



Alınma

04 Şubat 2022

Düzeltilme

20 Nisan 2022

Kabul

24 Mayıs 2022

* Abdulhalim Aşkan.

e-mail: aaskan@erciyes.edu.tr

Anahtar Kelimeler:

- Delme
- Kesme Sıvısı
- MMY
- Kesme Kuvveti
- Takım Ömrü
- Yüzey Pürüzlülüğü

Delme Operasyonlarında Kesme Sıvısı Uygulamaları: Derleme Çalışması

Abdulhalim Aşkan^{1*}

¹ Uçak Gövde ve Motor Bakımı Bölümü, Erciyes Üniversitesi, 38030, Kayseri, Türkiye

ÖZET

Delme işlemlerinde işlenen yüzeyin pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve takım ömrü gibi karakteristik özellikler üzerinde kesme sıvısının tipi ile soğutma/yağlama metodu; ilerleme hızı, kesme hızı gibi işleme parametreleri kadar önemlidir. Kesme sıvısı, delme işlemlerinde yağlama ve soğutma işlevlerini yaparak, sürtünmenin ve ihtiyaç duyulan kesme kuvvetinin azalmasını, ısının işleme bölgesinden çevreye daha hızlı yayılmasını ve kesme bölgesinden talaşların tahliyesini kolaylaştırarak yüzey kalitesinin artmasını sağlamaktadır. İşleme performansı (soğutma, yağlama vb.), maliyet ve çevre koruması gibi parametrelerin tümü göz önüne alındığında minimum miktarda yağlama (MMY) uygulaması diğer tüm kesme sıvı uygulamaları içerisinde en verimli yöntem olarak öne çıkmaktadır. MMY uygulaması basınçlı hava ve kesme sıvısı karışımını işleme bölgesine minimum miktarda ve atomize bir şekilde püskürtmektedir. İşleme sürecinde soğutma sıvısının kullanımını azaltarak maliyeti ve kesme sıvısının çevreye verdiği zararı da minimuma indirmektedir. MMY uygulamasında kesme sıvısı içerisine karbon nanotüp (CNT), nano-grafen, alüminyum oksit (Al_2O_3), elmas vb. metal veya metal oksitler takviye edilerek kesme sıvısının soğutma ve yağlama performansı iyileştirilebilmektedir. Bu derleme çalışmasında kesme sıvılarının kullanım amacı ve kesme sıvılarının sınıflandırılması geniş bir literatür araştırması ile sunulmuştur. Daha sonra minimum miktarda yağlama uygulamasının avantajları ve diğer uygulamalara kıyasla öne çıkan özellikleri üzerinde durulmuştur. MMY uygulamasının delme işlemlerinde takım ömrü, işlenen bölgenin yüzey kalitesi ve kesme ve tork kuvvetleri üzerindeki etkisi literatür çalışmaları ile detaylandırılarak verilmiştir.

Applications of Cutting Fluid in Drilling Operations: A Review Study

Abdulhalim Aşkan^{1*}

¹ Department of Airframes and Powerplants Maintenance, Erciyes University, 38030, Kayseri, Turkey

ABSTRACT

Received

04 February 2022

Revised

20 April 2022

Accepted

24 May 2022

* Abdulhalim Aşkan.

e-mail: aaskan@erciyes.edu.tr

Keywords:

- Drilling
- Cutting Fluid
- MQL
- Cutting Force
- Tool Life
- Surface Roughness

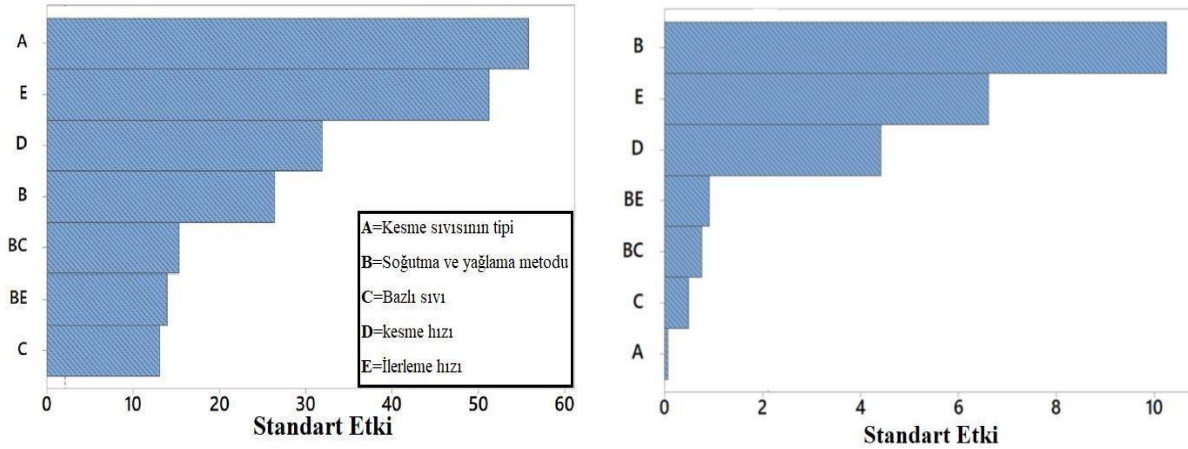
The type of cutting fluid and the cooling/lubrication method on the characteristics property such as the roughness of the machined surface, cutting force and tool life in drilling operations; is as important as machining parameters such as feed rate and cutting speed. Cutting fluid provides lubrication and cooling functions in drilling processes, reducing friction and the required cutting force, spreading the heat faster from the machining area to the environment, and facilitating the evacuation of chips from the cutting area, thus increasing the surface quality. Considering all parameters such as machining performance (cooling, lubrication, etc.), cost and environmental protection, minimum quantity lubrication (MQL) application stands out as the most efficient method among all other cutting fluid applications. The MQL application sprays the compressed air and cutting fluid mixture to the machining area in a minimal amount and in an atomized manner. It also minimizes the cost and environmental damage of the cutting fluid by reducing the use of coolant in the machining process. In MQL application cooling and lubrication performance of the cutting fluid can be improved by supplementing metal or metal oxides such as carbon nanotube (CNT), nano-graphene, aluminium oxide (Al_2O_3) diamond etc. In this review study, the purpose of using cutting fluids and the classification of cutting fluids are presented with an extensive literature search. Then, the advantages of the minimum quantity lubrication application and its prominent features compared to other applications are emphasized. The effect of MQL application on tool life, surface quality of the machined area and cutting and torque forces in drilling operations are given in detail with literature studies.

1. Giriş (Introduction)

Delik delme işlemleri, tornalama ve frezeleme gibi talaşlı imalat işlemlerinin tamamı dikkate alındığında, farklı sanayii alanlarında kullanım oranı değişmekle birlikte, bu imalat işlemlerinin yaklaşık olarak %33'lük gibi bir payını oluştururken (Chen ve Tsao, 1999; ZHAO, 1994), harcanan zamanın ise yaklaşık %25'lik dilimi delme işlemlerine ayrılmaktadır (Bayraktar vd., 2017). Havacılık sanayiinde özellikle perçin kullanımına bağlı olarak bu oran %40-60 aralığında olduğu bilinmektedir (Isbilir ve Ghassemieh, 2011; Kivak ve Şeker, 2015). Delme işlemlerinde takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme ısısı gibi önemli parametrelerin geliştirilmesi açısından kesme sıvısının kullanılması hayati önem taşımaktadır (Gürbüz vd., 2017; Liao ve Lin, 2007; Pal vd., 2020). Kesme sıvısının daha yüksek kesme ve ilerleme hızlarına imkân verdiği rapor edilmiştir (Hosseini Tazehkandi vd., 2014).

Kesme sıvıları frezeleme işlemi sırasında meydana gelen ısının, sürtünme kuvvetinin ve işleme kuvvetlerinin azaltılması için kullanılmaktadır. Su, işleme sürecinde kullanılan ilk kesme sıvısıdır. Kesme sıvısı olarak performans gösterme yeteneği üzerine daha fazla araştırma yapılması ile yeni sıvılar geliştirilmiş ve suyun yerini almıştır (Erween Abd Rahim ve Dorairaju, 2018). Frezeleme işlemlerinde kesme sıvısı kullanımının temel amacı, takım ile materyal arayüzü arasında bir film tabakası oluşturarak takımın malzemeye direk temasının önlenmesi ve oluşan talaşların kesme bölgesinden uzaklaştırılmasıdır. Böylece kesme bölgesinde oluşan temas yüzey alanı azalırken buna bağlı olarak sürtünme kuvveti ve kesme ısısı da azalmaktadır (Naves vd., 2013). Delme işlemlerinde kesme ısısı, aşınma, çap doğruluğu, takım ömrü ve eksenel açıklık gibi işleme performansını belirleyen parametreler; kesme hızı, ilerleme hızı, matkap ucu malzemesi ve kaplamasına bağlı olmasının yanı sıra (Niketh ve Samuel, 2018; Zhang

vd., 2008), kesme sıvılarının kullanılmasına da bağlı olarak büyük ölçüde değişim göstermektedirler (R. Li vd., 2007; Pal vd., 2020; Zhang vd., 2008). Tran Minh Duc vd. (Duc vd., 2020) Hardox 500 sert çeliğinin farklı parametreler altında delinmesi ile ilgili çalışmalarında delme kesme kuvveti ve delik yüzey pürüzlülüğüne etki eden en etkili parametrelerin sırası ile kesme sıvısının tipi ve yağlama/soğutma metodu olduğu belirtilmiştir (bkz şekil 1).



Şekil 1. Bazı parametrelerin (a) delme kesme kuvveti ve (b) yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisinin önem sırası (Order of importance of the influence of some parameters on (a) drilling thrust and (b) surface roughness) (Duc vd., 2020)

Niketh ve Samuel tarafından yapılan bir çalışmada mikro delme işlemlerinde kesme sıvısının kullanılmasının, işleme sırasında meydana gelen ısının çevreye daha hızlı yayılmasını sağlayarak takım ömrünü arttırdığı rapor edilmiştir (Niketh ve Samuel, 2018). Titanyum alaşımlarının delinmesi ile ilgili Ru Li ve diğer takım arkadaşları tarafından yapılan başka bir çalışmada kesme sıvılarının kullanılmasının takım ömrü açısından hayati önem taşıdığı ve takım ömrünü kuru ortam şartlarına kıyasla yaklaşık 10 kat arttırdığı belirtilmiştir (R. Li vd., 2007). Heinemanna ve çalışma arkadaşlarının kesme sıvısının takım performansı üzerindeki etkisinin incelendiği çalışmada kesme sıvısının kullanılması ile takımların kaplamalı olup olmamasına ve kaplama malzemesine bağlı olarak değişmekle birlikte, kuru ortama göre takım ömrünün %62 ile %98 arasında arttığı kaydedilmiştir (R. Heinemann vd., 2006).

Literatürde kesme sıvılarının delme işlemleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı çok sayıda araştırma makalesi mevcut olmasına rağmen, kesme sıvılarının delme işlemleri üzerindeki etkisinin konu alındığı derleme çalışma sayısı oldukça azdır. Ayrıca yukarıda da ifade edildiği üzere delme işlemleri tüm frezeleme işlemlerinin yaklaşık 1/3'ünü oluşturmakta ve perçin kullanımından kaynaklı olarak havacılık vb. sanayilerde bu oran daha da artmaktadır. Delme işlemlerinin önemine ve literatürdeki eksikliğe binaen, bu çalışmanın hem delme işlemlerinin önemli olduğu talaşlı imalat sanayiine hem de literatüre katkı yapacağı düşünülmüştür.

Bu çalışmada esas olarak delme işlemleri sırasında kullanılan kesme sıvısı uygulamalarının kıyaslanması ve özellikle MMY uygulamasının delme parametreleri üzerindeki etkilerinin derlenmesine odaklanmıştır. Mevcut çalışmada, kesme sıvısı uygulamalarının delme performansı üzerindeki soğutma/yağlama teknikleri, ısı transferi etkilerinin yanı sıra fiziksel ve tribolojik özellikler üzerindeki

etkisini de içermektedir. Delme süreçlerinin performansı, takım aşınması, yüzey kalitesi ve kesme kuvvetleri gibi çeşitli kalite özellikleri derlenmiştir. Ayrıca, mevcut kapsamlı derleme çalışması, kesme sıvılarının sınıflandırması ve çeşitleri hakkında önemli bilgiler sağlamaktadır. Bu nedenle, mevcut çalışmanın, delme işlemlerinde delik çapına, derinliğine işlenen malzemeye vb. parametrelere bağlı olarak uygulanması gereken kesme sıvısı ve uygulamalarına ilişkin net bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Kesme sıvılarının kullanım prensibi başlığı altında genel olarak delme işlemlerinde kesme sıvılarının kullanım sebepleri ve kullanım teknikleri ile özellikleri tartışılmıştır. Daha sonra minimum miktarda kesme sıvısı uygulamasının takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü, tork ve kesme kuvveti üzerindeki etkisi geniş bir literatür taraması ile verilmiştir.

2. Kesme Sıvılarının Kullanım Prensibi (The Principle of Use of Cutting Fluids)

Delme operasyonlarında temas bölgesindeki ısı dağılımı ve yüksek sürüklenme genellikle kesme performansını sınırlandırmaktadır. Fakat kesme sıvıları kullanılarak takım ucunun soğutulması ile sürüklenme azaltılabilir, takım ömrü uzatılabilir, kesme ve ilerleme hızları artırılabilir, yüzey kalitesi iyileştirilebilir ve talaşların çıkışı kolaylaştırılabilir (Alves vd., 2013). Kesme sıvıları birincil fonksiyon olarak kesici takım ile materyal ara yüzü arasında bir film tabakası oluşturarak yağlama etkisi yaratır ve kesme bölgesinden hem talaşları uzaklaştırarak hem de soğutma etkisi yaratarak işleme bölgesinde temas sonucu oluşan ısının daha hızlı dağılmasını sağlar. İkincil fonksiyon olarak korozyon direnci ve oksidasyon oluşturmaya sayılabilir (Jayal vd., 2007). Ayrıca kesme sıvısı takım-malzeme ara yüzünde oluşan tribolojik özellikleri de geliştirebildiği rapor edilmiştir (Gaitonde vd., 2008; Geng vd., 2019). Kapalı alanda gerçekleşen delik delme işleminde matkap uçlarının helisel yivlerinden ilerleme yönünün tersi yönde, yukarı doğru çıkan talaşlar kesme sıvısının kesme bölgesine akışını sınırlandırmaktadır. Bu durum işleme bölgesinde oluşan ısının dağılımını engelleyerek ısının takım ucunda toplanmasına ve takımlarda ciddi arızaların oluşmasına sebebiyet verir. Ayrıca delik derinliği, delme takım çapının 2 veya 3 katını (R. Heinemann vd., 2006) (başka bir çalışmada da 3 veya 8 katını (Robert Heinemann, 2018)) geçtiğinde kesme sıvısının takım ucuna çok az miktarda ulaştığı veya hiç ulaşmadığı tespit edilmiştir. İşleme sırasında kesme sıvısının takım ucuna ulaşmasını sağlamak için daha fazla yağ kullanımı bir yandan işleme maliyetini arttırırken diğer yandan da çevre kirliliği açısından olumsuz bir durum oluşturmaktadır. Bu tür olumsuz etkilerin üstesinden gelebilmek için araştırmacılar tarafından delme işlemleri, sıvı ile soğutma, kriyojenik soğutma, sıkıştırılmış hava ile soğutma ve minimum miktarda yağlama (MMY) gibi sistemler ile yapılmış veya herhangi bir kesme sıvısı kullanılmadan kuru şartlarda delme işlemleri yapılmıştır (Niketh ve Samuel, 2018). Kuru delme hızlı takım aşınması, termal bozulmalar, düşük yüzey kalitesi gibi birçok teknik probleme yol açabilmektedir. Bu yüzden son zamanlarda pek çok araştırmacı tarafından sıkıştırılmış hava ve daha az miktarda işleme sıvısı karışımını püskürterek soğutma ve yağlama işlemini sağlayan minimum miktarda yağlama sistemini kullanmaktadır (Said vd., 2019). Ayrıca MMY sisteminin soğutma etkisini yeterli görmeyen bazı araştırmacılar, delme işleminin soğutma ve yağlama özelliğini arttırmak için kesme sıvısına nanoparçacıklı maddeler katmıştır (Duc vd., 2020; Pal vd., 2020). MMY yağlama/soğutma tekniği Bölüm 4 ve 5'te detaylı olarak ele alınmıştır.

3. Kesme Sıvıları (Cutting Fluids)

Kesme sıvıları; frezeleme işlemlerinde kesici takım ile iş parçası ara yüzünde oluşan sürtünmenin azaltılması ve sürtünme sonucu açığa çıkan ısının dağıtılması amacı ile kullanılan ve çeşitli kimyasal maddelerin karışımı ile üretilen sıvılardır (Demir vd., 2009; Kıvak, 2012). Bu sıvıların asıl görevi takım ile iş parçası ara yüzünde yağlama yaparak sürtünme katsayısını azaltma ve ısıyı çevreye yayarak işleme alanını soğutmak veya sıcaklığı kontrol altında tutmaktır. Ayrıca nano-kesme sıvılarının talaş tahliyesini kolaylaştırma, takım ömrünü ve verimliliğini artırma, kaynak oluşumunu engelleme, korozyonu önleme ve güç sarfiyatını azaltma gibi avantajları da vardır. Demir esaslı malzemelerin işlenen yüzeyleri paslanmaya daha yatkındır. Bu yüzden iyi bir kesme sıvısının korozyon önleyici özelliğinin olması ve ayrıca bakımı zorlaştıran cüruf ve topaklanma gibi oluşumları azaltmak adına talaş üzerinde koruyucu bir tabaka oluşturmaları özellikle demir esaslı malzemelerin işleme sürecinde oldukça önem arz etmektedir (TEMAK, 2021).

Nano-kesme sıvılarından temel olarak aşağıdaki özelliklere sahip olması beklenmektedir;

- Yüksek yağlama özelliğine sahip olması
- Yüksek ısı iletme kabiliyetine ve yüksek özgül ısı kapasitesine sahip olması
- Kararlı olmalı ve özelliklerini uzun süre koruyabilmesi
- Korozyon önleyici özelliğe sahip olması
- Alev almaması veya alev alma sıcaklığının yüksek olması
- Uçucu olmaması
- İnsan sağlığı açısından tehlike oluşturmaması
- Kolay tahliye edilebilir olması ve arıtılabilir olması

Kesme sıvılarının soğutma ve yağlama verimi, sıvının ıslatabildiği yüzey alanına, nano-akışkanın viskozitesine, fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlıdır (Gündoğdu, 2006). Nano-kesme sıvısının kalitesi ise dinamik viskozite, ıslatabilme kabiliyeti, yüzey gerilimi ve termal iletkenliği ile değerlendirilebilir (Said vd., 2019). Daha düşük yüzey gerilimine ve daha yüksek viskoziteye sahip kesme sıvılarının daha düşük kesme kuvveti sağladığı rapor edilmiştir (K. M. Li ve Chou, 2010). Yüksek viskoziteli kesme sıvıları frezeleme işlemlerinde takım ile iş parçası ara yüzünde daha kalın yağ filmi oluşturarak temas yüzeyini ve dolayısıyla sürtünmeyi azalttığı belirtilmiştir (Gündoğdu, 2006). Rahim vd. tarafından palmye yağı kullanılarak yapılan yüksek hızlı delme işleminde yüksek viskoziteli yağın takım-talaş ara yüzünde daha etkili yağlama sağladığı, bu sayede sürtünmeyi azaltarak kesici takımın hızlı aşınmasını önlediği ve ayrıca kesme sıcaklığını düşürdüğü belirtilmiştir (E. A. Rahim ve Sasahara, 2011). Fakat yüksek viskoziteli yağların kullanımdan sonra iş parçası ve kesici takım üzerinde yüksek viskoziteden dolayı film şeklinde artık oluşturduğu ve bu durumun da yağ kayıplarına neden olduğunu rapor eden çalışmalar da mevcuttur (Gündoğdu, 2006). Bu yüzden özellikle talaş tahliyesi sürecinde talaşın kesici takıma yapışmasını önlemek için düşük viskoziteli bir soğutma sıvısının kullanılması daha avantajlı olacaktır.

Mikro-delme işlemlerinde ise kesme sıvısı viskozite açısından diğer frezeleme işlemlerine göre farklılık arz etmektedir. Yapılan çalışmalar, derin mikro delik işlemlerinde yüksek viskoziteli kesme

sıvılarının deliğin içine hızlı bir şekilde nüfuz edemediğinden yeterli yağlama-soğutma sağlayamadığı belirtilmiştir. Heinemann vd. (R. Heinemann vd., 2006) tarafından yapılan çalışmada, düşük viskoziteli ve çok fazla su katkılı devamlı MMY tekniğinin derin delme işleminde takım ömrü, aşınma ve kesme ısısı açısından oldukça faydalı olduğunu rapor etmiş ve bu durumu öncelikle kesme sıvısının soğutma özelliğine ikincil olarak ise sıvının düşük viskozitesinden kaynaklı nüfuz etme özelliğine atfedilmiştir. Duc vd. tarafından Hardox 500 çeliği üzerinde yapılan delme işleminde kesme sıvı olarak kullanılan pirinç kepek yağının viskozitesinin yüksek olmasından kaynaklı olarak yağın kesme bölgesine ulaşmaması sonucu soğutma ve yağlama etkisini yeterli yapamadığı ve işleme bölgesinde aşırı ısı artışı meydana geldiği rapor edilmiştir (Duc vd., 2020). Frezeleme sırasında sağladığı avantajlar haricinde düşük viskoziteli kesme sıvılarının içerisindeki artıkların depo içerisinde daha hızlı çökmesi, filtreleme performansının daha yüksek olması gibi kullanım kolaylıkları da vardır. Ayrıca ısı iletkenlikleri daha yüksek olduğundan daha hızlı bir soğutma sağlarlar. Fakat buharlaşma noktaları düşük olduğundan alevlenme ısıları da düşüktür. Havada ayrışma ve partiküller halinde yayılmaları daha kolaydır. Bu yüzden personel sağlığını riske etme oranları yüksek viskoziteli kesme sıvılarına oranla daha yüksektir. Bu tür durumlar için yağ emme sistemlerinin kullanılması tavsiye edilmektedir (Gündoğdu, 2006).

Operatörün sağlığına etki etmeden işleme özelliklerini iyileştiren uygun bir soğutma/yağlama sıvısının seçilmesi oldukça önemlidir. Aşağıda kesme sıvılarının sınıflandırılması yapılarak kesme sıvılarının özellikleri ve hangi işlemler için uygun oldukları literatür verileri baz alınarak verilmiştir.

3.1. Kesme Sıvılarının Sınıflandırılması (Classification of Cutting Fluids)

Kesme sıvıları geniş çeşitlilikleri nedeni ile farklı yaklaşımlar kullanılarak sınıflandırılmıştır. Genel olarak kesme sıvıları kimyasal ve fiziksel bileşimlerine göre yağ bazlı (saf yağlar), su bazlı (suda çözünebilen sıvılar) ve gaz bazlı soğutucular olmak üzere şekil 2'de görüldüğü üzere 3 ana sınıfa ayrılabilir (Singh vd., 2020; Yücel vd., 2011). Saf yağlar iyi yağlama özelliğinin istendiği işlemlerde kullanılırken, su bazlı akışkanlar hem yağlama hem de soğutma özelliklerinin gerekli olduğu frezeleme işlemlerinde kullanılır (Debnath vd., 2014). Soğutucu gazlar ise bahsi geçen nano-sıvılara oranla daha doğa dostu kabul edilmekte olup oda sıcaklığında gaz halinde bulunurlar. İşleme alanına gaz veya soğutulmuş basınçlı sıvı şeklinde uygulanabilmektedirler.

3.1.1. Yağ bazlı saf kesme sıvıları (Oil-based pure cutting fluids)

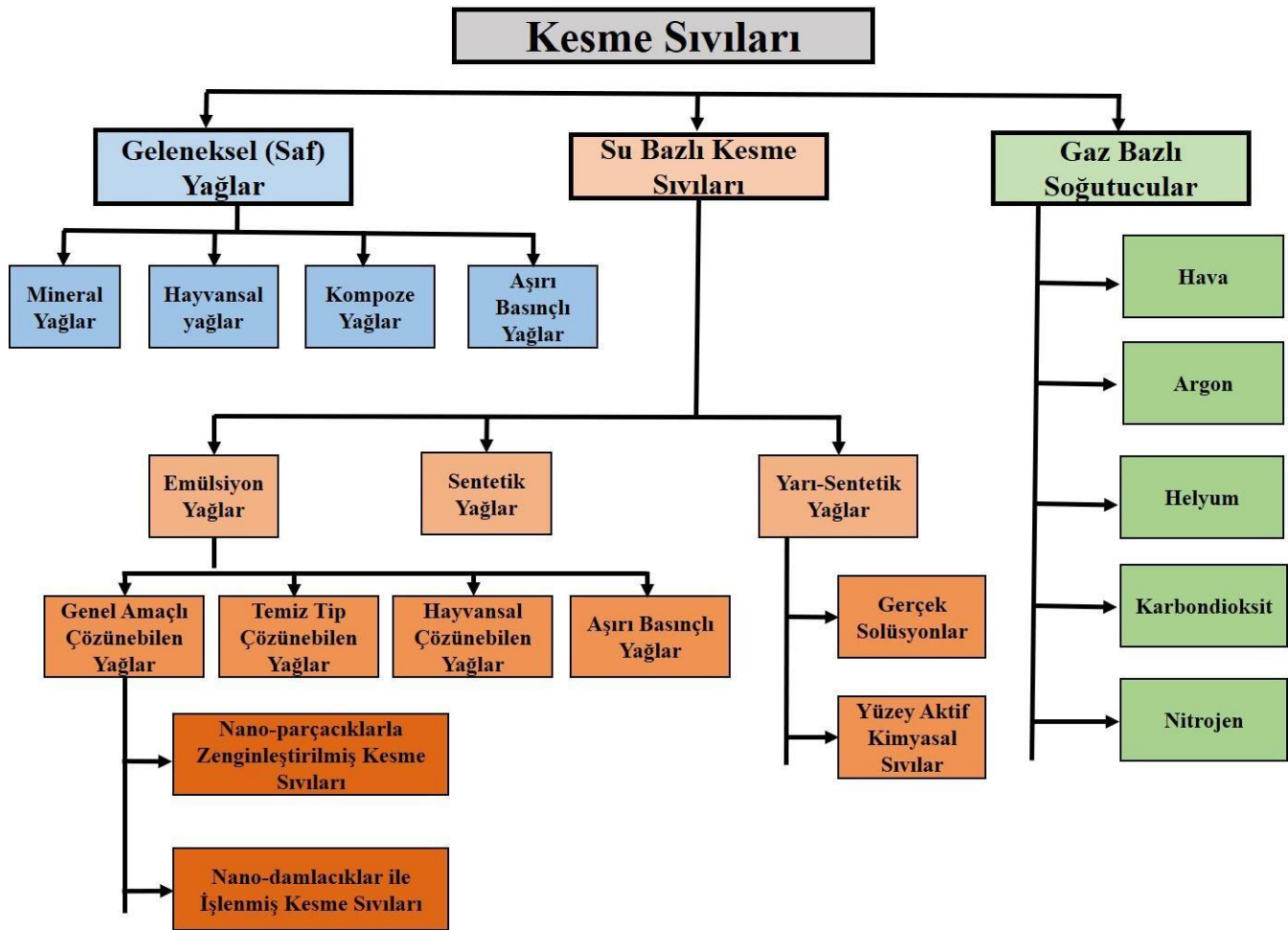
Katkısız saf yağlar, sentetik, mineral, petrol, bitkisel veya hayvansal kaynaklı yağlardan elde edilen, hafif frezeleme ve kesme işlemlerinde uygulanabilen en eski metal işleme sıvıları olarak kabul edilen akışkanlardır (Singh vd., 2020). İyi yağlama ve korozyon önleme özelliklerine sahip olsalar da soğutma kabiliyetleri zayıf olduğundan duman oluşturma ve alev alma gibi problemlere sebebiyet verebilmektedirler (Gajrani ve Sankar, 2020; Kuram vd., 2013). Bu sebeple, takım-iş parçacığı ara yüzünde sürtünmenin az olduğu ve bu sürtünmeye bağlı olarak daha az ısının ortaya çıktığı düşük hızlı hafif frezeleme işlemlerinde kullanılabilmektedirler (Gajrani ve Sankar, 2020; Yücel vd., 2011).

3.1.2. Su bazlı kesme sıvıları (Water-based cutting fluids)

Su bazlı kesme sıvıları, kullanımdan önce istenen kıvama kadar su ile karıştırılması gereken çeşitli sentetik veya kimyasal yağlardan oluşan yağ çözeltileri ve sulu emülsiyonlardır. Çözülebilir yağlar, yarı

sentetik kesme sıvıları ve sentetik kesme sıvıları olmak üzere 3 temel tipi vardır. Çözünür veya emülsiyon haline getirilebilir bu yağlar, karışım içinde asılı halde bulunur ve damlacık şeklinde oluşurlar. Sentetik yağlar kesme sıvısının soğutma yeteneğini en iyi arttıran yağlardır, fakat diğer yağlar ile karşılaştırıldığında kesme sıvısının yağlama fonksiyonunu düşürmektedir. Nitrit fosfatlar, amino grupları, glikol ve mikrop öldürücüleri içeren kimyasal ajanlar ise kesme sıvısının yağlama fonksiyonunu artırırken yüzey gerilimini azaltmaya yardımcı olur (Singh vd., 2020).

Genel olarak su bazlı kesme sıvılarının yağlama potansiyeli diğer türlere göre daha düşüktür. Fakat soğutma ve talaş uzaklaştırma fonksiyonlarında üstün kabiliyete sahip oldukları bilinir. Su, mineral yağlara göre işleme bölgesini iki veya üç kat daha hızlı soğutur ve neredeyse iki kattan fazla ısı tutma kapasitesine sahiptir (TEMAK, 2021). Suyun varlığı, emülsiyonları soğutma yeteneği bakımından üstün kılarken, çözeltideki yağın varlığı ise suyun sebebiyet verebileceği oksidasyon eğilimini azaltır (Debnath vd., 2014). Bu yüzden, yüksek ısı üretiminin olduğu, yüksek hızlı ve düşük basınçlı frezeleme işlemlerinde kullanılması tavsiye edilmektedir (Kalpakjian ve Schmid, 2020).



Şekil 2. Kesme sıvılarının sınıflandırılması (Classification of cutting fluids) (Singh vd., 2020)

3.1.3. Gaz bazlı soğutucular (Gas based coolers)

Gaz bazlı kesme sıvılar veya soğutucuları oda sıcaklığında gaz formunda olan hava, argon, nitrojen, karbondioksit ve helyum gibi çevre dostu maddelerden üretilmektedirler. Bu akışkanlar yüksek kesme sıcaklıklarında diğer kesme sıvılarına oranla dahi iyi soğutma kabiliyetine sahiptirler. Ayrıca bu yöntem yüksek derecede anti-korozif özelliğe sahip olduğundan takım-iş parçacığı ara yüzeyinde oksitlenmeyi önleyebilmektedir. Gaz bazlı soğutucular genellikle geleneksel yağlama/soğutma tekniklerinin takım/iş parçacığı/talaş ara yüzeylerine nüfuz edemediği ağır frezeleme koşullarında daha çok tercih edilmektedir. Aslında gazların tek başına termal iletkenlikleri düşüktür ve bu yüzden soğutma kapasiteleri yetersizdir. Soğutma kapasitelerini arttırmak için az miktarda geleneksel kesme sıvılarıyla birlikte sıkıştırma, soğutma ve sıvılaştırma gibi yaklaşımlarla sprey, sis veya damlacıklar şeklinde uygulandığında daha etkili sonuçlar alındığı rapor edilmiştir (Debnath vd., 2014; Gajrani ve Sankar, 2020; Shokrani vd., 2012). Çakır vd. tarafından nitrojen, oksijen ve karbondioksit gaz bazlı soğutucuların frezeleme işlemlerinde uygulamalarını hem incelemek hem de kuru ve ıslak işleme yöntemleri ile karşılaştırmak için yaptıkları çalışmada şu sonuçları elde etmişlerdir (Çakır vd., 2004): düşük besleme hızlarında gaz uygulamalarının diğer yöntemlere göre daha düşük kesme kuvveti gerektirdiği görülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü bakımından da gaz uygulamalarının genel kuru ve ıslak yöntemlere göre daha iyi sonuçlar verdiği fakat düşük hızlarda ıslak yöntemin öne çıktığı rapor edilmiştir. Araştırmacılar sonuç olarak gaz uygulamalarının sisli kesme sıvıları ile birlikte kullanımının daha iyi sonuçlar vereceğini iddia etmişlerdir. Gaz uygulamalarının bu şekilde çok az miktarda bir yağ ile birlikte yüksek basınçta atomize olarak işleme bölgesine aktarılması yukarıda da tanımlanan MMY yöntemi olarak bilinmektedir (Bhuyan vd., 2018; N. R. Dhar vd., 2007; Gajrani vd., 2017; Gajrani ve Sankar, 2020).

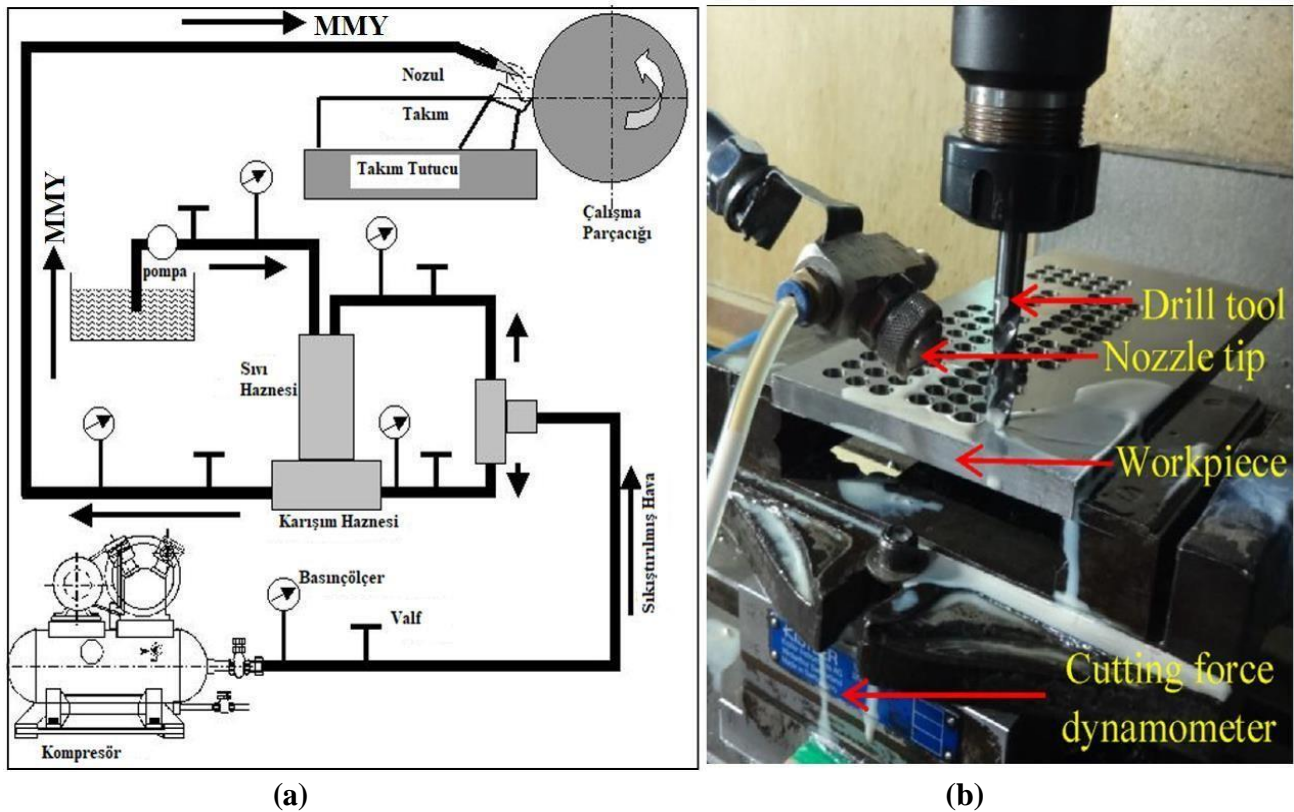
4. Minimum Miktarda Yağlama Tekniği (Minimum Quantity Lubrication Technique)

Kesme sıvılarının operatör ve çevre sağlığı üzerindeki sorunları ortadan kaldırmak ve mekanik işleme prosesleri sırasında sıvı kullanımını azaltmak için çeşitli araştırmalar yapılmış ve farklı teknikler denenmiştir. Bu araştırmalar arasında öne çıkan en etkili ve çevre dostu yöntem olan MMY yöntemi, yüksek işleme maliyetleri, çevresel etkiler ve personel sağlığı sorunları gibi yüksek yağ tüketiminden kaynaklanan birçok sorunu azaltabilme potansiyeline sahiptir (Nam vd., 2011), (Chatha vd., 2016). Ayrıca, ekstra oksijen sağlayarak talaş ile takım ara yüzü arasında koruyucu bir tabaka oluşturduğu ve böylece takımının mukavemet ve aşınma direncini koruyarak takım ömründe önemli ölçüde iyileşme sağladığı rapor edilmiştir (Pal vd., 2020), (Liao ve Lin, 2007). Geleneksel kesme sıvısı sistemlerine kıyasla kullanılan yağ miktarında olağanüstü azalma sağlamakta ve işleme sürecinde saatte yalnızca birkaç mililitre (ml) yağ kullanılmaktadır (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2010). Kullanılan sıvı miktarı, normal soğutmalı frezeleme işleminde kullanılan sıvı miktarının neredeyse on binde birine kadar düştüğü bildirilmiştir (K. M. Li ve Chou, 2010). Bu durum toplam üretim maliyetlerinde %15'e varan iyileştirme sağlayabilmektedir (Çağan vd., 2018). Bu denli az miktarda yağ kullandığından MMY uygulaması "yakın kuru işleme (NDM=near dry machining) olarak da bilinir. Bu sayede işyerinde çalışan personelin yağ ile teması ve havadaki emisyonları soluma ihtimali ciddi derecede azaldığından personelin

cilt ve soluk yolları ile ilgili sağlık riskini de büyük ölçüde azalmaktadır (Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, 2010).

MMY tekniğinde kullanılan Nano-kesme sıvıları içerisinde bir baz akışkana nano boyuttaki (1-100nm) karbon nanotüp (CNT), C₆₀, TiO₂, Al₂O₃, MoS₂, CuO ve elmas gibi metal veya metal oksitler eklenerek kesme sıvısının etkinliği artırılabilir. Bu sıvılarda kullanılan baz akışkanı ise genellikle yağ veya sudur. Bu nano-akışkanlar, yüksek termal iletkenlik ve yayılım katsayısı gibi mükemmel fiziksel özelliklere sahiptir (Huang vd., 2016). MMY sisteminin şematik gösterimi şekil 3'te gösterilmiştir (Niketh ve Samuel, 2018), (N. R. Dhar vd., 2006).

MMY yöntemi, yüksek kesme hızlarına oranla düşük kesme hızlarında daha verimli olduğu bilinmektedir. Düşük kesme hızlarındaki bu etkinlik, daha uzun süre için kapiler borular ve plastik kesme bölgesi yoluyla soğutma/yağlama sağlanması ile ilişkilendirilebilir. Yüksek hızlı işlemlerde ise ısıyı dağıtma sürecindeki azalmadan kaynaklı olarak sıcaklık artışı meydana geldiği ve MMY yönteminde işleme bölgesine sağlanan kesme sıvısının bu denli kısa sürede ısıyı yeterli derecede dağıtma potansiyeline sahip olmamasına bağlanmıştır (Nikhil Ranjan Dhar vd., 2007).



Şekil 3. MMY ile işleme tezgâhının (a) örnek bir şematik gösterimi ve (b) MMY sistemi altında delme işlemi yapılması ((a) an exemplary schematic representation of the machining workbench with MQL and (b) drilling under the MQL system) (N. R. Dhar vd., 2006), (Niketh ve Samuel, 2018)

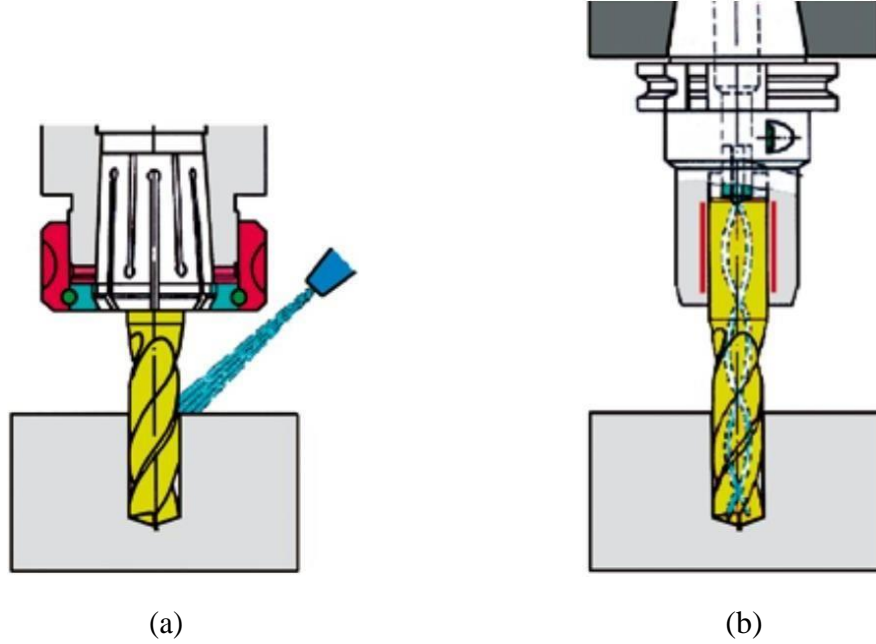
MMY tekniğinin temel prensibi basınçlı hava karışımı ile birlikte minimum miktarda yağ bazlı bir yağlayıcıyı ufak damlacıklar şeklinde işleme bölgesine yüksek basınçla püskürterek yağlama ve soğutma sağlamaktır. MMY sistemi kompresör, sıvı haznesi, akışkanı basınçlandıran pompa, hava yağ karışım haznesi, nozul ve hava ile yağı taşıyan borulardan meydana gelir. Bu yöntem çok az miktarda kesme sıvısı tükettiğinden ve ayrıca pompalamada tüketilen enerji çok daha az olduğundan çevre sağlığı açısından avantajlı bir yöntemdir (Pervaiz vd., 2019). Yakın zamanda yapılan çalışmalar referans alındığında minimum miktar yağlama sisteminin derin delik delme sırasında küçük çaplı matkaplar için de tatmin edici derecede takım ömrünü arttırdığı gözlenmiştir (Bayraktar vd., 2017; R. Heinemann vd., 2006; Niketh ve Samuel, 2018), (R. K. Heinemann, 2004). MMY, işleme performansını artırırken diğer geleneksel yağlama-soğutma yöntemlerine göre işleme maliyetini de azaltmaktadır. MMY tekniği kesme sıvısını işleme bölgesine sağlama bakımından içten ve dıştan olmak üzere iki kategoride sınıflandırılabilir. Bu iki sistem arasındaki temel fark şekil 4'te gösterilmiştir (Sharma vd., 2016). Bu tekniklerin birbirlerine göre bazı avantaj ve dezavantajları mevcuttur.

Dıştan püskürmeli MMY tekniğinde, daha çok fayda sağlamak için püskürtme sisinin tüm temas alanlarını kaplaması gerekmektedir. Ayrıca damlacık büyüklüğü, püskürtme hızı ve özellikleri ile nozulun işleme bölgesinden uzaklığı MMY performansını etkileyen faktörlerdir (Pal vd., 2020). Kesme sıvısının delme işlemlerinde frezeleme bölgesine nüfuz etmesi için partiküllerinin olabildiğince küçük olması istenir, ancak 10 μ m'dan daha küçük damlacıklar soluma sırasında insan vücuduna daha kolay nüfus ettiğinden operatörün sağlığı açısından tehdit oluşturabilmektedir (Gürbüz vd., 2017). Kyung-Hee Park vd. tarafından yapılan çalışmada üç boyutlu damlacıkların ortalama çapı 10.02 μ m olarak elde edilmiş ve bu büyüklüğün hem iyi bir yağlama özelliği için yeterli olduğu hem de operatör sağlığı açısından olumsuz bir durum oluşturmadığı rapor edilmiştir. Aynı çalışmada MMY nozulu işleme bölgesinden 30mm uzakta ve 12Psi basınç ile püskürtme yaptığı durumda maksimum verimin alındığı belirtilirken, aynı basınç ile 50mm mesafede duran nozulun işleme alanında yeterli ıslaklığı oluşturmadığı ifade edilmiştir (Park vd., 2010).

İçten beslemeli yağlama sistemi kesme sıvısını takımın ucuna akıtarak daima işleme bölgesinin ıslak kalmasını sağlar. Bu sistemde kesme sıvısının takımın içinden takım-malzeme temas yüzeyinin çok yakınına sağlanması yüzey kalitesi ve takım ömrü açısından çok iyi sonuçlar verdiği rapor edilmiştir (Klocke ve Eisenblätter, 1998; Le Coz vd., 2012). Ayrıca kesme sıvısının takım içerisine açılan kanallar ile verilmesi operatörün sıvıyı soluma ihtimalini azaltır. Bu sayede damlacık boyutu sağlık açısından bir problem oluşturmadığından 10 μ m'dan daha küçük damlacıkların kullanılması da mümkündür. Fakat bu sistemde, takım içine kanalların oluşturması meşakkatli bir işlem olduğundan takım ve dolayısıyla toplam üretim maliyeti artmaktadır. Ayrıca takım ucundaki MMY çıkışlarının işleme sırasında çapaklardan veya takım aşınmalarından ötürü tıkanma ihtimali vardır. Bu durum sıvı akışını keseceğinden işleme bölgesinde ciddi sürüklenme ve sıcaklık artışları oluşturabilir. Sıvının takım içerisinden işleme bölgesine gönderildiği durumlarda, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle kesme sıvısında basınç düşüşü de meydana gelebilir. Bu yüzden daha yüksek kesme sıvısı basıncına ihtiyaç vardır (Kıvak, 2012).

Ayrıca MMY yağlama sisteminde MMY nozulunun işleme bölgesine mesafesi, püskürtme açısı ve püskürtme hızı gibi parametreler de işleme performansı açısından oldukça önemlidir. Tawakoli vd.

(Tawakoli vd., 2010) MMY tekniğinin hava basıncı, yağ akış hızı, meme konumu ve işleme bölgesinden uzaklığı gibi parametrelerin işleme performansı üzerindeki etkisini araştırdıkları çalışmalarında, MMY nozulu işleme bölgesine doğrusal olarak 10° – 20° yerleştirildiğinde MMY yağ buharının işleme bölgesi etrafında sınır tabaka oluşturarak işleme bölgesine daha etkili bir şekilde nüfuz ettiği gözlemlenmiştir. Yağ damlacıklarının ve yağ sisinin temas bölgesine daha verimli bir şekilde taşınmasını sağlayan optimum parametrelerin taşlama kuvvetlerinde ve yüzey pürüzlülüğünde önemli ölçüde azalma sağladığı rapor edilmiştir.



Şekil 4. (a) dıştan ve (b) içten işleme sıvısı sağlama sistemleri ((a) external and (b) internal working fluid supply systems) (Sharma vd., 2016)

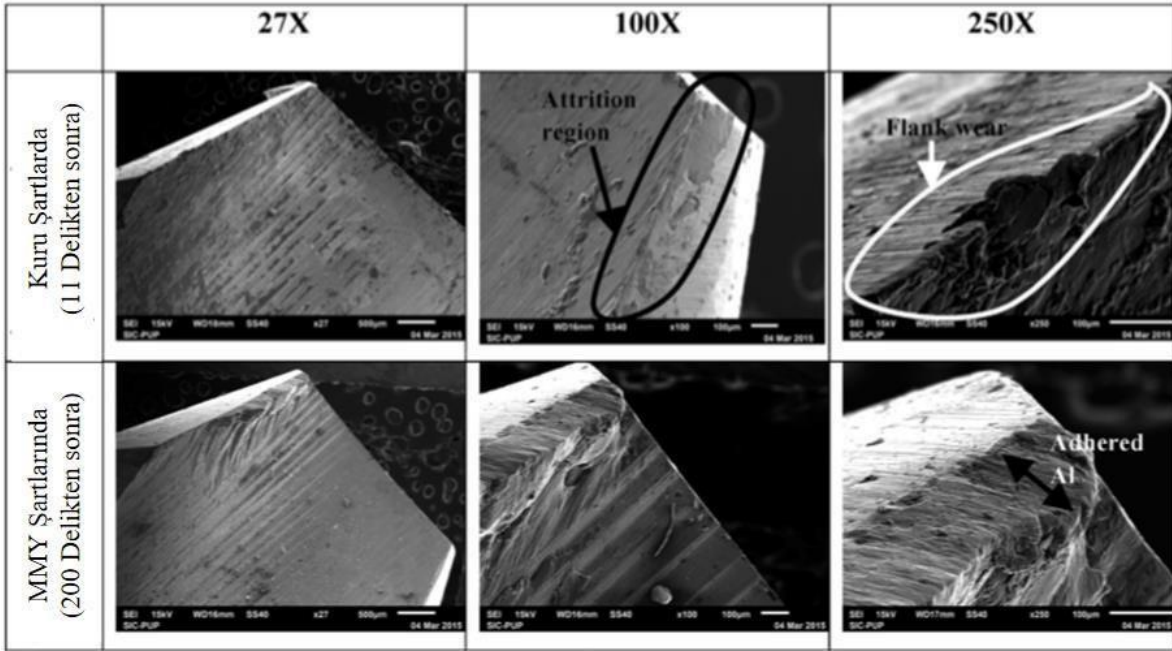
5. MMY'nin Delme İşlemleri Üzerindeki Etkisi (Effect of MQL on Drilling Operations)

Delme işlemleri ile birlikte minimum miktarda yağlama yönteminin kullanılması bu güne kadar birçok araştırmacının konu alanına girmiştir. Araştırmacılar delme işlemleri sırasında işleme sıvısını takım aşınması, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü ve takım ömrü gibi birçok parametre açısından incelemiştir. Bu derleme çalışmasında MMY'nin bahsi geçen parametreler üzerindeki etkisi literatür verileri kullanılarak ayrı başlıklar altında toplanmıştır.

5.1. MMY Tekniğinin Takım Ömrü Üzerindeki Etkisi (Effect of MQL Technique on Tool Life)

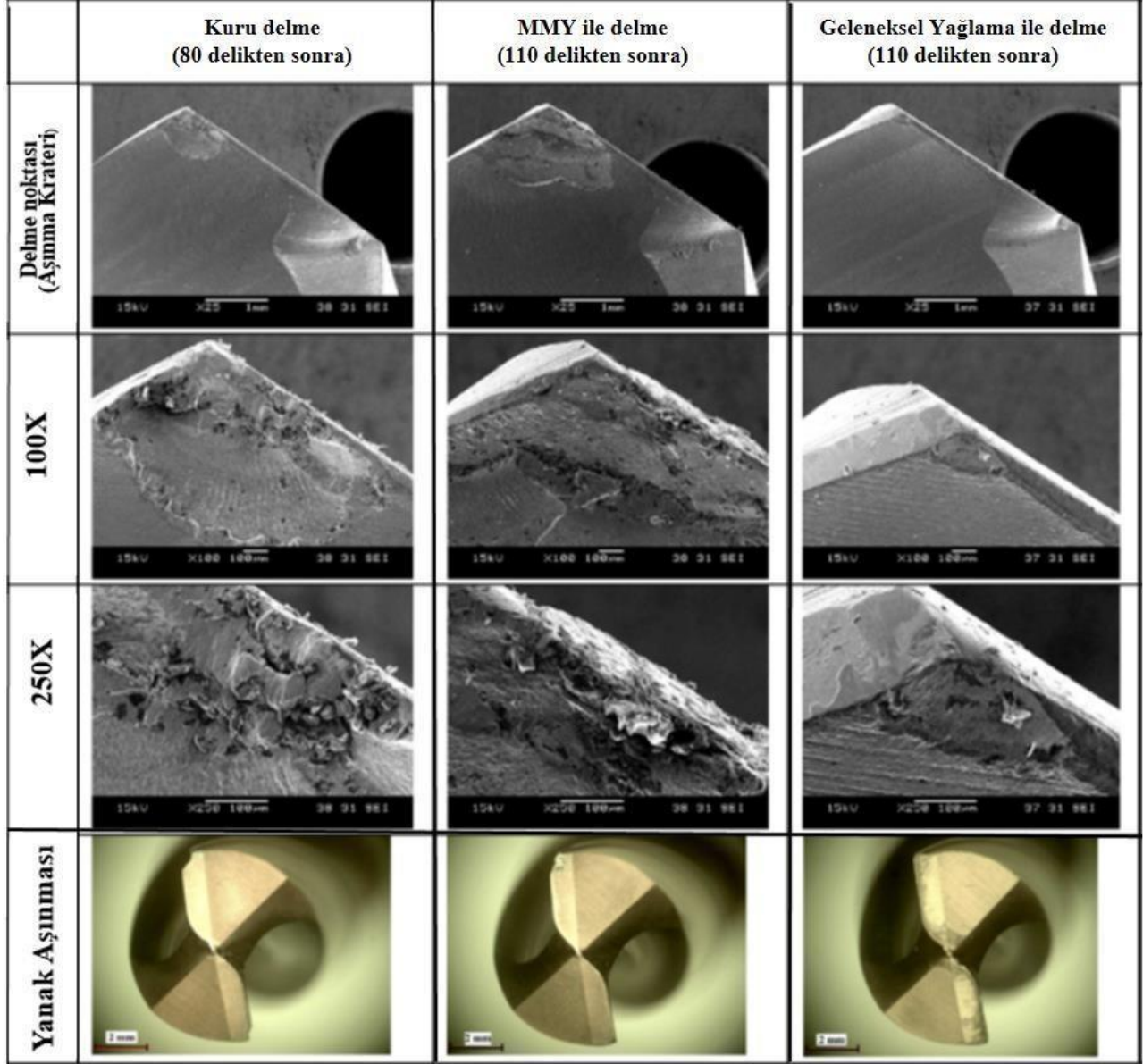
Delme işlemi kapalı alanda gerçekleştiğinden deliğin derinliği arttıkça takım-malzeme arayüzü arasındaki temas yüzeyi de artmaktadır. İşleme bölgesinde oluşan ısı tahliyesi diğer frezeleme

işlemlerinden daha zor olduğundan takımın aşınma hızı artmaktadır. Kuru koşullarda yapılan delme işlemlerinde talaşlar matkabın kanallarını doldurarak daha fazla sıkışmaya sebebiyet verdiği ve bu sıkışma neticesinde kesme kuvvetlerinde ve sıcaklık artışında oluşan ani artışların takım kırılmalarına neden olduğu belirtilmiştir (Çiftçi ve Gökçe, 2018). Artan kesme sıcaklığının deliklerin boyutsal doğruluğunu, yüzey kalitesini ve takım ömrünü doğrudan etkilediği rapor edilmiştir (Lotfi vd., 2017). Takımın aşınması, kullanılabilirliği ve işlem verimliliğini azalttığından takım değişimi işleme sağlığı açısından daha uygundur. Bu yüzden takım ömrü hem işleme maliyeti hem de verimlilik açısından oldukça önemli bir faktör olmaktadır (Gill vd., 2009).



Şekil 5. Kuru ve MMY şartlarında yapılan delme işlemi sonucu delme takımlarında meydana gelen aşınmalar (Wear of drilling tools as a result of drilling in dry and MQL conditions) (Chatha vd., 2016)

Yapılan birçok araştırmada MMY'nin yağlama etkisinin pozitif etkileri rapor edilirken, Dhar ve çalışma arkadaşları (N. R. Dhar vd., 2006) delme işlemlerinde MMY'nin daha çok soğutma etkisi sayesinde takım ömrünü arttırdığına işaret etmiştir. Ayrıca takımın yanak tarafının soğutulmasının takım ömrünü uzattığı öne sürülmüştür. Barrow (Barrow, 1972) yağlamanın en çok düşük kesme hızlarında etkili olduğunu belirterek, soğutmanın ise daha çok yüksek kesme hızlarında önemli hale geldiğini belirtmiştir. Delme işlemleri yüksek hızlı işlem olması gerektiğinden, yağ takım-malzeme arayüzüne yeterince hızlı nüfuz edememekte ve bu yüzden delme işlemlerinde yağlama tatmin edici derecede gerçekleşmemektedir (Haan vd., 1997). Kesme sıvısının yağlama özelliğinin yanında soğutma etkisini arttırmak için bazı araştırmacılar tarafından kesme sıvısına su katılmıştır. Sonuç olarak inceltirilmiş yağın işleme bölgesindeki ısıyı daha çok düşürerek takım aşınmalarını azalttığı ve takım ömrünü arttırdığı görülmüştür. Bu durum öncelikle kesme sıvısının soğutma özeliğine ikincil olarak ise sıvının düşük viskozitesinden kaynaklı daha kolay nüfuz etme özelliğine atfedilmiştir (R. Heinemann vd., 2006).



Şekil 6. Kuru, MMY ve geleneksel yağlama şartlarında delme işleminden sonra takımlarda meydana gelen aşınmaların SEM görüntüleri (SEM images of tool wear after drilling in dry, MQL and flooded conditions) (Meena ve El Mansori, 2011)

Takım ömrü; takım yanak aşınması, keskin yüzey aşınması, delici takımın kırılması ve delinebilen delik sayısı gibi parametreler ile değerlendirilmektedir. Sukhpal Singh Chatha vd. (Chatha vd., 2016) kuru şartlarda ve farklı yağlama teknikleri ile alüminyum 6063 malzemesinin delinmesi ile ilgili yaptıkları çalışmada MMY'nin kuru şartlara göre takım aşınmasını oldukça azalttığını ve takım ömrünü önemli ölçüde arttırdığını rapor etmişlerdir. Çalışma ile ilgili sonuçlar şekil 5'te verilmiştir. Ayrıca aynı çalışmada MMY şartlarında önemli sayıda delik delindikten sonra takım ucuna talaşların yapışması ve yüksek sıcaklıktan ötürü kaynaması sonucu takım aşınmasının belli bir delik sayısından sonra arttığı bildirilmiştir. Delme işleminde, kesme bölgesinde ısı artışı zamanında giderilmediğinde çapaklar ve talaşlar kesici ağız ile kaynarak yığılma ağız oluşmasına sebebiyet verdiği, yağ film tabakasını azalttığı ve yüksek

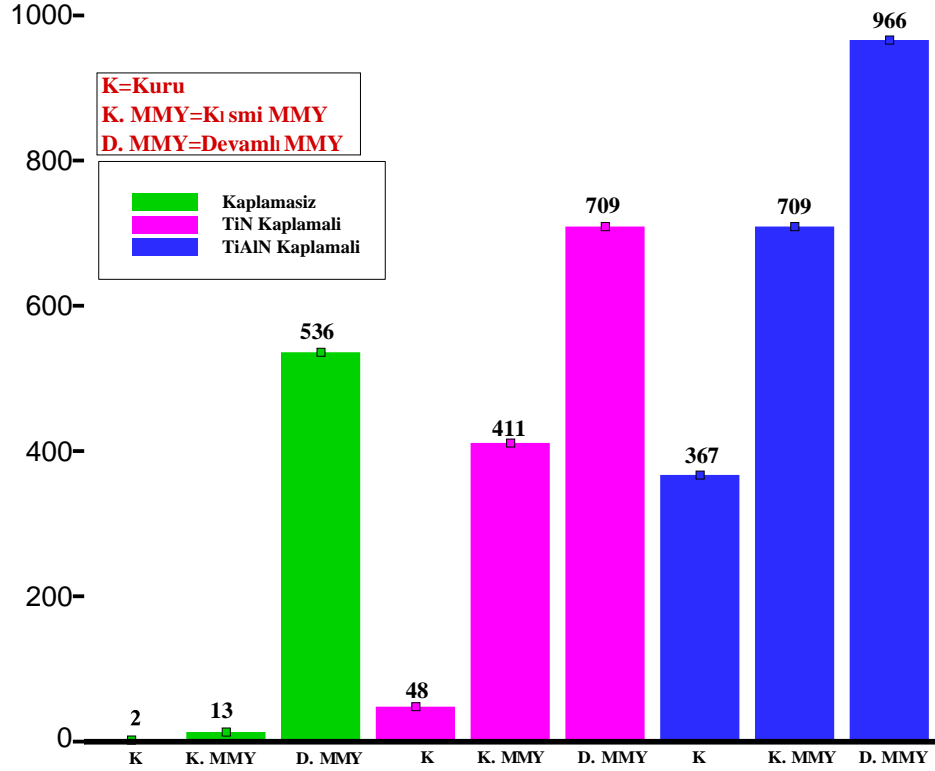
yapışmaya neden olduğu Dongzhou Jia ve çalışma arkadaşlarının kesme sıvıları ile ilgili yapmış oldukları çalışmada da bildirilmiştir (Jia vd., 2017).

A. Meena ve M. El Mansori (Meena ve El Mansori, 2011) tarafından östemperlenmiş sünek demirin TiAlN kaplamalı tungsten karbür delme takımları ile kuru, MMY ve flooded (geleneksel yağlama) uygulamaları altında delinmesi üzerine yapılan çalışmada Sukhpal Singh Chatha'nın elde ettiği sonuçlara benzer sonuçlar alınmıştır. Kuru delme ile karşılaştırıldığında, MMY delme koşullarının takım aşınmasını önemli ölçüde azalttığı ve takım ömrünü iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Takım aşınması, tüm koşullarda esas olarak çevreye yakın kesme kenarında meydana gelmiştir. MMY ve geleneksel yağlama tekniklerinin takım ömrü ve takım aşınması açısından 40. deliğe kadar birbirine yakın sonuçlar verdiği,

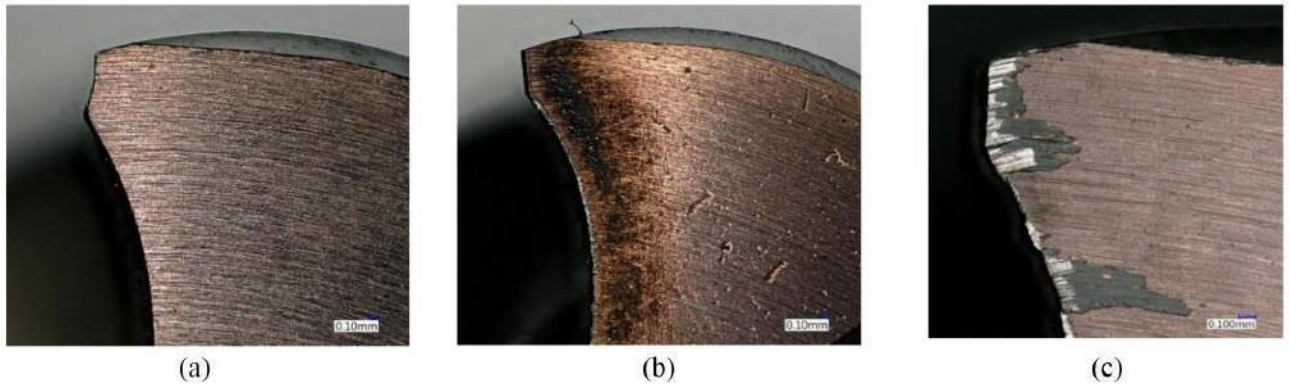
40. delikten sonra ise MMY ile delme işleminde takım aşınma hızının arttığı ve takım ömrünün hızla azaldığı görülmüştür. Aynı alet kullanılarak önemli sayıda delikten sonra, sürtünme kuvveti sürekli olarak artmış kesme kenarına talaş yapışmaya başlamış ve bu da matkabın çevresine yakın kesme kenarında talaşlanmaya yol açarak daha fazla takım kaplama kaybına sebebiyet vermiştir. Delinen son delikten sonra takımlarda ölçülen yanak aşınması kuru delmede 0.41mm, MMY ile delmede 0.25mm ve geleneksel yağlama tekniği ile delmede 0.12mm olarak ölçülmüştür. Geleneksel yağlama tekniği ile delme MMY tekniğine göre takım ömrü ve aşınma açısından daha tatmin edici sonuçlar vermiştir. Şekil 6'da scanning electron microscope (SEM) ile elde edilen görüntülerde takımların kesme kenarında yüzey aşınması, talaşlanma ve malzeme yapışması olduğu görülmektedir.

İşleme sıvısının takım ömrü üzerindeki etkisinin net anlaşıldığı en çarpıcı araştırmalardan bir tanesi de Heinemann ve ark. (R. Heinemann vd., 2006) tarafından yapılan çalışmadır. Farklı özelliklerde delme takımları kullanılarak 20mm derinlikte mikro delme işlemlerinin yapıldığı deneysel çalışmada delme işlemi 3 farklı etapta gerçekleştirilmiştir; i. tamamen kuru şartlarda, ii. 5mm'ye kadar kısmi MMY uygulanması ve daha sonra sıvı akışının kesilmesi, iii. tamamen MMY şartları altında delme işleminin tamamlanması. Kuru ortama göre kaplamasız takımın ömrü kısmi MMY ve devamlı MMY şartlarında çok çarpıcı bir şekilde sırası ile %84,6 ve %99,6 artarken TiN kaplamalı takımın delme ömrü sırası ile %88 ve %93 artmıştır. TiAlN kaplamalı takımın ise ömrü %48 ve %62 artmıştır. Elde edilen sonuçlar şekil 7'de verilmiştir. Kesme sıvısının çok az bir miktarı bile deliğin içine nüfuz etmesinin, özellikle kaplamasız ve ısıya karşı hassas matkap uçları için takım ömrü açısından hayati önem arz ettiği görülmektedir. Ayrıca takım kaplamasının takım ömrü üzerindeki önemini kanıtlamaktadır. Fakat takım kaplama malzemeleri bu çalışmanın temel konusu olmadığından üzerinde durulmamıştır.

Tran Minh Duc ve çalışma arkadaşları (Duc vd., 2020) Hardox 500 sert çeliğinin kuru ve Al₂O₃ nano parçacıklı minimum miktarda soğutma yağlaması (MMSY) şartlarında ve farklı parametreler altında delme işlemini incelemişlerdir. 20 dakikalık kesme işleminden sonra MMSY altında ağırlıkça %1 nanosıvı kullanılması ile takımın yan yüzünde yanma ve küçük bir bölgede yanak aşınması oluşmuştur. Yanık izleri, yan yüze yapışan kesme sıvısının ateşlemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Kuru koşullarda ise aşınma alanı aynı sürede MMSY'ye göre oldukça büyük olurken (yaklaşık 0,25–0,3 mm), krater şeklinde aşınma meydana geldiğinden takım ömrü bittiği belirtilmiştir (şekil 8). Ayrıca MMSY altında Al₂O₃ nano parçacıkların kullanılması ile (kritik yanak aşınması 0.3mm'ye ulaşıncaya kadar) 90 dakika boyunca işleme yapılabilmiştir.



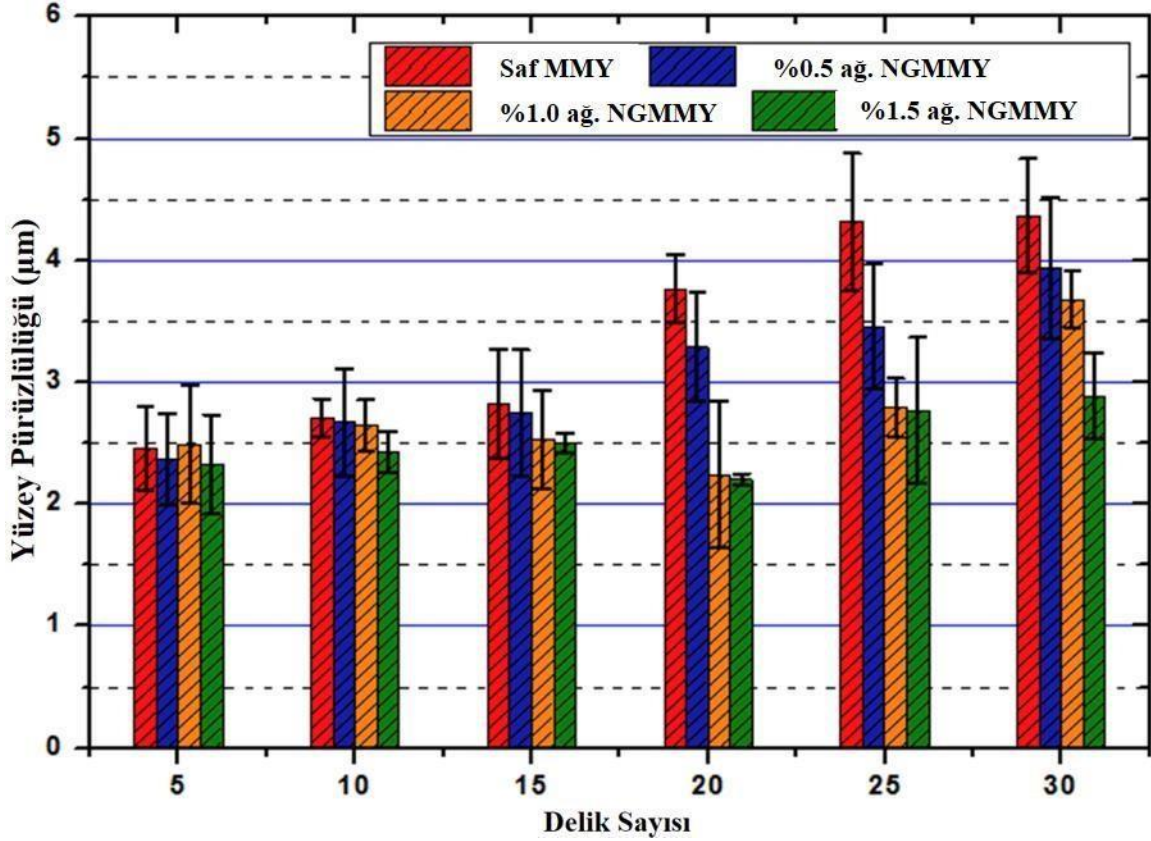
Şekil 7. Tamamen kuru ortam, kesikli MMY ve tamamen MMY ortamında yapılan delme işlemleri sonucunda takımlar ile yapılabilen delik sayısı. (Referans (R. Heinemann vd., 2006)'den alınan veriler bir araya getirilerek oluşturulmuştur) (The number of holes that can be made with the tools as a result of drilling in a completely dry environment, intermittent MQL and completely MQL environment. (Composed by combining data from the reference (R. Heinemann vd., 2006)))



Şekil 8. Takımın kesme kenarının yanak yüzeyi (a) yeni takım (delme yapılmamış) (b) MMSY altında Al_2O_3 nano parçacıklarının kullanılması ile 20 dakika delme işleminden sonra (c) 20 dakikalık kuru delme yapıldıktan sonra (The flank surface of the cutting edge of the tool (a) new tool (unused) (b) after 20 minutes of drilling with the use of Al_2O_3 nanoparticles under MQCL (c) after 20 minutes of dry drilling) (Duc vd., 2020)

5.2. MMY Tekniğinin Yüzey Kalitesi Üzerindeki Etkisi (Effect of MQL Technique on Surface Quality)

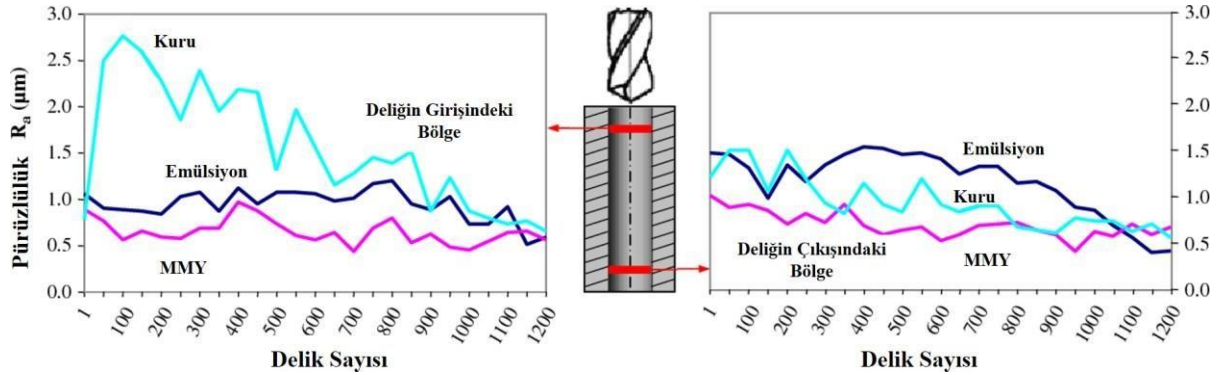
Yüzey pürüzlülüğü ürün kalitesinin bir göstergesi olarak mekanik ürünler için teknik bir gereklilik olarak kullanılmaktadır (Benardos ve Vosniakos, 2003). Ayrıca mekanik parçaların performansını ve üretim maliyetlerini etkileyebilen bir özellik olması nedeniyle imalat endüstrisinde önemli bir parametredir (Ramesh vd., 2012). Delme işlemlerinde de yüzey kalitesi delme performansı önemli bir değerlendirme parametresidir ve geniş bir kalite endeksi olarak kullanılmaktadır (Carou vd., 2014).



Şekil 9. AISI 321 paslanmaz çeliğin farklı yağlama/soğutma teknikleri ile delinmesi sonucu delik yüzeylerinde elde edilen ortalama pürüzlülük (R_a) değerleri (Average roughness (R_a) values obtained on the hole surfaces as a result of drilling AISI 321 stainless steel with different lubrication/cooling techniques) (Pal vd., 2020)

Delme işlemlerinde MMY kullanımı, kuru delme ile karşılaştırıldığında deliklerin yüzey kalitesi ve yüzey sıcaklığı açısından işleme performansını iyileştirdiği fakat geleneksel yağlama tekniği ile neredeyse aynı performansı verdiği görülmüştür. Bu nedenle, delme işleminde MMY ile geleneksel yağlama tekniklerinin birbirlerine alternatif olabileceği belirtilmiştir (Sharma vd., 2016). MMY sıvısı içerisine nano-tüp ve nano-partiküller takviye edilerek klasik MMY sıvısına kıyasla yüzey pürüzlülüğü (R_a) açısından daha iyi sonuçlar alınmıştır (Khan vd., 2019; Sanchez vd., 2010). Amrit vd. (Pal vd., 2020) tarafında nano-grafen takviyeli bitkisel bazlı nano-kesme sıvısı (NGMMY)'nın kullanıldığı AISI 321

çeliği delme çalışmasında nano-parçacık takviye oranına bağlı olarak yüzey pürüzlülüğünün kademeli olarak ciddi oranlarda düştüğü rapor edilmiştir. Nano-kesme sıvısına %0.5 eklenmesi ile R_a %9 azalırken, %1.0 eklenmesi ile %15'lik azalma elde edilmiştir. %1.5'lik nano-grafen katkısı sürüklemeyi %34 oranında azaltmıştır (şekil 9). Bu iyileşmeye nano-grafen parçacıklarının takım-iş parçacığı ara yüzeylerinde bir silindir görevi görerek teması azaltmasına ve sürtünme katsayısını düşürmesine bağlanmıştır.



Şekil 10. Kuru şartlarda, emülsiyon ve MMY yöntemi ile delinen deliklerin başlangıcına ve dibine yakın bir bölgede ölçülen pürüzlülük değerlerinin karşılaştırılması (Comparison of the roughness values measured near the beginning and the bottom of the holes drilled by dry conditions, emulsion and MQL method) (Rodrigo P. Zeilmann vd., 2012)

Rahim ve Sasahara tarafından MMY yöntemi ile palmye yağı ve sentetik ester yağları kullanılarak Inconel 718 nikel alaşımının delinmesi ile ilgili çalışmalarında mikrosertlik, yüzey kusurları, yüzey altı deformasyonu ve yüzey pürüzlülüğü açısından MMY yağlama/soğutma yönteminin üstün performans sağladığı belirtilmiştir (Erween A. Rahim ve Sasahara, 2011). Taşdelen vd. (Tasdelen vd., 2008) farklı yağ miktarlarında, kuru basınçlı hava, emülsiyon ve MMY ile delik delme işlemlerinde MMY ve kuru basınçlı havanın emülsiyon ortamına oranla daha az aşınma yarattığı belirtilmiştir. Yüzey kalitesi açısından ise kuru havanın iç akış ve talaşların duvarlara yapışmasından kaynaklı olarak yüzeyin daha pürüzlü olmasına sebebiyet verdiği, dolayısıyla bu yöntemler arasında MMY'nin öne çıktığı vurgulanmıştır. Dökme demir, S45C, SUS304 ve Ti alaşımının önce kuru ve MMY ile delinmesi, ardından SUS304'ün kuru, hava soğutmalı ve MMY ile delinme işlemlerinin yapıldığı başka bir çalışmada, yüzey kalitesi açısından kuru ve diğer iki koşul arasında oldukça belirgin farklılıklar ortaya çıkarken, hava soğutma ile MMY arasındaki yüzey kalitesi açısından göze göze çarpan bir farklılık görülmediği ve diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuçlar alındığı rapor edilmiştir (Xu vd., 2017). Zeilmann vd. AISI P20 çeliğini kuru emülsiyon ve MMY ortamlarında delmiş ve deliklerin giriş ve tabana yakın bölgelerinden yüzey pürüzlülüğünü ölçmüşlerdir. Şekil 10'da görüldüğü üzere her iki bölgede de en düşük pürüzlülük değerleri MMY uygulama koşullarında alınmıştır. Deliklerin giriş bölgesinde emülsiyon uygulamasında daha yüksek pürüzlülük değerlerine doğru bir eğilim gösterdiği görülmüştür. Bu durum emülsiyon sıvısının orijinal kesici kenar geometrisini daha uzun süre koruması ve aynı zamanda işlenen malzemeyi

soğutmasından kaynaklı olarak kesme mukavemetinin delme süreci boyunca yüksek olmasına atfedilmiştir (Rodrigo P. Zeilmann vd., 2012).

K10 matkap uçları kullanılarak AA1050 alüminyum alaşımı üzerinde MMY uygulaması ile yapılan delme işlemlerinde yüzey pürüzlülüğünün geleneksel yağlama uygulaması ile yapılan delme işlemleri ile çok yakın değerlerde çıktığı gözlemlenmiştir. MMY altında işleme performansının, uygun işleme parametre seçimi ile geleneksel yağlama uygulamasına benzer olması olağan bir durum olduğu öne sürülmüştür. Ayrıca kaplamalı uçlar ile yapılan delme işlemlerinde düşük hidrojenli DLC kaplamanın, 100 μ m'dan daha az matkap ucu aşınması ile 500-7000 arasında yapılan delme işlemlerinde daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır (Fox-Rabinovich vd., 2011).

Geleneksel yağlama uygulaması ile MMY'nin karşılaştırıldığı birçok çalışmada yüzey kalitesi açısından geleneksel yağlama uygulamasının biraz daha kaliteli sonuçlar verdiği veya her iki yöntemin karşılaştırılabilir derecede yüzey pürüzlülüğü sağladığı rapor edilmiştir. Meena vd. (Meena ve El Mansori, 2011) tarafından yüzey pürüzlülüğü ile beraber birçok parametrenin ölçüldüğü çalışma da bunlardan biridir. Farklı delme koşullarında delik sayısına bağlı olarak ölçülen yüzey pürüzlülüğü değerlerindeki değişim gözlemlendiğinde yüksek sıcaklık ve takım ucundaki gerilmeler nedeniyle MMY ve geleneksel yağlama uygulamalarına kıyasla kuru durumda yüzey pürüzlülüğünün oldukça hızlı arttığı gözlemlenmiştir. Matkap ucu arıza başlangıç durumunda kaydedilen en yüksek pürüzlülük değerleri, kuru delmede $1.529 \pm 0.098\mu$ m iken geleneksel yağlama ve MMY koşulları için bu değerler sırasıyla $0,389 \pm 0,136\mu$ m ve $0,498 \pm 0,2\mu$ m olarak ölçülmüştür. Bu durum geleneksel yağlama uygulaması ile delme koşullarına kıyasla MMY altında delme işleminin biraz daha pürüzlü yüzeyler ürettiğini göstermektedir (Meena ve El Mansori, 2011). Fakat MMY uygulamasına göre geleneksel yağlama uygulamasında sarf edilen kesme sıvısı miktarı ölçüldüğünde hem maliyet hem de çevre ve personel sağlığı açısından MMY uygulamasının daha avantajlı olduğu aşikârdır.

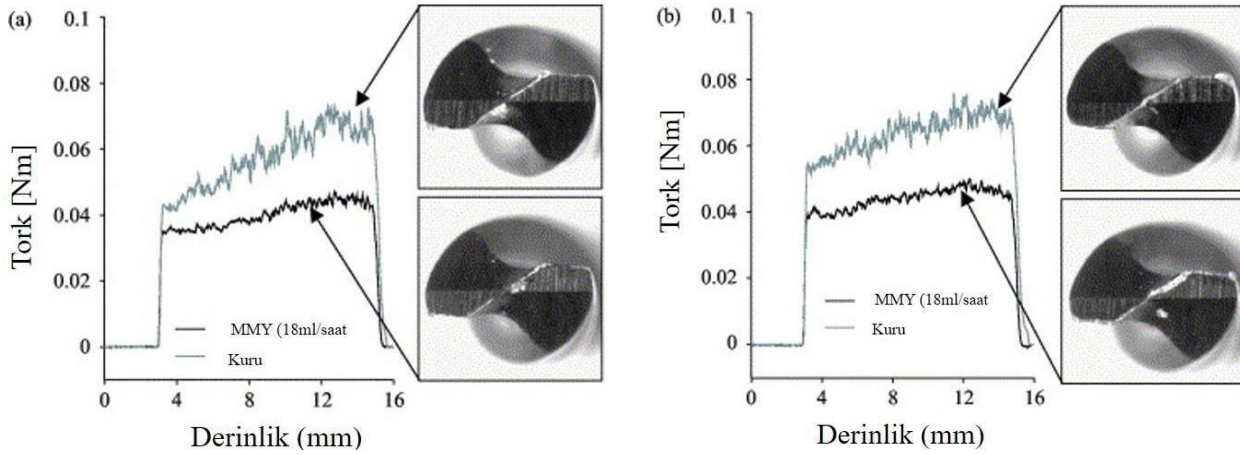
5.3. MMY Tekniğinin Kesme Kuvveti ve Tork Üzerindeki Etkisi (Effect of MQL Technique on Cutting Force and Torque)

Kesme kuvveti talaşlı imalat işlemlerinde işleme sürecini doğrudan etkileyen önemli parametrelerden biridir. Kesme kuvveti ve torku; işleme sıcaklığı, yüzey kalitesi, takım aşınması ve takım ömrü gibi birçok unsur ile doğrudan bağlantılıdır. Kesme sıcaklığı, sürtünme kuvveti ve takım aşınmasının artması kesme kuvveti ve kesme torkunun artmasına sebebiyet verebilmektedir. Ayrıca kesme kuvveti; ilerleme hızı, takım ve tezgah özellikleri, kesme sıvısı ve kesme sıvısı yöntemi, talaş derinliği ve geometrisi, takım aşınması ve sıcaklık gibi olgulardan etkilenebilmektedir (Taşbaşı ve Ay, 2019). Bu nedenle verimli bir frezeleme işlemi için kesme kuvvetlerinin tahmin edilebilir olması işleme maliyetinden ve işleme süresinden tasarruf sağlayacaktır. Kesme sıvısı yöntemlerinin kesme kuvveti ile ilişkisi üzerine literatürde çeşitli araştırmalar mevcuttur. MMY kullanımı ile kesme sıcaklığı ve kesme kuvvetine yönelik işleme performansının kesme sıvısının akış hızından, kesme sıvısının tipinden, meme ucunun işleme bölgesine uzaklığından ve işlenen parçanın malzemesinden etkilendiği gözlemlenmiştir (E. A. Rahim ve Sasahara, 2011; Erween A. Rahim ve Sasahara, 2011). Daha büyük çaplı nozul kullanımında, işleme bölgesine daha fazla kesme sıvısı sağlandığından kesme kuvvetinden tasarruf edilebileceği ileri sürülmüştür. Ayrıca

püskürtme basıncı 0.4MPa ve püskürtme nozulu ile işleme alanı arasındaki mesafesi 6 – 9mm aralığında olduğunda kesme kuvveti ve kesme sıcaklığı bakımından önemli performans artışı elde edildiği rapor edilmiştir (Erween Abd Rahim ve Dorairaju, 2018).

Delme işlemlerinde kesme sıvısının, kesme kuvveti ve torku üzerindeki etkisinin incelendiği birçok araştırma mevcuttur. Chatha vd. (Chatha vd., 2016) tarafından iki farklı kesme hızı kullanılarak 6061 alüminyum alaşımı üzerinde kuru ortam, geleneksel yağlama, saf MMY ve nano-akışkan MMY (NFMQL) ortamlarında delme araştırması yapılmıştır. Bu çalışmada kesme sıvısı olarak kullanılan bitkisel soya fasulyesi yağının içerisine 20nm parçacık boyutlu alüminyum oksit (Al_2O_3) eklenmesi ile elde edilen NFMQL kesme sıvısının diğer delme şartlarına göre delme kuvveti ve delme torkunu oldukça düşürdüğü tespit edilmiştir [41]. Xu vd. tarafından S45C, SUS304 ve Ti alaşımının kuru ve MMY ortamlarında, SUS304'ün ise kuru, soğuk hava ve MMY ortamlarında yapılan deliminasyon çalışmasında MMY kesme sıvısı kullanımının kesme kuvvetlerinin hem statik hem de dinamik bileşenlerini azaltarak takım ömrünün büyük ölçüde uzamasını sağladığı, talaş sıkışmasını hafiflettiği bildirilmiştir (Xu vd., 2017). Heinemann vd (R. Heinemann vd., 2006), küçük burgulu matkapların kuru koşullarda ve 18ml/saat hızında sentetik ester yağı kullanarak MMY uygulaması ile yaptıkları derin delme işleminde tork farklılıklarını karşılaştırmışlardır. Matkap uçları benzer aşınma modelleri sergilemelerine rağmen, kuru ve MMY altında çalışan matkapların tork eğrilerinin belirgin şekilde farklı olduğu gözlemlenmiştir. İlk penetrasyon sırasında ortaya çıkan fark takım ile iş parçası arasındaki artan sürtünmeye atfedilmiştir. Ayrıca Kuru koşullarda kanal boyunca çıkan talaşları itmek için gereken çaba da tork miktarının artmasına sebebiyet verebildiği belirtilmiştir. Yağlanmamış talaşlar kanallar boyunca süresiz bir talaş hareketine sebebiyet verdiği için şekil 11'de görülen kuvvet eğrisinin önemli ölçüde dalgalanmasına sebebiyet verdiği rapor edilmiştir. Bhowmick ve Alpas (Bhowmick ve Alpas, 2008) alüminyum-silikon alaşımını kuru koşullarda, MMY (püskürtme hızı 30ml/saat) ve geleneksel yağlama (30l/saat) uygulamaları altında delme işlemini gerçekleştirmişlerdir. MMY uygulaması ile delme işleminde kuru delmeye göre daha düşük tork ve itme kuvvetlerine ihtiyaç duyulduğu, yapışma ve ani tork artışlarının hafiflediği gözlemlenmiştir. Yine Bownwick vd. tarafından hafif otomotiv bileşenlerinin imalatında kullanılan dökme magnezyum alaşımı AM60'ın kuru ve MMY uygulamaları altında delme işlemleri yapılarak maksimum ve ortalama tork ile itme kuvvetleri ölçülerek karşılaştırılmıştır (Bhowmick vd., 2010). Deliklerin çevresindeki malzemenin mekanik özellikleri, plastik gerinim ve sertlik ölçümleriyle değerlendirildiğinde, kuru delme durumunda kayda değer bir yumuşama gözlemlenirken, MMY uygulaması altında delinen malzemede benzer sonuçlar görülmemiştir. MMY uygulaması ile delme işlemi, istikrarlı bir delme performansı sağladığı belirtilmiştir. Delme döngüleri boyunca tek tip tork ve kuvvet modelleri sağlanmış ve ayrıca pürüzsüz bir delik yüzeyi ve kısa talaş segmentleri dâhil olmak üzere arzu edilen işleme özelliklerini sunduğu rapor edilmiştir. Zeilmann ve Weingaertner (Rodrigo Panosso Zeilmann ve Weingaertner, 2006) Ti6Al4V titanyum alaşımını sert kaplamalı ve kaplamasız takımlar ile MMY uygulaması altında delme işlemi yapmışlardır. Bu çalışmada diğerlerinden farklı olarak MMY uygulaması hem harici bir nozul hem de matkap takımı içerisinden dahili olarak yapılmış ve bu uygulamaların farkları ortaya çıkarılmıştır. Dahili MMY uygulanmasıyla ölçülen sıcaklıklar, harici olarak uygulanan MMY ile elde edilenlerden %50 daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Harici MMY

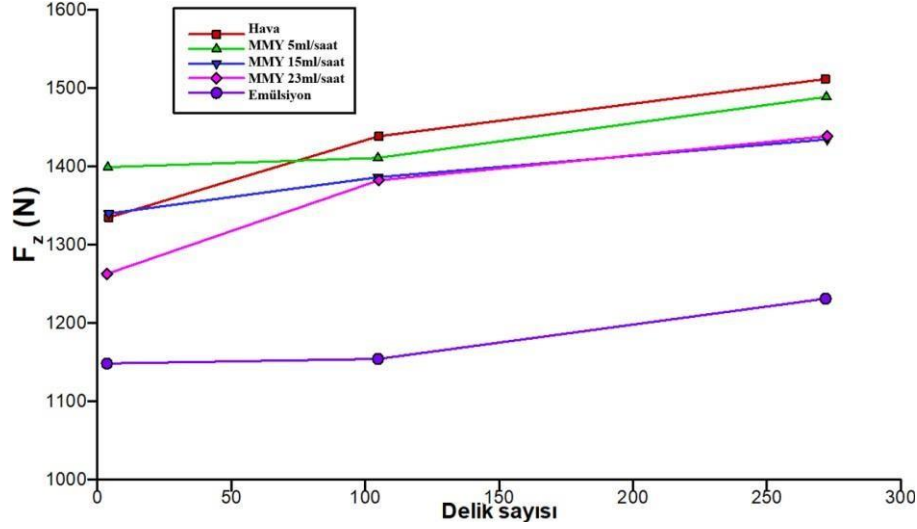
uygulamasında sıcaklığın artmasıyla, daha küçük dirençler için daha küçük besleme kuvvetlerinin ölçülmüştür.



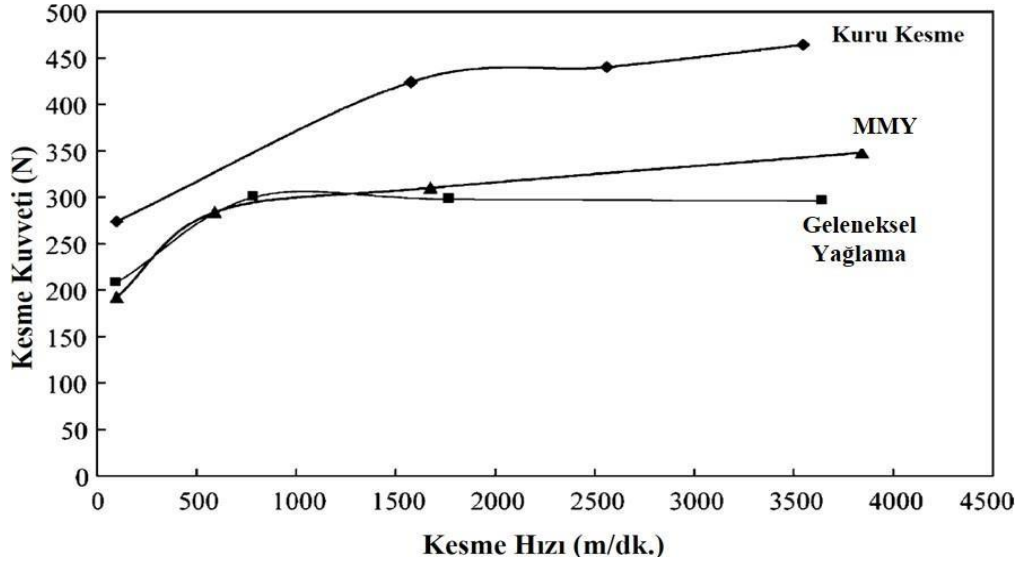
Şekil 11. (a) 51. ve (b) 351. delme döngüsü sırasında kaydedilen tork değerlerinin kuru ve MMY uygulamaları için karşılaştırması ((a) Comparison of torque values recorded during 51st and (b) 351st drilling cycles for dry and MQL applications) (R. Heinemann vd., 2006)

Kesme ve tork kuvveti bakımından MMY'nin diğer kesme sıvısı yöntemlerinin gerisinde kaldığı çalışmalar da mevcuttur. Tasdelen vd. tarafından basınçlı hava, MMY ve emülsiyon sıvısı uygulamaları altında 155m/dk hız ve 0.11mm/devir besleme oranı parametreleri kullanılarak 33mm derinliğinde ve 19mm çapında delme işlemi yapılmıştır. MMY işleminde kesme sıvısı 5, 15 ve 23 ml/saat olmak üzere 3 farklı hızda işleme bölgesine püskürtülmüştür. Şekil 12'de görüldüğü üzere bu çalışmada maksimum kesme kuvveti basınçlı hava ve ardından ise MMY-5 ml/saat için elde edilmiştir. MMY-15 ml/saat ve MMY-23 ml/saat uygulamalarında ise kuvvet ölçümleri hemen hemen aynı olup, basınçlı hava ortamına göre daha düşük kuvvet değerleri gözlemlenmiştir. En düşük kuvvet değerleri ise emülsiyon ile yağlama/soğutma uygulaması altında yapılan delme işleminde elde edilmiştir (Tasdelen vd., 2008).

A356 Alüminyum alaşımının işlendiği bir başka çalışmada farklı yağlayıcı uygulama yöntemleri ile bileşke kesme kuvvetleri arasındaki ilişki araştırılmıştır. Şekil 13'te gösterilen sonuçlara göre kuru ortamda yapılan işleme maksimum kuvvet gerektirirken geleneksel yağlama ve MMY kesme sıvısı yöntemleri ise kuru işleme koşullarına oranla kesme kuvvetini büyük oranda düşürmüştür. Taşmalı soğutma sıvısı uygulama yöntemi için elde edilen en düşük bileşke kesme kuvveti değerleri, kesme sıvısının malzeme yapışmasını ve dolayısıyla sürtünmeyi azaltma potansiyeline atfedilmiştir. MMY uygulaması, sürtünme kuvvetlerini azaltmak için ilk başta benzer bir davranışlar sergilese de, kesme hızının artışıyla birlikte soğutma sıvısı yeterli soğutma sağlayamadığından geleneksel yağlama uygulamasına kıyasla kesme kuvvetinde artışa sebebiyet vermiştir (Kishawy vd., 2005).



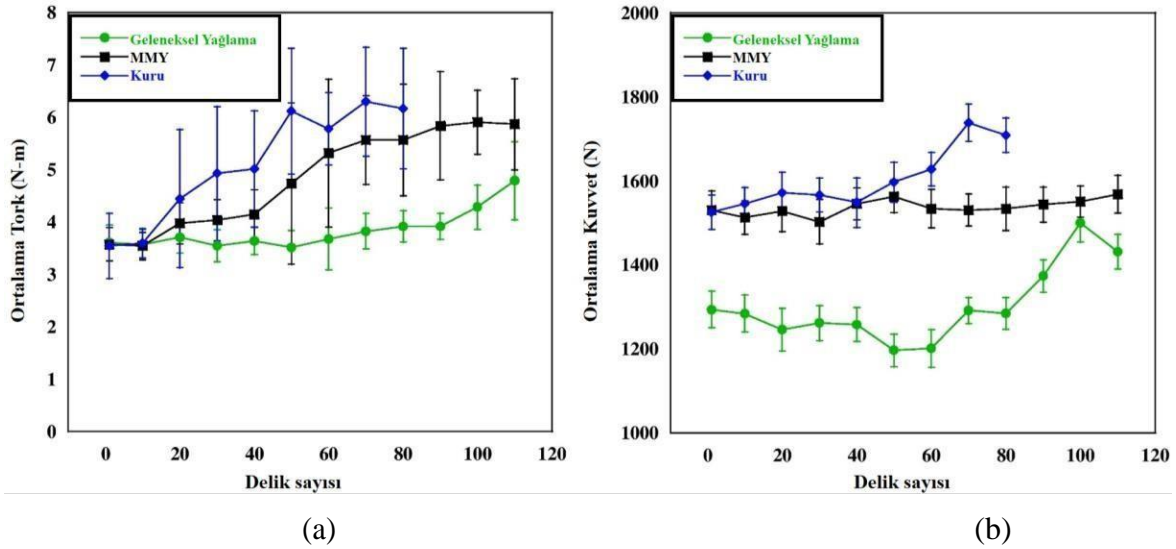
Şekil 12. Delik sayısına bağlı olarak farklı kesme sıvısı yöntemlerinin delme kuvveti ve torku üzerindeki etkisi (Ref. (Tasdelen vd., 2008)'den alınarak yeniden düzenlenmiştir) (Effect of different coolant methods on drilling force and drilling torque depending on the number of holes) (Revised from Ref. (Tasdelen vd., 2008))



Şekil 13. Farklı kesme sıvısı uygulamalarının kesme hızına bağlı olarak kesme kuvveti üzerindeki etkisi (Effect of different coolant applications on cutting force depending on cutting speed) (Kishawy vd., 2005)

Meena ve Mansori (Meena ve El Mansori, 2011) TiAlN-kaplamalı tungsten karbür takım kullanarak östemperlenmiş sünek demir (ADI: austempered ductile iron) üzerinde kuru, geleneksel yağlama ve MMY uygulamaları ile delme işlemlerini gerçekleştirmişlerdir. Kuru ortamda yapılan delme işleminde takım ile maksimum 80 delik delinebilirken, MMY ve geleneksel yağlama uygulamalarında

110 tane delme işlemi yeterli görülmüş ve elde edilen ortalama kuvvet ve tork verileri şekil 14'te verilmiştir. Ayrıca geleneksel yağlama uygulamasında 110 tane delik sonunda takımın hala hasarsız olduğu vurgulanmıştır. Kuru uygulamaya kıyasla MMY ve geleneksel yağlama uygulamalarından elde edilen maksimum ortalama torklar arasındaki fark sırasıyla %6 ve %24, maksimum ortalama kuvvet ise yine sırası ile %10 ve %13 olarak elde edilmiştir. Kuru koşullara göre MMY ve geleneksel yağlama uygulamaları ile işleme sırasında tork ve itme kuvvetlerinde önemli bir azalma elde edilmiştir.



Şekil 14. Farklı uygulamalarla yapılan delme işlemi sonucunda delik sayısına bağlı olarak elde edilen (a) ortalama tork ve (b) ortalama kuvvet verilerinin karşılaştırılması (Comparison of (a) average torque and (b) average force data obtained as a result of drilling with different applications depending on the number of holes) (Meena ve El Mansori, 2011)

6. Sonuçlar ve Öneriler (Conclusions and Recommendations)

Delme işlemlerinde kesme sıvısı kullanımının kuru delmeye göre oldukça avantaj sağladığı yapılan tüm literatür araştırmalarında açıkça ortaya koyulmuştur. Kuru delme sürecinde ortaya çıkan ve takım-iş parçası sürtünme davranışını ve işleme performansını bozan aşırı ısı nedeni ile frezeleme işlemlerinde kesme sıvısı uygulamalarının kullanımı giderek yaygınlaşmıştır. Kullanılan kesme sıvısı uygulamalarının takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvveti gibi parametreler üzerinde birbirlerine üstünlükleri mevcut olsa da kullanılan sıvının miktarına bağlı olarak maliyet, çevre ve insan sağlığı gibi faktörler göz önüne alındığında spesifik olarak bazı uygulamalar öne çıkmıştır. Geleneksel yağlama uygulaması işleme performansı açısından en verimli soğutma/yağlama tekniklerinden biridir; ancak işçi sağlığı ve çevre üzerindeki ciddi olumsuz etkiler ile yüksek işleme maliyeti gibi farklı dezavantajlar araştırmacıları başka bir alternatif uygulama arayışına yöneltmiştir. Bir diğer kesme sıvısı uygulaması olan minimum miktar yağlama (MMY) yöntemi son yıllarda hem işleme performansı hem de maliyet, çevre ve insan sağlığı açısından avantajlı olarak öne çıkan bir uygulamadır. Birçok çalışmada geleneksel yağlama kesme sıvısı uygulaması MMY ile kıyaslanmış ve yukarıda bahsedilen yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvveti ve takım ömrü gibi parametreler üzerinde geleneksel yağlama uygulamasının MMY ile kıyaslanabilir derecede

veya MMY'den daha iyi sonuçlar verdiği rapor edilmiştir. Fakat MMY uygulamasında kullanılan kesme sıvısının miktarı geleneksel yağlama ve diğer uygulamalarda kullanılan sıvının neredeyse on binde biri kadardır. Ayrıca son yıllarda MMY uygulamasında kullanılan sıvının içerisine nano-metal veya nano-metal-okisitler eklenerek delme performansını arttırmak mümkün olmuştur. Delme işlemi hem yüksek hızlı hem de derin işleme olması sebebi ile yeterli yağlama/soğutma yapılması ve kesme sıvısının işleme bölgesine nüfuz etmesi diğer frezeleme işlemlerine oranla daha zordur. İşleme bölgesinde ısı artışı takım ömrünü doğrudan düşürmekte ve bu da maliyeti arttırmaktadır. Bu yüzden delme işlemlerinde nano-parçacıklı kesme sıvısının MMY yöntemi ile uygulanması maliyet ve işleme performansı açısından büyük önem taşımaktadır.

Bu derleme çalışmasında delme işlemlerinde takım ömrü, yüzey kalitesi, maliyet çevre ve insan sağlığı gibi faktörler göz önüne alındığında MMY nano-kesme sıvısı uygulamasının diğer yöntemlere oranla daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu çalışma delme işlemlerinde MMY ve MMY-nano akışkan yaklaşımları ile ilgili gelecekte yapılacak çalışmalar için bir kılavuz sunmaktadır. Bu kılavuz bahsi geçen yağlama/soğutma yöntemlerinin kullanılmasının sürtünme ve ısı yayılım hızı ile bunların takım aşınması, yüzey kalitesi, tork ve kesme kuvveti gibi işleme parametreleri üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Ayrıca bu çalışmadan çıkarılabilecek temel öneriler aşağıda özetlenmiştir.

- İşleme performansı ve niteliğini iyileştirmek, işleme maliyetini azaltmak, işleme bölgesini korozyondan korumak vb. sebeplerden ötürü delme işlemlerinde kesme sıvısının kullanılması önerilmektedir.
- Kesme sıvısı partikül boyutunun küçük olması kesme sıvısının takı-malzeme arayüzüne daha kolay girmesini ve yağlama/soğutma performansını arttırsa da ortalama çapı $10\mu\text{m}$ 'dan daha küçük damlacıklar soluma sırasında insan vücuduna daha kolay nüfus ettiğinden operatörün sağlığı açısından tehdit oluşturmaktadır. Bu yüzden ortalama partikül çapı $10\mu\text{m}$ 'dan büyük kesme sıvılarının kullanılması önerilmektedir.
- Takım performansı ve işleme niteliği açısından geleneksel yağlama yöntemi, MMY tekniğine alternatif bir yöntem olarak görülse de, toplam işleme maliyeti, çevre ve personel sağlığı göz önüne alındığında delik delme işlemlerinde MMY tekniğinin daha avantajlı olduğu görülmektedir ve MMY tekniğinin kullanılması önerilmektedir.
- Derin delme işlemlerinde dıştan kesme sıvısı uygulaması, sıvıyı delik dibine ulaştıramadığından, işleme kalitesi düşmekte ve takım ömrü azalmaktadır. Bu yüzden derin delme işlemlerinde işleme niteliği ve takım ömrünün korunması açısından takım maliyeti daha fazla olmasına rağmen içten kesme sıvısı uygulamasının kullanılması önerilmektedir.

Referanslar (References)

Alves, S. M., Barros, B. S., Trajano, M. F., Ribeiro, K. S. B., & Moura, E. (2013). Tribological behavior of vegetable oil-based lubricants with nanoparticles of oxides in boundary lubrication conditions. *Tribology International*, 65, 28–36.

- Barrow, G. (1972). Wear of cutting tools. *Tribology*, 5(1), 22–30.
- Bayraktar, Ş., Sıyambaş, Y., & Turgut, Y. (2017). Delik delme prosesi: bir araştırma. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 124–124.
- Benardos, P. G., & Vosniakos, G. C. (2003). Predicting surface roughness in machining: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(8), 833–844.
- Bhowmick, S., & Alpas, A. T. (2008). Minimum quantity lubrication drilling of aluminium-silicon alloys in water using diamond-like carbon coated drills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 48(12–13), 1429–1443.
- Bhowmick, S., Lukitsch, M. J., & Alpas, A. T. (2010). Dry and minimum quantity lubrication drilling of cast magnesium alloy (AM60). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(5), 444–457.
- Bhuyan, M., Sarmah, A., Gajrani, K. K., Pandey, A., Thulkar, T. G., & Sankar, M. R. (2018). State of art on minimum quantity lubrication in grinding process. *Materials Today: Proceedings*, 5(9), 19638–19647.
- Çağan, S. Ç., Buldum, B. B., & Özkul, İ. (2018). Hafif Metallerde Minimum Miktarda Yağlama (MQL) Sisteminin Kullanımı. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(2), 582–590.
- Çakir, O., Kiyak, M., & Altan, E. (2004). Comparison of gases applications to wet and dry cuttings in turning. *Journal of Materials Processing Technology*, 153–154(1–3), 35–41.
- Carou, D., Rubio, E. M., Lauro, C. H., & Davim, J. P. (2014). Experimental investigation on surface finish during intermittent turning of UNS M11917 magnesium alloy under dry and near dry machining conditions. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 56, 136–154.
- Chatha, S. S., Pal, A., & Singh, T. (2016). Performance evaluation of aluminium 6063 drilling under the influence of nanofluid minimum quantity lubrication. *Journal of Cleaner Production*, 137, 537–545.
- Chen, W. C., & Tsao, C. C. (1999). Cutting performance of different coated twist drills. *Journal of Materials Processing Technology*, 88(1), 203–207.
- Çiftçi, İ., & Gökçe, H. (2018). Ti6Al4V Titanyum Alaşımının Delinmesinde Delme Yönteminin Aşınmaya Etkisinin İncelenmesi. *Journal of Polytechnic*, 0900(3), 627–631.
- Debnath, S., Reddy, M. M., & Yi, Q. S. (2014). Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review. *Journal of Cleaner Production*, 83, 33–47.
- Demir, H., Ulaş, H. B., & Zeyveli, M. (2009). *Cutting Fluids Used in Metal Cutting and Their Effects on Human Health*. 13–15.
- Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung. (2010). *Minimum quantity lubrication for machining - operations* (Issue November).
- Dhar, N. R., Ahmed, M. T., & Islam, S. (2007). An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(5 SPEC. ISS.), 748–753.
- Dhar, N. R., Kamruzzaman, M., & 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(2), 299–304.

- Dhar, Nikhil Ranjan, Islam, S., & Kamruzzaman, M. (2007). Effect of minimum quantity lubrication on tool wear and surface roughness in micro-milling. *Gazi University Journal Sci*, 20(2), 23–32.
- Duc, T. M., Long, T. T., & Van Thanh, D. (2020). Evaluation of minimum quantity lubrication and minimum quantity cooling lubrication performance in hard drilling of Hardox 500 steel using Al₂O₃ nanofluid. *Advances in Mechanical Engineering*, 12(2), 1–12.
- Fox-Rabinovich, G., Dasch, J. M., Wagg, T., Yamamoto, K., Veldhuis, S., Dosbaeva, G. K., & Tauhiduzzaman, M. (2011). Cutting performance of different coatings during minimum quantity lubrication drilling of aluminum silicon B319 cast alloy. *Surface and Coatings Technology*, 205(16), 4107–4116.
- Gaitonde, V. N., Karnik, S. R., & Davim, J. P. (2008). Selection of optimal MQL and cutting conditions for enhancing machinability in turning of brass. *Journal of Materials Processing Technology*, 204(1–3), 459–464.
- Gajrani, K. K., Ram, D., Sankar, M. R., Dixit, U. S., Suvin, P. S., & Kailas, S. V. (2017). Machining of hardened AISI H-13 steel using minimum quantity eco-friendly cutting fluid. *International Journal of Additive and Subtractive Materials Manufacturing*, 1(3/4), 240.
- Gajrani, K. K., & Sankar, M. R. (2020). *Role of Eco-friendly Cutting Fluids and Cooling Techniques in Machining*. 159–181.
- Geng, D., Liu, Y., Shao, Z., Lu, Z., Cai, J., Li, X., Jiang, X., & Zhang, D. (2019). Delamination formation, evaluation and suppression during drilling of composite laminates: A review. *Composite Structures*, 216(October 2018), 168–186.
- Gill, S. S., Singh, R., Singh, H., & Singh, J. (2009). Wear behaviour of cryogenically treated tungsten carbide inserts under dry and wet turning conditions. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(3–4), 256–260.
- Gündoğdu, H. E. (2006). *Kesme Sıvılı ve Kuru Talaşlı İşlemenin İş Parçası ve Kesici Takım Üzerindeki Etkileri*. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Gürbüz, H., Baday, Ş., & Gönülaçar, Y. E. (2017). *Minimum Miktarda Yağlamanın Frezeleme İşlemleri Üzerine Etkisinin Araştırılması: Derleme Investigation Of The Effect Of Minimum Quantity Lubrication On Milling Processes : Review*. 2(2), 59–79.
- Haan, D. M., Batzer, S. A., Olson, W. W., & Sutherland, J. W. (1997). An experimental study of cutting fluid effects in drilling. *Journal of Materials Processing Technology*, 71(2), 305–313.
- Heinemann, R., Hinduja, S., Barrow, G., & Petuelli, G. (2006). Effect of MQL on the tool life of small twist drills in deep-hole drilling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(1), 1–6.
- Heinemann, R. K. (2004). *Improving the Performance of Small Diameter Twist Drills in Deep-Hole Drilling*.
- Heinemann, Robert. (2018). Drilling. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, 16(1), 104–105.
- Hosseini Tazehkandi, A., Pilehvarian, F., & Davoodi, B. (2014). Experimental investigation on removing cutting fluid from turning of Inconel 725 with coated carbide tools. *Journal of Cleaner Production*, 80, 271–281.
- Huang, W. T., Wu, D. H., & Chen, J. T. (2016). Robust design of using nanofluid/MQL in micro-drilling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(9–12), 2155–2161.
- İsbilir, O., & Ghassemieh, E. (2011). Finite element analysis of drilling of titanium alloy. *Procedia Engineering*,

10, 1877–1882.

- Jayal, A. D., Balaji, A. K., Seseek, R., Gaul, A., & Lillquist, D. R. (2007). Machining performance and health effects of cutting fluid application in drilling of A390.0 cast aluminum alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 9(2), 137–146.
- Jia, D., Li, C., Zhang, Y., Yang, M., Wang, Y., Guo, S., & Cao, H. (2017). Specific energy and surface roughness of minimum quantity lubrication grinding Ni-based alloy with mixed vegetable oil-based nanofluids. *Precision Engineering*, 50, 248–262.
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2020). Manufacturing Engineering and Technology. In *Journal of Materials Processing Technology* (8th ed., Vol. 25, Issue 1).
- Khan, A. M., Jamil, M., Ul Haq, A., Hussain, S., Meng, L., & He, N. (2019). Sustainable machining. Modeling and optimization of temperature and surface roughness in the milling of AISI D2 steel. *Industrial Lubrication and Tribology*, 71(2), 267–277.
- Kishawy, H. A., Dumitrescu, M., Ng, E. G., & 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 and Manufacture*, 45(2), 219–227.
- Kivak, T., & Şeker, U. (2015). Effect of cryogenic treatment applied to M42 HSS drills on the machinability of Ti-6Al-4V alloy. *Materiali in Tehnologije*, 49(6), 949–956.
- Kıvık, T. (2012). *Kesici takımlara uygulanan kriyojenik işlemin Ti-6Al-4V alaşımının delinebilirliği üzerindeki etkilerinin araştırılması*. Gazi University.
- Klocke, F., & Eisenblätter, G. (1998). Dry cutting. *VDI Berichte*, 46(1399), 159–188.
- Kuram, E., Ozcelik, B., & Demirbas, E. (2013). *Environmentally Friendly Machining: Vegetable Based Cutting Fluids*.
- Le Coz, G., Marinescu, M., Devillez, A., Dudzinski, D., & Velnom, L. (2012). Measuring temperature of rotating cutting tools: Application to MQL drilling and dry milling of aerospace alloys. *Applied Thermal Engineering*, 36(1), 434–441.
- Li, K. M., & Chou, S. Y. (2010). Experimental evaluation of minimum quantity lubrication in near micro-milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(15), 2163–2170.
- Li, R., Hegde, P., & Shih, A. J. (2007). High-throughput drilling of titanium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(1), 63–74.
- Liao, Y. S., & Lin, H. M. (2007). Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(11), 1660–1666.
- Lotfi, M., Amini, S., Teimouri, R., & Alinaghian, M. (2017). Built-up edge reduction in drilling of AISI 1045 steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(6), 623–630.
- Meena, A., & El Mansori, M. (2011). Study of dry and minimum quantity lubrication drilling of novel austempered ductile iron (ADI) for automotive applications. *Wear*, 271(9–10), 2412–2416.
- Nam, J. S., Lee, P. H., & Lee, S. W. (2011). Experimental characterization of micro-drilling process using nanofluid minimum quantity lubrication. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 51(7–8), 649–652.

- Naves, V. T. G., Da Silva, M. B., & Da Silva, F. J. (2013). Evaluation of the effect of application of cutting fluid at high pressure on tool wear during turning operation of AISI 316 austenitic stainless steel. *Wear*, 302(1–2), 1201–1208.
- Niketh, S., & Samuel, G. L. (2018). Drilling performance of micro textured tools under dry, wet and MQL condition. *Journal of Manufacturing Processes*, 32, 254–268.
- Pal, A., Chatha, S. S., & Sidhu, H. S. (2020). Experimental investigation on the performance of MQL drilling of AISI 321 stainless steel using nano-graphene enhanced vegetable-oil-based cutting fluid. *Tribology International*, 151(March), 106508.
- Park, K. H., Olortegui-Yume, J., Yoon, M. C., & Kwon, P. (2010). A study on droplets and their distribution for minimum quantity lubrication (MQL). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(9), 824–833.
- 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., & Sasahara, H. (2011). A study of the effect of palm oil as MQL lubricant on high speed drilling of titanium alloys. *Tribology International*, 44(3), 309–317.
- Rahim, Erween A., & Sasahara, H. (2011). An analysis of surface integrity when drilling inconel 718 using palm oil and synthetic ester under MQL condition. *Machining Science and Technology*, 15(1), 76–90.
- Rahim, Erween Abd, & Dorairaju, H. (2018). Evaluation of mist flow characteristic and performance in Minimum Quantity Lubrication (MQL) machining. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 123(December 2017), 213–225.
- Ramesh, S., Karunamoorthy, L., & Palanikumar, K. (2012). Measurement and analysis of surface roughness in turning of aerospace titanium alloy (gr5). *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 45(5), 1266–1276.
- Said, Z., Gupta, M., Hegab, H., Arora, N., Khan, A. M., Jamil, M., & Bellos, E. (2019). A comprehensive review on minimum quantity lubrication (MQL) in machining processes using nano-cutting fluids. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(5–6), 2057–2086.
- Sanchez, J. A., Pombo, I., Alberdi, R., Izquierdo, B., Ortega, N., Plaza, S., & Martinez-Toledano, J. (2010). Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology. *Journal of Cleaner Production*, 18(18), 1840–1849.
- Sharma, A. K., Tiwari, A. K., & Dixit, A. R. (2016). Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 127, 1–18.
- Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. (2012). Environmentally conscious machining of difficult-to-machine materials with regard to cutting fluids. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 57, 83–101.
- Singh, G., Gupta, M. K., Hegab, H., Khan, A. M., Song, Q., Liu, Z., Mia, M., Jamil, M., Sharma, V. S., Sarikaya, M., & Pruncu, C. I. (2020). Progress for sustainability in the mist assisted cooling techniques: a critical review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 109(1–2), 345–376.
- Taşbaşı, M., & Ay, M. (2019). Nikel Alaşımlarının Farklı Soğutma/Yağlama Koşulları Altında Talaşlı İmalatının

Kesme Kuvvetlerine Etkisi: Bir Derleme Çalışması. *Marmara University, I(1)*, 24–36.

- Tasdelen, B., Wikblom, T., & Ekered, S. (2008). Studies on minimum quantity lubrication (MQL) and air cooling at drilling. *Journal of Materials Processing Technology*, 200(1–3), 339–346.
- Tawakoli, T., Hadad, M. J., & Sadeghi, M. H. (2010). Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication - MQL grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(6), 521–531.
- TEMAK. (2021). *Kesme Sıvılarının ve Metal Kesme Tekniklerinin Gelişimi*. <https://temak.com.tr/tag/kesme-sivilarinin-ve-metal-kesme-tekniklerinin-gelisimi/>
- Xu, J., Yamada, K., Sekiya, K., Tanaka, R., & Yamane, Y. (2017). Study of comparing cutting force signal features for dry, air cooling and minimum quantity lubrication (MQL) drilling. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 11(2), 1–11.
- Yücel, E., Günay, M., Ayyıldız, M., Erkan, Ö., & Kara, F. (2011). Talaşlı İmalatta Kullanılan Kesme Sıvılarının İnsan Sağlığına Etkileri ve Sürdürülebilir Kullanımı. *International Advanced Technologies Symposium*, 116–121.
- Zeilmann, Rodrigo P., Nicola, G. L., Vacaro, T., Teixeira, C. R., & Heiler, R. (2012). Implications of the reduction of cutting fluid in drilling AISI P20 steel with carbide tools. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58(5–8), 431–441.
- Zeilmann, Rodrigo Panosso, & Weingaertner, W. L. (2006). Analysis of temperature during drilling of Ti6Al4V with minimal quantity of lubricant. *Journal of Materials Processing Technology*, 179(1–3), 124–127.
- Zhang, P. F., Churi, N. J., Pei, Z. J., & Treadwell, C. (2008). Mechanical drilling processes for titanium alloys: A literature review. *Machining Science and Technology*, 12(4), 417–444.
- Zhao, H. (1994). *Predictive models for forces, power and hole oversize in drilling operations*. University of Melbourne, Australia.