

T.C.  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

PASLANMAZ ÇELİĞİN NANOAKIŞKAN KULLANILAN MİNİMUM  
MİKTARDA YAĞLAMA YÖNTEMİYLE SÜRDÜRÜLEBİLİR  
TORNALANMASI

EMİRHAN SAATÇI

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı  
İmal Usulleri Programı

Danışman  
Doç. Dr. Alper UYSAL

Ocak, 2022

T.C  
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**PASLANMAZ ÇELİĞİN NANOAKIŞKAN KULLANILAN MİNİMUM  
MİKTARDA YAĞLAMA YÖNTEMİYLE SÜRDÜRÜLEBİLİR  
TORNALANMASI**

Emirhan Saatçi tarafından hazırlanan tez çalışması 01.02.2022 tarihinden aşağıdaki  
jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği  
Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Alper UYSAL  
Yıldız Teknik Üniversitesi  
Danışman

**Jüri Üyeleri**

Doç. Dr. Alper UYSAL

Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Orhan ÇAKIR

Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ali Taner KUZU

Işık Üniversitesi

---

---

---

Danışmanım Doç. Dr Alper UYSAL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Paslanmaz Çeliğin Nanoakışkan Kullanılan Minimum Miktarda Yağlama Yöntemiyle Sürdürülebilir Tornalanması" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Emirhan SAATÇİ

İmza

## TEŞEKKÜR

---

Yüksek lisans tez fikrimin oluşturulmasında ve neticelendirilmesinde benden hiçbir türlü desteğini esirgemeyen Sayın Doç. Dr. Alper Uysal'a; deneysel çalışmalardan önce gerekli satın almaların yapılmasında, deney numunelerinin ve aparatlarının hazırlanmasında bana her türlü desteği veren Keskinler Kalıp San. ve Tic. Ltd. Şti'ye, Osmanoğlu Kalıp San ve Tic. Ltd. Şti'ye ve Özmet Makina San. ve Tic. Ltd. Şti'ye ve yaşam boyu bana sürekli destek olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Emirhan SAATÇI

# İÇİNDEKİLER

---

<b>SİMGE LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>KISALTMA LİSTESİ</b>	<b>viii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>xi</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>x</b>
<b>ÖZET</b>	<b>xi</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xiii</b>
<b>1 GİRİŞ</b>	<b>1</b>
1.1 Literatür Özeti .....	1
1.2 Tezin Amacı.....	14
1.3 Hipotez.....	14
<b>2 DENEYSEL ÇALIŞMA</b>	<b>16</b>
2.1 Malzeme.....	16
2.2 Deneyleerde Kullanılan Tezgah, Cihaz ve Ekipman .....	18
2.3 Nanoakışkanların Hazırlanması .....	21
2.4 Deneysel Çalışma.....	21
<b>3 SÜRDÜRÜLEBİLİR İNDEKS ÇALIŞMALARI</b>	<b>23</b>
3.1 Karbon Emisyon Miktarının Hesaplanması .....	23
3.1 Toplam Talaşlı İmalat Maliyetinin Hesaplanması.....	27
<b>4 DENEYSEL VE SÜRDÜRÜLEBİLİR İNDEKS SONUÇLARI</b>	<b>30</b>
4.1 Kesme Kuvvetleri .....	30
4.2 Yüzey Pürüzlülüğü.....	30
4.3 Karbon Emisyonu .....	34
4.4 Toplam Talaşlı İmalat Maliyet Sonuçları.....	40
<b>5 GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMİZASYON</b>	<b>44</b>
<b>6 SONUÇLAR VE ÖNERİLER</b>	<b>51</b>
<b>KAYNAKÇA</b>	<b>58</b>
<b>TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR</b>	<b>63</b>

## SİMGE LİSTESİ

---

$Z_3$ :	Birim enerji maliyeti (TL/kWh)
$Z_1$ :	Birim kesici takım maliyeti (TL)
$Z_2$ :	Birim soğutucu-yağlayıcı maliyeti (TL/ml)
$Z_4$ :	Çevreye zarar verme maliyeti (TL/kg)
$D$ :	Deney numunesi çapı (m)
$C_{\text{çevre}}$ :	Ekolojik maliyet (TL)
$CE_{\text{el}}$ :	Elektrik karbon emisyon faktörü (kgCO <sub>2</sub> /kWh)
$CE_{\text{el}}$ :	Elektrik tüketiminden kaynaklanan karbon emisyon miktarı (kgCO <sub>2</sub> /kg)
$C_{\text{enerji}}$ :	Enerji maliyeti (TL)
$Y$ :	Genel gider maliyeti (TL)
$f$ :	İlerleme miktarı (mm/dev)
$E_{\text{ayar}}$ :	İş parçasının ayarlanması için gerekli enerji (kWh)
$P_{\text{ayar}}$ :	İş parçasının ayarlanması için gerekli güç (kW)
$t_{\text{ayar}}$ :	İş parçasının ayarlanması için gerekli süre (h)
$X$ :	İşçilik maliyeti (TL)
$W_{\text{tak}}$ :	Kesici takım kütlesi (kg)
$C_{\text{takım}}$ :	Kesici takım maliyeti (TL)
$CE_{\text{tak}}$ :	Kesici takımdan kaynaklanan karbon emisyon miktarı (kgCO <sub>2</sub> /kg)
$K$ :	Kesici takımın enerji tüketim sabiti (MJ)
$CE_{\text{tak}}$ :	Kesici takımın karbon emisyon faktörü (kgCO <sub>2</sub> /kg)
$a_p$ :	Kesme derinliği (mm)
$V_c$ :	Kesme hızı (m/dak)
$L$ :	Kesme uzunluğu (m)
$R_z$ :	Maksimum ve minimum yüzey pürüzlülük değerleri farkı (μm)
$R_a$ :	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri (μm)
$CE_{\text{tal}}$ :	Paslanmaz çeliğin talaşından kaynaklanan karbon emisyon miktarı (kgCO <sub>2</sub> /kg)

$CEF_{tal}$ :	Paslanmaz çelik malzeme talaşının karbon emisyon faktörü (kgCO <sub>2</sub> /kg)
$CEF_{mal}$ :	Paslanmaz çelik malzemenin karbon emisyon faktörü (kgCO <sub>2</sub> /kg)
$\rho$ :	Paslanmaz çelik malzemenin yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
$CE_{mal}$ :	Paslanmaz çelikten kaynaklanan karbon emisyon miktarı (kgCO <sub>2</sub> /kg)
$Q_{soğ/yağ}$ :	Soğutucu-yağlayıcı debisi (ml/h)
$E_{soğ/yağ}$ :	Soğutucu-yağlayıcı kullanımı için gerekli enerji (kWh)
$P_{soğ/yağ}$ :	Soğutucu-yağlayıcı kullanımı için gerekli güç (kW)
$t_{soğ/yağ}$ :	Soğutucu-yağlayıcı kullanımı süresi (h)
$C_{soğ/yağ}$ :	Soğutucu-yağlayıcı maliyeti (TL)
$CEF_{soğ/yağ}$ :	Soğutucu-yağlayıcıların karbon emisyon faktörü (kgCO <sub>2</sub> /kg)
$t_{takım}$ :	Takım ömrü (h)
$N$ :	Takım tezgahı devri (dev/dak)
$E_{geridönüş}$ :	Takımın geri dönüşü için gerekli enerji (kWh)
$P_{geridönüş}$ :	Takımın geri dönüşü için gerekli güç (kW)
$t_{geridönüş}$ :	Takımın geri dönüşü için gerekli süre (h)
$P_c$ :	Talaş kaldırma işlemi için gerekli güç (kW)
$t_c$ :	Talaş kaldırma süresi (h)
$E_c$ :	Talaş kaldırmak için gerekli enerji (kWh)
$M_{talaş}$ :	Talaş kütlesi (kg)
$C_{talaşlı}$ :	Talaşlı imalat maliyeti (TL)
$CE_{top}$ :	Toplam karbon emisyon miktarı (kgCO <sub>2</sub> /kg)
$C_{top}$ :	Toplam talaşlı imalat maliyeti (TL)
$T_{top}$ :	Toplam talaşlı imalat süresi (h)
$E_{top}$ :	Tüketilen toplam enerji (kWh)
$CE_{yağ}$ :	Yağlayıcı kullanımından kaynaklanan karbon emisyon miktarı (kgCO <sub>2</sub> /kg)

## KISALTMA LİSTESİ

---

AISI:	Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> :	Alüminyum Oksit
Al-GNP:	Alüminyum-Nano Grafen Parçacık
BUE:	Yığıma Ağız
Co:	Kobalt
CO <sub>2</sub> :	Karbon Dioksit
CVD:	Kimyasal Buhar Biriktirme
HRC:	Rockwell Sertlik Değeri
MMY:	Minimum Miktarda Yağlama
MoS <sub>2</sub> :	Molibden Disülfür
MWCNT:	Çok Duvarlı Karbon Nanotüp
PVD:	Fiziksel Buhar Biriktirme
SDS:	Sodyum Dodesil Sülfat
SEM:	Taramalı Elektron Mikroskobu
TiAlN:	Titanyum Alüminyum Nitrür
TiC:	Titanyum Karbür
TiCN:	Titanyum Karbonitrür
TiN:	Titanyum Nitrür
WC:	Tungsten Karbür

## TABLO LİSTESİ

---

<b>Tablo 2.1</b> AISI 310S paslanmaz çeliğin 20 °C deki kimyasal bileşimi .....	16
<b>Tablo 2.2</b> AISI 310S paslanmaz çeliğin 20 °C deki mekanik özellikleri.....	16
<b>Tablo 2.3</b> Mikro yağlama sisteminin özellikleri .....	19
<b>Tablo 2.4</b> Ortogonal tornalama parametreleri.....	22
<b>Tablo 5.1</b> Yağlama koşulları için kukla değişken seviyeleri .....	46
<b>Tablo 5.2</b> TOPSIS yöntemiyle seçilen optimal sonuçlar .....	50



## ŞEKİL LİSTESİ

---

Şekil 1.1 Süper Paslanmaz Çeliğin Yüzey Pürüzlülüğü ve Takım Aşınması.....	4
Şekil 1.2 AISI D2 Çeliğin Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülüğü Sonuçları.....	5
Şekil 1.3 AISI D2 Çeliğin Tornalanmasında Takım Aşınması Sonuçları .....	5
Şekil 1.4 AISI 304 Çeliğin Tornalanmasında Takım Aşınması ve Yüzey Pürüzlülüğü...	8
Şekil 1.5 A286 Süper Alaşımın Tornalanmasında Yüzey Pür. ve Takım Aşınması.....	8
Şekil 1.6 EN8 Çeliğinin Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülük Sonuçları .....	9
Şekil 1.7 AISI 420 Çeliğin Tornalanmasında Yüzey Pürüzlülük Sonuçları .....	10
Şekil 1.8 Ti-6Al-4v Alaşımının Tornalanmasında Kesme Enerjisi ve Takım Aşınması.	12
Şekil 1.9 Sürdürülebilirlik Değerlendirilmesi için Kiviat Diyagramı .....	13
Şekil 2.1 Deney Numunesi Teknik Resim ve Numunesi .....	17
Şekil 2.2 Bağlantı Aparatı Teknik Resmi .....	17
Şekil 2.3 Deneysel Çalışmalar Sırasında Kullanılan Kesici Uçların Takım Tutucu .....	18
Şekil 2.4 Deneyslerde Kullanılan MMY Sistemi .....	18
Şekil 2.5 Deney Düzeneginin İki Boyutlu Çizimi ve Gerçek Görünüşleri .....	20
Şekil 2.6 Deneyslerde Kullanılan Araçlar .....	21
Şekil 4.1 Kesme Hızı 120m/dak için Sonuçları .....	30
Şekil 4.2 Kesme Hızı 170m/dak için Sonuçlar .....	32
Şekil 4.3 Kesme Hızı 220m/dak için Sonuçlar .....	33
Şekil 4.4 Yüzey Pürüzlülük Sonuçları .....	35
Şekil 4.5 Karbon Emisyon Miktarı .....	38
Şekil 4.6 Toplam Talaşlı İmalat Maliyeti .....	41
Şekil 5.1 Pareto Optimal Çözümleri .....	47

## Paslanmaz Çeliğin Nanoakışkan Kullanılan Minimum Miktarda Yağlama Yöntemiyle Sürdürülebilir Tornalanması

Emirhan SAATÇI

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Alper UYSAL

Paslanmaz çelik malzemeler sahip oldukları yüksek çalışma sertleşmesi (pekleşme) ve düşük termal iletkenlik özelliklerinden dolayı talaşlı şekillendirilmesi zor malzemelerdir. Paslanmaz çelik malzemelerin talaşlı imalatı bazı kimyasal kesme sıvılarının kullanımı ile mümkündür fakat bu kimyasal kesme sıvılarının bol miktarda kullanılması hem insan sağlığı hem de çevre açısından olumsuz sonuçlar doğurmakta ve yüksek maliyetleri nedeniyle işlem maliyetlerini yükseltmektedir. Bu çalışmada AISI 310S östenitik paslanmaz çelik malzeme, kuru ve nanoakışkanların kullanıldığı MMY (Minimum Miktarda Yağlama) yağlama yöntemi ile ortogonal tornalanmıştır. Kullanılan nanoakışkanlar, nano grafen ve nano MoS<sub>2</sub> (Molibden Disülfür) parçacıkların ağırlıkça toplam %0,8 oranında ticari bitkisel kesme sıvısına ayrı ayrı ve birlikte ilave edilmesiyle hazırlanmıştır. Ortogonal tornalama deneyleri üç farklı kesme hızı (120 m/dak, 170 m/dak ve 220 m/dak) ve üç farklı ilerleme (0,1 mm/dev, 0,15 mm/dev ve 0,2 mm/dev) değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında kesme kuvvetleri ve işlenen yüzeylerin pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Ayrıca, seçilen koşulların sürdürülebilir indislerden karbon emisyonu ve talaşlı imalat maliyetine etkileri karşılaştırılmıştır. Daha sonra deneysel ve sürdürülebilir indis sonuçları genetik algoritma yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Literatürde paslanmaz çelik malzemelerin nanoakışkan özellikle de hibrit nanoakışkan kullanılan MMY ile

tornalanması ve sonuçların sürdürülebilir indisleri ile birlikte optimize edilmesi konusunda bu şekilde bir çalışma bulunmaktadır.

Deneysel çalışmalar sonucunda, AISI 310S östenitik paslanmaz çelik malzemenin düşük hızlarda tornalanması sırasında küçük ilerlemelerde yüksek yüzey pürüzlülüklerinin kesici takımında oluşan yığılma ağızdan (BUE) kaynaklandığı belirlenmiş, kesme hızının artırılması ile bu etki ortadan kaldırılmıştır. Kesme hızı 170 m/dak ve 220 m/dak seçildiğinde yığılma ağız etkisinin ortadan kaldırılmasıyla beraber düşük ilerlemelerde yüzey pürüzlülüğünün daha iyi olduğu belirlenmiştir. Artan ilerleme değerleriyle birlikte talaş kaldırma kuvvetleri artmakta ve dolayısıyla toplam karbon emisyon miktarları artmaktadır. Yağlama koşulları dikkate alındığında, en iyi sonuçlar nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yönteminde elde edilmiştir. Nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yöntemini sırasıyla; hibrit nanoakışkan kullanılan MMY yöntemi, nano MoS<sub>2</sub> katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yöntemi, sadece bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MMY yöntemi ve kuru kesme takip etmiştir. Yapılan optimizasyon sonucunda en iyi şartlar; 220 m/dak kesme hızında, 0,1-0,14 mm/dev ilerleme değerleri aralığında ve nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yönteminde elde edilmiştir. Sonuç olarak, AISI 310S paslanmaz çelik malzemenin karbür kesici uçlarla sürdürülebilir tornalanmasında; yüksek kesme hızları, düşük ilerleme değerleri ve nanoakışkanların kullanıldığı MMY yöntemi, düşük yüzey pürüzlülüğü, kesme kuvvetleri, karbon emisyonu ve talaşlı imalat maliyeti oluşturduğundan tercih edilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Paslanmaz çelik; Minimum miktarda yağlama; Nanoakışkan; Yüzey pürüzlülüğü; Kesme kuvvetleri; Sürdürülebilir Talaşlı imalat; Karbon emisyon miktarı; Genetik Algoritma

## Sustainable Turning of Stainless Steel By Nanofluid Assisted Minimum Quantity Lubrication

Emirhan SAATÇI

Department of Mechanical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Alper UYSAL

Stainless steel materials are difficult-to-machine materials due to their high work hardening and low thermal conductivity properties. The machining of stainless steel materials is possible with the usage of some chemical cutting fluids, but the abundant use of these chemical cutting fluids has negative consequences for both human health and the environment, and increases the processing costs due to their high costs. In this study, AISI 310S austenitic stainless steel material was orthogonally machined under dry cutting and MQL (Minimum Quantity Lubrication) method using nanofluids. The nanofluids used were prepared by adding nano graphene and nano MoS<sub>2</sub> (Molybdenum Disulfide) particles to the commercial vegetable cutting fluid separately and together at the total of 0.8% by weight. Orthogonal turning experiments were performed at three different cutting speeds (120 m/min, 170 m/min and 220 m/min) and three different feed values (0.1 mm/rev, 0.15 mm/rev and 0.2 mm/rev). During the experiments, the cutting forces and the surface roughness values of the machined surfaces were measured. In addition, the effects of selected conditions on the carbon emissions and machining cost among the sustainable indices were compared. Then, the experimental and sustainable index results were optimized using the genetic algorithm method. In the literature, there is no such a study on MQL turning of stainless steel materials with nanofluid, especially hybrid nanofluid, and optimizing the results with sustainable indices.

As a result of the experimental studies, it was determined that high surface roughness at small feeds during low speed turning of AISI 310S austenitic stainless steel material was caused by the build up edge (BUE) formed on the cutting tool, and this effect was eliminated by increasing the cutting speed. It was obtained that the surface roughness is better at low feed values when the cutting speed was selected as 170 m/min and 220 m/min and the build-up edge effect was avoided. The cutting forces increased with increase of the feed values and therefore the total carbon emissions increased. As considering the lubrication conditions, the best results were obtained by applying MQL method using nano graphene reinforced nanofluid. The MQL method using nano graphene reinforced nanofluid was followed by MQL method using hybrid nanofluid, MQL method using nano MoS<sub>2</sub> reinforced nanofluid, MQL method using only vegetable cutting fluid and dry cutting, respectively. As the result of the optimization; the best condition was obtained as the cutting speed of 220 m/min, feed values of 0.1-0.14 mm/rev and MQL method using nano graphene reinforced nanofluid. Consequently, in sustainable turning of AISI 310S stainless steel material with carbide inserts; high cutting speeds, low feed values and MQL method using nanofluids might be preferred due to presenting low surface roughness, cutting forces, carbon emissions and machining costs.

**Keywords:** Stainless steel; Minimum quantity lubrication; Nanofluid; Surface roughness; Cutting forces; Sustainable machining; Carbon emissions; Genetic algorithm

### 1.1 Literatür Özeti

Paslanmaz çelik malzemeler, 1913 yılında keşfedilmesinden sonraki ilk dönemde, mutfak gereçleri, silah namlusu, kimyasal kaplar ve tanklar vb. yapmak için kullanılmıştır. İlerleyen süreçte paslanmaz çelikleri gerilmeli korozyon çatlamasına karşı yüksek dirençli ve yüksek sıcaklıklarda güçlü hale getirmek için birçok varyant geliştirilmiştir. Arzu edilen özelliklerin bu şekilde artması nedeniyle uygulama alanlarında önemli bir genişleme de olmuştur. Döküm malzeme taşıma ekipmanlarında, otomobil bileşenlerinde, kâğıt imalat endüstrisinde, kimyasal işleme tesisleri için yıkayıcılarda ve ısı eşanjörlerinde, petrol arıtma, kirlilik kontrol ekipmanları, tüketici ürünleri ve deniz endüstrilerinde kullanılmaktadır. Paslanmaz çelik malzemeler, mutfak eşyalarından uzay araçlarına çok geniş bir uygulama alanına sahiptir [1]. İnsanların hayat kalitelerinin artılmasında, teknolojinin gelişmesinde, daha dayanıklı araçların üretilmesinde ve sistemlerin çalışma sınırlarının daha da yukarılara çekilebilmesinde; paslanmaz çelik malzemelerin kullanılması ve performanslarının artırılması gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır. Paslanmaz çelik malzemeler östenitik, ferritik, martenzitik, dubleks ve çökeltmeyle sertleştirilmiş paslanmaz çelikler olmak üzere 5 gruptan oluşmaktadır.

Östenitik paslanmaz çelikler kolay şekillendirilebilmesi ve kaynak yapılabilmesi sebebiyle en yaygın kullanılan paslanmaz çelik türlerindedir. Çok yaygın kullanılmalarına rağmen şekillendirilebilmeleri ve işlenebilmeleri açısından birçok olumsuz özelliğe de sahiptirler. Fakat düşük termal iletkenlik ve yüksek çalışma sertleşmesi (pekleşme) nedeniyle işlenebilirliği düşüktür [2,3]. Düşük termal iletkenlikleri nedeniyle talaş kaldırma işlemleri sırasında yeterli soğutma ve yağlama yapılmazsa bu paslanmaz çeliklerin iç yapılarında ve çıktı ürün kalitelerinde bozulmalar gözlemlenmektedir. Östenitik paslanmaz çelikler, beş paslanmaz çelik ailesinin en büyük hacimlerinde kullanılmış ve yüksek süneklik, yüksek dayanıklılık ve mükemmel korozyon direnci ile karakterize edilmiş olsa da bazı uygulamalarda kullanımının

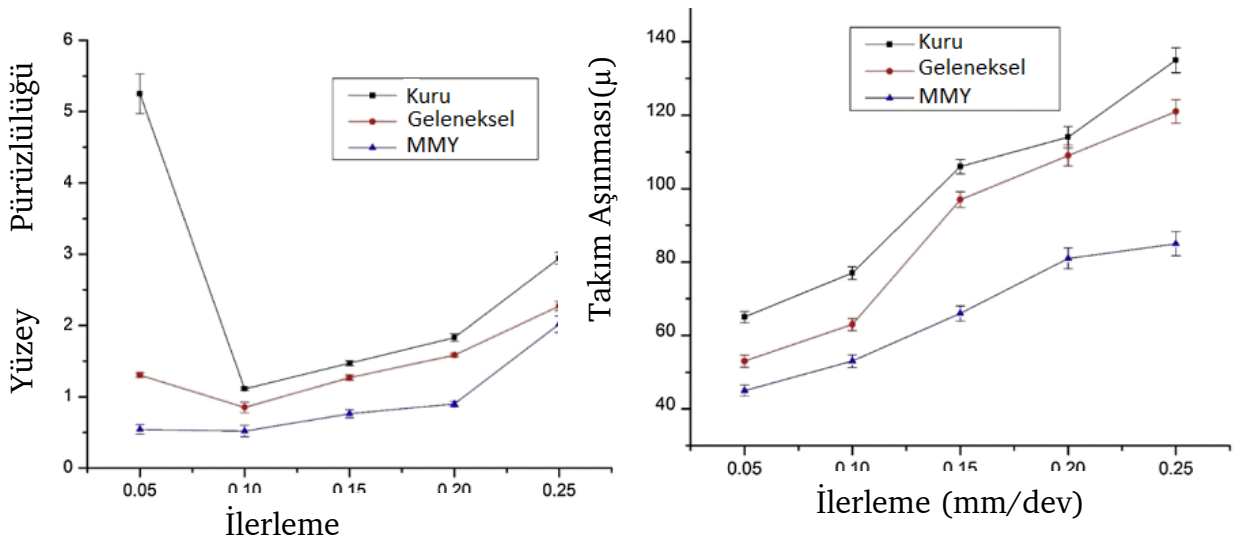
kısıtlanmasına neden olan bazı dezavantajlara da sahiptirler. Bu çelikler, yüksek pekleşme, düşük ısı iletkenlikleri ve yığma ağız (BUE) oluşumları nedeniyle diğer alaşımli çeliklere kıyasla işlenmesi en zor malzemelerden biri olarak kabul edilir [4]. Kesici takımlarda gözlemlenen yığma ağız etkisiyle ürünlerin yüzey kalitelerinde önemli bozulmalar gözlemlenmektedir ve bu da direkt olarak yapılan talaşlı imalat işleminin verimliliğinin düştüğüne bir işarettir. Kaplamalı WC (Tungsten Karbür) kesici takımların, paslanmaz çeliğin (47–48 HRC) kuru şartlarda tornalanmasında oldukça iyi performans gösterdiği belirtilmiştir [5]. Elmunafi vd. sertleştirilmiş paslanmaz çeliğin (47-48 HRC) Minimum Miktarda Yağlama (MMY) koşullarında çeşitli kesme hızlarında ve ilerlemelerde tornalanmasında kesme sıvısı olarak hint yağı kullanmışlardır. Araştırmacılar işleme çıktılarının (takım ömrü, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri) kesme hızı ve ilerlemeden etkilendiğini göstermişlerdir. Takım ömrünün hem kesme hızı hem de ilerleme ile ters orantılı olduğunu, yüzey pürüzlülüğünün ise ilerleme ile orantılı, kesme hızı ile ters orantılı olduğunu belirtmişlerdir. Kesme kuvvetlerinin ise kesme hızından daha çok ilerlemeden etkilendiği sonucuna varmışlardır [6]. Corrêa vd. martenzitik ve süper martenzitik paslanmaz çeliklerin tornalanmasında CVD (kimyasal buhar biriktirme) yöntemi ile TiC/TiCN/TiN (Titanyum Karbür/Titanyum Karbonitrür/Titanyum Nitrür) ile kaplanmış karbür takımların yüzeylerinde bulunan aşınma mekanizmalarını incelemişlerdir. Takım aşınmasını deneyler boyunca izlemiş ve sonunda aşınma mekanizmaları, bir taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak incelenmiştir. Sonuçlar, yüksek kesme hızlarında ve yüksek kesme derinliğinde süper martenzitik paslanmaz çeliğin martenzitik paslanmaz çeliğe göre daha kısa bir takım ömrü sunduğunu göstermiştir [7]. D. Jianxin vd. Cr12Mn5Ni4Mo3Al yarı östenitik paslanmaz çeliğinin kuru şartta tornalanmasında iki çeşit karbür takım (WC/Co ve WC/TiC/Co) kullanmışlardır. Yapılan deney sırasında ve sonrasında takım aşınması, kesme kuvvetleri ve kesme sıcaklıklarını ölçülmüşlerdir. Sonuçlar, WC/TiC/Co kesici takımlarında oluşan aşınmanın, kesme kuvvetlerinin ve kesme sıcaklığının, aynı test koşulları altında WC/Co takımında oluşanlardan daha az olduğu belirlenmiştir. Dolayısıyla WC/TiC/Co karbür takımların Cr12Mn5Ni4Mo3Al paslanmaz çeliğin işlenmesi için daha uygun olduğu belirtilmiştir [8].

Paslanmaz çeliklerin işlenmesi konusunda yapılan çalışmalar incelendiğinde bol miktarda soğutucu ve yağlayıcı kullanımı göze çarpmaktadır. Özellikle geleneksel

soğutmada kullanılan kimyasal ve petrol bazlı yağlayıcı ve soğutucuların çevre ve insan sağlığı için tehlikeleri daha da belirginleşmiş ve bu etkilerin azaltılması için yeni yağlama ve soğutma koşulları geliştirilmeye başlanmıştır. Minimum Miktarda Yağlama (MMY) en iyi alternatifler arasında yer almaktadır.

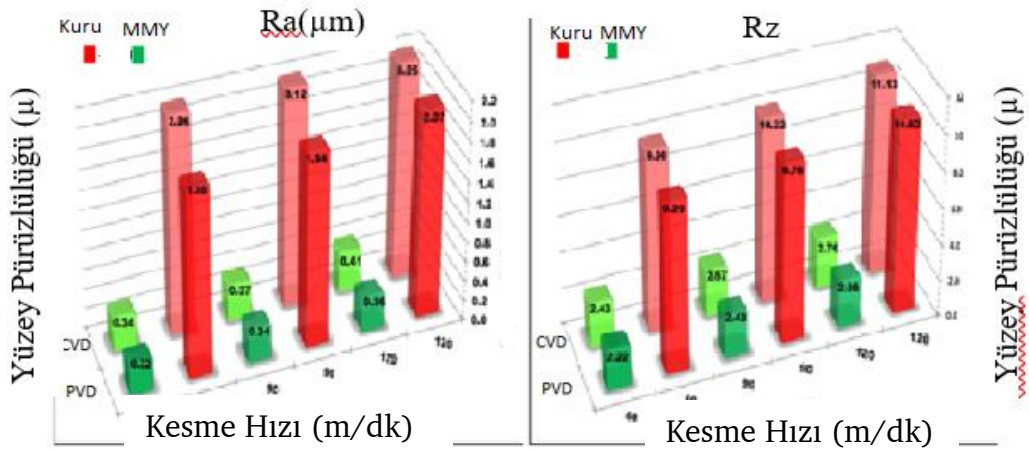
Talaşlı imalatta, minimum miktarda yağlama (MMY), kesici takım iş parçası temas bölgesine kesme sıvısının basınçlı hava ile pulverize edilerek gönderilmesi anlamına gelmektedir. Kuru işleme ile karşılaştırıldığında, MMY yöntemi kullanılarak yapılan talaşlı takım ömrünü arttırması, kesme sıcaklıklarını azaltması, yüzey pürüzlülüğünü düşürmesi vb. avantajları mevcuttur. Ayrıca, kesme sıvısının özellikleri işleme performansında önemli rol oynamaktadır [9]. MMY yöntemi, sadece kullanılan kesme yağı miktarını azaltmakla kalmayıp üretim maliyetlerini de düşürür. Aynı zamanda insan sağlığı ve çevre üzerine de daha az olumsuz etkisi olduğu kabul edilmektedir [10]. Kimyasal ve petrol esaslı kesme sıvılarına alternatif olarak bitkisel esaslı kesme ve soğutma sıvılarının kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır. Majak vd. AISI 304 paslanmaz çeliğinin tornalanmasında bitkisel esaslı kesme sıvılarının MMY koşulunda kullanılmasının etkilerini incelemişlerdir. Palm, hindistan cevizi ve ay çiçeği yağlarını kesme sıvısı olarak kullanmışlar ve ay çiçeği yağının en iyi yüzey kalitesini verdiğini ve bu üç yağ içerisinde sürdürülebilir imalat için en uygun yağın ay çiçeği yağı olduğu sonucuna varmışlardır [11]. Tabii ki MMY yönteminin ve kullanılan bitkisel esaslı yağların talaşlı imalat, parça yüzey kalitesi ve maliyeti, işleme parametreleri, takımlar ve enerji kullanımı gibi vb. birçok konuda etkileri araştırılmalıdır. MMY yönteminin ve kullanılan bitkisel esaslı kesme sıvılarının; talaşlı imalat, parça yüzey kalitesi ve maliyeti, işleme parametreleri, kesici takımlar ve enerji kullanımı gibi birçok konuda etkileri araştırılmakta ve araştırılmaya devam edilmektedir. S. Roy vd. çeşitli talaşlı imalat işlemlerinde MMY yöntemi kullanımını incelemişlerdir. Bitkisel esaslı kesme sıvılarının kullanıldığı MMY yönteminin, kuru ve geleneksel soğutma şartlarına göre kesme bölgesindeki sıcaklıkların azaltılmasında, takım ömrünün arttırılmasında ve yüzey pürüzlülüğünün düşürülmesinde daha iyi sonuçlar verdiği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca nano parçacık olarak grafit kullanılmasının kesme kuvvetlerini ve kesme bölgesindeki ısıyı düşürmesi sebebiyle takım ömrüne ve yüzey kalitesine olumlu etki yaptığı sonucuna da ulaşılmıştır [12]. Yazid vd. Inconel 718 alaşımının PVD (Fiziksel Buhar Biriktirme) yöntemi kullanılarak TiAlN (Titanyum Alümina Nitrür) kaplamalı WC

kesici takım ile MMY yöntemi kullanılarak tornalanmasını incelemiştir. MMY yöntemi kullanılarak kuru işleme koşuluna göre daha iyi yüzey pürüzlülüğü değerleri elde edilmiştir [13]. Babu vd. kuru, geleneksel ve MMY yağlama/soğutma şartlarında kaplamasız tungsten karbür takımlarla AISI 410 paslanmaz çeliğinin tornalanmasını incelemiştir. Çalışmada, MMY sisteminde 3 adet nozul kullanılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda, MMY şartının takım ömrü ve kesme kuvvetleri üzerine etkili bir yöntem olduğu belirtilmiştir. MMY yöntemi, kuru ve geleneksel şartlara göre sırasıyla yüzey pürüzlülüğünde %9 ve %51; kesme kuvvetlerinde ise yine sırasıyla %18 ve %19 iyileşme sağlamıştır. Ayrıca, MMY koşulunda diğer iki şarta göre kesici takımında daha az aşınma meydana gelmiştir. Bunun sebebi ise MMY yönteminde kesici takım – iş parçası arasındaki sürtünmenin azalmasıdır [14]. Rajaguru J ve Arunachalam N süper dubleks paslanmaz çeliğini kuru, geleneksel ve MMY yağlama/soğutma koşullarında tornalamışlardır. MMY yöntemi kullanılarak işlenen numunelerde daha az yüzey çatlağı tespit ettiklerini ve bunun sebebinin de MMY koşulunda kesme kuvvetlerinin düşmesiyle bağlantılı olarak daha düşük yüzey artık gerilmesi olduğunu belirtmişlerdir. Yapılan çalışmada, MMY yönteminin kuru şarta göre kesici takım aşınmasını %33,08 oranında azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca yüzey pürüzlülüğünde, kuru kesme şartına göre geleneksel soğutmada %29,06 ve MMY yönteminde %54,69 iyileşme gözlemlenmiştir [15].

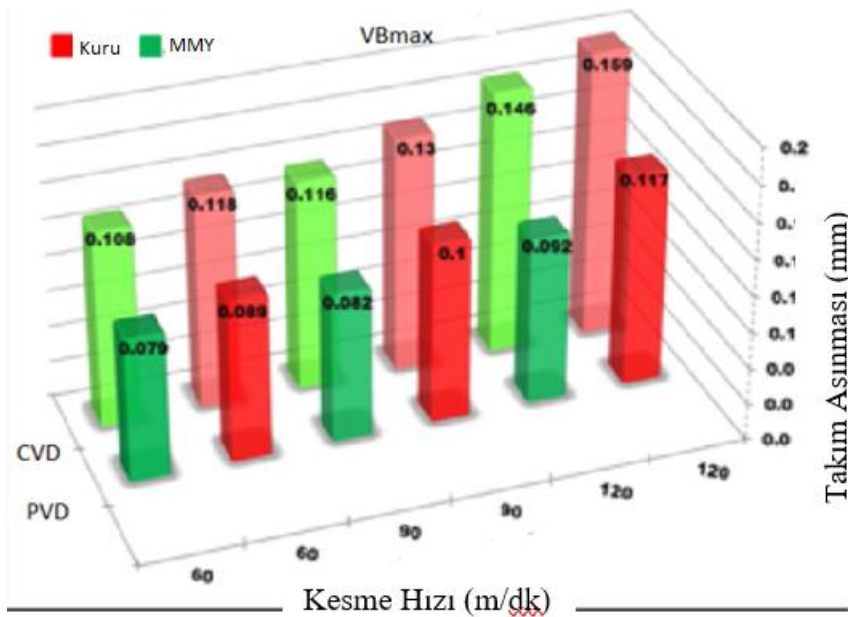


Şekil 1.1 Şekil 1.1 Süper paslanmaz çeliğin yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması

Özbek ve Saruhan AISI D2 çeliğinin CVD ve PVD yöntemleri ile kaplanmış kesici takımlar ile kuru ve MMY yağlama/soğutma şartlarında ve farklı kesme hızları (60, 90, 120 m/dak), 1 mm kesme derinliği ve 0,09 mm/dev ilerleme değerlerinde tormalanmasını incelemiştir. Yapılan çalışmaların sonunda kesme sıcaklığı ve takım titreşim değerlerinin, her iki kaplamalı takım için de MMY koşulunda daha düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, MMY koşulunda kuru kesme ye göre Ra yüzey pürüzlülük değeri %88, Rz yüzey pürüzlülük değeri ise %91 azalmıştır. Bunun yanı sıra MMY koşulu, CVD kaplamalı kesici takımın ömrünü %267 ve PVD kaplamalı kesici takımın ömrünü ise %200 arttırmıştır [16].



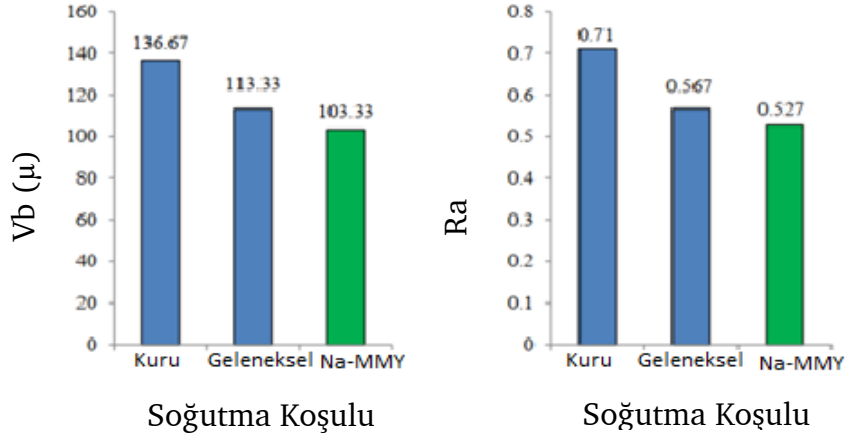
Şekil 1.2 AISI D2 Çeliğın tormalanmasında yüzey pürüzlülüğü sonuçları



Şekil 1.3 AISI D2 Çeliğın tormalanmasında takım aşınması sonuçları

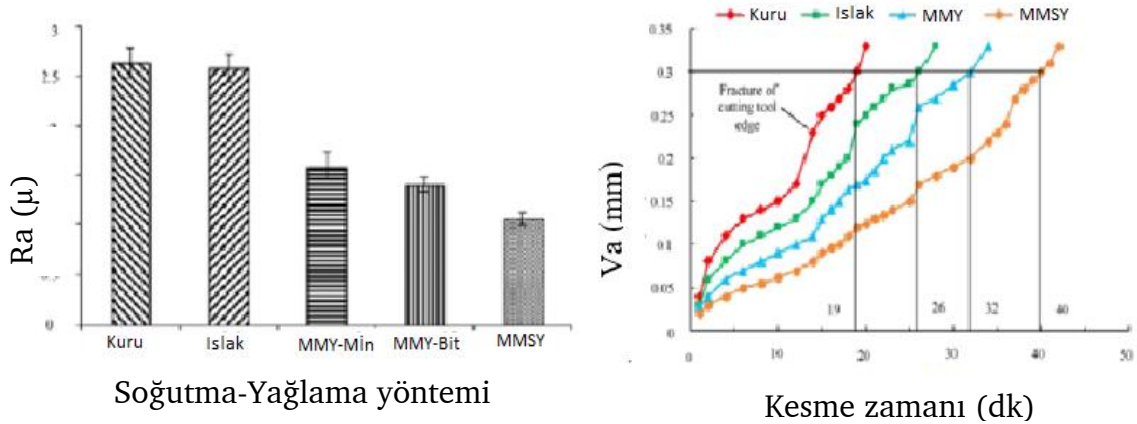
MMY yönteminin kullanımı ile kimyasal ve petrol esaslı yağların kullanımı azaltılmıştır. Ayrıca MMY yönteminde bitkisel esaslı kesme sıvıları da kullanılmaktadır. Fakat kullanılan bitkisel kesme sıvıları, yüksek sıcaklık, ilerleme ve kesme hızı değerlerinde istenilen performansı veremeyebilir, yapısı bozularak kullanılamaz hale gelebilir. Bu bozulmalar ve yetersizlikler direkt olarak iş parçalarının istenilen özelliklerde üretilmemesine sebep olabilmektedir. Tüm bu olumsuzluklar sonucunda ise parçaların istenilen forma getirilmesi için ekstra talaşlı ya da talaşsız şekillendirme yöntemleri uygulanması gerekebilir. Bunun sonucunda ise ürünler istenilen zamanda imal edilemeyeceği gibi; hem maliyetler artar hem de daha fazla enerji ve de soğutucu kullanımı nedeniyle ekolojik zarar artar. Tüm bu kayıpların giderilmesi ya da maliyetlerin düşürülmesi için çevre ve insan sağlığı açısından zararlı olduğu bilinen geleneksel yağlama/soğutma yöntemine geri dönmek yerine MMY yönteminde kullanılan bitkisel kesme sıvılarının performansının artırılması konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Bu amaçla, bitkisel esaslı kesme sıvılarına nano parçacıklar eklenilerek hem soğutucu hem de yağlayıcı özelliklerinin geliştirilmesi istenmektedir. Nano parçacıklar katılarak hazırlanan bu nano akışkanlar sadece bitkisel kesme sıvılarının kullanıldığı durumlara göre daha üstün sonuçlar vermektedir. Özellikle bazı nano parçacıkların yüksek termal iletkenliği sayesinde kesme sıcaklıkları düşürülmekte ve dolayısıyla kesici takımların ömrü artarken, imal edilen parçaların da yüzey bütünlüğü özellikleri iyileştirilebilir. Aynı şekilde bazı nano parçacıkların yüksek yağlayıcı özellikleri sayesinde kesme kuvvetleri düşürülebilir. Kesme kuvvetlerinin düşürülmesi direkt olarak kesme gücünü dolayısıyla da kullanılan elektrik miktarının azaltılmasını sağlayacaktır. Bu da daha az elektrik tüketimine, daha düşük maliyetlere, daha sürdürülebilir bir imalata imkân vermektedir. Patole ve Kulkarni AISI 4340 çeliğinin tornalanmasında nano parçacıkların kullanıldığı MMY yönteminin, yüzey pürüzlülüğü ve kesme kuvvetleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Nano parçacıkların kullanıldığı MMY yönteminin, geleneksel yağlama/soğutma koşuluna göre daha kaliteli bir yüzey verdiği gözlemlenmiştir [17]. Nano parçacık takviyeli kesme sıvısının kullanıldığı MMY yöntemi, kesme kuvvetinde, yüzey pürüzlülüğünde ve kesme sıcaklığında önemli bir azalmanın yanı sıra yüzey kalitesinde önemli bir iyileşme de dahil olmak üzere tornalama deneylerinde güçlü bir performans göstermiştir. Nano parçacıkların üstün özelliklerinden faydalanmak amacıyla MMY yöntemiyle takım-talaş ve takım-iş parçası

ara yüzeylerine pulverize ederken bitkisel yağ kullanmak, çevre dostu tornalama elde etmenin uygun bir yolu olarak belirtilmiştir [18]. Chetan vd. nano  $Al_2O_3$  (Alüminyum Oksit) parçacık takviyeli nanoakışkan kullanarak MMY yöntemi ile Nikel alaşımının torlanmasını incelemişler ve kesme kuvvetinin kuru kesme şartına göre %16 azaldığını gözlemlemişlerdir [19]. Khalil vd. nano  $Al_2O_3$  parçacık takviyeli nanoakışkan kullanılan MMY yöntemiyle AISI 10500 çeliğini tornalamışlardır. Nano parçacık takviyesinin, takım aşınmasını azaltarak takım ömrünü arttırdığı, ayrıca kesme bölgesindeki ısının uzaklaştırılmasına yardımcı olduğu belirtilmiştir [20]. Sharma vd. ise nano  $Al_2O_3$  parçacık takviyeli nanoakışkan kullanılan MMY yöntemiyle AISI 1040 çeliğinin tornalanmasını incelemişler ve kuru ve geleneksel yağlama/soğutma ile karşılaştırmışlardır. MMY yönteminin, kuru ve geleneksel talaşlı şekillendirmeye göre sırasıyla kesme kuvvetlerinde %59,1 ve %29,2, takım aşınmasında %63,9 ve %44,9 ve ortalama yüzey pürüzlülüğünde %47,8 ve %29,1 iyileşme sağladığı gözlemlenmiştir [21]. M. Amrita vd. nano grafit bazlı kesme sıvılarının talaş kaldırma prosesindeki etkileri üzerine yaptıkları araştırmada nanoakışkan kullanılan MMY yönteminin, geleneksel yağlama/soğutma koşuluna göre kesme kuvvetlerinde %54, kesme sıcaklığında %25, takım aşınmasında %71 ve yüzey pürüzlülüğünde %30 iyileşme sağladığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, MMY yönteminde nanoakışkan kullanılıp kullanılmadığı da incelenmiş olup nanoakışkan kullanıldığı durumda, kesme kuvvetlerinde %50, kesme sıcaklığında %20, takım aşınmasında %37 ve yüzey pürüzlülüğünde %27 iyileşme sağlandığı gözlemlenmiştir [22]. Singh vd. kuru, geleneksel talaşlı şekillendirme ve nanoakışkan kullanılan MMY şartlarında AISI 304 östenitik paslanmaz çeliğinin tornalanmasını incelemişlerdir. Çalışmada kullanılan nanoakışkan, kesme sıvısına MWCNT (Çok Duvarlı Karbon Nanotüp) katılarak elde edilmiştir. Kesici takımların SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüleri incelendiğinde, geleneksel talaşlı şekillendirmede yığılma ağız gözlemlenirken nanoakışkan kullanılan MMY yönteminde bu durum gözlemlenmemiştir. Ayrıca, nanoakışkan kullanılan MMY yönteminde oluşan takım aşınması kuru ve geleneksel talaşlı şekillendirmeye göre sırasıyla %32,26 ve %7,59 azalırken; yüzey pürüzlülük değerleri ise yine sırasıyla %34,72 ve %7,59 azalma göstermiştir. Tüm bu etkiler ve sonuçlar göz önüne alındığında nanoakışkan kullanılan MMY yönteminin daha çevreci ve sürdürülebilir bir yöntem olduğu söylenebilir [23].



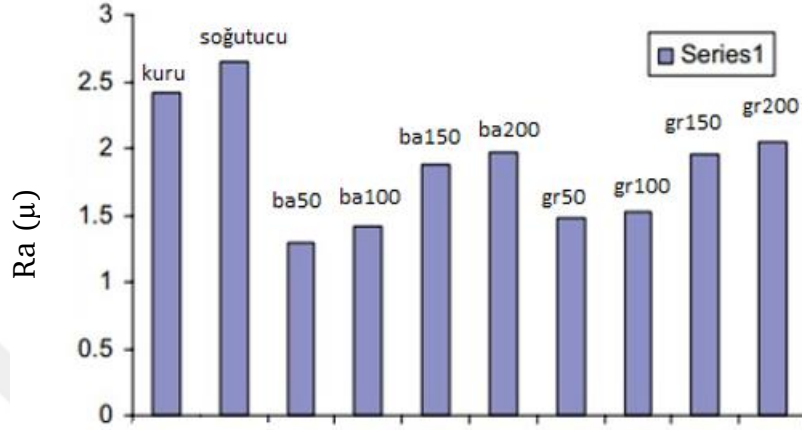
**Şekil 1.4** AISI 304 Çeliğinin tornalanmasında takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü

Musavi vd. kuru, geleneksel talaşlı şekillendirme, mineral ve bitkisel esaslı kesme sıvıları kullanılan MMY ve nanoakışkan kullanılan MMY koşullarında A286 süper alaşımının tornalanmasını incelemiştir. Nanoakışkan kullanılan MMY yönteminde ölçülen yüzey pürüzlülüğü, kuru kesmeye göre %59,4, geleneksel talaşlı şekillendirmeye göre %58,7, mineral bazlı kesme sıvısının kullandığı MMY yöntemine göre %32,8 ve bitkisel esaslı kesme sıvısının kullanıldığı MMY yöntemine göre %24 azalmıştır. Takım kenar aşınması değerleri ise nanoakışkan kullanılan MMY yönteminde, kuru kesmeye göre %53, geleneksel talaşlı şekillendirmeye göre %35 ve MMY yöntemine göre de %20 azalmıştır [24].



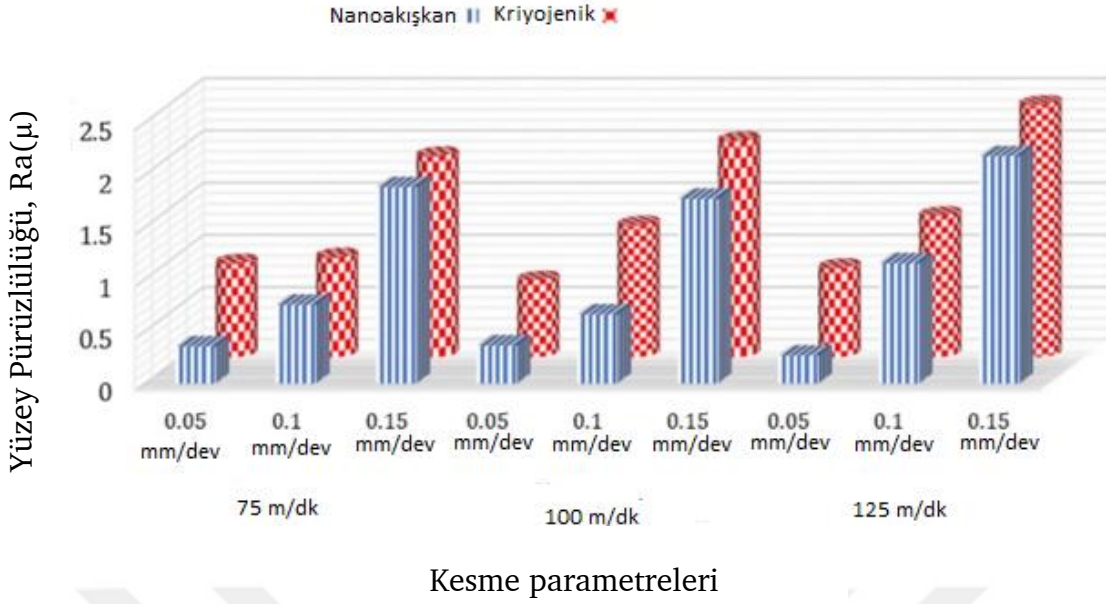
**Şekil 1.5** A286 Süper alaşımının tornalanmasında yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınması

Rao ve Krishna EN 8 çeliğinin tornalanmasında kuru, geleneksel soğutma koşullarını borik asit ve grafit nano parçacıklarının kullanıldığı soğutma koşullarına göre kıyaslamışlardır. Çalışma sonucunda her iki nano parçacığın da diğer soğutma koşullarına göre çok daha düşük yüzey pürüzlülüğü değerleri verdiğini ve takım ömrünün uzadığını göstermişlerdir [25].



**Şekil 1.6** EN8 Çeliğinin tornalanmasında yüzey pürüzlülüğü sonuçları

L. Dash vd. AISI D3 çeliğinin tornalanmasında grafit katkı nanoakışkanların kullanıldığı MMY yöntemini tercih etmişlerdir. Yapılan çalışmanın sonucunda nano grafit parçacıkların yağlayıcılık özelliği haricinde soğutucu özelliği de bulunması nedeniyle yüzey bütünlüğüne olumlu etki ettiği gözlemlenmiştir. Ayrıca nanoakışkan kullanılan MMY yönteminin çok az miktarda yağ kullanması, nano grafit parçacıkların soğutucu etkisi dolayısıyla kesme sıcaklıklarının düşürülmesi, bu yöntemin ve parçacıkların çevre dostu olduğuna, sürdürülebilir bir imalata imkân sağladığı sonucuna varılmıştır [26]. Yıldırım, sertleştirilmiş AISI 420 çeliğinin tornalanmasında %0,5 nano grafit takviyeli nanoakışkan kullanılan MMY ve kriyojenik yağlama/soğutma koşullarını karşılaştırmıştır. Yapılan deneyler sonucunda yüzey pürüzlülüğünde en iyi sonuçlar nanoakışkan kullanılması şartında elde edilmiştir. Kesme hızının 75 m/dak olduğu durumda, nanoakışkan kullanılan MMY yöntemi ile yüzey pürüzlülük değerleri, kriyojenik soğutma koşuluna göre 0,05 mm/dev ilerlemede %60,27 iyileşme gösterirken bu oran 0,1 mm/dev ilerlemede %20,78 ve 0,15 mm/dev ilerlemede ise %2,19 olarak bulunmuştur. Kesme hızı arttırıldığında da nanoakışkan kullanılan MMY yönteminin kriyojenik soğutma koşuluna göre avantajını kaybetmediği tespit edilmiştir [27].



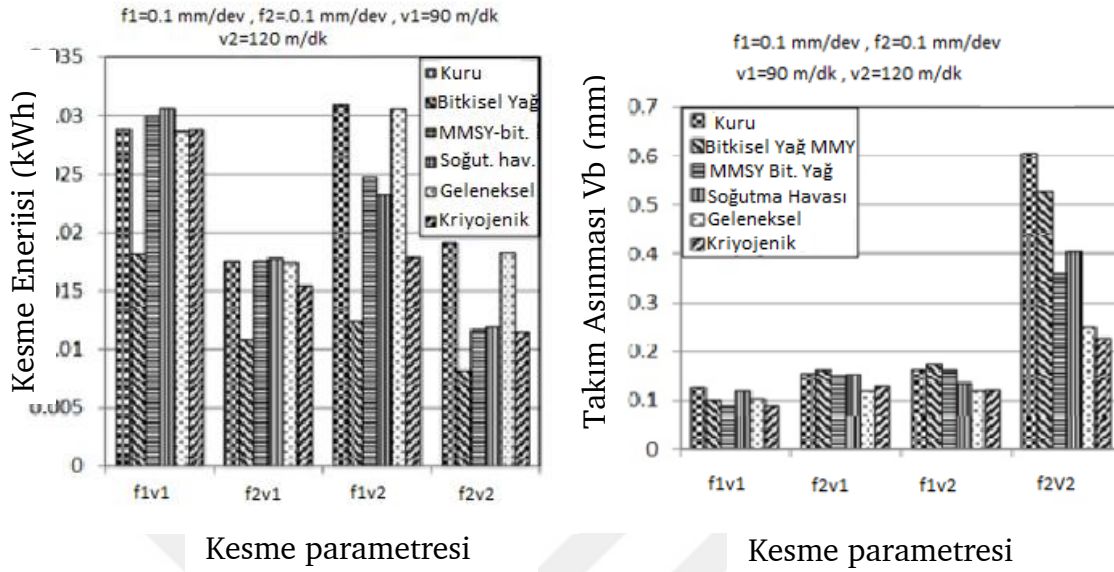
**Şekil 1.7** AISI 420 Çeliğinin tormalanmasında yüzey pürüzlülüğü sonuçları

Sertsöz ve Kaçal, nano MoS<sub>2</sub> (Molibden Disülfür) parçacıklarının ağırlıkça üç farklı (%0,5-%1-%1,5) oranda kesme sıvısına katılması sonucu elde edilen nanoakışkanların kullanıldığı MMY yöntemini ile GGG70 malzemesinin tormalanmasını incelemiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, en düşük yüzey pürüzlülüğü değeri ağırlıkça %1,5 MoS<sub>2</sub> takviyeli nanoakışkan kullanılan MMY yönteminde elde edilmiştir. Bu koşulda elde edilen değer, kuru koşulda elde edilen yüzey pürüzlülüğü değerinden %37 daha az elde edilmiştir. Ayrıca nano MoS<sub>2</sub> parçacıklarının yağlayıcı özelliği sayesinde takım aşınmasında da azalma gözlemlenmiştir [28]. Sterle vd. Inconel 718 alaşımının işlenmesi sırasında sıvı CO<sub>2</sub> ve nano MoS<sub>2</sub> parçacık takviyeli nanoakışkan kullanılan MMY yöntemi kullanmışlardır. Deneyler sonucunda, nano MoS<sub>2</sub> parçacıklarının yüzeyden çok kolay ayrılması ve yapışma yapmaması sayesinde; sadece kesme yağı kullanılan MMY şartına ve kuru kesmeye göre iyi bir yüzey kalitesi elde edildiğini göstermişlerdir [29]. R.R. Moura vd. Ti-6Al-4V alaşımının tormalanmasında grafit ve nano MoS<sub>2</sub> parçacıklarının kesme sıvısında kullanılmasını MMY şartında incelemiştir. Nano MoS<sub>2</sub> parçacıklarının 130 m/dak kesme hızında takım ömrünü %75, 150 m/dak kesme hızında ise %32 artırdığı sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca nano parçacık kullanılan tüm yöntemlerin kuru ve sadece kesme yağının kullanıldığı yöntemlere göre kesme kuvvetlerini düşürdüğü ve daha iyi bir yüzey kalitesi verdiği belirtilmiştir [30]. A.M. Khan vd. Al-GNP (Alüminyum-Nano Grafen Parçacık) parçacık takviyeli hibrit nanoakışkan kullanılan MMY yöntemi ile AISI 52100 çeliğinin

tornalanmasını incelemişlerdir. Kesme kuvvetlerinde en düşük değerler MMY yöntemi ve tek nanoakışkan kullanılan (yalnızca  $Al_2O_3$ ) hibrit nanoakışkan kullanılan durumda elde edilmiştir. Ayrıca, hibrit nanoakışkanın takım ömrünü arttırdığı belirtilmiştir. Parça başına üretim maliyeti incelendiğinde ise hibrit nanoakışkan kullanılan MMY yönteminin, katkısız kesme sıvısı kullanılan MMY yöntemine göre %1,7 ve tek nano parçacık (yalnızca  $Al_2O_3$ ) takviyeli nanoakışkan kullanılan MMY yöntemine göre %0,4 daha tasarruflu olduğunu belirtmişlerdir [31].

Gün geçtikçe, insan nüfusu ve dolayısıyla tüketim arttıkça üretim de talebi karşılamak için artmaktadır. Üretim kapasitelerinin artırılması için yeni finansal ve ekolojik kaynaklar gerekmektedir. Kontrolsüz şekilde artan talebi karşılayabilmek için üretim kapasiteleri de artmakta ve dolayısıyla doğal kaynaklar azalmakta ve çevre zarar görmektedir. Bilinçli bir üretim planı oluşturabilmek için sürdürülebilir imalat kavramının dikkate alınması oldukça önemlidir. Üretim için minimum miktarda enerji kullanımı, çevreye minimum zarar ve minimum maliyet, dünya için gün geçtikçe gerekli hale gelmektedir. Özellikle soğutucu ve yağlayıcıların ve enerji tüketiminin çevreye etkisi göz önüne alındığında sürdürülebilirlik kavramının imalat yöntemleri açısından önemi yadsınamaz. Yağlama için hayvansal ve bitkisel bazlı yağların kullanımı tarihe kadar uzanmaktadır. Petrolün keşfi ve ardından rafineri teknolojilerindeki gelişmelerle mineral bazlı yağlayıcıların kullanımı artmıştır. Madeni yağ hızla tükenen bir kaynak ve aynı zamanda bir çevre kirleticisidir. Madeni yağ bazlı yağlayıcıların etkisi ve kısıtlayıcı çevre düzenlemeleri, doğal kaynaklardan elde edilen yağlayıcılara olan ilgiyi arttırmıştır. Yenilenebilir, kirletici olmayan ve biyolojik olarak parçalanabilen bitkisel yağlar, çevreye duyarlı yağlama uygulamaları için birincil tercih haline gelmiştir [32]. Geleneksel kesme sıvılarının (kimyasal ve petrol esaslı) insan sağlığı ve çevre ekolojisi üzerinde büyük bir olumsuz etkisi vardır ve bu nedenle küresel imalat endüstrisinin sürdürülebilir gelişimi için ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Biyobozunur kesme sıvılarının kullanıldığı MMY yöntemi ile talaşlı şekillendirme, sürdürülebilir üretim elde etmek için önemli bir teknolojidir; gereken kesme sıvısı miktarını büyük ölçüde azaltır ve yağlamayı sağlamak için kesme bölgesine etkili bir şekilde girebilen atomize parçacıklar kullanır [33]. Deiab vd. Ti-6Al-4V alaşımının MMY yöntemi ile tornalanmasında, bitkisel kesme sıvılarının takım aşınmasında, yüzey kalitesinde ve

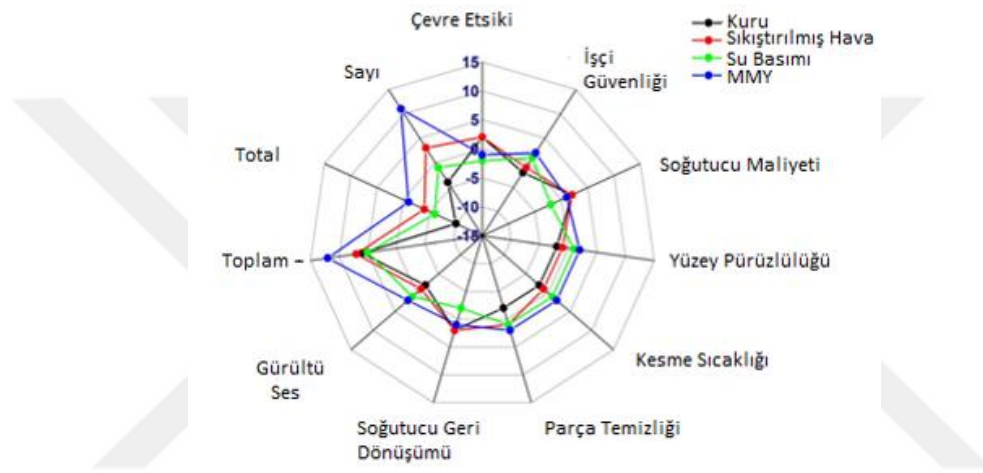
kesme işlemi sırasında harcanan enerji miktarında sentetik soğutuculara göre daha sürdürülebilir bir yöntem olduğu sonucuna varmışlardır [34].



**Şekil 1.8** Ti-6Al-4v alaşımının tornalanmasında kesme enerjisi ve takım aşınması

Aynı şekilde kesme sıvılarının türündeki değişiklik kadar önemli bir diğer konu ise bu soğutucu ve yağlayıcıların kullanım miktarını azaltmaktır. Bu sayede hem zararlı atıklar hem enerji tüketimi hem de maliyetler azaltılırken insan sağlığı üzerindeki riskler de minimize edilebilmektedir. Nur vd. kaplamalı karbür takımlar kullanarak AISI 316L östenitik paslanmaz çeliğin kuru kesmede üç farklı kesme hızı (90, 150, 210 m/dak) ve üç farklı ilerlemede (0,10, 0,16, 0,22 mm/dev) tornalanmasını incelemiştir. Yapılan deneyler sonucunda kesme hızı ve ilerleme değerlerinin artışının enerji tüketimini ve kesme kuvvetlerini artırırken takım ömrünü azalttığını belirtmişlerdir. Ayrıca güç tüketimindeki artışın dikkatten kaçırılmaması gerektiğini ve sürdürülebilirlik hesapları için önemli bir parametre olduğu belirtilmiştir [35]. Kuru kesme koşulunda üretim maliyetleri soğutucu ve/veya yağlayıcı kullanılmadığı için daha az olsa da kuru kesme koşulu kesme kuvvetlerinin ve dolayısıyla imalat için kullanılan enerjinin artmasına sebep olmaktadır. Artan bu enerji tüketimi hem karbon salınımını hem de doğal kaynak tüketimini artırarak çevreye olumsuz etki yapmaktadır. Bu durumun önüne geçilebilmesi için MMY yönteminin talaşlı imalatta kullanımı sürdürülebilirliğe olumlu anlamda katkı yapmaktadır. T.S. Padhan vd. seramik kesici takım kullanılarak Nitronic 60 çelik malzemenin tornalanmasında dört farklı yağlama/soğutma şartı (kuru, hava,

geleneksel ve MMY), dört farklı kesme hızı (51, 67, 87 ve 111 m/dak) ve dört farklı ilerleme (0,12, 0,16, 0,2 ve 0,24 mm/dev) kullanmışlardır. Yapılan deneylerin sonucunda MMY yönteminin kesme kuvvetlerinin ve sıcaklıklarının düşürülmesinde, takım aşınmasının azaltılmasında ve yüzey kalitesinin artırılmasında en etkili şart olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu sonuçlar ışığında MMY yönteminin çalışan sağlığı açısından ve maliyetinin düşük olması açısından, kontrol edilebilir kesme sıcaklığı ve temiz ürünler üretilmesine imkân vermesi açısından gerek tekno-ekonomik gerekse çevre dengesi bakımından en sürdürülebilir yöntem olduğunu göstermişlerdir [36].



**Şekil 1.9** Sürdürülebilirlik değerlendirme için Kiviat diyagramı ile ilişkili Pugh matrisi

Rajmohan vd. tarafından gerçekleştirilen sürdürülebilir talaşlı imalat konusundaki araştırma sonucunda kuru işlemenin toplam üretim maliyetinin %7-%17 aralığındaki maliyetini oluşturduğunu ve soğutucu/yağlayıcı maliyetini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Ancak nanoakışkan kullanılan MMY yönteminin, yüzey kalitesini artırırken kesme kuvvetlerini ve enerjisini düşürdüğü belirtilmiştir. Ayrıca nano parçacıkların termal iletkenliği sayesinde de kesme sıcaklıklarının düştüğü belirlenmiştir [37].

## 1.2 Tezin Amacı

Paslanmaz çelik malzemeler sahip oldukları düşük termal iletkenlik ve yüksek çalışma sertleşmesi gibi sebeplerden dolayı işlenmesi zor malzeme grubuna girmektedirler. Bu sebeple, bu malzemelerin talaşlı şekillendirilmesinde, bol miktarda kimyasal kesme sıvısı ve kaplamalı kesici takımlar kullanılmaktadır. Özellikle bol miktarda kesme sıvısı kullanımının hem çevreye hem de insan sağlığına zarar verdiği bilinmektedir. Ayrıca, paslanmaz çelik malzemelerin talaşlı işlenebilirliklerinin düşük olması sebebiyle kesici takım maliyetleri, talaşlı şekillendirme için gerekli güç, enerji tüketimi gibi maliyetler de yüksek olmaktadır. Bu yüzden geleneksel kesme sıvılarıyla paslanmaz çeliklerin işlenmesi sürdürülebilir bir talaş kaldırma işlemi değildir.

Bu çalışmada; paslanmaz çelik malzemenin çeşitli nanoakışkanlar kullanılan MMY (Minimum Miktarla Yağlama) yöntemiyle tornalanması amaçlanmıştır. Bu sayede, nano parçacıkların sahip oldukları yüksek termal iletkenlik ve yüksek yağlayıcılık özelliklerinden faydalanılması ve bu malzemenin sürdürülebilir talaşlı şekillendirilebilmesi hedeflenmiştir. Bu amaçla; ortogonal tornalama işlemleri sırasında kesme kuvvetlerinin ve işlenen parçalarının yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesi deneysel çalışmalar olarak ve karbon emisyonlarının ve talaşlı işleme maliyetlerinin hesaplanması sürdürülebilir indisler olarak belirlenmiştir. Bu şekilde, çeşitli nanoakışkanların MMY yönteminde etkilerinin ortaya konması amaçlanmıştır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak nanoakışkanların, nano grafen ve nano MoS<sub>2</sub> parçacıkların ticari bitkisel kesme sıvısına ağırlıkça toplam %0,8 oranında ayrı ayrı ve birlikte (hibrit) katılmasıyla elde edilmesi hedeflenmiştir. Ayrıca, nanoakışkan kullanılmayan MMY yöntemi ve kuru kesme şartlarında da ortogonal tornalama deneyleri gerçekleştirilerek karşılaştırma yapılması amaçlanmıştır. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda elde edilen veriler ve hesaplanan sürdürülebilir indislerin genetik algoritma yardımıyla optimizasyonun yapılarak en uygun işleme parametrelerinin ve yağlama koşullarının ortaya konması amaçlanmıştır.

## 1.3 Hipotez

Bu çalışmada; AISI 310S östenitik paslanmaz çelik malzemenin, çeşitli nanoakışkanlar kullanılan MMY yöntemi ile sürdürülebilir talaşlı şekillendirilebileceği varsayılmıştır. Bu malzemenin tornalanmasında, nanoakışkanların, kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü,

karbon emisyonu ve talaşlı işleme maliyeti bakımından fayda sağlayacağı öngörülmüştür. Genetik algoritma yöntemi kullanılarak da optimum kesme parametrelerinin ve yağlama şartının belirlenebileceği varsayılmıştır.



## 2. Deneysel Çalışma

Bu bölümde, deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme, takım tezgâhı ve cihazlardan bahsedilip, nanoakışkanların hazırlanması ve tornalama deneylerinin nasıl yapıldığı anlatılacaktır.

### 2.1 Malzeme

Deneysel çalışmalarda, iş parçası olarak östenitik AISI 310S paslanmaz çeliği kullanılmıştır. AISI 310 paslanmaz çeliğinin kimyasal bileşimi; %0,065 C, %0,623 Si, %1,55 Mn, %19,161 Ni, %24,244 Cr, %0,249 Mo, %0,435 Cu, %0,0002 S, %0,0216 P, %0,021 N şeklindedir. AISI 310S paslanmaz çelik malzemenin Brinel sertlik değeri (HB) 157, Rockwell sertlik (HRC) değeri ise 22'den düşüktür.

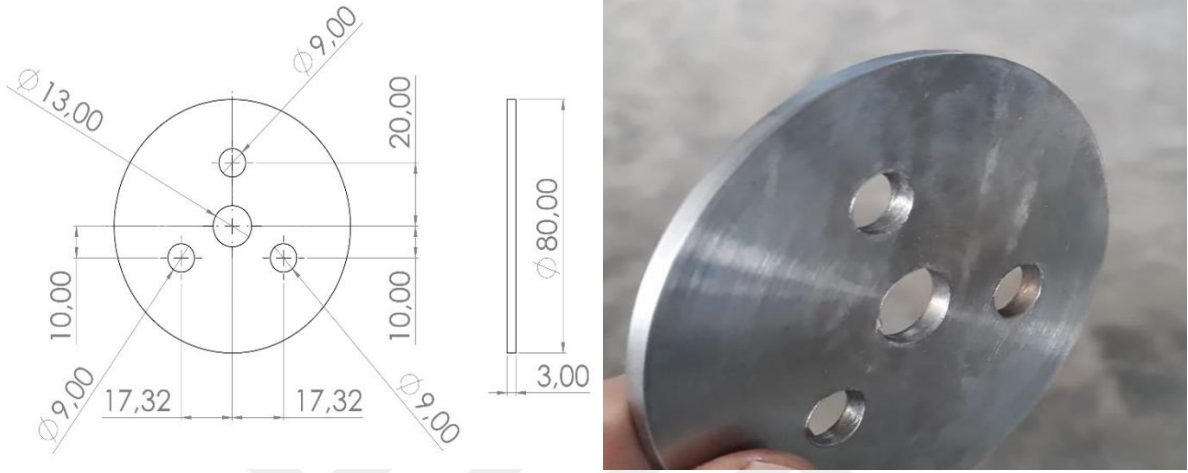
**Tablo 2.1** AISI 310S paslanmaz çeliğinin 20 °C'deki kimyasal bileşimi

Bileşen	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	S	P	N
%	0,065	0,623	1,55	19,161	24,244	0,249	0,435	0,0002	0,0216	0,021

**Tablo 2.2** AISI 310S paslanmaz çeliğinin 20 °C'deki mekanik özellikleri

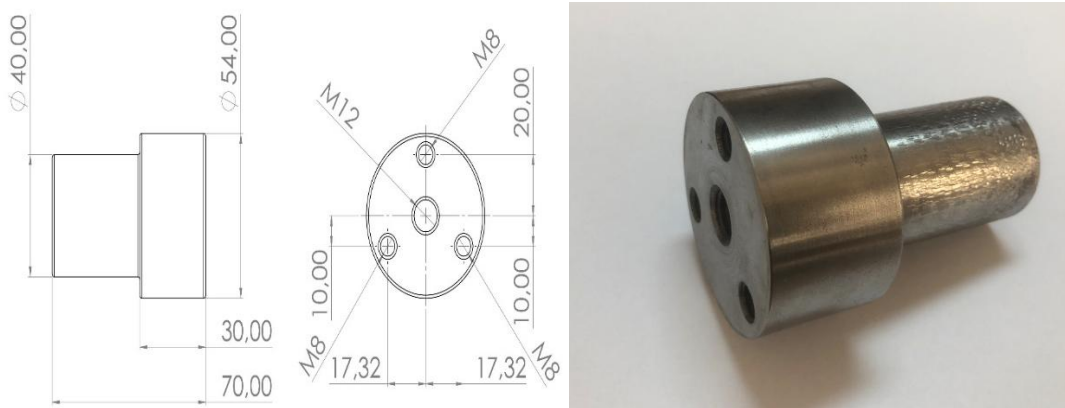
Akma dayanımı Rp=%0,2 (MPa)	Akma dayanımı Rp=%1 (Mpa)	Çekme Dayanımı RM (Mpa)	Brinel Sertlik değeri (HBW)	Rockwell Sertlik Değeri (HRC)
290	330	548	157	<22

Deney numunesi olarak kullanılacak olan AISI 310S paslanmaz çelik malzeme  $\text{Ø}80 \times 200$  mm olarak temin edildi. AISI 310S paslanmaz çelik malzeme Şekil 2.1’de verilen teknik resim ve fotoğrafta görüldüğü üzere merkezde  $\text{Ø}13$  ve eşit mesafede üç adet  $\text{Ø}9$  delik olacak şekilde radyal matkap tezgahında delindi. Daha sonra delinen malzeme tel erezyon tezgahında 3 mm’lik eşit parçalar halinde kesildi.



Şekil 2.1 Deney numunesi teknik resmi ve deney numunesi

Deney numunelerinin torna tezgahına bağlanabilmesi için AISI 1040 çelik malzemeden Şekil 2.2’de teknik resmi verilen aparat kullanıldı. Ayrıca bağlantı aparatının gerçek görünüşü Şekil 2.2’de verilmiş.



Şekil 2.2. Bağlantı aparatı teknik resmi

Ortogonal tornalama deneylerinde, TCMT 16T304-MH model, TiN (titanyum nitrür) kaplamalı WC (Tungsten Karbür) kesici uçlar kullanılmış ve görüldüğü gibi STNCN 2020 K16 model takım tutucuya monte edilmiştir.



**Şekil 2.3** Deneysel çalışmalar sırasında kullanılan kesici uçların takım tutucuya montajlanmış hali.

Deneylerde kullanılan kesme sıvısı Eraoil KT/2000 ticari bitkisel esaslı kesme sıvısıdır. Bitkisel kesme sıvısının rengi kırmızıya yakın bir turuncu, 20 °C'deki yoğunluğu 0,85 g/cm<sup>3</sup> ve 20 °C'deki viskozitesi 11 cst'dir. Deneylerde kullanılan bu bitkisel kesme sıvısı, yüksek direnç oluşturan katkıları içeren (sülfür katkısı içermemektedir), hidrodinamik yağlama özelliğine sahip püskürtmeli sistemlerde kullanıma uygundur. Minimum miktarda yağlama yöntemi gibi püskürtme esaslı sistemlerde talaş kaldırma işlemleri için kullanımı uygundur.

## 2.2 Deneylerde Kullanılan Tezgah, Cihaz ve Ekipmanlar

Deneyler Şekil 2.5'te görülen Goodway marka GA-230 model CNC torna tezgahında gerçekleştirilmiştir. Goodway GA-230 CNC torna tezgâhı maksimum 4200 dev/dak iş mili devrine sahiptir. Minimum Miktarla Yağlama (MMY) işlemi Şekil 2.4'te gösterilen ve özellikleri Tablo 2.3'te verilen Werte marka STN 15 model mikro yağlama sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Nano parçacıkların MMY cihazı içerisinde toplanarak cihaz borularını tıkamaması ve sağlıklı nanoakışkanın kesme bölgesine ulaştırılması amacıyla MMY cihazı içerisinde elektrik motoruyla tahrik edilen ve hızı ayarlanabilen bir pervane sistemi kullanılmıştır.

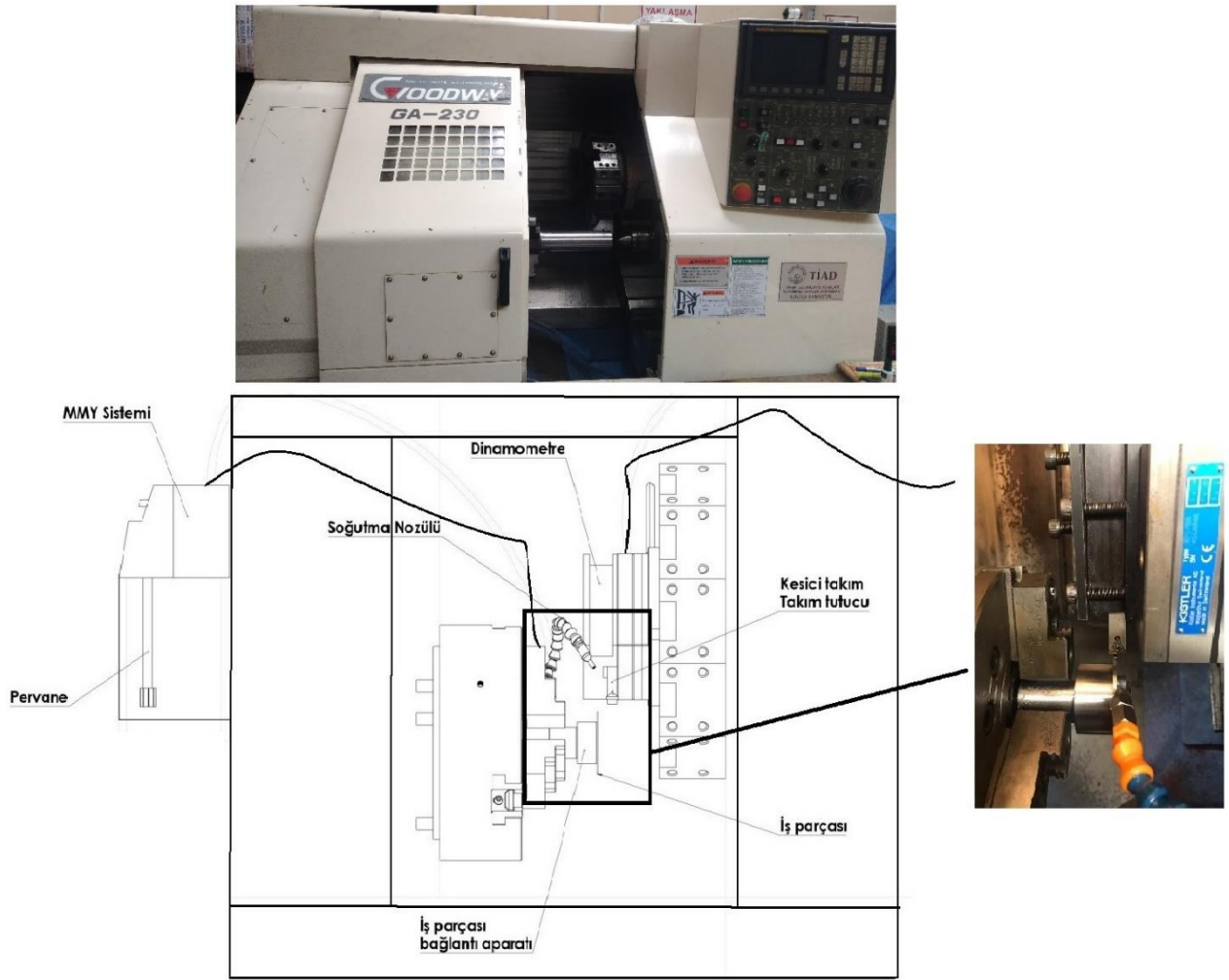


**Şekil 2.4** Deneylerde kullanılan MMY sistemi

**Tablo 2.3** Mikro yağlama sisteminin özellikleri

<b>Kontrol paneli</b>	Manuel
<b>Çalışma voltajı</b>	24V AC/DC
<b>Çalışma basıncı</b>	4-6 bar
<b>Rezervuar</b>	1,5 lt
<b>Yağlama aralığı</b>	0,1 sn-90 saat
<b>Yağlama süresi</b>	0,1 sn-60 sn
<b>Yağlama miktarı (min)</b>	0,0012 ml
<b>Yağ miktarı (maks)</b>	0,028 ml
<b>Viskozite aralığı</b>	2-30 cst

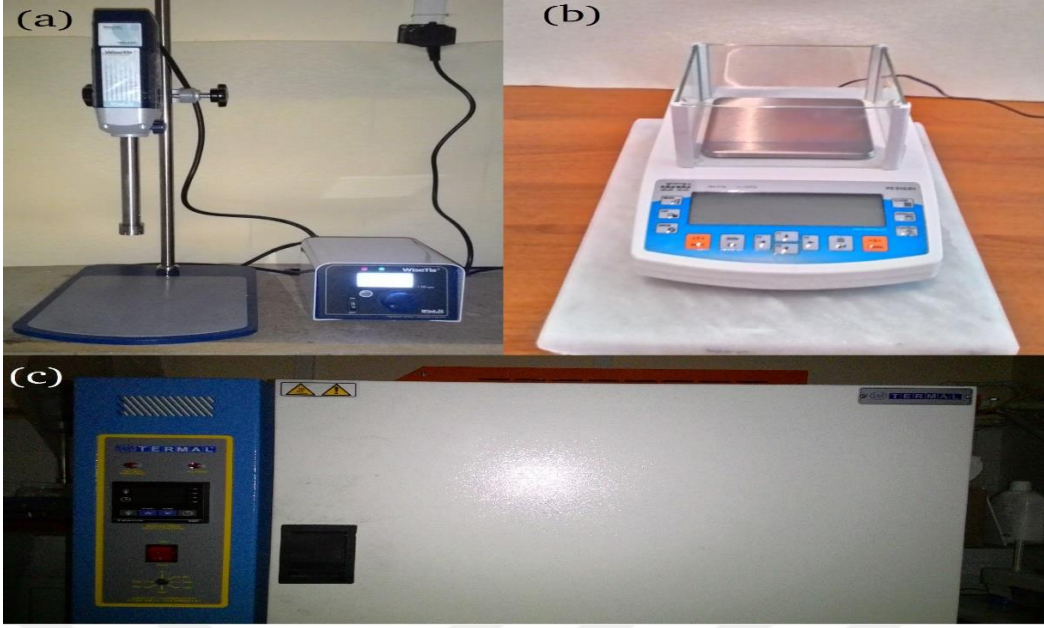
Tornalama deneyleri sırasında kuvvetlerin ölçümü için Kistler marka 9257B model dinamometre ve Kistler marka 5233A model kontrol paneli kullanılmıştır. Ölçülen kuvvet değerleri DynoWare yazılımı aracılığıyla bilgisayar ortamında işlenmiştir. Bu çalışmada ölçülen kuvvet değerleri talaş kaldırma işlemlerinin değişen ilerleme, kesme hızı değerleri ve yağlama koşullarının karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır.



**Şekil 2.5** Deney düzeneğinin iki boyutlu çizimi ve gerçek görünüşleri

Tornalama işlemlerinden sonra işlenen numunelerin yüzey pürüzlülüklerinin ölçülmesi amacıyla Mitutoyo marka SJ-210 model yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır.

Nanoakışkanların hazırlanmasında kullanılan nano parçacıkların tartılmasında Şekil 2.6'da görülen 1 mg hassasiyetli maksimum 510 g tartma kapasiteli, Radwag marka PS 510.R1 model hassas terazi kullanılmıştır. Nano grafen ve nano MoS<sub>2</sub> nano parçacıkları, Şekil 2.6'da verilen Termal marka ve G11420SD model etüv aracılığıyla kurutulmuşlardır. Nano akışkanların hazırlanması sırasında nano parçacıkların ticari bitkisel kesme sıvısına katılarak homojenizasyonunu sağlamak amacıyla, maksimum 15000 dev/dak hıza, 50-2500 ml sıvı hacmi çalışma aralığına ve AISI 304 paslanmaz çelik karıştırma ucuna sahip Daihan marka WiseTis HG-15D model dijital homojenizatör kullanılmıştır. Dijital homojenizatörün fotoğrafı şekil 2.6'da verilmiştir.



Şekil 2.6 Deneyleerde kullanılan a) dijital homojenizatör, b) hassas terazi, c) etüv

### 2.3 Nanoakışkanların Hazırlanması

Kullanılacak nano grafen ve nano MoS<sub>2</sub> parçacıklar, nemlerinin alınması amacıyla etüvde 120°C sıcaklıkta 1 saat ısıya dayanıklı cam kaba serilerek kurutulmuştur. Kurutulan nano parçacıkların oda sıcaklığına kadar soğutma işlemi fırında bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Daha sonra, kurutulan nano parçacıklar, ağırlıkça %0,8 oranında ticari bitkisel kesme sıvısına katılmıştır. Hibrit nanoakışkan hazırlanırken ise ağırlıkça %0,4 nano grafen ve ağırlıkça %0,4 nano MoS<sub>2</sub> ticari bitkisel kesme sıvısına katılmıştır. Karışımların homojenliğini artırmak ve çökelme süresini uzatmak amacıyla, nano grafen katkılı nanoakışkanlara nano parçacık ağırlığının %0,1 oranında SDS (Sodyum Dodesil Sülfat) yüzey etkin madde olarak ve nano MoS<sub>2</sub> katkılı nanoakışkanlara parçacık ağırlığının 2 katı kadar lesitin emülsifer olarak eklenmiştir. Malzemelerin belirtilen oranlarda hazırlanması hassas terazi ve ölçekli kaplar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan karışımlar, 5000 dev/dak devirde 1 saat dijital homojenizatör kullanılarak karıştırılmış ve homojen bir karışım elde edilmiştir.

### 2.4 Deneysel Çalışma

Ortogonal tornalama deneyleri sırasında üç farklı kesme hızı (120 m/dak, 170 m/dak ve 220 m/dak), üç farklı ilerleme miktarı (0,1 mm/dev, 0,15 mm/dev, 0,2 mm/dev), üç farklı kesme derinliği (0,1 mm, 0,15 mm, 0,2 mm) ve beş farklı yağlama koşulu

(kuru, bitkisel MMY, nano MoS<sub>2</sub> MMY, nano grafen MMY ve hibrit MMY) kullanılmıştır. MMY cihazının akış hızı 30 ml/saat, çalışma basıncı ise 5 bardır. MMY cihazının 1 mm uç yarıçapına sahip nozülü her deney için aynı olacak şekilde 30° açı ve 40 mm mesafeye ayarlanmıştır. Her bir adedi üç kesici ağza sahip kesme uçlarının her bir deney için bir kenarı kullanılmıştır.

**Tablo 2.4.** Ortogonal tornalama parametreleri

<b>Tornalama şartları</b>	Kuru, MQL, Nanoakışkan MQL
<b>Nano parçacıklar</b>	Nano grafen, nano MoS <sub>2</sub>
<b>Nano parçacık % oranları</b>	Nano grafen ve nano MoS <sub>2</sub> ağırlıkça %0,8, hibrit için ağırlıkça %0,4-%0,4
<b>MMY akış hızı</b>	30 ml/saat
<b>MMY basıncı</b>	5 bar
<b>Nozül açısı</b>	30°
<b>Nozül mesafesi</b>	40 mm
<b>Nozül uç çapı</b>	1 mm
<b>Kesici takım</b>	3 ağızlı karbür kaplamalı tornalama ucu
<b>Kesme hızı</b>	120-170-220 m/dak
<b>İlerleme</b>	0,1-0,15-0,2 mm/dev
<b>Kesme genişliği</b>	3 mm

Her bir şart için elde edilen tüm çıktılar dijital ortamda kaydedilmiştir.

## SÜRDÜRÜLEBİLİR İNDİS HESAPLAMALARI

Bu bölümde, sürdürülebilir indisler olarak belirlenen karbon emisyon miktarları ve toplam talaşlı imalat maliyetlerinin hesaplanmaları detaylı olarak açıklanmıştır.

### 3.1 Karbon Emisyon Miktarlarının Hesaplanması

AISI 310S paslanmaz çeliğinin tornalamasında çevreye salınan toplam karbon emisyon miktarının bulunması için elektrik tüketiminden kaynaklı karbon emisyon miktarı, kullanılan kesici takımın üretiminden dolayı salınan karbon emisyon miktarı, paslanmaz çelik malzeme üretiminden dolayı salınan karbon emisyon miktarı, paslanmaz çelik malzemenin talaşının geri dönüşümü kaynaklı karbon emisyon miktarı ve soğutucu-yağlayıcı kullanılmasından kaynaklı karbon emisyon miktarı hesaplanmış ve Denklem 1.1'e göre toplam karbon emisyon miktarı bulunmuştur [38].

$$CE_{top} = CE_{el} + CE_{tak} + CE_{mal} + CE_{tal} + CE_{soğ/yağ} \quad (1.1)$$

Elektrik kullanımından kaynaklı karbon emisyon salınımının bulunması için kullanılan toplam enerji ve elektrik karbon emisyon faktörü ( $CEF_{el}$ ) bilinmelidir. Elektrik kullanımından kaynaklı karbon emisyon miktarı Denklem 1.2'de verildiği gibi hesaplanır [38].

$$CE_{el} = CEF_{el} \times E_{top} \quad (1.2)$$

Burada,  $CEF_{el} = 0,5434$  olarak alınmıştır [39]. Bir talaşlı imalat işleminde kullanılan toplam enerji talaş kaldırma işlemi için gerekli enerji, takım geri dönüşü için harcanan enerji, takım ve iş parçasının ayarlanması için harcanan enerji ve soğutucu yağlayıcı kullanımı için gerekli enerjinin toplanmasıyla hesaplanmaktadır [38]. İlgili bağıntı Denklem 1.3'te verilmiştir.

$$E_{top} = E_c + E_{geridönüş} + E_{ayar} + E_{soğ/yağ} \quad (1.3)$$

Talaş kaldırma enerjisinin hesaplanabilmesi için talaş kaldırma için gerekli güç ve işleme süresi bilinmelidir. İlgili bağıntı Denklem 1.4'te verilmiştir.

$$E_c = P_c \times t_c \quad (1.4)$$

Talaş kaldırma için gerekli güç ise kesme kuvveti, kesme hızı ve talaş kaldırma süresi ile ilişkilidir. Talaş kaldırma için gerekli güç Denklem 1.5'e göre hesaplanır [38].

$$P_c = \frac{(F_c \times V_c)}{60000} \quad (1.5)$$

Takım geri dönüş enerjisinin hesaplanması için takımı geri döndürmek için gerekli güç ve geri dönüş süresince geçen zaman bilinmeli ve Denklem 1.6 kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$E_{geridönüş} = P_{geridönüş} \times t_{geridönüş} \quad (1.6)$$

Geri dönüş gücü  $P_{geridönüş}$  0,4 kW olarak kabul edilmiştir [31]. Takım geri dönüş süresi ise 2 saniye olarak ölçülmüştür.

Takım ve iş parçası ayarlanması için gerekli enerji ise ayarlama gücü ve ayarlama zamanının çarpılmasıyla Denklem 1.7'de verildiği gibi bulunur.

$$E_{ayar} = P_{ayar} \times t_{ayar} \quad (1.7)$$

Ayarlama enerjisi 0,4 kW olarak kabul edilmiştir [31]. Ayarlama süresi ise ortalama 180 saniye olarak ölçülmüştür.

Soğutucu/yağlayıcı kullanımı için gerekli enerji ise soğutucu yağlayıcı kullanımı için gerekli gücün yağlama süresi ile çarpılmasıyla elde edilir. İlgili bağıntı Denklem 1.8'de verilmiştir.

$$E_{soğ/yağ} = P_{soğ/yağ} \times t_{soğ/yağ} \quad (1.8)$$

Soğutucu/yağlayıcı kullanımı için gerekli güç 0,425 kW olarak kabul edilmiştir [31]. Yağlama süresi için her talaş kaldırma işleminin süresiyle eşit kabul edilmektedir.

Kesici takımın üretiminden kaynaklı salınan karbon emisyon miktarının hesaplanması için talaş kaldırma süresi, takım ömrü, kesici takım karbon emisyon faktörü ve kesici takım kütlesi bilinmelidir [38]. İlgili bağıntı Denklem 1.9'da verilmiştir.

$$CE_{tak} = \left( \frac{t_c}{T_{tak}} \right) \times CEF_{tak} \times W_{tak} \quad (1.9)$$

Talaşlı imalat süresi her işlem için talaş kaldırma parametrelerine bağlı olarak değişmektedir. Bu süre Denklem 1.10'e göre her işlem için hesaplanmıştır. Ayrıca talaş kaldırma süreleri her bir kesme şartı için Denklem 1.10 kullanılarak hesaplanır.

$$t_c = \frac{L}{f \times N} \quad (1.10)$$

Burada L kesme uzunluğunu, f ilerlemeyi, N ise tezgâh devrini sembolize etmektedir (Denklem 1.11). Aynı zamanda tezgâh devri kesme hızı (V) ve talaş kaldırılan parçanın çapı (D) yardımıyla da hesaplanabilir.

$$N = \frac{1000 \times V}{\pi \times D} \quad (1.11)$$

Paslanmaz çelik malzemenin kuru kesme şartından işlenmesinde takım ömrü Qehaja ve Kyçku tarafından önerilen Denklem 1.12 kullanılarak hesaplanmıştır [40].

$$T_{tak} = 1821,634 \times V^{-0,825} \times f^{0,769} \times a_p^{-0,248} \quad (1.12)$$

Çalışmamızda kuru kesme şartı ile sadece bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MMY, bitkisel kesme sıvısına nano MoS<sub>2</sub> parçacıklar katılarak hazırlanan nanoakışkan MMY, nano grafen parçacıklar katılarak hazırlanan nanoakışkan MMY ve her ikisinin birden katıldığı hibrit nanoakışkan MMY yağlama koşulları uygulanmıştır. Bitkisel kesme sıvısı ve katılan her nano parçacık kesici takım ömründe değişikliğe sebep olmaktadır. Sadece bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MMY'de kesici takım ömrü kuru kesme koşuluna göre yaklaşık %22 artmaktadır [41]. Nano MoS<sub>2</sub> takviyeli nanoakışkan kullanılmasıyla takım ömrü kuru kesme koşuluna göre yaklaşık %27,9 artmaktadır [42]. Nano grafen takviyeli nanoakışkan kullanıldığında takım ömrü kuru kesme şartına göre yaklaşık %65,63 artmaktadır [43]. Literatürde nano MoS<sub>2</sub> ve nano grafen parçacıklarının karıştırılmasıyla oluşturulan hibrit nanoakışkanın kullanıldığı ve takım ömrü çalışıldığı bir çalışma mevcut olmadığından hibrit nanoakışkanın kuru kesmeye göre takım ömrüne etkisinin belirlenebilmesi için yapılan deneysel çalışmaların sonuçlarından yola çıkılarak bir yaklaşımda bulunulmuştur. Buna göre hibrit nanoakışkanın kuru kesme koşuluna göre takım ömrünü yaklaşık %47,29 uzattığı belirlenmiştir.

Kesici takım karbon emisyon faktörünün hesaplanması için elektrik karbon emisyon faktörü, kesici takımın enerji tüketim sabiti ve kesici takım kütlesi bilinmelidir [38]. İlgili bağıntı Denklem 1.13'te verilmiştir.

$$CEF_{tak} = \left( \frac{CEF_{el} \times K}{3.6} \right) \times \left( \frac{1000}{W_{tak}} \right) \quad (1.13)$$

Burada kesici takım enerji tüketim sabiti  $K=1.5$  MJ kabul edilmiştir [44].

AISI 310S paslanmaz çelik malzemenin üretiminden kaynaklı karbon emisyon miktarının bulunması için paslanmaz çelik malzemenin karbon emisyon faktörü ve kaldırılan talaşın kütlesi bilinmelidir [38]. İlgili bağıntı Denklem 1.14'te verilmiştir.

$$CE_{mal} = CEF_{mal} \times M_{talaş} \quad (1.14)$$

Talaş kütlesi kesme hızı, kesme derinliği, ilerleme ve talaş kaldırma süresine göre değişiklik göstermektedir. Burada paslanmaz çelik malzemenin karbon emisyon faktörü ( $CEF_{mal}$ ) 6,15 olarak kabul edilmiştir [45]. Talaş kütlesinin bir işlem için bulunması için Denklem 1.15 kullanılmaktadır [38].

$$M_{talaş} = V \times f \times a_p \times t_c \times \rho \quad (1.15)$$

Talaş kütlesinin hesaplanması için kullanılan formülde tek sabit malzeme yoğunluğudur. Malzeme yoğunluk değeri  $7,9 \text{ g/cm}^3$  olarak alınmıştır [46].

AISI 310S paslanmaz çelik malzemenin tornalanması sırasında kaldırılan talaşın geri dönüşümünden kaynaklı salınan karbon emisyon miktarının hesaplanması için talaş kütlesinin yanında paslanmaz çelik malzeme talaşının karbon emisyon faktörünün bilinmesi gerekmektedir. Talaş tarafından salınan karbon emisyon miktarının belirlenmesi için Denklem 1.16 kullanılmaktadır [38].

$$CE_{tal} = CEF_{tal} \times M_{talaş} \quad (1.16)$$

Paslanmaz çelik malzeme talaşının karbon emisyon faktörü  $CEF_{tal}=0,44$  olarak kullanılmıştır [45].

Soğutucu/yağlayıcı kullanımından kaynaklı çevreye salınan karbon emisyon miktarının belirlenmesi için kesme sıvısının karbon emisyon faktörü, kesme sıvısının debisi ve yağlama süresi bilinmelidir. Soğutucu/yağlayıcı karbon emisyon miktarı Denklem 1.17 ile hesaplanmaktadır [38].

$$CE_{soğ/yağ} = CEF_{soğ/yağ} \times Q_{soğ/yağ} \times t_{soğ} \quad (1.17)$$

Çalışmamızda kullanılan MMY cihazının debisi tüm kesme şartları için 30 ml/h olarak ayarlanmıştır. Yağlama işlemi talaş kaldırma işlemi boyunca yapılacağı için yağlama zamanı her bir işlemin kendi talaş kaldırma süresine eşit seçilmiştir. Burada bilinmeyen tek parametre soğutucu/yağlayıcının karbon emisyon faktörüdür. MMY sırasında kullanılan bitkisel esaslı kesme sıvısının karbon emisyon faktörü 0,36 kgCO<sub>2</sub>/kg olarak alınmıştır [47]. Nano grafen parçacıkların kullanılmasından kaynaklı karbon emisyon faktörü ise 1532 kgCO<sub>2</sub>/kg olarak kullanılmıştır [39,45]. Nano MoS<sub>2</sub> parçacıklar için literatürde kayıtlı bir karbon emisyon faktörü bulunamadığı için bu şartlarda nano parçacıkların karbon emisyon faktörlerinin aynı olduğu kabul edilmiştir.

### 3.2 Toplam Talaşlı İmalat Maliyetinin Hesaplanması

Paslanmaz bir çeliğin sürdürülebilir tornalanmasının toplam talaşlı imalat maliyet hesabı yapılırken; talaşlı imalat, kesici takım, soğutucu/yağlayıcı, enerji ve ekolojik (çevreye verilen toplam zarar) maliyetler ayrı ayrı hesaplanarak toplanır ve toplam talaşlı imalat maliyeti ortaya koyulur [38]. İlgili bağıntı Denklem 2.1'te verilmiştir.

$$C_{top} = C_{talaşlı} + C_{takım} + C_{soğ/yağ} + C_{enerji} + C_{çevre} \quad (2.1)$$

Talaşlı imalat maliyeti; talaşlı imalat için harcanan toplam zamanın işçilik ve genel giderlerin toplamının çarpımı ile elde edilir [38]. İlgili bağıntı Denklem 2.2'te verilmiştir.

$$C_{talaşlı} = T_{top} \times (x + y) \quad (2.2)$$

Burada x; işçilik maliyetini, y ise genel giderleri ifade etmektedir. Çalışmamızda birim brüt işçilik maliyeti 17 \$/saat karşılığında Türk lirası kabul edilmiş olup genel giderler ise 90 TL/saat olarak kabul edilmiştir.

Talaşlı imalat için harcanan toplam zaman ise; tornalama işlemi öncesi kesici takımın ayarlanması için harcanan süre, talaş kaldırma süresi ve kesici takımın geri dönüş süresinin toplanması ile bulunur ve toplam üç bileşenden oluşur [38]. İlgili bağıntı Denklem 2.3'te verilmiştir.

$$T_{top} = t_{ayar} + t_c + t_{geridönüş} \quad (2.3)$$

Talaş kaldırma süreleri deneyler sırasında kayıt altına alınmış olup ayarlama süresi  $t_{ayar} = 2$  s, geri dönüş süresi  $t_{geridönüş} = 180$  s olarak ölçülmüştür. Talaş kaldırma süresi karbon emisyon hesaplamalarındaki Denklem 1.10 yardımıyla hesaplanabilir.

Kesici takım maliyetinin hesaplanmasında ise birim kesici takım fiyatı, talaş kaldırma süresi ve takım ömrü etkindir. Takım ömrü her kesme hızı, ilerleme ve yağlama koşulunda farklı davranış göstereceği için kesici takım maliyeti de her koşul için farklılık gösterecektir [38]. İlgili bağıntı Denklem 2.4'te verilmiştir.

$$C_{takım} = Z_1 \times \frac{t_c}{T_{tak}} \quad (2.4)$$

Kullanılan kesici ucun birim fiyatı 12 TL/adet'dir. Talaş kaldırma süreleri Denklem 2.4'e göre hesaplanmıştır. Takım ömrü ise Qehaja ve Kyçyku tarafından geliştirilen Denklem 2.4 ile hesaplanmıştır [40].

$$T_{takım} = 1821,634 \times V^{(-0,825)} \times f^{(-0,769)} \times a_p^{(-0,248)} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'de, kesme hızı (V), ilerleme (f) ve kesme derinliğinin ( $a_p$ ) etkili olduğu görülmektedir.

Soğutucu/yağlayıcı maliyeti ise soğutucu/yağlayıcı birim maliyeti, akış hızı ve talaş kaldırma süresi ile ilişkilidir [38].

$$C_{soğ/yağ} = Z_2 \times Q \times t_c \quad (2.6)$$

Çalışmamızda kullandığımız soğutucu/yağlayıcı birim maliyeti  $z_2 = 70$  TL/litre ve akış hızı (debi) 30 ml/saat olup talaş kaldırma süresi ise her koşula göre farklılık göstermektedir.

Enerji maliyeti hesaplamalarında ise toplam enerji maliyeti harcanan toplam enerjinin birim enerji maliyeti ile çarpılmasıyla bulunur ve her talaş kaldırma işlemi için farklılık göstermektedir [38]. İlgili bağıntı Denklem 2.7'te verilmiştir.

$$C_{enerji} = E_{top} \times Z_3 \quad (2.7)$$

EnerjiSA'nın İstanbul sanayi bölgeleri için sağladığı elektrik enerjisinin birim fiyatı olan 1,005 TL/saat fiyatı çalışmamızda birim elektrik enerjisi fiyatı olarak kabul edilmiş ve harcanan enerji miktarları her talaş kaldırma işlemi için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Ekolojik maliyet hesaplamalarında ise; her bir talaş kaldırma işleminde çevreye salınan karbon miktarı olan karbon emisyon miktarı ve çevreye zarar verme maliyeti etkili olmaktadır [38]. İlgili bağıntı Denklem 2.8’de verilmiştir.

$$C_{\text{çevre}} = z_4 \times CE_{\text{top}} \quad (2.8)$$

Toplam karbon emisyon miktarı değerleri bir önceki bölümde hesaplanıp tablolarla verilmiştir. Bu değerler toplam karbon emisyon miktarı verileri olarak kabul edilmiş ve çevreye zarar verme maliyeti olan  $z_4 = 217,5$  TL/ton olarak alınıp hesaplamalar yapılmıştır [38].



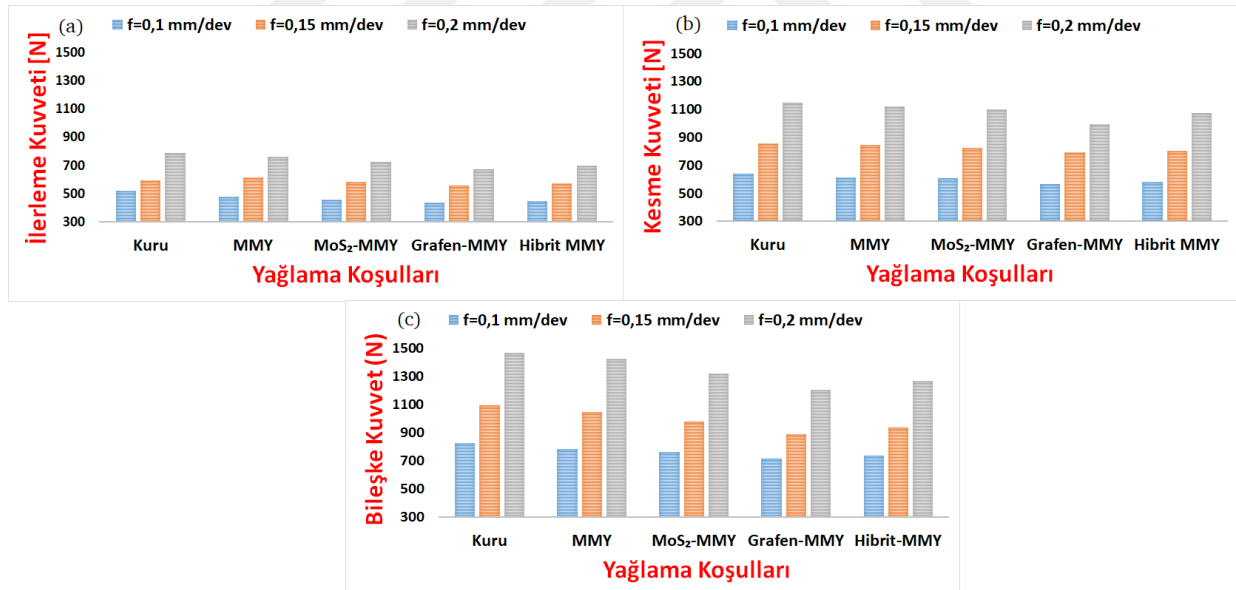
## DENEYSSEL VE SÜRDÜRÜLEBİLİR İNDİS SONUÇLARI

Bu bölümde, kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülüğü deney sonuçları ile karbon emisyonu ve toplam talaşlı imalat maliyeti sürdürülebilir indis sonuçları verilmektedir.

### 4.1 Kesme Kuvvetleri

Kesme kuvvetleri, ilerleme kuvvetleri ve dolayısıyla bileşke kuvvetlerinin artan ilerleme ile artması, artan kesme hızı ile azalması beklenmektedir [47]. Ayrıca kuru şartlarda oluşacak kuvvetlerin yağlama ve yağlama yapılan şartlara göre daha yüksek kuvvet değerleri (kesme kuvveti ve ilerleme kuvveti) çıktısı vermesi beklenir.

Bu çalışma sırasında ölçülen kuvvet verilerinin farklı kesme hızı, ilerleme ve yağlama koşullarına göre değişimleri Şekil 4.1'te verilmektedir.

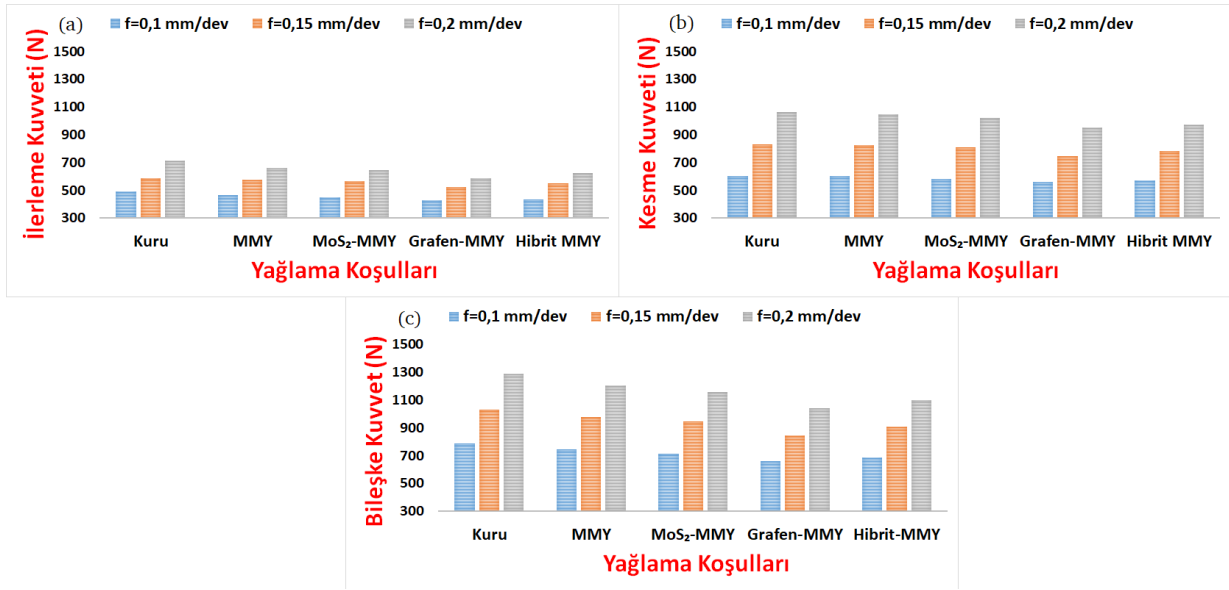


Şekil 4.1 Kesme hızı 120 m/dak için a) ilerleme kuvveti, b) kesme kuvveti, c) bileşke kuvvet sonuçları

Şekil 4.1'den görüldüğü üzere sabit kesme hızı ( $V_c=120$  m/dak) değerinde artan ilerlemeyle beraber kesme kuvvetleri artmaktadır. Aynı kesme hızı ve aynı ilerleme değerlerinde yağlama koşulları incelendiğinde en yüksek kesme kuvvetlerinin, soğutucu/yağlayıcı kullanılmayan kuru kesme koşullarında olduğu görülmektedir.

Kuru kesme koşulunu sırasıyla sadece bitkisel esaslı kesme sıvısının kullanıldığı MMY koşulu, nano MoS<sub>2</sub> parçacıklarının kullanıldığı nanoakışkan MMY koşulu, hibrit nanoakışkan koşulu ve nano grafen parçacıklarının kullanıldığı nanoakışkan MMY yöntemi takip etmektedir.

Bitkisel esaslı kesme sıvılarının kullanıldığı MMY yönteminde bitkisel esaslı kesme sıvıları kuru kesme şartına göre takım ve iş parçası arasına nüfuz ederek kesme bölgesinde oluşan ısıyı düşürür ve sürtünmeyi azaltır [12]. Bitkisel esaslı kesme sıvısının yağlayıcı etkisi kuru şartta yapılan kesme işlemlerine göre kesme kuvvetlerinde düşüşe neden olmuştur [9, 15]. Nano MoS<sub>2</sub> parçacıkları ise bitkisel esaslı kesme sıvısına katıldığında yapısındaki kristal taneciklerin birbirine göre yaptıkları kayma hareketi sayesinde kesme sıvısının yağlayıcı özelliğini artırmış ve kesme kuvvetlerinde kuru ve sadece bitkisel esaslı kesme sıvısının kullanıldığı kesme şartlarına göre bir düşüşe sebep olmuştur [48]. Nano grafen parçacıklar ise yağlayıcı özelliğinin yanına sıra çok iyi bir termal iletkenlik sağlamaktadır [49]. Bu termal iletkenlik sayesinde kesme bölgesinde oluşan ısı hızlıca kesme bölgesinden uzaklaştırılır. Bunun için nano grafen katkılı akışkan kullanılan yağlama şartı kesme kuvvetlerinde en düşük değerlerin elde edilmesine imkân sağlamıştır. Ağırlıkça eşit miktarda nano MoS<sub>2</sub> ve nano grafen parçacıkların kullanıldığı hibrit nanoakışkan yağlama koşulunda ise kesme kuvvetleri tek bir nano parçacığın (sadece MoS<sub>2</sub> veya sadece grafen) kullanıldığı yağlama koşullarının arasında kesme kuvveti değerlerinin elde edilmesine imkân sağlamıştır. Artan kesme hızı ile kesme kuvvetlerinin azalacağı bilinmektedir. Yaptığımız çalışmada kesme hızını 120 m/dak'dan 170 m/dak'ya yükselttiğimizde Şekil 4.2'deki kesme kuvvetleri elde edilmiştir.

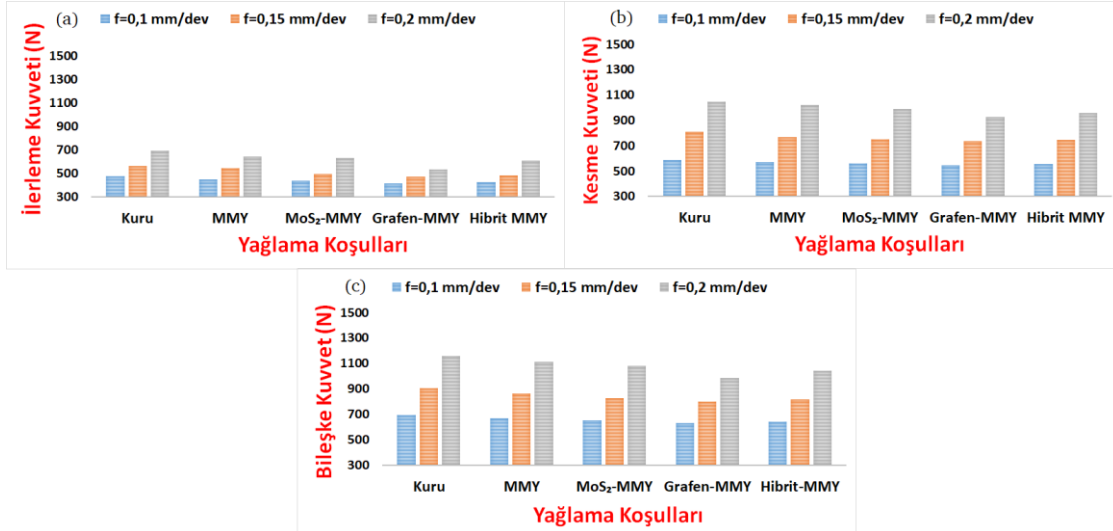


**Şekil 4.2** Kesme hızı 170 m/dak için a) ilerleme kuvveti, b) kesme kuvveti, c) bileşke kuvvet sonuçları

Şekil 4.2'den görüldüğü üzere kesme hızı yükseldiğinde ( $V_c=120$  m/dak'dan  $V_c=170$  m/dak'ya) ortaya çıkan kesme kuvvetlerinde düşüş gözlemlenmektedir. Sabit kesme hızında ( $V_c=170$  m/dak) elde edilen kesme kuvvetleri ise  $V_c=120$  m/dak'daki sonuçlarla benzerdir. Artan ilerleme ile kuvvetler artmışsa da yağlama koşullarına göre benzer eğilimde sonuçlar elde edilmiştir. En yüksek kuvvet değerleri kuru kesme şartında, sonrasında ise sırasıyla; sadece bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MMY, nano MoS<sub>2</sub> parçacık takviyeli nanoakışkan kullanılan MMY, hibrit nanoakışkan kullanılan MMY ve nano grafen takviyeli nanoakışkan kullanılan MMY şartlarında gözlemlenmiştir. Aynı şekilde bir önceki kesme hızına göre ( $V_c=120$  m/dak) aynı ilerleme değerlerinde artan kesme hızıyla beraber kuvvetlerin azaldığı gözlemlenmiştir ve bu beklenen bir sonuçtur. Kesme hızı 120 m/dak'dan 170 m/dak'ya yükseltildiğinde kuru kesme koşulunda ve 0,15 mm/dev ilerleme miktarında bileşke kuvvet yaklaşık %6, MoS<sub>2</sub> nanoakışkan yağlama koşulu ve 0,1 mm/dev ilerleme miktarında bileşke kuvvet yaklaşık %7, hibrit nanoakışkan kullanılan yağlama koşulu ve 0,2 mm/dev ilerleme miktarında bileşke kuvvet yaklaşık %14 azalırken, en büyük düşüş ise grafen nanoakışkanın kullanıldığı yağlama şartı ve 0,2 mm/dev ilerleme miktarında görülmüştür. Bu talaş kaldırma şartlarında bileşke kuvvet yaklaşık %18 azalmıştır. Nanoakışkanların artan kesme hızıyla beraber özelliklerinde bir kayıp olmadığı, kesme

hızından bağımsız olarak yağlayıcı ve soğutucu özelliklerini korudukları ve kuvvetler üzerinde olumlu bir etki yaparak düşüş sağladıkları gözlemlenmiştir.

Kesme hızının 220 m/dak'ya artırıldığı durumda elde edilen kesme kuvvetleri Şekil 4.3'te görülmektedir.



**Şekil 4.3** Kesme hızı 220 m/dak için a) ilerleme kuvveti, b) kesme kuvveti, c) bileşke kuvvet sonuçları

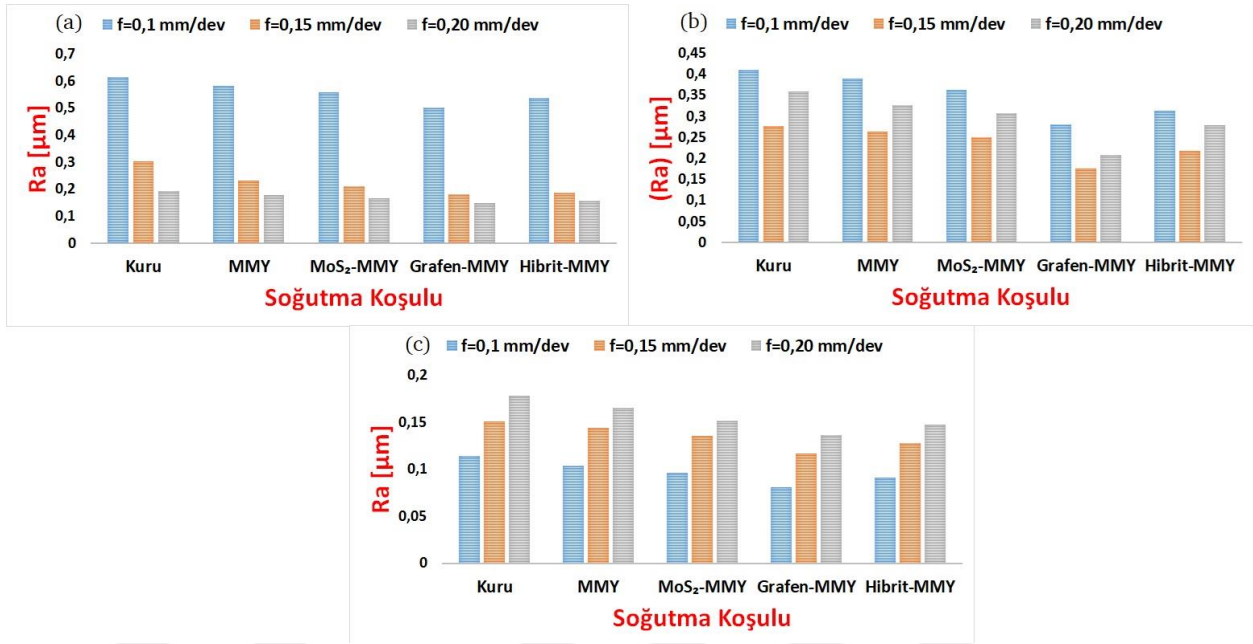
Şekil 4.3'te verildiği gibi üç farklı kesme hızı koşulunda ( $V_c=120$  m/dak,  $V_c=170$  m/dak ve  $V_c=220$  m/dak) en düşük kuvvet değerleri kesme hızının 220 m/dak olduğu koşulda elde edilmiştir. Diğer tüm parametrelerin etkisi ise diğer iki kesme hızı koşulundakilerle aynıdır. İlerleme arttıkça kesme kuvvetleri artmış, yağlama koşullarına bağlı olarak ise diğer kesme hızı sonuçlarına paralel olarak azalma gözlemlenmiştir. Kesme hızı 170 m/dak'dan 220 m/dak değerine yükseltildiğinde grafen nanoakışkan kullanılan yağlama şartında tüm ilerleme miktarı değerlerinde bileşke kuvvetler yaklaşık %6 azalmıştır. Aynı şekilde kuru kesme şartında bileşke kuvvetler tüm ilerleme miktarı değerlerinde yaklaşık %11 azalmıştır. Sadece bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MMY'de ilerleme değeri 0,15 mm/dev iken bileşke kuvvet bir önceki kesme hızına ( $V_c=170$  m/dak) göre yaklaşık %11 azalmıştır. En büyük düşüş ise MoS<sub>2</sub> nanoakışkan kullanılan yağlama şartında gözlemlenmiştir. İlerleme miktarı 0,15 mm/dev iken bileşke kuvvet bir önceki kesme hızına göre ( $V_c=170$  m/dak) yaklaşık %13 azalmıştır. Üç farklı kesme hızına ve üç farklı ilerleme miktarına göre yapılan deneyler sonucunda en düşük kuvvet değerlerinin nano grafen katkılı nanoakışkan

kullanılan yağlama şartında elde edildiği gözlemlenmiştir. Bunun sebebi ise açıklandığı üzere nano grafen parçacıkların iyi bir yağlayıcı olmasının yanı sıra çok iyi bir termal iletkenlik sağlamasıdır. Bu iyi termal iletkenlik sayesinde kesme bölgesinde oluşan ısı etkin bir şekilde kesme bölgesinden uzaklaştırılmış, yağlayıcılık özelliği sayesinde ise takım-iş parçası arası sürtünmeler azaltılmıştır. Tüm bu olumlu etkiler kesme kuvvetlerinin azalmasına neden olmuş ve daha kolay talaş kaldırma işlemi gerçekleştirilmesine imkân sağlamıştır.

Kuru şart ile kıyaslandığında bileşke kuvvetler ortalama olarak sırasıyla; bitkisel esaslı kesme sıvısı kullanılan MMY koşulunda %5, nano MoS<sub>2</sub> parçacıklarının kullanıldığı nanoakışkan MMY koşulunda %10, nano grafen parçacıkların kullanıldığı nanoakışkan MMY koşulunda %16, hibrit nanoakışkan koşulunda ise %13 azalmıştır.

#### **4.2 Yüzey Pürüzlülüğü**

Talaşlı imalat işlemlerinde, yüzey pürüzlülük değerlerinin artan ilerleme miktarı ile artacağı bilinmektedir [50,51]. Bu çalışmada, her deney koşulu için 10 farklı bölgeden yüzey pürüzlülüğü ölçümü yapılmış ve aritmetik ortalaması alınarak yüzey pürüzlülük sonuçları elde edilmiştir. Ancak, Şekil 4.4(a).’da görüldüğü üzere yüzey pürüzlülük değerleri ilerleme miktarının en düşük olduğu değerde (0,1 mm/dev) en yüksek olarak gözlemlenmiştir. Artan ilerleme miktarı ile yüzey pürüzlülüğü azalmış, yağlama şartlarına göre de değişkenlik göstermiştir. Yüzey pürüzlülük değerleri kesme kuvvetleri sonuçlarındaki gibi azalış eğilimindedir. Minimum yüzey pürüzlülüğü değerleri en yüksek kesme hızı olan 220 m/dak değerinde gözlemlenmiştir. 220 m/dak kesme hızında artan ilerleme ile yüzey pürüzlülük değerleri artmış ve literatürle uyumlu hale gelmiştir. [49,50,51,52]



**Şekil 4.4** Yüzey pürüzlülük sonuçları a)  $V_c=120$  m/dak, b)  $V_c=170$  m/dak, c)  $V_c=220$  m/dak

Aynı kesme hızı ve aynı ilerleme miktarı değerlerinde en yüksek yüzey pürüzlülük değeri soğutucu/yağlayıcı kullanılmayan kuru kesme şartında elde edilmiştir. Kuru kesme koşulunu sırasıyla sadece bitkisel esaslı kesme sıvısının kullanıldığı MMY, nano MoS<sub>2</sub> katkılı nanoakışkanının kullanıldığı MMY, hibrit nanoakışkanın kullanıldığı MMY ve nano grafen katkılı nanoakışkanın kullanıldığı MMY takip etmiştir. Bu durumun sebepleri ortama gönderilen yağlayıcının farklı termal iletkenlik ve yağlayıcılık özellikleri göstermektedir.

Bitkisel esaslı kesme sıvısı, kuru kesme şartıyla karşılaştırıldığında iş parçası-takım arası sürtünmeyi azaltır ve yüzey pürüzlülük değerini düşürür. Nano MoS<sub>2</sub> parçacıklar, katıldığı bitkisel esaslı kesme sıvısının yağlayıcılık özelliğini artırır ve bu sayede; sadece bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MMY ve kuru kesme koşuluna göre daha düşük yüzey pürüzlülük değerlerinin elde edilmesine olanak sağlar. Nano grafen parçacıklar ise yağlayıcılık özelliğinin yanı sıra çok iyi bir termal iletkenlik özelliği sağladığı için kesme bölgesindeki ısıları uzaklaştırır ve yüzeyin, oluşacak kesme ısısından olumsuz etkilenmesini önemli ölçüde önler.

Bu etkiler sayesinde en düşük yüzey pürüzlülük değerleri nano grafen parçacıklarının kullanıldığı nanoakışkan MMY yönteminde gözlemlenmiştir. Hibrit nanoakışkan

koşulunda ise kuvvet sonuçlarında olduğu gibi sadece bir nano parçacık kullanılan nanoakışkan MMY yağlama şartlarının arasında yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür.

Literatür incelendiğinde ilerleme miktarının yüzey pürüzlülüğü üzerinde en etkili parametrelerden olduğu görülmektedir. İlerleme miktarının en düşük olduğu değerlerde yüzey pürüzlülük değerlerinin en düşük değerlerde olması beklenmektedir [52, 53]. Ancak elde edilen deneysel sonuçlar bu durum ile uyuşmamaktadır. Bunun sebebi olarak paslanmaz çelik gibi sünek malzemelerin tornalanmasında görülen yığıma ağız (BUE) olduğu belirtilmelidir. Talaş dibinde ya da kesici takımında gözlemlenen bu oluşum yüzey kalitesini olumsuz etkileyerek yüzey pürüzlülük değerlerini artırır. Genellikle, belirlenen optimum kesme hızının altında veya üzerinde yapılan tornalama deneylerinde BUE, aşınma gibi etkilerin yüzey pürüzlülüğünü olumsuz etkilediği görülmüştür [54, 55].

Şekil 4.4(b).’de verildiği üzere kesme hızı değeri 170 m/dak ve ilerleme miktarı 0,1 mm/dev iken yüzey pürüzlülük değeri en yüksek olarak ölçülmüştür. Bunun sebebi; bu parametrelerde yığıma ağız oluşumunun hala görülmesidir. Anlaşılacağı üzere yığıma ağız etkisi kesme hızı artırılrsa bile en düşük ilerleme değerinde gözlemlenmeye devam etmektedir.

İlerleme miktarı 0,15 mm/dev değerine artırıldığında yüzey pürüzlülük değerlerinin beklenen rejime girmeye başladığı görülmektedir. Buradan, kesme hızının düşük seçilmek zorunda kalındığı durumlarda ilerleme miktarının minimum tutulmasından kaçınılarak yüzey pürüzlülük değerlerinin iyileştirilebileceği sonucuna varılabilir.

Şekil 4.4(c).’den görülebileceği üzere kesme hızı 220 m/dak değerine yükseltildiğinde elde edilen yüzey pürüzlülük sonuçları literatürle tam uyum halindedir [50,51]. Artan ilerleme ile yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca her kesme hızında ve yağlama koşullarında elde edilen yüzey pürüzlülük değerleri kesme kuvvetleri sonuçları ile benzerdir.

Yağlama koşullarına göre inceleme yapıldığında en iyi yüzey pürüzlülük değerleri nano grafen parçacıkların kullanıldığı nanoakışkan MMY’de elde edilmiştir. Bunun sebebi; daha önce açıklandığı üzere nano grafen parçacıkların, bitkisel esaslı kesme sıvısının yağlayıcılık ve termal iletkenlik özelliklerini artırmasıdır.

AISI 310S paslanmaz çeliğinin ortogonal tornalanmasında, nano grafen katkılı kesme sıvısı kullanılması kesme kuvvetlerini düşürerek yüzey pürüzlülük değerlerinin de azalmasını sağlamıştır.

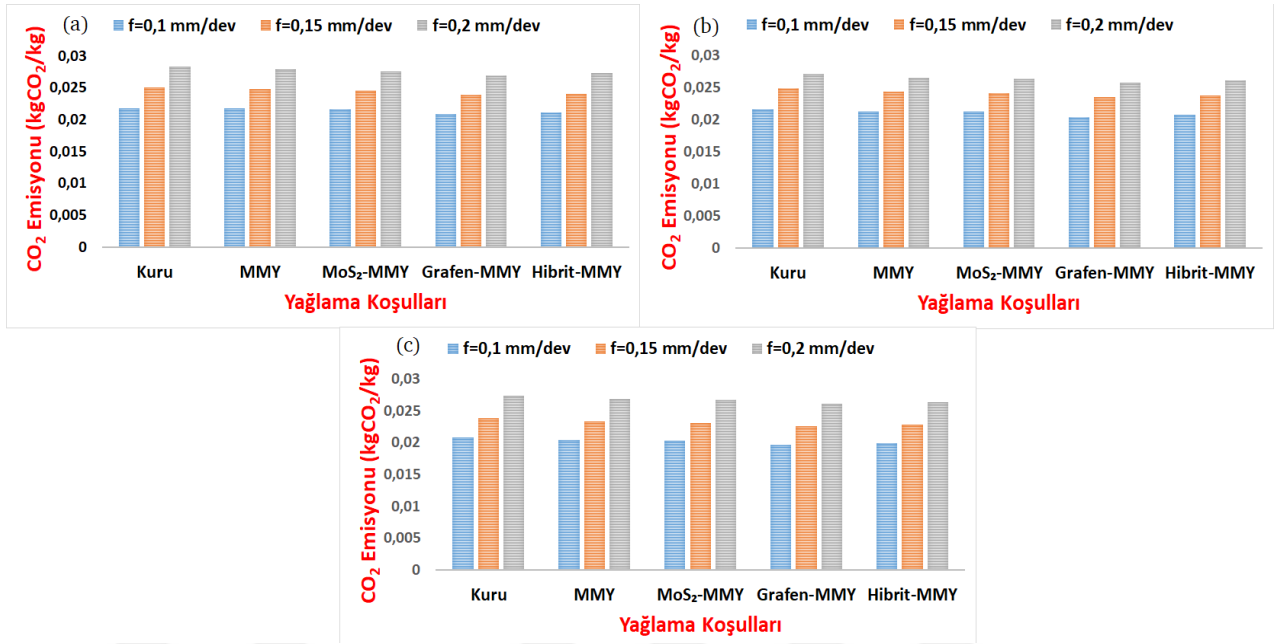
Kuru şart ile kıyaslandığında yüzey pürüzlülük değerleri literatürle paralele eğilimde olan 220 m/dak kesme hızında ortalama olarak sırasıyla; bitkisel esaslı kesme sıvısı kullanılan MMY koşulunda %7, nano MoS<sub>2</sub> parçacıklarının kullanıldığı nanoakışkan MMY koşulunda %14, nano grafen parçacıkların kullanıldığı nanoakışkan MMY koşulunda %26, hibrit nanoakışkan koşulunda ise %18 azalmıştır.

### **4.3 Karbon Emisyonu**

Bir talaşlı imalat işlemi sırasında çevreye salınan karbon miktarı o işlemin çevreye olan zararının ölçülebilmesi için önemli bir parametredir. Bir talaşlı imalat işlemi sonucunda ortaya çıkan karbon emisyon miktarı ne kadar düşükse çevreye verilen zarar da bir o kadar az olacaktır.

Talaşlı imalat işlemindeki toplam karbon emisyonunu oluşturan faktörler sırasıyla elektrik tüketiminden, kesici takımdan, talaşlı imalat yapılan malzemedan, talaş kaldırma işlemi sonrasında oluşan talaştan ve soğutucu/yağlayıcı kesme sıvılarından kaynaklanan karbon emisyon miktarları şeklinde sıralanabilir.

Şekil 4.5(a).’da 120 m/dak kesme hızında üç farklı ilerleme miktarında ve beş farklı yağlama koşulunda yapılan deneyler sonucunda elde edilen karbon emisyon miktarları görülmektedir.



**Şekil 4.5** Karbon emisyon miktarları a) V<sub>c</sub>=120 m/dak, b) V<sub>c</sub>=170 m/dak, c) V<sub>c</sub>=220 m/dak

İlerlemenin artması kesme kuvvetlerini arttırmakta ve artan kesme kuvvetleri ile takım tezgâhı zorlanmakta ve doğal olarak tüketilen enerji miktarı artmaktadır. Aynı şekilde artan kesme kuvvetleri takım ömrünü azaltacak, dolayısıyla da kesici takımdan ortaya çıkan karbon emisyon miktarında artışa sebep olacaktır. Tüm bu etkenler göz önüne alındığında artan ilerleme miktarı ile talaşlı imalat sonucu oluşan karbon emisyon miktarı artacaktır. Kesme hızı 120 m/dak iken kuru kesme koşulunda ilerleme miktarı değeri 0,1 m/dak'dan 0,2 m/dak'ya artırıldığında toplam karbon emisyonu yaklaşık %30 artmıştır. Aynı ilerleme miktarı artışında karbon emisyonu; MoS<sub>2</sub> nanoakışkan kullanılan yağlama koşulunda yaklaşık %27, grafen nanoakışkan kullanılan yağlama koşulunda ise %29 olarak gözlemlenmiştir.

Şekil 4.5(a)'dan görüldüğü üzere 120 m/dak sabit kesme hızında artan ilerleme miktarı ile karbon emisyon miktarında artış olduğu sonucuna varılmıştır. Normal şartlarda, kuru kesme koşulunda herhangi bir soğutucu/yağlayıcı olmaması ve bu soğutucu yağlayıcıların kesme bölgesine gönderilmesi için elektrik tüketen bir cihaza ihtiyaç olmamasına rağmen kuru kesme şartında toplam karbon emisyon miktarı diğer kesme koşullarına göre daha yüksek çıkmıştır. Kesme hızı 170 m/dak ve ilerleme miktarı 0,15 mm/dev iken kuru kesme koşulundaki toplam karbon emisyon miktarı; sadece bitkisel

esaslı kesme sıvısının kullanıldığı MMY yağlama koşuluna göre yaklaşık %2, grafen nanoakışkan kullanılan yağlama koşuluna göre %6 daha yüksektir. Bunun sebebi ise; kuru kesme koşullarında takım ömrünün çok kısa ve oluşan kesme kuvvetlerinin fazla olmasıdır.

Şekil 4.5(a) incelendiğinde karbon emisyon miktarındaki değişimin kesme kuvvetleriyle benzer olduğu görülmektedir. Bunun sebebi ise üst paragrafta açıklandığı üzere kesme kuvvetlerinin artmasının karbon emisyon miktarında artışa sebep olmasıdır. En yüksek karbon emisyon miktarı kuru kesme şartında elde edilmiştir. Kuru kesme koşulunu sırasıyla sadece bitkisel esaslı kesme sıvısının kullanıldığı MMY, nano MoS<sub>2</sub> katkılı nanoakışkanının kullanıldığı MMY, hibrit nanoakışkanın kullanıldığı MMY ve nano grafen katkılı nanoakışkanın kullanıldığı MMY yöntemi takip etmektedir.

Şekil 4.5(b).’den görülebileceği gibi Vc=120 m/dak kesme hızına benzer sonuçlar Vc=170 m/dak kesme hızında da elde edilmiştir. Sabit kesme hızında artan ilerleme miktarı ile karbon emisyon miktarında artış gözlemlenmiştir. Yağlama koşullarına göre inceleme yapıldığında Vc=170 m/dak kesme hızında yine Vc=120 m/dak kesme hızındaki sonuçlara paralel sonuçlar elde edilmiştir. Sabit 170 m/dak kesme hızı ve sabit 0,2 mm/dev ilerleme miktarı değerlerinde kuru kesme şartında toplam karbon emisyon miktarı; sadece bitkisel kesme sıvısı kullanılan MMY koşuluna göre %2,3; nano MoS<sub>2</sub> takviyeli nanoakışkan kullanılan yağlama koşuluna göre yaklaşık %2,7; nano grafen takviyeli nanoakışkan kullanılan yağlama koşuluna göre yaklaşık %5,5 ve hibrit nanoakışkan kullanılan yağlama koşuluna göre ise yaklaşık %3,8 daha yüksektir.

En yüksek karbon emisyon miktarı kuru kesme şartında elde edilmiştir. Kuru kesme koşulunu sırasıyla sadece bitkisel esaslı kesme sıvısının kullanıldığı MMY, nano MoS<sub>2</sub> katkılı nanoakışkanının kullanıldığı MMY, hibrit nanoakışkanın kullanıldığı MMY ve nano grafen katkılı nanoakışkanın kullanıldığı MMY takip etmiştir.

Kesme hızı 220 m/dak’ya yükseltildiğinde karbon emisyon miktarında elde edilen değerler Şekil 4.5(c).’de verilmiştir. Kesme hızının 120 m/dak ve Vc=170 m/dak olduğu durumlardaki karbon emisyon miktarı grafiklerine benzer bir eğilim 220 m/dak kesme hızında yapılan deneylerin sonucunda da gözlemlenmiştir. Artan ilerleme miktarıyla beraber karbon emisyon miktarları artmış, yağlama koşullarına göre de benzer eğilimler oluşmuştur.

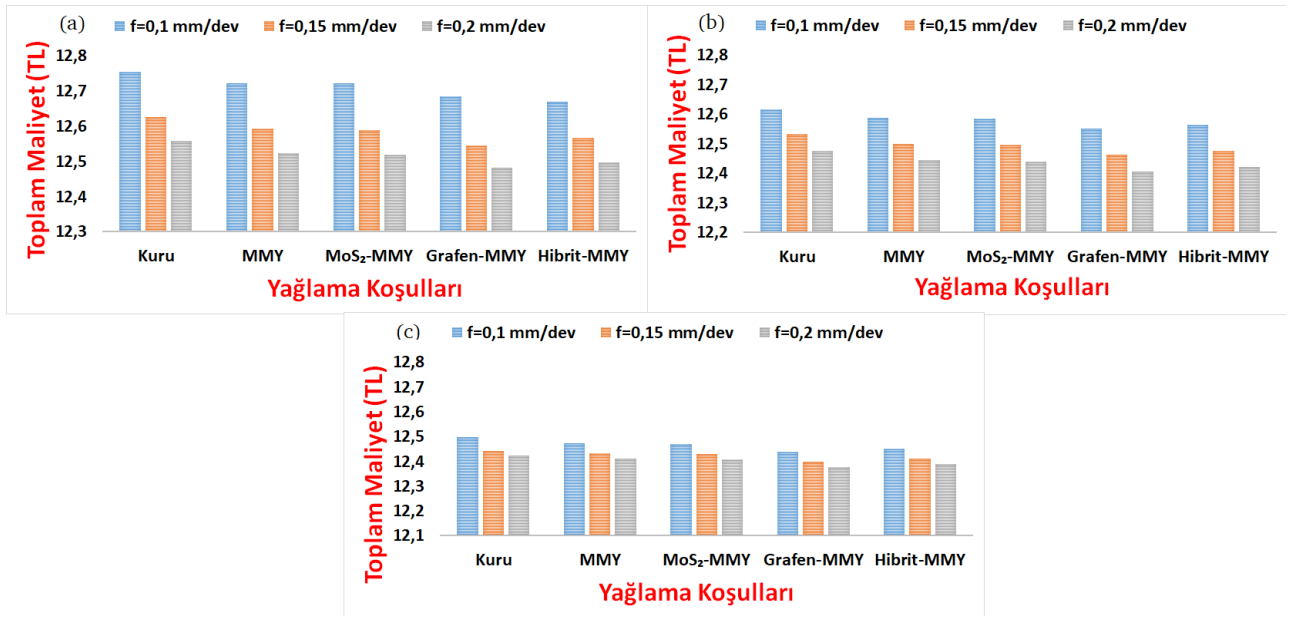
Her üç kesme hızı ve ilerleme değerlerinde, en düşük karbon emisyon miktarı tıpkı kuvvetler ve yüzey pürüzlülük sonuçlarında olduğu gibi nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yönteminde gözlemlenmiştir. Bunun sebebi önceki sonuçlarda da açıklandığı üzere; nano grafen parçacıkların yağlayıcı özelliklerinin yanı sıra çok iyi bir termal iletkenlik özelliğine sahip olmasıdır. Bu termal iletkenlik sayesinde kesme bölgesinde oluşan ısı hızlıca kesme bölgesinden uzaklaştırılmış ve takım ömrünü uzatmış, kesme kuvvetlerini azaltmıştır. Azalan kesme kuvvetleri ve artan takım ömrü ise karbon emisyon miktarının azalmasına neden olmuştur.

Kuru kesme şartı ile kıyaslandığında karbon emisyon miktarı değerleri ortalama olarak sırasıyla; bitkisel esaslı kesme sıvısı kullanılan MMY koşulunda %2, nano MoS<sub>2</sub> parçacıklarının kullanıldığı nanoakışkan MMY koşulunda %3, nano grafen parçacıkların kullanıldığı nanoakışkan MMY koşulunda %6, hibrit nanoakışkan koşulunda ise %4 azalmıştır. AISI 310S paslanmaz çeliğinin ortogonal tornalanmasında çevreye en az karbon emisyon salınımı yapılan yöntemin nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yöntemi olduğu sonucuna varılmıştır.

#### **4.4 Toplam Talaşlı İmalat Maliyeti Sonuçları**

Kesme hızı 120 m/dak için hesaplanan toplam maliyet sonuçları Şekil 4.6(a)'da verilmiştir. Buradan görüleceği üzere 120 m/dak kesme hızında en yüksek talaşlı imalat maliyeti kuru kesme şartında ortaya çıkmıştır. Kuru kesme şartında soğutucu/yağlayıcı maliyeti olmamasına rağmen maliyetin yüksek çıkma sebebi takım ömrünün çok düşük olmasıdır. Daha fazla kesici takım kullanma gereksinimi maliyetleri artırmıştır. Kuru kesme koşulu soğutucu/yağlayıcı maliyetinden tasarruf etme ve çevreye verilen zararın minimize edilmesi açısından olanak sağlasa da takım maliyetlerini yükseltmiş ve maliyet açısından en kötü koşul olarak karşımıza çıkmıştır. Soğutucu/yağlayıcı kullanılan ilk yöntem olan sadece bitkisel esaslı kesme sıvısının kullanıldığı MMY yöntemi kuru şart ile kıyaslandığında toplam maliyeti; 0,15 mm/dev ilerleme miktarı incelendiğinde yaklaşık %1 düşürmüştür. Bunun sebebi soğutucu/yağlayıcı bitkisel esaslı kesme sıvısının takım-iş parçası ve takım-talaş arasındaki sürtünmeyi azaltması ve dolayısıyla kesme sıcaklığını azaltması ile ilişkili olarak takım ömrünü uzatması olarak yorumlanabilir. MMY yönteminde bitkisel esaslı kesme sıvısına nano parçacıkların katılması sonucunda toplam maliyetin giderek azaldığı görülmektedir.

Bunun sebepleri önceki bölümlerde sıkça bahsedildiği gibi nano parçacıkların yağlayıcılık ve termal iletkenlik özelliklerinin yüksek olması şeklinde sıralanabilir. En düşük maliyetin olduğu nano grafen parçacıkların kullanıldığı MMY yöntemi, nanoakışkan kullanılması maliyet açısından sürdürülebilirliğe katkısını açık şekilde göstermektedir. Nano grafen nanoakışkan kullanılan yağlama koşulu ve kuru kesme koşulu; 0,2 mm/dev ilerleme miktarı değerinde karşılaştırıldığında toplam talaşlı imalat maliyeti yaklaşık %2 düşmüştür.



**Şekil 4.6** Toplam Talaşlı İmalat Maliyetleri a) V<sub>c</sub>=120 m/dak, b) V<sub>c</sub>=170 m/dak, c) V<sub>c</sub>=220 m/dak

Kesme hızı 170 m/dak'ya yükseltildiğinde toplam talaşlı imalat maliyet grafikleri Şekil 4.6(b)'de görülmektedir. Burada da en yüksek maliyet kuru kesme koşulunda görülmektedir. Bunun sebepleri 120 m/dak kesme hızında söylenenlerle açıklanabilir. Bu grafik aslında 120 m/dak kesme hızında kuru kesme koşullarında maliyetin en yüksek çıkmasının tesadüf olmadığını da bizlere göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken asıl husus maliyet eğilimlerinden ziyade toplam talaşlı imalat maliyetin 120 m/dak kesme hızında yapılan talaş kaldırma işlemine oranla daha düşük çıkmasıdır. V<sub>c</sub>=120 m/dak, f=0,1 mm/dev ve kuru şartlar ile V<sub>c</sub>=170 m/dak, f=0,1 ve kuru şartlar karşılaştırıldığında toplam talaşlı imalat maliyeti neredeyse %2 daha azalmıştır. Benzer eğilim, grafikler karşılaştırıldığında tüm talaş kaldırma koşullarında gözlemlenmektedir. Bunun ana nedeni ise kesme hızının yükseltilmesinin talaş

kaldırma süresini kısaltmasıdır. Aynı şekilde önceki bölümlerde gözlenen yığılma ağız (BUE) etkisinin kesme hızı arttıkça azalmasıyla da maliyet düşüşü ilişkilendirilebilir. Yığılma ağız oluşumunun gözlemlenmemesi takım ömrünü artırmış ve takım maliyetlerini düşürmüştür. Bu etkiler kesme hızı ve ilerleme arttıkça artan tezgâh gücü; dolayısıyla enerji kullanımının etkisine rağmen maliyetleri düşürmüştür. Sonuç olarak bu grafik bize 310S paslanmaz çelik malzemenin tornalanmasında kesme hızının düşük tutulmaması gerektiğini ekonomik açıdan da göstermektedir.

Bu çalışmada seçilen en yüksek kesme hızı değeri olan 220 m/dak'da hesaplanan toplam talaşlı imalat maliyetleri Şekil 4.6(c).’de verilmiştir. Kesme hızı 170 m/dak için toplam talaşlı imalat maliyetleri için yapılan yorumlamalar geçerliliğini 220 m/dak kesme hızı için de korumaktadır. En yüksek maliyetler kuru kesme koşullarında gözlemlenmiştir. Bunun sebebi tüm çalışma boyunca açıklanan soğutucu/yağlayıcı etkisinin kuru kesme koşulunda gözlemlenmemesidir. Ayrıca kesme hızı 220 m/dak’ya yükseltince artan enerji tüketiminin diğer parametrelerin azalmasıyla tolere edilebileceği Şekil 4.6(c).’de görülmektedir. Artan takım ömrü, azalan talaş kaldırma süresi ve soğutucu/yağlayıcı etkileri toplam talaşlı imalat maliyetini önemli ölçüde düşürmüştür.  $V_c=220$  m/dak,  $f=0,1$  mm/dev ve kuru koşullarında toplam maliyet aynı diğer şartlar ve  $V_c=120$  m/dak kesme hızı koşuluna göre kıyaslandığında yaklaşık %2 daha azalmıştır. Diğer yağlama koşullarına göre kıyaslamalar yapıldığında en büyük maliyet düşüşünün kuru kesme koşulunda elde edildiği görülmektedir. Bunun ana sebebi ise takım ömrüdür.

Toplam talaşlı imalat maliyet grafiklerinden görüleceği üzere en sürdürülebilir yöntemin kesme hızının 220 m/dak olduğu, ilerlemenin 0,2 mm/dev olduğu nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yöntemi olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar, yüzey pürüzlülük, kesme kuvvetleri ve karbon emisyon sonuçları ile paraleldir. Tüm sonuçlar göz önünde bulundurulduğunda çalışmamızdaki tutarlılık görülebilmektedir.

AISI 310S paslanmaz çeliğinin sürdürülebilir bir şekilde tornalanması için yığılma ağız (BUE) etkisini en aza indirmek, takım-talaş ve takım-iş parçası arası teması mümkün olduğunca kesmek gerekmektedir. Bu şartlara en uygun sonuçlar ise kesme hızı ve ilerleme değerleri fark etmeksizin nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yönteminde elde edilmektedir. Nano grafen parçacıkların üstün termal iletkenliği ve

yağlayıcı etkisi hem yüzey bütünlüğüne hem de kesme kuvvetlerinin; dolayısıyla kullanılan enerjinin düşürülmesine, çevreye karbon salınımının azaltılmasına ve maliyetlerin düşürülmesine katkı sağlamaktadır. Nano grafen parçacıkları ise sırasıyla nano MoS<sub>2</sub> parçacıklarının kullanıldığı MMY yöntemi, hibrit MMY yöntemi ve sadece bitkisel esaslı kesme sıvısının kullanıldığı MMY yöntemi takip etmektedir. En kötü sonuçlar ise herhangi bir soğutucu/yağlayıcı kullanılmayan kuru kesme koşulunda elde edilmiştir.



## GENETİK ALGORİTMA İLE OPTİMİZASYON

---

Bu çalışmada, genetik algoritma yöntemi olarak, NSGA-II (baskın olmayan sıralamalı genetik algoritma II) kullanılmıştır.

Genetik algoritma, isminden de anlaşılacağı üzere canlıların genlerinden ve biyolojiden esinlenerek üretilmiş bir algoritmadır. Canlıların zaman içerisinde evrimler ve gen değişimleri geçirmesi; kendilerini güçlendirmeleri, hayat şartlarına uyum sağlamaları ve hayat kalitelerini artırmalarına olanak vermiştir. Tüm bunlar zamanla değişen çevresel şartlara göre edinilen tecrübelerin sonucunda olmuştur. Bir nevi canlılar kendi genlerini hayatlarını kolaylaştıracak şekilde eğitmişler ve sürekli bir gelişim içerisinde dahil olmuşlardır. Aynı şekilde çevresel şartlara ya da hayat şartlarına uyum sağlayamayan canlıların ise nesilleri tükenmiştir. Tüm bu değişimler nesiller boyunca birbirine aktarılmış ve en güçlü olanlar hayatta kalmaya devam etmiştir.

Genetik algoritma ise bu şekilde değişen her şarta göre daha güçlü ve avantajlı sonuçların alınması için oluşturulmuş bir algoritmadır. Genetik algoritma bir deney sonuç kümesinin içerisindeki tüm sonuçları istenen parametrelere göre birbiriyle yarıştırmış, inceler ve üstün olan sonuçları kümeler. Bu yapılan her iterasyonda bu şekilde devam eder ve istenen sonuç sayısı kadar yapılan iterasyon sonucunda; belirlenen optimum şartı ya da şartları sonuç olarak verir. Değişen her parametre her sonuç üzerinde etkili olabilir. Burada önemli olan nokta bizim için en etkili olacak, aynı şekilde canlılardaki gibi hayat kalitemizi en fazla yükseltecek sonucu seçmek ve ona göre algoritmayı kullanmaktır.

Çalışmamızdan örnek verirsek; bizim için çevreyi minimum derecede kirletecek olan kuru kesme çevrenin korunması açısından en önemli şart iken, kesme kuvvetlerini artırması ve takım ömrünü azaltması sebebiyle hem maliyetleri hem enerji tüketimini hem de karbon emisyon miktarını artırarak çevreye dolaylı yollardan daha çok zarar verecek hem de kaynak tüketimini artırarak işlem verimliliğini ve kalitesini düşürecektir. Bitkisel yağların kullanıldığı MMY yönteminde nano parçacıklar birbirlerine göre üstünlükler gösterecektir fakat bunlar da maliyetleri artıracaktır.

Burada önemli olan nano parçacıkların maliyetleri artırmasına karşın işleme verimliliği de maliyetlere kıyasla daha fazla artacak mıdır ve işlenen numuneler deneyin amacına en yakın sonuçları verecek midir? Eğer maliyeti artırarak çevreye daha az zarar veriyor, işleme kalitesini artırıyor ve kaynak tüketimini azaltıyorsak bu maliyet artışları tolere edilebilmiş demektir. Aynı şekilde bu yaklaşım diğer deney parametreleri için de geçerlidir (kesme hızı, ilerleme vb.).

Bu şekilde düşünüldüğünde her parametre ve her sonuç için bunların birbiriyle kıyaslanması, üstünlüklerinin ve dezavantajlarının karşılaştırılmasının manuel olarak yapılması hem çok zor olmakta hem de çok zaman gerekmektedir. Burada ise devreye genetik algoritma girecek ve tüm bu sonuçları bizim için karşılaştırarak en uygun sonuçları bize verecektir.

Baskın olmayan sıralamalı genetik algoritma II yöntemi, bilinen İngilizce isim kısaltması NSGA-II, genetik algoritmada yer alan tüm bu sonuç kümelerinin birbiri ile kıyaslanmasını, birbirine karşı kıyaslanmasını ve üstün olanların seçilerek kıyaslamaya devam edilmesini sağlayan; genetik algoritma çözüm yöntemidir. Birbiriyle karşılaştırılan sonuçlar istenilen iterasyon sayısına göre devamlı olarak bu döngü içerisinde bir rekabete sokulur ve son iterasyondan galip çıkan parametreler veya deney koşulları optimum sonuç olarak kullanıcıya verilir. Bu sonuçlar Pareto grafikleri ile sunulur ve kullanıcının yapılan deneyin sonuçlarını incelemesi ve yorumlaması açısından önemlidir.

Bu çalışmada kukla değişkenlere (dummy variables) göre iterasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu sayede kuru, MMY ve nanoakışkan destekli MMY yöntemlerinin deneyler sonucu ölçülen veya hesaplanan talaş kaldırma kuvvetleri, yüzey pürüzlülükleri, karbon emisyon miktarları ve talaşlı imalat maliyetleri üzerindeki etkileri belirlenebilmiştir. Kukla değişkenler ikili nicel değişkenlerdir ve sadece 1 veya 0 gibi iki nicel değer alabilirler. Yaygın olarak 1, bir nitel özelliğin varlığı yani sonuç üzerinde etkisi olduğunu; 0 ise bir nitel özelliğin yokluğunu yani sonuç üzerindeki etkisinin olmamasını temsil eder. Tablo 5.1'de her bir yağlama koşulunun kukla değişken seviyeleri görülebilmektedir.

**Tablo 5.1:** Yağlama koşulları için kukla değişken (dummy variable) seviyeleri

Yağlama Koşulu	LC-1	LC-2	LC-3	LC-4
Kuru	1	0	0	0
MMY	0	1	0	0
MoS <sub>2</sub> -MMY	0	0	1	0
Grafen-MMY	0	0	0	1
Hibrit-MMY	0	0	0	0

Bileşke kuvvetler, yüzey pürüzlülüğü, karbon emisyon miktarları ve talaşlı imalat maliyetlerinin matematiksel modelleri Tablo 5.1'e göre hesaplanmış ve denklem (5.1)-(5.4) olarak verilmiştir.

$$\begin{aligned} F_{bileşke} = & (361,023) + (101,691 \times LC1) + (76,896 \times LC2) + (30,51 \times LC3) - \\ & (3,867 \times LC4) + (0,203 \times V) + (3892,84 \times f) - (0,627 \times V \times LC1) - (0,577 \times V \times LC2) - \\ & (0,213 \times V \times LC3) + (0,162 \times V \times LC4) + (0,002 \times V^2) - \\ & (15,356 \times V \times f) + (856,7 \times f \times LC1) + (646,2 \times f \times LC2) + (260,1 \times f \times LC3) - \\ & (425,5 \times f \times LC4) + (10704,3 \times f^2) \end{aligned} \quad (5.1)$$

$$R^2_{Fbileşke} = 0,9929$$

$$\begin{aligned} R_a = & (1,67142) + (0,173 \times LC1) + (0,098 \times LC2) + (0,061 \times LC3) - \\ & (0,026 \times LC4) + (0,001425 \times V) - (17,583 \times f) - (0,0005 \times V \times LC1) - (0,0002 \times V \times LC2) - \\ & (0,00014 \times V \times LC3) + (0,00047 \times V \times LC4) - (0,000029 \times V^2) + (0,045 \times V \times f) - (0,17 \times f \times LC1) - \\ & (0,157 \times f \times LC2) - (0,11 \times f \times LC3) - (0,043 \times f \times LC4) + (29,12 \times f^2) \end{aligned} \quad (5.2)$$

$$R^2_{Ra} = 0,9206$$

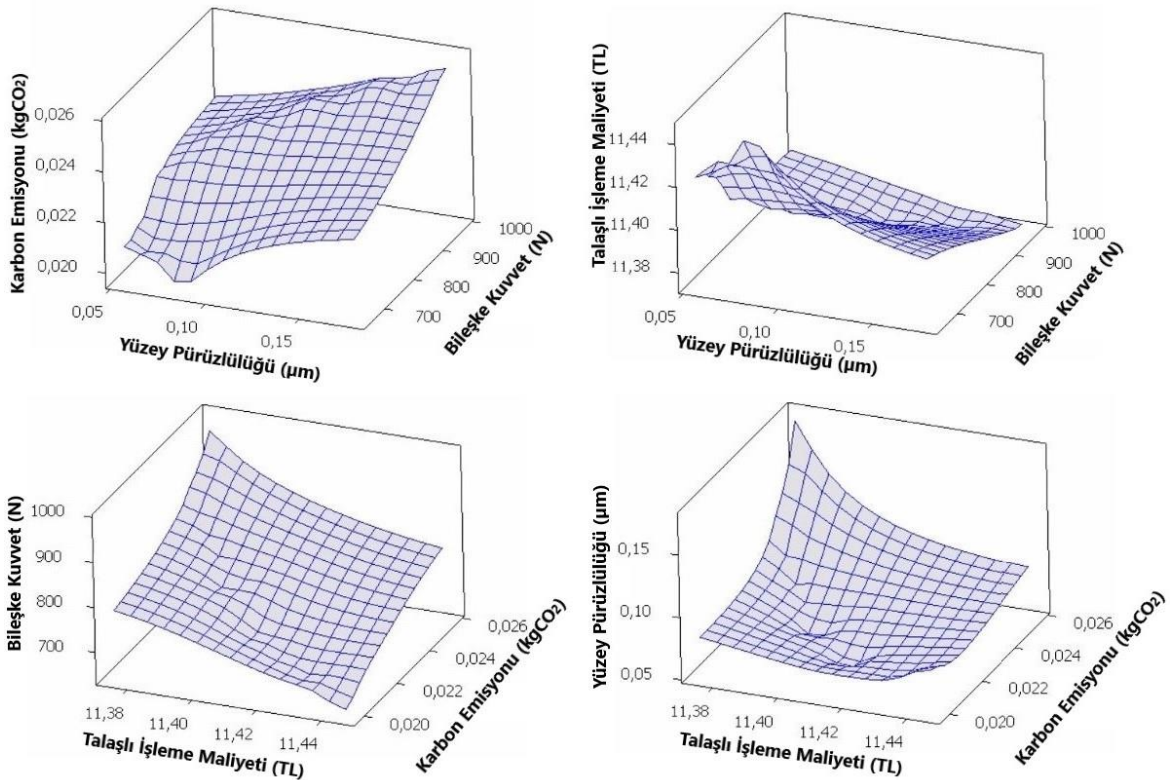
$$\begin{aligned}
CE_{toplamlam} = & (0,019) + (0,00047 \times LC1) + (0,00083 \times LC2) + (0,00071 \times LC3) - \\
& (0,00025 \times LC4) + (0,00003 \times V) + (0,054 \times f) + (6,67 \times e^{-7} \times V \times LC1) - (1,67 \times e^{-6} \times V \times LC2) - \\
& (1 \times e^{-6} \times V \times LC3) + (3,33 \times e^{-7} \times V \times LC4) + (4,67 \times e^{-8} \times V^2) + (3,6 \times e^{-5} \times V \times f) + (0,0023 \times f \times LC1) - \\
& (1,03 \times e^{-17} \times f \times LC2) - (0,001 \times f \times LC3) - (0,0007 \times f \times LC4) - (0,0013 \times f^2)
\end{aligned} \quad (5.3)$$

$$R^2_{CEtoplamlam} = 0,9908$$

$$\begin{aligned}
C_{toplamlam} = & (13,5835) + (0,1213 \times LC1) + (0,06 \times LC2) + (0,0621 \times LC3) + (0,0121 \times LC4) - \\
& (0,0053 \times V) - (5,7039 \times f) - (0,0003 \times V \times LC1) - (0,0001 \times V \times LC2) - (0,0001 \times V \times LC3) - \\
& (4,9 \times e^{-5} \times V \times LC4) + (5,11 \times e^{-6} \times V^2) + (0,013 \times V \times f) - (0,1157 \times f \times LC1) - (0,076 \times f \times LC2) - \\
& (0,1023 \times f \times LC3) - (0,1023 \times f \times LC4) + (7,452 \times f^2)
\end{aligned} \quad (5.4)$$

$$R^2_{Ctoplamlam} = 0,9963$$

NSGA-II'nin popülasyon büyüklüğü 50 olarak belirlenmiş, 50 sonuç çıktısı istenmiş ve maksimum nesil sayısı ise 20000 olarak seçilmiştir. Şekil 5.1'de modelin Pareto optimal çözümleri verilmiştir.



Şekil 5.1: Pareto optimal çözümleri

Pareto optimal çözümlerinden nihai çözüm ya da çözümlerin seçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada Şekil 5.1'de verilen Pareto çözümleri içerisinde optimum sonuçların seçilmesi için çok kriterli bir karar verme yöntemi olan TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Tercih Sıralaması Tekniği) yöntemi kullanılmıştır.

1981 yılında Hwang ve Yoon tarafından geliştirilen ve çok sayıdaki çözüm arasından istenilen parametrelere göre en faydalı ya da en kötü değerlerin seçilebilmesini sağlayan birçok kriterli karar verme tekniğidir.

Elde edilen tüm sonuçlar arasından bizim için en önemli parametrelere göre optimum seçimin TOPSIS yöntemi ile yapılması, sonuçların doğruluğu ve zamanın etkin kullanılması açısından önemlidir. TOPSIS yöntemi bilimsel çalışmaların yanı sıra şirketlerin ve ülkelerin ekonomik durumlarının değerlendirilmesinde de kullanılan değerli bir karar verme tekniğidir ve kararı insana bırakmayarak riski azaltmaktadır. TOPSIS yönteminde sonuçların ideal sonuca yakınlıklarını belirlemeden önce etkinliklerinin ağırlıkça etkinlik dağılımları hesaplanmalıdır. Etkinlik dağılımları tüm sonuçlar için eşit verilebileceği veya araştırmacı tarafından tecrübeye dayalı belirlenebileceği gibi denklem (5.1.1) – (5.1.4) kullanılarak da belirlenebilir. Bu çalışmada, denklem (5.1.4) – (5.1.11) kullanılmıştır.

Sonuçların ağırlıkça etkinlik dağılımları şu şekildedir hesaplanmıştır [56]:

1. adım: Karar verme matrisinin standartlaştırılması,

$$r_{ij} = \frac{\min(x_{ij})}{x_{ij}} \quad (5.1.1)$$

Burada  $r_{ij}$  değeri j. kriter için  $x_{ij}$  değerinin standartlaştırılmasını ifade eder.

2. adım: Karar matrisinin standartlaştırılmış değerlerinin normalizasyonu,

$$t_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^m r_{ij}} \quad (5.1.2)$$

3. adım: Her sonuç için etkinlik dağılımlarının hesaplanması,

$$H_j = - \frac{\sum_{i=1}^m t_{ij} \times \ln(t_{ij})}{\ln(m)} \quad (5.1.3)$$

4. adım: Sonuçların ağırlıkça etkinlik dağılımlarının hesaplanması,

$$w_j = \frac{1-H_j}{\sum_{j=1}^n (1-H_j)} \quad (5.1.4)$$

Sonuçların ağırlıkça etkinlik dağılımları hesaplandıktan sonra uygulanacak TOPSIS karar verme yönteminin işleyişi şu şekildedir [56]:

1. adım: Karar verme matrisinin normalizasyonu,

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{kj}^2}}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (5.1.5)$$

Burada  $r_{ij}$  değeri j. kriter için  $x_{ij}$  değerinin normalleştirilmesini ifade eder.

2. adım: Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisinin hesaplanması,

$$v_{ij} = w_j \times r_{ij}, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (5.1.6)$$

Burada  $w_j$ , j. kriterin ağırlığıdır.

3. adım: Negatif ve pozitif ideal çözümün hesaplanması,

$$A^+ = \{v_1^+, \dots, v_n^+\} \quad (5.1.7)$$

$$A^- = \{v_1^-, \dots, v_n^-\} \quad (5.1.8)$$

Burada  $A^+$  pozitif ideal çözümü,  $A^-$  ise negative ideal çözümü sembolize eder. Burada faydalı j kriterinin alacağı değerler;  $v_j^+ = \max(v_{ij}, i = 1, 2, \dots, m)$  ve

$v_j^- = \min(v_{ij}, i = 1, 2, \dots, m)$ 'dir. Hesap kriteri olan j'nin alacağı değerler ise;  $v_j^+ = \min(v_{ij}, i = 1, 2, \dots, m)$  ve  $v_j^- = \max(v_{ij}, i = 1, 2, \dots, m)$ 'dir.

4. adım: Her alternatif çözümün pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklığının hesaplanması,

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (5.1.9)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (5.1.10)$$

Burada  $D_i^+$  pozitif alternatif çözümün ideal çözüme olan mesafesini ve  $D_i^-$  negative alternatif çözümün ideal çözüme olan mesafesini sembolize eder.

5. adım: İdeal çözüme olan göreceli yakınlığın hesaplanması,

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (5.1.11)$$

6. adım: Azalan  $C_i$  değerlerine göre alternatif çözümlerin sıralanması.

**Tablo 5.2:** TOPSIS yöntemiyle seçilen optimal sonuçlar

Yağlama Koşulu	V (m/dak)	f (mm/dev)	F <sub>bileşke</sub> (N)	R <sub>a</sub> (µm)	CE <sub>toplam</sub> (kgCO <sub>2</sub> )	C <sub>toplam</sub> (TL)
Grafen MMY	220	0.11	674,32	0.066	0.0204	11,43
Grafen MMY	220	0.12	689,74	0.066	0.0208	11,424
Grafen MMY	220	0.13	710,83	0.055	0.0213	11,414
Grafen MMY	220	0.14	763,65	0.057	0.0224	11,397

TOPSIS optimal sonuçlarından da görüleceği üzere AISI 310S paslanmaz çelik malzemenin sürdürülebilir tornalamasında en uygun kesme koşulunun nano grafen takviyeli MMY yöntemi ve kesme hızı değerinin ise 220 m/dak olduğu hesaplanmıştır. Bu durum elde edilen deney sonuçlar ile paraleldir. Kesme hızının 220 m/dak seçildiği talaş kaldırma koşullarında ilerlemenin artmasıyla birlikte bileşke kuvvetlerin, yüzey pürüzlülüklerinin, karbon emisyon miktarının ve talaşlı imalat maliyetlerinin arttığı deney sonuçlarından ve yorumlamalarından görülebilmektedir. TOPSIS karar verme yönteminden de ilerleme miktarının düşük seçilmesi gerektiği ve artan ilerleme miktarıyla beraber elde edilecek sonuçların artacağı görülebilmektedir. Yüksek kesme hızı ve düşük ilerleme miktarı değerlerinde kuvvetlerin minimum olarak elde edilmesi güç tüketimini ve dolayısıyla maliyetleri ve karbon emisyon miktarlarını da düşüreceği için en sürdürülebilir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

---

Östenitik paslanmaz çelik malzemeler, özellikle yüksek sıcaklıklarda özelliklerini kaybetmeden ve korozyona uğramadan çalışabilmeleri sebebiyle tercih edilmekte ve en yaygın kullanılan paslanmaz çelik türlerindedir. Ancak düşük termal iletkenlikleri ve yüksek çalışma sertleşmesi bu malzemelerin talaşlı işlenebilirliğini olumsuz etkilemektedir. Literatürde, bu malzemelerin işlenebilirliklerinin artırılması konusunda çalışmalar yapılmaktadır. Günümüzde, bu malzemelerin sadece özelliklerinin koruması ve işlenebilmesinin artırılmasının yeterli olmamakta aynı zamanda yapılan imalatın çevreye de duyarlı olması istenmektedir. Karbon ayak izinin azaltılması, maliyetlerin düşürülmesi, soğutucu-yağlayıcı kullanımının azaltılması gibi etkenler bir bütün olarak ele alındığında yapılacak imalat işleminin sürdürülebilir olması gerekmektedir. Sürdürülebilirlik indislerinin hesaplanması ve sonuçların ortaya çıkarılması, çevresel ve ekonomik yönden en faydalı yöntem ve parametrelerin seçilmesi; kaynak tasarrufuna ve çevreye duyarlı imalat yapılmasına katkı sağlamaktadır.

Bu çalışmada AISI 310S östenitik paslanmaz çelik malzeme; beş farklı yağlama şartında (kuru, bitkisel yağ kullanılan MMY, MoS<sub>2</sub> katkılı nanoakışkan MMY, grafen nanoakışkan MMY, hibrit MMY), üç farklı kesme hızında (120 m/dak, 170 m/dak, 220 m/dak) ve üç farklı ilerlemede (0,1 mm/dev, 0,15 mm/dev, 0,2 mm/dev) tornalanmıştır.

DeneySEL çalışmalardan kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Daha sonra sürdürülebilirlik indisleri olarak karbon emisyon miktarları ve talaşlı imalat maliyetleri hesaplanmıştır. Son olarak deneysel ve sürdürülebilir sonuçlar optimum koşul ve parametrelerin belirlenebilmesi amacıyla genetik algoritma yöntemi ile analiz edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmektedir:

- Kesme hızının en düşük değeri olan 120 m/dak değerinde soğutma şartı ve ilerleme miktarı fark etmeksizin kesici uçlarda yığılma gözlemlenmiştir. Kesici uçlarda oluşan bu yığılma yüzey pürüzlülük değerlerinin artmasına ve takım

ömürlerinin azalmasına sebep olmuştur. Yüzey pürüzlülük değerlerinin artması talaşlı imalat verimliliğinin düşmesine sebep olmuştur. Bu durum da işlem maliyetlerinin artmasına, zaman kaybına, çevreye verilen zararın ve kaynak tüketiminin artırılmasına sebep olacaktır. Tüm bu etkiler ise imalatın sürdürülebilirliğini olumsuz etkileyecektir.

- Kesme hızının en düşük değeri olan 120 m/dak değerinde yüzey pürüzlülük değerleri; yağlama koşulu fark etmeksizin artan ilerleme miktarı değerleriyle azalmıştır. Ayrıca artan ilerleme miktarı değerleri yığılma ağız etkisinin azalmasına ve yüzey pürüzlülük değerlerinin düşmesine olanak sağlamıştır. Artan ilerleme miktarı aynı zamanda talaşlı imalat süresinin azalmasına da olanak sağlamaktadır.
- Artan ilerleme miktarı değerleri talaş kaldırma kuvvetlerini artırmıştır. Talaş kaldırma kuvvetlerinin artması demek; takım ömrünün azalması, tezgâh gücünün dolayısıyla da tüketilen elektrik miktarının artması, çevreye salınan karbon miktarının artması ve işleme maliyetlerinin yükselmesi demektir.
- Kesme hızı 120 m/dak ve sabit ilerlemede yüzey pürüzlülük değerlerinin en düşük olduğu yağlama koşulu nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yöntemi olarak belirlenmiştir. Nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yöntemini hibrit nanoakışkan kullanılan MMY, nano MoS<sub>2</sub> nanoakışkan kullanılan MMY, sadece bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MMY ve kuru koşulları takip etmiştir. Kesme hızı 120 m/dak ve ilerleme miktarı 0,2 mm/dev şartlarında nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yöntemi kullanıldığında yüzey pürüzlülük değerlerinde; kuru koşuluna göre %23,1, sadece bitkisel kesme sıvısı kullanılan MMY yöntemi göre %16,6, nano MoS<sub>2</sub> katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yöntemine göre %10,7, hibrit nanoakışkan kullanılan MMY yöntemine göre ise %5,4 azalma sağlanmıştır.
- Kesme hızı 170 m/dak değerine yükseltildiğinde ve ilerleme miktarı 0,1 mm/dev olduğunda yığılma ağız etkisinin hala daha devam ettiği görülmüştür. İlerleme miktarı 0,15 mm/dev değerine yükseltildiğinde yığılma ağız etkisi ortadan kalkmaya başlamış ve yüzey pürüzlülük değerleri artan ilerlemeyle artacak şekilde beklenen rejime girmiştir. Kesme hızı 170 m/dak ve ilerleme miktarı 0,15 mm/dev iken; nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY şartında yüzey

pürüzlülük değerleri ilerleme miktarları 0,1 mm/dev ve 0,2 mm/dev değerlerine göre sırasıyla yaklaşık %38 ve %15 daha azdır.

- Yağlama koşullarına göre incelendiğinde kesme hızı 170 m/dak için tüm ilerleme miktarı değerlerinde en düşük yüzey pürüzlülük değerleri nano grafen katkı nanoakışkan kullanılan MMY yağlama şartında görülmüştür. 170 m/dak kesme hızı ve 0,15 mm/dev ilerleme miktarı ve nano grafen takviyeli nanoakışkan kullanılan MMY yağlama koşulunda yüzey pürüzlülük değerleri, kuru kesmeye göre %36,5, sadece ticari bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MMY koşuluna göre yaklaşık %33,3, nano MoS<sub>2</sub> katkı nanoakışkan kullanılan MMY koşuluna göre yaklaşık %29,9, hibrit nanoakışkan kullanılan MMY koşuluna göre ise yaklaşık %19,9 azalmıştır.
- Kesme hızı 220 m/dak değerine yükseltildiğinde artık yığılma ağız etkisi ortadan tamamen kalkmıştır. Yüzey pürüzlülük değerleri artan ilerleme miktarı ile birlikte artma eğilimindedir. Dolayısıyla kesme hızı 220 m/dak değerinde en düşük yüzey pürüzlülük değerleri ilerleme miktarı 0,1 mm/dev değerinde elde edilmiştir.
- Yağlama koşullarının etkileri incelendiğinde, nano grafen katkı nanoakışkan kullanılan MMY, hibrit nanoakışkan kullanılan MMY, nano MoS<sub>2</sub> katkı nanoakışkan kullanılan MMY, ticari bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MMY ve kuru kesme sıralamasında bir değişiklik gözlemlenmemiştir. Sabit kesme hızı ve sabit ilerleme miktarı değerlerinde yağlama koşullarına göre yüzey pürüzlülük değerlerinin değişimi tüm çalışma boyunca aynıdır. Kesme hızı 220 m/dak, ilerleme miktarı 0,1 mm/dev ve nano grafen katkı nanoakışkan kullanılan MMY koşulunda yüzey pürüzlülük değerleri kuru kesmeye göre yaklaşık %29,05, ticari bitkisel kesme sıvısını kullanılan MMY yöntemine göre yaklaşık %22,1, nano MoS<sub>2</sub> katkı nanoakışkan kullanılan MMY yöntemine göre yaklaşık %15,7 ve hibrit nanoakışkan kullanılan MMY yöntemine göre yaklaşık %11 azalmıştır.
- AISI 310S paslanmaz çelik malzemenin karbür kesici uçlarla tornalanmasında kesme hızının düşük seçilmesi yüzey pürüzlülüğünü artıracaktır. Eğer kesme hızı düşük seçilmek zorunda ise ilerleme miktarı yüksek seçilmeli ve mümkünse nanoakışkanların kullanıldığı MMY koşulları tercih edilmelidir.

- Kesme kuvvetleri, tüm kesme hızları ve yağlama koşullarında artan ilerleme miktarı ile birlikte artış eğilimindedir. En yüksek kesme kuvveti değerleri tüm kesme hızları için 0,2 mm/dev ilerleme miktarı ve kuru kesme durumunda gözlemlenmiştir. Bunun temel sebebi; ilerleme miktarının artmasının talaş kaldırmak için gerekli kuvveti dolayısıyla da tezgâh için gerekli gücü artırmasıyla ilişkilidir. Ayrıca herhangi bir soğutucu ya da yağlayıcı olmayan kuru kesme koşulunda, takım-talaş-iş parçası arası sürtünmenin ve dolayısıyla sıcaklıkların artması; kesme kuvvetlerini arttırmaktadır.
- Yağlama şartlarına göre kesme kuvvetlerinin değişimi tıpkı yüzey pürüzlülük değerlerindeki gibidir. Nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yönteminde kesme kuvvetleri minimum iken bunu sırasıyla; hibrit nanoakışkan kullanılan MMY, nano MoS<sub>2</sub> katkılı nanoakışkan kullanılan MMY, sadece ticari bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MMY ve kuru kesme koşulu takip etmektedir.
- Kesme hızı 120 m/dak ve ilerleme miktarı 0,1 mm/dev iken bileşke kuvvet nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY koşulunda kuru kesme koşuluna göre yaklaşık %13,3; sadece ticari bitkisel kesme sıvısının kullanıldığı MMY koşulunda yaklaşık %8,4; nano MoS<sub>2</sub> katkılı nanoakışkan kullanılan MMY koşulunda yaklaşık %6,2 ve hibrit nanoakışkan kullanılan MMY koşulunda yaklaşık %2,5 azalmıştır. İlerleme miktarının artırılması ile bileşke kuvvetlerdeki artış; kesme hızı 120 m/dak, ilerleme miktarı 0,2 mm/dev ve nano MoS<sub>2</sub> katkılı nanoakışkan kullanılan MMY koşulunda, ilerleme miktarı 0,1 mm/dev ve 0,15 mm/dev değerlerine göre sırasıyla yaklaşık %72 ve %35'tir.
- Kesme hızı artırıldığında takım-iş parçası-talaş arası sürtünme süresi azalacağı için kesme kuvvetlerinde de azalma olacaktır. Kesme hızı 170 m/dak, ilerleme miktarı 0,15 mm/dev ve kuru kesme koşulundaki bileşke kuvvet, 120 m/dak, 0,15 mm/dev ve kuru kesme koşulundaki bileşke kuvvete göre yaklaşık %5,9 düşmüştür. Aynı şekilde 220 m/dak, 0,15 mm/dev ve kuru kesme koşulunda ölçülen bileşke kuvvet, 170 m/dak, 0,15 mm/dev ve kuru kesme koşuluna göre %11,9 azalmıştır.
- Kesme hızlarının düşük seçilmesi takım-iş parçası-talaş arasındaki temas süresini uzatacaktır. Bu durumda sıcaklık artışları daha fazla olacaktır. Aynı şekilde talaş kaldırma süresinin uzun olması tezgâh için gerekli gücü de artıracaktır. Tüm bu

etkiler göz önünde bulundurulduğunda; kesme hızlarının düşük seçilmesi talaş kaldırma kuvvetlerini artıracaktır ve bu da sürdürülebilirliği olumsuz yönde etkileyecektir.

- Karbon emisyon miktarları yağlama koşullarından bağımsız olarak artan kesme hızlarıyla birlikte azalırken; artan ilerleme miktarı değerleriyle birlikte ise artmaktadır. Bu durumların temel sebepleri; kesme hızının artırılmasının takım-talaş-iş parçası arası temas süresini yani talaş kaldırma süresini azaltmasıyla ve artan ilerleme miktarı değerlerinin tezgâh için gerekli gücü artıracığıyla açıklanabilir.
- Herhangi bir yağlayıcı kullanılmayan kuru kesme koşulunun çevre için en faydalı talaş kaldırma yöntemi olacağı yanlış bir düşüncedir. Çünkü yağlayıcı kullanılsa da talaş kaldırma sırasında ortaya çıkan yüksek sıcaklıklar hem ürün kalitesini bozacak hem de kesici takım ömrünü kısaltacaktır. Bu etkiler hem karbon emisyon değerlerini hem de maliyetleri artıracığı için sürdürülebilirlik açısından olumsuz sonuçlar doğurmaktadır.
- Kesme hızı 120 m/dak, ilerleme değeri 0,2 mm/dev ve kuru kesme koşulunda karbon emisyon miktarı; ticari bitkisel kesme sıvısı kullanılan MMY yöntemine göre yaklaşık %1,5; nano MoS<sub>2</sub> katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yöntemine göre yaklaşık %2,5; nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY yöntemine göre yaklaşık %5 ve hibrit nanoakışkan kullanılan MMY yöntemine göre yaklaşık %3,6 daha fazladır. Bu durumun en temel sebebi yağlayıcı etkisinin olmadığı bir talaş kaldırma işleminde takım ömrünün; yağlayıcı kullanılan talaş kaldırma işlemlerine göre çok kısa olmasıdır. Aynı şartlarda takım ömürleri sırasıyla; %19,1, %21,9, %39,6 ve %32,1 artmıştır.
- Kesme hızının artırılması takım ömrünü azaltmaktadır. Bu durumda karbon emisyon miktarının artması beklenebilir fakat öyle değildir. Takım ömrü azalsa bile talaş kaldırma süresi azalacağı için takım-iş parçası-talaş arası termal etkiler ve talaş kaldırma kuvvetleri azalacaktır. Bu azalmalar karbon emisyon miktarı üzerinde takım ömründen daha etkilidir. Bu sayede kesme hızı arttıkça karbon emisyon miktarı azalmıştır.
- Kesme hızı 220 m/dak, ilerleme değeri 0,1 mm/dev ve nano grafen katkılı nanoakışkan kullanılan MMY koşulunda takım ömrü, kesme hızı 170 m/dak,

ilerleme miktarı değeri 0,1 mm/dev ve nano grafen katkı nanoakışkan kullanılan MMY koşuluna göre %19,2 azalırken; karbon emisyon miktarı da yaklaşık %3,5 azalmıştır. Kesme hızı 170 m/dak, ilerleme miktarı değeri 0,2 mm/dev ve nano MoS<sub>2</sub> katkı nanoakışkan kullanılan MMY koşulunda takım ömrü, kesme hızı 120 m/dak ilerleme değeri 0,2 mm/dev ve nano MoS<sub>2</sub> katkı nanoakışkan kullanılan MMY koşuluna göre %24,9 azalırken; karbon emisyon miktarı da yaklaşık %4,4 azalmıştır.

- AISI 310S paslanmaz çelik malzemenin nanoakışkanların kullanıldığı MMY ve karbür kesici uçlar kullanılarak tornalanmasında, kesme hızları ve ilerleme miktarı değerleri arttıkça toplam talaşlı imalat maliyetleri düşmektedir. Bunun temel sebebi ise talaşlı imalat süresinin kısılması ve talaş kaldırma kuvvetlerinin düşmesidir. İmalat süresi ve talaş kaldırma kuvvetleri azaldıkça talaşlı imalat maliyetleri düşer. Kesme hızı ve ilerleme miktarının artırılması takım ömrünü kısaltıp takım maliyetini arttırsa da bu artış talaşlı imalat maliyetindeki düşüşle tolere edilebilmektedir. Aynı şekilde yağlayıcı kullanımı, maliyeti arttırsa da talaş kaldırma kuvvetlerinde azalma, takım ömründe ise uzama sağlar. Dolayısıyla da enerji ve takım maliyetlerinde düşüşe imkân sağlamaktadır. Buradan da anlaşılacağı üzere yüksek kesme hızları, yüksek ilerleme ve yağlayıcı kullanımı olan talaş kaldırma işlemlerinde toplam maliyet düşecektir.
- Kesme hızı 120 m/dak, ilerleme miktarı 0,2 mm/dev ve kuru kesme koşulunda toplam talaşlı imalat maliyeti; aynı talaş kaldırma parametrelerindeki sadece bitkisel kesme sıvısı kullanılan MMY yöntemine göre %0,3, nano MoS<sub>2</sub> katkı nanoakışkan kullanılan MMY yöntemine göre %0,4, nano grafen nanoakışkan kullanılan MMY yöntemine göre %0,7 ve hibrit nanoakışkan kullanılan MMY yöntemine göre %0,5 daha fazladır.
- Kesme hızı 170 m/dak, ilerleme miktarı 0,15 mm/dev iken kuru kesme, sadece bitkisel kesme sıvısı kullanılan MMY, nano MoS<sub>2</sub> katkı nanoakışkan kullanılan MMY, nano grafen nanoakışkan kullanılan MMY ve hibrit nanoakışkan kullanılan MMY şartlarındaki toplam talaşlı imalat maliyeti; kesme hızı 220 m/dak, ilerleme miktarı 0,15 mm/dev olan yağlama şartlarına göre sırasıyla %0,73, %0,55, %0,54, %0,52, %0,53 daha fazladır.

- Deneysel sonuçların ve hesaplanan sürdürülebilir indislerin sonuçlarının NSGA-II genetik algoritma optimizasyonu uygulanarak optimum değerleri veren parametre ve koşul kombinasyonları elde edilmiştir. Bu optimum sonuçların TOPSİS yaklaşımı ile incelenmesi sonucunda ise en uygun kesme koşulunun nano grafen takviyeli MMY yöntemi ve kesme hızının 220 m/dak olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca, ilerleme değerinin de düşük seçilmesi gerektiği ve artan ilerleme değerinin deneysel sonuçları ve sürdürülebilir indisleri olumsuz etkileyeceği belirlenmiştir.

## Öneriler

Bu çalışma kapsamında ölçülen değerler, hesaplanan sonuçlar ve gerçekleştirilen optimizasyonlar ışığında; östenitik paslanmaz çelik malzemelerin sürdürülebilir talaşlı şekillendirilmesinde, nanoakışkan kullanılan MMY yöntemi tercih edilebilir. Özellikle yüksek kesme hızları ve düşük ilerleme değerlerinde nano grafen katkılı nanoakışkan kullanıldığı durumda, minimum kesme kuvvetleri, yüzey pürüzlülüğü, karbon emisyonu ve talaşlı imalat maliyetleri elde edilmektedir. Bu durum, gelecekte daha fazla önem kazanacak olan sürdürülebilir talaşlı imalatın işlenmesi zor malzeme grubuna giren paslanmaz çelikler için uygulanabilirliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca nano parçacık takviyeli nanoakışkanların MMY yönteminde kullanılmasıyla performans artışlarının olduğu ve bu durumun sürdürülebilir talaşlı imalata katkı yaptığı da belirtilebilir.

- [1] N. Deshpande and H. Vaudevan, "Machining induced surface integrity aspects of stainless steels," *Materials Today: Proceedings* 22, 2020, pp.1499–1506.
- [2] A.P. Junaidh, G. Yuvaraj, J. Peter, V. Bhuvaneshwari, Kanagasabapathi and K. Karthik, "Influence of process parameters on the machining characteristics of austenite stainless steel (AISI 304)," *Materials Today: Proceedings* 5, 2018, pp. 13321–13333.
- [3] M.A. Xavier, "Evaluating the machinability of AISI 304 stainless steel using alumina inserts", *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 55, pp. 841-847, 2012.
- [4] M. Kaladhar, K.V. Subbaiah and C.H.S. Rao, "Machining of austenitic stainless steels – a review," *International Journal Machining and Machinability of Materials*, vol. 12, pp. 178-192, 2012.
- [5] M. Y. Noordin, D. Kurniawan, Y. C. Tang and K. Muniswaran, "Feasibility of mild hard turning of stainless steel using coated carbide tool," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 60, pp. 853-863, 2012.
- [6] M. H. S. Elmunafi, N. M. Yusof and D. Kurniawan, "Effect of cutting speed and feed in turning hardened stainless steel using coated carbide cutting tool under minimum quantity lubrication using castor oil," vol. 7(8), pp. 1-7, 2015.
- [7] J. G. Corrêa, R. B. S. and Á. R. Machado, "Tool life and wear mechanism analysis of carbide tools used in the machining of martensitic and supermartensitic stainless steels," *Tribology International*, vol. 105, pp. 102–117, 2017.
- [8] D. Jianxin, Z. Jiantou, Z. Hui and Y. Pei, "Wear mechanisms of cemented carbide tools in dry cutting of precipitation hardening semi-austenitic stainless steels," *Wear*, vol. 270, pp. 520–527, 2011.
- [9] S. S. Bedi, G. C. Behera, S. Datta, "Effects of cutting speed on MQL machining performance of AISI 304 stainless steel using uncoated carbide insert: application potential of coconut oil and rice bran oil as cutting fluids," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol 45, pp. 8877–8893, 2020.
- [10] M. Sarıkaya, V. Yılmaz, A. Güllü, "Analysis of cutting parameters and cooling/lubrication methods for sustainable machining in turning of Haynes 25 superalloy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 133, pp. 172-181, 2016.
- [11] D. Majak, E. U. Olugu and S. A. Lawal, "Analysis of the effect of sustainable lubricants in the turning of AISI 304 stainless steel," *Procedia Manufacturing*, vol. 43, pp. 495–502, 2020.
- [12] S. Roy, R. Kumar, A. K. Sahoo and R. K. Das, "A brief review on effects of conventional and nano particle based machining fluid on machining performance of minimum quantity lubrication in machining," *Materials Today: Proceedings* 18, 2019, pp. 5421–5331.

- [13] M. Z. A. Yazid, C.H. CheHaron, J. A. Ghani, G. A. Ibrahim and A. Y. M. Said, "Surface integrity of Inconel 718 when finish turning with PVD coated carbide tool under MQL," *Procedia Engineering*, vol. 19, 2011, pp. 396-401.
- [14] M. N. Babu and G. Manimaran, "Experimental estimation of MQL in turning on AISI 410 stainless steel," *International Journal of Machining and Machinability of Materials*, vol. 19, no. 6, pp. 522-537, 2017.
- [15] J. Rajaguru and N. Arunachalam, "A comprehensive investigation on the effect of flood and MQL coolant on the machinability and stress corrosion cracking of super duplex stainless steel," *Journal of Materials Processing Tech.*, vol. 276, 116417, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.116417>.
- [16] O. Özbek and H. Saruhan, "The effect of vibration and cutting zone temperature on surface roughness and tool wear in eco-friendly MQL turning of AISI D2," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9(3), pp. 2762-2772, 2020.
- [17] P.B. Patole and V. V. Kulkarni, "Optimization of Process Parameters based on Surface Roughness and Cutting Force in MQL Turning of AISI 4340 using Nano Fluid," *Materials Today: Proceedings* 5, pp. 104–112, 2018.
- [18] X. Wang, C. Li, Y. Zhang, W. Ding, M. Yang, T. Gao, H. Cao, X. Xu, D. Wang, Z. Said, S. Debnath, M. Jamil and H. M. Ali, "Vegetable oil-based nanofluid minimum quantity lubrication turning: Academic review and perspectives," *Journal of Manufacturing Processes* vol. 59, pp. 76–97, 2020.
- [19] Chetan, S. Ghosh, P. V. Rao, "Comparison between sustainable cryogenic techniques and nano-MQL cooling mode in turning of nickel-based alloy," *Journal of Cleaner Production* vol. 231, pp. 1036-1049, 2019.
- [20] A.N.M Khalil, M. A. M. Ali, A.I. Azmi, "Effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanolubricant with SDBS on tool wear during turning process of AISI 1050 with minimal quantity lubricant," *Procedia Manufacturing*, vol. 2, pp. 130 – 134, 2015.
- [21] A. K. Sharma, R. K. Singh, A. R. Dixit, A. K. Tiwari, "Characterization and experimental investigation of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticle based cutting fluid in turning of AISI 1040 steel under minimum quantity lubrication (MQL)," *Materials Today: Proceedings* 3, pp. 1899–1906, 2016.
- [22] M. Amrita, R. Srikant, A. Sitaramaraju, "Performance Evaluation of Nanographite-Based Cutting Fluid in Machining Process," *Materials and Manufacturing Processes*, vol. 29, pp. 600–605, 2014.
- [23] T. Singh, J. S. Dureja, M. Dogra and M. S. Bhatti, "Machining Performance Investigation of AISI 304 Austenitic Stainless Steel under Different Turning Environments," *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 15, no. 4, pp. 5837-5862, Oct.-Dec. 2018.
- [24] S. H. Musavi, B. Davoodi, S. A. Niknam, "Environmental-friendly turning of A286 superalloy," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 32, pp. 734–743, 2108.

- [25] D. N. Rao, P. V. Krishna, "The influence of solid lubricant particle size on Machining parameters in turning," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 48, pp. 107–111, 2008.
- [26] L. Dash, S. Padhan, S. R. Das, "Experimental investigations on surface integrity and chip morphology in hard turning of AISI D3 steel under sustainable nanofluid-based minimum quantity lubrication," *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, vol. 42:500, 2020.
- [27] Ç. V. Yıldırım, "Investigation of hard turning performance of eco-friendly cooling strategies: cryogenic cooling and nanofluid based MQL," *Tribology International* vol. 144, pp. 106-127, 2020.
- [28] Ş. Sertsöz, A. Kaçal, "Nano MoS<sub>2</sub> application in turning process with minimum quantity lubrication technique (MQL)," *Technical Gazette*, vol. 28, no. 1, pp. 70-76, 2021.
- [29] L. Sterle, D. Mallipeddi, P. Krajnik, F. Pušavec, "The influence of single- channel liquid CO<sub>2</sub> and MQL delivery on surface integrity in machining of Inconel 718," *Procedia CIRP* vol. 87, pp. 164–169, 2020.
- [30] R. R. Moura, M. B. da Silva, Á. R. Machado, W. F. Sales, "The effect of application of cutting fluid with solid lubricant in suspension during cutting of Ti-6Al-4V alloy," *Wear*, vol. 332-333, pp. 762–771, 2015.
- [31] A. M. Khan, M. Gupta, H. Hegab, M. Jamil, M. Mia, N. He, Q. Song, Z. Liu, C. I. Pruncu, "Energy-based cost integrated modelling and sustainability assessment of Al-GnP hybrid nanofluid assisted turning of AISI52100 steel," *Journal of Cleaner Production* vol. 257, 120502, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120502>.
- [32] J. K. Mannekote, S. V. Kailas, K. Venkatesh, N. Kathyayinic, "Environmentally friendly functional fluids from renewable and sustainable sources-a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 81, pt. 2, pp. 1787-1801, 2018.
- [33] X. Wang, C. Li, Y. Zhang, W. Ding, M. Yang, T. Gao, H. Cao, X. Xu, D. Wang, Z. Said, S. Debnath, M. Jamil, H. M. Ali, "Vegetable oil-based nanofluid minimum quantity lubrication turning: academic review and perspectives," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 59, pp. 76–97, 2020.
- [34] I. Deiaba, S. W. Raza, S. Pervaiz, "Analysis of lubrication strategies for sustainable machining during turning of titanium Ti-6Al-4V alloy," *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 766–771, 2014.
- [35] R. Nur, M. Y. Noordin, S. Izman, and D Kurniawan, "Machining parameters effect in dry turning of AISI 316L stainless steel using coated carbide tools," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part E Journal of Process Mechanical Engineering*, vol. 231, pt. 4, pp. 676-683, 2015.
- [36] S. Padhan, A. Das, A. Santoshwar, T. R. Dharmendrabhai, S. R. Das, "Sustainability assessment and machinability investigation of austenitic stainless steel in finish turning with advanced ultra-hard SiAlON ceramic tool under different cutting environments," *Silicon*, vol. 13, pp. 119-147, 2021.

- [37] T. Rajmohan, V.V. Kalyan Chakravarthy, A. Nandakumar, S.D. Satish Kumar, "Eco friendly machining processes for sustainability – review," ICMME 2020- IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 954, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/954/1/012044.
- [38] A. Uysal, I. S. Jawahir, "Optimization of sustainable machining of Ti6Al4V alloy using genetic algorithm for minimized carbon emissions and machining costs, and maximized energy efficiency and human health benefits," Proceedings of the ASME 2021, International Mechanical Engineering Congress and Exposition, IMECE2021, November 1-5, 2021, Virtual, [Online].
- [39] Brown to green: The G20 transition to a low-carbon economy, [https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2019/01/BROWN-TO-GREEN\\_2018\\_Turkey\\_FINAL.pdf](https://www.climate-transparency.org/wp-content/uploads/2019/01/BROWN-TO-GREEN_2018_Turkey_FINAL.pdf), 2018.
- [40] N. Qehaja, A. Kyçyku, "Tool life modeling based on cutting parameters and work material hardness in turning process," *Machines. Technologies. Materials.*, vol. 11, pp. 356-359, 2017
- [41] P. Sivaiah, D. Chakradhar, "Identifying the effectiveness of manner of cryogenic coolant supply in different cryogenic cooling techniques in turning process—a review," *Machining Science and Technology*, vol. 24, pp. 1-52, 2020.
- [42] M. P. Suarez, A. Marques, D. Boing, F. L. Amorim, Á. R. Machado, "MoS<sub>2</sub> solid lubricant application in turning of AISI D6 hardened steel with PCBN tools," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 47, pp. 337-346, 2019.
- [43] M. K. Gupta, Q. Song, Z. Liu, M. Sarikaya, M. Jamil, M. Mia, A. K. Singla, A. M. Khan, N. Khanna, D. Y. Pimenov, "Environment and economic burden of sustainable cooling/lubrication methods in machining of Inconel-800," *Journal of Cleaner Production*, vol. 287, 125074, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125074>.
- [44] C. Li, Y. Tang, L. Cui, P. Li, "A quantitative approach to analyze carbon emissions of CNC-based machining systems," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol 26, pp. 911-922, 2015.
- [45] ICE (Inventory of Carbon & Energy) v2, 2011, <https://www.carbonsolution.com>
- [46] Birçelik, <https://bircelik.com/tr/kategori/310-1-4845->
- [47] P. Sivaiah, D. Chakradhar, "Effect of cryogenic coolant on turning performance characteristics during machining of 17-4 PH stainless steel: a comparison with MQL, wet, dry machining," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol 21. pp. 86-96, 2018
- [48] G. Gaurav, A. Sharma, G.S. Dangayach, M.L. Meena, "Assessment of jojoba as a pure and nano-fluid base oil in minimum quantity lubrication (MQL) hard-turning of Ti-6Al-4V: A step towards sustainable machining," *Journal of Cleaner Production*, vol. 272, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122553>
- [49] M. N. Babu, V. Anandan, N. Muthukrishnan, A. Arivalagar, M. D. Babu, "Evaluation of graphene based nano fluids with minimum quantity lubrication in turning of AISI D3 steel," *SN Applied Sciences*, vol. 1, pp. 1-15, 2019.

- [50] I. P. Arbizu, C. J. L. Pérez, “Surface roughness prediction by factorial design of experiments in turning processes,” *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 143-144, pp. 390-396, 2003.
- [51] M. W. Azizi, S. Belhadi, M. A. Yallese, T. Mabrouki, J.-F. Rigal, “Surface roughness and cutting forces modeling for optimization of machining condition in finish hard turning of AISI 52100 steel,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 26, pp. 4105-4114, 2012.
- [52] M. Boozarpour, R. Teimouri, K. Yazdani, “Comprehensive study on effect of orthogonal turn-milling parameters on surface integrity of Inconel 718 considering production rate as constrain,” *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, vol 4, pp. 145-155, 2021.
- [53] P. Venkatesh, C. R. Kannan, M. S. Dennison, “The outcome of turning factors on the machining characteristics while turning 655M13 steel alloy using TiAlN coated carbide insert,” *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, vol. 9, 2020.
- [54] Ö. Tekaslan, N. Gerger, U. Şeker, “AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerde kesme parametrelerine bağlı olarak yüzey pürüzlülüklerinin araştırılması,” *BAÜ FBE Dergisi*, Cilt:10, Sayı:2, sayfa: 3-12, 2008.
- [55] M. J. Akhtar, M. G. Mustafa, R. M. Singari, S. Ahmad, P. Ali, “Effect of machining parameters on cutting force, tool wear and surface roughness of AISI 304 austenitic stainless steel – a review,” *International Journal of Advanced Production and Industrial Engineering*, pp. 18–21, 2017.
- [56] C. Karmaker, T. Ahmed, S. Rahman, M. Tahiduzzaman, T. Biswas, M. Rahman, S. K. Biswas, “A framework of faculty performance evaluation: a case study in Bangladesh,” *International Journal of Research in Advanced Engineering and Technology*, vol 4, pp. 18–24, 2018.

## KONFERANS BİLDİRİLERİ

1. OPTIMIZATION OF CUTTING PARAMETERS AND CONDITIONS FOR SURFACE ROUGHNESS AND RESULTANT FORCE IN ORTHOGONAL TURNING OF AISI 310S AUSTENITIC STAINLESS STEEL

