



Ti-6Al-4V Alaşımının Tornalanmasında Minimum Miktarda Yağlama (MMY) Yöntemi İle Kesme Sıvısı Uygulamanın İşlenebilirliğe Etkilerinin Araştırılması

Investigation of the Effects of Cutting Fluid Application on Machinability by Using the Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method in Turning Ti-6Al-4V Alloy

Kanay Zeyrek¹ , Ali Osman Er*¹ 

¹Kırıkkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 71450, Kırıkkale, TÜRKİYE

Başyuru/Received: 01/04/2021

Kabul / Accepted: 30/05/2021

Çevrimiçi Basım / Published Online: 18/06/2021

Son Versiyon/Final Version: 18/06/2021

Öz
Ti6Al4V alaşımı kullanım yerinde avantaj sağlayacak yüksek sertlik ve aşınma dayanımı, ısıl direnç gibi özelliklere sahip olması sebebiyle talaşlı imalatla şekillendirme işlemlerinde kesici takım malzemelerinde ciddi manada güçlükler çıkarmaktadır. Bu sebeple kesici takım ve iş parçası arasındaki etkileşimi olabildiğince en aza indirmek gerekmektedir. Hali hazırda sektörde bunu sağlayabilmek için geleneksel kesme sıvısı yöntemi kullanılmaktadır. Fakat bu durum bize maliyet ve insan sağlığı gibi çeşitli sıkıntılar olarak geri dönmektedir. Yapılan bu deneysel çalışmada, Ti6Al4V alaşımı TiAlN kaplı kesici takımla önce kesme sıvısı kullanılmadan tornalanmış, daha sonra karşılaştırma yapmak için aynı kesme parametreleriyle MMY (MQL) sistemin içerisine ticari bitkisel bazlı kesme sıvısı eklenerek tornalamaya tabi tutulmuştur. Deney sonuçları kesme kuvveti, sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğü cinsinden karşılaştırılmış ve MMY işleme yönteminin kuru işlemeye kıyasla performans farklılıkları hesaplanmıştır. Kesme kuvvetinde, sıcaklıkta ve yüzey pürüzlülüğündeki fark oranları değişen işleme değişkenleri ile sırasıyla %50, %90 ve % 67'ye varan oranlarda azalmaktadır. İşleme değişkenlerinin kesme kuvvetine etki oranları, kesme derinliğinde azalırken, ilerleme ve kesme hızında artmaktadır. Sıcaklıktaki etki oranlarındaki değişim ise, ilerleme ve kesme derinliğindeki oran artarken, kesme hızının etkisi azalmaktadır. Yüzey pürüzlülüğüne ilerleme değerinin etkisi artarken, kesme derinliği ve kesme hızının etkisi azalmaktadır.

Anahtar Kelimeler

“Minimum Miktarda Yağlama(MMY), Ti6Al4V Alaşım, Tornalama, Kesme Kuvveti, Sıcaklık, Yüzey Pürüzlülüğü”

Abstract

Ti6Al or ASTM Grade 5, Ti-6Al-4V alloy is one of the most widely used titanium alloys in aerospace, automotive and biomechanical applications. This alloy creates serious difficulties in the materials of the cutting tool due to its high hardness and abrasion resistance and thermal resistance. For these reasons, it is necessary to minimize the interaction between the cutting tool and the workpiece as much as possible. The conventional coolant method is currently used in the industry to achieve this. However, this situation comes back to us as various problems such as cost and human health. In this experimental study, MQL system was used instead of the traditional method of machining Ti-6Al-4V alloy with TiAlN coated cutting tool and turning was performed by adding commercial vegetable-based cutting fluid into the system. Experiments were repeated by dry processing method for comparison. The experimental results were compared in terms of cutting force, temperature and surface roughness, and the performance differences of the MQL machining method compared to dry machining were calculated. The difference rates in cutting force, temperature and surface roughness decrease up to 50%, 90% and 67%, respectively, with varying processing variables. While the effect ratios of machining variables on the cutting force decreases with MQL at depth of cut, they increase in feed rate and cutting speed. On the other hand, the change in the effect rates in temperature, the effect of the feed rate and cutting depth increases with MQL, while the effect of the cutting speed decreases. While the effect of the feed rate on the surface roughness increases with MQL, the effect of cutting depth and cutting speed decreases.

Key Words

“Minimum Quantity Lubrication(MQL), Ti6Al4V Alloy, Turning, Cutting Force, Temperature, Surface Roughness”

1. Giriş

Talaşlı imalat uygulamalarında özellikle kesme bölgesinde fazla sıcaklığın oluştuğu uygulamalarda kesme sıvılarının faydası yadsınmaz. İmalat işlemlerinde kesme sıvıları; kesme derinliği, ilerleme, kesme hızı gibi işleme parametrelerinin yüksek olduğu uygulamalarda; yüzey pürüzlülüğü, sıcaklık, kesme kuvveti ve takım aşınması gibi işlenebilirlik parametreleri üzerinde önemli bir rol oynar. Çevresel felaketlerin her geçen gün daha fazla yaşandığı son yıllarda, imalat sektörü, diğer tüm alanlarda olduğu gibi sürdürülebilirliği önemsemektedir (D. Fratila, 2010). Fakat kesme sıvıları ise talaşlı imalatta sürdürülebilirliği olumsuz etkileyen faktörlerin başında gelmektedir. Sürdürülebilirlik ekolojik, toplumsal ve ekonomik açıdan değerlendirilmektedir. Kesme sıvısı kullanımı yukarıda belirttiğimiz üç ana başlık dikkate alınarak değerlendirildiğinde, toplam maliyeti arttırmakla kalmayıp özellikle insan sağlığına ve çevreye zarar vermektedir. Bu nedenle geleneksel kesme yöntemlerine alternatif olarak çeşitli işleme yöntemleri araştırılmıştır ve araştırmalar sürdürülebilirliği sağlamak için devam etmektedir.

Araştırmaların yoğunlaştığı yöntemler arasında MMY-MQL (Minimum Miktarla Yağlama - Minimum Quantity Lubrication) ilk sıralarda gelir. MMY sayesinde kesme sıvısı tüketimi, yani toplam maliyet azalmaktadır. Bunun yanı sıra çeşitli çalışmalarda işleme parametreleri ve işlenebilirlik konusunda da iyi yönlü iyileşme gözlemlenmiştir. MMY sisteminin çalışmasında aynı zamanda basınçlı hava da rol oynadığı için, bu basınçlı hava aracılığıyla kesici takım ve malzeme arasındaki talaşlar uzaklaştırılarak oluşan ısının azalmasına yardımcı olduğu belirtilmektedir.

Khan vd. (2009) tarafından yapılan çalışmada, MMY sistemi ile deneysel olarak çalışılmış bu yöntemde bitkisel yağ bazlı kesme sıvısı kullanılmışlardır. İş parçası olarak düşük alaşımlı AISI 9310 çelik kullanmış ve tormalama işlemine tabi tutmuşlardır. Sonuç olarak takım aşınmasındaki azalmanın, yüzey kalitesini ve kesici takımın ömrünü arttırdığını gözlemlemişlerdir. Buna ek olarak MMY'in sağlık açısından daha iyi ve çevre dostu olduğundan, hem işlenebilirlik açısından avantajlı hem de sürdürülebilir bir yöntem olduğunu belirtmişlerdir.

Marques vd. (2011) yaptıkları çalışmada, Inconel 718 iş parçasının tormalama işlemi sırasında, üç farklı kesme işlemi üzerinde yüzey bütünlüğünü, işlenebilirlik koşullarını ve kesme parametrelerine etkilerini incelemişlerdir. Çalışmadan elde ettikleri sonuç olarak, MMY sistemi kullanımının yüzey karakteristiğini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir.

Meena ve Mansori (2011) yaptıkları çalışmada delik delme işlemlerinde, kesici takımın aşınmasını düşürmek, takım ömrünü uzatmak ve sürdürülebilirlik doğrultusunda soğutucu akışkan tüketimini en aza miktara indirmeyi amaçlamışlardır. Sertleştirilmiş sünek döküm (ADI) malzemenin, TiAlN tungsten kaplamalı karbür takım ile kuru ve MMY yöntemi kullanılarak işlenmesi incelemişlerdir. Sonuçlar, MMY ile işlemede takım aşınmasında, kesme kuvvetinde ve yüzey pürüzlülüğünde azalma olduğunu, kesme bölgesindeki sıcaklıklarda düşüş olduğu gözlemlenmiştir.

Basmacı (2012) yaptığı çalışmada kesme parametrelerinin; kesme kuvvetleri, sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini tormalamada, MMY ve kuru işleme yöntemlerini karşılaştırılarak incelemiştir. MMY sisteminin talaş kaldırma esnasında oluşan sıcaklık, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini, önemli oranda takım talaş ara yüzünde sürtünme katsayısını azaltarak bu değerlerin düşürülmesine katkı sağladığını gözlemlemiştir. Hastelloy C-22 malzemesinin işlenmesinde çok düşük ortalama pürüzlülük değerlerine ulaşıldığı ve daha sonra herhangi bir işleme gerek kalmayacak şekilde yüzey kalitesi elde edildiğini belirlemiştir.

Hadad ve Sadeghi (2013) tarafından yapılan çalışmada, AISI 4140 çelik alaşımlı iş parçasının torna tezgahında deneysel olarak işlenmesini incelemişlerdir. MMY işleme yönteminin nozul lokasyonunun ve kesme parametrelerinin sonuca nasıl etki ettiğini gözlemlemişlerdir. Kuru işleme ile MMY işleme yöntemi arasında bir kıyaslama yaptıklarında ise kesme performansı, takım ömrü ve yüzey kalitesini arttırdığını belirtmişlerdir.

Sarıkaya vd. (2014) AISI 1050 çeliğinin tormalanmasını kuru, ıslak ve MMY ile gerçekleştirerek yüzey pürüzlülüğüne etkilerini incelemişlerdir. Yüzey pürüzlülüğü açısından en iyi sonucu 120ml/h akış hızlı MMY, 200 m/dak kesme hızında, 0,07mm/devir ilerleme ve 1,2 mm kesme derinliğinde elde etmişlerdir. Yüzey Pürüzlülüğüne en fazla etkileyen faktörler %68,68 ile ilerleme, %16,98 ile soğutma tipi, %9,98 ile kesme hızı ve %1,09 ile kesme derinliği olmuştur.

Ekinovic vd. (2015) yaptıkları çalışmada, St52 çeliğinin tormalamasında kuru kesme ve MMY sisteminin içerisine koydukları yağ ve suyun etkilerini kıyaslamışlardır. Kesme kuvvetlerinin kuru işlemeye oranla %17 oranına kadar azaldığını gözlemlemişlerdir. MMY sisteminin içerisine koydukları yağın 10 ml/h ve suyun 1,7 l/h olarak belirleyip yaptıkları deneylerde minimum kesme kuvvetini elde ettiklerini gözlemlemişlerdir.

Rahim vd. (2015) AISI 1045 çeliğinin işlenmesinde kesme sıvısı olarak MMY tekniği altında sentetik ester kullanmışlardır. Deneysel çalışmalarında kesme kuvveti, takım-talaş temas uzunluğu, kesme sıcaklığı, talaş kalınlığı açısından MMY tekniğini kuru işleme ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak kesme sıcaklığında, MMY' nin kuru işlemeye kıyasla %10 ila %30 arasında azalma tespit etmişler ve böylece takım ömrünü iyileştirdiğini ve sürdürülebilir üretime katkıda bulunduğunu gözlemlemişlerdir. Kesme kuvvetinde ise, MMY' in kuru işlemeye kıyasla %5 ila %28 arasında azalma tespit etmişlerdir. Bunun nedenini; düşük sürtünme katsayısı ve kesme bölgesine giren daha küçük parçacık boyutuna sahip kesme sıvısı olduğunu belirtmişlerdir.

Moura vd. (2015) Ti64 alaşımını kuru, ıslak ve MMY sistemi altında tormalama işlemine tabi tutmuşlardır. Katı yağlayıcılar kullanıldığında ıslak ve kuru işlemeye kıyasla yüzey kalitesinde iyileşme gözlemlemişlerdir. Katı yağlayıcıların kullanılmasının takım

ömrünün artmasına neden olduğu tespit etmişlerdir. Katı yağlayıcıların talaş ve takım ara yüzüne nüfuz edebilmesi sayesinde hem soğutma hem de yağlama fonksiyonlarını yerine getirdiği için takım ömrünü attırdığını belirtmişlerdir. Katı yağlayıcıların kullanılmasının, kuru ve ıslak işlemeyle kıyasla kesme kuvvetlerini azalttığını, sürtünme etkilerini en aza indirdiğini belirtmişlerdir.

Sharma vd. (2016) AISI 1040 çeliğinin tormalanmasında çeşitli soğutma sıvısı performanslarını kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve aşınma cinsinden karşılaştırmıştır. Deneyleri kuru, konvansiyonel soğutma sıvısı, MMY ile normal soğutma sıvısı ve MMY ile nano partiküllü soğutma sıvısı kullanarak gerçekleştirmiştir. Sonuç olarak MMY nano, kesme kuvveti değerinde, kuru kesmeye göre ~ % 59,1, konvansiyonel soğutma sıvısına göre ~%29,2 ve MMY normal soğutma sıvısına göre ~%28,6 oranında azalmıştır. Aşınma sırasıyla ~ % 63,9, ~%44,9 ve ~%5,27, yüzey pürüzlülüğü ise ~ %47,8, ~%29,1 and ~%25,5 oranlarında azalmıştır.

Nouioua vd. (2017) DIN X210Cr12 takım çeliğini kuru, ıslak ve MMY ortamda tormalamaya tabi tutmuşlar ve değerlendirmeyi yüzey tepki metodolojisini (RSM-Response Surface Methodology) kullanarak yapmışlardır. Aynı zamanda yapay sinir ağlarını (ANN-Artificial Neural Network) kullanarak tahminde bulunmuşlardır. Varyans analizi neticesinde kesme kuvveti için yüzde etki oranlarını sırasıyla kuruda kesme hızı 1,14, ilerleme 20,66 ve kesme derinliği 72,86, ıslakda kesme hızı 0,71, ilerleme 19,66 ve kesme derinliği 75,81 ve MMY'de ise kesme hızı 0,31, ilerleme 21,57 ve kesme derinliği 72,30 olarak bulmuşlardır. Yüzey pürüzlülüğü için ise yüzde etki oranlarını sırasıyla kuruda kesme hızı 0,15, ilerleme 40,46 ve kesme derinliği 0,67, ıslakda kesme hızı 0,74, ilerleme 52,40 ve kesme derinliği 0,65 ve MMY'de ise kesme hızı 0,66, ilerleme 41,04 ve kesme derinliği 2,27 olarak bulmuşlardır.

Elbah vd. (2019) yaptıkları çalışmalarda AISI 4140 düşük alaşımlı çeliğin sert tormalanmasında, çeşitli işleme ortamlarındaki performansların yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti açısından değerlendirmelerini sunmuşlardır. MMY işlemenin kıyaslanabilmesi açısından kuru ve geleneksel işlemeyle aynı parametrelerde deneyleri tekrarlamışlardır. Daha iyi yüzey kalitesi için optimum parametrelerin, kuru ve MMY işlemleri kullanırken yüksek kesme hızında ve düşük ilerleme hızında elde edildiğini belirtmişlerdir.

Yücel vd. (2019) AA2024 Alaşımının tormalanmasında MMY parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığı üzerine etkilerini araştırmışlardır. En iyi sonuçları 100 ml/s debi, 8 bar basınç ve %0,6 konsantrasyon oranı ile elde etmişlerdir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğüne en fazla etki eden parametrenin %40,58 ile basınç olduğunu ve sıcaklığa en fazla etki eden parametrenin ise %28,96 ile konsantrasyon oranı olduğunu tespit etmişlerdir.

Gajran. (2020) Ti6Al4V alaşımının tormalanmasında kuru, MMY ve kroyojenik MMY yöntemlerini karşılaştırmıştır. Kuru kesmeye göre kroyojenik MMY ile kesme kuvvetinde 27% ve yüzey pürüzlülüğünde %46 azalma gözlemlenmiştir.

Yapılan bu çalışmalar incelendiğinde Minimum Miktarla Yağlamanın (MMY) birçok malzeme için uygulandığı ve olumlu sonuçlar verdiği gözükmektedir. Ti6Al4V malzemesi kesme bölgesinde sıcaklık oluşturması sebebiyle en fazla problem yaşanan ve günümüzde savunma, uzay ve biyomedikal sanayiinde kullanımı her geçen gün artan önemli bir malzemedir (Arrazola,2009). Ti6Al4V alaşımı için MMY ile işlenmesi ile ilgili yapılan çalışmalar (Pervaiz,2019) incelendiğinde, işlenebilirliğin artırılması üzerine Ti6Al4V alaşımının tormalanması ile ilgili yapılan çalışmaların çok kısıtlı sayıda olduğu gözükmektedir.(Arrazola et al., 2009 ; Moura et al., 2015)

Kesme bölgesinde oluşan sıcaklığı, kuvveti ve parçanın yüzey pürüzlülüğünü bir arada inceleyerek işlemeyi ayrıntılı olarak analiz eden ve özellikle etki oranlarını araştıran bir çalışmanın uygulayıcılara ve literatüre katkısı olacağı düşünülmektedir.

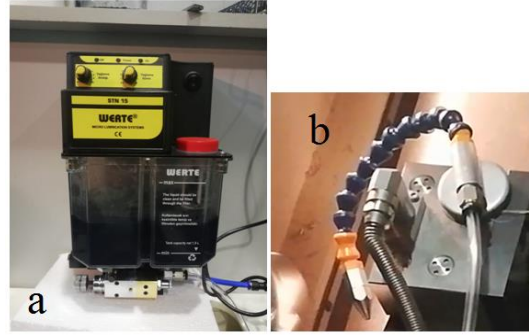
2. Materyal ve Metod

DeneySEL çalışmalarda, iş parçalarının tormalanması için Goodway GLS-150 marka CNC tormalama merkezi kullanılmıştır. Uzunluğu 130 mm, çapı ise 30 mm olan Ti-6Al-4V alaşımı işlenmiştir. Tormalama deneyleri, kuru ve MMY yönteminin birbirleriyle kıyaslanabilmesi adına aynı kesme parametreleri ile tekrarlanmıştır. Ti6Al4V alaşımının teknik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Deneylerde işleme uzunluğu 30 mm olarak belirlenmiştir.

Tablo 1. Ti-6Al-4V Teknik Özellikleri

Ti-6Al-4V Bileşenleri (% Ağırlıkça)		Ti-6Al-4V Teknik Özellikleri	
Al	6	Yoğunluk (g/cm ³)	4,43
Fe	Maks. 0,25	Erime Noktası (°C)	1649
O	Maks. 0,2	Isıl İletkenlik (W/mK)	7,2
Ti	90	Elastisite Modülü (GPa)	114
V	4	Maksimum Mukavemet (MPa)	1000
		Akma Mukavemeti (MPa)	880

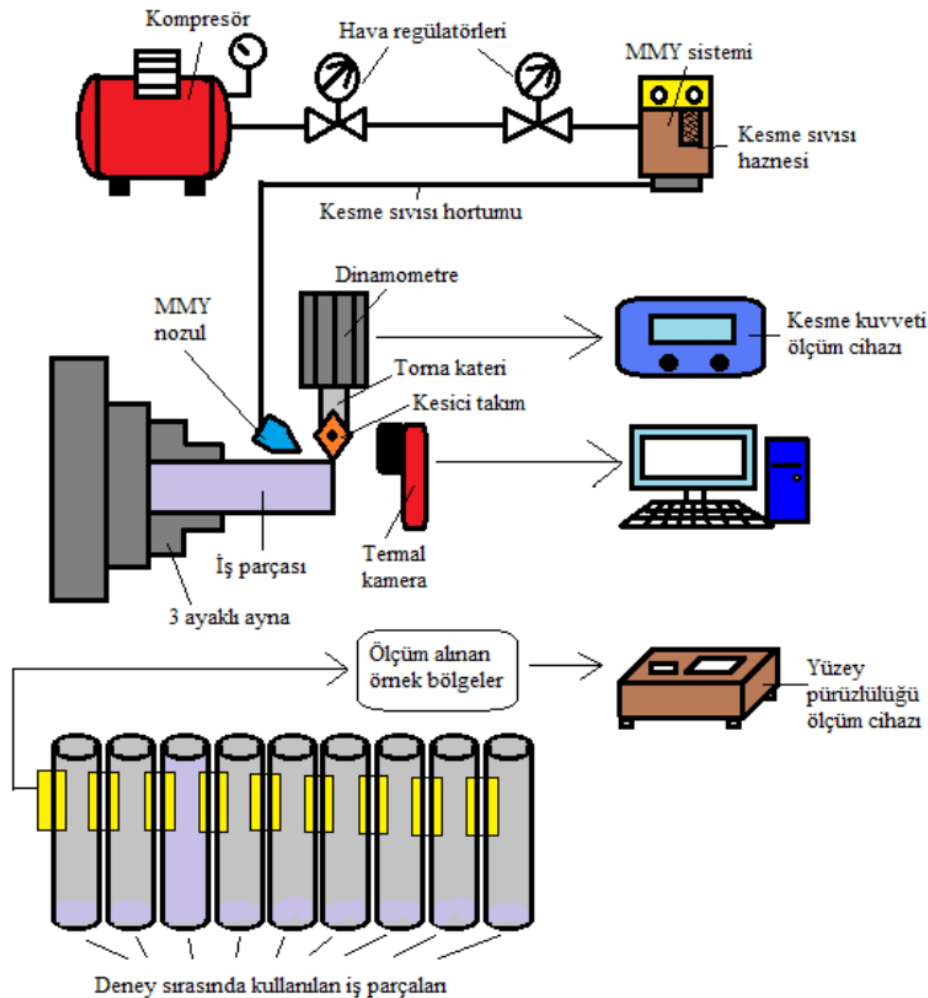
MMY sistemi için Werte Mikro STN 15 marka (Şekil 1) potansiyometre kontrollü pulvarize yağlama sistemi ve nozul ucu kullanılmıştır. Deneylerin yapılması sırasında yağlama aralığı ve yağlama süresi 0,1 sn., hava basıncı da 4 bar olarak belirlenmiştir.



Şekil 1. (a)MMY Sistemi ve (b) MMY Sistemi Nozul Ucu

MMY sisteminde Trim E950 kesme sıvısı kullanılmıştır. Çevreye dostu, yeni yağ teknolojisi ve üst sınıf yağlayıcı katıkların harmanlanmasıyla elde edilmiş bitkisel bazlı metal işleme sıvısıdır. Parlama Noktası konsantre halde 160°C'nin üstündedir. Tipik çalışma aralığı pH değeri 8,8 - 9,4 arasındadır. Kesme sıvısının refraktometre katsayısı 1,0'dır. İş parçasının tornalanmasında Sandvik marka CNMG 12 04 08-SM 1105 kalite PVD TiAlN kaplı kesici uç ve DCLNR 2020K 12 kodlu torna kateri kullanılmıştır. Kesme kuvvetinin ölçülmesi için Kistler marka 9257b model dinamometre kullanılmıştır. Sıcaklık ölçümleri için Flir marka İ50 model termal kamera kullanılmıştır. Termal kamera doğruluk oranı $\pm\%2$, spektral aralığı 7,5 ila 13 μm ve 2,3 MP kamera çözünürlüğüne sahiptir. Sıcaklık ölçümünde, emisyon 0,8 ve kamera ölçüm aralığı olarak 0-350 °C kullanılmıştır. Yüzey Pürüzlülüğü ölçmek için ise Mitutoyo marka SJ-201 model yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Deneyde kullanılan tezgah ve ölçüm cihazlarını gösteren deney düzeneği şematik gösterimi Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneği şematik gösterimi

Deneylerde işleme parametrelerinin sonuca etkilerinin karşılaştırılması için Tablo 2’de görüldüğü üzere 3 farklı kesme hızı, 3 farklı ilerleme ve 3 farklı kesme derinliği değerleri kullanılmıştır. Kesme hızı 60, 90,120 m/dak, ilerleme 0,05 - 0,15 - 0,25 mm/dev ve kesme derinlikleri 0,5, 1, 1,5 mm olarak belirlenmiştir.

Tablo 2. İşleme parametreleri

PARAMETRELER	SEVİYELER		
	SEVİYE 1	SEVİYE 2	SEVİYE 3
KESME HIZI m/dak	60	90	120
İLERLEME mm/dev	0,05	0,15	0,25
KESME DERİNLİĞİ mm	0,5	1	1,5

Bu parametrelerin hepsi değişerek deney yapıldığında, toplamda her bir işleme yöntemi için 27 deney yapacağından dolayı, hem maliyetten hem de süreden tasarruf edebilmek için Taguchi metodu ortogonal dizisi kullanılmıştır. Taguchi metodunda 3 seviye ve 3 faktör uygulayacağımız için L9 dizisi kullanılmıştır. Bu dizinin faktörleri ve seviyeleri aşağıdaki Tablo 3’de verilmiştir. Bu metod sayesinde 27 deney yerine 9 deney yapılmıştır.

Tablo 3. Deney numaralarının faktörleri ve seviyeleri

DENEY NUMARASI	FAKTÖRLER VE SEVİYELERİ		
	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

Taguchi Metodu ve Varyans Analizi (ANOVA) değerlendirmeleri Minitab uygulaması vasıtasıyla yapılmıştır.

3. Bulgular ve Tartışma

Ti-6Al-4V alaşımı malzemenin, kuru ve MMY sistemi içerisine konulan ticari bitkisel bazlı kesme sıvısı şartları altında tornalanması esnasında işlenebilirliğin değerlendirilmesi adına kesme kuvveti ve sıcaklık kesme esnasında ve yüzey pürüzlülüğü ise kesme işleminden sonra ölçülmüştür. MMY yöntemi kullanılmasıyla işlenecek bölgeye gönderilen pulvarize kesme sıvısı/hava karışımının etkisiyle ölçülen değerlerde önemli miktarlarda değişiklikler gözlemlenmiştir. Daha sonra bu sonuçlar Minitab uygulamasında değerlendirilmeye alınmıştır. En küçük en iyi yaklaşımı uygulanarak sonuçların sinyal/gürültü oranlarına göre en optimal işleme parametreleri bulunmuştur. Ayrıca hangi işleme parametresinin sonuçlara nasıl etkideği ise varyans analizi ile tespit edilmiştir.

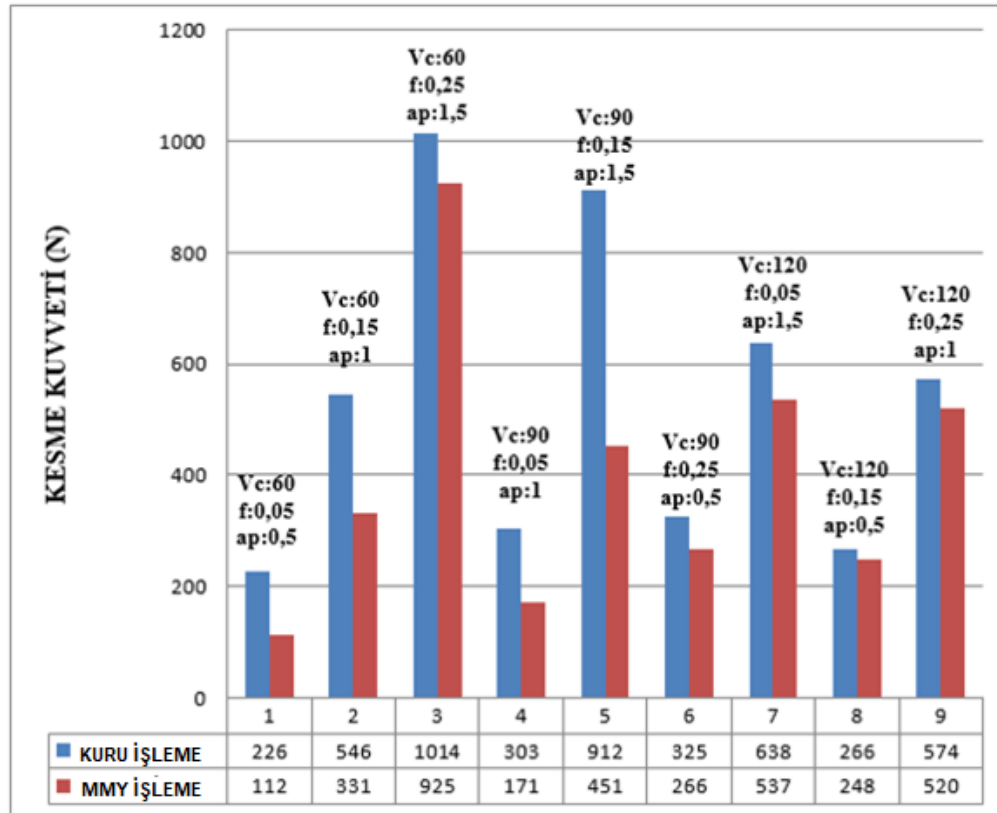
3.1. Kesme Kuvveti

Kuru kesme ve MMY sistemi ile kesme neticesinde elde edilen kesme kuvveti değerleri Tablo 4’te verilmektedir. Tablo 4’te ve Şekil 3’te görüleceği üzere kuru ve MMY ile işleme arasında ki en büyük fark % 50,55 ile 5. deneyde (kesme hızı 90 m/dak, ilerleme 0,15 mm/dev ve kesme derinliği 1,5 mm) olduğu, en az fark ise % 6,77 ile 8. deneyde (kesme hızı 120 m/dak, ilerleme 0,15 mm/dev, kesme derinliği 0,5 mm) olduğu gözlemlenmiştir. Ti6Al4V alaşımının tornalanmasında 1 mm kesme derinliği, 0,20 mm/dev ilerleme ve iki farklı kesme hızı 130 m/dak ve 150 m/dak . yapılan çalışmada bizim bulduğumuz çalışmanın aksine MMY ile yapılan işlemede kesme kuvveti artmıştır (Moura et al., 2015). Başka malzemelerle yapılan diğer araştırmalara bakıldığında bizimle paralel sonuçların elde edildiği görülmektedir. AISI 1040 malzemesinin MMY ile tornalanmasında 0,1 mm/dev ilerleme, 96,7 m/dak kesme hızı ve 1 mm kesme derinliği için kesme kuvvetinde %57,1 azalma olduğu gözlemlenmiştir (Sharma vd., 2016).

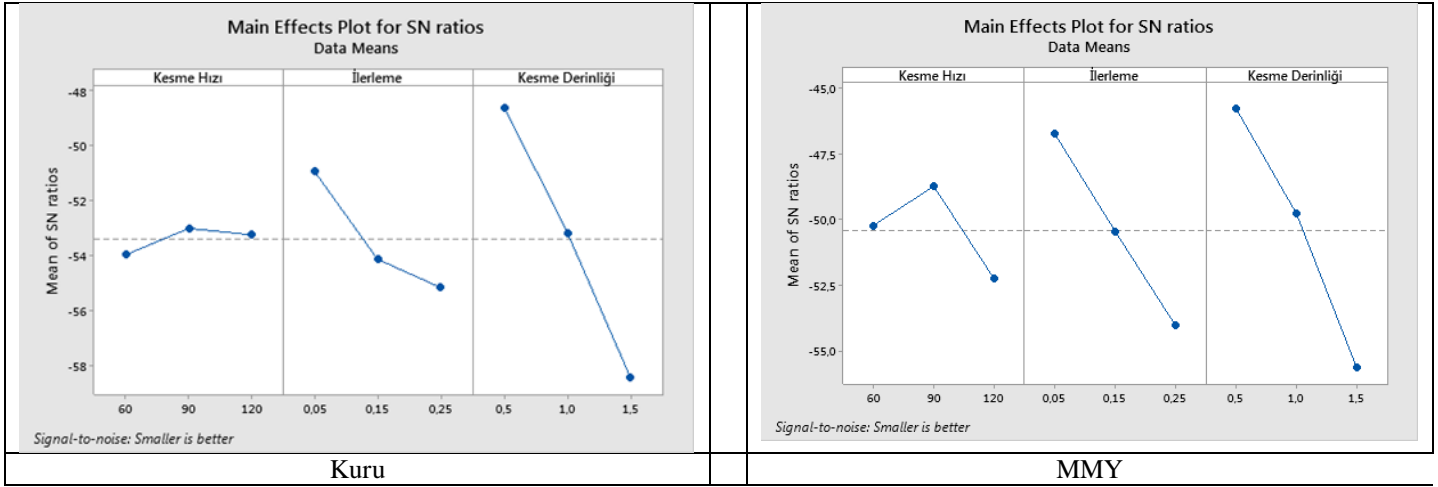
Tablo 4. Kesme Kuvveti Değerleri ve Fark yüzdesi

DENEY NUMARASI	KURU İŞLEME KESME KUVVETİ (N)	MMY İLE İŞLEME KESME KUVVETİ (N)	KESME KUVVETİ FARK ORANLARI (%)
1	226	112	50,44
2	546	331	39,38
3	1014	925	8,78
4	303	171	43,56
5	912	451	50,55
6	325	266	18,15
7	638	537	15,83
8	266	248	6,77
9	574	520	9,41

Kesme kuvveti sonuçlarında ise aşağıdaki Şekil 3'te de görüleceği üzere MMY ile işleme kuru işlemeye kıyasla çok daha düşük sonuçlar vermiştir. Burada dikkat edilecek husus MMY etkisinin işleme parametrelerine göre değişkenlik göstermesidir. MMY ile işlemede düşük işleme değişkenleri değerlerinde en düşük kesme kuvveti açığa çıkmıştır.

**Şekil 1.** Kesme Kuvveti Kıyaslama Grafiği

Taguchi metodunda kuru ve MMY işlemeye göre en küçük en iyi yaklaşımına göre en optimal değerler Şekil 4'te ve Tablo 5'te görüldüğü üzere kuru kesmede kesme hızı 90 m/dak, ilerleme 0,15 mm/dev, kesme derinliğinde ise 0,5 mm olarak sonuçlanmıştır. MMY işleme çalışmalarında Sinyal/Gürültü Oranına göre en optimal değerler kesme hızı 90 m/dak, ilerleme 0,05 mm/dev, kesme derinliği 0,5 mm olarak görülmektedir.



Şekil 2. Kuru ve MMY işlemede Kesme Kuvveti Sinyal/Gürültü Oranı grafiği

Tablo 5. Kuru ve MMY İşlemede Kesme Kuvveti Sinyal/Gürültü oranı

SEVİYE	Kuru Kesme			MMY		
	KESME HIZI	İLERLEME	KESME DERİNLİĞİ	KESME HIZI	İLERLEME	KESME DERİNLİĞİ
1	-53,98	-50,94	-48,61	-50,23	-46,75	-45,79
2	-53,02	-54,15	-53,18	-48,75	-50,46	-49,79
3	-53,26	-55,18	-58,47	-52,27	-54,05	-55,67

ANOVA sonuçlarında (Tablo 6) görüldüğü üzere Ti6Al4V alaşımının kuru işleme deneylerinde en büyük katkının %80,76 ile kesme derinliği, %15,44 ile ilerleme ve %2,72 ile kesme hızı olduğu ve deneylerin güvenilirlik oranı %98,92 olduğu görülmüştür. MMY ile işlemede deneylerinde en büyük katkının %58,83 ile kesme derinliği, %29,37 ile ilerleme ve %2,59 ile kesme hızı olduğu ve deneylerin güvenilirlik oranı %97,41 olduğu görülmüştür. Nouioua vd. (2017) X210Cr12 malzemesi ile yaptıkları benzer çalışmada MMY için kesme derinliğinin etkisini %72,30, ilerlemenin etkisini %21,57 ve kesme hızının etkisini ise %0,31 olarak bulmuşlardır. Bu oranların birbirine yakın olduğunu göstermektedir. Aradaki farkın ise malzeme farkından oluştuğu düşünülmektedir.

Tablo 6. Kuru ve MMY işlemede Kesme Kuvveti için ANOVA Etki Oranları ve güvenilirlik

Parametreler	Kuru İşleme Etki Oranı	MMY İşleme Etki Oranı
İlerleme	15,44%	29,37%
Kesme Derinliği	80,76%	58,83%
Kesme Hızı	2,72%	9,21%
Hata	1,08%	1,08%
Toplam	100,00%	100,00%
Güvenilirlik Oranı	R-sq 98,92%	R-sq 97,41%

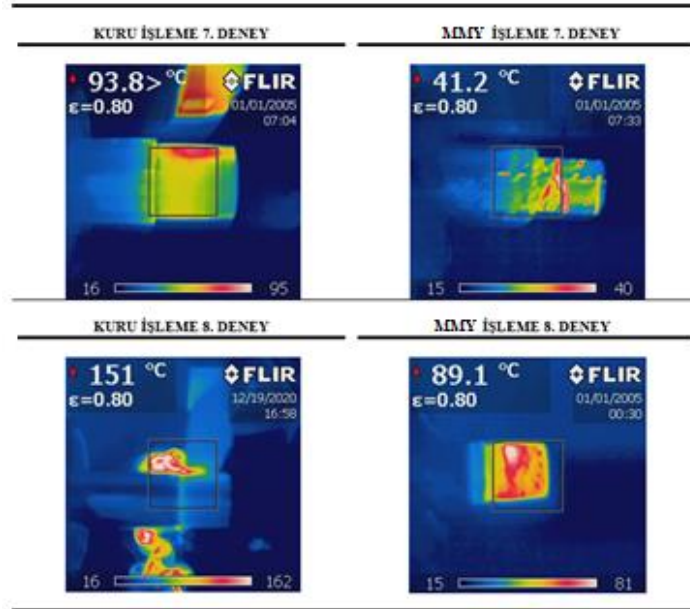
Yapılan deneysel çalışmalarda her iki işleme yönteminin işleme parametrelerinde en optimal değerler kesme hızı 90 m/dak, ilerleme 0,05 mm/dev, kesme derinliği 0,5 mm olduğu görülmüştür. ANOVA sonuçlarında ise kesme derinliği en büyük katkıyı sağlamıştır, kesme derinliğine takiben ilerleme ve kesme hızı izlemiştir. Literatürde de buna paralel sonuçlar bulunmuştur (Nouioua et al., 2017).

ANOVA analizlerinde de görüldüğü üzere kesme kuvvetine en büyük etkinin kesme derinliği olduğu ve bu etkinin kuru işlemede % 80,76 MMY ile işlemede ise % 58,83 oranında olduğu görülmüştür. MMY kullanılmasıyla kesme kuvvetine etki eden işleme parametrelerinin ANOVA etki oranında % 27,15 bir düşüş gözlemlenmiştir.

Burada dikkat edilecek husus, MMY kullanımıyla işleme değişkenlerinin kesme kuvvetine etkilerinin değiştiğinin tespit edilmesidir. Normalde kesme kuvveti hesaplamalarında kullanılan formüllerde kesme bölgesindeki sıcaklıkla ilgili bir parametre bulunmamaktadır.

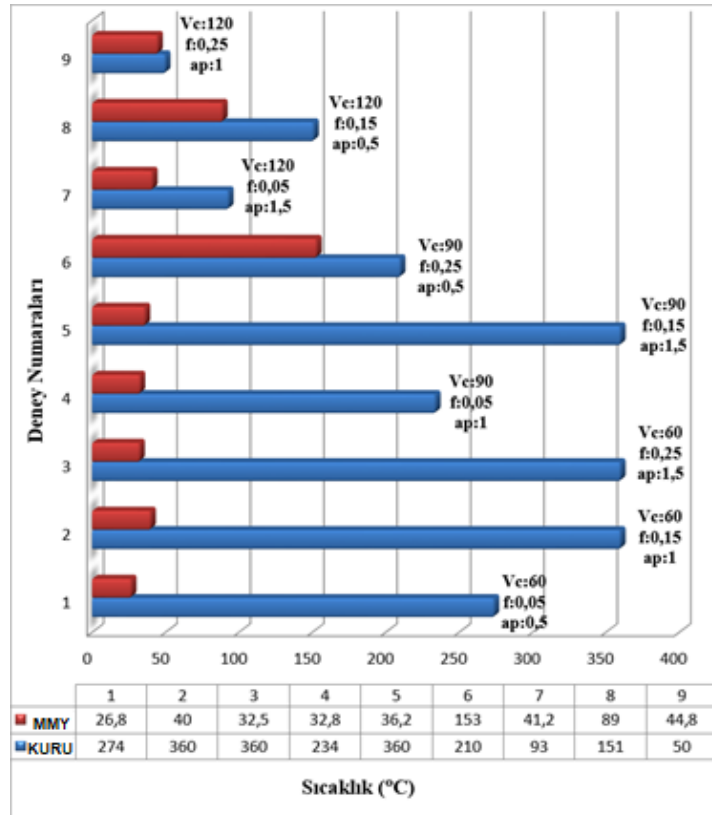
3.2. Sıcaklık

Kuru ve MMY ile işleme yöntemiyle yapılan deneylerde ortaya çıkan sıcaklık değerleri Şekil 5'te görüldüğü üzere termal kamera ile tespit edilmiştir. Aşağıdaki Şekil 5'te kuru ve MMY ile işlemede ortaya çıkan örnek sıcaklık fotoğrafları gösterilmiştir. 7. deneyde % 55,69 oranında değişim, 8. deneyde ise % 41,05 oranında bir değişim gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Kuru ve MMY İşlemede Örnek Termal Kamera Fotoğrafları

Kuru ve MMY ile işleme yöntemiyle yapılan deneylerde ortaya çıkan sıcaklık sonuçları Şekil 6'da sıcaklık grafiği şeklinde verilmiştir. Grafikten de görüleceği MMY'e geçildiği zaman sıcaklıklarda ciddi azalma gözlemlenmiştir. Daha sonra daha detaylı yorum yapabilmek için bu sonuçlar Minitab uygulamasında en küçük en iyidir yaklaşımı ile çözümlenmiştir.



Şekil 6. Sıcaklık Grafiği

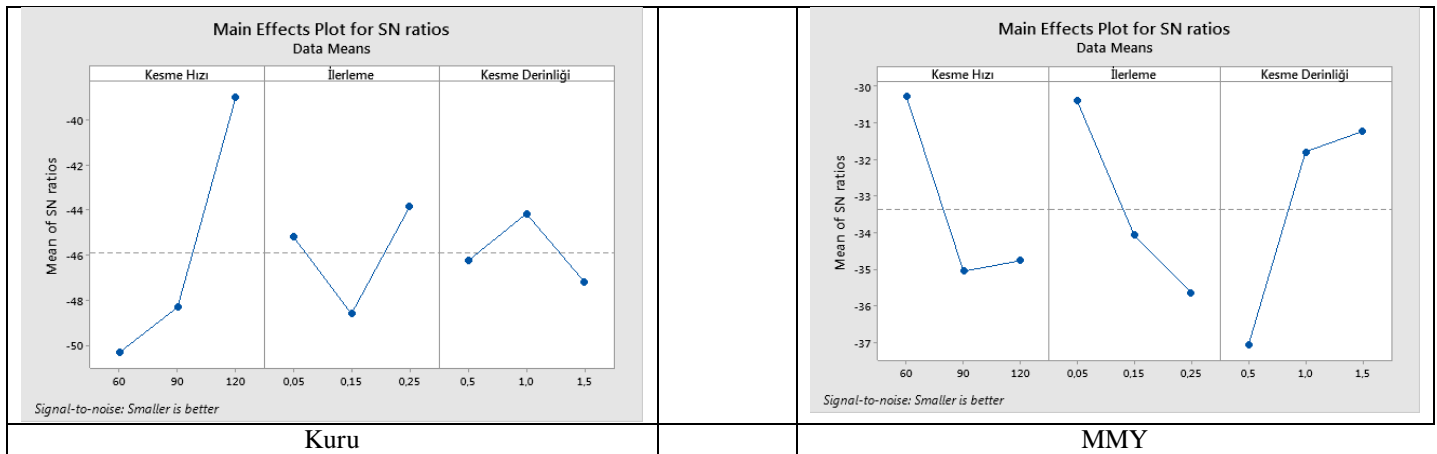
Yapılan deneylerin sonuçlarında elde edilen sıcaklık değerleri ve fark oranları Tablo 7'de verilmiştir. En çok fark 3. deneyde % 90,97 ile en az fark ise 6. deneyde % 27,14 oranında bulunmuştur. Sıcaklıkla ilgili literatürde iki farklı sonuçla karşılaşılmıştır. Birisi kuru kesme ile MMY arasındaki sıcaklık farkının maksimum 50°C olduğunu söylemektedir (Moura et al., 2015). Diğeri ise bizim çalışmamıza benzer olarak % 90 oranında azalmadan söz etmektedir (Hadad & Sadeghi, 2013). Buna ek olarak 2 tip sıcaklık ölçümü söz konusudur. Bunlardan birincisi termal kamera yardımıyla (Rahim et al., 2015), ikincisi ise ısı-çift yardımcıdır (Moura et al., 2015);

Hadad & Sadeghi, 2013). Literatür incelendiğinde ısı çift ile ölçümlerde daha yüksek kesme bölgesi sıcaklığı tespit edildiği görülmektedir. Literatürdeki ısı çifti ile elde edilen değerlerde yanlışlık olduğu düşünülmektedir. Burada bahsedilen sıcaklıklar 1000°C'ye ulaşmaktadır ki bu da malzemeler için plastik şekil verme veya operasyon sıcaklıklarının üstündedir.

Tablo 7. Farklı İşlemlerdeki Sıcaklık Sonuçları ve Fark Oranları

DENEY NUMARASI	KURU İŞLEME SICAKLIK (°C)	MMY İLE İŞLEME SICAKLIK (°C)	FARK ORANLARI (%)
1	274	26,8	90,21
2	360	40	88,88
3	360	32,5	90,97
4	234	32,8	85,98
5	360	36,2	89,94
6	210	153	27,14
7	93	41,2	55,69
8	151	89	41,05
9	50	44,8	10,4

Şekil 7'de ve Tablo 8'de görüleceği üzere Minitab uygulamasında yapılan sonuç analizlerinde kuru işleme de sıcaklık için en optimal işleme parametreleri kesme hızı 120 m/dak, ilerleme 0,25 mm/dev, kesme derinliği 1,0 mm olarak belirlenmiştir. MMY ile işleme de sıcaklık için en optimal işleme parametreleri kesme hızı 60 m/dak, ilerleme 0,05 mm/dev, kesme derinliği 1,5 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 7. Kuru ve MMY İşlemede Sıcaklık Sinyal Gürültü Oranı Grafiği

Tablo 8. Kuru ve MMY İşlemede Sıcaklık Sinyal Gürültü Oranı Tablosu

SEVİYE	Kuru Kesme			MMY		
	KESME HIZI	İLERLEME	KESME DERİNLİĞİ	KESME HIZI	İLERLEME	KESME DERİNLİĞİ
1	-50,34	-45,17	-46,26	-30,28	-30,39	-37,08
2	-48,32	-48,61	-44,16	-35,06	-34,07	-31,79
3	-38,98	-43,85	-47,21	-34,77	-35,65	-31,24

Kuru ve MMY işlemedeki sıcaklık değerlerinin Anova sonuçları karşılaştırmalı olarak incelemek için yan yana Tablo 9'da verilmiştir. Kuru kesme için etki oranları kesme hızı için % 79,12, ilerleme için % 13,71 ve kesme derinliği için % 6,07 olarak hesaplanmıştır. Model özetinde yapılan çalışmanın güvenilirlik oranının % 98,90 olduğu belirlenmiştir. MMY ile işlemedeki sıcaklık değerlerinin için etki oranları, kesme hızı için % 19,03, ilerleme için % 20,82 ve kesme derinliği için ise % 39,86 olarak hesaplanmıştır. MMY ile işleme yöntemiyle yapılan deneylerde ortaya çıkan sıcaklık değerlerinin güvenilirlik oranı %79,71 çıkmıştır.

Tablo 9. Kuru ve MMY İşlemede Sıcaklık için ANOVA

Parametreler	Kuru İşleme Etki Oranı	MMY İşleme Etki Oranı
İlerleme	13,71%	20,82%
Kesme Derinliği	6,07%	39,86%
Kesme Hızı	79,12%	19,03%
Hata	1,10%	20,29%

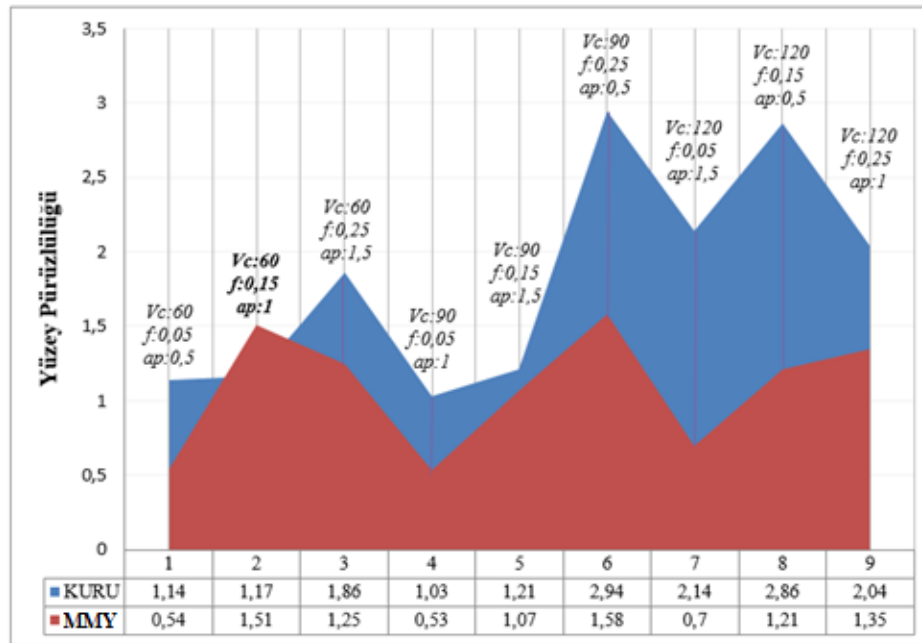
Tablo 9 (devam). Kuru ve MMY İşlemede Sıcaklık için ANOVA

“	Kuru İşleme	MMY İşleme
Parametreler	Etki Oranı	Etki Oranı
Toplam	100,00%	100,00%
Güvenilirlik Oranı	R-sq 98,90%	R-sq 79,71%

Sonuç olarak, MMY kullanımıyla işleme değişkenlerinin sıcaklığa etkilerinin değiştiğinin tespit edilmiştir. Normalde sıcaklık oluşumuna kesme hızı en fazla etki ederken MMY ile işlemede sıcaklığa en fazla kesme derinliğinin etki ettiği görülmektedir.

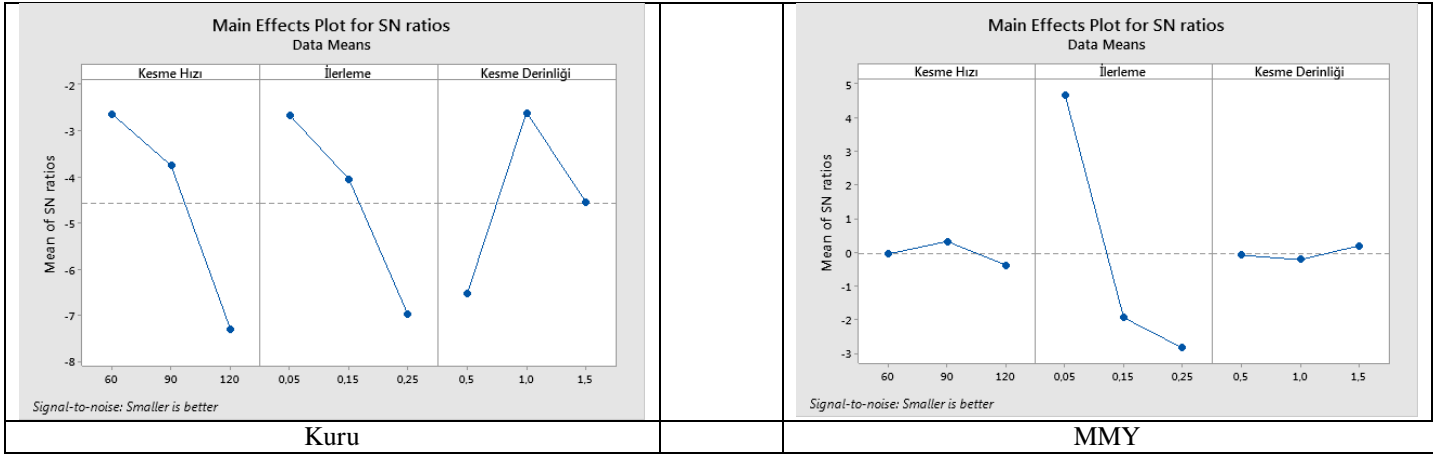
3.3. Yüzey Pürüzlülüğü

Yapılan deneylerin sonuçlarında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri Şekil 8’de verilmiştir. Kuru kesme ve MMY pürüzlülük değerleri ve kıyaslama oranları Tablo 10’da verilmiştir. En çok fark 7. deneyde % 67,28, en az fark ise 5. deneyde % 11,57 oranında bulunmuştur. Ayrıca 2. deneyde kuru kesme ile daha iyi yüzey pürüzlülüğü değeri elde edilmiştir. Literatüre bakıldığında kuru kesmede 1,20 ila 1,60 μm arasında değişen yüzey pürüzlülüğü değerlerinin 0,80 ila 1,10 μm ’ye gerilediği yani benzer oranlarda değişim gözlemlenmektedir.(Gajrani, 2020)

**Şekil 8.** Yüzey Pürüzlülüğü Kıyaslama Grafiği**Tablo 10.** Farklı İşlemelerdeki Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları ve Fark Oranları

DENEY NUMARASI	KURU İŞLEME YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ	MMY İLE İŞLEME YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ	YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ FARK ORANLARI (%)
1	1,14	0,54	52,63
2	1,17	1,51	-29,05
3	1,86	1,25	32,79
4	1,03	0,53	48,54
5	1,21	1,07	11,57
6	2,94	1,58	46,25
7	2,14	0,7	67,28
8	2,86	1,21	57,69
9	2,04	1,35	33,82

Şekil 9 ve Tablo 11’ de görüleceği üzere Minitab uygulamasında yapılan sonuç analizlerinde kuru işleme de yüzey pürüzlülüğü için en optimal işleme parametreleri kesme hızı 60 m/dak, ilerleme 0,05 mm/dev ve kesme derinliği 1,0 mm olarak belirlenmiştir. MMY işlemede yüzey pürüzlülüğü için en optimal işleme parametreleri ise kesme hızı 90 m/dak, ilerleme 0,05 mm/dev ve kesme derinliği 1,5 mm olarak belirlenmiştir.



Şekil 9. Kuru ve MMY İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü Sinyal Gürültü Oranı Grafiği

Tablo 11. Kuru ve MMY İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü Sinyal Gürültü Oranı Tablosu

SEVİYE	Kuru Kesme			MMY		
	KESME HIZI	İLERLEME	KESME DERİNLİĞİ	KESME HIZI	İLERLEME	KESME DERİNLİĞİ
1	-2,631	-2,668	-6,544	-0,05520	4,65488	-0,09224
2	-3,760	-4,049	-2,604	0,31789	-1,94097	-0,22391
3	-7,309	-6,983	-4,551	-0,38811	-2,83934	0,19072

Kuru ve MMY işlemedeki yüzey pürüzlülük değerlerinin Anova sonuçlarını incelenmiş ve etki oranları ve güvenilirlik değerleri Tablo 12'de verilmiştir. Kuru kesme için etki oranları kesme hızı için % 32,34, ilerleme için % 24,99 ve kesme derinliği için % 28,54 olarak hesaplanmıştır. Kuru kesme için güvenilirlik oranının % 85,86 olduğu hesaplanmıştır. MMY işlemedeki yüzey pürüzlülük değerlerine etki oranları incelendiğinde kesme hızı için % 0,19, ilerleme için % 86,34 ve kesme derinliği için % 2,03 olarak hesaplandığı görülmektedir. Güvenilirlik oranı ise % 88,57 olarak hesaplanmıştır. AISI 1050 ile yapılan benzer çalışmada (Sarıkaya,2014) yüzey pürüzlülüğüne en fazla etkileyen faktörün %68,8 ile ilerleme olduğu belirtilmiştir. Bu sonuçların benzer ama oranların malzemeden malzemeye değiştiğini göstermektedir.

Tablo 22. Kuru ve MMY İşlemede Yüzey Pürüzlülüğü için ANOVA

Parametreler	Kuru İşleme Etki Oranı	MMY İşleme Etki Oranı
İlerleme	24,99%	86,34%
Kesme Derinliği	28,54%	2,03%
Kesme Hızı	32,34%	0,19%
Hata	14,14%	11,43%
Toplam	100,00%	100,00%
Güvenilirlik Oranı	R-sq 85,86%	R-sq 88,57%

MMY kullanımıyla işleme değişkenlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkilerinin değiştiğinin tespit edilmiştir. Burada dikkat edilecek husus, normalde yüzey pürüzlülüğü hesaplamalarında kullanılan formüllerde ilerlemenin etkisinden söz edilmektedir. Burada MMY formüllerine uygun bir netice vermesine rağmen kuru işlemede kesme derinliği ve kesme kuvveti neticesinde kesme bölgesinde oluşan sıcaklık neticesinde yüzey pürüzlülüğüne etki eden faktörlerin değiştiği tespit edilmiştir.

4. Sonuçlar

Ti6Al4V Alaşımının tornalanmasında kuru kesme ve bitkisel bazlı MMY ile işleme kesme kuvveti, sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğü açısından karşılaştırılması neticesinde aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- MMY kullanımıyla işleme değişkenlerinin kesme kuvvetine etkilerinin değiştiğinin tespit edilmiştir. Ti6Al4V alaşımının kuru işleme deneylerinde en büyük katkının %80,76 ile kesme derinliği yaparken MMY ile işlemede 'bu oranın %58,83' e gerilediği

görülmektedir. İlerlemenin etkisi ise MMY sayesinde %15,44'ten %29,37'ye yükselmiştir. Kesme hızı değişiminin fazla bir etkisi olmadığı görülmüştür.

- Deneylerde kullanılan kesme sıvısının, iş parçası ve kesici takım arasına iyi bir şekilde nüfuz ettiğinden yani ıslatma özelliğinden dolayı kesme kuvvetinin %50,55'e varan oranlarda düştüğü görülmektedir.
- Yüksek kesme derinliği değerlerinde sıcaklığın çok yükseldiği ve MMY'nin sıcaklık düşme oranına daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Kesme sıvısının yağlayıcı özelliği sayesinde sürtünme kuvvetini azalttığı için işleme esnasında ortaya çıkan ısının azaldığı ve buna ek olarak MMY sisteminde bulunan basınçlı havanın talaşı uzaklaştırma fonksiyonunun da, ısının büyük bir kısmının talaşla birlikte atılmasının da katkı sağladığı görülmektedir.
- Kuru kesmede sıcaklık oluşumuna %79,12 kesme hızı en fazla etki ederken MMY ile işlemede sıcaklığa en fazla %39,86 ile kesme derinliğinin etki ettiği görülmektedir.
- Kesme derinliği ve kesme hızlarının yüksek olduğu durumlarda sıcaklığa etkileri artmakta bu da yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilemektedir. MMY kullanılan durumlarda ise sıcaklık normal değerlere düşmekte ve beklenildiği gibi yüzey pürüzlülüğüne en fazla etkiyi % 86,34 ile ilerleme göstermektedir.
- MMY sistemi sayesinde sürdürülebilirlik açısından geleneksel kesme sıvısını kullanımı saatte 1000 l/sa iken MMY sistemi sayesinde bu sıvı tüketimi 25 ml/sa tüketimine düşürülmüştür ve bu duruma ek olarak iş parçasının üzerine geleneksel işleme yöntemleri gibi sıvı fazla miktarda sıvı püskürtülmediği için iş parçasını kurutma işlemine tabii tutulmasına gerek kalmamıştır.
- ANOVA etki oranlarındaki kıyaslama tablolarındaki işleme parametrelerinin etki oranlarındaki değişiminin, kesme kuvveti ve sıcaklıkta herhangi bir ölçümü değiştirmek için tek bir parametreyi değiştirip optimal skalayı yakalamaya çalışmak yerine kesme sıvısı sayesinde bütün işleme parametrelerini değiştirip daha çok kombinasyon yapıp daha etkili sonuçlar yakalanabileceği, yüzey pürüzlülüğünde ise bu durumun tam tersi olup sadece ilerlemeyi değiştirmenin daha etkili olacağı düşünülmektedir.
- MMY kullanımıyla işleme değişkenlerinin kesme kuvvetine, sıcaklığa ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerinin değiştiği tespit edilmiş olup hesaplamalarda kullanılan formüllerin kullanılmasında, kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın veya soğutmanın da hesaba katılması gerekmektedir.

Teşekkür/Bilgilendirme

Bu çalışma 2020/053 nolu proje numarası ile Kırıkkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir. Kırıkkale, Türkiye.

Kaynakça

Arrazola, P. J., Garay, A., Iriarte, L. M., Armendia, M., Marya, S., & Le Maître, F. (2009). Machinability of titanium alloys (Ti6Al4V and Ti555. 3). *Journal of materials processing technology*, 209(5), 2223-2230.

Basmacı, G. (2012). Tornalamada minimum miktarda yağlama (MMY) tekniğinin takım ve iş parçası üzerine etkilerinin incelenmesi. Yüksek Öğretim Kurulu Başkanlığı, Tez Merkezi. 320540

Ekinovic, S., Prcanovic, H., Begovic, E. (2015). Investigation of Influence of MQL Machining Parameters on Cutting Forces During MQL Turning of Carbon Steel St52-3. [Procedia Engineering](#), 132, 608-614

Elbah, M., Laouici, H., Benlahmidi, S., Nouioua, M., Yaltese, M. A. (2019). Comparative assessment of machining environments (dry, wet and MQL) in hard turning of AISI 4140 steel with CC6050 tools. [The International Journal of Advanced Manufacturing Technology](#), 105, 2581–2597.

Fratila, D. (2010). Macro-level environmental comparison of near-dry machining and flood machining. *Journal of Cleaner Production*, 18, 1031-1039.

Gajrani, K. K. (2020). Assessment of cryo-MQL environment for machining of Ti-6Al-4V. *Journal of Manufacturing Processes*, 60, 494-502.

Hadad, M., Sadeghi, B. (2013). Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy. *Journal of Cleaner Production*, 54, 332-343.

Khan, M. M. A., Mithu, M. A. H., Dhar, N. R. (2009). Effects of minimum quantity lubrication on turning AISI 9310 alloy steel using vegetable oil-based cutting fluid. [Journal of Materials Processing Technology](#), 209, 5573-5583.

Marques, A., Guimaraes, C., Batista, R. B., Fonseca, M. P. C., Sales, W. F., Machado, A. R. (2016). Surface Integrity Analysis of Inconel 718 after Turning with Different Solid Lubricants Dispersed in Neat Oil Delivered by MMY. *Procedia Manufacturing*, 5, 609-620.

Meena, A., Mansori, M. E. (2011). Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications. *Wear*, 271, 2412-2416.

- Moura, R. R., Silva, M. B., Machado, A. R., Sales, W. F. (2015). The effect of application of cutting fluid with solid lubricant in suspension during cutting of Ti-6Al-4V alloy. *Wear*, 332-333, 762-771.
- Nouioua, M., Yallese, M. A., Khettabi, R., Belhadi, S., Bouhalais, M. L., & Girardin, F. (2017). Investigation of the performance of the MQL, dry, and wet turning by response surface methodology (RSM) and artificial neural network (ANN). *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(5), 2485-2504.
- Pervaiz, S., Anwar, S., Qureshi, I., & Ahmed, N. (2019). Recent advances in the machining of titanium alloys using minimum quantity lubrication (MQL) based techniques. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 6(1), 133-145.
- Rahim, E. A., İbrahim, M. R., Rahim, A. A., Aziz, S., Mohid, Z. (2015). Experimental Investigation of Minimum Quantity Lubrication (MQL) as a Sustainable Cooling Technique. *Procedia CIRP*, 26, 351-354.
- Sarıkaya, M., & Güllü, A. (2014). Taguchi design and response surface methodology based analysis of machining parameters in CNC turning under MQL. *Journal of Cleaner Production*, 65, 604-616.
- Sharma, A. K., Singh, R. K., Dixit, A. R., & Tiwari, A. K. (2016). Characterization and experimental investigation of Al₂O₃ nanoparticle based cutting fluid in turning of AISI 1040 steel under minimum quantity lubrication (MQL). *Materials Today: Proceedings*, 3(6), 1899-1906.
- Yücel, A., & Yıldırım, Ç. V. AA2024 Alaşımının Tornalanmasında Nanoakışkan Konsantrasyon Oranı ve MMY Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü ve Kesme Sıcaklığı Üzerindeki Etkisi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(3), 18-32.