

# Minimum Miktarda Yağlama Yöntemi İçin Farklı Uygulama Mesafelerinin ve Farklı Kesme Parametrelerinin St37 Çelik İşlenebilirliğine Etkilerinin İncelenmesi

Üsame Ali Usca<sup>1</sup>

## Özet

İmalat endüstrisinde sıklıkla tercih edilen St37 çeliğinin işlenebilirlik özelliklerinin geliştirilmesi ve araştırılması oldukça önemlidir. Bu malzemelerin frezelenmesi esnasında minimum miktarda yağlama (MMY) soğutma/yağlama sisteminin kullanılması gün geçtikçe artmakta fakat bu sistemin içerdiği değişken parametrelerin frezeleme işlemine olan etkileri yeterince araştırılmamıştır. Ayrıca bu sistemin değişken parametrelerinden olan püskürtme mesafelerinin işlenebilirlik parametrelerine olan etkisi de ayrı bir inceleme konusudur. Bundan dolayı, bu çalışmada yaygın bir kullanım alanına sahip St37 sade karbonlu çeliğin kesme derinliği (1 mm) sabit tutularak farklı kesme (140-210 m/dk) ve ilerleme hızlarında (0,14-0,21 mm/dev) MMY destekli soğutma yapılarak CNC frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışma ile farklı kesme ve ilerleme hızları ile farklı MMY püskürtme mesafelerinin (50-250 mm) işlenebilirlikteki çıktı parametreleri (Yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve kesme sıcaklığı) üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Elde edilen bulgulara göre uzun mesafeden uygulanan MMY sıvısı takım aşınması ve kesme sıcaklığı üzerinde olumlu etki yaptığı görülmüştür. MMY uygulama mesafesinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ise kesme hızına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği tespit edilmiştir.

## 1. Giriş

Dünyada yer alan sanayi kuruluşlarının üretim aşamasında en çok ihtiyaç duyduğu ve kullandığı malzemelerden biri St37 çeliği olup yapısında maksimum %2 oranında karbon bulunan ve çekme dayanımı en az 37 kg/mm

1 Dr. Öğr. Üyesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Bingöl Üniversitesi, Bingöl, Türkiye; ausca@bingol.edu.tr, Orcid: 0000-0001-5160-5526

olan sade karbonlu bir çeliktir. Gerek ucuz olmaları gerekse de maliyetlerine kıyasla iyi mekanik özellik göstermeleri nedeni ile otomotiv, inşaat ve tekstil sektörleri başta olmak üzere pek çok imalat sanayisinde tercih edilmektedir [1]. Tüm bu yaygın kullanım alanları nedeni ile St37 sade karbonlu çeliğin işlenebilirliği ve yüzey özelliklerinin geliştirilmesi önemli bir araştırma alanıdır. Talaşlı imalat sırasında kesici takımın zarar görmemesi ve kaliteli bir yüzey elde etmek için kesme sıvıları yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [2-7]. Ayrıca kesme sıvıları talaşın kırılmasını ve kesme bölgesinden taşınmasını da kolaylaştırmaktadır [8]. Fakat geleneksel kesme sıvılarının kullanımı birçok sağlık sorunlarına yol açarak endüstriye sebep olmaktadır [9]. Aynı zamanda maliyet açısından kesme sıvıları oldukça yüksek rakamlara çıkabilmektedir. Bu sebeple son zamanlarda alternatif soğutma/yağlama seçenekleri oldukça popüler bir hal almaktadır [2, 10-13]. Özellikle MMY ile soğutma seçeneği birçok araştırmacının odağı haline gelmektedir [14-16]. MMY ile soğutma yönteminde çok az sıvı tüketimi sağlandığı için oldukça çevreci bir yöntemdir. Minimum seviyede püskürtülen yağ kesme bölgesindeki sürtünmenin azalmasını sağlayarak malzemenin kesici takıma yapışmasını önleyebilmektedir [17]. Ayrıca kesme bölgesinde ve kesici takımında kalıntı bırakmadan ortalama 5-500 ml/saat aralığında yağlama hızı sayesinde kuru işlemeye alternatif bir seçenektir [18]. MMY ile soğutma işleminde kullanılan yağ basınçlı hava yardımıyla pulverize şekilde kesme bölgesine iletilerek sıcaklıklar azaltılmaktadır. Bu nedenle MMY koşulları kullanılarak takım aşınmasının ve yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesine yönelik yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalara örnek olarak Danish et al. [19] havacılık sektöründe yaygın bir şekilde kullanılan Inconel 718 alaşımının tornalanması için kriyojenik ve MMY teorisini içeren bir soğutma/yağlama ortamı önermişlerdir. Hadad and Sadeghi [20] AISI 4140 çelik alaşımında MMY koşulları altında işleme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık gibi malzeme performanslarını araştırdılar. Khanna et al. [21] 15-5 PH SS çeliğinin kuru, taşma, LCO<sub>2</sub> ve MMY koşulları altında takım aşınması açısından analiz ettiler. Ayrıca farklı soğutma/yağlama stratejilerinin güç tüketimi ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırdılar. Mia et al. [22] kuru kesme, MMY ve basınçlı hava soğutmalı katı yağlama sistemi gibi üç sürdürülebilir işleme teknolojisi kullanarak soğutma yağlama sıvılarının işlenebilirlikteki etkilerini incelemişlerdir. Yapılan çalışma sonucunda MMY'nin iyileştirmeye yardımcı olduğu, çevre dostu ve daha temiz üretim sağladığı bulunmuştur. Bir diğer çalışmada Aslantaş ve Cicek [23] Inconel 718 süper alaşımının mikro frezelenmesinde MMY, etanol ve yağ-su emülsiyonu) gibi farklı soğutma/yağlama tekniklerinin yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve çapak oluşumu üzerindeki etkileri araştırmıştır. Yüzey kalitesi ve takım aşınması göz önüne

alındığında MMY'nin daha iyi sonuçlar verdiği bulunmuştur. Korkmaz et al. [24] Ni tabanlı bir alaşım olan Nimonic 80A'nın farklı soğutma koşullarının ve mesafelerinin işlenebilirlik parametreleri (Takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü, güç tüketimi) üzerinde olan etkilerini araştırmışlardır. Muaz and Choudhury [25] TiCN/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiN kaplı kesici uçlar kullanarak AISI 4340 çeliğinin MMY destekli frezelenmesinde kesme kuvvetlerinin ve yüzey pürüzlülüğünün etkilerini araştırdılar.

## 2. Materyal ve metot

Bu çalışmada test malzemesi olarak pek çok imalat sanayinde yaygın olarak kullanılan St37 çeliği kullanılmıştır. Tablo 1, kullanılan çeliğe ait ağırlıkça kimyasal bileşimini göstermektedir.

**Tablo 1. St37 çeliğinin kimyasal bileşeni.**

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
% 0,11	% 0,03	% 0,56	% 0,007	% 0,005	% 0,07	% 0,03

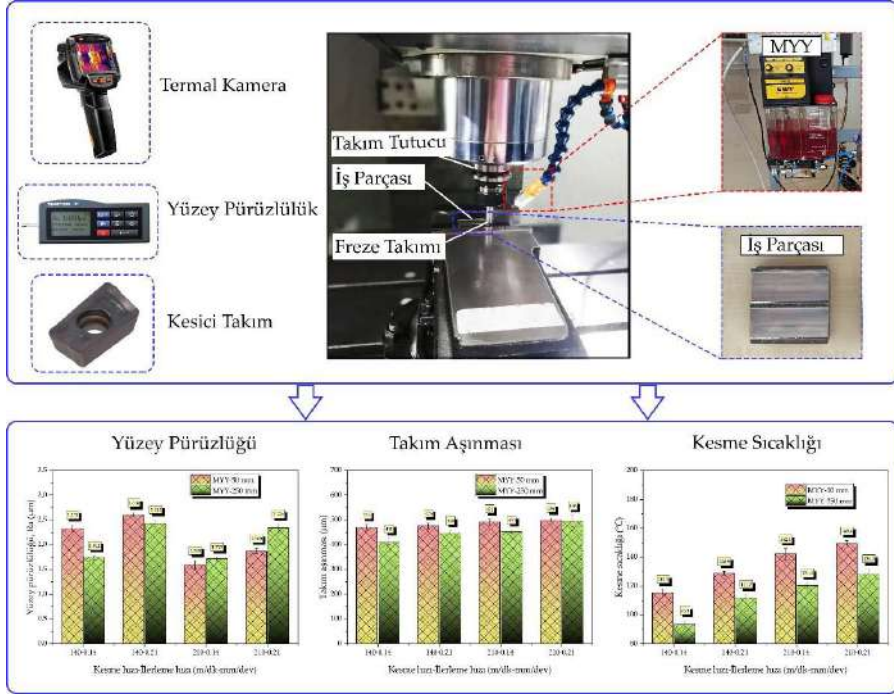
Deneylerde kullanılacak iş parçaları, 50 mm x 50 mm genişlik ve 15mm kalınlığa sahip olacak şekilde kare kesitli levhalar şeklinde temin edilmiştir. DAHLIH MCV-860 marka CNC freze tezgahı kullanılarak MYY soğutma/yağlama sıvısı altında numunelerin frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemi için AlTiN kaplı ISO 13399 kodlu kesici takım uçları kullanılmıştır. Kesici uçlar tek ağızlı yüzey tarama frezesine takılmıştır. Deneylerde kesme derinliği sabit ve 1 mm olarak seçilmiştir. Kesme hızı (140-210 m/dk) ve ilerleme hızı (0,14-0,21 mm/dev) ise değişken parametreler olarak seçilmiştir. Tablo 2, deney sistemini göstermektedir.

**Tablo 2. İşlenebilirlik deney tasarım sistemi.**

Deney no	Kesme hızı (m/dk)	İlerleme hızı (mm/dev)	MMY nozül uzaklığı (mm)
1	140	0,14	50
2	140	0,14	250
3	140	0,21	50
4	140	0,21	250
5	210	0,14	50
6	210	0,14	250
7	210	0,21	50
8	210	0,21	250

MMY soğutma/yağlama sıvısı ile işlenebilirlik deneyleri yapılarak yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve kesme sıcaklığı incelenmiştir. İlgili deney şeması Şekil 1'de görülmektedir.

Şekil 1. İşlenebilirlik deney şeması.,



MMY yağı sisteme Werte Micro Stn-15 marka potansiyometre kontrollü bir sistem kullanılarak uygulanmıştır. MMY kesme sıvısı olarak Cuttex Syn 5 sıvısı kullanılmış bu sıvı basınçlı hava yardımıyla kesici takım ve iş parçası üzerine püskürtülmektedir. Uygulanan MMY'nin akış debisi 35 mL/saat, püskürtme basıncı 6,5 bar ve püskürtme açısı 45° dir. MMY'nin çıkış nozulu ise 5 mm çapa sahiptir. Bu çalışmada MMY sıvısının kesme bölgesine uygulanma mesafesinin işlenebilirlik parametreleri üzerindeki etkileri araştırılmak istendiğinden 50 mm ve 250 mm olmak üzere iki farklı uygulama mesafesi seçilmiştir. Kesme sıcaklıkları 650 °C sıcaklığa kadar ölçüm yapabilen Testo-871 model bir termal kamera kullanılarak ölçülmüştür. Ölçümler sabit bir mesafede konumlandırılarak gerçekleştirilmiştir. Kesme işlemi sonrasında numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri TIME3200 test cihazı ile ölçülmüştür. Ölçüm parametreleri olarak Cutoff: 0,25 mm, n\*cutoff: 51, Standart: ISO, Range:  $\pm 80 \mu\text{m}$ , Filter: RC, Display: Ra değerleri referans alınmıştır. Hata payını en aza indirerek doğru ölçüm değerleri elde etmek için cihaz kalibrasyonu yapıldıktan sonra ölçümler farklı noktalardan 5 kez tekrarlan-

mıştır. Bu değerler içerisinde yüksek sapma yapan değerler çıkartılarak kalan değerlerin ortalaması alınmış ve nihai yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir. Kesici takım aşınma değerleri Insize ISM-PM200SB cihazı kullanılarak ölçülmüştür. En fazla aşınan alan dikkate alınarak kesici takımın yan bölgesinden alınmıştır.

### 3. Bulgular ve tartışma

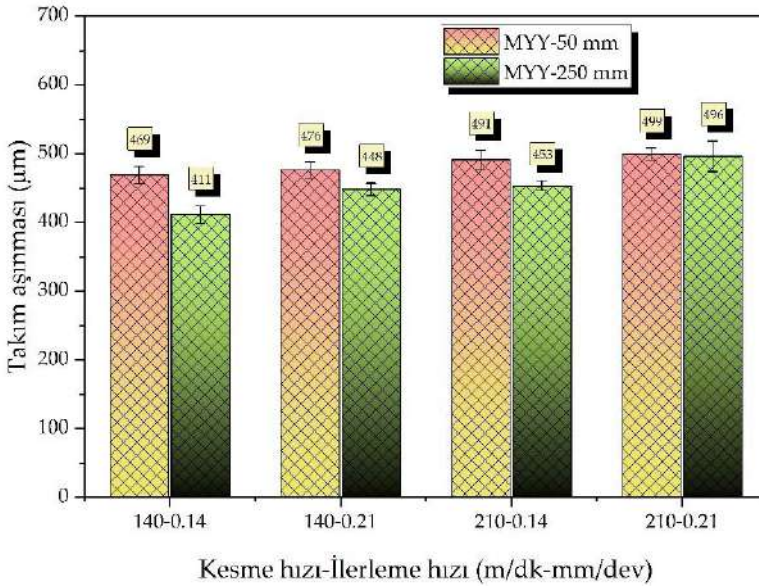
St37 çeliği farklı kesme hızında (140-210 m/dk), farklı ilerleme hızında (0,14-0,21 mm/dev) ve farklı nozul uzaklıklarında (50-250 mm) frezelenmiştir. Deney esnasında ve sonrasında kesici takım aşınması, kesme sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü sonuçları kayıt altına alınarak analiz edilmiştir.

#### 3.1. Kesici takım aşınması

Takım aşınması bitmiş parça yüzey kalitesi, parça maliyeti ve işlenebilirlik sürecinin sürdürülebilirliği üzerinde etkisi olan çok önemli bir işlenebilirlik metriğidir [26]. Frezeleme esnasında kesici takımın maruz kaldığı mekanik ve termal yükler takım ömrünü azaltır. Hem ürün kalitesi hem de üretim verimliliği açısından takım ömrünü analiz etmek kritik bir durumdur [27]. Bu sebeple, kesici takımın ömrünü tamamlayıp parçaya zarar vermeden değiştirilmesi önemlidir. Şekil 2, farklı işlenebilirlik parametrelerinin takım aşınması üzerinde etkisini göstermektedir. Kesme hızı ve ilerleme hızının artışıyla birlikte takım aşınmasının arttığı görülmektedir. En düşük takım aşınması değeri (0,411 mm) düşük kesme parametrelerinde ve uzak mesafe MMY uygulamasında elde edilmiştir. En yüksek takım aşınma değeri (0,499 mm) ise yüksek kesme parametrelerinde ve yakın mesafe MMY uygulamasında elde edilmiştir. Artan kesme hızının takımda meydana gelen plastik deformasyonu artırdığı ve artan ilerleme hızının da kesici takım-ış parçası temas süresini artırarak daha fazla kuvvet ve ısı oluşumuna yol açtığı bilinmektedir [27]. Bu sebeple takım aşınmasında artış meydana geleceği açıktır. MMY uygulama mesafesinin artmasında takım aşınmasının azalmasının iki farklı nedeni olabilir. Birincisi, uygulama mesafesi arttığında yağlama akışkanı iş parçası-takım bölgesini daha etkili kapsayabilir. Böylelikle ısıyı daha etkin dağıtarak kesici takımın aşırı ısınmadan kaynaklanan aşınma sürecini geciktirebilir. İkincisi ise uzak mesafede yağlama akışkanı, daha fazla alana homojen bir şekilde dağıldığından dolayı takım yüzeyinin daha etkin bir şekilde temizlenmesini ve takım-ış parçası yüzeyinde daha etkin bir yağlama filminin oluşmasına neden olduğundan dolayı sürtünmeyi azaltabilir. Bu sebeple daha takım aşınması azalarak takım ömrü artabilir.

#### Şekil 2. Farklı işlenebilirlik parametrelerinin takım aşınması üzerindeki

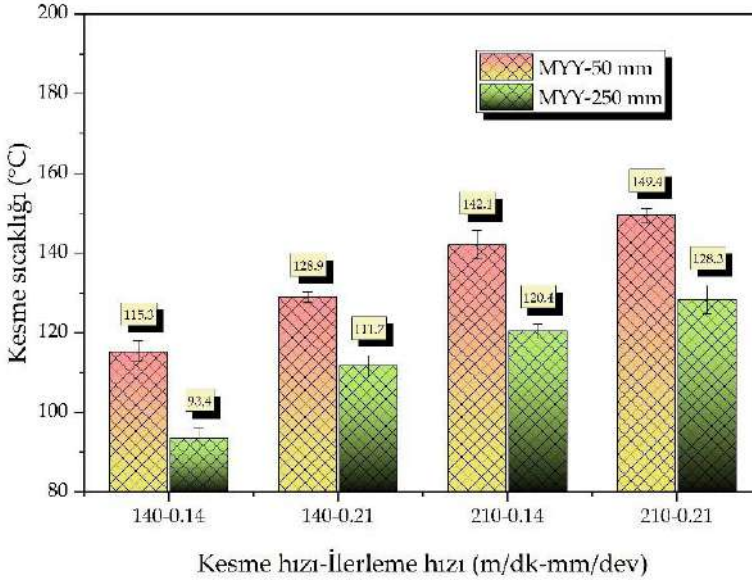
etkisi.



### 3.2. Kesme sıcaklığı

Frezeleme esnasında kesici takım-iş parçası arasında kesme, sürtünme, plastik deformasyon gibi bazı mekanik olgulardan dolayı ısı enerjisi açığa çıkmaktadır. Bu ısı enerjisi iş parçası, kesici takım ve talaşa yayılarak kesme sıcaklığına neden olabilir. Frezeleme ile birlikte oluşan talaşlar ise ısının büyük bir bölümünü kesme ortamından uzaklaştırırlar [28]. Kesme sıcaklığı kesici takım kenar keskinliğini, iş parçası kalitesini ve talaş geometrisini önemli derecede etkilemektedir [29]. Yüksek kesme sıcaklıkları düşük yüzey kalitesi ve düşük takım ömrü ile işleme sürecini olumsuz etkileyebilir [30]. Bu sebeple kesme sıcaklığını kontrol altına alabilmek önem arz eder. Şekil 3, farklı kesme parametreleri ile farklı MMY uygulama mesafelerinin kesme sıcaklığına olan etkisini göstermektedir. Kesme parametrelerinin artmasıyla birlikte kesme sıcaklıklarının arttığı gözlemlenmiştir. Bu durumun birim zamandaki kinetik enerji, sürtünme ve plastik deformasyondaki artışlara bağlı olduğu söylenebilir [22]. En düşük (93,4 °C) ve en yüksek (149,4 °C) kesme sıcaklıkları buna bağlı olarak sırasıyla en düşük ve en yüksek kesme parametrelerinde meydana gelmiştir. Takım aşınmasına durumuna benzer şekilde uzak mesafeden uygulanan MMY sıvısı daha fazla alana yayılarak daha etkin bir şekilde homojen yağlama yapmaktadır. Böyle daha etkin bir soğutma yapabildiğinden dolayı uzak mesafeden yağlama durumunda daha iyi kesme sıcaklık sonuçları elde edilmiştir.

Şekil 3. Farklı işlenebilirlik parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerindeki etkisi.

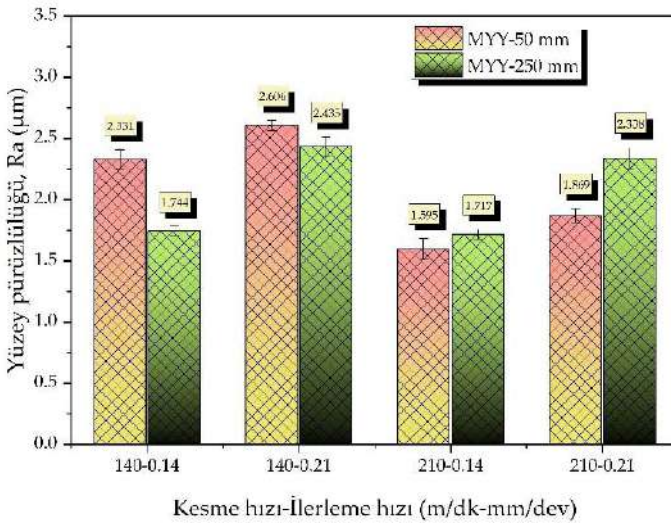


### 3.3 Yüzey pürüzlülüğü

Yüzey kalitesi, işlenebilirlik işlemlerinden sonra elde edilen en önemli parametrelerden bir tanesidir. Ayrıca yüzey kalitesi parçanın çalışacağı ortamda tribolojik ve mekanik özellikleri etkileyebilmektedir. [8]. Yüzey pürüzlülüğü, yüzey kalitesi için önemli parametrelerden birisidir. Yüzey pürüzlülüğü fazla olan parçalar daha fazla aşınabilmekte ve bulunduğu yerdeki işlevini daha hızlı kaybedebilmektedir. Bu yüzden istenilen yüzey kalitesini elde edebilmek için yüzey pürüzlülük değerleri istenilen değer içerisinde kalması gerekmektedir [31].  $R_a$  değeri, iş parçası örneklem uzunluğundaki yüzey profili yüksekliğinin aritmetik ortalaması olarak bilinen bir yüzey pürüzlülük değerini yansıtmaktadır. Bundan dolayı örneklem uzunluğundaki ani değişikliklere duyarlı olmayıp, bütün yüzey profillerinden etkilenmektedir. Bu nedenle diğer yüzey pürüzlülük değerlerine göre daha çok kullanılmaktadır [32, 33]. Yüksek-düşük kesme hız ve ilerleme hızlarında ve yakın-uzak MMY uygulama mesafesinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi Şekil 4'te gösterilmiştir. İlerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisi bilinmektedir [34]. Literatür bilgisi doğrultusunda artan ilerleme hızı ile yüzey pürüzlülüğünün düştüğü gözlemlenmiştir. Kesme hızının artması ile birlikte yüzey kalitesinin önemli şekilde iyileştiği tespit edilmiştir. Yapılan bir çalışmada artan kesme hızı ile birlikte kesme sıcaklığının artacağı ve bununla birlikte kesme bölgesinin yumuşayarak kesici takım üzerinde daha az talaş yığılmasına sebep olacağı belirtilmiştir.

tır. Böylece takım daha geç aşınacağı için iş parçası yüzeyinin daha kaliteli olacağı vurgulanmıştır [27]. Literatürdeki başka çalışmaların da [35, 36] bu kanyı desteklediğini belirtmişlerdir. MMY uygulama mesafelerinin çalışmada farklı kesme hızları için farklı davranışlar sergilediği gözlemlenmiştir. Düşük kesme hızına göre yüksek kesme hızında yüzey kalitesinin yaklaşık % 29 iyileştiği görülmüştür. Yüksek kesme hızında artan MMY uygulama mesafesi, talaş kontrolünü zorlaştırabilir. Kontrolsüz talaşın yüzey üzerine çarpma etkisiyle birlikte yüzey kalitesini azaltabileceği düşünülmektedir.

**Şekil 4. Farklı işlenebilirlik parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi.**



#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada farklı kesme parametrelerinin ve farklı MMY uygulama mesafelerinin St37 çeliği üzerindeki işlenebilirlik etkileri araştırılmıştır. Bu kapsamda iki farklı kesme hızı (140-210 m/dk) ve iki farklı ilerleme (0,14-0,21 mm/dev) hızı kullanılmıştır. Ayrıca iki farklı MMY uygulama mesafesi (50-250 mm) tercih edilmiştir.  $2^3$  deney tasarım sistemine göre toplam 8 deney gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarına göre kesme sıcaklığı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülük sonuçları irdelenmiştir. Bu sonuçlara göre;

- Artan kesme ve ilerleme hızlarıyla birlikte takım aşınmasında maksimum %20 oranında artış meydana geldiği görülmüştür. Ayrıca MMY uygulama mesafesinin artmasıyla birlikte tüm kesme parametreleri için takım aşınmasında azalma meydana geldiği tespit edilmiştir.



- Uzak mesafe MMY uygulaması, işlenebilirlik üzerinde pozitif etki oluşturmuş ve kesme sıcaklığının düşmesinde önemli rol oynamıştır. Farklı kesme parametrelerinin artışı ile kesme sıcaklığının arttığı görülmüştür.
- Farklı MMY uygulama mesafelerinin yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına etkisi kesme hızına göre değiştiği tespit edilmiştir. Yüksek kesme hızlarında yakın mesafeden uygulanan MMY sıvısı iş parçası yüzey kalitesi üzerinde pozitif etki yaparken düşük kesme hızlarında uzak mesafeden uygulanan MMY sıvısı pozitif etki yaptığı görülmüştür. Kesme parametreleri için, artan ilerleme hızı ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı, artan kesme hızı ile yüzey pürüzlülüğünün azaldığı tespit edilmiştir.

## Kaynakça

- [1] O. Altay, T. Gürgeç, St37 çeliğinin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğünün destek vektör regresyonu kullanılarak tahmini, *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2022.
- [2] I.S. Jawahir, H. Attia, D. Biermann, J. Duflou, F. Klocke, D. Meyer, S.T. Newman, F. Pusavec, M. Putz, J. Rech, V. Schulze, D. Umbrello, *Cryogenic manufacturing processes*, *CIRP Annals*, 65 (2016) 713-736.
- [3] H.-J. Kim, K.-J. Seo, K.H. Kang, D.-E. Kim, Nano-lubrication: A review, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17 (2016) 829-841.
- [4] S. Amiril, E. Rahim, S.J.J.o.C.P. Syahrullail, A review on ionic liquids as sustainable lubricants in manufacturing and engineering: Recent research, performance, and applications, 168 (2017) 1571-1589.
- [5] Ç.V. Yıldırım, T. Kivak, F.J.A.J.f.S. Erzincanlı, *Engineering*, Influence of different cooling methods on tool life, wear mechanisms and surface roughness in the milling of nickel-based waspaloy with WC tools, 44 (2019) 7979-7995.
- [6] C. Cai, X. Liang, Q. An, Z. Tao, W. Ming, M. Chen, Cooling/Lubrication Performance of Dry and Supercritical CO<sub>2</sub>-Based Minimum Quantity Lubrication in Peripheral Milling Ti-6Al-4V, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8 (2021) 405-421.
- [7] Q.L. Niu, L. Jing, Z. Yu, C.P. Li, X.Y. Qiu, T.J. Ko, Experimental study on cryogenic milling performance of SiCp/Al composites with liquid nitrogen, *Machining Science and Technology*, 26 (2022) 1-17.
- [8] S. Şap, M. Uzun, Ü.A. Usca, D.Y. Pimenov, K. Giasin, S. Wojciechowski, Investigation of machinability of Ti-B-SiCp reinforced Cu hybrid composites in dry turning, *Journal of Materials Research and Technology*, 18 (2022) 1474-1487.
- [9] T. Tawakoli, M.J. Hadad, M.H. Sadeghi, A. Daneshi, S. Stöckert, A. Rasifard, An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication—MQL grinding, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 49 (2009) 924-932.
- [10] G. Singh, C.I. Pruncu, M.K. Gupta, M. Mia, A.M. Khan, M. Jamil, D.Y. Pimenov, B. Sen, V.S. Sharma, Investigations of Machining Characteristics in the Upgraded MQL-Assisted Turning of Pure Titanium Alloys Using Evolutionary Algorithms, *Materials*, 12 (2019) 999.
- [11] Y.S. Liao, H.M. Lin, Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47 (2007) 1660-1666.

- [12] S.A.S. Amiril, E.A. Rahim, S. Syahrullail, A review on ionic liquids as sustainable lubricants in manufacturing and engineering: Recent research, performance, and applications, *Journal of Cleaner Production*, 168 (2017) 1571-1589.
- [13] M. Mia, M.K. Gupta, J.A. Lozano, D. Carou, D.Y. Pimenov, G. Królczyk, A.M. Khan, N.R. Dhar, Multi-objective optimization and life cycle assessment of eco-friendly cryogenic N<sub>2</sub> assisted turning of Ti-6Al-4V, *Journal of Cleaner Production*, 210 (2019) 121-133.
- [14] Y. Touggui, A. Uysal, U. Emiroglu, S. Belhadi, M. Temmar, Evaluation of MQL performances using various nanofluids in turning of AISI 304 stainless steel, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 115 (2021) 3983-3997.
- [15] E. Salur, M. Kuntoğlu, A. Aslan, D.Y. Pimenov, The Effects of MQL and Dry Environments on Tool Wear, Cutting Temperature, and Power Consumption during End Milling of AISI 1040 Steel, *Metals*, 11 (2021) 1674.
- [16] R.L. Rodriguez, J.C. Lopes, M.V. Garcia, F.S. Fonteque Ribeiro, A.E. Diniz, L. Eduardo de Ângelo Sanchez, H. José de Mello, P. Roberto de Aguiar, E.C. Bianchi, Application of hybrid eco-friendly MQL+W CJ technique in AISI 4340 steel grinding for cleaner and greener production, *J. Clean. Prod.*, 283 (2021) 124670.
- [17] S. Ekinovic, H. Prcanovic, E. Begovic, Investigation of Influence of MQL Machining Parameters on Cutting Forces During MQL Turning of Carbon Steel St52-3, *Procedia Eng.*, 132 (2015) 608-614.
- [18] V.S. Sharma, M. Dogra, N.M. Suri, Cooling techniques for improved productivity in turning, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 49 (2009) 435-453.
- [19] M. Danish, M.K. Gupta, S. Rubaiee, A. Ahmed, M.E. Korkmaz, Influence of hybrid Cryo-MQL lubri-cooling strategy on the machining and tribological characteristics of Inconel 718, *Tribol. Int.*, 163 (2021) 107178.
- [20] M. Hadad, B. Sadeghi, Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy, *J. Clean. Prod.*, 54 (2013) 332-343.
- [21] N. Khanna, P. Shah, Chetan, Comparative analysis of dry, flood, MQL and cryogenic CO<sub>2</sub> techniques during the machining of 15-5-PH SS alloy, *Tribology International*, 146 (2020) 106196.
- [22] M. Mia, M.K. Gupta, G. Singh, G. Królczyk, D.Y. Pimenov, An approach to cleaner production for machining hardened steel using different cooling-lubrication conditions, *Journal of Cleaner Production*, 187 (2018) 1069-1081.
- [23] K. Aslantas, A. Çiçek, The effects of cooling/lubrication techniques on cutting performance in micro-milling of Inconel 718 superalloy, *Procedia CIRP*, 77 (2018) 70-73.

- [24] M.E. Korkmaz, M.K. Gupta, M. Boy, N. Yaşar, G.M. Krolczyk, M. Günay, Influence of duplex jets MQL and nano-MQL cooling system on machining performance of Nimonic 80A, *Journal of Manufacturing Processes*, 69 (2021) 112-124.
- [25] M. Muaz, S.K. Choudhury, Experimental investigations and multi-objective optimization of MQL-assisted milling process for finishing of AISI 4340 steel, *Measurement*, 138 (2019) 557-569.
- [26] N. Khanna, J. Airao, G. Kshitij, C.K. Nirala, H. Hegab, Sustainability analysis of new hybrid cooling/lubrication strategies during machining Ti6Al4V and Inconel 718 alloys, *Sustainable Materials and Technologies*, 36 (2023) e00606.
- [27] M.N. Babu, V. Anandan, Ç.V. Yıldırım, M.D. Babu, M. Sarıkaya, Investigation of the characteristic properties of graphene-based nanofluid and its effect on the turning performance of Hastelloy C276 alloy, *Wear*, 510-511 (2022) 204495.
- [28] S. Şap, Understanding the Machinability and Energy Consumption of Al-Based Hybrid Composites under Sustainable Conditions, *Lubricants*, 2023.
- [29] N.A. Abukhshim, P.T. Mativenga, M.A. Sheikh, Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46 (2006) 782-800.
- [30] Ç.V. Yıldırım, Ş. Şirin, T. Kıvak, M. Sarıkaya, The effect of nanofluids reinforced with different surfactants on the machining and friction-wear properties of Waspaloy, *Tribology International*, 181 (2023) 108316.
- [31] W. Akhtar, J. Sun, P. Sun, W. Chen, Z. Saleem, Tool wear mechanisms in the machining of Nickel based super-alloys: A review, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 9 (2014) 106-119.
- [32] E.S. Gadelmawla, M.M. Koura, T.M.A. Maksoud, I.M. Elewa, H.H. Soliman, Roughness parameters, *Journal of Materials Processing Technology*, 123 (2002) 133-145.
- [33] N. Khanna, N.M. Suri, P. Shah, H. Hegab, M. Mia, Cryogenic turning of in-house cast magnesium based MMCs: A comprehensive investigation, *Journal of Materials Research and Technology*, 9 (2020) 7628-7643.
- [34] G.S. Samy, S. Thirumalai Kumaran, M. Uthayakumar, An analysis of end milling performance on B4C particle reinforced aluminum composite, *Journal of the Australian Ceramic Society*, 53 (2017) 373-383.
- [35] D. Umbrello, Investigation of surface integrity in dry machining of Inconel 718, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69 (2013) 2183-2190.

- [36] A. Thakur, S. Gangopadhyay, State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 100 (2016) 25-54.