

## Minimum Miktarda Yağlamanın Frezeleme İşlemleri Üzerine Etkisinin Araştırılması:Derleme

Hüseyin Gürbüz<sup>1</sup>, Şehmus Baday<sup>2</sup>, Yunus Emre Gönülaçar<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Yrd.Doç.Dr., Batman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü,  
[huseyin.gurbuz@batman.edu.tr](mailto:huseyin.gurbuz@batman.edu.tr)

<sup>2</sup> Yrd.Doç.Dr., Batman Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine ve İmalat Mühendisliği Bölümü,  
[sehmus.baday@batman.edu.tr](mailto:sehmus.baday@batman.edu.tr)

<sup>3</sup> Araştırma Görevlisi, Siirt Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü,  
[yunusemregonulacar@gmail.com](mailto:yunusemregonulacar@gmail.com)

**Geliş Tarihi/Received:**

08.10.2017

**Kabul Tarihi/Accepted:**

30.11.2017

**Yayın Tarihi/Published:**

27.12.2017

### ÖZ

Talaşlı imalat işlemlerinde çok miktarda kullanılan kesme sıvılarının çevreye ve insan sağlığına olan negatif etkisi önemli bir hale gelmektedir. Bu etkiyi minimize etmek için en etkili metot kesme sıvılarının tüketimini azaltmaktır. Ancak kullanılan soğutma sıvısının miktarının düşürülmesi talaşlı imalatta büyük bir önem arz eden kesici takım ömrünü ve ürün kalitesini olumsuz etkilemektedir. MQL (Minimum Miktarda Yağlama) yöntemi basınçlı hava özelliği aracılığıyla kesici takımı ve iş parçasını soğutarak ayrıca çıkan talaşları uzaklaştırarak kesme bölgesinde oluşan ısıyı düşürmeye, yağlama etkisi ile de kesici takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünmeyi azaltarak kesici takım ömrünü ve yüzey kalitesini artırmasına yardımcı olur. Aynı zamanda pozitif açıdan MQL gibi teknikler uygulanarak kesme sıvısı tüketimi ve üretim maliyeti azaltılabilir. Bu çalışmada, frezeleme işlemleri üzerinde MQL tekniğinin uygulanmasıyla ilgili özellikle talaşlı imalatta büyük bir önem arz eden kesici takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri ile ilgili yapılan araştırmalar değerlendirilmiş olup MQL tekniğinin bu parametreler üzerindeki sonuçları ortaya konulmuştur. Yapılan bilimsel çalışmalara bağlı olarak frezeleme işlemlerinde MQL tekniğinin geleneksel soğutma tekniklerine oranla kesici takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri gibi birçok parametre açısından çok daha iyi performans sağladığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Frezeleme, Minimum Miktarda Yağlama (MQL) , Yüzey pürüzlülüğü, Kesici takım ömrü, Kesme kuvvetleri, Kesici takım aşınması

## Investigation Of The Effect Of Minimum Quantity Lubrication On Milling Processes:Review

### ABSTRACT

The negative effects of cutting fluids, used in large amounts in machining operations, on the environment and human health have become important. The most effective method to minimize this effect is to reduce the consumption of cutting fluids. However, reducing the quantity of cooling fluid used in this process has negative effects on the cutting tool life and the product quality, which are of great importance in machining. The MQL (Minimum Quantity Lubrication) method, on the other hand, helps to increase the cutting tool life and surface quality by decreasing the heat generated in the cutting area by cooling the cutting tool and workpiece by means of compressed air feature and by reducing the friction at the cutting tool-chip interface. At the same time, by applying techniques such as MQL in a positive way, consumption of cutting fluid and production cost can be reduced. In this study, the researches about cutting tool life, surface roughness and cutting forces, which are of great importance in the machining, especially regarding the application of MQL technique on milling processes, are evaluated, and the results of MQL technique on these parameters are presented. Depending on the scientific work done, it has been found that MQL technique displays a better performance in terms of many parameters such as cutting tool life, surface roughness and cutting forces than conventional cooling techniques in milling operations.

---

**Keywords:** Milling, Minimum Quantity Lubrication (MQL), Surface roughness, Cutting tool life, Cutting forces, Cutting tool wear

---

## 1. GİRİŞ

Uygulanabilir bir imalat işleminin gerekliliği; sadece üretim ekonomisini ilgilendiren iş parçası kalitesi, işleme süresi ve üretim miktarı ile ilgili değil aynı zamanda insan sağlığına ve çevreye olan etkisi ile doğrudan ilgilidir (Dhar vd., 2006; Çakır vd., 2013). Kesme sıvıları, talaş kaldırma sırasında büyük bir önem arz etmektedir (Liao ve Lin, 2007). Talaşlı imalat sürecinde kesme sıvısı kullanımı, gerek yağlama etkisi ile kesici takım-talaş ara yüzeyindeki sürtünmeyi azaltmaya gerekse de kesme bölgesinde oluşan ısıyı düşürmeye büyük bir katkı sağlamaktadır (İlhan vd., 2013). Ayrıca, kesme sıvıları, imalat sırasında çıkan talaşların kesme bölgesinden uzaklaşmasına da yardımcı olur. Bu nedenlerden dolayı talaşlı imalatta kullanılan kesme sıvıları, kesici takım ömrünün uzamasına ve ürün kalitesinin artmasına katkı sağlamaktadır (Dhar vd., 2006; Liao ve Lin, 2007). Geleneksel soğutma uygulamalarında kullanılan kesme sıvıları, imalat sürecinde avantajlarının yanında dezavantajları da mevcuttur. Kimyasal içeriğe sahip soğutma sıvıları üretim hattında çalışanların tenine temas ederek insan sağlığına ve atık yönetimi iyi yapılmadığında toprağa karışarak doğaya zarar vermektedir. Bunun yanında toplam üretim maliyetini ilgilendiren kesme sıvılarının depolanması, atığının yok edilmesi ve tedariği gibi aşamalardan dolayı işleme maliyetlerini artmasına sebep olmaktadır (Autret ve Liang, 2003). Çevresel ve çalışma ortamının sürdürülebilirliği ve bazı imalat işlemlerinde %17'lere kadar varan kesme sıvısı maliyetleri nedeniyle son yıllarda talaşlı imalatta kesme sıvısı kullanımı azalmıştır. Çevresel sürdürülebilirlik atık emisyonlarını azaltmayı hedeflerken çalışma ortamının sürdürülebilirliği kaynağın verimli kullanılması ve maliyetlerin düşürülmesinin yanı sıra insan sağlığına olan zararlarını önlemeyi hedefler (Kim ve Hur, 2009). Talaşlı imalatta kullanılan geleneksel soğutma sıvılarına hem çevre bilinci ve hem de endüstriyel işletmeler üzerinde artan maliyet baskılarından dolayı eleştirel bir bakış açısı getirmiştir. Kesme sıvısı kullanım maliyeti iş parçasına bağlı olarak bir parçayı imal etmek için gerekli işleme maliyetin % 7 ile 17'sini oluştura bilmektedir. Farklı talaş kaldırma işlemleri için güvenli bir şekilde istenilen sonuçlar elde edebilmek için ihtiyaç duyulan soğutma sıvısı miktarı değişecektir (Weinert vd., 2004; Klocke ve Eisenblätter, 1997). Gerek toplam üretim maliyeti bakımından gerekse de doğaya ve insan sağlığına olan etkisi açısından talaşlı imalat sürecinde kullanılan soğutma sıvısı miktarı önemlidir. Yukarıda bahsedilen bu hususlardan dolayı kullanılan soğutma sıvısı miktarının düşürülmesi ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır. Burada önemli olan husus iş parçası kalitesini ve kesici takım ömrünü olumsuz etkilemeyecek şekilde soğutma sıvısı miktarını düşürebilmektir (Dhar vd., 2007). Son zamanlarda kesme sıvısı kullanılmadan kuru kesme işlemleri kirliliği azalttığı için popüler olmuştur. Ancak işlenmesi zor olan iş parçaları kuru işleme şartlarında işlenirken kesici takım ile iş parçası arasında daha fazla sürtünme ve yapışmaya neden olacaktır ve bu da daha fazla kesici takım aşınmasına yol açar. Bu nedenle kuru kesme işlemi, tam olarak iş parçasının işlenmesi taleplerini yerine getiremez (Wang vd., 2015; Çelik, 2014).

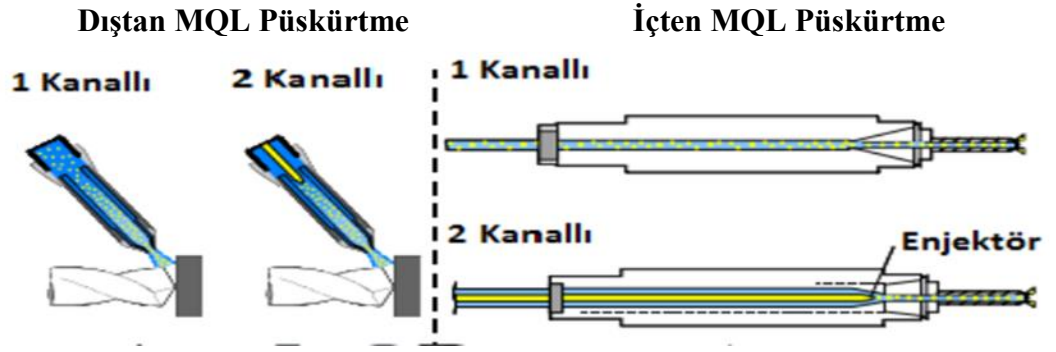
Geleneksel soğutma sıvılarındaki maliyet artışıyla birlikte çevreye ve insan sağlığına olan olumsuz etkilerinden dolayı özellikle talaşlı imalat işlemlerinde yerini MQL (Minimum Quantity

Lubrication - Minimum Miktarda Yağlama) uygulamalarına bırakmıştır. MQL, geleneksel ve yüksek hızlarda metalik ve kompozit parçaların işlenmesinde teknolojik, ekonomik ve çevresel faydaları ispatlanmış bir soğutma-yağlama teknolojisidir (Weinert vd., 2004; Sadek vd., 2010; Yıldırım vd., 2015). MQL, geleneksel ıslak işleme ve kuru işlemenin olumsuz etkilerini hafifletmek için umut verici çözümlerden biridir; özellikle talaşlı imalat işlemlerinde başarıyla kullanılmaktadır (Fratila ve Caizar, 2011; Tawakoli vd., 2011). MQL’de az miktarda biyo parçalanabilir (geri dönüşümlü) yağ damlacığı ile basınçlı hava karıştırılır ve kesme alanına püskürtülür, bu da kesme sıcaklığını ve kesici takım aşınmasını düşürür, yüzey kalitesini artmasına sebep olur. Bu az miktardaki geri dönüşümlü yağ sadece atık kirliliğini azaltmaz, aynı zamanda işçi sağlığına da zarar vermez (Wang vd., 2015; Winder ve Balouet, 2002). Bu durumlar altında MQL kullanımı çevreye ve insan sağlığına karşı korumacı bir yaklaşımla üretim gereksinimlerini sergileyecek ve talaşlı imalat sürecinde büyük bir önem arz eden kesici takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine karşı olumlu etki edebilecektir. Bu doğrultuda geliştirilen MQL tekniği ihtiyaçları karşılamak için uygulanan bir yöntemdir (İlhan vd., 2013).

Sonuç olarak, talaşlı imalatta kullanılan geleneksel kesme sıvılarının çevresel ve çalışma ortamının sürdürülebilirliği için olumsuz yönlerini minimize edecek, gerek kesici takım ömrü açısından gerekse de iş parçası kalitesi bakımından ve ayrıca kesme esnasında meydana gelen yüksek sıcaklıkların üzerindeki olumsuz etkilerini azaltacak yöntemlere başvurulmalıdır. Konuyla ilgili yapılan araştırmalar incelendiğinde elde edilen sonuçlara bağlı olarak uygun şekilde kullanılan MQL tekniğinin geleneksel soğutma tekniğinin yerini alacağını göstermektedir. Bu çalışmada talaşlı imalatta büyük bir önem arz eden frezeleme işlemlerinde MQL sisteminin uygulamaları üzerinde durulmuştur. Böylece daha kapsamlı bir şekilde MQL sisteminin etkilerinin değerlendirilmesi amaçlanmıştır.

## 2. MİNİMUM MİKTARDA YAĞLAMA (MQL) PRENSİBİ

MQL sistemi, talaşlı imalatta kesme bölgesine çok küçük miktarlardaki yağlama-soğutma sıvılarının püskürtülmesi sonucu kesmeye pozitif açıdan etki etmesi üzerine kurulmuştur [Yıldırım vd., 2015; Park 2010). Minimum miktarda yağlama yönteminde genelde bitkisel yağ kullanılırken; minimum miktarda soğutma yönteminde ise su bazlı kesme sıvısı kullanılmaktadır (Weinert vd., 2004; Yıldırım vd., 2015). MQL’nin çalışma prensibi, kesme bölgesine minimum miktarda yağ bazlı yağlayıcı ile basınçlı hava karışım damlacıklarının püskürtülmesi şeklindedir. Ancak MQL sisteminde sıvı haldeki partiküller sağlık sorunlarına neden olmaması için püskürtme miktarı 10 µm’den daha büyük olmak zorundadır (Yıldırım vd., 2015; Thornburg ve Leith, 2000). Yağlayıcı akış hızı MQL de genel olarak 10-100 ml/saat’tir. MQL’deki bu akış hızı geleneksel sulu kesmeye oranla yirmi bin kat daha azdır. Bu sebepten dolayı MQL’de kullanılan kesme sıvısı çok daha az miktarlarda olur. MQL sisteminin bir diğer avantajı ise sulu kesmeye göre kesme yapıldığında iş parçası ve çıkan talaşların hemen hemen kuru bir şekilde kalmasını sağlayarak talaşın geri dönüşüm maliyetlerini düşürmesine sebep olmaktadır (Kuzu vd., 2013). MQL’nin dıştan ve içten püskürtülmesinin şematik gösterimi Şekil 1’de verilmiştir (Klocke ve Gerschwiler, 2003).



Şekil 1. MQL'nin dıştan ve içten püskürtülmesinin şematik gösterimi (Klocke ve Gerschwiler, 2003).

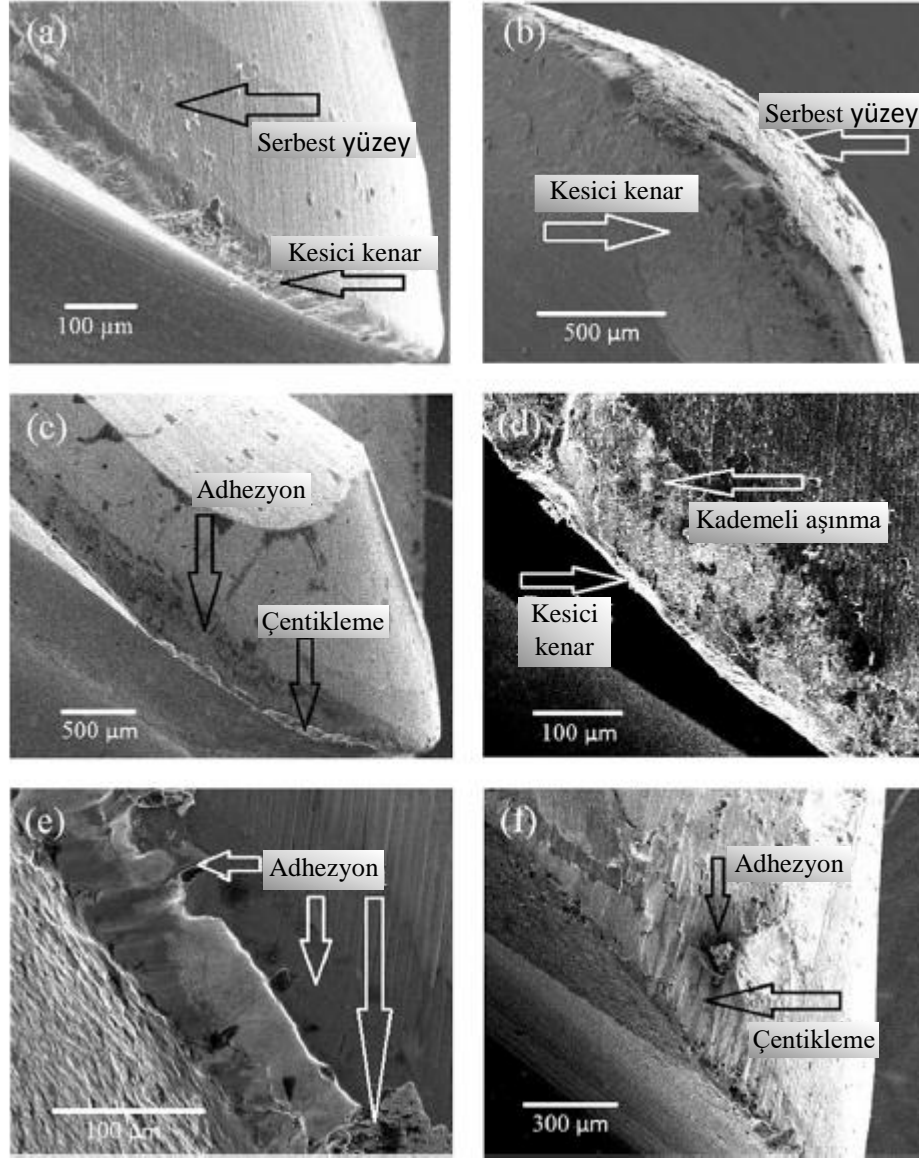
MQL tekniği içten ve dıştan olmak üzere iki şekilde uygulanabilir (Şekil 1). Dıştan MQL sisteminde sabit nozullarla dışarıdan püskürtme şeklinde olurken içten MQL sisteminde ise kesici takım içerisine açılmış kanallarla püskürtme şeklinde gerçekleşmektedir (Weinert vd., 2004; Klocke ve Eisenblatter, 1997). Ayrıca kendi içinde tek kanallı ve çift kanallı olan gerek içten MQL sistemlerinin gerekse de dıştan MQL sistemlerinin belirli konularda birbirlerinden üstünlükleri bulunmaktadır. Yağ-hava karışımı dışarıda hazırlanarak püskürtülen sistemler tek kanallı, yağ ve hava ayrı kanallarla nozul içine veya kesici takım içine getirildikten sonra karıştırılarak püskürtülen sistemlere de çift kanallı denilmektedir (Suzuki, 2002).

### 3. FREZE İŞLEMLERİNDE MQL UYGULAMALARI

Minimum miktarda yağlama tekniğinin frezeleme işlemlerinde kullanılması üzerine yapılmış bilimsel çalışmaları kesici takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri açısından ele alınarak derlenip aşağıda ayrıntılı bir şekilde verilmiştir.

#### 3.1. MQL'nin kesici takım aşınması üzerine etkisi

Iqbal ve arkadaşları frezeleme işleminin sürdürülebilirliği üzerinde kesici takım aşınma kriterlerinin etkilerini incelemiştir. AISI D2 malzemesinin frezelenmesinde MQL ile kuru kesmeyi karşılaştırmışlardır. MQL ile frezelemenin kuru kesmeye göre kesici takım ömrünü artırmada fayda sağladığını (Şekil 2) ve işleme maliyetlerini düşürdüğünü ortaya koymuşlardır (Iqbal vd., 2016).

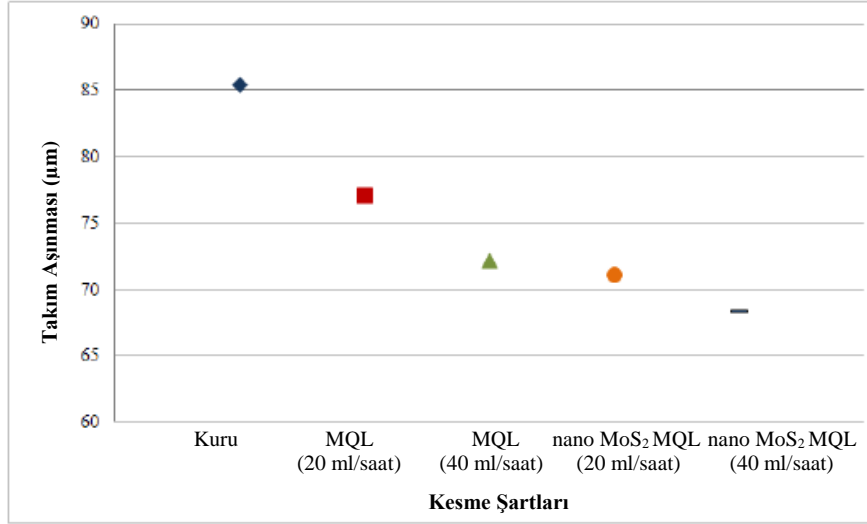


**Şekil 2.** Farklı kesme koşullarındaki SEM görüntüleri: (a) 55 HRc, 90 m/dk, 0.08 mm/diş, Kuru; (b) 55 HRc, 90 m/dk, 0.11mm/diş, MQL; (c) 55 HRc, 150 m/dk, 0.11 mm/diş, Kuru; (d) 61 HRc, 90 m/dk, 0.08mm/diş, Kuru; (e) 61 HRc, 150 m/dk, 0.08mm/diş, MQL; (f) 61 HRc, 150 m/dk, 0.11mm/diş, Kuru (İqbal vd., 2016).

Prakash ve arkadaşları 1 ml/saat akış oranı ile MQL tekniğini kullanmış ve kesici takım aşınması, talaş biçimi, kesme hızı ve besleme oranı açısından sonuçları değerlendirmişlerdir. MQL tekniğiyle işlemede kesici takım talaş arasındaki sürtünme katsayısını düşürerek kesici takım aşınmasına olumlu katkılarda bulunmuştur. Kesmede oluşan talaşların aksine MQL sırasında daha küçük talaş oluştuğunu tespit etmişlerdir (Prakash vd., 2001). Najiha ve arkadaşları ise AA6061-T6 alüminyum alaşımının su esaslı  $TiO_2$  nanosivili MQL ile frezelenmesinde kesme parametrelerinin kesici takım aşınma mekanizmalarına etkisini araştırmışlardır. Deneylerde farklı kesme parametreleri ve debiler kullanmışlardır. Su bazlı nanosivili MQL kullanılmasının özellikle yüksek kesme şartlarında çok az miktarda kesici kenar dökülmesi/kırığı oluşturduğunu, genel olarak kesici kenar bütünlüğüne büyük katkıda bulunduğunu görmüşlerdir. Ayrıca yüksek MQL debisinin daha az yapışma ve kesici kenar bütünlüğüne büyük katkı sağladığını görmüşlerdir. % 2.5 oranında  $TiO_2$  nanopartiküllerin kesici takım aşınması açısından daha uygulanabilir olduğunu göstermişlerdir (Najiha vd., 2016). Benzer bir çalışmada Uysal ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilmiştir. Yaptıkları çalışmada Nano  $MoS_2$  takviyeli bitkisel kesme sıvısı kullanarak martenzitik paslanmaz çeliğin frezelenmesinde MQL metodu uygulanmasını araştırmışlardır. Nano  $MoS_2$  parçacıkları nanosivili hazırlamak için bitkisel kesme sıvısına ilave edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kesme şartlarının kesici takım aşınması üzerindeki etkisini inceleyerek MQL metodunun kesici takım aşınması üzerinde etkileri olduğunu tespit etmişlerdir. Bunun yanı sıra, MQL akış oranındaki artış ve nano  $MoS_2$  partikül takviyeli yağlama etkisi nedeniyle MQL

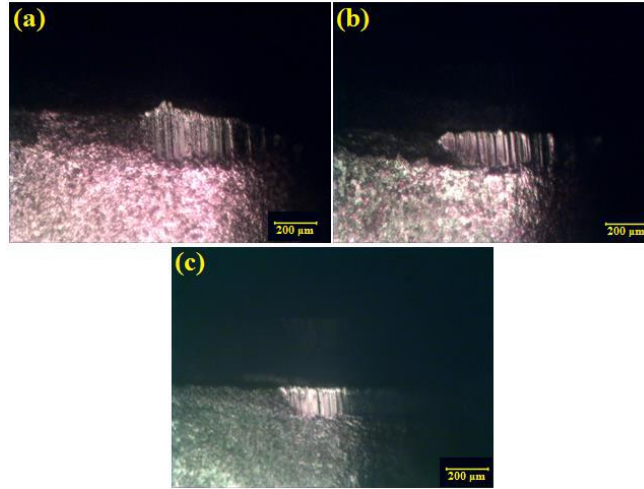


kullanımı kesici takım aşınması üzerinde bir azalmaya neden olduğunu ortaya koymuşlardır (Şekil 3) (Uysal vd., 2015).

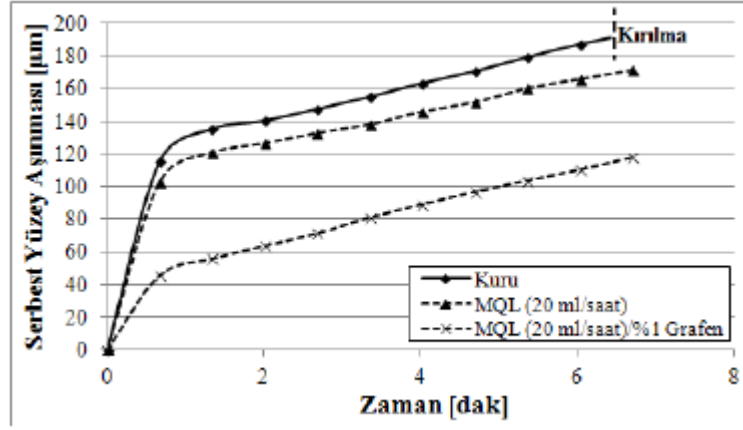


Şekil 3. Farklı soğutma koşulları altındaki takım aşınması değerleri (Uysal vd., 2015).

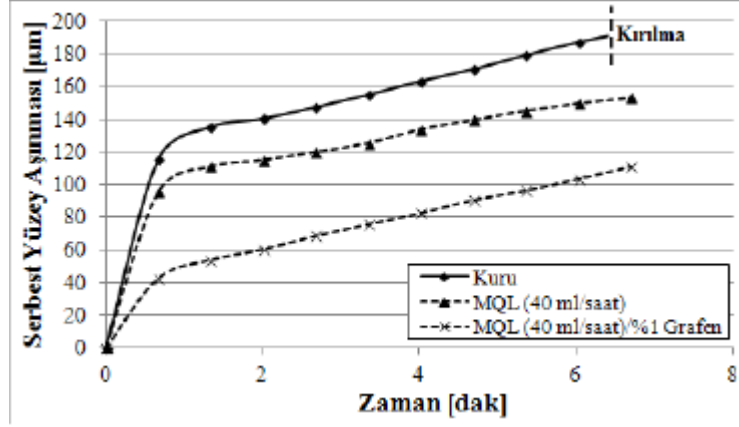
Park ve arkadaşları nano grafen katkılı kesme sıvılı MQL yöntemi uygulayarak AISI 1045 çeliğin frezelenmesinde kesici takım aşınması üzerine etkilerini incelemiştir. Deneylerde kuru işleme, nano katkılı ve katkısız MQL yöntemini karşılaştırma yapmak amacıyla uygulamışlardır. Kesici takım aşınması açısından en iyi sonucu Nano grafen katkılı MQL yöntemiyle elde etmişlerdir (Park vd., 2011). Sonraki yıllarda Uysal ve arkadaşları kuru, saf bitkisel kesme sıvılı ve ağırlıkça %1 oranında nano grafen katkılı ticari bitkisel kesme sıvılı MQL yöntemini AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğin frezelenmesinde uygulayarak, kesici takım aşınmasına MQL ve nano grafen katkılı kesme sıvısı debisinin etkilerini incelemiştir. Deneyler sonucunda nano grafen katkılı kesme sıvısının kullanıldığı MQL yöntemiyle en düşük serbest yüzey aşınmasını elde etmişlerdir (Şekil 4). Ayrıca, MQL debisinin artırılmasıyla kesici takım aşınmalarının azaldığını gözlemlemiştir (Şekil 5) (Uysal vd., 2015).



Şekil 4. 5,4 dakika frezeleme işleminden sonra, MQL debisi 20 ml/saat için serbest yüzey aşınma görüntüleri a) kuru b) saf bitkisel kesme sıvısı ile MQL c) %1 nano grafen katkılı bitkisel kesme sıvısı ile MQL (Uysal vd., 2015).



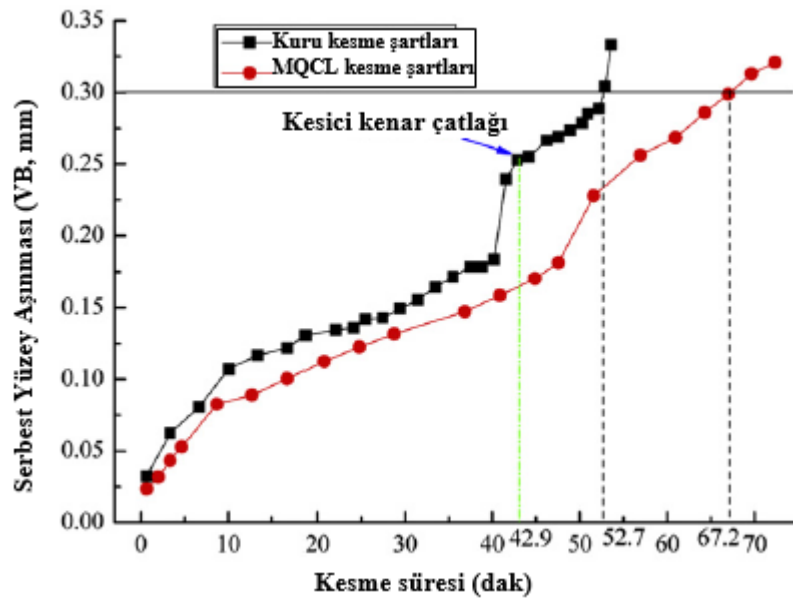
a)



b)

Şekil 5. Serbest yüzey aşınması a) 20 ml/saat MQL debisi b) 40 ml/saat MQL debisi (Uysal vd., 2015).

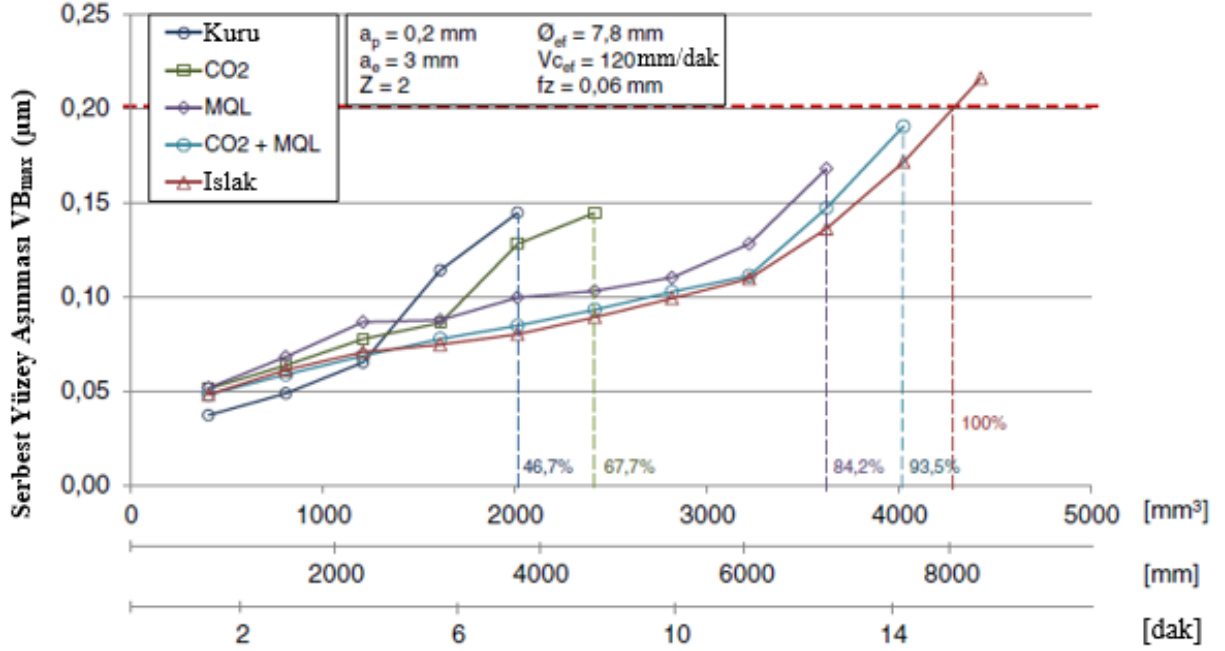
Zhang ve arkadaşları Inconel 718 alaşımının frezelenmesinde kuru ve MQL koşullarının etkisini araştırmışlardır. İlerlemeyi 0.1 mm/diş, aksenal kesme derinliği 0.5 mm, radyal kesme derinliğini 1 mm, kesme hızını 55 m/dk, MQL Bescut 173 sentetik bitkisel yağ debisini 8 ml/saat, basıncı 0.15 Mpa olarak belirlenmiştir. Yaptıkları çalışmada MQL'nin kuru frezelemeye oranla kesici takım ömrünü 1.57 kat artırdığını göstermişlerdir (Şekil 6) (Zhang vd., 2012).



Şekil 6. Farklı kesme koşullarında kesme süresine bağlı olarak elde edilen serbest yüzey aşınması (Zhang vd., 2012)

Pereira ve arkadaşları Inconel 718 alaşımının frezelenmesinde kuru, ıslak, CO<sub>2</sub> kriyojenik, MQL ve CO<sub>2</sub>+MQL koşullarını incelemişlerdir. Farklı CO<sub>2</sub> çıkışları için iki uçlu adaptör kullanmışlardır. Kesme hızı 120 m/dk, ilerleme 0.06 mm/diş, aksenal kesme derinliği 0.2 mm, radyal kesme derinliği 3 mm, MQL

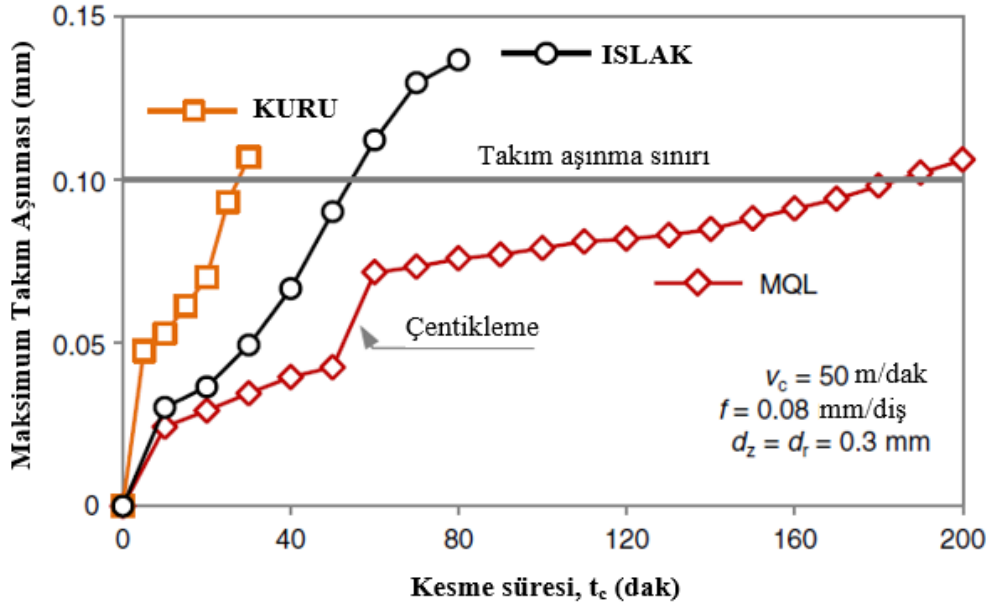
bitkisel yağ debisi 100 ml/saat olarak belirlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, MQL ile ıslak işleme karşılaştırıldığında MQL'nin kesici takım ömrünü %84,2'ye kadar arttırırken CO<sub>2</sub>+MQL ile ıslak işleme karşılaştırıldığında CO<sub>2</sub>+MQL'nin kesici takım ömrünü %93,5'e kadar arttırdığını bulmuşlardır (Şekil 7) (Pereira vd., 2015).



Şekil 7. Farklı işleme şartlarında Inconel 718'in frezelenmesinde oluşan serbest yüzey aşınması (Pereira vd., 2015).

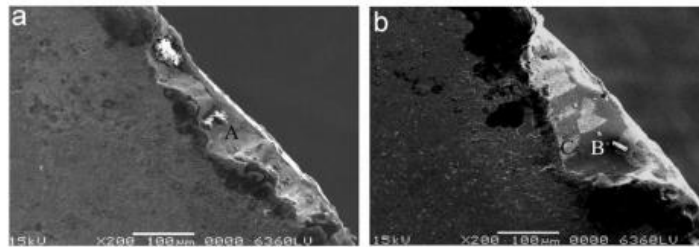
Li ve Chou iş parçası olarak sıcak iş kalıp çeliği (SKD61) kullanılarak MQL metodunun mikrofrezelemedeki etkisi üzerine çalışmışlardır. MQL Blube LB-1 bitkisel yağ debisi 1.88 ve 7.5 ml/saat, basınç 0.5 Mpa, ilerleme 1, 1.5, 2 µm/dev, kesme derinliği 300 µm, iş mili hızı 20000, 30000, 40000 dev/dk seçilmiştir. MQL kullanımı ile kesici takım ömrünün önemli ölçüde arttığı sonucuna varmışlardır (Li ve Chou, 2010). Vazquez ve arkadaşları ise Ti6Al4V alaşımının mikrofrezelenmesinde soğutma ve yağlama koşullarının etkisini; mikro-kanal üretim süreçlerinde soğutma koşulları değişen kuru işleme, jet uygulaması ve MQL gibi işlemler yaparak incelemişlerdir. Kesici takım aşınması ile ilgili olarak yağlama koşullarının performansını değerlendirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, MQL kullanarak Ti6Al4V alaşımının mikrofrezelenmesinde kesici takım aşınması ve kesme sıvısı tüketiminde önemli bir azalmaya neden olduğunu ortaya koymuşlardır (Vazquez vd., 2014). Priarone ve arkadaşları Ti-48Al-2Cr-2Nb (%) intermetalik alaşımlarının frezelenmesinde yağlama stratejilerinin kesici takım aşınması üzerine olan etkilerini değerlendirmişlerdir. Kuru, ıslak ve MQL koşullarını karşılaştırmışlardır. MQL işleme şartlarında daha iyi yağlama özelliğinden dolayı sürtünme azalmasının sonucu olarak kesici takım ömrünün arttığını görmüşlerdir (Şekil 8). Ayrıca MQL'nin çevre dostu çözümü olarak avantajlı olduğunu belirtmişlerdir (Priarone vd., 2014).



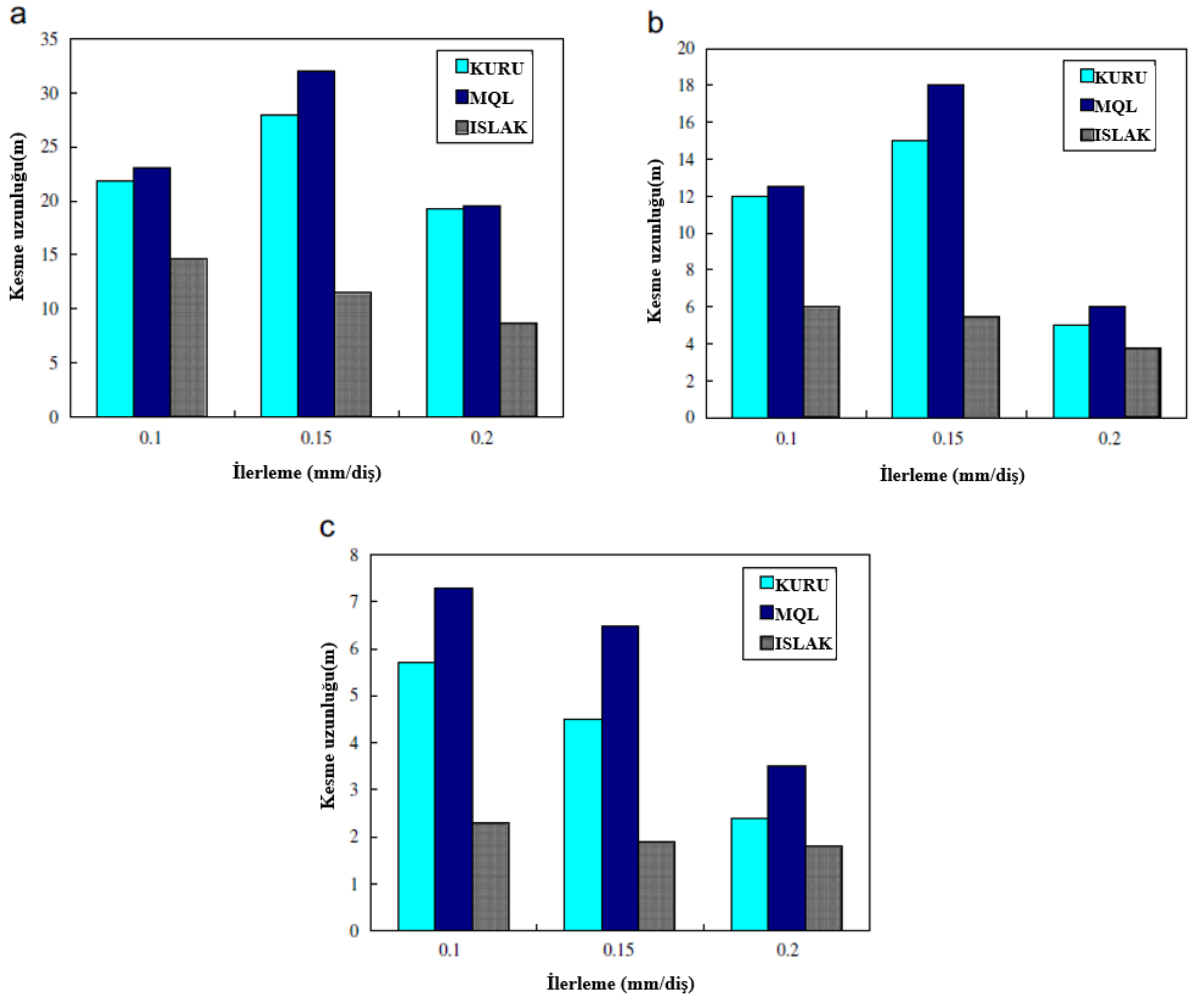


Şekil 8. Soğutma koşullarının takım aşınması üzerindeki etkileri (Priarone vd., 2014).

Kang ve arkadaşları AISI D2 soğuk işlenmiş kalıp çeliğinin  $Ti_{0.75}Al_{0.25}N$  ve  $Ti_{0.69}Al_{0.23}N_{0.08}$  kaplamalı kesici takımlarla yüksek hızlı frezelenmesinde MQL'nin kesici takım ömrüne etkisini incelemişlerdir. Deneysel çalışmalarını su soğutma, kuru ve MQL şartlarında yapmışlardır ve soğutma şartlarına bağlı olarak sonuçları karşılaştırmışlardır. Su soğutma koşulu altında şiddetli termal çatlaklardan dolayı en kısa kesici takım ömrü elde ederken MQL ile en iyi kesici takım ömrünü elde etmişlerdir. MQL'nin her iki kaplamalı kesici takımın ömrü için de yararlı olduğunu gözlemlemişlerdir (Kang vd., 2008). Liao ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada sertleştirilmiş NAK80 çeliğe karbür kaplamalı kesici takım ile yüksek hızlı frezeleme işlemi yapılırken uygulanan MQL tekniğinin fizibilite çalışması yapılmıştır. Farklı kesme şartlarında MQL, Soğutma sıvısı ve kuru kesme işlemleri karşılaştırılmıştır. Soğutma sıvısı kullanılan kesme şartlarında termal çatlaklardan dolayı kesici takım ömründe azalma olurken; MQL uygulamalarında bu açıdan en iyi performans elde edilmiştir. MQL hem düşük hem de yüksek kesme hızlarında kesici takım ömrü açısından faydalı olmuştur. Özellikle yüksek kesme hızlarında düşük viskoziteli yağlar kullanılarak uygulanan MQL yönteminde soğutma işlemi daha etkili olmuştur. SEM görüntüleri göstermiştir ki; yüksek kesme hızlarında MQL kullanımı talaşın takıma yapışıp kaynamasını engellediği için kuru kesme şartlarına kıyasla kesici takım ömrünün uzamasını sağlamaktadır (Şekil 9-10) (Liao vd., 2007).

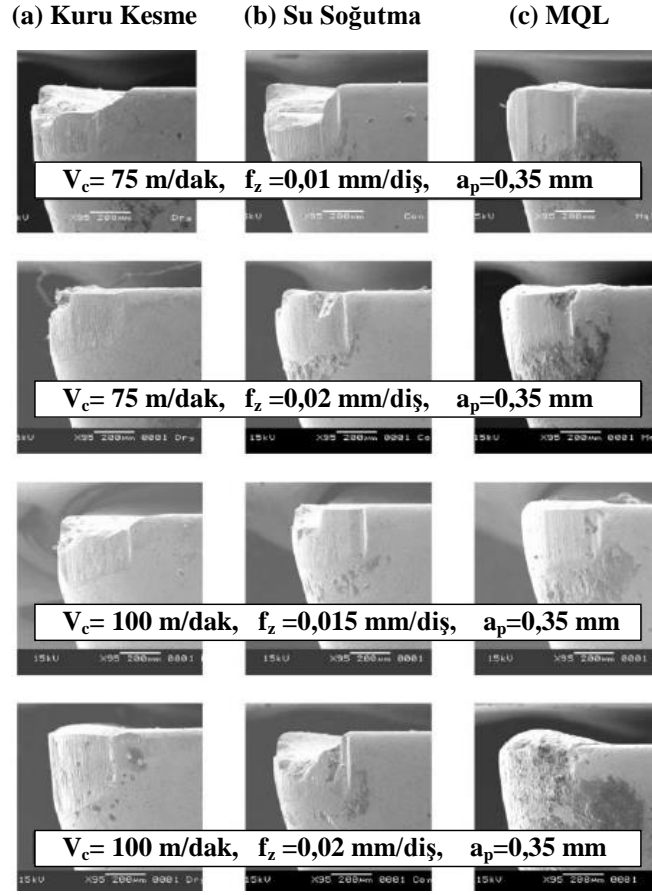


Şekil 9. Kuru ve MQL işleme şartlarında  $V_c=300$  m/dak  $f=0,15$  mm/diş ve  $a=0,3$  mm a) kesme sonunda kuru kesme için kesici kenarın SEM görüntüsü b) kesme sonunda MQL için kesici kenarın SEM görüntüsü (Liao vd., 2007).



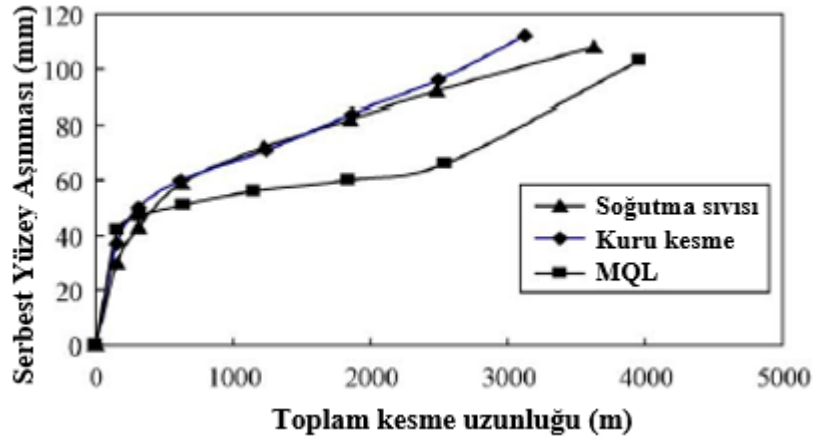
**Şekil 10.** Farklı kesme hızlarında ilerleme oranı ve soğutma yöntemine göre kesici takım ömrü a)  $V=150$  m/dk b)  $V=200$  m/dk c)  $V=250$  m/dk (Liao vd., 2007).

Rahman ve arkadaşları ASSAB 718HH çeliğinin frezelenmesinde MQL, kuru ve su soğutma koşullarının kesici takım aşınması etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, MQL'nin kuru ve su soğutmaya göre kesici takım aşınmasını önemli ölçüde düşürdüğünü gözlemlemişlerdir. MQL ile işlemenin özellikle düşük kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinde en az kesici takım aşınmasını verdiğini tespit etmişlerdir (Şekil 11) (Rahman vd., 2002).



Şekil 11. 47 dakikalık operasyondan sonra aşınan kenarların görüntüleri (Rahman vd., 2002).

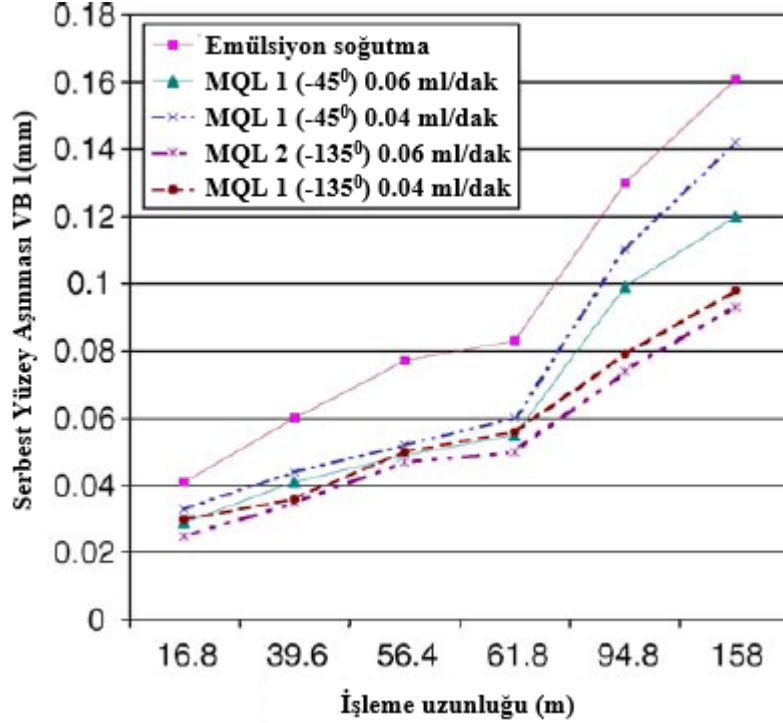
Kishawy ve arkadaşları yüksek hızda A356 alüminyum alaşımının frezeleme işleminde kesici takım aşınması üzerine MQL, kuru kesme ve soğutma sıvısının etkilerini araştırmışlardır (Şekil 12). Bu çalışmalarla MQL'nin soğutma sıvısı tekniğine alternatif olabileceği belirtmişlerdir. Adhesiv aşınma mekanizmasının etkisinin bu teknikle azaldığı gözlemlenmiştir (Kishawy vd., 2005).



Şekil 12. Soğutma metodlarının takım aşınmasına etkisi ( $V=5000$  m/dk,  $f=0.2$  mm/diş,  $a_z=2$  mm) (Kishawy vd., 2005).

Lacalle ve arkadaşları yüksek hızda alüminyum alaşımlarının frezelenmesinde kesici takımda oluşan aşınma üzerinde durmuşlardır (Şekil 13). Yaptıkları çalışmada mikro-damlatmalı hava ile yağ püskürtme yöntemli soğutma ve suda yağ emülsiyonları ile soğutma şeklinde iki teknik kullanmışlardır. MQL tekniğinin etkili ve hızlı bir soğutma yapmasına karşılık; emülsiyon tekniğinin yavaş soğutma yaptığını hem Bilgisayarlı Akış Dinamiği (CFD) ile simülasyon yaparak hem de deneysel olarak gözlemlenmişlerdir. Aynı zamanda nozul enjeksiyon konumunun ilerleme yönüne bağlı olarak etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Kesici takım kenarındaki yağlama/soğutmanın çok önemli bir faktör olduğunu vurgulamışlardır. Geleneksel soğutma yönteminde kesici takım kenarlarının iç kesme bölgelerine soğutma

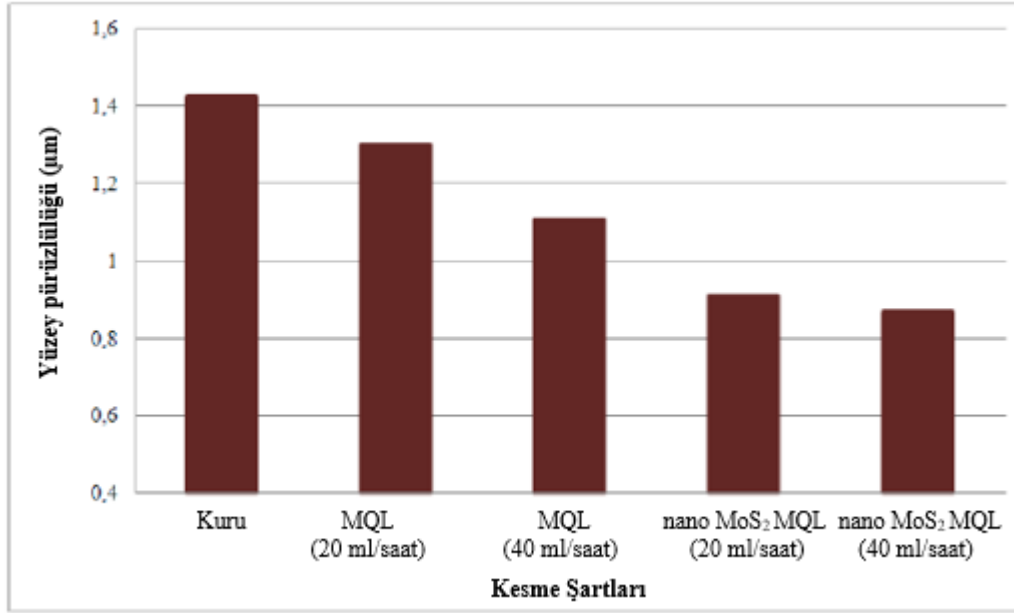
sıvısının ulaşamamasından kaynaklı bir verimsizliğinin olduğunu tespit etmişlerdir. MQL yöntemi basınçlı hava özelliği ile kesme bölgesinde gerek çıkan talaşları uzaklaştırılmasına gerekse de kesici takım ve iş parçasını soğutmasına yardımcı olmaktadır. Ayrıca ilerleme yönünün uygun olarak nozül konumuna göre belirlenmesi verimlilik için önemli olduğu sonucuna varmışlardır. Kesme yağı tüketiminin minimize edilmesi analizi edilerek geleneksel soğutma sistemine oranla MQL’de yaklaşık %95 civarında soğutma sıvısı tüketim miktarının azalması, işleme maliyetini de olumlu yönde etkilediğini bulmuşlardır (L’opez de Lacalle vd., 2006).



Şekil 13. Farklı MQL işleme şartlarında işleme uzunluğuna bağlı olarak elde edilen serbest yüzey aşınması (L’opez de Lacalle vd., 2006).

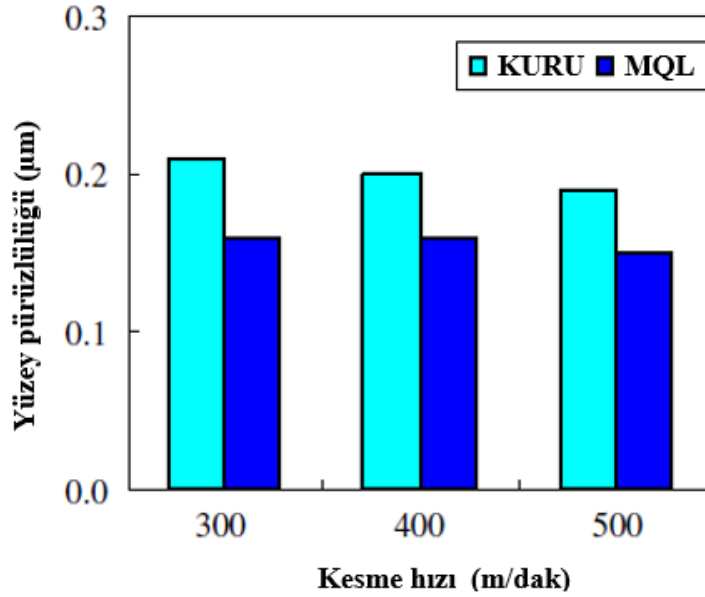
### 3.2. MQL’nin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi

Uysal ve arkadaşları, Nano MoS<sub>2</sub> takviyeli bitkisel kesme sıvısı kullanarak martenzitik paslanmaz çeliğin frezelenmesinde MQL metodu uygulanmasını araştırmışlardır. Kesme şartlarının yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Deneylerde Nano MoS<sub>2</sub> parçacıkları nanosıvı hazırlamak için bitkisel kesme sıvısına ilave edilmiştir. Deney sonuçları MQL metodunun yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiğini göstermiştir. Bunun yanı sıra, MQL akış oranındaki artış ve yağlama etkisi nedeniyle nano MoS<sub>2</sub> partikül takviyeli kesme sıvılı MQL kullanımı yüzey pürüzlülüğü üzerinde bir azalmaya neden olmuştur (Şekil 14). Yaptıkları deneysel sonuçlardan en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin nano MoS<sub>2</sub> partikül takviyeli kesme sıvılı MQL kullanımıyla ortaya çıkmıştır (Uysal vd., 2015). Wang ve arkadaşları Inconel 182 alaşımının yüzey frezelenmesinde kuru ve MQL ile işlemenin etkisini incelemişlerdir. Yazarlar, özellikle verimlilik ve ekonomiklik açısından Inconel 182 alaşımlarının MQL ile frezelenmesinde önemli ölçüde soğutma sıvısı atıklarını düşürdüğünü, üretim maliyetleri azalttığını ve yüzey pürüzlülük değerlerinin azalttığını göstermişlerdir (Wang vd., 2015).



Şekil 14. Martenzitik paslanmaz çeliğin frezelenmesinde farklı soğutma koşulları altındaki yüzey pürüzlülüğü değerleri (Uysal vd., 2015).

Benzer bir çalışmayı Liao ve Lin sertleştirilmiş çeliğin frezelenmesinde kuru ve MQL koşullarının etkisini farklı ilerleme oranları ve kesme hızlarında incelemiştir. Sertleştirilmiş çeliğin frezelenmesinde MQL kullanımının daha iyi yüzey pürüzlülüğü sonuçlarını verdiğini belirtmişlerdir (Şekil 15) (Liao ve Lin, 2007).

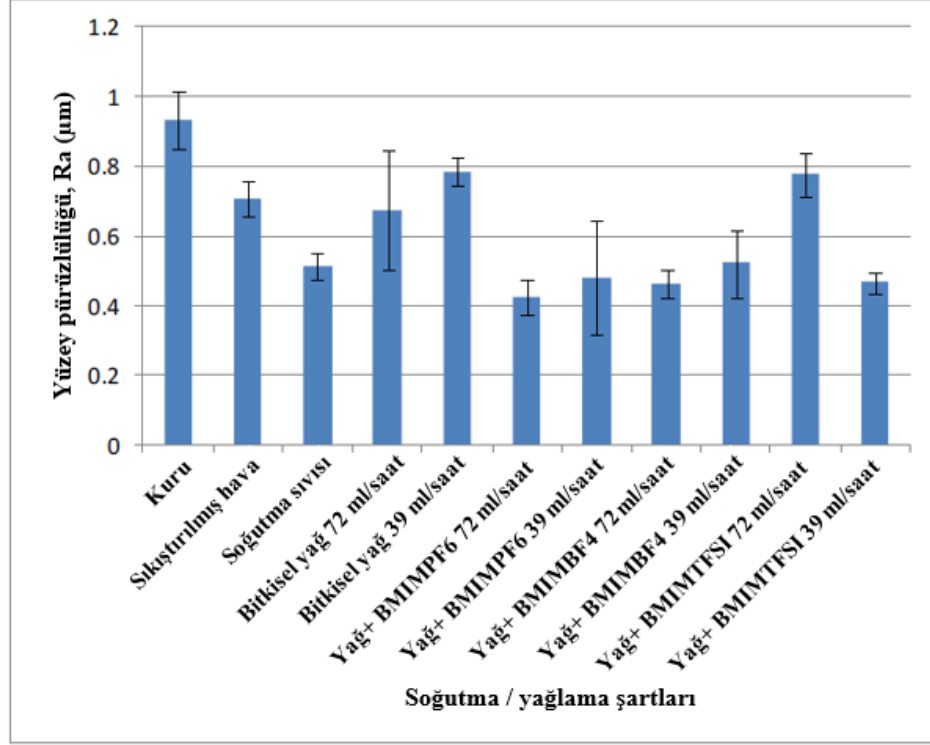


Şekil 15. Farklı kesme hızlarında kuru ve MQL işlemeyle elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerleri (Liao ve Lin, 2007).

Vazquez ve arkadaşları Ti6Al4V alaşımının mikrofrezelenmesinde soğutma ve yağlama koşullarının etkisini; mikro-kanal üretim süreçlerinde soğutma koşulları değişen kuru işleme, jet uygulaması ve MQL gibi işlemler yaparak incelemiştir. Sonuçları yüzey kalitesi ve geometrik şekli ile ilgili olarak yağlama koşullarının performansını değerlendirmek suretiyle elde etmişlerdir. Deneysel sonuçlara göre, MQL kullanarak Ti6Al4V alaşımının mikrofrezelenmesinde mikrokanal boyutları ve yüzey pürüzlülüğü iyileştirdiğini ortaya koymuşlardır. Ayrıca mikrofrezlemede MQL kullanımı kesme sıvısı tüketiminde önemli bir azalmaya neden olduğunu vurgulamışlardır (Vazquez vd., 2014). Goindi ve arkadaşları AISI 1045 çeliğinin işlenmesinde iyonik sıvı katılan bitkisel yağlı MQL ile kuru kesme, geleneksel sıvı soğutma ile kesme ve saf bitkisel kesme sıvılı MQL şartlarını karşılaştırmışlardır. Ayrıca BMIMPF<sub>6</sub>, BMIMBF<sub>4</sub> ve BMIMTFSI olmak üzere üç farklı iyonik sıvı kullanmışlardır. Deneyleri kesme

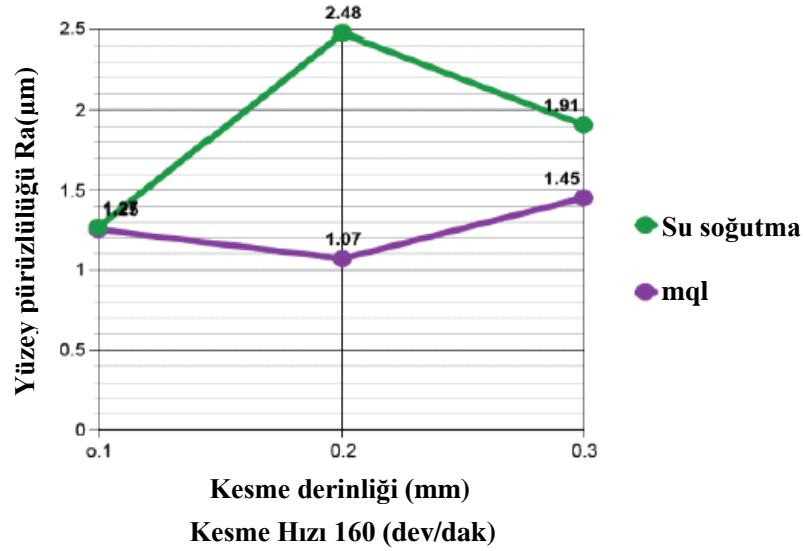


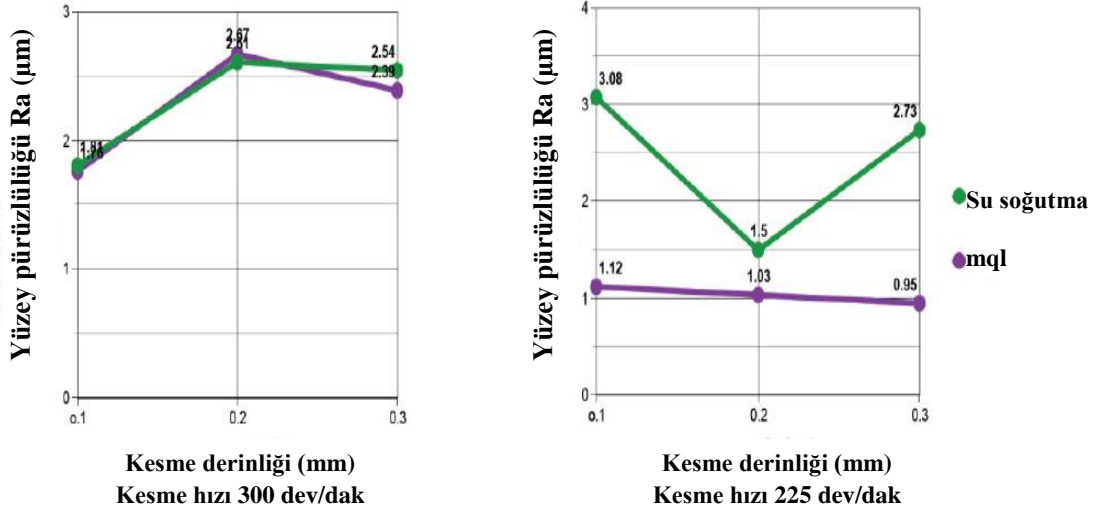
hızı 150 m/dk, ilerleme 0.3 mm/dev, kesme derinliği 0.8 mm ile gerçekleştirmişlerdir. Özellikle yaptıkları frezeleme işlemlerinde uygulanan soğutma yöntemleri arasında iyonik sıvıların işleme sürecinde yüzey pürüzlülüğünü azaltmada önemli bir etkisi olduğunu görmüşlerdir (Şekil 16) (Goindi vd., 2015).



Şekil 16. AISI 1045 çeliğinin farklı soğutma ve yağlama şartları altındaki yüzey pürüzlülüğü değerleri (Goindi vd., 2015).

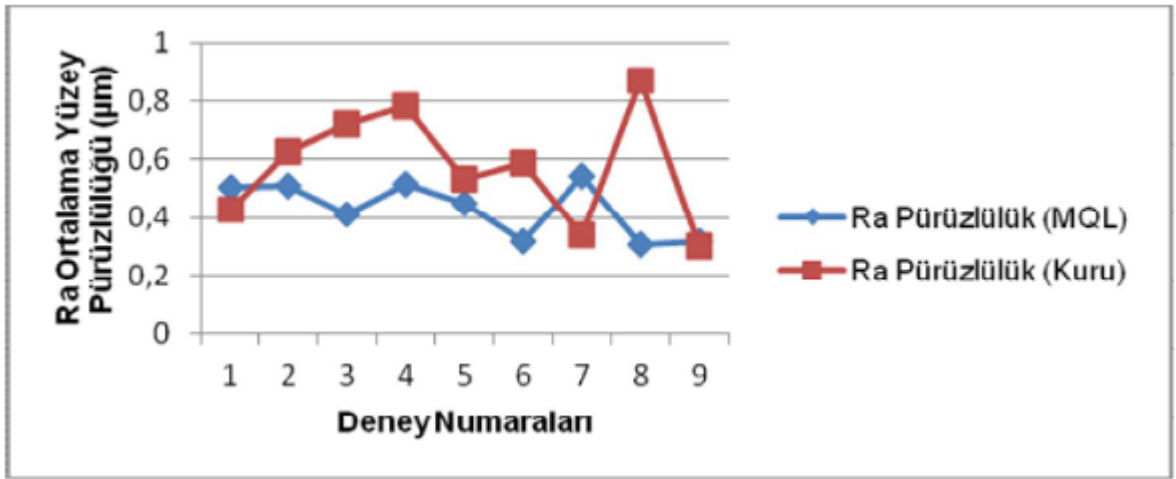
Kedare ve arkadaşları freze operasyonu sırasında finish/bitirme yüzeyi üzerinde kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliğinin etkisini araştırmışlardır. MQL ile elde edilen bitirme yüzeyinin % 27 daha iyi olduğunu gözlemlemişlerdir. Ayrıca en iyi yüzey pürüzlülüğü değerini 225 dev/dk kesme hızı ve 0.3 mm derinlikle elde etmişlerdir (Şekil 17). Yaptıkları çalışmanın bulguları MQL'nin hem yüzey pürüzlülüğü üzerine önemli bir etkisinin hem de ekonomik ve çevreyle uyumlu yağlama tekniği olarak kabul edilebilir olduğunu göstermiştir (Kedare vd., 2014).





Şekil 17. Farklı kesme hızlarında soğutma yöntemlerinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Kedare vd., 2014).

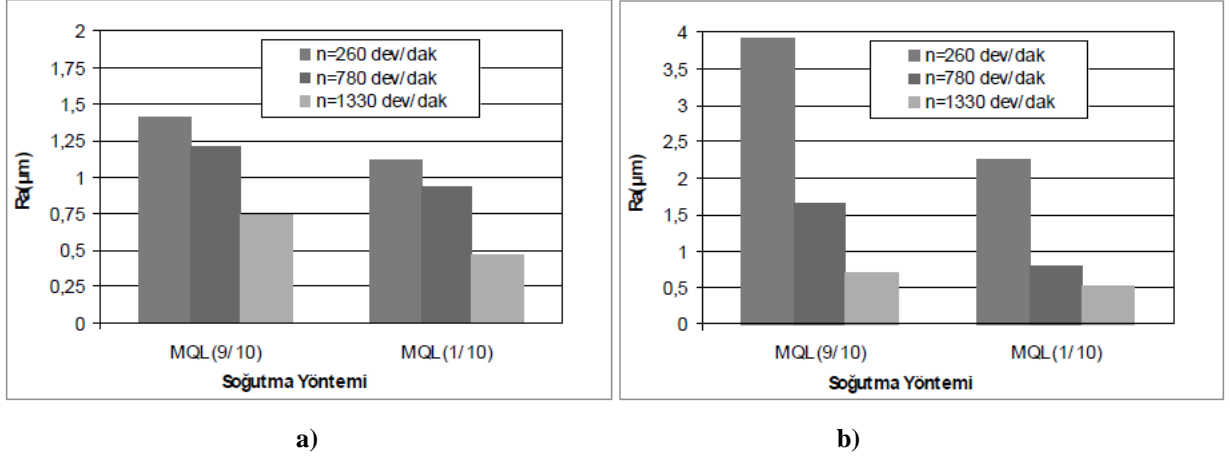
Kurt ve arkadaşları MQL tekniği ile Invar36 demir-nikel alaşımının frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde kesme parametrelerinin etkilerini incelemişlerdir. Dış beslemeli MQL tekniği için, SKF firmasına ait sistem kullanmışlardır. 25 mm<sup>2</sup>/s kinematik viskoziteye sahip LubriOil yağı, kesici takım ve iş parçası ara yüzeyine 4 bar ve 40 ml/sa debi ile püskürtmüşlerdir. Deneylerde ilerlemenin artmasına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiğini, fakat devir sayısının yüzey pürüzlülüğü değeri üzerine çok az etki ettiğini tespit etmişlerdir. Buna ek olarak daha önce yaptıkları kuru işleme göre MQL ile daha iyi yüzey pürüzlülüğü sonuçları elde etmişlerdir (Şekil 18) (Kurt vd., 2012).



Şekil 18. Invar36 Malzemesinin Kuru ve Minimum Miktarla Yağlama (MQL) Sistemi ile İşlenmesi Neticesinde Ölçülen Ortalama Yüzey Pürüzlülük Değerleri (Kurt vd., 2012).

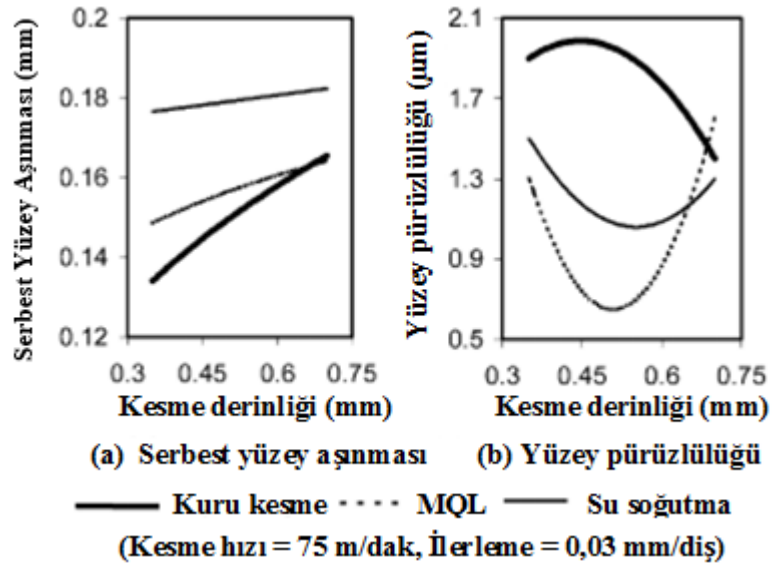
Rahmati ve arkadaşları AL6061-T6 alaşımının frezelenmesinde MoS<sub>2</sub> nanopartikül katkılı MQL'nin yüzey kalitesine etkisini incelemişlerdir. Karşılaştırma yapmak için saf MQL ve % 0.2, 0.5, 1 oranında MoS<sub>2</sub> nanopartikül katkılı MQL kullanmışlardır. Deneyler sonucunda en iyi yüzey kalitesini % 0.5 MoS<sub>2</sub> katkılı işlemlerde elde ederken % 1 katkılı durumda yüzey kalitesinin bozulduğunu görmüşlerdir (Rahmati vd., 2014). Fratila ve Caizar AlMg<sub>3</sub>(ENAW 5754) alaşımının frezelenmesinde kuru, su soğutma ve MQL etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarında MQL'nin yüzey pürüzlülüğü açısından karşılaştırılabilir sonuçlar verdiğini görmüşlerdir (Fratila ve Caizar, 2011). Shahrom ve arkadaşları AISI 1060 alüminyum iş parçasının frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerinde MQL, ıslak ve kuru işleme gibi soğutma şartlarının etkisini incelemişlerdir. MQL'nin ıslak işleme ile karşılaştırıldığında daha düşük yüzey pürüzlülük değerlerini verdiğini ve maliyet ile çevre kirliliğini önemli ölçüde azalttığı sonucuna varmışlardır (Shahrom vd., 2013). Wakabayashi ve Suda kesme hızı, ilerleme oranı ve çeşitli soğutma koşullarının AC8A alüminyum alaşımının frezelenmesine etkisini incelemişlerdir. Soğutma koşulları

olarak kuru, ıslak ve MQL koşullarını kullanmışlardır. Deney sonuçlarından düşük kesme hızı (63 m/dk) ve yüksek ilerleme oranında (0.09 mm/diş) MQL'nin daha iyi yüzey kalitesi sonuçları verdiğini görmüşlerdir (Wakabayashi ve Suda, 2008). Hüseyinoğlu ve arkadaşları minimum soğutma sıvısı kullanılarak AA7075 alüminyum alaşımlı bir malzemenin frezelenmesinde işleme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde farklı devir sayıları, ilerlemeler, kesici takımlar, MQL yağlayıcı 5 ml/dk debili bor yağı ve 5 bar basınçlı hava kullanmışlardır. MQL ve geleneksel soğutmaya karşılaştırmışlardır. MQL uygulamasının yüzey pürüzlülüğünün iyileşmesine katkı sağladığını görmüşlerdir (Şekil 19) (Hüseyinoğlu ve Tosun 2009).



Şekil 19. Yüzey pürüzlülüğünün, soğutma yöntemine göre değişimi a) HSS freze b) TiN freze (Hüseyinoğlu ve Tosun 2009).

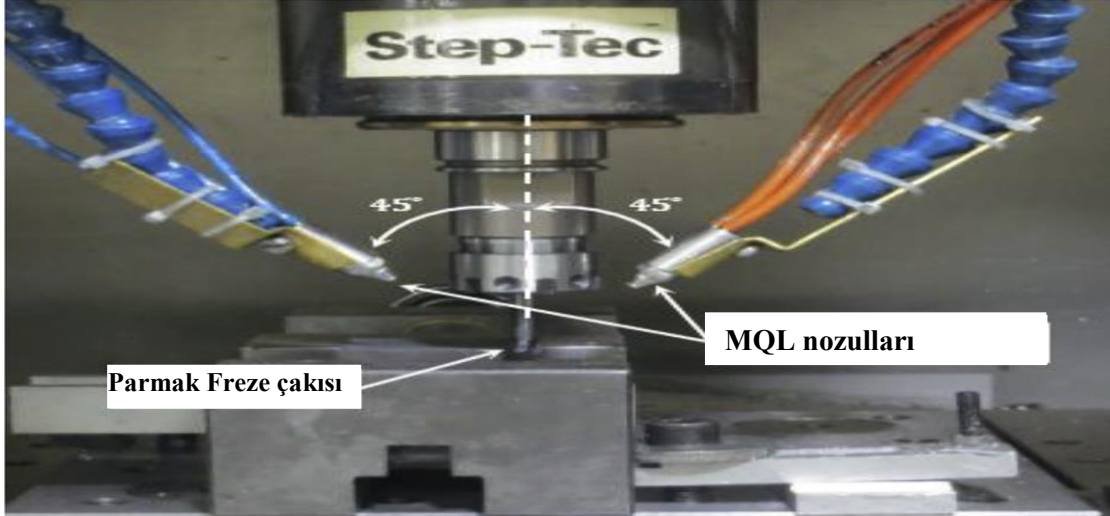
Kolahdouz ve arkadaşları gama titanyum alüminidin MQL ve kuru koşullar altında yüksek hızlı frezelenmesinin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisini araştırmışlardır. Ortaya koymuş oldukları çalışmada elde edilen sonuçlara bağlı olarak MQL ile frezelemenin yüzey pürüzlülüğü değerinin düştüğünü gözlemlemişlerdir (Kolahdouz vd., 2015). Rahman ve arkadaşları ASSAB 718HH çeliğinin frezelenmesinde MQL, kuru ve su soğutma koşullarının finish yüzeyine etkisini incelemişlerdir. Deney sonuçlarına göre, yüzey pürüzlülüğü açısından MQL'nin kuru kesmeden daha iyi iken su soğutma ile karşılaştırılabilir sonuç verdiğini gözlemlemişlerdir (Şekil 20) (Rahman vd., 2002).



Şekil 20. Eksenel kesme derinliğinin a) serbest yüzey aşınması b) yüzey pürüzlülüğü üzerinde etkisi (Rahman vd., 2002).

Hassanpour ve arkadaşları AISI 4340 alaşımlı çeliği MQL kullanarak sert frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğünü, mikrosertliği ve beyaz tabaka kalınlığını araştırmışlardır. Araştırmalarında, sert frezeleme

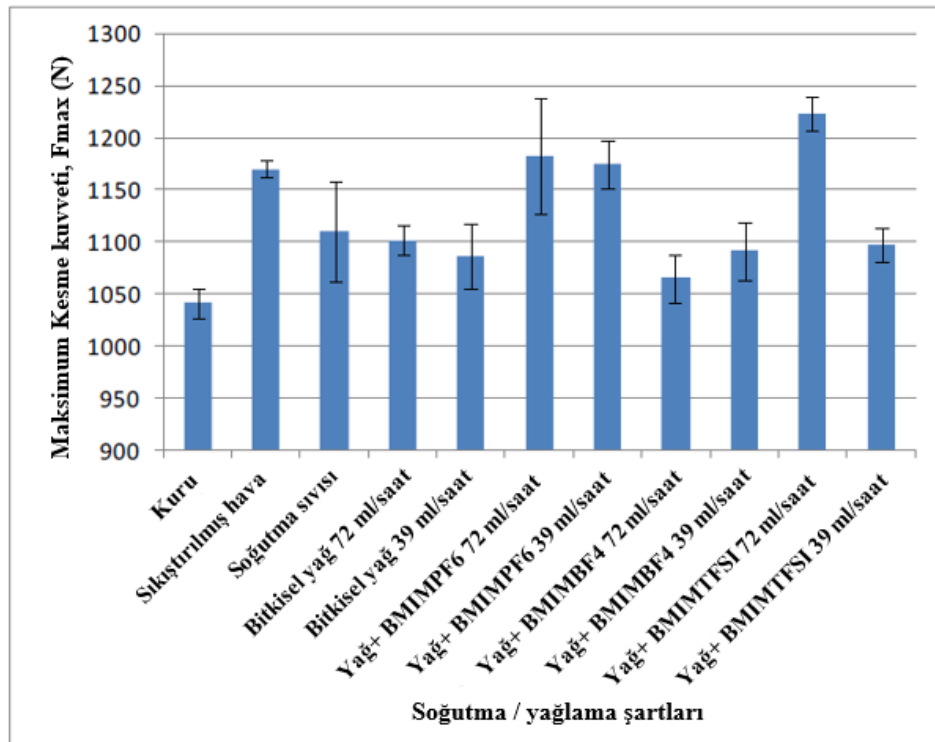
işleminde yüzey bütünlüğünü Tepki Yüzey Metodolojisi (RSM) tekniği uygulayarak incelemiştir. Ayrıca MQL uygulamasını tek uçlu değil çift uçlu spreyle yapmışlardır (Şekil 21). MQL ile frezeleme işleminde en düşük yüzey pürüzlülüğünü maksimum kesme hızı, minimum ilerleme ve düşük kesme derinliğinde elde etmişlerdir (Hassanpour vd., 2016).



Şekil 21. Çift uçlu MQL uygulaması (Hassanpour vd., 2016).

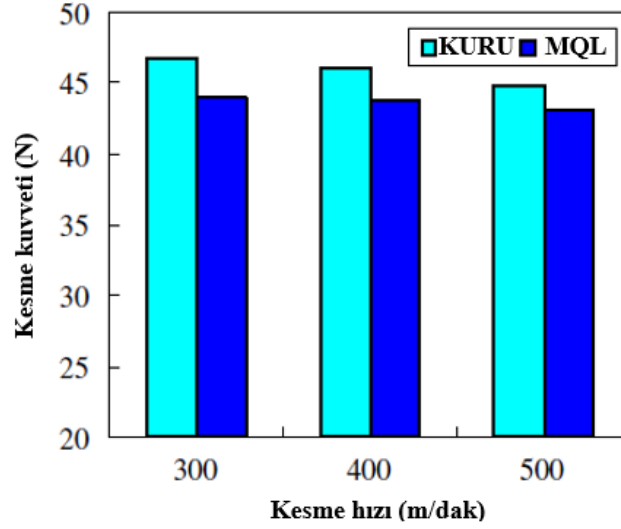
### 3.3. MQL'nin kesme kuvvetleri üzerinde etkisi

Goindi ve arkadaşları AISI 1045 çeliğinin işlenmesinde iyonik sıvı katılan bitkisel yağlı MQL ile kuru kesme, geleneksel sıvı soğutma ile kesme ve saf bitkisel kesme sıvılı MQL şartlarını karşılaştırmışlardır. Ayrıca BMIMPF6, BMIMBF4 ve BMIMTFSI olmak üzere üç farklı iyonik sıvı kullanmışlardır (Şekil 22). Deneyleri kesme hızı 150 m/dk, ilerleme 0.3 mm/dev, kesme derinliği 0.8 mm ile gerçekleştirmişlerdir. Yaptıkları frezeleme işlemlerinde iyonik sıvıların işleme sürecinde kesme kuvvetlerini azaltmada önemli bir etkisi olduğunu görmüşlerdir (Goindi vd., 2015).



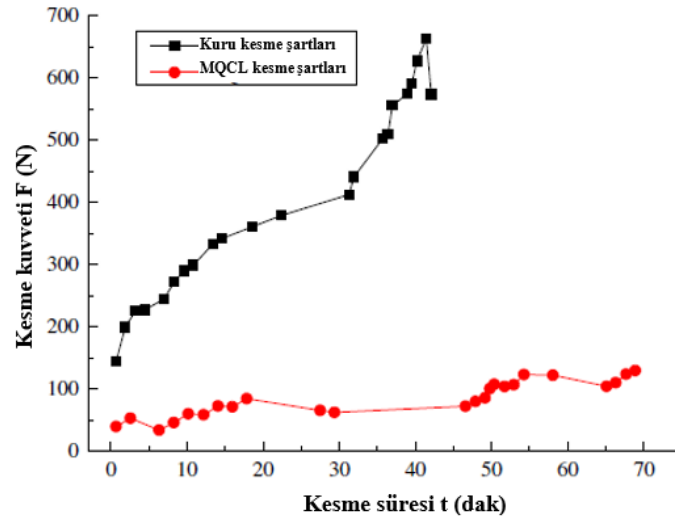
Şekil 22. Farklı soğutma ve yağlama şartlarında ortogonal frezelemede maksimum kesme kuvvetleri değişimi (Goindi vd., 2015).

Liao ve Lin sertleştirilmiş çeliğin frezelenmesinde kuru ve MQL koşullarının etkisini farklı ilerleme oranları ve kesme hızlarında incelemiştir. MQL'nin daha düşük kesme kuvvetleri oluşturduğunu belirtmiştir (Şekil 23) (Liao ve Lin, 2007). Zhang ve arkadaşları Inconel 718 alaşımının frezelenmesinde kuru ve MQL koşullarının etkisini araştırmışlardır. MQL'nin kuru frezelemeye oranla kesme kuvvetlerini düşürdüğünü gözlemlemiştir (Şekil 24) (Zhang vd., 2012).



Şekil 23. Farklı kesme hızı ve soğutma koşulları altındaki kesme kuvveti değişimi (Liao ve Lin, 2007).

Rahman ve arkadaşları ASSAB 718HH çeliğinin frezelenmesinde MQL, kuru ve su soğutma koşullarının kesme kuvveti üzerine etkilerini incelemiştir. Deney sonuçlarına göre, MQL tekniğinin kuru ve su soğutmaya göre kesme kuvvetlerini önemli ölçüde düşürdüğünü ve MQL'nin özellikle düşük kesme hızı, düşük ilerleme oranı ve düşük kesme derinliğinde kesme kuvveti açısından çok etkili olduğu sonucuna varmışlardır (Rahman vd., 2002).



Şekil 24. Farklı kesme şartlarında kesme zamanına bağlı olarak esas kesme kuvveti değişimleri (Zhang vd., 2012).

Yapılan literatür çalışmasının sonucunda MQL tekniğinin, geleneksel soğutma tekniklerine göre çeşitli avantajlarının olduğu görülmüştür. Özellikle kesici takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri gibi frezeleme işleminde önemli olan üç parametre üzerinde MQL tekniğinin daha iyi sonuç verdiği saptanmıştır. Ayrıca bilimsel çalışmaların sonuçlarından hareketle MQL tekniğinin, geleneksel soğutma yöntemine kıyasla işleme maliyetlerini azalttığını, çevre ve insan sağlığı açısından daha yararlı olduğunu ortaya koymaktadır. Bu nedenlerden dolayı son yıllarda MQL tekniği üzerinde birçok bilimsel çalışma yapılmıştır ve hala yapılmaktadır.



#### 4. SONUÇLAR

Bu çalışmada MQL yönteminin frezeleme operasyonlarındaki uygulamaları incelenerek, deney sonuçları kesici takım aşınması, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetlerine göre değerlendirilmiş olup, elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- Frezeleme operasyonlarında MQL kullanımı kesici takım ömrünü önemli ölçüde artırdığını sonucuna varılmıştır.
- MQL ile frezelemenin yüzey pürüzlülüğü değerlerini azaltmada önemli bir etkisi olduğu görülmüştür.
- MQL tekniğinin kesme kuvvetlerini önemli ölçüde düşürdüğünü sonucuna varılmıştır.
- Verimlilik ve ekonomiklik göz önüne alındığında frezeleme işlemlerinde MQL kullanımı önemli ölçüde atıkları düşürdüğü, üretim maliyetleri azalttığı, çevreyle uyumlu yağlama tekniği olarak kabul edilebilir olduğunu göstermiştir.

#### 5. KAYNAKÇA

- Autret, R., ve Liang, S.Y. (2003). Minimum quantity lubrication in finish hardturning. *HNICEM '03*, 1-9.
- Çakır, A., Yağmur, S., ve Şeker, U. (2013). Farklı şartlarda uygulanan minimum miktarda soğutma yönteminin AA7075 alüminyum alaşımının tornalanması sürecine olan etkisinin deneysel olarak incelenmesi. *4. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, 07-09 Kasım 2013, Kuşadası, 173-183.
- Çelik, Y. H. (2014). Investigating the effects of cutting parameters on the hole quality in drilling the Ti-6Al-4V alloy, *Materials and technology*, 48 (5), 653-659.
- Dhar, N.R., Kamruzzaman, M., ve Ahmed, M. (2006). Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 299-304.
- Dhar, N.R., Ahmed, N.T., ve Islam, S. (2007). An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47, 748-753.
- Fratila, D., ve Caizar, C. (2011). Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3. *J. Clean. Prod.*, 19, 640-645.
- Iqbal, A., Al-Ghamdi, K.A., ve Hussain, G. (2016). Effects of tool life criterion on sustainability of milling. *Journal of Cleaner Production*, 139, 1105-1117.
- İlhan M., Çavuşoğlu O., Duran A., ve Şeker U. (2013). Talaş kaldırma işlemlerinde minimum miktarda yağlama (MQL) uygulamasının kesme hızı ve yağlama debisine bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin araştırılması. *4.ulusal talaşlı imalat sempozyumu*, 7-9 kasım 2013, Kuşadası 637-643.
- Goindi, G.S., Chavan, S.N., Mandal, D.,ve Sarkar, P. (2015). Investigation of ionic liquids as novel metalworking fluids during minimum quantity lubrication machining of a plain carbon steel. *Procedia CIRP*, 26, 341-345.
- Hassanpour, H., Sadeghi, M.H., Rasti, A., ve Shajari, S. (2016). Investigation of surface roughness, microhardness and white layer thickness in hard milling of AISI 4340 using minimum quantity lubrication. *Journal of Cleaner Production*, 120, 124-134.

- Hüseyinoğlu, M., ve Tosun, N. (2009). 7075 Alüminyum alaşımlarının frezelenmesinde minimum soğutma sıvısının yüzey pürüzlülüğüne etkisi. 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*.
- Kang, M.C., Kim, K.H., Shin, S.H., Jang, S.H., Park, J.H., ve Kim, C. (2008). Effect of the minimum quantity lubrication in high-speed end-milling of AISID2 cold-worked die steel (62HRC) by coated carbide tools. *Surface & Coatings Technology*, 202, 5621-5624.
- Kedare S. B., Borse D.R., ve Shahane P. T. (2014). Effect of Minimum Quantity Lubrication (MQL) on Surface Roughness of Mild Steel of 15HRC on Universal Milling Machine. *Procedia Materials Science*, 6, 150-153.
- Kim, I., ve Hur, T. (2009). Integration of working environment into life cycle assessment Framework. *Int. J. Life Cycle Assess*, 14, 290-301.
- Kishawy, H.A., Dumitrescu, M., Ng, E.-G., ve Elbestawi, M.A. (2005). Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high-speed machining of A356 aluminum alloy. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45, 219-227.
- Klocke, F., ve Eisenblatter, G. (1997). Dry Cutting. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 46(2), 519-526.
- Klocke, F., ve Gerschwiler, K. (2003). Minimalmengenschmierung-Systeme, Medien, Einsatzbeispiele und ökonomische Aspekte der Trockenbearbeitung, Trockenbearbeitung von Metallen. *Proc. of the VDI-Seminar*, Stuttgart, Mar. 18 (2), 1-20.
- Kolahdouz, S., Hadi, M., Arezoo, B., ve Zamani, S. (2015). Investigation of surface integrity in high speed milling of gamma titanium aluminide under dry and minimum quantity lubricant conditions. *Procedia CIRP*, 26, 367-372.
- Kurt, M., Bakur, B., Mutlu, B., Atakök, G., ve Girit, O. (2012). INVAR36 Demir-Nikel Alaşımının Minimum Miktarda Yağlama (MQL) Tekniği ile Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi. 3. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, 04-05 Ekim 2012, Ankara, 233-239.
- Kuzu A.T., Tülü T., Baysal G., Çelik C., ve Bakkal M. (2013). CO<sub>2</sub> – MQL sisteminin işlenebilirliğe etkisi. 4. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, 7-9 Kasım 2013, Kuşadası, 99-108.
- Li, K.M., ve Chou S.Y. (2010). Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 2163-2170
- Liao, Y., ve Lin, H. (2007). Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel. *Int. J. Mach. Tool. Manuf.*, 47, 1660-1666.
- Liao, Y.S., Lin, H.M., ve Chen, Y.C. (2007). Feasibility study of the minimum quantity lubrication in high-speed end milling of NAK80 hardened steel by coated carbide tool. *International Journal of Machine tools & Manufacture*, 47, 1667-1676.
- L'opez de Lacalle, L.N., Angulo, C., Lamikiz, A., ve S'anchez, J.A. (2006). Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 11-15.
- Najiha, M.S., Rahman, M.M., ve Kadirgama, K. (2016). Performance of water-based TiO<sub>2</sub> nanofluid during the minimum quantity lubrication machining of aluminium alloy. AA6061-T6. *Journal of Cleaner Production*, 1-14.
- Park, K., H. (2010). A Study on Droplets and Their Distribution for Minimum Quantity Lubrication (MQL). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(9): 824-833.
- Park, K.H., Ewald, B., ve Kwon, P.Y. (2011). Effect of Nano-Enhanced Lubricant in Minimum Quantity Lubrication Balling Milling. *Journal of Tribology*, 133, 1-8.
- Pereira, O., Català, P., Rodríguez, A., Ostra, T., Vivancos, J., Rivero, A., López de Lacalle, ve L.N. (2015). The use of hybrid CO<sub>2</sub>+MQL in machining operations. *Procedia Engineering*, 132, 492-499.
- Prakash, J.R.S., Rahman, M., Kumar, A.S., ve Lim, S.C. (2001). Effect of minimal quantities of lubricant in micro milling. *Initiatives Precis. Eng. Begin. a Millenn*, 309-313.
- Priarone, P.C., Robiglio, M., Settineri, L., ve Tebaldo, V. (2014). Milling and turning of titanium aluminides by using minimum quantity lubrication. *Procedia CIRP*, 24, 62-67.
- Rahman, M., Kumar, A.,S., ve Salam, M.U. (2002). Experimental evaluation on the effect of minimal quantities of lubricant in milling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42, 539-547.

- Rahmati, B., Sarhan, A.,A.,D., ve Sayuti, M. (2014). Morphology of surface generated by end milling AL6061-T6 using molybdenum disulfide (MoS<sub>2</sub>) nanolubrication in end milling machining. *J. Clean. Prod.* 66, 685-691.
- Sadek, A., Meshreki, M., Shi, Z., ve Attia, H. (2010). A Comparative Study on Conventional and Orbital Drilling of Woven Carbon Fiber Reinforced Epoxy Laminates. *Proceedings CIRP-2nd International Conference on Process Machine Interactions*, Vancouver, B.C., Canada.
- Shahrom, M.S., Yahya, N.M., ve Yusoff, A.R. (2013). Taguchi Method Approach on Effect of Lubrication Condition on Surface Roughness in Milling Operation, *Procedia Engineering*, 53, 594-599.
- Suzuki, S. (2002). Developments in Oil Supplying Systems for MQL Cutting. *Journal of Japanese Society of Tribologists*, 47, 538-543.
- Uysal, A., Demiren, F., ve Altan, E. (2015). Applying Minimum Quantity Lubrication (MQL) Method on Milling of Martensitic Stainless Steel by Using Nano MoS<sub>2</sub> Reinforced Vegetable Cutting Fluid. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, 2742-2747.
- Tawakoli, T., Hadad, M., Sadeghi, M.H., Daneshi, A., ve Sadeghi, B. (2011) Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolante lubricant types. *J. Clean. Prod.*, 19, 2088-2099.
- Thornburg, J., ve Leith, D. (2000). Size Distribution of Mist Generated During Metal Machining. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 15(8): 618-628.
- Uysal, A., Demiren, F., ve Altan, E. (2015). AISI 304 Paslanmaz Çeliğin Nano Grafen Katkılı Bitkisel Esaslı Kesme Sıvısı ve MQL Yöntemi Kullanılarak Frezelenmesinde Takım Aşınması. *6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*, 5-7 Kasım 2015, İstanbul, 356-363.
- Vazquez, E., Gomar, J., Ciurana, J., ve Rodríguez, C.A. (2014). Analyzing effects of cooling and lubrication conditions in micromilling of Ti6Al4V. *Journal of Cleaner Production*, 87, 906-913.
- Wakabayashi, T., ve Suda, S. (2008). Environmentally friendly machining of aluminium using minimal quantity lubrication system. *In: proceedings of 41st CIRP conference on manufacturing systems*, Tokyo, Japan, May 26-28, 377-380.
- Wang, C., Li, K., Chen, M., ve Liu, Z. (2015). Evaluation of minimum quantity lubrication effects by cutting force signals in face milling of Inconel 182 overlays, *Journal of Cleaner Production*, 108, 145-157.
- Weinert, K., Inasaki, I., Sutherland, J.W., Wakabayashi, T. (2004). Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 53(2), 511-537.
- Winder, C., ve Balouet, J.-C. (2002). The toxicity of commercial jet oils. *Environ. Res.*, 89, 146-164.
- Yıldırım, Ç.V., Kıvak, T., ve Erzincanlı, F. (2015). Minimum miktarda yağlama tekniğinin delme ve taşlama operasyonlarındaki uygulamaları üzerine bir derleme. *6.ulusal talaşlı imalat sempozyumu*, 5-7 Kasım 2015, İstanbul.
- Zhang, S., Li, J.F., ve Wang, Y.W. (2012). Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *Journal of Cleaner Production*, 32, 81-87.