termal iletkenlik, çok karmaşık bir olgudur ve birçok uygulama için oldukça önemlidir. Sonuç olarak, nano katkı maddesi baz sıvıyla karşılaştırıldığında, bu gibi karışımların viskozite, yoğunluk ve termal iletkenlik gibi fiziksel özelliklerinde değişiklikler meydana gelir [25]. Bu çalışmada da benzer bir durum ortaya çıkmış ve nano katkı maddesinin eklenmesiyle birlikte kesme sıcaklığı önemli ölçüde azalmıştır. Şekil 5'te görülen bir başka durum ise kesme hızının artmasıyla birlikte kesme sıcaklığının da artmasıdır. Kesme hızı, doğrudan kesme sıcaklığıyla ilişkilidir ve kesme hızının artmasıyla birlikte kesme sıcaklığının artması beklenen bir durumdur. Benzer bir ilişki ilerleme değeri için de söylenebilir. İlerlemenin artması ile birlikte kesme sıcaklığı da artış göstermiştir (Şekil 5b) [26].

3.2. ANOVA

Kesme sıcaklığı deneylerine ait ANOVA analizi sonuçları Tablo 6'da sunulmuştur. Analiz %95 güven seviyesi dikkate alınarak yapılmıştır. Tablo 6'ya göre soğutma/yağlama sistemi kesme sıcaklığı üzerinde %56.9 katkı oranına sahipken kesme hızı ve ilerleme hızı sırasıyla %6.5 ve %26.4 oranında çıkmıştır. Sonuç olarak, bu çalışmada en etkili parametre soğutma/yağlama oranı olurken onu sırasıyla ilerleme ve kesme hızı takip etmiştir.

Tablo 5. Kesme sıcaklığı deneyleri için S/N yanıt tablosu

Faktörler	Serbestlik derecesi	Kareler toplamı	Kareler ortalaması	F değeri	P değeri	Katkı oranı (%)
SYY	2	14580	7290.1	5.58	0.152	56.9
V	2	1662	830.8	0.64	0.611	6.5
f	2	6780	3390.1	2.59	0.278	26.4
Hata	2	2614	1306.8	-	-	10.2
Toplam	8	25636	-	-	-	100

4. Sonuçlar

Yapılan kesme sıcaklığı deneyleri ve sonuçlara ait analizler aracılığıyla elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur;

- Inconel 625'in seramik takımlarla tornalanması esnasında kesme sıcaklığını düşürmek için nano katkı maddesi içeren kesme sıvısı olumlu sonuç vermiştir.

- En düşük kesme sıcaklığı değeri nano MMY, 120 m/dak kesme hızı ve 0.05 mm/dev ilerleme ile elde edilmiştir.
- En yüksek kesme sıcaklığı kuru işleme altında 200 m/dak kesme hızı ve 0.15 mm/dev ilerleme ile elde edilmiştir.
- Kesme hızının ve ilerlemenin artması ile birlikte kesme sıcaklığında artış gözlemlenmiştir.
- Kesme sıcaklığı üzerinde en etkili parametre soğutma/yağlama yöntemi olurken onu sırasıyla ilerleme ve kesme hızı takip etmiştir.

Teşekkür

Bu çalışmanın finansal giderleri Erciyes Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğü tarafından karşılanmıştır (Proje No: FBA-2018-8074).

Kaynakça

- [1] Li S, Wei Y, Shi Y, Zhu Z, Zhang D. Microstructure characteristics of Inconel 625 superalloy manufactured by selective laser melting. *J. Mater. Sci. Technol.* 2015;31:946-952.
- [2] Abioye TE, Folkes J, Clare AT. A parametric study of Inconel 625 wire laser deposition. *J. Mater. Sci. Technol.* 2013;231:2145-2151.
- [3] Paul CP, Ganesh P, Mishra SK, Bhargava P, Negi JA, Nath, AK. Investigating laser rapid manufacturing for Inconel-625 components. *Opt. Laser Technol.* 2007;39(4): 800-805.
- [4] Shankar V, Rao KBS, Mannan SL. Microstructure and mechanical properties of Inconel 625 superalloy. *J. Nucl. Mater.* 2001;288(2-3);222-232.
- [5] Lotfi M, Jahanbakhsh M, Farid AA. Wear estimation of ceramic and coated carbide tools in turning of Inconel 625: 3D FE analysis. *Tribol. Int.* 2016;99:107-116.
- [6] Ramanujam R, Venkatesan K, Saxena V, Pandey R, Harsha T, Kumar G. Optimization of machining parameters using fuzzy based principal component analysis during dry turning operation of Inconel 625—A hybrid approach. *Procedia Eng.* 2014;97:668-676.
- [7] Jahanbakhsh M, Akhavan Farid A, Lotfi M. Optimal flank wear in turning of Inconel 625 super-alloy using ceramic tool. *Proc. Inst. Mec. Eng., Part B: J. Eng. Manuf.* 2018;232(2):208-216.
- [8] Xavior MA, Adithan M. Determining the influence of cutting fluids on tool wear and surface roughness during turning of AISI 304 austenitic stainless steel. *J. Mater. Process. Technol.* 2009;209(2):900-909.
- [9] De Chiffre L. Function of cutting fluids in machining. *Lubr. Eng.* 1988;44:514-518.
- [10] Soković M, Mijanović K. Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. *J. Mater. Process. Technol.* 2001;109(1-2):181-189.
- [11] Shen B, Shih AJ, Tung SC. (2008). Application of nanofluids in minimum quantity lubrication grinding. *Trib. Trans.* 2008;51(6):730-737.
- [12] Sharma AK, Tiwari AK, Dixit AR. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. *J. Clean. Prod.* 2016;127:1-18.
- [13] Nguyen TK, Do I, Kwon P. A tribological study of vegetable oil enhanced by nano-platelets

- and implication in MQL machining. *Int. J. of Precis. Eng. and Manuf.* 2012;13(7):1077-1083.
- [14] Yıldırım ÇV. Experimental comparison of the performance of nanofluids, cryogenic and hybrid cooling in turning of Inconel 625. *Tribol. Int.* 2019;137:366-378.
- [15] Sharma VS, Dogra M, Suri NM. Cooling techniques for improved productivity in turning. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 2009;49(6):435-453.
- [16] Samuel J, Rafiee J, Dhiman P, Yu ZZ, Koratkar N. Graphene colloidal suspensions as high performance semi-synthetic metal-working fluids. *J. Phys. Chem. C*, 2011;115(8):3410-3415.
- [17] Raju RA, Andhare A, Sahu NK. (2017). Performance of multi-walled carbon nanotube-based nanofluid in turning operation. *Mater. Manuf. Process.* 2017;32(13):1490-1496.
- [18] Sharma P, Sidhu BS, Sharma J. Investigation of effects of nanofluids on turning of AISI D2 steel using minimum quantity lubrication. *J. Clean. Prod.* 2015;108: 72-79.
- [19] Hegab H, Kishawy H. Towards sustainable machining of Inconel 718 using nano-fluid minimum quantity lubrication. *J. Manuf. Materials Process.* 2018;2(3):50-58.
- [20] Hegab H, Kishawy HA, Gadallah MH, Umer U, Deiab I. On machining of Ti-6Al-4V using multi-walled carbon nanotubes-based nano-fluid under minimum quantity lubrication. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 2018;97(5-8):1593-1603.
- [21] Devendiran DK, Amirtham VA. (2016). A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016;60:21-40.
- [22] İç YT, Duran H, Keçeci B, İlik E, Bilgiç B. Çok yanıtli Taguchi eniyilemesine yönelik bir bilgisayar uygulamasının geliştirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 2016;19(3):311-323.
- [23] Rajeesh J, Balamurugan R, Balachandar K. Process parameter optimization of friction stir welding of aluminium 2014-T651 alloy using Taguchi technique. *J. Eng. Sci. Technol.* 2018;13(2):515-523.
- [24] Şirin Ş, Kıvak T. Performances of different eco-friendly nanofluid lubricants in the milling of Inconel X-750 superalloy. *Tribol. Int.* 2019;137:180-192.
- [25] Tawfik MM. Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2017;75:1239-1253.
- [26] Klocke F, Eisenblätter, G. (Dry cutting. *Cirp Annals.* 1997;46(2):519-526.