

Tornalama İşleminde Uygulanan MMY Tekniğinde Kullanılan Nanoakışkanların İşleme Performansına Etkisi: Çevre Dostu İşleme Üzerine Bir İnceleme

Ayşegül ÇAKIR ŞENCAN^{1,*} , Muhammet ÇELİK¹ , Ekin Nisa SELAYET SARAÇ¹ 

¹Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Zonguldak, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 08.11.2021

Kabul: 20.12.2021

Anahtar Kelimeler:

Çevre dostu işleme,

MMY,

Nanoakışkan,

Tornalama,

Kesme sıvısı,

ÖZET

Tornalama operasyonunda uygulanan soğutma/yağlama yöntemleri işleme performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Soğutma/yağlama yönteminde kullanılan kesme sıvısı miktarının kontrolü ise, hem toplam üretim maliyeti açısından hem de çevreye olan etkileri açısından önem arz etmektedir. Bu amaçla uygulanan Minimum Miktarda Yağlama (MMY) tekniği, kullanılan kesme sıvısı miktarını ciddi oranda azaltırken işleme performansını da koruduğu bilinmektedir. MMY yönteminde kullanılan kesme sıvılarının soğutma/yağlama etkisini artırmak amacıyla son yıllarda bu kesme sıvılarına nanoparçacık takviye edilmektedir. Bu şekilde elde edilen nanoakışkanların kesme performansını ne ölçüde iyileştirdiği araştırmacıların üzerinde yoğunlaştığı bir konudur. Bu çalışmada tornalama işleminde uygulanan MMY soğutma/yağlama yönteminde nanoparçacık takviyeli kesme sıvısı (nanoakışkan) kullanımının işleme performansına etkisi ile ilgili çalışmalar incelenmiştir. Yapılan incelemede iş parçası malzemesi olarak çelik alaşımları, titanyum alaşımları ve nikel alaşımları olmak üzere, işlenmesinde zorluk yaşanan bu malzemelerle ilgili yapılan çalışmalar ayrı başlıklarda değerlendirilmiştir. Bu çalışmalarda kuru işleme, ıslak işleme (geleneksel soğutma), sade MMY ve nanoparçacık katkılı MMY olmak üzere farklı soğutma şartlarında işleme performansları incelendiği görülmüştür. Ayrıca, nanoparçacık ilavesi ile ilgili farklı çeşit malzemeler, ağırlıkça veya hacimce farklı oranlar veya farklı boyutlar olmak üzere birden çok parametrenin irdelendiği gözlenmiştir. Yapılan tüm bu çalışmalardan elde edilen sonuçlarda, MMY yönteminde nanoakışkan uygulamasının sade MMY ve kuru işlemeye göre işleme performansında belirgin bir iyileşme sağlandığı ortaya konmuştur.

The Effect of Nanofluids Used in the MQL Technique Applied in Turning Process on Machining Performance: A Review on Eco-Friendly Machining

ARTICLE INFO

Received: 08.11.2021

Accepted: 20.12.2021

Keywords:

Eco-friendly machining,

MQL,

Nanofluid,

Turning,

Coolant

ABSTRACT

The cooling/lubrication methods applied in the turning operation significantly affect the machining performance. The control of the amount of cutting fluid used in the cooling/lubrication method is important both in terms of the total production cost and in terms of its effects on the environment. It is known that the Minimum Amount of Lubrication (MQL) technique applied for this purpose significantly reduces the amount of cutting fluid used while maintaining the machining performance. In recent years, nanoparticles have been added to these cutting fluids in order to increase the cooling/lubricating effect of the cutting fluids used in the MQL method. The extent to which the nanofluids obtained in this way improve the cutting performance is a subject that researchers focus on. In this study, studies on the effect of the use of nanoparticle reinforced cutting fluid (nanofluid) on the machining performance in the MQL cooling/lubrication method applied to the turning process were examined. In the study, studies on these materials, which are difficult to process, such as steel alloys, titanium alloys and nickel alloys as workpiece materials, were evaluated under separate headings. In these studies, machining performances were investigated under different cooling conditions, including dry machining, wet machining (conventional cooling), pure MQL and nanoparticle added MQL. In addition, it has been observed that more than one parameter, including different kinds of materials, different ratios by weight or volume, or different sizes, related to the addition of nanoparticles. In the results obtained from all these studies, it has been revealed that nanofluid application in the MQL method provides a significant improvement in machining performance compared to pure MQL and dry machining.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Talaşlı imalat önceden tasarımı yapılan iş parçasının, imalat sürecine uygun takım tezgahlarında, özel kesici takımlar marifetiyle kesme operasyonuna tabi tutularak şekillendirilmesini kapsayan imalat yöntemidir. Talaşlı imalat yöntemlerinden biri olan tornalama işlemi ise, dönen iş parçası üzerinde doğrusal ilerleyen kesici takımın talaş kaldırmak suretiyle parçayı şekillendirme işlemidir. Tornalama yöntemi talaşlı imalat sektöründe uygulama sıklığı fazla olan önemli bir operasyondur [1].

Son yıllarda talaşlı imalat sektöründe artan rekabet ortamı, yüksek verimlilikle ilgili talebi de artırmıştır. Verimli bir üretim, üretim maliyetlerini düşürürken ürün kalitesini korumak veya iyileştirmek ile mümkündür. Verimli bir üretim için üretim hızları önemli bir faktördür. Çünkü üretim hızlarındaki artış birim zamanda üretilen ürün sayısını da artırmaktadır. Yüksek kesme hızı değerleri kullanmak sadece üretim hızını artırmakla kalmayıp, aynı zamanda takıma etki eden mekanik yükleri düşürüp iş parçasının yüzey kalitesini de iyileştirebilmektedir [2]. Fakat talaş kaldırma işlemi gerçekleşirken kullanılan mekanik enerjinin neredeyse tamamının ısı enerjisine dönüşmesinden dolayı, yüksek kesme hızları beraberinde daha yüksek sıcaklıkları ortaya çıkarmaktadır. Ortaya çıkan bu yüksek sıcaklıklar, iş parçasına ve kesici takıma ciddi oranda zarar verebilmektedir [2-3]. Bu problemleri en aza indirebilmek için kesme bölgesindeki sıcaklığın kontrolü çok önemlidir. Kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın yaklaşık %80'i talaş ile uzaklaştırılır. Bundan dolayı kesme bölgesinde oluşan sıcaklığın kontrolü, çıkan talaşın kontrolüyle de ilgilidir. Kesme sıvısı uygulamaları tüm bu problemlerin çözümüne katkı sağlamaktadır. Çünkü bu süreçte, kesme sıvıları kesme bölgesindeki sıcaklığı soğutma etkisiyle düşürür. Ayrıca yağlama etkisi ile takım-iş parçası ve takım-talaş ara yüzeylerindeki sürtünmeyi azaltır. Aynı zamanda çıkan talaşın kırılmasını ve kesme bölgesinden uzaklaşmasını da sağlar. Kesme sıvısı uygulamasının soğutma, yağlama ve talaş uzaklaştırma olmak üzere bu üç önemli fonksiyonu, talaşlı imalat işleminin performansına olumlu katkı yapmaktadır [4]. Bu şekilde kesme sıvısı uygulamaları yüksek kesme hızları kullanımından kaynaklanan olumsuzlukları en aza indirebilmektedir.

Kesme performansına olumlu etki eden kesme sıvısı uygulamaları, toplam işleme maliyetlerini ise yükseltmektedir. Yapılan bazı araştırmalar kesme sıvısının tedariki, depolanması, geri dönüşümü ve atığının yok edilmesi gibi süreçlerin maliyetleri, toplam üretim maliyetinin %7-17'sini oluşturduğunu ortaya koymuştur [5]. Ayrıca tehlikeli kimyasallar içeren bu kesme sıvıları kontrolsüz miktarlarda uygulandığında çevreye ve insan sağlığına da ciddi zararlar verdiği bilinmektedir [6]. Bu sebeple son yirmi yılda araştırmacılar, kesme sıvısı kullanımını en aza indirmek için çeşitli araştırmalar yapmışlardır [3-11]. Burada önemli olan husus, kullanılan kesme sıvısı miktarını düşürürken ürün kalitesi ve kesici takım ömrünü olumsuz etkilememektir. Hem iyi bir işleme performansı veren, hem de işlem sonunda atığı kalmayan, en az miktarda kesme sıvısı kullanımı için son yıllarda minimum miktarda yağlama (MMY) yöntemi uygulanmaya başlanmıştır [7]. MMY yönteminde, kesme sıvısı sis halinde basınçlı havayla kesme noktasına püskürtülmektedir. Bu şekilde iş parçası ve kesici takım arasında yağ filmi oluşumu sağlanmaktadır. Basınçlı hava uygulaması da talaşın kırılıp uzaklaşmasını sağlamaktadır. MMY yönteminde kullanılan kesme sıvısı miktarı, geleneksel uygulamaya göre 1000-10000 kat daha az olmasına rağmen, işleme performansı konusunda geleneksel uygulamaya yakın sonuçlar elde edilmiştir [8]. MMY uygulaması ile, özellikle alüminyum, çelik, titanyum, inconel ve kompozit gibi malzemelerin işlenmesinde olumlu sonuçlar gözlenmiştir [9-11].

Son yıllarda önem kazanan araştırma konularından biri de MMY tekniğinin işleme performansına olumlu etkisini artırmak için nanoparçacık takviyesiyle nanoakışkanlar oluşturulmasıdır. Yapılan araştırmalarda nanoparçacıkların kesme sıvılarının işleme performansını arttırabildiği görülmüştür. Bu araştırmalar incelendiğinde, nanoparçacıkların kesme sıvısı ile birleşerek ısı iletkenlikleri sayesinde kesme sıcaklığını azalttığı ve böylece takım ömrünü olumlu etkilediği söylenebilir [12-16]. Ayrıca nanoparçacıkların geometrik yapısından dolayı da daha iyi yüzey kalitesi elde edilebildiği bazı araştırmalarda ortaya konmuştur [15-16].

Bu çalışma okuyucuya, tornalama operasyonlarında bu tür soğutma/yağlama teknikleri uygulandığında nasıl faydaların/kısıtların ortaya çıktığını inceleyerek bilgi sunmaktadır. Bu

incelemenin temel amacı, tornalama işlemlerinde kullanılan MMY uygulamalarının ve bu uygulamalarda kesme sıvısı olarak kullanılan nanoakışkanların işleme performansına etkisi üzerine derinlemesine bir analizin yapılmasıdır. Özellikle farklı iş parçalarının tornalanması sürecinde, MMY-nanoakışkan uygulamalarının sürece katkısı ayrıntılı olarak incelenmiştir. Tornalama işlemine tabi tutulan farklı malzeme grupları arasından çelik alaşımları, titanyum alaşımları ve nikel alaşımları seçilerek bu malzeme grupları için üç başlıkta incelemeler yapılmıştır. Bu incelemeler sonunda her bir malzeme grubu için MMY yönteminde nasıl stratejiler denendiği, hangi nanoakışkanların ne şekilde kullanıldığı ve işlem sonunda sürece etkileri paylaşılmıştır.

Mevcut çalışma sadece MMY-nanoakışkan uygulamasının işleme performansına etkisini değerlendirmekle kalmayıp, aynı zamanda bu tekniğin arkasındaki tribolojik ve ısı transfer mekanizmalarını da irdelemektedir. Ayrıca bu çalışma soğutma teknikleri konusunda MMY-nanoakışkan teknikleri uygulanmasıyla geleceğe yönelik sürdürülebilir perspektiflerin belirlenmesini amaçlamaktadır. Bu şekilde daha ekonomik ve çevre dostu bir üretim süreci için yönlendirmeler gerçekleştirilebileceği düşünülmektedir.

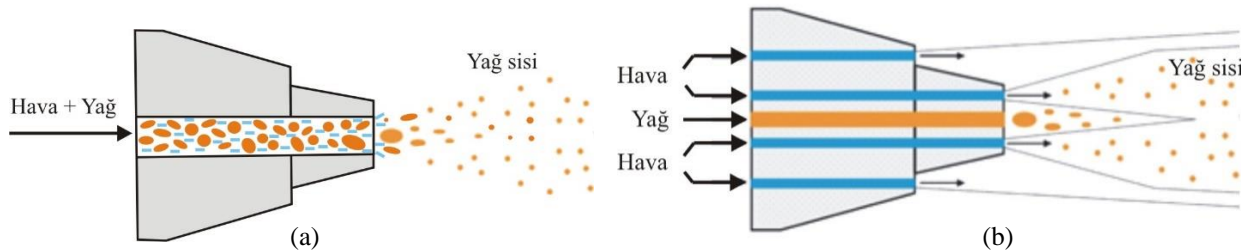
2. MMY TEKNİĞİ VE BU TEKNİKTE NANOAKIŞKAN KULLANILMASI (MQL TECHNIQUE AND USING NANOFLUID IN THIS TECHNIQUE)

2.1. MMY Tekniği (MQL Technique)

MMY tekniği, talaşlı imalatta kesme performansını artırmak amacıyla kesme bölgesine çok küçük miktarlardaki soğutma/yağlama sıvılarının püskürtülmesini kapsayan bir yöntemdir. Bu teknikte, kesme sıvısı olarak bitkisel yağ kullanılan uygulamalar minimum miktarda yağlama (MMY) olarak adlandırılırken, su bazlı kesme sıvısı kullanılan uygulamalar minimum miktarda soğutma (MMS) olarak da adlandırılabilir [17-18].

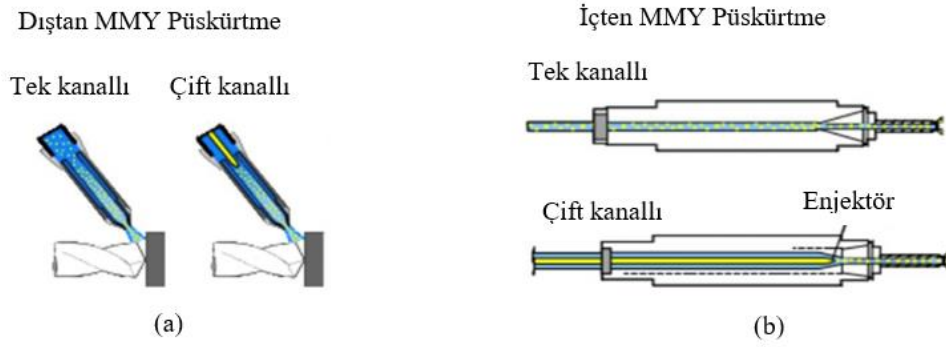
MMY tekniği, geleneksel soğutma yöntemlerine göre kesme sıvısı tüketim maliyetlerinin azaltılması ve çalışanın kesme sıvısına maruz kalması sonucu oluşabilecek potansiyel risklerin önlenmesi amacıyla 1990'ların başında Japonya ve Almanya'da geliştirilmiştir [19]. Bu teknikte az miktarda bitkisel yağ veya su bazlı kesme sıvısıyla oluşturulmuş yağ sisi takım içinden veya dışarıdan uygulanır (Şekil 1). Gerekli sıvı miktarı, uygulamanın ve sıvının çeşidine göre değişmekle birlikte, genellikle saatte 10 ila 150 ml'dir. Teknikteki bu akış hızı sulu kesmeye göre yaklaşık on bin kat daha azdır. Bundan dolayı MMY'de kullanılan kesme sıvısı çok daha az olur. Parça işleme sırasında yağ neredeyse tüketildiği için havaya sis karışmamaktadır. Talaşlar kuruya yakındır ve kolayca geri dönüştürülebilir [19]. Kullanılan kesme yağı ise, işlem esnasında tamamen buharlaştığı için, geri dönüşümü yada atığının yok edilmesi gibi maliyetler söz konusu değildir.

Yağ-hava karışımı dışarıda hazırlanarak püskürtülen sistemlere tek kanallı, yağ ve hava ayrı kanallarla nozul içine veya kesici takım içine getirildikten sonra karıştırılarak püskürtülen sistemlere de çift kanallı denilmektedir [20]. Şekil 1'de bir nozul içinde çift kanallı (a) ve tek kanallı (b) dıştan MMY uygulama görselleri verilmiştir.



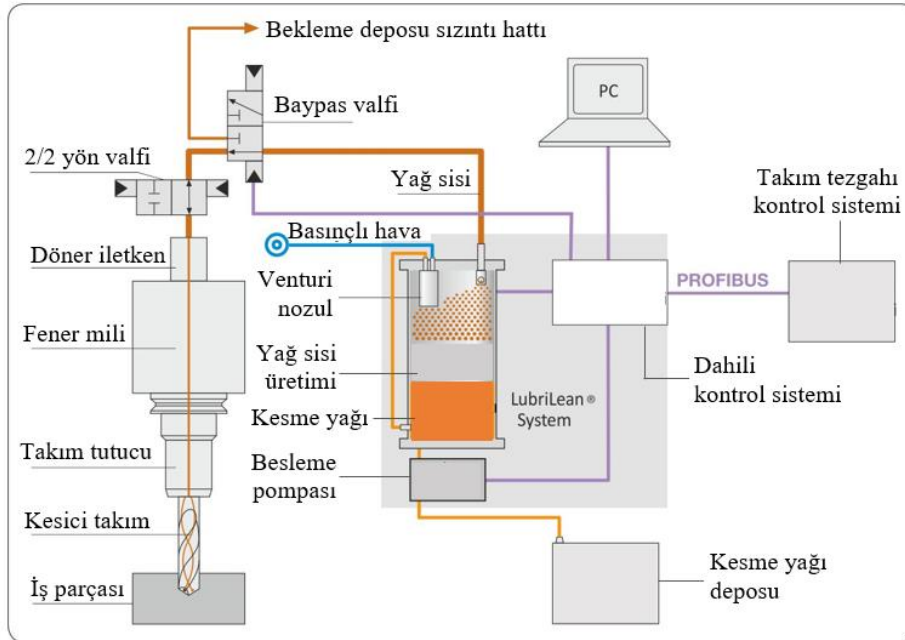
Şekil 1. Tek kanallı (a) ve çift kanallı (b) harici MMY uygulamaları (Single channel (a) and dual channel (b) external MQL applications) [21]

MMY tekniği içten ve dıştan olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilir. İçten MMY sisteminde yağ sisi takım içinden uygulanırken, dıştan MMY sisteminde yağ sisi nozullarla takım dışından uygulanır. İçten MMY sistemleri tek kanallı veya çift kanallı olabildiği gibi dıştan MMY sistemleri de tek kanallı veya çift kanallı olabilir. Şekil 2.a'da dıştan MMY uygulamasında çift kanallı ve tek kanallı uygulama görülmektedir. Şekil 2.b'de ise içten MMY uygulamasında çift kanallı ve tek kanallı uygulama görseli verilmiştir [4].



Şekil 2. MMY tekniğinin dıştan (a) ve içten (b) uygulamalarının şematik gösterimi (Schematic representation of the external (a) and internal (b) applications of the MMY technique) [22]

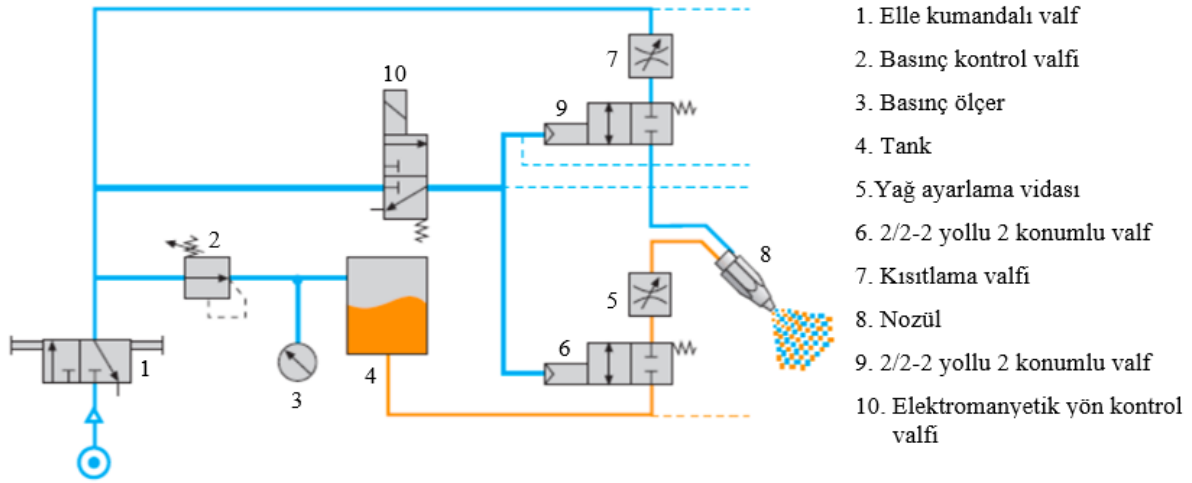
İçten MMY sistemlerinde yağ sisi oluşturmak için özel bir alet kullanılmaktadır. Bu alet sayesinde damlacıkların büyüklüğü 0,3-1 μ m'ye kadar düşürülebilmektedir. Damlacıkların kütleleri ne kadar az olursa ataletleri de o kadar az olur. Yağ sisi bu sayede çok uzak mesafelere taşınabilir. Keskin dönüşler ya da takım içi uygulamalarında yüksek hızda dönen millerden önemli bir değişikliğe uğramadan geçebilir ve istenilen yağlama noktasına ulaştırılır [21]. Şekil 3'te tek kanallı içten MMY sisteminin çalışma şeması görülmektedir.



Şekil 3. Tek kanallı içten MMY sisteminin şeması (Working diagram of single channel internal MQL system) [21]

Sıvının mil ve takım içinden geçtiği içten yağlama uygulamaları uzunluk/çap (l/d) oranının daha büyük olduğu delme, raybalama ve diş açma işlemlerinde faydalıdır. Bu yöntemle takımın pozisyonundan bağımsız olarak püskürtülen sıvı kesme kenarına ulaşır. Derin delik delme işlemlerinde, büyük l/d oranı içten püskürtmeli MMY yöntemini vazgeçilmez hale getirmektedir. Bu yöntemin diğer avantajları ise nozul konumlandırılmadan kaynaklanabilecek hataların önlenmiş olması ve takım içinden püskürtme yapıldığı için işleme alanının besleme borularıyla işgal edilmemiş olmasıdır [23].

Dıştan püskürtmeyi gerektiren uygulamalarda yağ sisi kesici uca dışarıdan bir veya daha fazla nozulla ulaştırılır. Burada nozul sayısı, yönü ve düzeni yöntemin kalitesini belirlemede önemlidir. Bu teknik kesmede, parmak ve alın frezelemede ve tornalamada kullanılmaktadır. Delme, raybalama ve diş açma gibi işlemlerde sadece uzunluk/çap oranı $l/d < 3$ olduğu durumlarda dıştan püskürtme kullanışlıdır [19, 24]. Şekil 4'te çift kanallı dıştan MMY sistemi pnömatik devre şeması verilmiştir.



Şekil 4. Çift kanallı dıştan MMY sistemi pnömatrik devre şeması (Dual channel external MMY system pneumatic circuit diagram) [21]

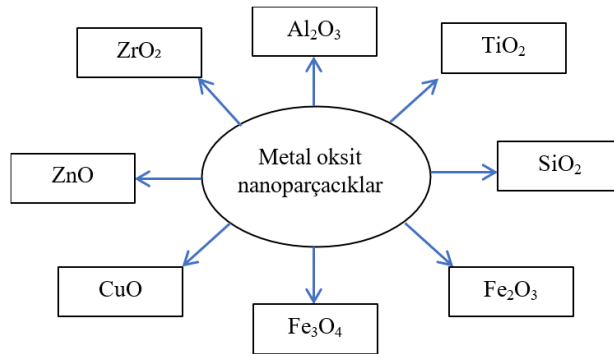
2.2. MMY Tekniğinde Nanoakışkan Kullanılması (Using Nanofluids in MQL Technique)

Nanoparçacık, metal veya metal olmayan malzemelerin fiziksel veya kimyasal yollar ile parçalanarak nanometre boyutuna indirilmesi ile elde edilen parçacıklardır. Malzemenin türüne, ulaşılmak istenen nanoparçacığın şekline ve boyutuna göre kimyasal, elektroliz veya atomizasyon olmak üzere farklı nanoparçacık üretim yöntemleri kullanılabilir. İyi ısı iletim oranları ve düşük maliyetlere sahip metal oksit nanoparçacıkları, nanoakışkan olarak sıkça tercih edilmektedir [25-27]. Şekil 5'te Fe_2O_3 nanoparçacığı ve bu nanoparçacıktan elde edilmiş nanoakışkan görülmektedir.



Şekil 5. Fe_2O_3 nanoparçacığı ile nanoakışkan elde edilmesi (Obtaining nanofluid with Fe_2O_3 nanoparticle) [26]

Fe_2O_3 dışında da çeşitli metal oksit parçacıklar nanoakışkan oluşturmada kullanılmaktadır. Farklı işleme süreçleri için kullanılan çeşitli metal oksit nanoparçacıklar mevcuttur. Bunlar şekil 6'da da verildiği gibi alüminyum oksit (Al_2O_3), titanyum dioksit (TiO_2), silisyum dioksit (SiO_2), demir trioksit (Fe_2O_3), manyetit (Fe_3O_4), bakır oksit (CuO), çinko oksit (ZnO) ve zirkonyum dioksit (ZrO_2)'tir.



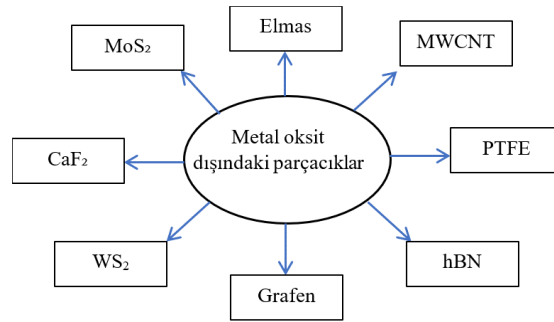
Şekil 6. Nanoakışkan oluşturmada kullanılan çeşitli metaloksit parçacıklar (Various metal oxide particles used to form nanofluids) [28]

Nanoakışkanın performansları büyük ölçüde baz akışkanda karıştırılan nanoparçacıkların termal iletkenliğine ve yoğunluğuna bağlıdır [28]. Tablo 1’de metal oksit nanoparçacıkların termal iletkenlik ve yoğunluk özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Nanoparçacıkların termal iletkenlik ve yoğunluk özellikleri (Thermal conductivity and density properties of nanoparticles) [28]

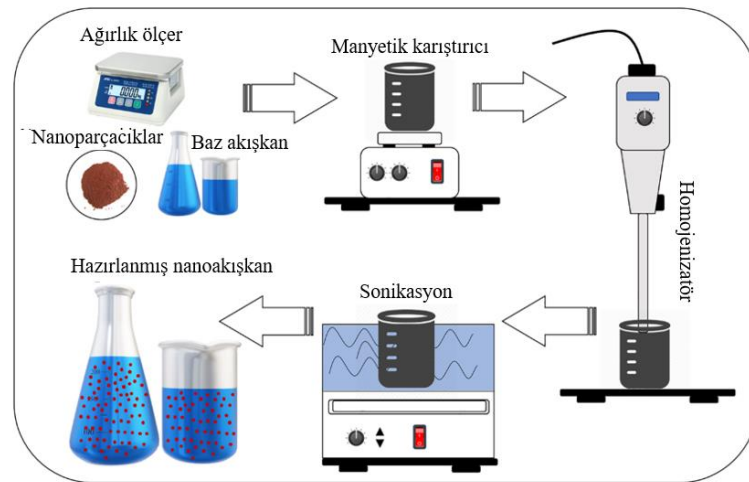
Nanoparçacık	Termal İletkenlik (W/m.K)	Yoğunluk (g/cm ³)
Al ₂ O ₃	40	3.97
TiO ₂	11.7	4.23
SiO ₂	7.6	2.4
Fe ₂ O ₃	7	5.34
Fe ₃ O ₄	17.65	5.18
CuO	29.8	6.5
ZnO	50	5.61
ZrO ₂	2	5.89

Metal oksit dışında da nanoakışkanlar için kullanılan çeşitli nanoparçacıklar vardır. Bunlar şekil 7’de de verildiği gibi çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT), grafen, teflon (PTFE), altıgen bor nitrid (hBN), molibden sülfür (MoS₂), gümüş (Ag), kalsiyum florid (CaF₂), tungsten disülfür (WS₂), elmas olarak sayılabilir. Bu nanoparçacıklardan bazıları (kalsiyum florid, tungsten disülfür vb.) malzeme özelliklerinden dolayı mikro boyutta kullanılabilir.



Şekil 7. Nanoakışkanlarda kullanılan metal oksit dışındaki çeşitli nanoparçacıklar (Various nanoparticles other than metal oxide used in nanofluids) [26]

Metalik ya da metalik olmayan nanoparçacıkların baz akışkanla karıştırılması ile edilen kolloid karışımlara nanoakışkan denilmektedir. Şekil 8’de nanoakışkan hazırlama aşamaları verilmiştir.



Şekil 8. Nanoakışkan hazırlama aşamaları (Nanofluid preparation steps) [26]

Bir nanoakışkan hazırlanırken nanoparçacık, hacim bazlı ya da kütle bazlı olarak kesme sıvısına eklenerek karışım oranı belirlenir. Uygun kesme sıvısına, belirlenen orandaki nanoparçacık eklendikten sonra, öncelikle manyetik karıştırmaya tabi tutulur. Daha sonra homojen bir karışım elde etmek için mekanik karıştırma yapılır. Son aşamada nanoparçacıkların çökmesini engellemek adına karışım ultrasonik karıştırmaya da tabi tutulur. Bu şekilde homojen ve çökmesi geciktirilmiş bir nanoakışkan elde edilir.

MMY sistemlerinde kullanılan nanoakışkanlar işleme performansına olumlu etki yapmaktadır. Nanoparçacıkların yüksek termal iletkenlik özelliği, dahil olduğu kesme sıvısının soğutma etkisini artırmaktadır. Ayrıca nanoparçacık dahil edilen kesme sıvılarının vizikositesi arttığından dolayı daha iyi bir yağlama etkisine sahip olmaktadır. Bunun yanında, kesme sıvısı içerisindeki bu parçacıklar parlatma etkisi göstererek yüzey kalitesini de iyileştirmektedir [27-28]. Nanoakışkanların ısı transfer performansına etkisi ile ilgili yapılan çalışmalarda, takviye edilen nanoparçacık türünün, boyutunun ve hacminin akışkanın ısıl iletkenliğini önemli ölçüde etkilediği ortaya konmuştur [27-30].

Bundan sonraki bölümlerde MMY tekniğinde kesme sıvısı olarak nanoakışkan kullanılan uygulamalar “MMY-nanoakışkan” tekniği olarak ifade edilecektir.

3. TORNALAMA İŞLEMİNDE MMY-NANOAKIŞKAN TEKNİĞİ KULLANILAN ÇALIŞMALAR (STUDIES USING MQL-NANOFLUID TECHNIQUE IN TURNING PROCESS)

3.1. Çelik Alaşımlarının Tornalanmasında MMY-Nanoakışkan Tekniği Kullanılan Çalışmalar (Studies Using MQL-Nanofluid Technique in Turning Steel Alloys)

3.1.1. AISI 304 çelik alaşımların tornalanmasıyla ilgili yapılan çalışmalar (Studies on turning of AISI 304 steel alloys)

AISI 304 çeliğinin (82 HRB sertlik değerinde) karbür kesici uç kullanarak tornalanması üzerine Sodavadia ve Makwana'nın yaptığı çalışmada farklı soğutma şartları, ilerlemeler, kesme hızları ve talaş derinlikleri kullanarak bu değişkenlerin kesme sıcaklığı, takım yan aşınması ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Soğutma uygulaması için nano boyutlardaki borik asit parçacıklarını farklı konsantrasyonlarda hindistan cevizi yağına katarak nanoakışkanlar elde etmişlerdir. Bu nanoakışkanları kullanarak uyguladıkları MMY-nanoakışkan yöntemi ile sade MMY yönteminin işleme performansına etkilerini araştırmışlardır. Deneylerden elde ettikleri sonuçlara göre MMY-nanoakışkan yönteminde işleme performansının daha iyi olduğunu belirlemişlerdir. MMY-nanoakışkanla ilgili en iyi değerleri %0.5 konsantrasyon oranının kullanıldığı şartlarda elde etmişlerdir [31].

R.K. Singh ve arkadaşları da AISI 304 çeliğinin tungsten karbür uç ile tornalanma deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Kesme sıvısı olarak farklı nanoparçacık yüzdelerine sahip su bazlı yağlar kullanmışlardır. Farklı kesme sıvılarına ek olarak kesme hızı, ilerleme ve kesme derinliği değişkenleri ile yapılan deneylerde, bu değişkenlerin kesme sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sonuç olarak yüksek grafen nanoparçacık konsantrasyonunun, yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığının azaltılmasında önemli bir rol oynadığını tespit etmişlerdir. MMY tekniğinde işleme bölgesine nanoakışkanın uygulanmasının yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığını azaltmada etkili olduğunu ortaya koymuşlardır [15].

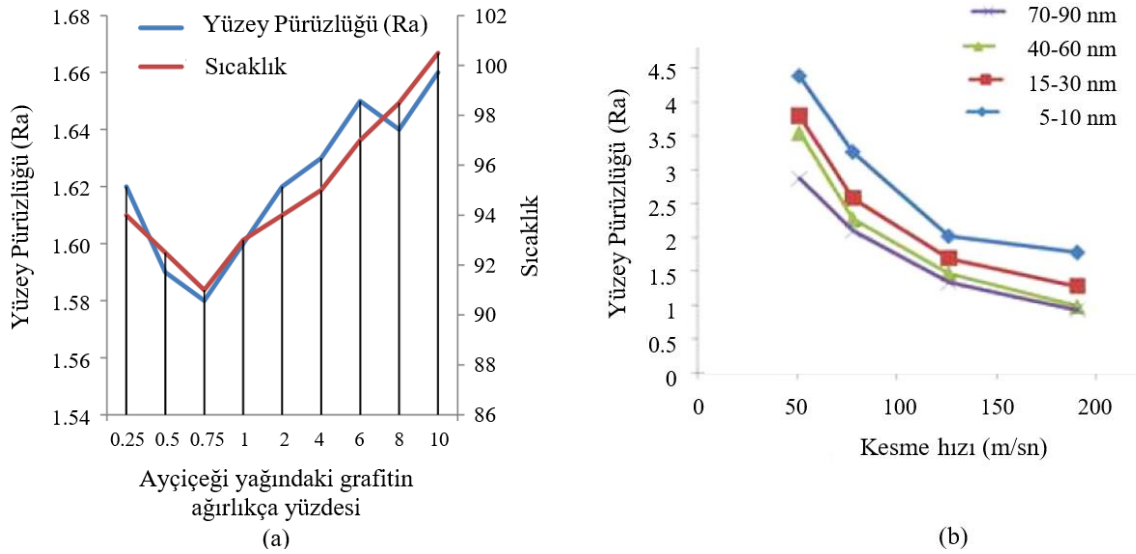
Kumar Sharma ve arkadaşları yine AISI 304 çeliğinin karbür kesici uç ile tornalanmasında kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği ve nanoparçacık yüzdesi değişkenlerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonunda kesme sıvısı olarak nanoakışkan kullanıldığında, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğünde daha düşük değerler gözlemlenmiştir [32]. Singh ve arkadaşları da AISI 304 çeliğinin tornalanmasında uygulanan MMY yönteminde, bu kez hibrit nanoakışkanlar kullanarak deneyler gerçekleştirmişlerdir. Nanoparçacık olarak alümina ve grafenin hibrit nanoakışkan oluşturmada kullanıldığı deneylerde, işleme performansının önemli ölçüde arttığını belirlemişlerdir [33]. AISI 304 alaşımı ile ilgili yapılan çalışmalarda seçilen değişkenlerin ve incelenen kriterlerin rahatlıkla karşılaştırılabilmesi için Tablo 2'de birlikte verilmiştir.

Tablo 2. AISI 304 çelik alaşımların tornalanmasında MMY-nanoakışkan tekniği kullanılan çalışmalar (Studies using MQL-nanofluid technique in turning AISI 304 steel alloys)

Ltr. No	İş Parçası	Kesici Takım	Kesme Sıvısı	Nanoparçacık	Soğutma Yöntemi	İncelenen Çıktılar	Yıl
[31]	AISI 304 Çeliği	Karbür Kesici Uç	Hindistan Cevizi Yağı	Borik Asit (H ₃ BO ₃)	MMY MMY-Nano	Kesme Sıcaklığı Takım Aşınması Yüzey Pürüzlülüğü	2014
[15]	AISI 304 Çeliği	Tungsten Karbür Uç	Su+Servo Kesici yağı	Grafen	MMY-Nano	Kesme Sıcaklığı Yüzey Pürüzlülüğü	2018
[32]	AISI 304 Çeliği	Karbür Kesici Uç	Su+Bitkisel yağ	Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃)	MMY-Nano	Yüzey Pürüzlülüğü Kesme Kuvveti	2020
[33]	AISI 304 Çeliği	Karbür Kesici Uç	Hibrit Kesme sıvısı	Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃) ve Grafen	MMY-Nano	Yüzey Pürüzlülüğü Takım Aşınması Kesme Kuvveti	2017

3.1.2. AISI 1040 çelik alaşımların tornalanmasıyla ilgili yapılan çalışmalar (Studies on turning of AISI 1040 steel alloys)

Krishna ve arkadaşları AISI 1040 çeliğin tornalanmasında kaplamasız karbür kesici uç kullanılarak yaptıkları deneylerde, kesme sıvısı olarak kullandıkları ayçiçek yağına farklı yüzdelerde ve farklı boyutlarda nanoparçacık ekleyerek hazırladıkları nanoakışkanların işleme performansına etkilerini incelemişlerdir. Farklı soğutma şartı, kesme hızı ve kesme derinliği uygulayarak yaptıkları deneylerde, bu kesme parametrelerin işleme performansı olarak belirledikleri takım sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak sabit kesme derinliğinde kesme hızı arttıkça sıcaklığın da artacağı, ayrıca takım sıcaklığının kesme derinliği artışı ile de arttığını gözlemişlerdir. Ayrıca nanoparçacık boyutu arttıkça sıcaklığın düştüğünün altını çizmişlerdir. Şekil 9'da araştırmacıların yaptıkları bu deneylerde kesme sıvısına katılan nanoparçacık miktarının (ağırlıkça yüzdesinin) yüzey kalitesi ve takımda oluşan sıcaklığa etkisi (a) ile nanoparçacık boyutlarının yüzey kalitesi üzerindeki etkisi (b) verilmiştir. Grafik b'deki verilere dayanarak nanoparçacık boyutunun azalmasının yüzey pürüzlülüğünü artırdığını savunmuşlardır. Daha küçük boyutlu nanoparçacıkların takım ucunda birikerek sürtünmenin artmasına sebep olduğunu; sürtünmenin artmasının da hem sıcaklık artışına hem de daha fazla kesme kuvvetine ve buna bağlı olarak takımda daha fazla aşınmaya sebep olduğunu değerlendirmişlerdir. Kesme hızındaki artışın yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiğini yine grafik b'de vurgulamışlardır. Grafik a'da da görüleceği üzere, sıcaklık ve yüzey pürüzlülüğü sonuçlarına göre ayçiçek yağına ağırlıkça katılacak en uygun nanoparçacık oranının %0.75 olduğunu vurgulamışlardır [34].



Şekil 9. Kullanılan nanoparçacık oranına göre yüzey pürüzlülüğü ve sıcaklık sonuçları (a), Kesme hızına göre yüzey kalitesindeki değişim (b) (Surface roughness and temperature results according to the used nanoparticle ratio (a), Change in surface quality with respect to cutting speed (b)) [34]

Prasad, AISI 1040 çeliğini tornalarken iki farklı takım kullanılarak üç farklı akış hızında kuru, normal, MMY ve üç farklı konsantrasyonda grafit nanoparçacık değişkenlerini kullanılarak deneyler yapmıştır. Bu değişkenlerin yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, kesme kuvveti ve kesme sıcaklığına olan etkilerini araştırmıştır. Elde ettiği sonuçlarda MMY işleminin kuru yapılan kesme işlemine göre daha iyi performans sergilediğini görmüştür. Nanografite içerme yüzdesindeki artışın kesme kuvvetleri, kesme sıcaklıkları, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması gibi sonuçlarda akışkanların daha iyi özellikler göstermesini sağladığını ortaya koymuştur. Ayrıca yaptığı deneylerden elde ettiği sonuçlarda daha yüksek akış hızlarının daha iyi performans gösterdiğini tespit etmiştir. Ancak MMY’de uygulanabilecek çok yüksek akış hızları, mikrobiyal etkileşim ve bertaraf sorunları gibi geleneksel soğutmanın dezavantajlarına sebep olabileceğini belirtmiştir. Ayrıca yazara göre, akış hızına karar verirken nanoakışkanların maliyetleri de dikkate alınmalıdır. Yazar deneylerinde 15 ml/dk akış hızında %0.3 nanografite partikül kombinasyonlarının en iyi sonuçları verdiğini ortaya koymuştur [35].

Yine AISI 1040 çelik malzemelerin tornalanması konusunda Pasam ve arkadaşları, elmas kaplamalı tungsten karbür kesici uç kullanarak kuru kesme, MMY-mikroakışkan ve MMY-nanoakışkan uygulamalarını farklı kesme hızlarında tatbik etmişlerdir. Deneyler sonunda bu parametrelerin kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasına olan etkilerini araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlarda nanoakışkanların performansının daha iyi olmasına rağmen, mikroakışkanların daha ekonomik olduğunu belirlemişlerdir [36]. Revuru ve arkadaşları da, AISI 1040 çeliği kullanarak yaptıkları tornalama işleminde mikro ve nano partiküllerin performansını karşılaştırmışlardır. Deneyler sonunda nanoparçacıkların daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemişlerdir [37].

Sharma ve arkadaşları, kaplamasız sementit karbür kesici uç kullanılarak AISI 1040 malzemesine yaptıkları tornalama işleminde kuru, normal, MMY ve MMY-nano (silisyum dioksit) uygulamalarının kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması değerlerine etkisini incelemeyi amaçlamışlardır. Deneyler sonunda nanoparçacıkların kullanıldığı şartlarda çıktı parametreleriyle ilgili daha iyi sonuçlar elde etmişlerdir [38]. AISI 1040 çeliğinin tornalanması ile ilgili yapılan diğer bir çalışmada Padmini ve arkadaşları MMY tekniğinde bitkisel yağ bazlı nanoakışkanların işleme performansı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Hindistancevizi, susam ve kanola yağlarına değişen oranlarda molibden disülfür (MoS_2) nanoparçacıkları karıştırarak elde ettikleri farklı nanoakışkanların işleme performansına etkilerini incelemişlerdir. Deneyler sonunda %0.5CC+nMoS₂'nin tüm yağlayıcı koşullarına kıyasla daha iyi işleme performansı gösterdiğini ortaya koymuşlardır [39].

Sharma ve arkadaşları, AISI 1040 iş parçasının tornalanmasında elde edilen iş parçası yüzey kalitesini incelemişlerdir. Yaptıkları deneyleri farklı kesme hızı, ilerleme, talaş derinliği kullanarak sade MMY ile nanoparçacık takviyeli MMY şartlarında gerçekleştirmişlerdir. Her iki işleme ortamında da işlenmiş iş malzemesinin yüzey pürüzlülüğü için en uygun kesme parametreleri 100 m/dk kesme hızı, 0.1 mm/dev ilerleme ve 0.05 mm kesme derinliği olduğunu belirlemişlerdir. Tungsten disülfür (WS_2) katı yağlayıcı takviyeli MMY tekniğiyle işlemede yüzey kalitesi, sade MMY tekniğine kıyasla %35 daha iyi bir iyileşme gösterdiğini ortaya koymuşlardır [16]. AISI 1040 alaşımı ile ilgili yapılan çalışmalarda seçilen değişkenlerin ve incelenen kriterlerin rahatlıkla karşılaştırılabilmesi için Tablo 3’te birlikte verilmiştir.

Tablo 3. AISI 1040 çelik alaşımların tornalanmasında MMY-nanoakışkan tekniği kullanılan çalışmalar (Studies using MQL-nanofluid technique in turning AISI 1040 steel alloys)

Ltr. No	İş Parçası	Kesici Takım	Kesme Sıvısı	Nanoparçacık	Soğutma Yöntemi	İncelenen Çıktılar	Yıl
[34]	AISI 1040 Çeliği	Kaplamasız Karbür Uç	Ay çiçek yağı	Grafit	MMY-Nano	Takım Sıcaklığı Yüzey Pürüzlüğü Kesme Kuvveti	2019
[35]	AISI 1040 Çeliği	HSS Kesici ve Karbür Kesici Uç	Su + Çözülebilir Yağ	Grafit	Kuru, Geleneksel, MMY ve MMY-nano	Yüzey Pürüzlüğü Takım Aşınması Kesme Kuvveti Kesme Sıcaklığı	2013

[36]	AISI 1040 Çeliği	Elmas Kaplamalı Tungsten Karbür Uç	Hindistan Cevizi Yağı	Borik Asit (H ₃ BO ₃) ve Molibden Disülfür(MoS ₂)	Kuru MMY-Nano MMY-Mikro	Yüzey Pürüzlülüğü Takım Aşınması Kesme Kuvveti Kesme Sıcaklığı	2018
[37]	AISI 1040 Çeliği	Elmas Kaplamalı Karbür Uç	Hindistan Cevizi Yağı	Borik Asit (H ₃ BO ₃) ve Molibden Disülfür(MoS ₂)	MMY-Nano MMY-Mikro	Yüzey Pürüzlülüğü Kesme Kuvveti Kesme Sıcaklığı	2018
[38]	AISI 1040 Çeliği	Kaplamasız Karbür Uç	Su+Bitkisel Yağ	Silisyum Dioksit (SiO ₂)	Kuru, Geleneksel, MMY ve MMY-Nano	Yüzey Pürüzlülüğü Takım Aşınması Talaş morfolojisi Kesme Kuvveti	2017
[39]	AISI 1040 Çeliği	Kaplamalı Karbür Uç	Hindistancevizi (CC), Susam (SS) ve Kanola (CAN) yağları	Molibden Disülfür (MoS ₂)	MMY-Nano	Yüzey Pürüzlülüğü Takım Aşınması Kesme Kuvveti Kesme Sıcaklığı	2016
[16]	Inconel 718 Nikel Alaşımı	Sementit Karbür Uç	Su+Bitkisel Yağ	Titanyum Dioksit (TiO ₂)	Kuru, Geleneksel, MMY ve MMY-Nano	Yüzey Pürüzlülüğü	2016

3.1.3. AISI 1045 çelik alaşımların tormalanmasıyla ilgili yapılan çalışmalar (Studies on turning of AISI 1045 steel alloys)

Talib ve Rahim yaptıkları çalışmada AISI 1045 iş parçasının tormalanmasında kurkas (jatropha) yağı ve sentetik ester kullanılarak kesme kuvveti, kesme sıcaklığı, yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve aşınma mekanizması sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Hekzagonal bor nitrür (hBN) nanoparçacıklar kullanarak yaptıkları işlemde bitkisel yağın sentetik estere göre daha iyi yağlama özelliklerine ve çevresel olarak daha zararsız bir etkiye sahip olduğunu gözlemişlerdir [40].

Su ve arkadaşları, AISI 1045 çeliğini kullanarak yaptıkları tormalama işleminde farklı kesme hızı ve farklı yağlama yöntemleri uygulayarak deneyler gerçekleştirmiş ve bu deneyler neticesinde elde ettikleri takım sıcaklığı ve kesme kuvvetini incelemişlerdir. Deneyler sonunda MMY tekniğinde kullanılan aynı nanoparçacık kütesine sahip grafit-LB2000 nanoakışkan ve grafit-PriEco6000 nanoakışkan karşılaştırıldığında, özellikle yüksek kesme hızlarında, grafit-LB2000 nanoakışkan daha düşük kesme kuvveti ve sıcaklık sergilemiştir [41].

Yine AISI 1045 çeliğinin tormalanması konusunda bir diğer çalışmayı Usha ve Srinivasa Rao yapmışlardır. Araştırmacılar yaptıkları bu çalışmada MMY tekniğinde kullandıkları bitkisel yağa Al₂O₃ nanoparçacıkları dahil ederek elde ettikleri nanoakışkanların kesme kuvvetlerine etkilerini incelemişlerdir. MMY akış hızını, nanoparçacıkların hacim konsantrasyonunu, kesme hızını, ilerlemeyi ve kesme derinliğini sürece etkisi incelenecek parametreler olarak belirlemişlerdir. Deneyler sonunda araştırmacılar, kesme kuvvetini etkileyen önemli parametrelerin kesme derinliği, ilerleme ve MMY sisteminin akış hızı ile bağlantılı olduğunu belirtmiştir. Optimum kesme kuvveti değerini, 5 ml/dk akış hızı, %0.6 hacim konsantrasyonu, 120 m/dk kesme hızı, 0.096 mm/dev ilerleme, 0.25 mm kesme derinliğinde gözlemişlerdir [42]. AISI 1045 alaşımı ile ilgili yapılan çalışmalarda seçilen değişkenlerin ve incelenen kriterlerin rahatlıkla karşılaştırılabilmesi için Tablo 4'te birlikte verilmiştir.

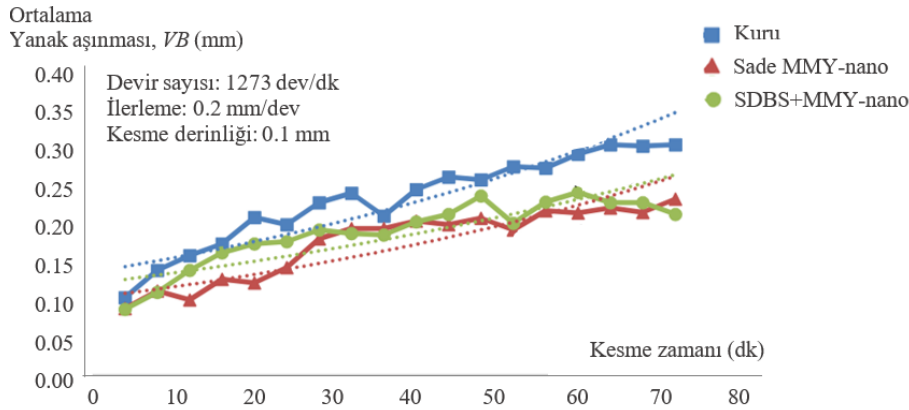
Tablo 4. AISI 1045 çelik alaşımların tormalanmasında MMY-nanoakışkan tekniği kullanılan çalışmalar (Studies using MQL-nanofluid technique in turning AISI 1045 steel alloys)

Ltr. No	İş Parçası	Kesici Takım	Kesme Sıvısı	Nanoparçacık	Soğutma Yöntemi	İncelenen Çıktılar	Yıl
[40]	AISI 1045 Çeliği	Kaplamasız Sermet Uç	Jatropha yağı ve sentetik ester	Hekzagonal bor nitrür (hBN)	MMY ve MMY-Nano	Kesme Kuvveti Kesme Sıcaklığı Yüzey Pürüzlülüğü Takım Ömrü	2018
[41]	AISI 1045 Çeliği	Karbür Kesici Uç	LB2000 ve PriEco6000	Grafit	MMY-Nano	Kesme Kuvveti Kesme Sıcaklığı	2016
[42]	AISI 1045 Çeliği	Tungsten Karbür Uç	Bitkisel yağ,	Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃)	MMY-Nano	Kesme Kuvveti	2020

3.1.4. Diğer çelik alaşımların tormalanmasıyla ilgili yapılan çalışmalar (Studies on turning of other steel alloys)

Kumar ve Krishna yaptıkları çalışmada AISI 1018 çeliğinin tormalanması sürecinde üç farklı oranda hibrit nanoparçacık uyguladıkları MMY tekniği ile kuru işleme sonuçlarını yüzey pürüzlülüğü değerlerini baz alarak karşılaştırmışlardır. Deneyler sonunda kuru işlemeyle kıyasla, hibrit nanoparçacıkların optimum oranının daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemişlerdir. Ayrıca bu yöntemle kesme bölgesinden ısı iletim hızının artırılabilirliği de araştırmacılar tarafından ortaya konmuştur [43].

Khalil ve arkadaşları ise karbür kesici uç kullanarak AISI 1050 çeliğini tormalama işlemine tabi tutmuşlardır. Yapılan bu tormalama deneylerinde farklı yağlama yöntemleri kullanarak bunların takım aşınmasına olan etkilerini incelemişlerdir. Araştırmacılar, çeliğin kuru işlenmesinin en yüksek takım aşınmasına neden olduğunu, nanoparçacık katkılı MMY uygulaması ile takım aşınmasının azaltılabildiğini ve bu şekilde takım ömrünün uzatılabileceğini belirlemişlerdir [44]. Şekil 10'daki grafikte farklı soğutma şartlarında yapılan bu deneylerde kesici takımlarda meydana gelen aşınmaları vermişlerdir. Takım aşınmasının en fazla görüldüğü şartların kuru kesme şartları olduğunu grafiklere dayanarak vurgulamışlardır. Sade MMY-nanoakışkan uygulamasında ise kuru kesmeye göre takım aşınmasında açık bir azalma gözlemişlerdir. Fakat sadece MMY-nanoakışkan uygulamasına kıyasla, sodyum dodesil benzen sülfonat (SDBS) takviyeli MMY-nanoakışkan uygulamasının takım ömrüne net bir katkısı görülemediğinin altını çizmişlerdir. Bu durumun ilave edilen nanoparçacık boyutu ve miktarıyla da ilgili olabileceğini değerlendirmişlerdir.



Şekil 10. Farklı soğutma şartlarının ortalama takım aşınmasına etkileri (Effects of different cooling conditions on average tool wear) [44]

Patole ve Kulkami, AISI 4340 çeliğini kullanarak yaptıkları tormalama işleminde performans değerlendirmesi için girdi parametreleri olarak ilerleme, kesme hızı, kesme derinliği, takım köşe radyüsü ve nanoparçacık fakörlerini kullanmış ve bu girdi parametrelerinin yüzey pürüzlülüğünü ile kesme kuvvetini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Yaptıkları incelemeler sonucunda en düşük yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerinin, takım köşe radyüsü 0,8 mm olduğu şartlarda, kesme hızı ile ilerlemenin en düşük olduğu seviyelerde görüldüğünü belirlemişlerdir. Kesme kuvvetinin en düşük değerini ise, kesme hızının yüksek, ilerlemenin en düşük olduğu ve köşe radyüsünün 0,4 mm olduğu şartlarda tespit etmişlerdir [45].

P. Sharma ve arkadaşları AISI D2 çeliğinin tungsten karbür takımı ile tormalanmasında farklı kesme kesme hızı ve ilerleme parametrelerinde MMY işlemiyle ilgili hava basıncı ve karbon nanotüplerin kullanılmasının yüzey pürüzlülüğü ve kesme sıcaklığına olan etkilerini araştırmışlardır. Deneyler sonunda karbon nanotüplerin kullanılmasının kesme sıcaklığını azalttığını belirlemişlerdir. Buna bağlı olarak nanoakışkan kullanılarak MMY tekniğinin, kesme bölgesi sıcaklığı ve yüzey pürüzlülüğü açısından sade kesme sıvısı kullanan MMY tekniğine göre umut verici sonuçlar verdiğini gözlemişlerdir [46].

Makhesana ve Patel yaptıkları çalışmada EN 31 çeliğinin karbür kesici uç ile tormalanmasında kuru işleme, geleneksel soğutma, farklı konsantrasyonlarda kalsiyum florür (CaF₂) takviye edilen

MMY tekniği ve sade MMY uygulamasının yapıldığı deneylerde yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve kesme sıcaklığını incelemiştir. Deneyler sonunda %15 konsantrasyon ile karıştırılan CaF_2 , mükemmel yağlama özellikleri ve işleme bölgesinde film tabakası oluşturma eğiliminden dolayı yüzey pürüzlülüğü, takım talaş ara yüzey sıcaklığı ve takım yanak aşınmasını azaltarak daha iyi bir performans sergilediğini ortaya koymuşlardır. Daha yüksek konsantrasyon oranı için ise, yağlama maddesinin miktarındaki artışın karışımının genel termal iletkenliğini azalttığını belirlemiştir. Bu durumun daha yüksek takım-talaş ara yüzey sıcaklığına sebep olduğunu ve böylece daha yüksek takım aşınmasının ortaya çıktığını tespit etmişlerdir [47].

Özcan yaptığı çalışmada, MMY yönteminde kesme sıvısına katılan aşındırıcı parçacık miktarının ve kesme hızının yüzey pürüzlülüğünü nasıl etkilediğini tornalama işleminde incelemiştir. Kesme hızı ve soğutma yöntemlerini değişken parametreler olarak kullanmıştır. Deney malzemesi olarak 59HRC sertliğindeki 1,2379 soğuk iş takımı çeliğini seçmiştir. Kesici uç olarak ise CBN kesici uç kullanmıştır. Kesme sıvısına ilave edilen nanoparçacıklar Al_2O_3 olarak belirlemiştir. Deney sonucunda en iyi yüzey kalitesine kesme hızının 160 m/dk ve hacimsel nanoakışkan konsantrasyonunun %4 olarak uygulandığı şartlarda elde edildiğini tespit etmiştir. Farklı parametreler değerlendirildiğinde, kesme hızı ve nanoakışkan konsantrasyonundaki artışın yüzey kalitesini olumlu etkilediğini ortaya koymuştur [48]. Kullanılan çeşitli çelik alaşımları ile ilgili yapılan çalışmalarda seçilen değişkenlerin ve incelenen kriterlerin rahatlıkla karşılaştırılabilmesi için Tablo 5'te birlikte verilmiştir.

Tablo 5. Diğer çelik alaşımların tornalanmasında MMY-nanoakışkan tekniği kullanılan çalışmalar (Studies using MQL-nanofluid technique in turning other steel alloys).

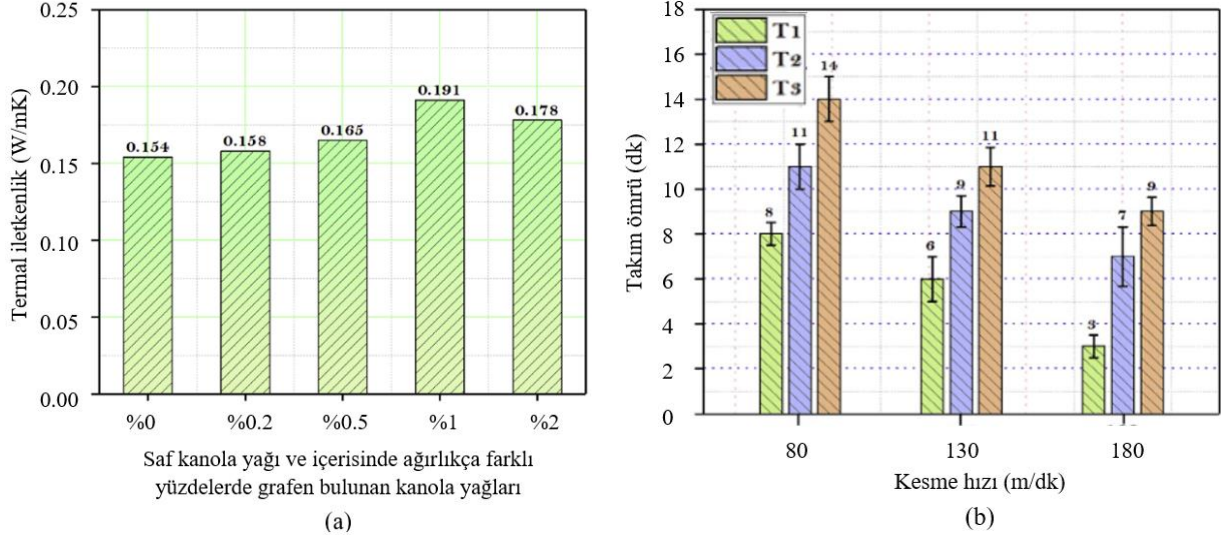
Ltr. No	İş Parçası	Kesici Takım	Kesme Sıvısı	Nanoparçacık	Soğutma Yöntemi	İncelenen Çıktılar	Yıl
[43]	AISI 1018 Çeliği	TiAlN Kaplamalı Karbür Uç	Hibrit Kesme sıvısı	Alüminyum Oksit (Al_2O_3) ve Bakır Oksit	Kuru ve MMY-Nano	Yüzey Pürüzlülüğü Kesme Sıcaklığı	2020
[44]	AISI 1050 Çeliği	Karbür Kesici Uç	Su+Bitkisel Yağ	Alüminyum Oksit (Al_2O_3)	Kuru ve MMY-Nano	Takım Aşınması	2015
[45]	AISI 4340 Çeliği	Tungsten Karbür Uç	Etilen Glikol	Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT)	MMY-Nano	Yüzey Pürüzlülüğü Kesme Kuvveti	2018
[46]	AISI D2 Çeliği	Tungsten Karbür Uç	SAE20W40 Yağ	Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT)	MMY ve MMY-Nano	Kesme Sıcaklığı Yüzey Pürüzlülüğü	2015
[47]	EN 31 Çeliği	Karbür Kesici Uç	Servo kesici Yağ ve SAE 40 Yağ	Kalsiyum florit (CaF_2)	Kuru, Geleneksel MMY ve MMY-nano	Kesme Sıcaklığı Takım Aşınması Yüzey Pürüzlülüğü	2019
[48]	1.2379 Çeliği	CBN Kesici Uç	Belirtilmemiş	Alüminyum Oksit (Al_2O_3)	MMY-Nano	Yüzey Pürüzlülüğü	2019

3.2. Titanyum Alaşımların Tornalanmasında MMY-Nanoakışkan Tekniği Kullanılan Çalışmalar (Studies Using MQL-Nanofluid Technique in Turning Titanium Alloys)

Hegab ve arkadaşları 2018 yılında yaptıkları bir çalışmada Ti-6Al-4V alaşımının kaplamalı karbür kesici uç ile tornalanması işleminde MMY tekniği kullanarak kesme hızı, ilerleme ve nanoparçacık yüzdesi değişkenlerinin takım aşınmasına ve güç tüketimine olan etkilerini araştırmışlardır. MWCNT nanoparçacık takviyeli akışkanın kullanıldığı MMY uygulaması ile nano katkı maddesi olmadan yapılan uygulama (sade MMY) sonuçlarını karşılaştıran araştırmacılar, nanoakışkan takviyesinin takım aşınması ve güç tüketimi açısından daha iyi sonuçlar sunduğunu gözlemişlerdir. Ağırlıkça %4 oranında MWCNT kullanılarak hazırlanan nano akışkanların en düşük takım yan aşınma değerini sunduğunu ortaya koymuşlardır. Güç tüketimi sonuçları açısından

ise %2 oranında MWCNT kullanılarak hazırlanan nano akışkanların % 4 oranında kullanılan nanoakışkana göre daha iyi performans sağladığını belirlemişlerdir [49].

R. Singh ve arkadaşları da Ti-6Al-4V alaşımının tornalanmasında kanola yağı kullanarak kuru (T1), MMY (T2) ve nanoparçacık (grafen) katkılı MMY (T3) yöntemlerinin işleme performansına etkilerini araştırmışlardır. Farklı oranlarda nanoparçacık takviyelerini incelemişler ve en iyi termal iletkenliği %1 nanografen takviyesinde gözlemişlerdir. Şekil 11'de araştırmacıların bu çalışmadan elde ettikleri bazı sonuçlar görülmektedir.



Şekil 11. Nanoparçacık oranına göre ısı iletkenlik (a) ve kesme hızına göre takım ömrü (b) (Thermal conductivity (a) according to nanoparticle ratio and tool life (b) according to cutting speed) [50]

Grafiklerde de görüldüğü üzere, kesme hızının sabit alındığı değerlerde grafen takviyeli MMY deneylerinde takım ömrünün en uzun süreyi verdiğini belirtmişlerdir. Kesme hızı arttıkça takım ömrü süresinin azaldığını vurgulamışlardır. Ayrıca araştırmacılar sürtünme katsayısı değerlerini de incelemiş ve en yüksek değerlerin kuru işlemede, en düşük değerlerin ise grafen katkılı MMY deneylerinde olduğunu saptamışlardır. Hız arttıkça sürtünme katsayısı değerlerinin azaldığını da ortaya koymuşlardır. Kesme hızı arttıkça yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığını, bununla birlikte en düşük yüzey pürüzlülüğü değerlerinin grafen bazlı MMY işleminde olduğunu gözlemişlerdir. MMY ortamında düşük ve orta kesme hızında takıma talaş yapışması gözlemişlerdir. Maksimum kesme hızında kanola yağının buharlaşma oranının sıcaklık arttığı için arttığını ve bunun da takımda aşınmaya sebep olduğunu belirlemişlerdir. Sonuç olarak, araştırmacılar yaptıkları çalışmada nanografen katkılı MMY yönteminin diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini ortaya koymuşlardır [50].

Ti-6Al-4V alaşımının farklı yağlama/soğutma yöntemleri ile tornalanması üzerine bir başka çalışmayı Sartori ve arkadaşları gerçekleştirmiştir. Yaptıkları deneylerde sade MMY uygulamasında, PTFE partikülleri ilave edilmiş MMY uygulamasında ve farklı yüzdelerde grafit ilave edilmiş MMY uygulamasında işlem parametrelerinin takım ömrüne ve yüzey kalitesine olan etkilerini incelemişlerdir. Deneyler sonunda grafit takviyeli soğutma işleminde en iyi sonuçları elde etmişlerdir [51]. Kumar Mishra ve arkadaşlarının da Ti-6Al-4V iş parçası üzerinde yaptığı işlenebilirlik deneylerinde dokulu yüzeylerin işleme performansına etkisini araştırmışlardır. Kaplamsız karbür uçlar kullanarak yaptıkları işlemede kuru, MMY ve alüminyum oksit nanoparçacık takviyeli MMY uygulamalarının kesme kuvvetleri ve takımlardaki aşınma üzerindeki etkilerini karşılaştırmışlardır. Dokulu yüzeylerin MMY sıvısının ısı transferini artırarak olumlu sonuçlar verdiğini gözlemişlerdir [52]. Chaudhari ve arkadaşarı ise farklı oranlarda ve farklı nanoparçacık kullanarak yaptıkları Ti6Al4V ELI alaşımının tornalanması deneylerinde termal iletkenlik ve vizkozite ölçüm değerlerini araştırılmıştır. Bu değerlerdeki değişimin takım ömrü ve yüzey pürüzlülüklerine etkilerini incelemişlerdir. Nanoparçacıkların yüksek termofiziksel özelliklerinden dolayı MMY yöntemi ile birlikte kullanılmasının iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir [53].

Yi ve arkadaşları ise geleneksel soğutma uygulamasında nanoakışkan takviyesinin işleme performansına etkilerini incelemişlerdir. Bu kapsamda Ti-6Al-4V alaşımının tornalarken uygulanan kesme sıvısına takviye edilmiş grafen oksit nanoparçacıkların takım aşınmasına, kesme kuvvetlerine ve titreşimlere etkisini incelemişlerdir. Geleneksel soğutma yöntemi ile yapılan bu deneylerde kesme sıvısına grafen oksit ilavesinin takım aşınması ve kesme kuvvetinde azalışa sebep olduğunu belirlemişlerdir. Nanoparçacık yüzdesindeki artışın daha iyi sonuçlar vermediğini ve optimum oranda kullanılması gerektiğini de tespit etmişlerdir. Kesme esnasında oluşan titreşimin de nanoparçacık kullanımı ile daha iyi değerler ulaştığını saptamışlardır. Bu şekilde sadece MMY tekniğinde değil geleneksel soğutma uygulamalarında da nanoakışkan kullanılabilceğini ortaya koymuşlardır [54]. Titanyum alaşımları ile ilgili yapılan çalışmalarda seçilen değişkenlerin ve incelenen kriterlerin rahatlıkla karşılaştırılabilmesi için Tablo 6’da birlikte verilmiştir.

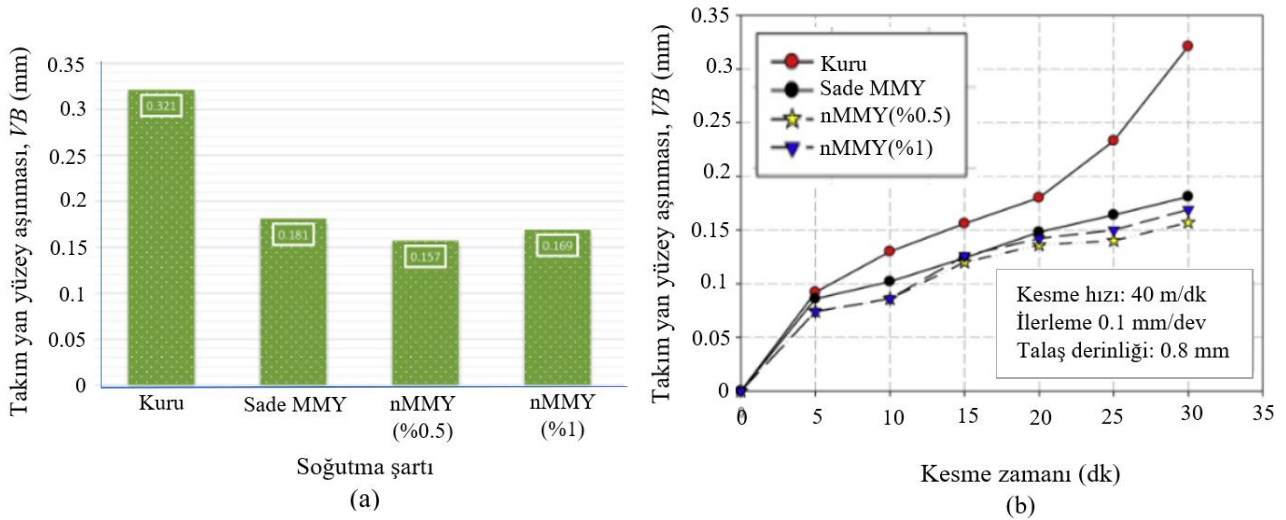
Tablo 6. Titanyum alaşımların tornalanmasında MMY-nanoakışkan tekniği kullanılan çalışmalar (Studies using MQL-nanofluid technique in the turning of titanium alloys)

No	İş parçası	Kesici Takım	Kesme Sıvısı	Nanoparçacık	Soğutma Yöntemi	İncelenen Çıktılar	Yıl
[49]	Ti-6Al-4V Titanyum Alaşımı	Kaplamalı Karbür Uç	ECOLUBRIC E200	Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT)	MMY-Nano	Takım Aşınması Güç Tüketimi	2018
[50]	Ti-6Al-4V Titanyum Alaşımı	Kaplamasız Karbür Uç	Kanola Yağı	Grafen	Kuru, MMY ve MMY-nano	Takım Ömrü Kesme Açısı Yüzey Pürüzlülüğü	2020
[51]	Ti-6Al-4V Titanyum Alaşımı	TiAlN Kaplanmış Tungsten Karbür Uç	Bitkisel Yağ+Su	Grafen ve PTFE (Teflon)	MMY ve MMY-nano	Takım Ömrü Yüzey Pürüzlülüğü	2018
[52]	Ti-6Al-4V Titanyum Alaşımı	Kaplamasız Karbür Uç	Bitkisel Yağ+Su	Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃)	Kuru, MMY ve MMY-nano	Kesme Kuvveti Takım Aşınması	2020
[53]	Ti6Al4V Titanyum Alaşımı	Kaplamasız Karbür Uç	Su bazlı kesme sıvısı	Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃) ve Bakır Oksit (CuO)	MMY-nano	Takım Ömrü Yüzey Pürüzlülüğü	2019
[54]	Ti-6Al-4V Titanyum Alaşımı	PCBN Kesici Takım	Mineral Yağ+Su	Grafen Oksit	Geleneksel	Takım Aşınması Kesme Kuvveti Titreşim	2020

3.3. Nikel Alaşımların Tornalanmasında MMY-Nanoakışkan Tekniği Kullanılan Çalışmalar (Studies Using MQL-Nanofluid Technique in Turning Nickel Alloys)

Kishore Joshi ve arkadaşlarının 2018 yılında yaptıkları bir çalışmada inconel 600 iş parçasının kaplamasız karbür kesici uç ile tornalanması işleminde kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği ve farklı yağlama yöntemleri kullanarak yüzey pürüzlülüğü değerlerini araştırmışlardır. Elde ettikleri sonuçlarda nanoakışkan kullanılarak uygulanan MMY yöntemi ile kesme performansının, ıslak (geleneksel soğutma) işlemeden, kuru işlemeden ve sade MMY ile işlemeden daha iyi olduğunu gözlemişlerdir. Nanoakışkan takviyeli MMY tekniğinde yüzey pürüzlülüğünün, kuru ve bitkisel yağ ile uygulanan MMY tekniğine kıyasla daha iyi olduğunu ortaya koymuşlardır [55].

Yıldırım ve arkadaşları Inconel 625 iş parçasının tornalanmasında kuru, MMY ve hegzagonal bor nitrür nanoparçacık takviyeli MMY tekniği uygulayarak takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması ve takım-talaş arayüz sıcaklığını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarda en uzun takım ömrü, en az takım aşınması, en düşük yüzey pürüzlülük değeri ve kesme sıcaklığı nanoparçacık takviyeli MMY tekniğinde gözlemişlerdir. Nanoparçacık yüzdesinde optimum seviyenin üzerindeki artışın ise, takım ömrü ve yüzey pürüzlülük değerlerinde kötüleşmeye sebep olduğunu belirlemişlerdir [13].



Şekil 12. Farklı soğutma şartlarına göre takım yan yüzey aşınması (a) Kesme zamanı ile yan yüzey aşınması arasındaki ilişki (b) (Tool flank wear according to different cooling conditions (a) Relationship between cutting time and flank wear (b)) [13]

Şekil 12’de araştırmacılar yaptıkları deneyler sonucunda ölçtükleri takım aşınma değerlerini vermişlerdir. Soğutma şartlarına bağlı yanak aşınması değerlerini verdikleri Şekil 12.a grafiğinde en yüksek işleme performansının hacimce %0.5 nanoparçacık takviyeli MMY tekniğinde elde edildiğinin altını çizmişlerdir. Kesme hızıyla birlikte yanak aşınması artsa da, yine de en düşük artışların optimum oran olan %0.5 nanoparçacık takviyesinde gerçekleştiğini Şekil 12.b’de ortaya koymuşlardır.

Anburaj yaptığı çalışmada inconel 718 iş parçasını kuru, normal yağlama, sade MMY tekniği ve iki farklı nanoparçacığın üç farklı konsantrasyonunda MMY tekniğine takviyesiyle elde edilen farklı soğutma şartlarının talaş kalınlığı, yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranına etkisini araştırmak için tornalama deneyleri gerçekleştirmiştir. MMY uygulamasında sodyum dodesil sülfat (SDS) yüzey aktif maddesi kullanmıştır. SDS yüzey aktif maddesi ve Al_2O_3 partiküllerinin MMY uygulamasına eklenmesinin kuru ve sade MMY yöntemine kıyasla işlenebilirliği arttırdığını gözlemiştir. Deneyler sonunda nanoparçacıkların kullanılması ile daha iyi yüzey kalitesi, daha küçük talaş kalınlığı ve daha iyi talaş kaldırma oranının elde edilebileceğini ortaya koymuştur [56]. Yine inconel 718 alaşımının tornalanmasıyla ilgili bir çalışmada Paturi ve arkadaşları kuru, normal, MMY ve MMY-nano (titanyum dioksit) olmak üzere farklı kesme şartları kullanarak, kesme kuvveti, yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması değerleri üzerinde bu kesme şartlarının etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak bu çalışmada da MMY tekniğinde nanoakışkan kullanıldığında diğer soğutma yöntemlerine göre çıktı sonuçlarında daha iyi değerler elde edildiğini ortaya koymuşlardır [57]. Inconel 718 alaşımının tornalanması ile ilgili bir diğer çalışmada Gutnichenko ve arkadaşları kesme kuvveti, takım aşınması, yüzey kalitesi ve titreşim parametrelerini incelemişlerdir. Yaptıkları deneyleri kuru işleme, sade MMY ve grafit nanoparçacık katkı MMY şartlarında gerçekleştirmiş ve elde edilen sonuçları karşılaştırmışlardır. Yaptıkları incelemeler sonucunda grafit nanoparçacık katkı MMY yöntemi ile işlemede daha iyi sonuçlar alındığını görmüşlerdir [58].

Bir başka çalışmada, Sarıkaya ve arkadaşları nikel-cobalt alaşımı olan Haynes 25’in tornalanmasında soğutma şartlarının işleme performansına etkisini araştırmışlardır. Hekzagonal Bor Nitrür (hBN), Molibden Disülfür (MoS_2), Grafit olmak üzere 3 farklı nanoparçacık kullanarak farklı nanoakışkanlar elde etmişlerdir. Bu nanoakışkanları kullanarak uyguladıkları MMY-nano akışkan yöntemlerini sade MMY ve kuru kesme yöntemleri ile kıyaslamışlardır. Deneyler sonunda en iyi yüzey kalitesini grafit katkı MMY-nanoakışkan yönteminin uygulandığı şartlarda gözlemişlerdir. En düşük takım aşınmasının ise hBN katkı MMY-nanoakışkan yönteminin uygulandığı şartlarda elde edildiğini vurgulamışlardır. Kuru işlemeye kıyasla kesme bölgesinde ölçülen sıcaklıklardaki azalmanın en çok MoS_2 katkı MMY-nanoakışkan yönteminin uygulandığı şartlarda gerçekleştiğini ortaya koymuşlardır [59]. Nikel alaşımları ile ilgili yapılan çalışmalarda seçilen değişkenlerin ve incelenen kriterlerin rahatlıkla karşılaştırılabilmesi için Tablo 7’de birlikte verilmiştir.

Tablo 7. Nikel alaşımların tornalanmasında MMY-nanoakışkan tekniği kullanılan çalışmalar (Studies using MQL-nanofluid technique in the turning of nickel alloys)

No	İş parçası	Kesici Takım	Kesme Sıvısı	Nanoparçacık	Soğutma Yöntemi	İncelenen Çıktılar	Yıl
[55]	Inconel 600 Nikel Alaşımı	Kaplamasız Karbür Uç	Bitkisel Yağ+Su	Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃)	Kuru, MMY ve MMY-nano	Yüzey Pürüzlülüğü	2018
[13]	Inconel 625 Nikel Alaşımı	TiAlN-TiN Kaplama Karbür Uç	Ester bazlı kesme yağı	Hekzagonal Bor Nitrür (hBN)	Kuru, MMY ve MMY-nano	Takım Ömrü Yüzey Pürüzlülüğü Takım Aşınması Takım Sıcaklığı	2018
[56]	Inconel 718 Nikel Alaşımı	TiN Kaplama Tungsten Karbür Uç	Petrol bazlı kesme yağı	Alüminyum Oksit (Al ₂ O ₃)	Kuru, Geleneksel, MMY ve MMY-nano	Talaş Kalınlığı Yüzey Pürüzlülüğü Talaş Kaldırma Oranı	2016
[57]	Inconel 718 Nikel Alaşımı	Kaplamasız Karbür Uç	Emülsiyon Kesme yağı	Tungsten Disülfür (WS ₂)	MMY ve MMY-nano	Yüzey Pürüzlülüğü	2016
[58]	Inconel 718 Nikel Alaşımı	Kaplamasız Karbür Uç	Bitkisel Yağ (ECOLUBRIC E200L)	Grafit	MMY-nano	Kesme Kuvveti Takım Aşınması Yüzey Pürüzlülüğü Titreşim	2018
[59]	Haynes 25 Kobalt/Nikel Alaşımı	Seramik Uç	Bitkisel Yağ (Belgin Oil Cuttex Syn 5)	Hekzagonal Bor Nitrür (hBN), Molibden Disülfür (MoS ₂), Grafit	Kuru, MMY ve MMY-nano	Kesme Sıcaklığı Takım Aşınması Yüzey Pürüzlülüğü	2021

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, ekonomik ve ekolojik açıdan olumsuz etkilerinden dolayı, talaşlı imalat operasyonlarında kullanılan kesme sıvısı miktarını en aza indiren ve aynı zamanda işleme performansını da koruyan soğutma/yağlama yöntemleri incelenmiştir. Bu kapsamda tornalama işlemlerinde uygulanan MMY yönteminin ve bu yöntemde kesme sıvısı olarak kullanılan nanoakışkanların işleme performansına etkisi üzerine yapılan çalışmalar derinlemesine incelenmiştir. Farklı iş parçalarının tornalanması sürecinde, MMY-nanoakışkan uygulamalarının sürece katkısı ayrıntılı olarak araştırılmıştır. Özellikle işleme zorluğu çekilen çelik alaşımları, titanyum alaşımları ve nikel alaşımları seçilerek bu malzeme grupları için üç ana başlıkta incelemeler yapılmıştır. Bu incelemeler sonunda her bir malzeme grubu için MMY yönteminde nasıl stratejiler denendiği, hangi nanoakışkanların ne şekilde kullanıldığı ve işlem sonunda sürece etkileri aşağıda verilmiştir.

- ✓ Deneylerde kesme sıvısı olarak sentetik, yarı sentetik ve mineral yağlar, yağ su çözeltileri ve özellikle de insan sağlığına ve çevreye zararı en az olan bitkisel yağlar kullanılmıştır. Bitkisel yağlar içerisinde ise ay çiçek yağı, hindistan yağı ve kanola yağı araştırmacıların üzerinde en çok çalıştığı yağ türleri olmuştur. Deneylerde birden fazla çeşit kesme sıvısı birleştirilerek hibrit kesme sıvılarıyla da araştırmalar yapılmıştır.
- ✓ Kullanılan sade MMY yöntemlerinde yağ çeşidinden başka; farklı debi, basınç, nozul mesafesi ve takıma göre açılma konum da incelenen parametreler arasında olmuştur.
- ✓ Ayrıca farklı kesme hızı ilerleme ve talaş derinliğinin işleme performansına etkisi de yapılan deneylerde incelenmiştir.
- ✓ Nanoakışkan oluştururken çok çeşitli nanomalzemeler üzerinde çalışılmıştır. Bunlar Silisyum Dioksit (SiO₂), Titanyum Dioksit (TiO₂), Alüminyum Oksit (Al₂O₃), Bakır Oksit (CuO), Borik Asit (H₃BO₃), Kalsiyum florit (CaF₂), Molibden Disülfür (MoS₂), Tungsten Disülfür (WS₂), Hekzagonal bor nitrür (hBN), Grafit, Çok duvarlı karbon nanotüpler (MWCNT) ve Teflon (PTFE) olarak sıralanabilir. İncelenen araştırmalar arasında Alüminyum Oksit ve Grafit nanoparçacıklarla yapılan çalışmaların sayısının diğerlerinden fazla olduğu gözlenmiştir. Birden fazla tür nanoparçacık dahil edilerek oluşturulan hibrit nanoakışkanlarla da deneyler gerçekleştirilmiştir.

- ✓ Nanoakışkan oluşturulurken parçacıklar kesme sıvısına hacimce veya kütlece belli bir oranda dahil edilmiştir. Kesme sıvısına dahil edilen nanoparçacıkların farklı oranlarının etkisi karşılaştırılmıştır.
- ✓ Nanoakışkan oluşturulurken parçacıkların boyutlarına da bakılmıştır. 10 nm - 150 nm arasında değişen boyutların performans etkileri incelenmiştir.
- ✓ Oluşturulan farklı nanoakışkanların termal iletkenlikleri ve vizikositeleri ölçülerek bu değerler de karşılaştırılmıştır.
- ✓ Çalışmalarda MMY yönteminde nanoakışkan kullanımının farklı şartları karşılaştırıldığı gibi, bu yöntemden elde edilen sonuçlar kuru işleme, sade MMY, ıslak işleme (geleneksel soğutma) sonuçlarıyla da karşılaştırılmıştır
- ✓ Deneylerde işlenen yüzeyin pürüzlüğü, takım aşınması, kesme bölgesinde oluşan sıcaklık, takıma etkiyen kesme kuvvetleri, titreşimler, talaş kaldırma oranı ve kesme açısı performans kriteri olarak incelenen parametrelerdir.

İncelenen çalışmalarda gözlenen sonuçlar dikkate alınarak aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

- ✓ İşlenen tüm malzemelerde ve tüm kesme sıvılarında MMY sistemlerinde kullanılan nanoakışkanların işleme performansına belirgin şekilde olumlu etki yaptığı gözlenmiştir. Özellikle kuru işleme ve sade MMY yöntemine göre MMY-nanoakışkan uygulamalarında dahi iyi yüzey kaliteleri, daha düşük takım aşınmaları, kesme bölgesinde daha düşük sıcaklıklar gözlenmiştir.
- ✓ Kullanılan bitkisel kesme sıvıları yanma noktaları göreceli düşük olduğu için yüksek kesme hızlarında yeterli verimi vermese de, orta ve düşük kesme hızlarında kullanılabilmesi yapılan çalışmalarda ortaya konmuştur. Çevre dostu olan bu kesme sıvılarına nanoparçacık ve yüzey aktif madde (ör. SDS) gibi katkıların bu kesme sıvılarının performansını artırdığı gözlenmiştir.
- ✓ Nanoparçacıkların termal iletkenliği oluşturduğu nanoakışkanın özelliğini de etkilemiştir. Termal iletkenliği yüksek olan nanomalzemeler (ör. Al_2O_3) kesme bölgesindeki ıstıyı düşürmede, dolayısıyla takım aşınmalarını azaltmada etkili olmuştur. Kesme sıvılarına dahil edilen nanoparçacıklar kesme sıvısının vizikositesini de yükselterek yağlama özelliğini iyileştirmiştir. Bunun yanında kesme sıvısı içerisindeki bu parçacıklar, parlatma etkisi göstererek yüzey kalitesini de iyileştirdiği gözlenmiştir.
- ✓ Yapılan çalışmalarda kesme sıvısına hacimce ya da ağırlıkça farklı miktarlarda dahil edilen nanoparçacıkların etkisi incelendiğinde; belli bir oranın altındaki miktarlar ısı iletimini ve vizikositeyi yeterince iyileştirememiştir. Belli bir oranın üstündeki miktarlar ise nanoakışkanın kesme bölgesine ulaşabilmesiyle ilgili püskürtme özelliğini kötüleştirmiştir. Ayrıca katı kalıntı miktarındaki aşırı artışın takım aşınmalarını olumsuz etkileyebildiği, bunun için optimum nanoparçacık oranlarının tercih edilmesi gerektiği ortaya konmuştur.
- ✓ Çalışmalarda kullanılan aynı tür parçacıklar için farklı boyutların performans etkisi de irdelenmiştir. Genel olarak performans iyileştirmede mikro boyutlardaki parçacıkların nano boyutlardaki parçacıklar kadar etkili olmadığı gözlenmiştir. Bunun yanında aşırı küçük nano boyutların da (10 nm) takım kesici kenarlarında birikme yaparak aşınmaları tetikleyebildiği belirlenmiştir.

Özet olarak, bu çalışmada MMY-nanoakışkan yönteminin işleme performansına olumlu etkisi, bu yöntemle ilgili tribolojik ve ısı transfer mekanizmalarıyla ilişkilendirilerek değerlendirilmiştir. Ayrıca bu çalışma, soğutma yöntemleri konusunda MMY-nanoakışkan yönteminin tatbikiyle, geleceğe yönelik sürdürülebilir yaklaşımların uygulamasının mümkün olabileceğini ortaya koymuştur. Bu şekilde daha ekonomik ve çevre dostu bir üretim süreci için sanayilerde bu konuda yönlendirmeler yapılabileceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR(REFERENCES)

1. M. Akkurt, Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları, Birsan Yayınevi, 23-90, 117-181, Ankara, 1998.
2. N. Tosun, C. Kuru, E. Altıntaş ve E.O. Erdin, Hava ve geleneksel soğutma yöntemi ile frezelemede yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25(1): 141-146, 2010.
3. N.R. Dhar, N.T. Ahmed, S. Islam, An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 748-753, 2007.
4. A. Çakır, AA 7075 ve AA 2024 Alüminyum malzemelerin delinmesinde soğutma koşullarının kesme performansına etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2015.
5. R. Autret, S.Y. Liang, Minimum quantity lubrication in finish hard turning, <http://hardingeus.com/usr/pdf/hardturn/LIANG3.PDF>, 2003
6. E. Yücel, M. Günay, M. Ayyıldız, Ö. Erkan ve F. Kara, (t.y.), Talaşlı imalatta kullanılan kesme sıvılarının insan sağlığına etkileri ve sürdürülebilir kullanımı, 6th International Advanced Technologies Symposium, 16-18 Mayıs 2011, Elazığ.
7. N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, M. Ahmed, 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, 2006.
8. K. Holmes, Minimum quantity lubrication (MQL) is a key technology to lower manufacturing costs for automotive, aerospace, defense and other industries, Manufacturing Business and Technology Forum, Dearborn, MI. 2008.
9. M.K. Gupta, M. Mia, C.I. Pruncu, W. Kapłonek, K. Nadolny, K. Patra, T. Mikolajczyk, D.Y. Pimenov, M. Sarikaya, V.S. Sharma, Parametric optimization and process capability analysis for machining of nickel-based super alloy, The International Journal Advance Manufacturing Technology, 102: 3995–4009, 2019.
10. B.K. Sato, A.R. de Sales, J.C. Lopes, L.E. de AS, H.J. de Mello, P.R. de Aguiar, E.C. Bianchi, Influence of water in the MQL technique in the grinding of steel AISI 4340 using CBN wheels, REM – International Engineering Journal 71(3):391–396, 2018.
11. R.L. Rodriguez, J.C. Lopes, S.D. Mancini, L.E. de Ângelo Sanchez, F.M.F. de Almeida Varasquim, R.S. Volpato, H.J. de Mello, P.R. de Aguiar, E.C. Bianchi, Contribution for minimization the usage of cutting fluids in CFRP grinding, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 103: 487–497, 2019.
12. S. Pervaiz, S. Kannan, H.A. Kishawy, An extensive review of the water consumption and cutting fluid based sustainability concerns in the metal cutting sector, Journal of Cleaner Production, 197: 134–153, 2018.
13. Ç.V. Yıldırım, M. Sarikaya, T. Kıvak, Ş. Şirin, The effect of addition of Hbn nano particles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625, Tribology International, 134:443–456, 2019.
14. K. Venkatesan, A.T. Mathew, S. Devendiran, N.M. Ghazaly, S. Sanjith, R. Raghul, Machinability study and multi-response optimization of cutting force, Surface roughness and toolwear on CNC turned Inconel 617 super alloy using Al₂O₃ Nanofluids in Coconutoil, Procedia Manufacturing, 30:396–403, 2019.
15. R.K. Singh, A.K. Sharma, Bishwajeet, V. Mandal, K. Gaurav, A. Nag, A. Kumar, Influence of graphene-based nanofluid with minimum quantity lubrication on surface roughness and cutting temperature in turning operation, Materials Today: Proceedings, 5(11):24578–24586, 2018.
16. A.K. Sharma, A.K. Tiwari, R.K. Singh, A.R. Dixit, Tribological investigation of TiO₂ nanoparticle based cutting fluid in machining under minimum quantity lubrication (MQL), Materials Today: Proceedings, 3(6):2155–2162, 2016.
17. Park, Kyung-Hee, Gi-Dong Yang, ve Dong Yoon Lee, Tool wear analysis on coated and uncoated carbide tools in inconel machining, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 16 (7): 1639–45, 2015.
18. A. Çakır, S. Yağmur, U. Şeker, Farklı şartlarda uygulanan minimum miktarda soğutma yönteminin AA2024 alüminyum alaşımının tornalanması sürecine olan etkisinin deneysel olarak incelenmesi, 7th International Advanced Technologies Symposium, (IATS'13), 30 Ekim-3 Kasım 2013, İstanbul.

19. D.A. Stephenson, J.S. Agapiou, *Metal Cutting Theory and Practice*, (3rd ed.), 783-825, Taylor & Francis, New York, 2016
20. S. Suzuki, Developments in oil supplying systems for MQL cutting, *Journal of Japanese Society of Tribologists*, 47, 538-543, 2002.
21. Url-1 <http://www.skf.com>, alındığı tarih: 02.01.2012.
22. F. Klocke, K. Gerschwiler, Minimal mengens chmierung – Systeme, Medien, Einsatz beispiele und ökonomische Aspekte der Trocken bearbeitung, *Trocken bearbeitung von Metallen*, Proc. of the VDI-Seminar, Stuttgart, March 18: 2.1-2.20.
23. ASTM E1687-95: Determining carcinogenic potential of virgin base oils in metal working fluids, American society for testing and materials, Philadelphia, PA, 1997.
24. U. Akben, Minimum miktarda yağlama (MMY) ile kesmenin takım aşınması ve yüzey pürüzlüğüne etkilerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2009.
25. Y. Xuan, Q. Li, Heat transfer enhancement of nanofluids, *International Journal Of Heat And Fluid Flow*, 21(1): 58-64. 2000.
26. H. Babar, H.M. Ali, Airfoil shaped pin-fin heat sink: Potential evaluation of ferric oxide and titania nanofluids, *Journal of Energy Conversion and Management*, 202, 112194, 2019.
27. P. Lee, J.S. Nam, C. Li, S.W. Lee, An experimental study on micro- grinding process with nanofluid minimum quantity lubrication (MQL), *International Journal Of Precision Engineering And Manufacturing*, 13(3): 331-338, 2011.
28. S. Khatai, R. Kumar, A.K. Sahoo, A. Panda, D. Das, Metal-oxide based nanofluid application in turning and grinding processes: A comprehensive view, *Materialstoday: Proceedings*, 26(2): 1707-1713, 2020.
29. Y. Xuan, Q. Li, Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, 125(1): 151–155, 2003.
30. S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, Enhanced thermal conductivity of TiO₂ - Water based nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, 44(4): 367–373, 2005.
31. K.P. Sodavadia, A.H. Makwana, Experimental investigation on the performance of coconut oil based nanofluid as lubricants during turning of AISI 304 austenitic stainless steel, *International Journal of Advanced Mechanical Engineering*, 4(1): 55–60, 2014.
32. A. Kumar Sharma, A. Kumar Tiwari, A. Rai Dixit, R. Kumar Singh, Measurement of machining forces and surface roughness in turning of AISI 304 steel using alumina-MWCNT hybrid nanoparticles enriched cutting fluid, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 150, 2020.
33. R.K. Singh, A.K. Sharma, A.R. Dixit, A.K. Tiwari, A. Pramanik, A. Mandal, Performance evaluation of alumina-graphene hybrid nano-cutting fluid in hard turning, *Journal of Cleaner Production*, 162: 830–845, 2017.
34. V. Krishna Kanth, D. Sreeramulu, S. Srikanan, M. Pradeep Kumar, K.E. Jagdeesh, B. Govindh, Experimental investigation of cutting parameter susing nano lubrication on turning AISI 1040 steel, *Materials Today: Proceedings* 18, 2019.
35. M.M.S. Prasad, Performance evaluation of nano graphite inclusions in cutting fluids with MQL technique in turning of AISI 1040 steel, *International Journal of Research in Engineering and Technology*, 02(11): 381–393, 2013.
36. V.K. Pasam, R. Srikant, S. Gugulothu, Comparing the performance & viability of nano and microfluids in minimum quantity lubrication for machining AISI 1040 steel, *Materials Today: Proceedings*, 5(2): 8016–8024, 2018.
37. R.S. Revuru, V.K. Pasam, I. Syed, U.K. Paliwal, Development of finite element based model for performance evaluation of nano cutting fluids in minimum quantity lubrication, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21: 75–85, 2018.
38. A.K. Sharma, A.K. Tiwari, A.R. Dixit, R.K. Singh, Investigation into performance of SiO₂ nanoparticle based cutting fluid in machining process, *Materials Today: Proceedings*, 4(2): 133–141, 2017.
39. R. Padmini, P. Vamsi Krishna, G. Krishna Mohana Rao, Effectiveness of vegetable oil based nanofluids as potential cutting fluids in turning AISI 1040 steel, *Tribology International*, 94: 490–501, 2016.
40. N. Talib, E.A. Rahim, Tribology International Performance of modified jatropha oil in combination with hexagonal boron nitride particles as a bio-based lubricant for green machining, *Tribology International*, 118: 89–104. 2018.
41. Y. Su, L. Gong, B. Li, Z. Liu, D. Chen, Performance evaluation of nanofluid MQL with vegetable-based oil and ester oil as base fluids in turning, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*,

- 83(9–12): 2083–2089, 2016.
42. M. Usha, G. Srinivasa Rao, Optimisation of parameters in turning using herbal based nano cutting fluid with MQL. *Materials Today: Proceedings*, 22: 1535–1544, 2020
 43. S.M. Kumar V.M. Krishna, An investigation on turning AISI 1018 steel with hybrid biodegradable nanofluid / MQL incorporated with combinations of, *Materials Today: Proceedings*, 24: 1577–1584, 2020.
 44. A.N.M. Khalil, M.A.M. Ali, A.I. Azmi, Effect of Al₂O₃ nanolubricant with SDBS on tool wear during turning process of AISI 1050 with minimal quantity lubricant, *Procedia Manufacturing*, 2: 130–134, 2015.
 45. P.B. Patole, V.V. Kulkarni, Optimization of Process parameters based on surface roughness and cutting force in MQL turning of AISI 4340 using nanofluid, *Materials Today: Proceedings*, 5(1): 104–112, 2018.
 46. P. Sharma, B.S. Sidhu, J. Sharma, Investigation of effects of nanofluids on turning of AISI D2 steel using minimum quantity lubrication, *Journal of Cleaner Production*, 108: 72–79, 2015.
 47. M.A. Makhesana, K.M. Patel, Performance assessment of CaF₂ solid lubricant assisted minimum quantity lubrication in turning, *Procedia Manufacturing*, 33: 43–50, 2019.
 48. A.E. Özcan, M. Ay, A. Etyemez, Nano-akışkan aşındırıcı toz miktarının yüzey kalitesine etkilerinin incelenmesi, *International Periodical of Recent Technologies in Applied Engineering*, 1:1-8, 2019.
 49. H. Hegab, U. Umer, I. Deiab, H. Kishawy, Performance evaluation of Ti–6Al–4V machining using nano-cutting fluids under minimum quantity lubrication, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 95(9–12): 4229–4241, 2018.
 50. R. Singh, J.S. Dureja, M. Dogra, M.K. Gupta, M. Mia, Q. Song, Wear behavior of textured tools under graphene-assisted minimum quantity lubrication system in machining Ti-6Al-4V alloy, *Tribology International*, 145,106183, 2020.
 51. S. Sartori, A. Ghiotti, S. Bruschi, Solid lubricant-assisted minimum quantity lubrication and cooling strategies to improve Ti6Al4V machinability in finishing turning, *Tribology International*, 118: 287–294, 2018.
 52. S. Kumar Mishra, S. Ghosh, S. Aravindan, Machining performance evaluation of Ti6Al4V alloy with laser textured tools under MQL and nano-MQL environments, *Journal of Manufacturing Processes*, 53: 174–189, 2020.
 53. S.S. Chaudhari, R.R. Chakule, P.S. Talmale, Experimental study of heat transfer characteristics of Al₂O₃ and CuO nanofluids for machining application, *Materials Today: Proceedings*, 18: 788–797, 2019.
 54. S. Yi, J. Li, J. Zhu, X. Wang, J. Mo, S. Ding, Investigation of machining Ti-6Al-4V with graphene oxide nanofluids: Tool wear, cutting forces and cutting vibration, *Journal of Manufacturing Processes*, 49: 35–49, 2020.
 55. K. Kishore Joshi, R.K. Behera, Anurag, Effect of minimum quantity lubrication with Al₂O₃ nanofluid on surface roughness and its prediction using hybrid fuzzy controller in turning operation of Inconel 600, *Materials Today: Proceedings*, 5(9): 20660–20668, 2018.
 56. R. Anburaj, a study of minimum quantity lubrication with nano cutting fluid on surface roughness and chip thickness in turning Inconel 718, *International Journal on Recent Researches In Science, Engineering & Technology*, 5(1): 0–5, 2016.
 57. U.M.R. Paturi, Y.R. Maddu, R.R. Maruri, S.K.R. Narala, Measurement and analysis of surface roughness in WS₂ solid lubricant assisted minimum quantity lubrication (MQL) turning of Inconel 718, *Procedia CIRP*, 40: 138–143, 2016.
 58. O. Gutnichenko, V. Bushlya, S. Bihagen, J.E. Ståhl, Influence of GnP additive to vegetable oil on machining performance when MQL-assisted turning Alloy 718, *Procedia Manufacturing*, 25: 330–337, 2018.
 59. M. Sarıkaya, Ş. Şirin, Ç.V. Yıldırım, T. Kıvak, M.G. Gupta, Performance evaluation of whisker-reinforced ceramic tools under nano-sized solid lubricants assisted MQL turning of Co-based Haynes 25 superalloy, *Ceramics International*, 47(11): 15542-15560, 2021.