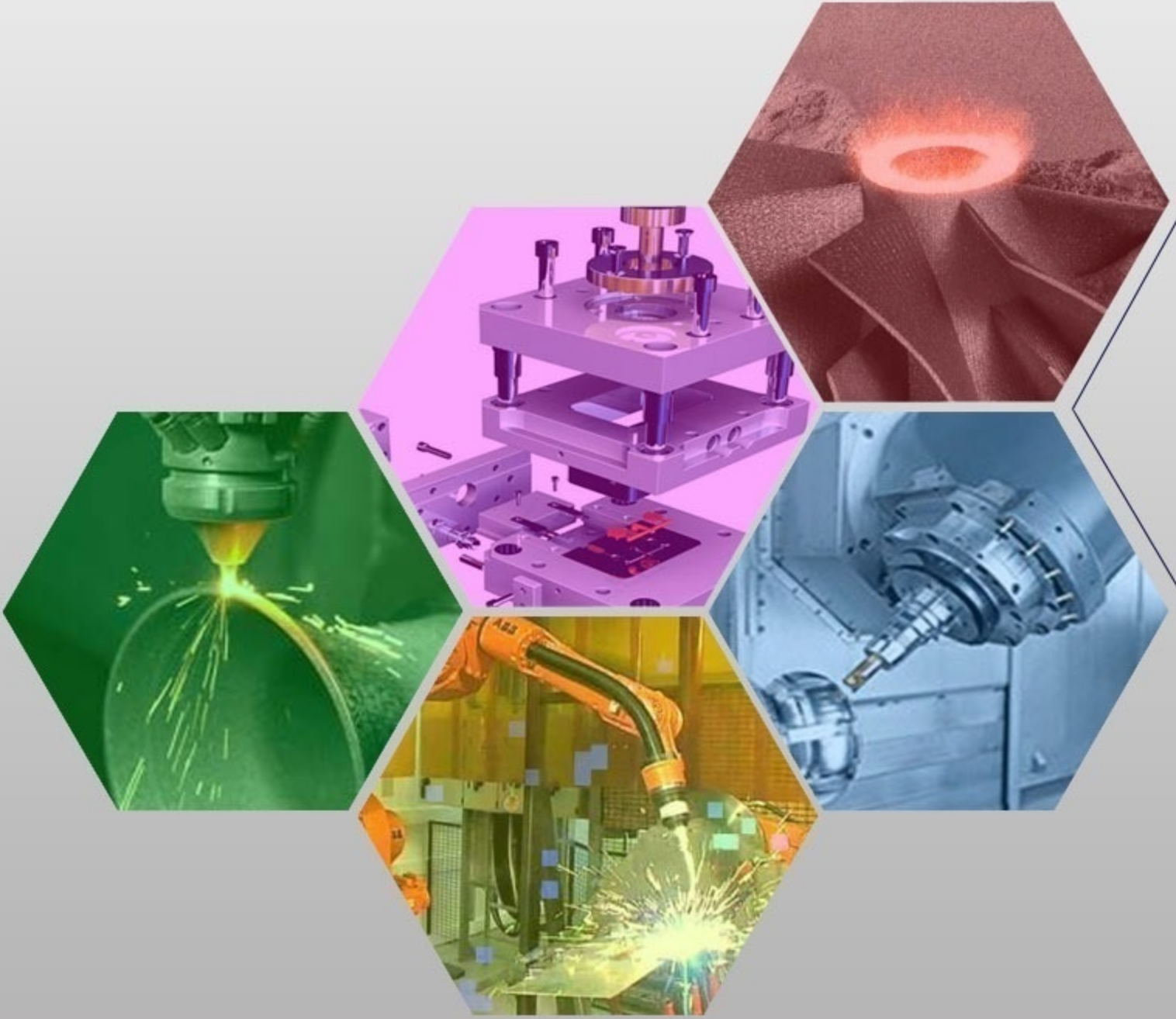




İMİLAT TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI

CİLT:2 SAYI:3 YIL: 2021

e-ISSN: 2717-7475



MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

VOLUME:2 ISSUE:3 YEAR: 2021



Cilt (Volume) : 2

Sayı (Issue) : 3

Yıl (Year) : 2021

e-ISSN: 2717-7475

İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları Manufacturing Technologies and Applications (MATECA)

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca>

Honoray Editör (Honorary Editor)

Prof. Dr. Ulvi Şeker, Gazi Üniversitesi

Baş Editor (Editor in Chief)

Prof. Dr. Mustafa Günay, Karabük Üniversitesi

Yardımcı Editör (Associate Editor)

Prof. Dr. Alaattin KAÇAL, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi

Alan Editörleri (Editors)

Doç. Dr. Yakup Turgut, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Murat Sarıkaya, Sinop Üniversitesi

Doç. Dr. Turgay Kıvak, Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Azmi Erdoğan, Bartın Üniversitesi

Dr. Munish Kumar Gupta, Opole University of Technology

Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY, Düzce Üniversitesi

Teknik Editörler (Technical Editors)

Dr. Öğr. Üyesi Mehmet Erdi Korkmaz, Karabük Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan Özmen, Karabük Üniversitesi

Danışma Kurulu (Advisory Board)

Prof. Dr. Can Çoğun, Çankaya Üniversitesi

Prof. Dr. Serdar Salman, Marmara Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa Cemal Çakır, Uludağ Üniversitesi

Prof. Dr. Teyfik Demir, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Prof. Dr. İhsan Korkut, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Oğuzhan Yılmaz, Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. İlyas Uygur, Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Ramazan Kaçar, Karabük Üniversitesi

Prof. Dr. Ulaş Çaydaş, Fırat Üniversitesi

Prof. Dr. Ayhan Erol, Afyon Kocatepe Üniversitesi

Prof. Dr. İbrahim Çiftçi, Çankırı Üniversitesi

Doç. Dr. Mohd Fathullah Ghazali, University of Malaysia Perlis

Doç. Dr. Gültekin Uzun, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Çağrı Vakkas Yıldırım, Erciyes Üniversitesi

Dr. Mozammel Mia, Imperial College London

Dr. Nafiz Yaşar, Karabük Üniversitesi

Dr. Ferhat Yıldırım, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi

Dr. Catalin Pruncu, University of Strathclyde

Dr. Danil Yu. Pimenov, South Ural State University

Dr. Selçuk Yağmur, Gazi Üniversitesi



Cilt (Volume) : 2
Sayı (Issue) : 3
Yıl (Year) : 2021
e-ISSN: 2717-7475

Yayıncı (Publisher)
Mustafa GÜNAY

Web Sayfası (Web Page)
<http://dergipark.gov.tr/pub/mateca>

Yayın Tarihi (Publication Date)
Aralık 2021 (December 2021)

Yayın Dili (Publication Language)
Türkçe / İngilizce (Turkish/English)

Yayın Aralığı (Publication Frequency)
Yılda üç kez yayınlanır (Tri-annual)

Yayın Türü (Publication Type)
Sürekli yayın (Periodical)

Kapak Tasarımı (Cover Design)
Ozan YETKİN

İletişim

Prof. Dr. Mustafa Günay (Editör)
Telefon: +90 370 4187400
E-posta: matecajournal@gmail.com, mgunay@karabuk.edu.tr

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/mateca> adresinden dergiye ilişkin bilgilere ve makalelerin tam metnine ulaşılabilir.

Contact

Prof. Dr. Mustafa Günay (Editor)
Phone: +90 370 4187400

E-mail: matecajournal@gmail.com, mgunay@karabuk.edu.tr

Instructions for authors and all articles in this journal can be reached at
<https://dergipark.org.tr/en/pub/mateca>

İÇİNDEKİLER (CONTENTS)

Araştırma Makalesi (Research Article)

Sayfa (Page)

- EN AC 46000 (AlSi9Cu3) Alüminyum Alaşımının T6 Isıl İşleminde Yaşlandırılması Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi** (*Aging of EN AC 46000 (AlSi9Cu3) Aluminum Alloy in T6 Heat Treatment and Investigation of Mechanical Properties*)
Bahadır ACAR1, Kaan DAĞ 1-9
- Al-NiAl Kompozitlerin Korozyon Davranışlarının İncelenmesi** (*Investigation of Corrosion Behaviors of Al-NiAl Composites*)
Hüseyin DEMİRTAŞ, Ramazan YILDIZ, Engin ÇEVİK 10-19
- GG25 Dökme Demirin Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Kesme Sıcaklığı Üzerine Etkisi ve Optimizasyonu** (*Effect of Cutting Parameters on Cutting Temperature and Optimization in Milling of GG25 Cast Iron*)
Raşit DÜZCE, Gürcan SAMTAŞ 20-33
- Alüminyum 7075-T6 Malzemenin Isı Desteği ile İşlenebilirliğinin İncelenmesi** (*Investigation of Machinability of Aluminum 7075-T6 Material with Heat Support*)
Ümit KARABUĞA, Şener KARABULUT, Abdulkadir GÜLLÜ 67-77
- Orta ve İleri Düzey Robotik Kodlama Eğitimleri için İnternet Odaklı Sensör Kartı Tasarım ve İmalatı** (*Internet-Oriented Sensor Card Design and Manufacture for Intermediate and Advanced Robotics Coding Trainings*)
Samed KAYA, Gürcan SAMTAŞ 78-88

Derleme Makale (Review Article)

- Tool Wear in Machining of Wrought and Cast Aluminium Alloys: Literature Review** (*Dövme ve Döküm Alüminyum Alaşımının İşlenmesinde Takım Aşınması: Literatür Araştırması*)
Cem ALPARSLAN1, Şenol BAYRAKTAR 34-46
- Tornalama İşleminde Uygulanan MMY Tekniğinde Kullanılan Nanoakışkanların İşleme Performansına Etkisi: Çevre Dostu İşleme Üzerine Bir İnceleme** (*The Effect of Nanofluids Used in the MQL Technique Applied in Turning Process on Machining Performance: A Review on Eco-Friendly Machining*)
Ayşegül ÇAKIR ŞENCAN, Muhammet ÇELİK, Ekin Nisa SELAYET SARAÇ 47-66

EN AC 46000 (AlSi9Cu3) Alüminyum Alaşımının T6 Isıl İşleminde Yaşlandırılması Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi

Bahadır ACAR^{1,*} , Kaan DAĞ¹ 

¹Yıldız Pul Otomotiv Motor Parçaları Sanayi A.Ş. AR-GE Merkezi, Konya, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 06.07.2021

Kabul: 01.09.2021

Anahtar Kelimeler:

Alüminyum Alaşımı

Isıl İşlem

T6

Sertlik

Çekme Dayanımı

Yapay Yaşlandırma

ÖZET

Alüminyum alaşımları havacılık, savunma sanayi, otomotiv gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Son yıllarda alüminyumun tercih edilmesininin sebepleri hafif olması, işleme kolaylığı sağlaması ısı ve elektriği bakır kadar iyi iletmesidir. Alüminyum alaşımlarının mühendislik malzemesi olarak kullanılabilmesi için, ısıl işlem sürecinin başarılı bir şekilde tamamlanması gerekmektedir. Alüminyum alaşımlarının farklı kimyasal analizlere sahip alüminyum alaşımlarının ısıl işlem süreçleri de farklılık göstermektedir. Alüminyum alaşımlarından EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımına uygulanan T6 ısıl işleminde, farklı sürelerde yapay yaşlandırma yapılmıştır. Yapılan yapay yaşlandırma da metalografik ve mekanik özelliklere etkisi ele alınmıştır. Seçilen EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alüminyum alaşımı T6 ısıl işleme tabi tutularak, yaşlandırma sıcaklık ve süre eğrileri çıkartılmıştır. Yaşlandırma sıcaklığı ve süresinin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesinde sertlik ölçümleri ve çekme dayanımı esas alınmıştır. Bulgular sonucunda EN AC 46000 (AlSi9Cu3) malzemesinin sertlik değerlerinde ve çekme dayanımında değişimler gözlemlenmiştir.

Aging of EN AC 46000 (AlSi9Cu3) Aluminum Alloy in T6 Heat Treatment and Investigation of Mechanical Properties

ARTICLE INFO

Received: 06.07.2021

Accepted: 01.09.2021

Keywords:

Aluminum Alloy

Heat Treatment

T6

Hardness

Tensile Strength

Artificial Aging

ABSTRACT

Aluminum alloys are used in many areas such as aerospace, defense industry and automotive. The reasons why aluminum has been preferred in recent years are that it is light, easy to process, and conducts heat and electricity as well as copper. In order for aluminum alloys to be used as engineering materials, the heat treatment process must be completed successfully. The heat treatment a process of aluminum alloys with different chemical analyzes also differs. In the T6 heat treatment applied to the EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alloy, one of the aluminum alloys, artificial aging was performed at different times. The effect of artificial aging on metallographic and mechanical properties is also discussed. The selected EN AC 46000 (AlSi9Cu3) aluminum alloy was subjected to T6 heat treatment and aging temperature and time curves were obtained. In the examination of the effect of aging temperature and time on mechanical properties, hardness measurements and tensile strength were taken as basis. As a result of the findings, changes were observed in the hardness values and tensile strength of EN AC 46000 (AlSi9Cu3) material.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Bu makalenin amacı, alüminyum dökümünde kullanılan EN AC 46000 alaşımının sıcaklık sabit tutularak süre değişimine göre mekanik özelliklerinin değişimi gözlemlenmesidir. Amaç sonunda EN AC 46000 alüminyum alaşımının T6 yapay yaşlandırma sonucu mikroyapı özellikleri, sertlik değerleri ve çekme testine göre değerlendirilip sonuca ulaşılması hedeflenmiştir. Yüksek basınçlı döküm yöntemi ile döküm işlemi gerçekleşen EN AC 46000 alüminyum alaşımında T6 ısıl işlem prosesi farklı sürelerle bağlı olarak uygulanmıştır.

Alüminyum-silisyum alaşımları, çelik ve dökme demirlerden sonra en çok kullanılan metaldir. Bakır ve alaşımlarına göre 3 (üç) kat daha hafif olmasına rağmen yüksek dayanıma sahip olması, alüminyumun otomotiv sektöründe kullanım miktarını hızlı bir şekilde yükseltmektedir. Yurtdışında kullanılan alüminyumun yaklaşık 1/3'ü otomotiv sektörü tarafından kullanılmaktadır. Ağır ve hafif araçlarda, hava yolu taşımacılığında, demir yolu ulaşım sisteminde yük taşıma ve gemi sanayinde de kullanılmaktadır. Otomotiv endüstrisinde güvenilir olması, konforlu olması, büyük ve az yakıt tüketen otomobiller için hafif ve mukavemeti yüksek malzemelerin geliştirilmesi için daha fazla alüminyum kullanımı yapılmaktadır [1].

Alüminyum alaşımları üretim metotları esas alınarak dövme ve döküm olmak üzere iki ana alt gruba ayrılmaktadır. Bu da imal usullerindeki farklılıkların olduğunu göstermektedir. Plastik deformasyon ile şekil verilebilen dövme alaşımları, döküm alaşımlardan oldukça farklı mikroyapı ve kimyasal kompozisyona sahiptirler. Her iki grup içinde bulunan alaşımlar, ısıl işlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşımlar olmak üzere, iki alt gruba ayrılmaktadır. Isıl işlem uygulanabilen alüminyum alaşımları için yapılan ısıl işlem çökeltme sertleşmesiyle elde edilmektedir. Çökeltme sertleşmesi, alüminyum alaşımlarında istenilen mukavemeti elde etmek için uygulanan bir prosestir. Isıl işlem uygulanabilir dövme alüminyum alaşımlarının 2XXX, 6XXX ve 7XXX serileri olmak üzere üç ana grubu bulunmaktadır. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları ise çökeltmeyle sertleştirilemez, mukavemetinin artırılabilmesi için sadece soğuk işleme yapılmalıdır. Katı eriyik mukavemetlendirmesi, pekleşme ve dağılım mukavemetlendirmesiyle güçlendirilirler [5]. Isıl işlem uygulanamayan dövme alüminyum alaşımlarının ise 1XXX, 3XXX ve 5XXX serileriyle üç ana grubu bulunmaktadır [2]. Çökeltme sertleşmesi için kimyasal analizde tek fazlı bir yapı elde etmek amacıyla T1 sıcaklığına kadar ısıtılır ve alaşımdaki bütün fazların tek fazda çözünmesine kadar bekletilir. Daha sonra ani su verme işlemi ile yaşlandırma prosesi yapılır [3].

Alüminyumun çok fazla kullanım alanı bulunmaktadır. Bugün dünyada, 24.300.000 ton/yıl üretim ile alüminyum, demir-çelik üretiminden sonra en çok üretimi yapılan ikinci metal konumunda bulunmaktadır. Teknolojik gelişmeler ve alüminyum alaşımlarının özelliğinden kaynaklanan avantajı nedeni ile alüminyumun kullanıldığı alanların hızla artmaktadır. Alüminyumun kullanım alanlarına göre dağılımı Tablo 1'de verilmiştir.

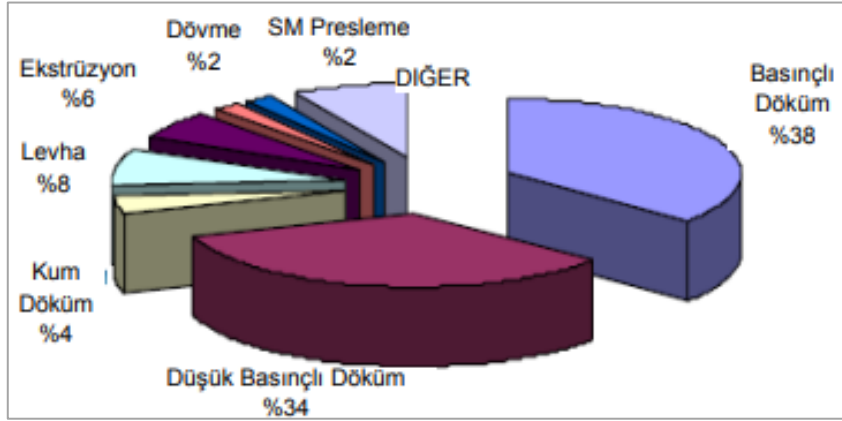
Tablo 1. Alüminyumun kullanım alanlarına göre dağılımı (Distribution of aluminum by areas of use) [6]

| Sektörler | Oran (%) |
|-------------------------|----------|
| Ulaşım | 25 |
| İnşaat | 24 |
| Ambalaj | 15 |
| Elektronik | 10 |
| Genel Mühendislik | 9 |
| Mobilya, Ofis Eşyaları | 6 |
| Demir Çelik, Metalurji | 3 |
| Kimya ve Tarım Ürünleri | 1 |
| Diğer | 7 |

Otomotiv sektöründe günümüzde artan rekabet ve çevre duyarlılığı otomobil üreticilerini yeni arayışlara itmiştir. Üretimde verimliliği korurken işletme maliyetlerini minimuma indirgeyen bir üretim anlayışı ile çevreyi daha az kirleten, malzeme geri dönüşümünün çok daha kolay olduğu, emniyet ve konforu bir arada bulunduran ve ayrıca yakıt tasarrufu sağlayan otomobiller üretilmeye başlanmıştır [7]. Üretim yöntemine göre otomotiv alanında alüminyum kullanımı bir hayli fazladır. Döküm yöntemi ile alüminyumdan imal edilen kompresör gövdeleri, havalı grup gövdeleri, dişli

kutusu gövdeleri, yakıt pompası gövdeleri, jantlar, başlıca örnekler arasındadır. Otomotiv sektöründe kullanılan alüminyumun %85'e yakını döküm yöntemiyle üretilmektedir[8].

Alüminyum alaşımlarına ısı işlem uygulanabilmesi için Cu, Mg, Fe, Mn, Sn ve Zn elementlerinin varlığının gerekliliği vurgulanmaktadır. Çünkü bu elementler ısı işlem sonucunda çökeltiler (Mg_2Si , $Mg_3Mn_2Al_{18}$, $Al-FeSi$, $AlCuMgSi$, $CuAl_2$ vb.) oluşturmak için gerekmektedir. Oluşturulan bu çökeltiler ise dayanımı ve sertliği geliştirmektedir. [9] Otomotiv sanayinde üretim tekniğine göre alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Otomotiv sanayinde üretim tekniğine göre alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Classification of aluminum alloys according to the production technique in the automotive industry) [10]

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Deneyisel çalışmalarda kullanılan alüminyum alaşımı, ticari bir alüminyum alaşımı olup kimyasal analizi Tablo 2'de verilmiştir. Alüminyum alaşımı soğuk kamara metal enjeksiyon makinesinde (yüksek basınç) döküm işlemi gerçekleştirilmiştir.

Yüksek basınç döküm yöntemi ile dökülen numuneler $460^{\circ}C$ - $480^{\circ}C$ 'de çözeltiye alınıp ardından su verilmiştir. Ardından numuneler farklı sürelerde T6 ısı işlemi uygulanmıştır. Şekil 2'de T6 (yapay yaşlandırma) ısı işleminin prosesi verilmiştir.

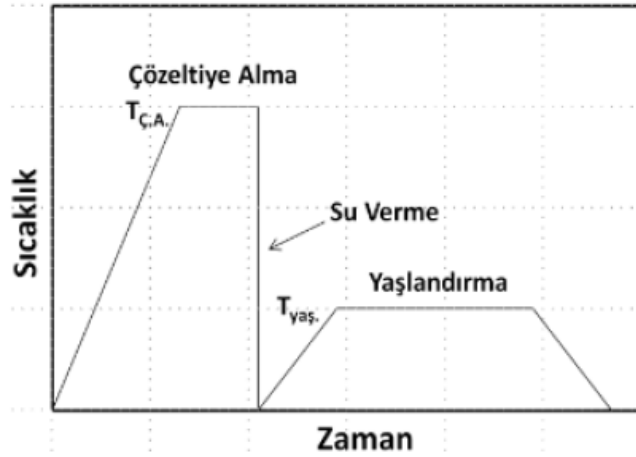
EN AC 46000 ($AlSi_9Cu_3$) alüminyum alaşımından toplamda 30 adet numune döküm işlemi yapılmıştır. Dökülen numunelerden EN AC 46000 ($AlSi_9Cu_3$) malzemesinin işlem görmeden mikroyapı ve çekme test işlemleri yapılacaktır. Daha sonra EN AC 46000 ($AlSi_9Cu_3$) malzemesi 60 dakika, 120 dakika, 180 dakika ve 240 dakika yapay yaşlandırma işlemi yapılarak sonuç incelemesi yapılmıştır. Hazırlanan numunelere $460^{\circ}C$ - $480^{\circ}C$ 'de çözeltiye alınıp ardından su verilmiştir. Su verme işleminden hemen sonra fırında $180^{\circ}C$ 'de suni (yapay) yaşlandırma işlemine alınmıştır.

Tablo 2. EN AC 46000 ($AlSi_9Cu_3$) alaşımına ait kimyasal birleşim (Chemical composition of EN AC 46000 ($AlSi_9Cu_3$) alloy)

| ALAŞIM | | ELEMENTLER | | | | |
|---------------------------------|------|------------|--------|--------|--------|--------|
| | | Si (%) | Fe (%) | Cu (%) | Mn (%) | Mg (%) |
| EN AC 46000 ($AlSi_9Cu_3$) | Min. | 8.00 | 0.60 | 2.00 | 0.00 | 0.15 |
| | Max. | 11.00 | 1.10 | 4.00 | 0.55 | 0.55 |
| | | Cr (%) | Ni (%) | Zn (%) | Pb (%) | Ti (%) |
| | Min. | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| | Max. | 0.15 | 0.55 | 1.20 | 0.35 | 0.20 |

Tablo 3. EN AC 46000 döküm koşulları (EN AC 46000 casting conditions)

| Malzeme Cinsi | Malzeme Sıcaklığı | Kalıp Sıcaklığı | Arka Pompa Basıncı | 2. Faz Akümülatör Basıncı |
|---------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------|---------------------------|
| EN AC 46000 | 640 ±10 °C | 100 °C | 145 ±10 bar | 148 ±10 bar |
| 3. Faz Akümülatör Basıncı | Enjeksiyon Basıncı | 1. Faz Enjeksiyon Basıncı | 1. Faz Hızı | 2. Faz Hızı |
| 120 ±10 bar | 250 ±10 bar | 140 bar | % 30 ±3 | 2.5 Tam Tur |
| 3. Faz Hızı | Kalıp Kapalı Kalma Süresi | Kalıp Açık Kalma Süresi | İtici Bekleme | 3. Faz uygulama Süresi |
| 2.5 Tam tur | 2 sn | 10 sn | 1 sn | 45 sn |



Şekil 2. T6 ısıl işlem prosesi (T6 heat treatment process)

Yaşlandırma işlemi yaparken tüm numuneler fırında olup süreler göre fırından hızlı bir şekilde alınmıştır. Fırının sıcaklığının korumak amacıyla yapılan bu işlemlerde max. 5°C'lik kayıp olmuştur. Bu kayıp metalografik olarak bir problem oluşturmamıştır. Sertlik ölçümü, EMCOTEST Brinell sertlik cihazında 62.5 kgf yük altında 2.5 mm çaplı bilye kullanılarak 8 saniye test süresinde ölçümü yapılmıştır. 180°C sıcaklığında 60 dakika, 120 dakika, 180 dakika ve 240 dakika olacak şekilde suni yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Alınan numuneler mikroyapıların incelenmesi için kesilerek bakalite alınmıştır. Bakalit alma işleminden sonra numuneler zımparalama ve parlatma işlemine tabi tutulmuştur.

Numuneleri zımparalama işlemi sırasında 80 grid, 240 grid, 600 grid, 1200 grid ve 2400 grid zımpara kağıtları ile yapılmıştır. Yapılan işlem sonucunda alüminyum alaşımları için kullanılan cuhada sırasıyla 3 µm ve 1 µm solüsyon ile yapılmıştır. Yapılan solüsyon işleminden sonra alüminyum alaşımları için kullanılan 0.5 cm³ hidroflüorik asit ve 99.5 cm³ su karışımı hazırlanarak hazırlanan dağlayıcı da 5-10 sn bekletilerek dağlama işlemi yapılmıştır. Mikroyapı incelemeleri NİKON MA 200 ters elektron mikroskobu ve CLEMEX yazılımı ile mikroyapı görüntüleri alınmıştır.

Çekme deneyi için SHIMADZU 10 kN'luk çekme cihazı kullanılmıştır. Çekme cihazı için her numune için 3 kez test yapılarak ortalaması alınmıştır. Yapılan çekme testinde 3 dk/mm ile çekme testi yapılmıştır. Çekme testinde EPSİLON marka Clip-On ekstensometre kullanılmıştır. Ekstansometre ile uzama, yüzde uzama kontrollü yapılarak sonuçlar alınmıştır.



Şekil 3. Çözeltiye alma ve yaşlandırma fırını (Solution and aging furnace)

Şekil 3'te ısıtım işlemi için kullanılan PROTHERM laboratuvar tipi ısıtım işlemi için yer almaktadır. 480°C'de çözeltiye alınan numuneler hızlı bir şekilde suda soğutulmuştur. Daha sonra her numune birer saat ara ile ısıtım işlemi için alınarak yapay yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 4. Yüksek basınç yöntemiyle EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşım numunesi (EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alloy sample with high pressure method)

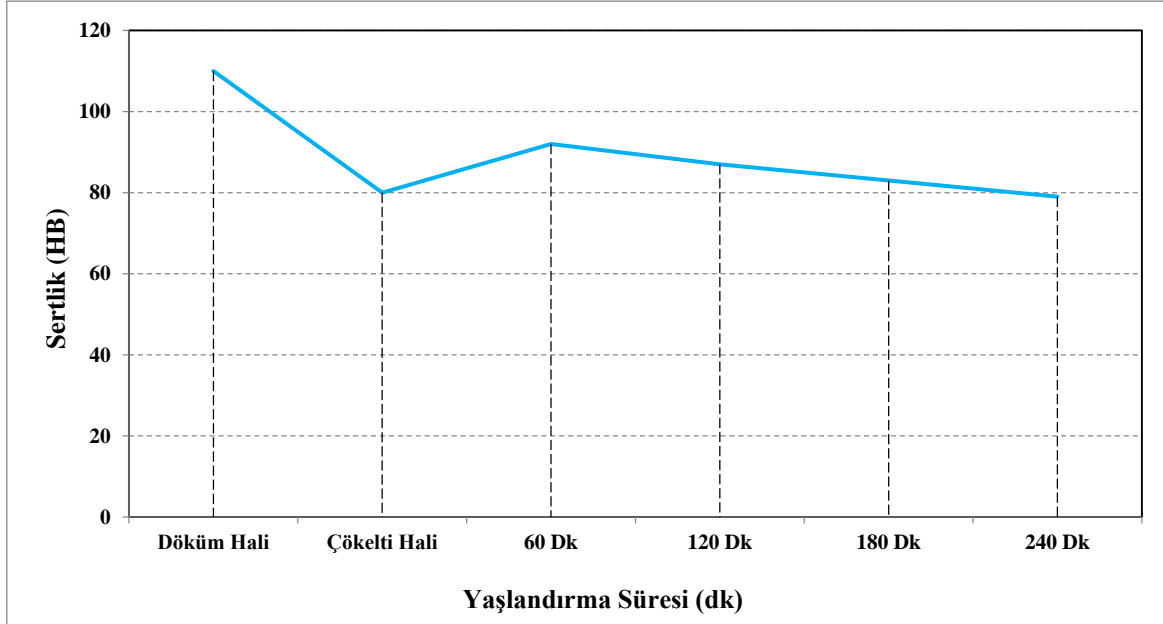
Şekil 4'te soğuk kamalı yüksek basınçlı enjeksiyon makinesinden çıkan numunelerdir. Soğuk kamalı yüksek basınçlı döküm makinesinde kalıp tasarımından sonra soğuk kamalı enjeksiyon makinesine bağlandıktan sonra döküm işlemi yapılmıştır. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımı için yaşlandırma işleminden sonra parçalar üzerinde mekanik özellikler incelenmiştir.

Soğuk kamalı yüksek basınçlı dökümde Tablo 3'te verilen parametrelere ile döküm işlemi gerçekleştirir. Döküm işleminin ardından kalıptan çıkan numuneler havada soğumaya bırakıldı. Ardından T6 yapay yaşlandırma işlemi farklı sürelerde yapılmıştır.

3. DENEY VE OPTİMİZASYON SONUÇLARI (EXPERIMENT AND OPTIMIZATION RESULTS)

3.1. Sertlik Deneyi (Hardness test)

480 °C’de çözeltiye alınan ve 180°C’de 1saat, 2saat, 3 saat ve 4 saat süre ile yaşlandırılan EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının sertlik-zaman (HB) grafiği hazırlanmıştır (Şekil 5).



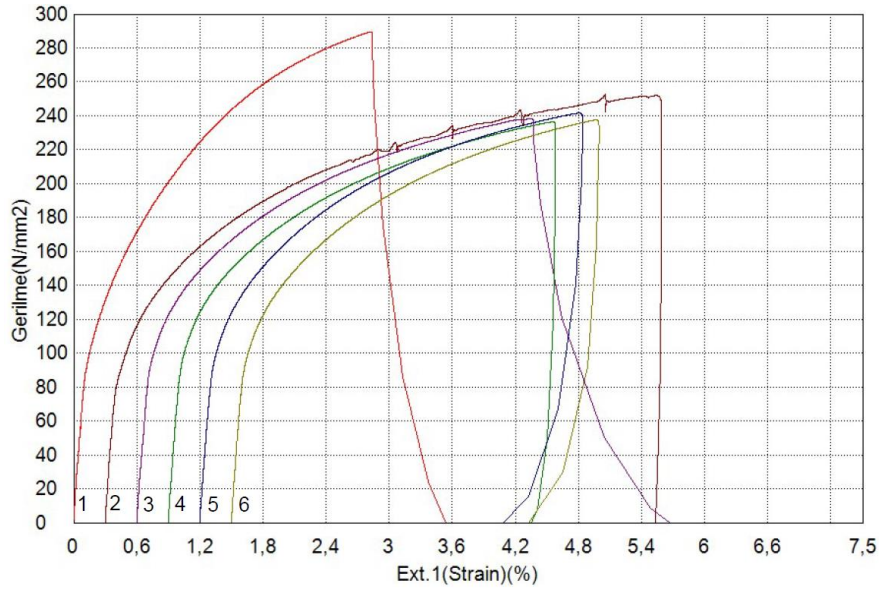
Şekil 5. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının sertlik- zaman grafiği (Hardness-time graph of EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alloy)

Şekil 5’de verilen grafikte görüldüğü üzere yaşlandırma yapılmadan EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımı en yüksek sertliğe sahiptir. Çözeltiye alındıktan sonra alaşımın sertlik değeri zamana bağlı olarak düşmektedir. 60 dakika sonunda 92 HB sertlik değerine düşmüştür. Her 60 dakika sonunda sertlik değeri azalma meydana gelmiştir.

3.2. Çekme Deneyi (Tensile test)

Tablo 4’te görüldüğü üzere işlem yapılmadan EN AC 46000 (AlSi9Cu3) malzemesinin uzama değeri en düşük seviyededir. Bununla birlikte çözelti halinde iken (hızlı soğutma yapıldığında) uzama oranı en yüksek seviyededir. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının uzama miktarı standartlarda % 0.5-3 arasındadır. Yaşlandırma prosesi ile birlikte uzama miktarı düşüşe geçmekte fakat sınır üzerinde bir uzama miktarına sahiptir. Uzama miktarının sınır üzerinde olması ile birlikte sertlik değeri de düşmektedir. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) malzemesinin çekme ve akma dayanımı doğru orantılı bir şekilde düşmektedir (Şekil 6).

Çekme testi sonuçlarına göre EN AC 46000 alüminyum alaşımında uzama miktarına bakılarak T6 ısıl işlemi uygulandığı süre boyunca alüminyum alaşımında sünekliğin arttığını söyleyebiliriz.



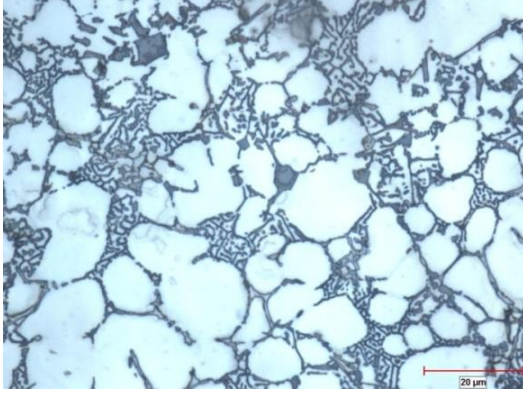
Şekil 6. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının döküm halinde (1), çözültüye alınmış (2), 60 dk yaşlandırma (3), 120 dk yaşlandırma (4), 180 dk yaşlandırma (5), 240 dk yaşlandırma (6) F-ΔL çekme grafiği (EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alloy as cast (1), dissolved (2), 60 min aging (3), 120 min aging (4), 180 min aging (5), 240 min aging (6) F-ΔL tensile graph)

Tablo 4. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının çekme test sonucu (Tensile test result of EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alloy)

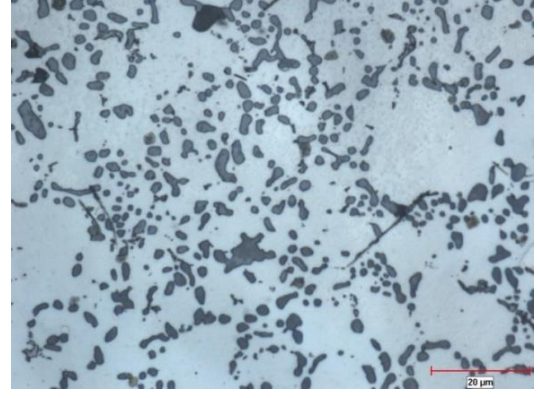
| | Çekme Dayanım (N/mm ²) | Akma Dayanımı (N/mm ²) | İlk Boy (mm) | Son Boy (mm) | % Uzama |
|------------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------|--------------|---------|
| Döküm hali | 289.430 | 230.695 | 130.0 | 131.41 | 2.82 |
| Çözültüye alma | 252.537 | 223.848 | 130.0 | 132.37 | 4.74 |
| 60 dakika yaşlandırma | 238.411 | 213.546 | 130.0 | 131.87 | 3.74 |
| 120 dakika yaşlandırma | 236.359 | 211.696 | 130.0 | 131.82 | 3.64 |
| 180 dakika yaşlandırma | 234.522 | 203.832 | 130.0 | 131.80 | 3.60 |
| 240 dakika yaşlandırma | 230.515 | 199.328 | 130.0 | 131.73 | 3.46 |

3.3. Mikroyapı İncelemesi (Microstructure Investigation)

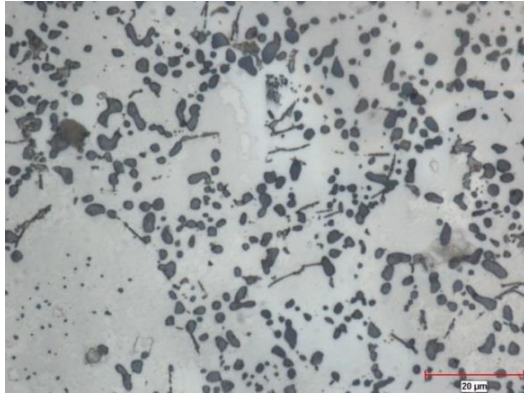
Mikroyapı incelemeleri için Keller çözeltisi ile dağlanmıştır. Dağlama sonrası NikonEclipse MA-200 ters metal mikroskobunda ClemexVisionLight görüntü analiz yazılımı kullanılarak 1000x büyütme yapılarak mikroyapı görüntüleri alınmıştır. Alınan mikroyapı görüntülerine göre yaşlandırma prosesinin uzaması ile birlikte tanecikler bir araya toplanmıştır. Taneciklerin bir araya toplanması ile birlikte mukavemet azalmıştır. Buna eş değer olarak sertlik değeri de düşmüştür. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) malzemesinin dentrit yapılarının oluşmasından dolayı çekme dayanımı en yüksek olan yapıdır. Yaşlandırma prosesi ile birlikte dentrit yapıların kaybolduğunu mikroyapılardan görülmektedir (Şekil 7).



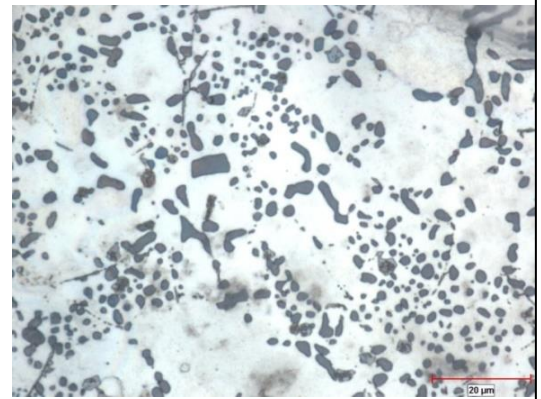
a. Döküm hali mikroyapısı



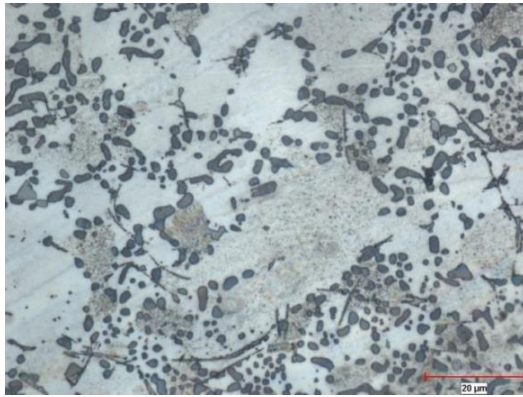
b. Çözeltiye alınmış hali mikroyapısı



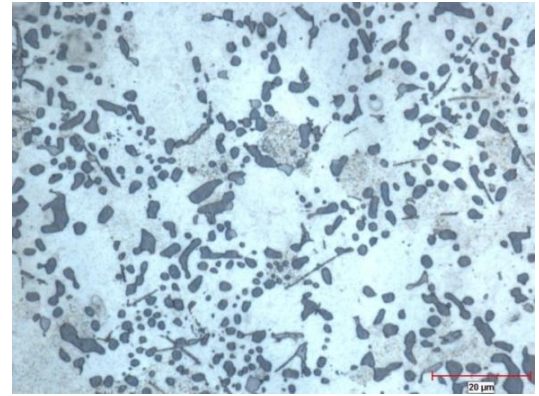
c. 60 dk yaşlandırma mikroyapısı



d. 120 dk yaşlandırma mikroyapısı



e. 180 dk yaşlandırma mikroyapısı



f. 240 dk yaşlandırma mikroyapısı

Şekil 7. Mikroyapı görüntüleri (Microstructure images)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

- Bu çalışmada yüksek basınçlı enjeksiyon döküm yöntemiyle üretilen parçalara yapay yaşlandırma (T6) sonucunda sertlik, çekme testi ve mikroyapı incelemeleri yapılarak sonuca ulaşılmıştır.
- Döküm halinde aldığımız numunede sertlik ve çekme dayanımı en yüksek sonucu elde edildi. Döküm halinde dentrit yapıların oluşumu ile birlikte en yüksek çekme dayanımına sahiptir. Ayrıca malzemeye yapılan çözeltiye alma işleminden itibaren yaşlandırma prosesinde tanelerin bir araya toplanmaya başladığını gördük. Tanelerin bir araya

toplanması ile birlikte sertlik değeri, çekme dayanımı ve akma dayanımında düşüş meydana gelmiştir. Daha sünek bir malzeme elde edilmiştir. EN AC 46000 (AlSi9Cu3) % uzama miktarı 0.5-3 arasında olması gerekirken yaşlandırma prosesi ile birlikte uzama miktarı % 3 sınırının üzerine çıkmıştır.

- EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının yüksek basınçlı enjeksiyon döküm yöntemiyle yapay yaşlandırma (T6) ısıl işleminin mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. 110 HB sertlik değerinden 80 HB sertlik değerine bir düşüş ve daha sünek malzeme elde edilmiştir.
- EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının yüksek basınçlı döküm yönteminden sonra uygulanan T6 ısıl işlemi sonucunda EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alaşımının sertlik değerinde düşüşler.
- EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alüminyum alaşımının yüksek basınçlı döküm sonunda sertlik miktarının düşürülmesi istenen durumlarda yapılmalıdır.
- Ayrıca EN AC 46000 alüminyum alaşımının sünekliliğinin artırılması istenen durumlarda yaşlandırma prosesi uygulanmalıdır.
- Çalışma sonucunda, döküm halinde çıkan numune ile 4 saat yaşlandırma yapılan numune arasında 60 N/mm^2 çekme dayanımı farklı olmuştur. Ayrıca malzeme sertliğinde yaklaşık olarak 30 HB sertlik farkı bulunmaktadır.
- Yapılan yaşlandırmalar arasında mekanik özelliklerin değişmediği gözlemlenmiştir. Çözeltiye alınan numuneler 1 saat yaşlandırma prosesi yapıldıktan sonra istenilen sertlik düşüşü yakalanmıştır. 110 HB'den 90 HB'ye düşüş yaşanmaktadır.
- Yapılan çalışma ile EN AC 46000 alüminyum alaşımı kullanılarak mekanik özelliklerin azaldığı sonucuna varılmıştır.
- EN AC 46000 alüminyum alaşımı çökeltiye alma halinde en yüksek sünekliliğe sahiptir. T6 ısıl işlem prosesinde geçen zaman boyunca çökeltiye alma haline göre süneklilik miktarı azalmıştır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Teknik yazıda kullanılan test metotları için Yıldız Pul Otomotiv Motor Parçaları Sanayi A.Ş. firmasına ve test numunelerinin dökümünde yardımcı olan Sn. Özgür GÖKÇİL'e teşekkürü borç biliriz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, Alüminyum Komisyonu, 24. Dönem Çalışma Raporu, https://www.metalurji.org.tr/arsiv/05_sektorel_rapor/aluminyum_raporu.pdf.
2. W.F. Smith, Material science and engineering, University of Central Florida, USA, 2001.
3. A.E. Geçkinli, Alüminyum alaşımlarının ısıl işlemi, 2. Isıl İşlem Sempozyumu, İstanbul/TÜRKİYE, 07-08 Şubat 2002.
4. Alüminyum alaşımlarının ısıl işlemlerinin esası, Kocaeli Üniversitesi, <https://docplayer.biz.tr/12743335-Aluminyum-alasimlarinin-isis-islemlerinin-esasi.html>
5. E. Demir, Alüminyum alaşımlarda ısıl işlem etkilerinin incelenmesi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 2008.
6. https://www.tubitak.gov.tr/tubitak_content_files/vizyon2023/mm/Ek2b.pdf, 12.04.2021.
7. M. Özcömert, Otomotiv endüstrisinde alüminyum, İstanbul Ticaret Odası, <http://www.ito.org.tr/Dokuman/Sektor/1-68.pdf>, 2006.
8. M. Dündar, G. Güngör, Otomotiv sektöründe alüminyum uygulamaları ve sürekli döküm tekniği ile üretilmiş alüminyum levha alaşımları, 2008.
9. H. Hasırcı, Effects of heat treatment parameters on the abrasive wear behaviours of the eutectic AlSi alloy, Politeknik Dergisi, 18, 7-13, 2015.
10. T.A. Başer, Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı, Mühendis ve Makina, 53: 635, 51-58, 2013.

Al-NiAl Kompozitlerin Korozyon Davranışlarının İncelenmesi

Hüseyin DEMİRTAŞ¹, Ramazan YILDIZ², Engin ÇEVİK^{2*}

¹Karabük Üniversitesi, TOBB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Karabük, Türkiye

²Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

³Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 31.10.2021

Kabul: 22.11.2021

Anahtar Kelimeler:

Aluminyum
NiAl partikül
Korozyon

ÖZET

Bu çalışmada saf Al matrisine hacimce % 40 oranında farklı tane boyutlarına sahip NiAl partikül ilavesinin, üretilen kompozitlerin korozyon performansına etkisini incelemek amaçlanmaktadır. Takviye malzemesi olarak kullanılan NiAl partiküller ark ergitme yöntemi ile atomca 1:1 oranında üretilip mekanik öğütme yöntemi ile ince partiküller haline getirilmiştir. Sonrasında titreşimli elek ile farklı boyutlarda sınıflandırılarak kompozit üretiminde kullanılmıştır. Böylece partikül boyutunun üretilen kompozitlerin korozif özelliklerine etkisi incelenmiştir. Takviye partikül oranını yüksek tutmak ve homojen dağılım sağlamak için basınçlı infiltrasyon yöntemi ile üretim tercih edilmiştir. Kompozitlerin korozif özellikleri % 3.5 NaCl ortamında potansiyodinamik polarizasyon ve daldırma korozyon testi uygulanarak belirlenmiştir. Elde edilen veriler değerlendirildiğinde 7. günde her üç numunedeki korozyon oranları birbirine yakın seyretmiştir. 21. günde ise korozyon oranı tane boyutu 45 - 63 µm olan A numunesinde 0.001 mm/yıl ölçülürken tane boyutu 90 - 125µm olan C numunesinde 0.0075 mm / yıl olarak ölçülmüştür. Her iki deney metodunda da tane boyutu düştükçe korozyon dayanımının arttığı gözlenmiştir.

Investigation of Corrosion Behaviors of Al-NiAl Composites

ARTICLE INFO

Received: 31.10.2021

Accepted: 22.11.2021

Keywords:

Aluminium
NiAl particle
Corrosion

ABSTRACT

This study aims to investigate the effect of the addition of 40 % by volume NiAl particles with different grain sizes to the pure Al matrix on the corrosion performance of the produced composites. NiAl particles used as reinforcement material were produced by arc melting method at a ratio of 1:1 by atom and turned into fine particles by mechanical grinding method. Afterwards, it was classified in different sizes by vibrating sieve and used in composite production. Thus, the effect of particle size on the corrosive properties of the produced composites was investigated. Production with pressure infiltration method was preferred in order to keep the reinforcement particle ratio high and to provide homogeneous distribution. The corrosive properties of the composites were determined by applying potentiodynamic polarization and immersion corrosion test in 3.5 % NaCl environment. When the data obtained were evaluated, the corrosion rates in all three samples were close to each other on the 7th day. On the 21st day, the corrosion rate was 0.001 mm/year in sample A with a grain size of 45 - 63 µm, while it was measured as 0.0075 mm / year in sample C with a grain size of 90 - 125µm. In both test methods, it was observed that the corrosion resistance increased as the grain size decreased.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Metal matrisli kompozitlerde bölgesel korozyon çoğunlukla matris ile takviye elemanı arasında oluşan tane sınırlarında, arayüzeyde veya dislokasyon gibi kimyasal ve fiziksel heterojenliklerin olduğu yerlerde görülmektedir. Ancak birçok araştırmacı da ilave edilen takviye elemanının ve oluşan intermetalik fazlarının meydana gelen bu lokal korozyonlara karşı bir duvar görevi görerek korozyona karşı direncin yükseldiğini söylemişlerdir [1-3].

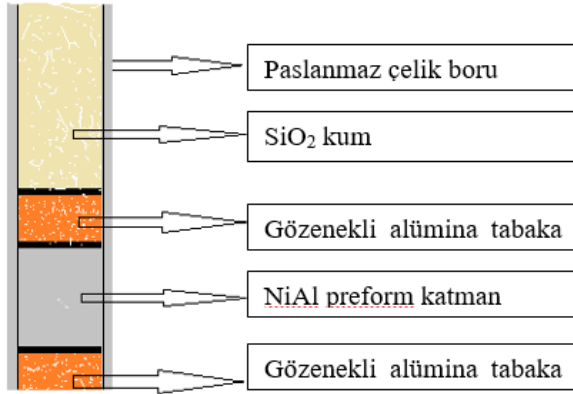
Seah vd. partikül yapısında ve çeşitli miktarlardaki garnet ilavesi ile üretilen LM 13 matrisli kompozitleri HCl çözeltisine daldırarak oluşacak korozyon üzerindeki katkısını araştırmışlardır. % 2 -4 - 6 oranlarında olacak şekilde garnet takviyeli kompozitler üretmişler. Bu kompozitlere ve LM 13 alaşımının döküm haline T6 ısıl işlemi uygulayarak bu iki ürün arasında karşılaştırma yapmışlardır. Numunelerin yaşlandırma içerisinde geçirdikleri sürelerin hepsinde takviye elemanı olan garnet arttıkça ağırlık kaybının azaldığını gözlemlemişlerdir. Üretilen bu kompozitlerin korozyon dayanımlarının artmasını malzeme yüzeyinde oluşan film tabakasına ve takviye malzemesi olan garnet partiküllerinin fiziksel duvar oluşturmaya bağlı olduğunu açıklamışlardır [4].

Candan yapmış olduğu çalışmada saf alüminyum matris ile takviye malzemesi olarak (13-23-37 μm) boyutlarında SiC partiküllerini birleştirerek AlSiC kompozit malzemeleri üretmiştir. Bu kompozitleri farklı kaplarda % 3.5 NaCl çözeltisinin içerisinde daldırarak 28 gün boyunca bekletmiştir. 28. günün sonunda kompozit malzemelerin korozyon sonuçlarını incelemiştir ve çıkan sonuçlarda en yüksek korozyon dayanımının 13 μm tane boyutuna sahip SiC takviye malzemesinin olduğu kompozitlerde olduğunu gözlemlemiştir. Kompozit içerisindeki takviye malzemesinin partikül boyutu küçüldükçe matris ile takviye malzemesi arasında oluşan tepkimeler ile meydana gelen Al_4C_3 ve serbest halde bulunan Si fazının yoğunluğunun artması, oluşan bu fazların SiC partiküllerinin birleşme noktalarına yerleşerek korozyonun ilerlemesini engellediğini belirtmiştir [5].

Bu çalışmada yüksek miktarda (% 40) takviye partikül içeren alüminyum matrisli kompozitlerin üretimi ve özellikleri incelenmiştir. Takviye malzemesi olarak farklı boyutlarda NiAl seçilmiştir. Böylece partikül boyutunun kompozitin üretilebilirlik ve korozif özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Kompozitler, gaz basınçlı infiltrasyon yöntemi ile üretilmiştir. Üretim preform malzemelerin hazırlanması ve infiltrasyon işlemi şeklinde iki aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada paslanmaz çelik boru (7 mm çap, 50 mm boy) içerisine hacimce % 40 doluluk sağlayacak şekilde NiAl intermetalik partiküller yerleştirilmiştir. Partiküllerin önüne ve ardına açık gözenekli alümina parçaları yerleştirilmiştir. Bunlardan arda kalan kısım ise silika kum ile doldurulmuştur. Hazırlanan preform malzemeye ait şematik görüntü Şekil 1’ de verilmiştir.



Şekil 1. Hazırlanan preform malzemenin şematik gösterimi (Schematic representation of the preform)

Kompozit üretiminin ikinci aşamasında infiltrasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. İnfiltrasyonun ilk aşamasında matris malzemesi 800 °C sıcaklığında grafit pota içerisinde ve argon atmosferi altında sıvı faza geçene kadar tutulmuştur. Bu şekilde 1 saat bekletildikten sonra, önceden hazırlanmış olan preform malzeme infiltrasyon ünitesine yerleştirilmiş ve uygulanan 8 bar basınç ile erimiş alüminyumun preform içerisine infiltre edilmesi sağlanmıştır. İnfiltrasyon işlemi sonrası paslanmaz tüp düzenekten çıkarılmış böylece paslanmaz çelik boru içerisine yerleşmiş kompozitler elde

edilmiştir. Sonrasında ise tornalama talaşlı imalat yöntemi ile üzerindeki paslanmaz çelik tabaka kaldırılarak kullanıma hazır kompozitler elde edilmiştir.

Öncelikle üretilen kompozit malzemeleri istenilen ölçülere getirebilmek için elmas diskli hassas kesme cihazı ile 5 mm yüksekliğinde kesilen kompozit numunelere Struers marka cihaz ile sıcak bakalite alma işlemi gerçekleştirilmiş ve daha sonra yine Struers marka olan otomatik zımpara-parlatma makinesi ile kabadan inceye olacak şekilde (240 - 1200 mesh SiC) zımparalanarak sonrasında 3 µm ve 0.3 µm alümina solüsyon ile parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatılan kompozitler ultrasonik temizleme cihazında tutulduktan sonra yüzeylerine Kellar dağlama reaktifi (2.5 ml HNO₃ + 1.5 ml HCl + 1.0 ml HF + 95 ml su) ile dağlama işlemi yapılmıştır. Yapılan bu işlem sonrasında Nikon Epiphot 200 tipi optik mikroskop ve Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem adlı cihazda SEM görüntüleri alınmıştır.

Matris ve takviye malzemesi arasında etkileşim olup olmadığını belirlemek amacıyla Rigaku Ultra IV marka XRD cihazı ile 40 kv jeneratör gerilimi, 30 mA akımda 20° - 90° aralığında ve 0.02 adım tarama boyutlu 2 derece/dk hızda XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

Korozyon testi öncesinde aynı numuneler üzerinden yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Yoğunluk ölçümü saf su içerisinde 0.1 mg hassasiyetindeki Precisa XB 200 cihazında Arşimet prensibine göre yapılmıştır.

Korozyon testi ise potansiyodinamik ve daldırma korozyonu olmak üzere 2 farklı şekilde uygulanmıştır. Bu yüzden kompozit malzemeler 2 farklı boyutta kesilerek sırasıyla zımparalama, parlatma, ultrasonik cihaz ile saf su içerisinde temizleme ve sıcak hava ile kurutma işlemlerinden geçirilmiştir. Hazırlanan bu kompozit malzemelerin ilki 7mm çapında ve 3 mm boyundadır ve bu kompozit numune PARSTAT 4000 cihazında % 3.5 NaCl içeren saf su çözeltisi içerisinde potansiyodinamik korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Karşıt elektrot olarak bir çift grafit çubuk ve serbest korozyon potansiyeli ölçümlerinde referans elektrot olarak doygun kalomel elektrot (SCE) kullanılmıştır. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde açık devre (OC) değerini belirlemek için numunelere -725 mV, 15 dakika süresince uygulanmıştır. Anodik ve katodik bölge deneyleri ayrı olarak yapılmıştır. Deneyler sonucunda korozyon oranı mm / yıl cinsinden ASTM G-102 standardında geçtiği şekilde Faraday kanunundan faydalanarak aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır [6];

$$CR = 3,27 \times 10^{-3} \times \frac{I_{corr} \times (EW)}{d} \quad (1)$$

Formülde CR korozyon oranını (mm/yıl), I_{corr} korozyon akım yoğunluğunu (µAcm²), EW eşdeğer ağırlık (equivalent weight, gr) ve d ise yoğunluğu (gr/cm³) vermektedir.

İkinci kompozit malzeme ise 21 gün sürecek daldırma korozyonu testinde kullanılmıştır. 7 mm çapında ve 3 mm boyunda hazırlanan kompozit malzemeler ilk olarak yüzey alanları hesaplanıp hassas terazi ile tartılmıştır. Daha sonra ise ortam sıcaklığında cam kavanozda saf su içerisine % 3.5 NaCl ilavesi ile hazırlanan çözeltiye polimer file içerisine konularak daldırılmıştır. Çözelti içerisindeki kompozit malzemeler 7, 14 ve 21. günlerde buldukları çözelti dolu kavanozlardan çıkartılıp saf su yardımı ile ultrasonik temizleyicide 5 dakika temizlendikten sonra kurutma işlemi uygulanmış ve 0.1 mg hassasiyetteki hassas terazi ile tartılmıştır. Tartım sonucu kaydedildikten hemen sonra kompozit numuneler kavanozlara tekrar aynı şekilde daldırılmış ve bu işlem belirtilen günlerde tekrarlanmıştır. 21' inci günün sonunda aynı işlemler yapıp tartıldıktan sonra numunelerden Nikon Epiphot 200 tipi optik mikroskop ile yüzey görüntüleri alınmıştır. Testler sonrasında ölçülen kayıp miktarları ASTM G-31'de verilen (2) nolu formül ile hesaplanmıştır [7];

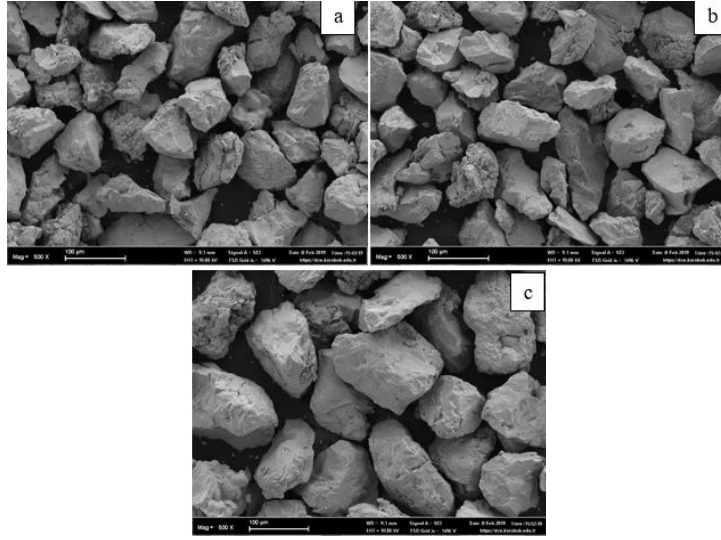
$$CR = \frac{K \times W}{A \times T \times D} \quad (2)$$

Formülde CR korozyon ilerleme oranını (mm / yıl), K sabit sayıyı (mm / yıl için 87.6), W ağırlıkça kayıp miktarını (miligram), D yoğunluğu (gr / cm³), A korozyona maruz kalan yüzey alanını (cm²) ve T ise korozyon süresini (saat) ifade etmektedir.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

3.1. Mikroyapı İncelemeleri (Microstructure Examinations)

Takviye olarak kullanılan intermetalik NiAl (at. 1:1) ark ergitme yöntemi ile üretilmiştir. Üretim sonrası halkalı öğütücü ile yapılan öğütme işlemi sonrası titreşimli elek kullanılarak sınıflandırılan takviye partikülleri 45 - 63 μm (a), 63 - 90 μm (b) ve 90 - 125 μm (c) boyutlarında elde edilmiştir. Üretimde kullanılan bu partiküllere ait SEM görüntüleri Şekil 2’ de verilmiştir.



Şekil 1. Farklı boylardaki NiAl partikülleri (Different sizes NiAl particles)

Matris malzemesi olarak ticari saflıkta alüminyum (AA1050) kullanılmıştır. Bu alüminyuma ait spektral analiz sonucu Tablo 1’de verilmiştir.

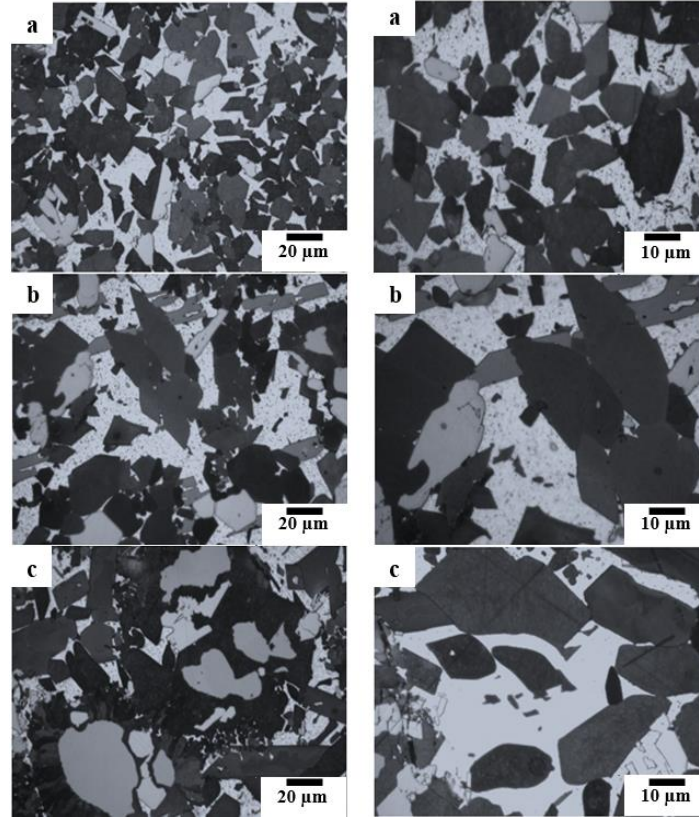
Tablo 1. Matris olarak kullanılan ticari saflıktaki alüminyumun spektral analizi (Spectral analysis of commercially pure aluminum used as matrix)

| | Pb | Mg | Al | Zn | Cu | Fe | Mn | Ni | Si | Sn | Ti |
|---------------|-----|-------|--------|-------|-------|-------|-----|-----|-------|-----|-------|
| AA1050 | 0.1 | 0.002 | 99.588 | 0.011 | 0.011 | 0.215 | --- | --- | 0.116 | --- | 0.020 |

Farklı boyutlarda NiAl partikül içeren Al matrisli kompozitlere ait mikroskop görüntüleri Şekil 3’te verilmiştir. Mikroyapı görüntülerinde açık renkli bölgeler Al matris malzemesini göstermektedir. Diğer koyu bölgeler ise partikül takviyelerine aittir. Bu bölgelerdeki kontrast farklılıkları dağlama işleminin etkisinden ve farklı fazlar içermesinden kaynaklanmaktadır. Genel olarak bakıldığında takviye malzemelerinin matris içerisinde iki boyutlu gözlemlerde net olmasa da üç boyutlu olarak değerlendirildiğinde homojen bir dağılım gösterdiği ve belirgin boşlukların olmadığı belirlenmiştir. Bu durum infiltrasyon prosesinin başarılı bir sonuç verdiğini göstermektedir. Şekil 3’deki mikroyapıda da görüldüğü üzere çeşitli renk kontrastlarında fazların varlığı aşikârdır. Bu fazların kimyasal değişimlerini belirlemek üzere fazlar üzerinden alınan EDS ölçümleri Şekil 4’ te verilmiştir. Bu ölçüm değerleri incelendiğinde genel olarak matrisin saf Al ve az miktarda oksitlerden oluştuğu görülmektedir. Al’ un yüksek oksijen afinitesi olduğu bilinmektedir [8]. Üretim aşamasında ise hazırlanan preform malzeme koruyucu gaz atmosferinde tutulmamıştır ve düşük miktardaki kirliliğin bu durumdan kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

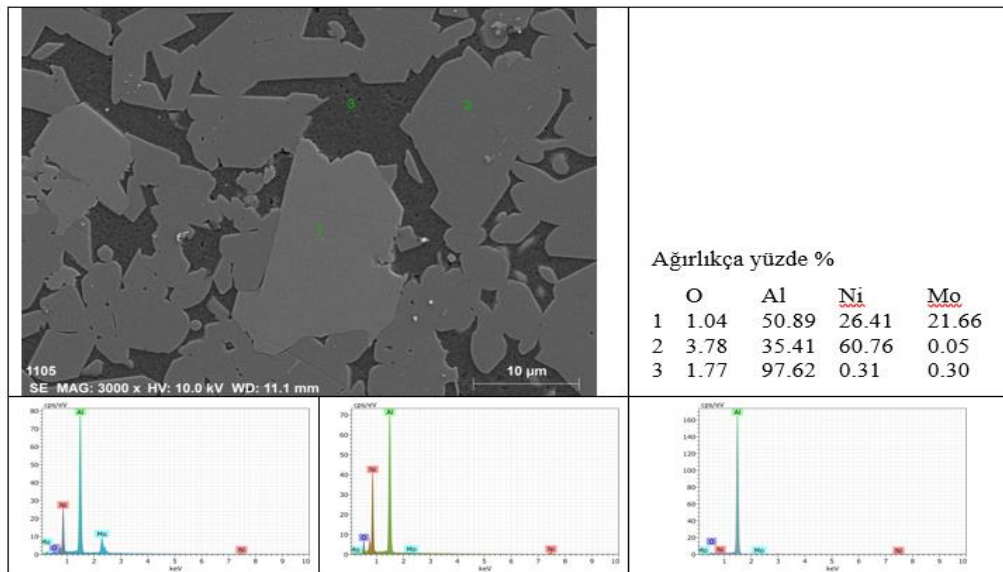
Takviye malzemesinin ise atomca yaklaşık 1:1 oranında Ni ve Al içerdiği belirlenmiştir. Fakat bu fazın yer yer üzerinde ve yanında farklı bir faz oluştuğu tespit edilmiştir. Tespit edilen bu faz üzerinde yapılan EDS ölçümünde ağırlıkça farklı oranlarda Al, Ni ve Mo elementlerini içerdiği

görülmüştür. Bu konuda daha detaylı inceleme XRD analizlerinde yapılmış ve bu fazın üçlü Al-Ni-Mo fazı olduğu belirlenmiştir.



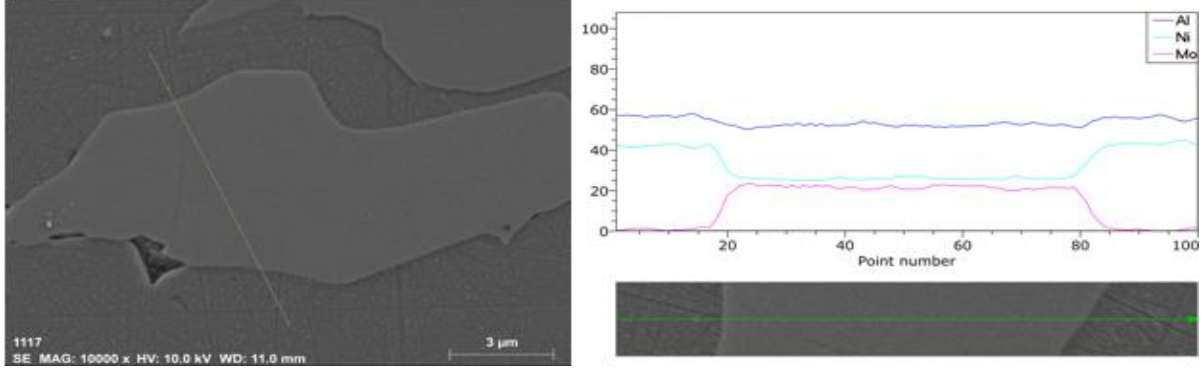
Şekil 3. Farklı boyutlarda NiAl partikül içeren kompozitlere ait mikroyapı görüntüleri (Microstructure images of composites containing different sizes.NiAl particles)

Oluşan fazlar dışında NiAl partiküllerde büyük miktarda bozulmalar tespit edilmemiştir. Normalde NiAl' un, Al ile etkileşime geçme potansiyeli yüksektir ve böylece NiAl ile Al arasında Al' ca zengin çeşitli NiAl fazlarının oluşması muhtemeldir (Al_3Ni_2 , Al_5Ni_3 gibi). Bu sebeple partiküllere bir miktar Mo ilave edilmiş ve üretim prosesi kısa tutulmaya çalışılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda alınan bu tedbirlerin faydalı olduğu görülmüştür. Fakat yine de mikroyapıda Al' ca zengin NiAl fazlarının oluştuğu XRD analizlerinde tespit edilmiştir.



Şekil 4. A malzemesine ait SEM görüntüsü ve farklı bölgelerin nokta EDS analizleri (SEM image of sample A and point EDS analysis of different regions)

NiAl partiküllerinin üzerinde bulunan Mo içeren faz bölgesinde yapılan çizgi EDS analizi Şekil 5’ te verilmiştir. Bu incelemede de görüldüğü üzere alt faz Ni ve Al içermektedir. Üzerinde oluşan fazda ise molibden oranı hızla artmakta Ni oranı ise buna orantılı olarak düşmektedir. Bunların yanı sıra Al miktarında da bir miktar düşüş görülmüştür. Sonuç itibariyle XRD analizlerinde de belirtildiği gibi Al’ ca zengin Al-Ni-Mo üçlü fazı oluştuğu tespit edilmiştir.



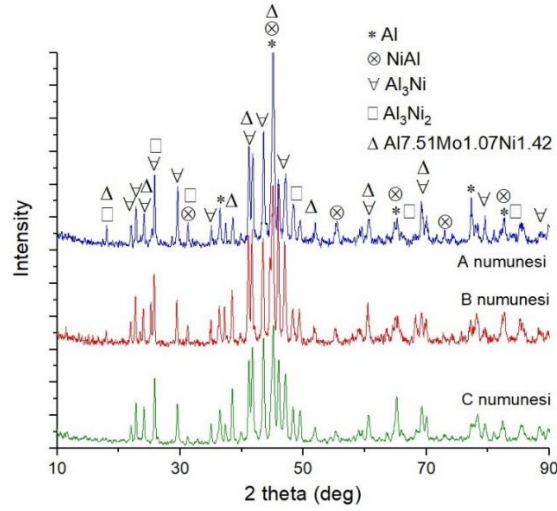
Şekil 5. C numunesi mikroyapı görüntüsü ve çizgi EDS analizi (Microstructure image and line EDS analysis of C sample)

3.2. XRD İncelemeleri

Kompozitler üzerinde yapılan XRD analiz sonuçları toplu halde Şekil 6’ da verilmiştir. Genel olarak incelendiğinde her üç tür kompozitte de benzer piklerin oluştuğu görülmektedir. Oluşan paternlerden keskin Bragg pikleri Al, NiAl, Al_3Ni_2 , Al_3Ni ve Al-Ni-Mo üçlü fazlarından oluşmaktadır.

Gözlemlenen keskin pikler dışında küçük birçok pik de görülmektedir. Bunların birçoğu belirtilen fazların oluşturduğu keskin piklerin devamı niteliğindedir. Bu fazlar dışında literatür incelemelerinde Ni, Al ve Mo arasında çeşitli fazların oluştuğu belirtilmiştir [9]. Elde edilen patern üzerinde tanımlanamayan bazı küçük piklerin bu alaşım kombinasyonuna bağlı olarak da oluşabileceği düşünülmektedir.

Oluşan fazlar değerlendirildiğinde, NiAl partiküllerinin bir kısmının Al matris ile etkileşime geçerek Al_3Ni ve Al_3Ni_2 gibi Al’ ca zengin fazlar oluşturduğu görülmektedir. Üretimin 800 °C’de gerçekleştirildiği düşünülürse bu dönüşümlerin oluşması normaldir. Zaten bu durum önceden beklendiği için partiküllere Mo ilave edilmiş ve üretim süresi kısa tutulmuştur. Bunların sonucunda mikroyapı incelemelerini de göz önüne aldığımızda büyük miktarda çözünmelerin oluşmadığı belirlenmiştir.



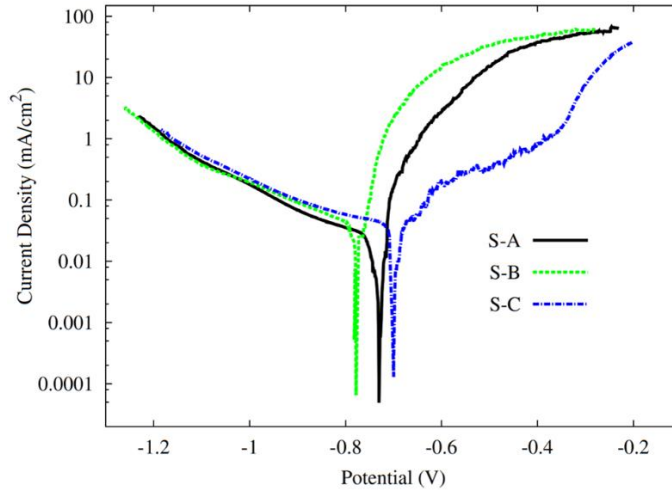
Şekil 6. Kompozit malzemelere ait XRD analizi (XRD analysis of composite materials)

3.3. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Kompozitlerin yoğunluk değerleri sırası ile A malzemesi için 3.583 gr / cm^3 , B için 3.293 gr / cm^3 ve C için ise 3.649 gr / cm^3 olarak ölçülmüştür. Bu yoğunluk değerlerine bakıldığında hacimce ilave edilen partikül oranı benzer olmasına rağmen değerlerde farklılıklar gözlemlenmiştir. Ayrıca teorik olarak yoğunluk değerinin 3.9 gr/cm^3 civarında olması beklenmektedir. Bu durum partikül boyutunun paketlenabilirliğe etkisine ve mikroyapı incelemelerinde de farkedildiği şekilde kompozitin tüm kesitinde homojenlik göstermemesine bağlanmıştır. Stokiyometrik olmayan NiAl' in yoğunluğu Al' ca zengin olan bölgelerde 5.3 g/cm^3 e kadar düşebilmektedir [10].

3.4. Korozyon Testi Sonuçları

Potansiyodinamik polarizasyon deneyi anodik ve katodik bölgelerde tarama ayrıık olarak yapılmış ve birleştirilmiş hali Şekil 7' de verilmiştir.



Şekil 7. Potansiyodinamik polarizasyon deney grafikleri (Potentiodynamic polarization tests plots)

Şekil 7' de verilen grafik incelendiğinde anodik bölgedeki verilen gerilim başına çekilen akım değerlendirildiğinde A ve B numuneleri benzer davranışlar sergilediği C numunesinin ise diğerlerine göre daha pasif davrandığı grafik eğrilerinden anlaşılmaktadır. Katodik bölgede ise oluşan grafikler birbirlerine oldukça yakın oluşmuşlardır. Bunların dışında grafiklerde herhangi bir aktifleşme yada pasifleşme bölgesi oluşmamıştır.

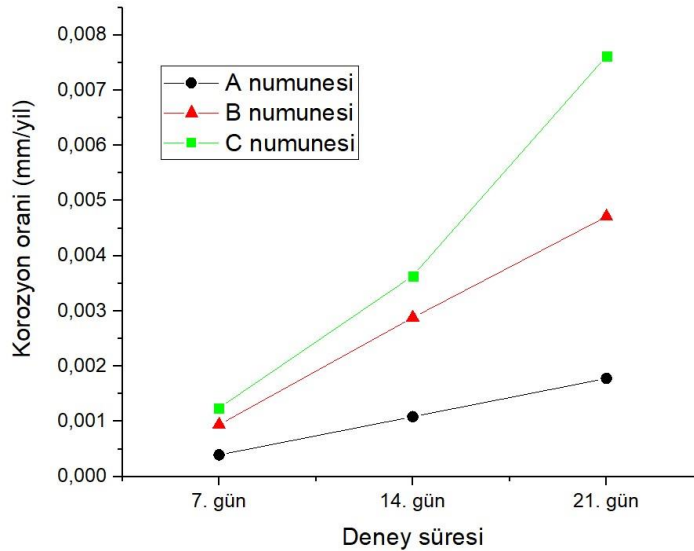
Grafikteki korozyon potansiyeli (E_{corr}) değerleri 15 dk'lık açık devre (OC) deney sonucu edinilen değerlerdir. Grafikler bu yönden değerlendirildiğinde B malzemesi en agresif A malzemesinde ise korozyon oranı en düşüktür. Bu sonuç anodik bölgedeki oluşum ile de tutarlılık göstermektedir.

Grafikte genel bir tafel ekstrapolasyonu oluşturulamadığından dolayı sadece katodik bölgedeki datalar kullanılarak akım yoğunluğu (i_{corr}) değerleri belirlenmiştir. Belirlenen i_{corr} değerleri ve buna bağlı olarak Faraday kanunu (ASTM G-102) ile hesaplanan korozyon oranları Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 2. Potansiyodinamik polarizasyon deneyleri sonrasında belirlenen korozyon yoğunluğu (i_{corr}) ve korozyon oranı değerleri (Corrosion density (i_{corr}) and corrosion rate values determined after potentiodynamic polarization tests)

| | Korozyon yoğunluğu ($\mu\text{A} / \text{cm}^2$) | Korozyon oranı (mm / yıl) |
|---|--|---------------------------|
| A | 6.51 | 0.22 |
| B | 14.30 | 0.48 |
| C | 11.00 | 0.37 |

Tablo 2' de verilen korozyon değerlerine bakıldığında i_{corr} değeri ve buna bağlı olarak korozyon oranı A numunesinde en düşük çıkmıştır. En yüksek korozyon oranı B malzemesinde çıkmakla birlikte C'ye yakın değerler tespit edilmiştir. Bu kullanılan i_{corr} değerleri açık devre (OC) testinden edinilen değerlerin oluşturduğu eksen ve katodik bölgenin ekstrapolasyonu ile elde edildiğinden dolayı OC değerleri ile de benzerlik göstermektedir. Bu edinilen değerler deney numuneleri arasındaki nitel farklılıkları vermekle birlikte gerçekçi sonuçlar sunmayacağı bilinmektedir. Bu amaçla benzer tuzluluk ortamında daldırma korozyon deneyleri gerçekleştirilmiş ve mm / yıl cinsinden hesaplanan korozyon oranları Şekil 8' de verilmiştir.



Şekil 8. % 3.5 NaCl ortamında daldırma korozyonu test grafiği (Immersion corrosion test chart in % 3.5 NaCl solution)

Şekil 8'e baktığımızda ilk 7 günün sonunda özellikle B ve C numunelerinde kütle kayıplarının birbirine yakın seyrettiği görülmüş fakat ilk periyottan sonra, NiAl partikül boyutunun küçültülmesinin önemli ölçüde korozyon direncinin arttırdığı ve sonuç olarak en fazla kütle kaybının C numunesinde gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Yapılan çalışmalar daha büyük boyutlu

partikül kullanıldığında ve korozif çözeltiliye maruz kalma süresi arttıkça korozyon dayanımının düştüğü ve oyuklanma potansiyelinin arttığını rapor etmiştir [5, 11].

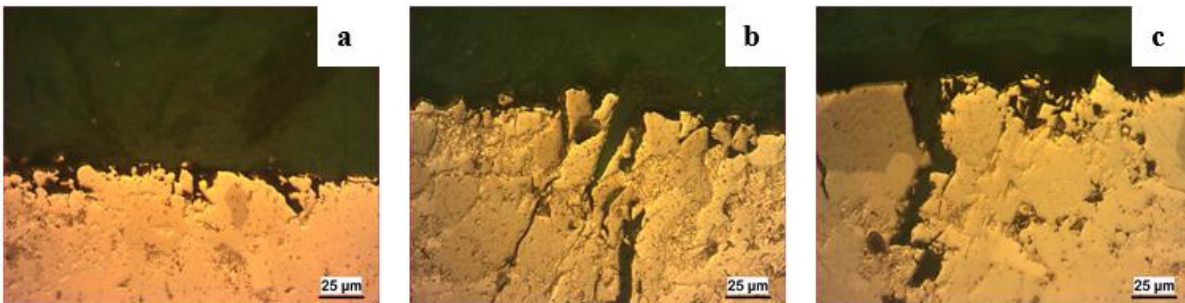
Potansiyodinamik polarizasyon deneyinde ince bir tabakada test yapılırken daha gerçekçi olan daldırma korozyonunda kayıplar çok daha büyük olmaktadır. Bu durumda yüksek oranda takviye fazı içeren deney numunesinde matrisin korozyona uğraması ile tutucu özelliğini yitirdiği ve bu sebeple malzemede büyük çukurcukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Yoğunluk ölçüm sonuçlarını incelediğimizde en düşük yoğunluk 3.583 gr / cm^3 ile A numunesinde tespit edilmiştir. Bu sonuçlar bize düşen tane boyutunun porozite miktarını arttırdığını göstermektedir ki buna rağmen korozyon dayanımı artmaktadır. Elde edilen sonuçlara göre üretilen kompozitlerin korozyon davranışlarında tane boyutu ve arayüzeyde oluşan intermetalikler poroziteden daha ziyade rol oynamaktadır.

Literatürde de belirtildiği gibi Al ve seramik partiküller arasındaki reaksiyonun bir sonucu olarak oluşan intermetaliklerin, kompozitler içindeki matris kanallarının sürekliliğinin kesintiye uğraması nedeniyle kompozitlerin korozyon direncine yararlı bir etkisi olduğunu göstermiştir [5]. Bilindiği üzere tane boyutu küçüldüğünde yüzey alanı artan takviye elemanı ile matris malzemesinin reaksiyon hızı artmaktadır. Bu durum yapılan XRD analizlerinde de görülmektedir. Sonuç olarak Şekil 9’ da incelenen kompozit malzemelere ait yüzey fotoğraflarına baktığımızda korozyon kaynaklı yüzey deformasyonu özellikle B ve C numunelerinde oyuklanma şeklinde görülmekte bu durumda oldukça büyük kütle kayıplarına yol açmaktadır. A numunesinde ise daha düşük kütle kayıpları olmasının yanında yüzeyde daha küçük oyuklanmalar görülmektedir.



Şekil 9. Daldırma korozyon testi sonrası yüzeyden alınan makro fotoğraflar (Macro-photos was taken from the surface after immersion corrosion test)

Yan kesit fotoğraflarına baktığımızda (Şekil 10) ise korozyonun matris boyunca gerçekleştiği takviye ve oluşan intermetaliklerin matris sürekliliğini bozarak korozyon ürünlerine karşı bariyer görevi yaptığı görülmektedir [5]. Bunun yanında takviye elemanı ile matris arasında galvanik ikili oluştuğu ve matrisin korozyonunun hızlandığı düşünülmektedir. Bunun sonucunda da matris ile bağlantısı kesilen takviyelerinde kompozit yapıdan ayrılarak korozyonun hızlanmasında etkili olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 10. Daldırma korozyon testi sonrası yan kesitten alınan mikro fotoğraflar (Micro-photos was taken from the cross-section after the immersion corrosion test)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada yüksek oranda (% 40) NiAl partikül takviyeli Al matrisli kompozitler basınçlı infiltrasyon yöntemi ile başarılı bir şekilde üretilmiştir. Üretim aşamasında partikül boyutu değiştirilerek bu faktörün kompozitin özelliklerine etkisi incelenmiştir.

Korozyon deneyleri sonrasında en küçük partikül boyutuna sahip kompozit en yüksek korozyon direnci gösteren malzeme olmuştur. Diğer ikisi ise potansiyodinamik polarizasyon deneyinde yakın değerler göstermekle birlikte daldırma korozyonunda en yüksek ağırlık kaybına en kaba partiküllü C kompoziti uğramıştır.

Sonuç itibari ile üretilen kompozitler genel manada kıyaslandığında her iki korozyon metodunda da en yüksek korozyon dayanımı 45-63 µm aralığında NiAl partikül içeren A kodlu kompozitte elde edilmiştir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir. (Proje no: KBUBAP-18-YL-149).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. A.Lekatou, A.E. Karantzalis, A. Evangelou, V. Gousia, G. Kaptay, Z. Gácsi, P. Baumli and A. Simon, Aluminium reinforced by WC and TiC nanoparticles (ex-situ) and aluminide particles (in-situ), Microstructure, wear and corrosion behaviour, Materials and Design, 65: 1121–1135 (2015).
2. H. Çuğ and M. E. E. Erhaima, Effect of Mn and Zr Addition on Microstructure, Wear and Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V Composite Biomaterials Produced by Powder Metallurgy, Manufacturing Technologies and Applications, 2 (2): 41-48 (2021).
3. S. Candan, An investigation on corrosion behaviour of pressure infiltrated Al–Mg alloy/SiCp composites, Corrosion Science, 51: 1392–1398 (2009).
4. K. H. W. Seah, M. Krishna, V. T. Vijayalakshmi and J. Uchil, Corrosion behaviour of garnet particulate reinforced LM13 Al alloy MMCs, Corrosion Science, 44: 917–925 (2002).
5. S. Candan, Effect of SiC particle size on corrosion behavior of pressure infiltrated Al matrix composites in a NaCl solution, Mater Letters, 58(27-28): 3601–3605 (2004).
6. ASTM G102-89, Standard practice for calculation of corrosion rates and related information from electrochemical measurements, ASTM International, 2004.
7. ASTM G 31-72, Standard practice for laboratory immersion corrosion testing of metals, ASTM International, 1990.
8. M. Conserva, G. Donzelli and R. Trippodo, Aluminum and Its Applications, Edimet, Brescia, 1992.
9. B. Grushko, S. Mi, J.G. Highfield, A study of the Al-rich region of the Al–Ni–Mo alloy system, Journal of Alloys and Compounds, 334 (1-2): 187–191 (2002).
10. A. Taylor and N. Doyle, Further studies on the nickel–aluminium system. I. β NiAl and δ -Ni₂Al₃ phase fields, Journal of Applied Crystallography, 5(3): 201–209 (1972).
11. H. M. Zakaria, Microstructural and corrosion behavior of Al/SiC metal matrix composites, Ain Shams Engineering Journal, 5(3): 831-838 (2014).

GG25 Dökme Demirin Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Kesme Sıcaklığı Üzerine Etkisi ve Optimizasyonu

Raşit DÜZCE¹ , Gürcan SAMTAŞ^{2,*} 

¹Düzce Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İmalat Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Düzce, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 04.11.2021

Kabul: 29.11.2021

Anahtar Kelimeler:

GG25

Yüzey frezeleme

Optimizasyon

Kesme sıcaklığı

Taguchi

ÖZET

GG25 en yaygın olarak kullanılan dökme demir alaşımıdır. Bu malzeme, yüksek sağlamlık ve aşınma direncine sahiptir ve ek ısıl işleme ihtiyaç duymaz. Bu nedenle üretim maliyetleri düşüktür. Ağırlıklı olarak perlitik yapıya sahip lamelli bir dökme demirdir. Sertlikleri 230 Brinell'e kadar çıkabilmektedir. Bu nedenle özellikle delme ve frezeleme işlemleri zordur. Bu çalışmada özel olarak dökürülmüş GG25 numunelerine yüzey frezeleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Yüzey frezeleme işlemi için üç farklı kaplamaya sahip kesici uç (TiAlN kaplamalı, TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplamalı ve AlTiN kaplamalı), üç farklı kesme hızı (150, 200 ve 250 m/dak), üç farklı ilerleme (0.10, 0.25 ve 0.35 mm/diş) ve üç farklı kesme derinliği (0.5, 1 ve 1.5 mm) kesme parametresi olarak kullanılmıştır. Deneysel tasarım için Taguchi L27 (3⁴) ortogonal dizisi seçilmiş ve 27 deney gerçekleştirilmiş, kesme parametreleri Taguchi metodu ile optimize edilmiştir. Her bir deney esnasında kesme bölgesinden termal kamera ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlar Varyans analizi ve üç boyutlu grafikler ile değerlendirilmiştir. Optimizasyon sonucunda minimum sıcaklık için optimum parametreler, TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici uç, 200 m/dak kesme hızı, 0.25 mm/diş ilerleme oranı ve 0.5 mm kesme derinliğidir. Varyans analizi değerlendirildiğinde sıcaklığa etki eden et etkili faktör kesme derinliği olmuştur. Taguchi optimize parametreler ve üç boyutlu grafikler değerlendirildiğinde, minimum sıcaklık için en uygun kaplama türü TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici uç olduğu görülmüştür.

Effect of Cutting Parameters on Cutting Temperature and Optimization in Milling of GG25 Cast Iron

ARTICLE INFO

Received: 04.11.2021

Accepted: 29.11.2021

Keywords:

GG25

Face milling

Optimization

Cutting temperature

Taguchi

ABSTRACT

GG25 is the most widely used cast iron alloy. This material has high strength and wear resistance, and does not require additional heat treatment. Therefore, production costs are low. It is a lamellar cast iron with a predominantly pearlitic structure. Their rigidity can go up to 230 Brinell. Therefore, drilling and milling operations are particularly difficult. In this study, face milling was performed on specially cast GG25 samples. For face milling, a cutting insert with three different coating (TiAlN coated, TiN-TiCN-Al₂O₃ coated, and AlTiN coated), three different cutting speeds (150, 200 and 250 m/min), three different penetration rates (0.10, 0.25 and 0.35 mm/tooth), and three different cutting depths (0.5, 1 and 1.5 mm) were used as cutting parameters. Taguchi L27 (3⁴) orthogonal sequence was selected for experimental design, and 27 experiments were performed, and the cutting parameters were optimized by the Taguchi method. During each experiment, temperature measurements were taken on the cutting zone with a thermal camera. Experimental results were evaluated with analysis of variance and three-dimensional graphics. Optimum parameters regarding minimum temperature at the end of optimization were TiN-TiCN-Al₂O₃ coated cutting insert, cutting speed of 200 m/min, 0.25 mm/head penetration rate, and 0.5 mm cutting depth. When the analysis of variance was evaluated, the most effective factor affecting the temperature was cutting depth. When the Taguchi optimized parameters and three-dimensional graphics were evaluated, it was seen that the most suitable coating type for minimum temperature is TiN-TiCN-Al₂O₃ coated cutting insert.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dökme demirler; sertlik, aşınma direnci, işlenebilirlik, korozyon direnci ve mukavemet gibi mekanik özelliklerinin yanı sıra daha kolay üretilebilir ve ekonomik olmalarından ötürü yaygın olarak kullanılan mühendislik malzemeleridir [1]. Dökme demirlerin işlenmesi yani talaşlı imalatı, dökümün tipine ve mikro yapısına bağlıdır. Beyaz dökme demirin talaşlı imalatı oldukça zor iken, ferritik dökümün ise, diğer dökme demirlere oranla daha kolaydır. Küresel grafitli dökme demir, vermüküler grafitli dökme demir, alaşımlı ve temper dökme demirlerin işlenebilirlikleri ise beyaz ve ferritik döküm arasındadır [2].

Talaşlı imalatta kullanılan kesici takımlarda oluşan deformasyonlar; işlenen malzemenin yüzey kalitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu olumsuzluklardan en önemlisi takım ömrünün azalmasıdır. Kesici takımların ömrünün azalması, kesici takım maliyetlerini, diğer bir deyişle üretim maliyetlerini etkileyen en önemli faktörlerden birisidir. Dolayısıyla takım ömrünü etkileyen parametrelerin bilinmesi, bu parametrelerin kontrol altına alınabilecek tedbirlerin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır [3].

Bir malzemenin iyi mekanik özelliklere sahip olması, o malzemeyi diğer malzemelerden ayıran en önemli etkenlerden bir tanesidir. Ayrıca, malzemenin talaşlı imalatı da mekanik özellik kadar ayrı bir önem taşımaktadır. Mühendislik malzemelerinin talaşlı imatlarının iyileştirilmesi, imalat esnasında maliyeti düşüreceği için, endüstriyel anlamda önemli bir parametredir. Bu nedenle, literatürde talaşlı imalat ile ilgili değişik çalışmalara rastlamak mümkündür. Literatür değerlendirildiğinde bazı çalışmalarda, küresel grafitli dökme demir ve östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlere katılan alaşım elementlerinin, mikroyapı, mekanik özellikleri, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülükleri üzerinde büyük etkilerinin olduğu belirtilmiştir [4, 5]. Yine bazı çalışmalarda, küresel grafitli dökme demir ve östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin talaşlı imalatında, düşük östemperleme sıcaklığının, kesme kuvvetlerini artırırken yüzey pürüzlülüğü değerlerini düşürdüğü, hızın artırılmasının ise, kesme sürecinde oluşan titreşimi azalttığı belirtilmiştir [6,7]. Ayrıca literatürde, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirlerin abrasif aşınma davranışına, östemperleme işleminde soğutmanın etkisini ve östemperleme sıcaklığının ve süresinin talaşlı imalat üzerine etkisini araştıran, değişik çalışmalara da rastlanmaktadır [8-10]. Moncada vd. östemperlenmiş dökme demirlerin tornalanmasında işlenebilirliği etkileyen parametreleri araştırmışlardır [11]. Dökme demirlerin işlenebilirliğinde kesici takımlarda ortaya çıkan aşınma tipleri abreziv, adeziv ve difüzyon aşınmalarıdır. Dökme demir işlemede aranan kesici takım özellikleri yüksek sertlik ve kimyasal kararlılıktır. Sinterlenmiş karbürlerin yanı sıra seramik kesici takımlar da dökme demir işlemede kullanılır [12]. Marwanga vd., tornalama işleminde; işleme sırasında dökme demirlerin mikro yapısındaki değişiklikleri incelemişlerdir [13]. Ahmet vd. yaptıkları çalışmada, dört farklı lamel grafitli dökme demirlerin tornalanmasında kalem ile parça arasında meydana gelen gerilme, işleme şartları ve malzeme yapısının etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında, gerilim farkı artışının en büyük etkeni, toplam kesitteki grafit miktarı artışından kaynaklandığını tespit etmişlerdir [14]. Kaçal vd., GGG70 sfero dökme demirin frezelenmesinde kesici takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünü araştırmışlardır. Deney sonuçlarına göre ilerleme değerinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün de arttığı görülmüştür [15]. Kahraman vd. yaptıkları çalışmada, vermüküler grafitli dökme demirlerin frezelenmesinde östemperleme sıcaklığı ve süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisini araştırmışlardır. Çalışmalarında östemperleme ısıl işleminin malzemelerin yüzey kalitesini iyileştirdiğini gözlemlemişlerdir [16]. Çakıroğlu ve Uzun yaptıkları çalışmada, vermüküler grafitli dökme demirlerin frezelenmesinde oluşan kesme kuvvetinin ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünün yapay sinir ağları ile modellenmesini gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen matematiksel model sonucu tahmin edilen değerler ile deney sonuçları arasında uyum olduğu görülmüştür [17]. Aşkun vd. yaptıkları çalışmada, Ni ve Cu ile alaşımlandırılmış küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliğini kesme kuvvetleri ve yüzey kaliteleri açısından değerlendirmişlerdir [18]. Avishan vd., alaşımlı östemperlenmiş dökme demirin işlenebilirliği üzerine kesme derinliklerinin etkisi incelemişlerdir. Çalışmalarının sonucunda kesme derinliğinin azaltılmasının işlenebilirliği iyileştirmeyeceğini ifade etmişlerdir [19]. Da Silva vd. yaptıkları çalışmada, yüksek kromlu beyaz dökme demir alaşımının, tornalanmasında işlenebilirlik

kabiliyetini incelemişlerdir. Çalışmalarını kuru ve ıslak soğutma şartlarında gerçekleştirerek, kübik bor nitrür kesici takımlar kullanmışlardır. Çalışmada kullandıkları kesme sıvısının daha düşük pürüzlülük değerleri, iyileştirilmiş takım ömrü ve takım aşınma performansına olumlu etkileri olduğunu vurgulamışlardır [20]. Eraslan vd., yaptıkları çalışmada, benzer özelliklere sahip G18NiMoCr3-6+QT1 dökme çelik ve 1050-6 östemperlenmiş sfero dökümün frezeleme işlemleri sırasında işlenebilirlik özelliklerini incelemişlerdir. Deneyler, kuru, geleneksel kesme sıvısı ve minimum miktarda yağlama koşulları altında TiALN kaplamalı kesici uçlarla gerçekleştirilmiştir. Her bir deney için kesme kuvvetleri, takım aşınması, ortalama yüzey pürüzlülüğü ve mikrosertlik değişimlerini her iki malzeme için analiz etmişlerdir. Her iki malzeme için kuru şartlarda işlemenin daha elverişli olduğu sonucuna varmışlardır [21]. Lu vd., Sıkıştırılmış grafit dökme demirin işlenmesi sonrası elde edilen yüzey pürüzlülüğünü tahmin etmek için istatistiksel yöntemler kullanmışlardır. Analiz sonrası, kesme hızı ve ilerleme oranının yüzey pürüzlülüğüne önemli düzeyde etkilediğini, kesme derinliğinin ise pürüzlülük üzerine çok az etkisi olduğu sonucuna varmışlardır [22]. Da Silva vd., grafitli dökme demirin frezeleme işleminde işlenebilirliğini araştırmışlardır. Çalışmalarında grafitli dökme demirin; normal, rafine ve rafine grafitli molibden ilaveli olarak üç farklı türünü kullanmışlardır. Bu malzemenin işlenebilirliği, takım ömrü ve aşınma mekanizmaları, malzeme yüzey kalitesi ve elektrik akımı tüketimi açısından değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlarda; takım ömrü, yüzey kalitesi ve elektrik akımı tüketimi açısından en önemli kesme parametrelerinin, takım ömrü, ilerleme oranı ve iş parçası malzemesi olduğunu vurgulamışlardır [23]. Çakıroğlu ve Uzun, vermüküler grafitli dökme demir numunelerine farklı östemperleme işlemi uygulayarak bu numunelere yüksek ilerlemede frezeleme deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Deneylerde kesme kuvvetleri ile pürüzlülük ölçümü yapmışlardır. Deneylerin sonucunda elde edilen deneysel veriler kullanılarak Yapay Sinir Ağları yöntemiyle matematiksel model geliştirmişlerdir [17].

Literatür değerlendirildiğinde bu çalışmanın, kullanılan frezeleme yöntemi, kesici uçlar ve kesme sıcaklığının değerlendirilmesi ve Taguchi metodunun kullanılması açısından özgün bir değer taşıdığı görülmüştür. Bu çalışmada GG25 dökme demirin frezelenmesinde kesme parametrelerinin kesme sıcaklığı üzerine etkileri araştırılmış ve kesme parametreleri Taguchi metodu kullanılarak optimize edilmiştir. Çalışmada L27 (3⁴) Taguchi ortogonal dizisi kullanılarak deney sayısı azaltılmıştır. Deneysel sonuçlar varyans analizi ve üç boyutlu grafikler ile değerlendirilmiştir. Ayrıca Taguchi tahmin değeri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

ISO 8688-1 standardına göre frezelenen olan deney numunesi için tavsiye edilen ölçüler, kullanılan takım tutucu çapının en az 3 katı kadar boy ve 0.6 katı kadar kesme genişliği ölçülerinde olmasıdır [24]. Bu durum dikkate alınarak frezeleme deneylerinde GG25 dökme demir kullanılmıştır. GG25 Dökme demire ait teknik özellikler Tablo 1 ve Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 1. GG25 dökme demire ait bileşenler (Components of GG25 cast iron) [25]

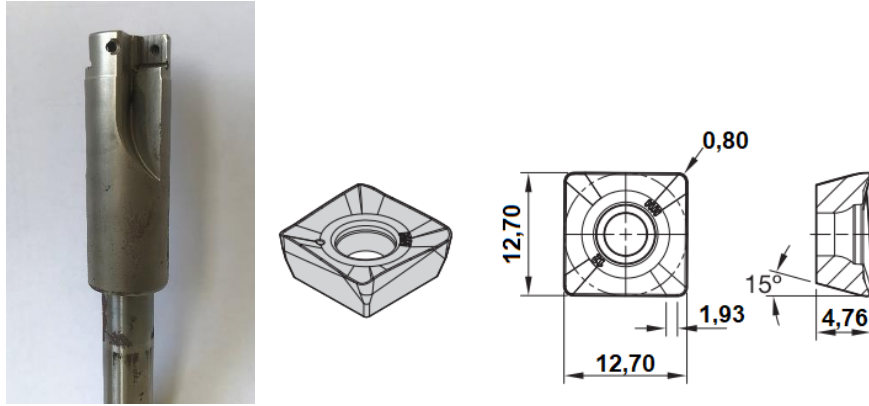
| C | Fe | Mn | P | Si | S |
|------------|--------------|------------|------------|----------|--------------|
| %2.95-3.45 | %92.63-94.26 | %0.55-0.75 | %0.10-0.20 | %2.1-2.9 | %0.040-0.070 |

Tablo 2. GG25 dökme demire ait mekanik özellikler (Mechanical properties of GG25 cast iron) [25]

| Yoğunluk | Sertlik Brinell | Çekme Dayanımı |
|------------------------|-----------------|----------------|
| 7.30 g/cm ³ | 180 | 155 Mpa |

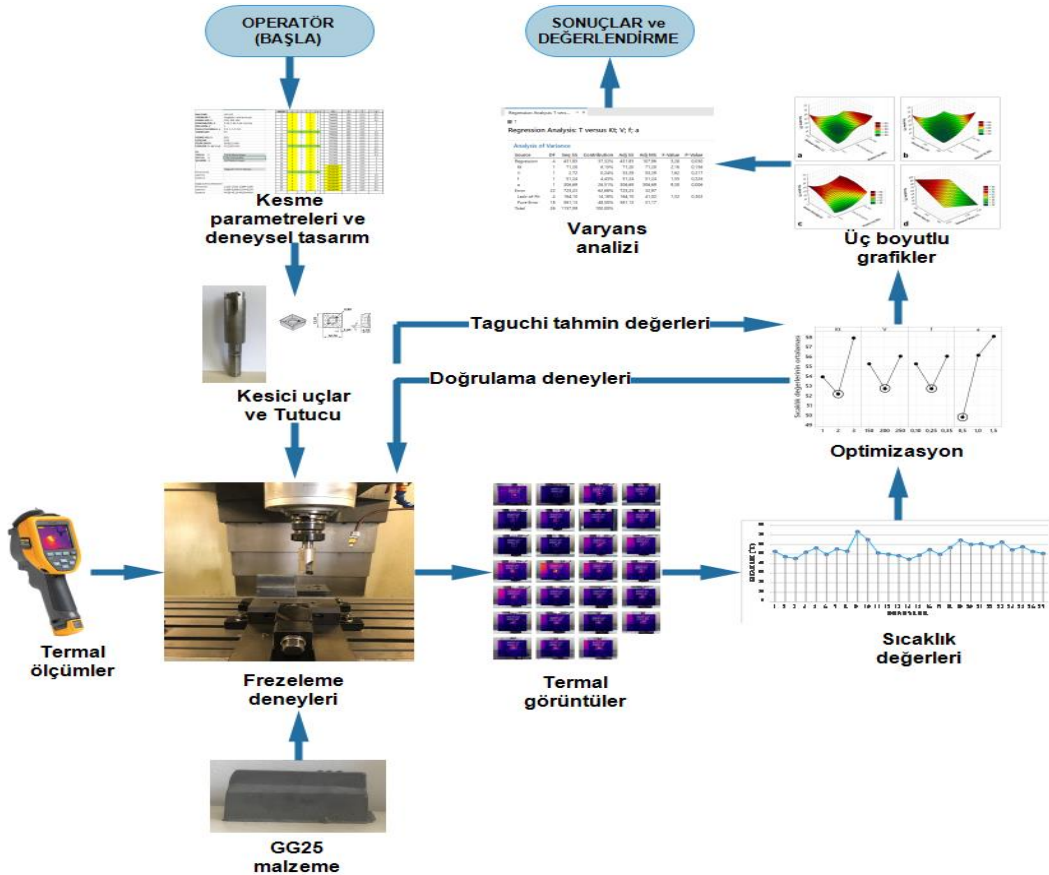
Deneylerde WIDIA (Germany) kesici takım firmasına ait TN6525 kodlu TiALN kaplanmış, TN7535 kodlu TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplanmış ve WS30PM kodlu ALTiN (çok katmanlı) kaplanmış 4

kesme kenarına sahip kesici uçlar kullanılmıştır. Ayrıca kullanılan uçlara uygun 3 ağızlı takım tutucu, özel olarak üretilmiş olup muadil olarak temin edilmiştir (Şekil 1).



Şekil 1. Kullanılan takım tutucu ve kesici uç (Used tool holder and cutting insert)

Frezeleme işlemlerinde DELTA SEIKI 1050A üç eksenli dikey freze tezgâhı kullanılmıştır. Deneyler soğutma sıvısı kullanılmadan kuru ortamda yürütülmüştür. Her bir deney için kesici takım talaş kaldırmaya başladıktan sonra, işleme boyunun yaklaşık orta noktasından Fluke TiS20 model termal kamera ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Termal kameraya ait bilgisayar programı, çekilen termal görüntüleri işleyerek bu sıcaklıkların minimum, maksimum ve ortalama değerleri göstermektedir. Bu çalışmada kesme bölgesinden alınan termal görüntüler incelenerek, her bir deney için maksimum sıcaklık dikkate alınmıştır. Kullanılan termal kamera $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ile $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ arası ölçüm yapabilen, dedektör çözünürlüğü 120×90 , görüş alanı $35.7^{\circ} \times 26.8^{\circ}$ ve 9 Hz kare hızına sahiptir. Kullanılan malzemenin emissivity (yayınım) değeri 0.82 olarak alınmıştır. Deneysel kurulum ve çalışmayı gösteren şema Şekil 2’de gösterilmiştir.



Şekil 2. Deneysel kurulumun akış şeması (The flowchart of experimental setup)

2.1. Taguchi Metodu (Taguchi method)

İlk olarak 60'lı yıllarda Genuchi Taguchi tarafından önerilen bir metot olup, endüstriyel ürün kalitesinin iyileştirilmesinde kullanılan yaygın bir tekniktir. Taguchi metodu sayesinde deney öncesi yapılacak ayrıntılı analiz ve değerlendirmelerle gereken deney sayısı önemli şekilde azaltmak mümkündür. Taguchi metodu bir deney tasarım tekniği olmanın ötesinde parametre optimizasyonu ve minimum deney sayısı ile maksimum verimlilik sunan son derece faydalı bir tekniktir [26, 27].

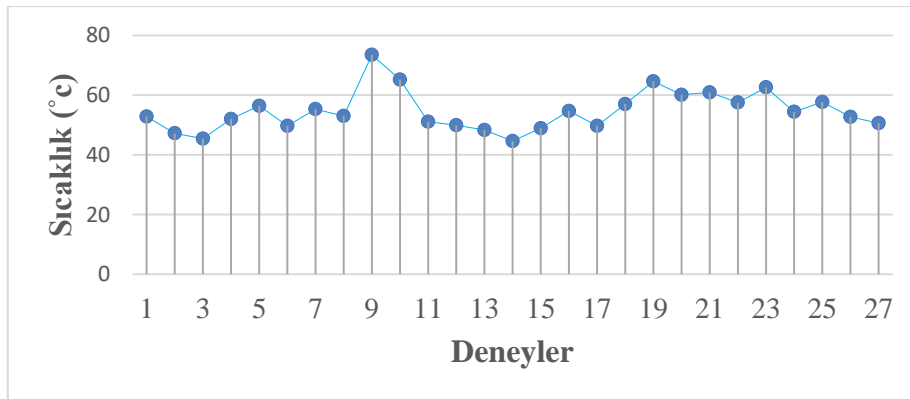
Bu çalışmada kullanılan Taguchi tekniği şu adımları içermektedir: (1) Faktörlerin belirlenmesi; (2) Her bir faktöre ait seviyelerin belirlenerek uygun ortogonal dizinin seçilmesi; (3) Seçilen ortogonal matrise faktörlerin atanması ve deneylerin yapılması; (4) Verilerin analizi ve faktörlerin optimal seviyelerin belirlenmesi; (5) Doğrulama deneylerinin yapılarak güven aralığının elde edilmesi; (6) Taguchi tahmin değerlerinin hesaplanması ve deneysel sonuçlarla karşılaştırılması. Taguchi metodu, arzu edilen değerlerden performanslarının karakteristik sapmalarının ölçülmesi için bir kayıp fonksiyon kullanır. Kayıp fonksiyon değerleri ayrıca, bir sinyal gürültü oranına (S/N) dönüştürülmektedir. Genel olarak S/N oranı analizinde, en küçük en iyi, en yüksek en iyi ve nominal daha iyi olmak üzere üç farklı kalite karakteristikleri vardır. İşlem parametrelerinin her bir seviyesi için sinyal oranı, S/N analizi temel alınarak hesaplanmaktadır.

3. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF RESULTS)

Deneysel tasarım için Taguchi L27 (3^4) ortogonal dizisi kullanılmış, tam tasarım 81 deney yerine sadece 27 deney yapılmıştır. Taguchi metodu ile yapılan analiz ve değerlendirmelerde deney sayısı önemli derecede azaltmak mümkündür. Taguchi metodu, kalite özelliklerini belirlemede bazı fonksiyonlar kullanmaktadır. Bu çalışmada kesme bölgesi sıcaklık ölçümlerinde en küçük değer arzu edildiği için Taguchi "En küçük en iyi" fonksiyonu kullanılmıştır. Tablo 3'de seçilen kesme parametreleri ve bu parametrelerin seviyeleri verilmiştir. Kesme parametrelerinin belirlenmesinde malzeme ve kesici takım kataloğu dikkate alınmıştır [28, 29]. L27 ortogonal dizisi dikkate alınarak oluşturulan deneysel tasarım, deneysel sonuçlar ve deneysel sonuçlara göre hesaplanan sinyal gürültü (S/N) oranları Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 3. Kesme parametreleri (Cutting parameters)

| Parametreler | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 |
|----------------------------|----------|---|----------|
| Kesici uçlar (Kt) | TiALN | TiN-TiCN-Al ₂ O ₃ | ALTiN |
| Kesme hızı (V, m/dak) | 150 | 200 | 250 |
| İlerleme oranı (f, mm/diş) | 0.10 | 0.25 | 0.35 |
| Kesme derinliği (a, mm) | 0.5 | 1 | 1.5 |



Şekil 3. Deneylerden elde edilen sıcaklık değerleri (Temperature values obtained from experiments)

Deneylerden elde edilen sıcaklık değerleri ve bu değerlere ait sinyal gürültü oranları dikkate alındığında, sıcaklık sonuçlarının ortalama değeri 54.659 °C ve sıcaklık için ortalama S/N oranı da -34.694 dB olarak hesaplanmıştır. Şekil 3’de sıcaklık değerlerine ait grafik verilmiştir.

Tablo 4. Deneysel tasarım ve ölçülen sıcaklık değerleri (Experimental design and measured temperature values)

| Deneysel no | Kesme parametreleri | | | | Deneysel Sonuçlar ve S/N oranları | |
|-------------|---|----------------|--------------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|
| | A | B | C | D | Sıcaklık (T, °C) | S/N _T (dB) |
| | Kesici uçlar (Kt) | Kesme hızı (V) | İlerleme oranı (f) | Kesme derinliği (a) | | |
| 1 | TiALN | 150 | 0.10 | 0.5 | 52.8 | -34.453 |
| 2 | TiALN | 150 | 0.10 | 0.5 | 47.2 | -33.479 |
| 3 | TiALN | 150 | 0.10 | 0.5 | 45.4 | -33.141 |
| 4 | TiALN | 200 | 0.25 | 1 | 52 | -34.320 |
| 5 | TiALN | 200 | 0.25 | 1 | 56.4 | -35.026 |
| 6 | TiALN | 200 | 0.25 | 1 | 49.7 | -33.927 |
| 7 | TiALN | 250 | 0.35 | 1.5 | 55.3 | -34.855 |
| 8 | TiALN | 250 | 0.35 | 1.5 | 53 | -34.486 |
| 9 | TiALN | 250 | 0.35 | 1.5 | 73.5 | -37.326 |
| 10 | TiN-TiCN-Al ₂ O ₃ | 150 | 0.10 | 1.5 | 65.2 | -36.285 |
| 11 | TiN-TiCN-Al ₂ O ₃ | 150 | 0.10 | 1.5 | 51.1 | -34.168 |
| 12 | TiN-TiCN-Al ₂ O ₃ | 150 | 0.10 | 1.5 | 49.9 | -33.962 |
| 13 | TiN-TiCN-Al ₂ O ₃ | 200 | 0.25 | 0.5 | 48.3 | -33.679 |
| 14 | TiN-TiCN-Al ₂ O ₃ | 200 | 0.25 | 0.5 | 44.6 | -32.987 |
| 15 | TiN-TiCN-Al ₂ O ₃ | 200 | 0.25 | 0.5 | 48.9 | -33.786 |
| 16 | TiN-TiCN-Al ₂ O ₃ | 250 | 0.35 | 1 | 54.7 | -34.760 |
| 17 | TiN-TiCN-Al ₂ O ₃ | 250 | 0.35 | 1 | 49.7 | -33.927 |
| 18 | TiN-TiCN-Al ₂ O ₃ | 250 | 0.35 | 1 | 57 | -35.117 |
| 19 | ALTiN | 150 | 0.10 | 1 | 64.6 | -36.205 |
| 20 | ALTiN | 150 | 0.10 | 1 | 60.1 | -35.577 |
| 21 | ALTiN | 150 | 0.10 | 1 | 60.9 | -35.692 |
| 22 | ALTiN | 200 | 0.25 | 1.5 | 57.5 | -35.193 |
| 23 | ALTiN | 200 | 0.25 | 1.5 | 62.6 | -35.931 |
| 24 | ALTiN | 200 | 0.25 | 1.5 | 54.4 | -34.712 |
| 25 | ALTiN | 250 | 0.35 | 0.5 | 57.7 | -35.224 |
| 26 | ALTiN | 250 | 0.35 | 0.5 | 52.7 | -34.436 |
| 27 | ALTiN | 250 | 0.35 | 0.5 | 50.6 | -34.083 |

3.1. Optimum Seviyelerin Belirlenmesi (Determining Optimum Levels)

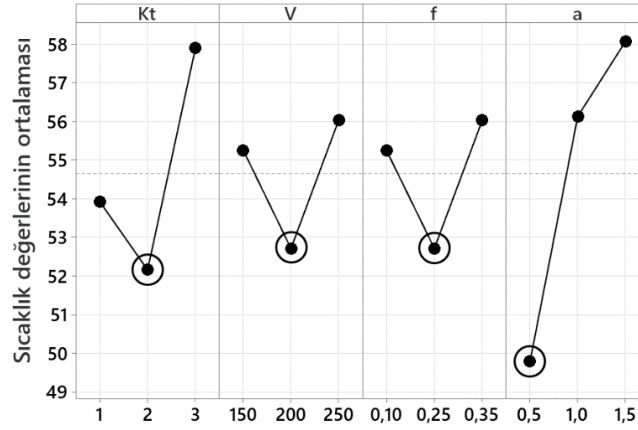
Tablo 5’de kesme parametreleri, bu çalışmada kullanılan ortogonal dizi dolayısıyla farklı seviyeler ve olası etkileri dikkate alınarak ayırt edilmiştir. Bu seviyeler deneysel çalışmada sıcaklık değerlerinin analizi için hesaplanan sinyal gürültü oranlarının ortalama değerlerini göstermektedir. Bu değerler, belirlenen optimum parametreler için tahmin değerleri hesaplamak için kullanılır.

Tablo 5. Her bir seviye için S/N oranları ortalamaları (Averages of S/N ratios for each level)

| Kesme parametreleri | Seviyeler | | | Mak-Min |
|------------------------|-----------|----------|----------|---------|
| | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 | |
| A (Kesici uç, Kt) | -34.64 | -34.36 | -34.25 | 0.89 |
| B (Kesme hızı, V) | -34.83 | -34.42 | -34.99 | 0.58 |
| C (İlerleme oranı, f) | -34.83 | -34.42 | -34.99 | 0.58 |
| D (Kesme derinliği, a) | -33.94 | -34.97 | -35.33 | 1.39 |

Tablo 4’de mak-min (maksimum-minimum) değeri, her bir parametrenin ilgili seviyelerinin maksimum ortalaması ile minimum değerlerin ortalamasının arasındaki farktır. Taguchi metodunda

önemli olan aşamalardan bir tanesi, optimum seviyeleri belirlemektir. Optimum seviyeler, seçilen ortogonal dizi tarafından oluşturulan kombinasyonlar, yani kesme parametrelerinin farklı seviyelerini değerlendirilerek belirlenmektedir. Bu seviyeler, seviyelere ait etki grafiklerini çizmek için kullanılır (Şekil 4). Ana etki grafiği değerlendirilirken, bu çalışmada arzu edilen minimum sıcaklık olduğu için, sıcaklık değerleri için en düşük seviye, sıcaklık değerleri S/N oranlarının ise en yüksek seviyeleri dikkate alınır.



Şekil 4. Sıcaklık değerleri için ana etki grafiği (Main effect graph for temperature values)

Şekil 4'e göre minimum sıcaklık değerleri için deney parametrelerinin optimum kombinasyonu $A_2B_2C_2D_1$ (A_2 = TiN-TiCN- Al_2O_3 kaplamalı kesici uç, B_2 = 200 m/dak kesme hızı, C_2 = 0,25 mm/diş ilerleme oranı ve D_1 = 0.5 mm kesme derinliği) olarak belirlenmiştir.

3.2. Kesme Parametrelerinin Varyans Analizi ile Değerlendirilmesi (Evaluation of Cutting Parameters by Analysis of Variance)

Deney tasarımında kullanılan tüm kontrol faktörlerinin birbirlerini nasıl etkilediğini, bunun performans özellikleri üzerinde nasıl bir etkisi olduğunu ve performans özelliklerinde parametrelerin farklı seviyelerinde ne gibi değişiklikler olduğunu belirlemek için ve Taguchi güven aralıklarının belirlenmesinde varyans analizi kullanılmaktadır [30, 31]. Kesici takım, kesme hızı, ilerleme oranı ve kesme derinliğinin sıcaklık üzerine etkileri varyans analizi ile değerlendirilmiş, varyans analizi sonuçları Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Deneysel sonuçlar için ANOVA sonuçları (ANOVA results for experimental results)

| Faktörler | Serbestlik derecesi (DoF) | Kareler toplamı (SS) | Kareler ortalaması (MS) | F - Değeri | P-Değeri | Faktör etkisi (%) |
|---------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------|------------|----------|-------------------|
| Kesici takım (Kt) | 1 | 71.20 | 71.20 | 2.16 | 0.156 | 6.15 |
| Kesme hızı (V) | 1 | 2.72 | 53.29 | 1.62 | 0.217 | 0.24 |
| İlerleme oranı (f) | 1 | 51.24 | 51.24 | 1.55 | 0.226 | 4.43 |
| Kesme derinliği (a) | 1 | 306.69 | 306.69 | 9.30 | 0.006 | 26.51 |
| Hata (e) | 22 | 725.23 | 32.97 | | | 62.68 |
| Toplam | 26 | 1157.09 | | | | 100 |

Varyans analizi sonuçları değerlendirildiğinde sıcaklığa etki eden en etkili parametre %26.51 ile kesme derinliği olmuştur. Bu parametreyi % 6.15 ile kesici uç takip etmektedir. Talaş derinliğinin artması birim alana düşen sürtünmeyi arttıracığından sıcaklığın da artmasına neden olmaktadır. Dolayısıyla sıcaklık için varyans analizi sonuçları tutarlıdır denilebilir.

3.3. Doğrulama Deneyleeri ve Taguchi Tahmin Değerlerinin Hesaplanması (Confirmation Experiments and Calculation of Taguchi Prediction Values)

Taguchi metodunun son adımını olan doğrulama deneylerinin amacı, kalite özelliklerini analiz etmektir. Ayrıca optimizasyon sürecinin doğruluğunu test etmek için de doğrulama deneyleri kullanılır. Yani diğer bir deyişle doğrulama deneyleri, kesme parametrelerinin ve seviyelerinin belirlenen optimum kombinasyonu test etmek amacıyla yapılır. Kesme parametrelerinin bireysel etkileri dikkate alınarak sıcaklık için elde edilen optimum kombinasyona göre $A_2B_2C_2D_1$ ($A_3 = \text{TiN-TiCN-Al}_2\text{O}_3$ kaplamalı kesici uç, $B_2 = 200$ m/dak kesme hızı, $C_2 = 0.25$ mm/diş ilerleme oranı ve $D_1 = 0.5$ mm kesme derinliği) tahmin sıcaklık değeri (T_p) aşağıda verilen eşitliklerle hesaplanır [32-34].

$$\eta_{gT} = A_2 + B_2 + C_2 + D_1 - 3\eta_{\frac{S}{N}-T} \quad (1)$$

$$T_p = 10^{-\eta_{gT}/20} \quad (2)$$

Eşitliklerde; $A_2B_2C_2D_1$ faktörlerin optimum seviyelerine ait sinyal gürültü oranlarıdır (Tablo 5). Buna göre; $A_2 = -34.36$, $B_2 = -34.42$, $C_2 = -34.42$ ve $D_1 = -33.94$ dB olarak Tablo 5'den okunmuştur. $\eta_{\frac{S}{N}-T}$ sıcaklık değerlerinin S/N oranları ortalamasıdır. η_{gT} sıcaklık optimum seviyeleri için hesaplanan S/N oranı, T_p , sıcaklık için hesaplanan Taguchi tahmin değerleridir. Denklem 1 ve denklem 2 kullanılarak hesaplanan sıcaklık tahmin değeri 44.96 °C olarak bulunmuştur. Doğrulama deneylerinin sonucunu tahmin değerle karşılaştırılmasında ve kalite özelliğinin doğrulanmasında güven aralığı (CI) kullanılmaktadır. Güven aralığı maksimum ve minimum değer olup, hesaplanan değer tahmin değerleri ile karşılaştırılarak doğrulama deneylerinin doğruluğu test edilir. CI aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır [26-28].

$$CI = \sqrt{F_{\alpha:1,V_e} \times V_{ep} \times \left(\frac{1}{n_{eff}} + \frac{1}{r} \right)} \quad (3)$$

Eş. 3'de $F_{\alpha:1,V_e}$ önem düzeyi α 'nın F oranı, α önem düzeyi, $1 - \alpha$ güven aralığı, V_e varyans analizi sonuçlarına göre sıcaklığa ait hatanın serbestlik derecesidir. Tablo 6 incelendiğinde hatanın serbestlik derecesi 22 dir. Bu durumda %95 güven seviyesine ait F tablosundan 1-22 değeri 4.30 olarak bulunmuştur. V_{ep} yine varyans analizi sonuçlarına göre hatanın varyansı, r doğrulama deney sayısı ve n_{eff} etkin ölçülen sonuçların sayısıdır [34, 35].

$$n_{eff} = \frac{N}{1 + V_t} \quad (4)$$

Eş. 4'de N , toplam deney sayısını (27), V_t Tablo 6 dikkate alınarak ortalamanın hesaplandığı kesme parametrelerine ait toplam serbestlik derecesini (4) ifade etmektedir. Bu durumda n_{eff} , 5.4 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada, sıcaklık için belirlenen optimum kombinasyon dikkate alınarak her biri için 3 adet doğrulama deneyi yapılmıştır ve deney sonuçları %95 güven aralığında değerlendirilmiştir. Eş. 3 ve Eş. 4 dikkate alındığında sıcaklık için güven aralığı (CI) = 8.569 olarak bulunmuştur. Güven aralığının kullanımında, her bir parametre için hesaplanan Taguchi tahmin değeri güven aralığı ile toplanır ve çıkartılır. Doğrulama deneylerinin ortalaması bu iki değer arasında olması istenir. Kesme sıcaklığı için yürütülen 3 adet doğrulama deneylerinin ortalaması 44.84 °C'dir. Bu durumda sıcaklık için; $(44.96 - 8.569 < 44.84 < (44.96 + 8.569) = 36.391 < 44.84 < 53.529$ aralığı elde edilmiş ve sıcaklık için doğrulama deneyleri güven aralığı içinde gerçekleşmiştir. Bu durumda optimizasyon başarılıdır denilebilir.

Tablo 7'de, Taguchi metodu kullanılarak elde edilen öngörülen değerlerle deney sonuçlarının karşılaştırmasını gösterilmiştir. Tahmin değerlerinin hesaplanmasında Eş.1 ve Eş.2 kullanılmıştır.

Tahmin edilen değerler ve deneysel değerler birbirine yakın çıkmıştır. Güvenilir istatistiksel analiz için hata değerleri %20'den az olmalıdır [30].

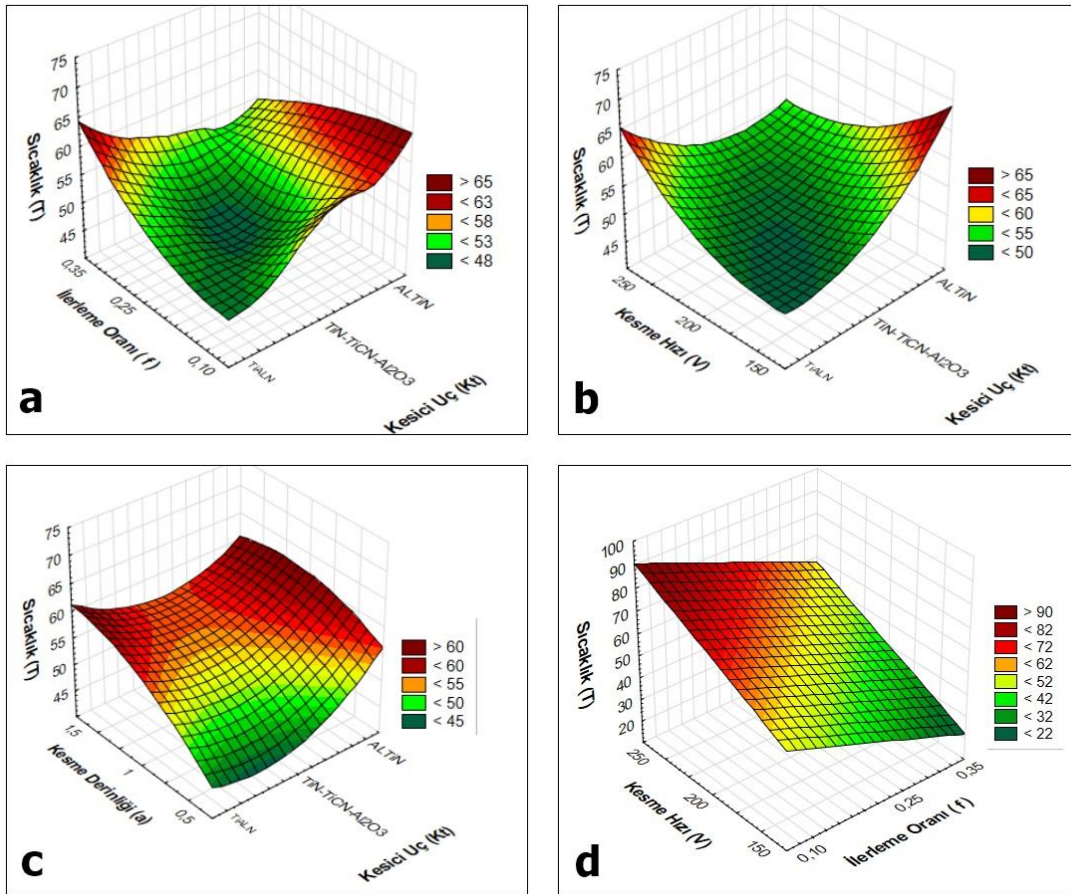
Tablo 7. Optimize ve rastgele koşulların tahmin değerlerle karşılaştırılması (Comparison of optimized and random conditions with predicted values)

| Seviyeler | Taguchi metodu | | |
|--|----------------|--------|----------|
| | Deneysel | Tahmin | Hata (%) |
| A ₂ B ₂ C ₂ D ₁ (Optimum) | 44.84 | 44.96 | 0.266 |
| A ₂ B ₁ C ₂ D ₃ (Rastgele) | 49.90 | 55.96 | 10.82 |
| A ₁ B ₃ C ₃ D ₃ (Rastgele) | 55.30 | 62.14 | 11.01 |

Tablo 7’de, doğrulama testi sonuçları ile Taguchi metoduyla elde edilen sonuçlar arasındaki hata değerleri %20’den az olduğu görülmektedir. Bu durumda doğrulama deneyleriyle elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, optimizasyon başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

3.4. Kesme Parametrelerinin Sıcaklık Üzerine Etkisi (Effect of Cutting Parameters on Temperature)

Deneysel sonuçlara etki eden kesme parametreleri ve bu parametrelerin etkisi üç boyutlu grafiklerle değerlendirilmiştir (Şekil 5). Şekil 4a’da ilerleme oranı ve kesici uçların kesme sıcaklığı üzerine etki grafiği gösterilmiştir. Burada ilerleme oranı arttıkça sıcaklığın da arttığı görülmektedir. En düşük sıcaklık değeri 0.25 mm/diş ilerleme oranı ve TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici uçta olduğu görülmektedir. Bu durum Taguchi optimizasyon değerleri ile örtüşmektedir. Şekil 5a’da en yüksek sıcaklığın ise, ALTiN kaplamalı kesici uç, 0.15 mm/diş ilerleme oranı ve TiALN kaplamalı kesici uç, 0.35 mm/diş ilerleme oranlarında olduğu görülmektedir. Ayrıca TiN-TiCN-Al₂O₃ kaplamalı kesici ucun bütün ilerleme oranlarında iyi performans göstermiştir.



Şekil 5. Kesme parametrelerinin sıcaklık üzerine etkileri (Effects of cutting parameters on temperature)

Şekil 5b’de kesici uç ve kesme hızının, kesme sıcaklığı üzerine etkileri gösterilmiştir. Burada kesme hızı arttıkça sıcaklığın arttığı görülmektedir. En düşük sıcaklığın TiALN kesici uç ve 150 mm/dak kesme hızı ile TiN-TiCN- Al_2O_3 kaplamalı kesici uç ve 200 m/dak kesme hızında olduğu görülmektedir. Bu durum yine Taguchi optimizasyon değerleriyle benzerlik göstermektedir. Şekil 4b’de en yüksek sıcaklığın ALTiN kaplamalı kesici uç ve 150 m/dak kesme hızı, TiALN kaplamalı kesici uç ve 250 m/dak kesme hızlarında olduğu görülmektedir. Burada da en iyi performansı TiN-TiCN- Al_2O_3 kaplamalı kesici uç göstermiştir. Şekil 5c’de kesici uç ve kesme derinliğinin sıcaklık üzerine etkileri gösterilmiştir. Burada kesme derinliği arttıkça sıcaklığın arttığı görülmektedir. En düşük kesme sıcaklığının TiALN ve TiN-TiCN- Al_2O_3 kaplamalı kesici uçlar ve 0.5 mm kesme derinliğinde olduğu görülmektedir. Bu durum da Taguchi optimizasyon değerleriyle örtüşmektedir. Şekil 4c’de en yüksek sıcaklık değerleri; TiALN kaplamalı kesici uç ve 1.5 mm kesme derinliği, ALTiN kaplamalı kesici uç ve 0.5 mm kesme derinliğinde olduğu görülmektedir. Bu grafikten de anlaşılacağı gibi burada da en iyi performansı TiN-TiCN- Al_2O_3 kaplamalı kesici uç göstermiştir. Şekil 5d’de kesme hızı ve ilerleme oranının kesme sıcaklığı üzerine etkileri gösterilmiştir. Burada kesme hızı arttıkça sıcaklığın arttığı, en yüksek sıcaklığın ise 0.10 mm/diş ilerleme oranı ve 250 m/dak kesme hızında olduğu görülmektedir. En düşük sıcaklık değeri ise 15 m/dak kesme hızı ve 0.25 mm/diş ilerleme oranında olduğu görülmektedir.

TiALN kaplamalar, çok yüksek sertliğe ve sıcaklık direncine sahip olup, yüksek sıcaklıklarda iyi aşınma direnci sunmakta ve takım ömrünü arttırmaktadır [36]. Yapılan çalışmalar dikkate alındığında bu kaplama türü, işlenebilirlik çalışmalarında, düşük takım aşınması ve düşük kesme kuvvetleri sunmaktadır [37, 38]. Diğer taraftan TiN-TiCN- Al_2O_3 kaplamalar çok katmanlı yapıları sayesinde aşınma dirençleri oldukça iyidir. Ancak bu kaplamalarda iyi yüzey kalitesinin elde edilemediği literatürde ifade edilmektedir. Bu tür kaplamalar daha çok kaba işlemede tercih edilmektedir [39, 40]. Alüminyum-titanyum-nitrür kaplama (ALTiN), alüminyum, titanyum ve azot elementlerinin kimyasal bir bileşimidir. Kaplama kalınlığı 1-4 μm arasındadır. ALTiN kaplamanın özelliği, ısıya ve oksidasyona karşı çok yüksek direnç göstermesidir. Özellikle talaşlı imalatda, yüksek kesme kuvvetlerinde iyi performans gösterirler [41]. Kesme bölgesindeki artan sıcaklıklar bu kaplama türüne sahip kesici uca talaş yapışmasını da arttırmaktadır. Literatürde, ALTiN kaplamalı kesici uçlarda paslanmaz çeliklerin frezelenmesi operasyonunda bu kaplamaya sahip kesici uçlarda yapışma görülmüştür. Ayrıca aynı çalışmada, yüksek pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Bu durum takım aşınmasını ve kesme bölgesi sıcaklığını arttırmaktadır [42]. Literatür incelendiğinde özellikle çeliklerin işlenmesinde kesme hızının artması kesme bölgesi sıcaklığını da arttırdığı ifade edilmektedir [43, 44]. Yüksek kesme hızlarında, birim zamanda kesici takım ve talaş temas süresi artacağından, sürtünmelerin yükselmesi, dolayısıyla kesme bölgesi sıcaklık değerlerinin de artması beklenen bir durumdur [45]. Bu çalışmada literatüre benzer sonuçlar elde edilmiştir. Üç boyutlu grafikler incelendiğinde kesme hızı ile beraber sıcaklığın da arttığı görülmektedir. Talaş kaldırma esnasında ortaya çıkan sıcaklık, kesici takım performansını önemli ölçüde etkilemektedir. Talaş kaldırma esnasında oluşan sıcaklığın büyük bölümü talaş vasıtasıyla kesme bölgesinden uzaklaştırılır literatürde delme işlemlerinde ilerleme oranının artmasıyla kesme sıcaklığının da arttığı belirtilmektedir [46].

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada GG25 dökme demire uygulanan yüzey frezeleme işlemlerinde, kesme parametrelerinin kesme bölgesi sıcaklığına etkileri araştırılmıştır. Deneysel tasarım için Taguchi metodu kullanılmış olup 27 adet deney yapılmıştır. Çalışmada kesme parametreleri optimize edilmiş ve optimizasyon sonrası, optimize parametreler ile üç adet doğrulama deneyi gerçekleştirilmiştir. Taguchi tahmin değerleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca kesme

parametrelerinin sıcaklık üzerine etkileri üç boyutlu grafiklerle değerlendirilmiştir. Bu çalışmadan elde edilecek sonuçları şu şekilde sıralamak mümkündür;

- Yapılan optimizasyon sonucunda, minimum sıcaklık değerleri için deney parametrelerinin optimum kombinasyonu $A_2B_2C_2D_1$ ($A_2= \text{TiN-TiCN-Al}_2\text{O}_3$ kaplamalı kesici uç, $B_2 = 200$ m/dak kesme hızı, $C_2 = 0,25$ mm/diş ilerleme oranı ve $D_1 = 0.5$ mm kesme derinliği) olarak çıkmıştır.
- Optimize parametreler ile yürütülen üç adet doğrulama deneyi ortalaması (44.84 °C), deney sonuçları ortalamasının (54.659 °C) altında gerçekleşmiştir.
- Varyans analizi sonuçları değerlendirildiğinde sıcaklığa etki eden en etkili parametre %26.51 ile kesme derinliği olmuştur. İkinci olarak en etkili parametre, % 6.15 ile kesici uç olmuştur.
- Taguchi metodu kullanılarak hesaplanan tahmin değeri (44.96 °C) deney sonuçları ortalamasının altında çıkmıştır.
- Optimum parametreleri ile rastgele seçilen parametreler ile yürütülen deneylerden elde edilen sonuçlar Taguchi tahmin değerleri ile karşılaştırıldığında hata değerleri %2'nin altında çıkmıştır.
- Üç boyutlu grafikler değerlendirildiğinde minimum sıcaklık için en uygun kesi uç kaplaması $\text{TiN-TiCN-Al}_2\text{O}_3$ kaplamalı kesici uç olup bu durum Taguchi optimize parametreler ile benzerlik göstermiştir. Bu durum bu kaplama türünün çok katmanlı olmasından dolayı yüksek aşınma direncine atfedilmektedir.
- AlTiN kaplamaya sahip kesici uçta yüksek sıcaklıklar elde edilmiştir.
- Literatür bilgileri ve bu çalışma genel olarak değerlendirildiğinde kesici uç kaplama türü kesme bölgesi sıcaklığına doğrudan etkilidir.
- Ayrıca kesme hızı arttıkça kesme bölgesi sıcaklığının da arttığı görülmüştür. Bu durum literatürle örtüşmektedir.
- GG25 malzemeye uygulanacak yüzey frezeleme işlemlerinde, kesme hızı ve ilerleme oranı takım üretici katalog bilgilerine bağlı kalınarak seçilmelidir. Kesici uç ise, $\text{TiN-TiCN-Al}_2\text{O}_3$ kaplamalı seçilmesi tavsiye edilmektedir.
- $\text{TiN-TiCN-Al}_2\text{O}_3$ kaplamalı kesici uç, yüksek ilerleme de bile düşük kesme sıcaklığı için pozitif etki göstermiştir.
- Kesme parametrelerinin bireysel etkileri dikkate alındığında en etkili faktör olarak kesici uç olmuştur. Bu durum kesici uç kaplama tiplerine atfedilmektedir.

Bu çalışmada deney sayısının azaltılması ve deneysel tasarım için Taguchi metodu kullanılmış, bu sayede zamandan ve işleme maliyetlerinden tasarruf sağlanmıştır. Tam tasarım olarak 81 deney yerine 27 adet deney yapılmıştır. Deneysel ve Taguchi sonuçları değerlendirildiğinde elde edilen sonuçlar uygulanabilir ve tatmin edicidir. Dolayısıyla Taguchi metodu bu çalışmaya başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde, özellikle TiAlN ve AlTiN kaplamalı kesici uçlarda ilerleme oranının artmasıyla beraber kesme sıcaklığının da arttığı görülmüştür. Gerek literatür, gerekse bu çalışma sonuçları değerlendirildiğinde, GG25 malzemenin yüzey frezeleme operasyonlarında kesme sıcaklığının değişimi birincil olarak kullanılan kesici takım kaplama türüne bağlıdır denilebilir. Sonraki çalışmalarda GG25 dökme demirin yüzey frezeleme işlemlerinde, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğü değerleri aynı ortogonal dizi kullanılarak ölçülebilir ve deneysel sonuçlar optimize edilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ö. Çelik, Küresel Grafitli dökme demirlerin aşınma davranışları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2001.
2. V.S.R. Murthy, S. Kishore Seshan, Characteristics of compacted Graphite Cast Iron, Transactions of the American Foundrymen's Society, 92:373-380, 1984.
3. R.T. Coelho, A.F. Souza, A.R. Roger, A.M.Y. Rigatti, A.A. Riberio, Mechanistic approach to predict real machining time for milling free-form geometries applying high feed rate, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 46: 1103–1111, 2010.
4. C.H. Hsu, M.L. Chen, C.J. Hu, Microstructure and mechanical properties of 4% cobalt and nickel alloyed ductile irons, Materials Science and Engineering A, 444: 339–346, 2007.
5. U. Şeker, İ. Çiftçi, H. Hasirci, The effect of alloying elements on surface roughness and cutting forces during machining of ductile iron, Materials and Design, 24: 47–51, 2003.
6. I. Ucun, K. Aslantas, The performance of ceramic and cermet cutting tools for the machining of austempered ductile iron, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 41: 642–650, 2009.
7. A.K. Ghani, I.A. Choudhury, Husni, Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with seramic tool Journal of Materials Processing Technology 127: 17–22, 2002.
8. F. Klocke, C. Klöpper, D. Lung, C. Essig, Fundamental wear mechanisms when machining austempered ductile iron (ADI), Annals of the CIRP., 56(1): 73-76, 2007.
9. M.C. Cakir, A. Bayram, Y. Isik, B. Salar, The effects of austempering temperature and time onto the machinability of austempered ductile iron, Materials Science and Engineering A, 407: 147–153, 2005.
10. M. Çetin, F. Gül, Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin abrasiv aşınma davranışına östemperleme işleminde soğutmanın etkisi, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der., 21(2): 359-366, 2006.
11. O.J. Moncada, R.H. Spicacci, J.A. Sikora, Machinability of austempered ductile iron, AFS Trans, 106: 39–45, 1998.
12. M.C. Çakır, Modern Talaşlı İmalatın Esasları. Uludağ Üniversitesi Güçlendirme Vakfı, Bursa, 140: 155-239, 1999.
13. R.O. Marwanga, R.C. Voigt, P.H. Cohen, Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of continuously cast ductile irons, AFS Transactions, 108: 651, 2000.
14. A. Yardımeden, M. Aksoy, A. İnan, Lamel grafitli dökme demirlerin işlenmesinde kale mile parça arasında meydana gelen gerilime, işleme şartları ve malzeme yapısının etkisi, 11. Uluslararası Makina Tasarım ve İmalat Kongresi, 13-15 Ekim, 2004, Antalya.
15. A. Kaçal, B. Çelik, Ş. Sertsöz, GGG70 sfero dökme demirin frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü ve takım aşınmasının incelenmesi, IMCOFE 2019, 24-26 Nisan, 2019, Antalya.
16. Y. Kahraman, G. Uzun, İ. Korkut, Vermiküler grafitli dökme demirlerin frezelenmesinde östemperleme sıcaklığı ve süresinin yüzey pürüzlülüğüne etkisi, 6. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu (UTİS 2015), 5-7 Kasım, 2015, İstanbul.
17. R. Çakıroğlu, G. Uzun, Yüksek ilerleme ile frezeleme işlemi esnasında oluşan kesme kuvvetinin ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünün Yapay Sinir Ağları ile modellenmesi, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 7(1): 58-66, 2021.
18. Y. Aşkun, H. Hasirci, U. Şeker, Ni ve Cu ile alaşımlandırılmış küresel grafitli dökme demirlerin işlenebilirliğinin kesme kuvvetleri ve yüzey kaliteleri açısından değerlendirilmesi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(2): 191-199, 2003.
19. B. Avishan, S. Yazdani, D. Jalali Vahid, The influence of depth of cut on the machinability of an alloyed austempered ductile iron, Materials Science and Engineering A, 523: 93-98, 2009.
20. A. E. Da Silva, I.N. Rabelo de Melo, I.P. Pinheiro, L.R. Da Silva, Characterisation and machinability of high chromium hardened white cast iron with and without the addition of niobium, Wear, 460-461: 1-16, 2020.
21. D. Eraslan, A. Balcı, B. Çetin, N. Uçak, A. Çiçek, O. D. Yılmaz, K. Davut, Machinability evaluations of austempered ductile iron and cast steel with similar mechanical properties under eco-friendly milling conditions, Journal of Materials Reserch and Technology, 11: 1443-1456, 2021.

22. J. Lu, Z. Zhang, X. Yuan, J. Ma, S. Hu, B. Xue, X. Liao, Effect of machining parameters on surface roughness for compacted graphite cast iron by analyzing covariance function of Gaussian process regression, *Measurement*, 157: 1-11, 2020.
23. L.R.R. da Silva, F.C.R. Souza, W.L. Guessser, M.J. Jackson, A.R. Machado, Critical assessment of compacted graphite cast iron machinability in the milling process, *Journal of Manufacturing Processes*, 56: 63-74, 2020.
24. F.Taylan, Sert malzemelerin frezelenmesinde takım aşınma davranışlarının belirlenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, 2009.
25. United Cast Bar Unibar 250 Continuously Cast Iron, EN-1561-GJL-250 GG25, <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=e9567779213346e28649f59333549e48&ckck=1>, 11.11.2021.
26. A. M. Pınar, A. Güllü, A. (2010). Sayısal denetimli hidrolik pozisyonlama sisteminin Taguchi metodu ile optimizasyonu. *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, 25(1): 93-100, 2010.
27. M., Savaşkan, Y. Taptık, M. Ürgen, Performance optimization of drill bits using design of experiments. *Journal of ITU*, 3(6): 117-128, 2004.
28. WIDIA Cutting tool company, *Advances catalog*, 2020.
29. WIDIA Cutting tool company, *Master Catalog*, 2017
30. F. Kara, Optimization of surface roughness in finish milling of AISI P20+S plastic-mold steel, *Materiali in tehnologije/Materials and technology*, 52(2): 195–200, 2018.
31. G. Samtaş, S. Korucu, Kriyojenik işlem görmüş EN AW 5754 (AlMg3) alüminyum alaşımının frezelenmesinde yüzey pürüzlülüğü için kesme parametrelerinin optimizasyonu, *Politeknik Dergisi*, 22 (3): 665-673, 2019.
32. F. Kara, B. Öztürk, Comparison and optimization of PVD and CVD method on surface roughness and flank wear in hard-machining of DIN 1.2738 mold steel, *Sensor Review*, 39 (1): 24-33, 2019.
33. T. Kıvak, Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts, *Measurement*, 50: 19-28, 2014.
34. G. Samtaş, Optimisation of cutting parameters during the face milling of AA5083-H111 with coated and uncoated inserts using Taguchi method, *Int. J. Machining and Machinability of Materials*, 17 (3/4): 211-232, 2015.
35. G. Samtaş, S. Korucu, Temperlenmiş Alüminyum 5754 Alaşımının Frezelenmesinde Kesme Parametrelerinin Taguchi Metodu Kullanılarak Optimizasyonu, *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 7(1): 45-60, 2019.
36. Alüminyum Titanyum Nitrür (AlTiN/TiAlN) Kaplama, <https://www.titanit.com.tr/pvd-kaplama/zafir-plus/>, 15.11.2021.
37. A. S. Kumar, A. R. Durai, T. Sornakumar, The effect of tool wear on tool life of alumina-based ceramic cutting tools while machining hardened martensitic stainless steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 151-156, 2006.
38. Ö. Tekaslan, N. Gerger, U. Şeker, AISI 304 östenitik paslanmaz çeliklerin farklı kesme parametreleri ile tornalama işleminden sonra oluşan kalıcı gerilmelerin araştırılması, *Gazi Üniv. Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 443-452, 2009.
39. R.P. Martinho, F.J.G. Silva, C. Martins, H. Lopes, Comparative study of PVD and CVD cutting tools performance in milling of duplex stainless steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 102(5–8): 2423–2439, 2019.
40. N. Szcotkarz, R. W. Maruda, D. Dębowski, K. Leksycki, S. Wojciechowski, N. Khanna, G. M. Królczyk, Formation of surface topography during turning of AISI 1045 steel considering the type of cutting edge coating, *Advances in Science and Technology Research Journal*, 15(4): 253-266, 2021.
41. General information about AlTiN coating, <https://ruko.de/en/blog/altin-the-aluminium-titanium-nitrite-coating>, 15.11.2021.
42. E. Kuram, AISI 304 paslanmaz çeliğinin frezelenmesinde farklı kaplama malzemelerinin takım aşınmasına, kesme kuvvetlerine ve yüzey pürüzlülüğüne etkileri, *Politeknik Dergisi*, 19(4): 433-443, 2016.
43. A. Aslan, Tornalama parametrelerinin kesme sıcaklığı ve krater aşınması üzerine etkilerinin deneysel olarak araştırılması, *Türk Doğa ve Fen Dergisi*, 10(1): 109-118, 2021.

44. U. Karagüzel, Ti6Al4V alaşımının talaşlı imalatı sırasında termal kamera ile sıcaklık ölçümü ve sonlu elemanlarla modellenmesi, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 7(2): 265-271, 2019.
45. U. ÇAydaş, O. Kuncan, M. Çelik, AISI 52100 rulman çeliğinin işlenebilirliğinin yüzey pürüzlülüğü, takım ömrü ve sıcaklık kriterine göre araştırılması, *Politeknik dergisi*, 20(2): 409-417, 2017.
46. B. Yılmaz, G. Uzun, A. Güllü, Ti6Al4V malzemeye uygulanan delme işleminde kesme parametrelerinin itme kuvveti, kesme momenti ve kesme sıcaklığına etkisi, *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 1(3): 1-8, 2020.

Tool Wear in Machining of Wrought and Cast Aluminium Alloys: Literature Review

Cem ALPARSLAN^{1,*} , Şenol BAYRAKTAR¹ 

¹Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, 53100, Rize, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 11.10.2021

Kabul: 30.11.2021

Anahtar Kelimeler:

Aluminum alloys

Machinability

Cutting force

Surface roughness

Tool wear

ABSTRACT

Aluminum and its alloys are commonly used in industry due to their lightness, high strength/weight ratio and easy formability. Various machining operations such as turning, drilling, milling and threading are needed in order to be manufactured in desired forms and used as a final product in mechanical systems. However, some problems arise that negatively affect the machined surface quality, dimensional tolerance and cutting tool (CT) performance during the machining of these materials. CT wear is among the most important of these problems. CT wear also causes loss of time due to tool changing and machine tool adjustment requirements in machining operations. In this study, current studies on tool wear in the cutting of aluminum-based alloys were investigated in detail and the factors affecting tool wear were presented comparatively.

Dövme ve Döküm Alüminyum Alaşımlarının İşlenmesinde Takım Aşınması: Literatür Araştırması

ARTICLE INFO

Received: 11.10.2021

Accepted: 30.11.2021

Keywords:

Alüminyum alaşımları

İşlenebilirlik

Kesme kuvveti

Yüzey pürüzlülüğü

Takım aşınması

ÖZET

Alüminyum ve alaşımları hafiflik, yüksek mukavemet/ağırlık oranı ve kolay şekillendirilebilme özelliklerinden dolayı endüstride yaygın kullanım alanına sahiptir. İstenilen formlarda üretilebilmesi ve mekanik sistemlerde nihai ürün olarak kullanılabilmeleri için tormalama, delme, frezeleme ve diş açma gibi farklı işleme operasyonlarına ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak, bu malzemelerin işlenmesi esnasında işlenmiş yüzey kalitesini, boyutsal toleransı ve kesici takım performansını olumsuz etkileyen bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Kesici takım aşınması, bu sorunlardan en önemlileri arasında yer almaktadır. Kesici takım aşınması, işleme operasyonlarında takım değiştirme ve takım tezgâhı ayarlama gereksinimlerinden dolayı zaman kaybına da yol açmaktadır. Bu çalışmada, literatürde alüminyum esaslı alaşımların işlenmesinde takım aşınması üzerine yapılan güncel çalışmalar detaylı bir şekilde araştırılmış ve takım aşınması üzerinde etkili olan faktörler karşılaştırmalı olarak ortaya konulmuştur.

1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

Aluminum alloys are an important material today due to their high strength/weight ratio, lightness, corrosion resistance, thermal and electrical conductivity. This situation increases the widespread use of aluminum alloys in the industry, depending on the developing technology [1]. It is preferred in aerospace, automotive, medical and defense industries due to its properties [2-5]. In addition, structural and mechanical properties can be developed by adding alloying elements such as copper, manganese, zinc, magnesium and silicon to aluminum-based alloys [6]. Thus, efficient results can be obtained with longer service life in mechanical systems. These alloys are subjected to different conventional machining operations such as turning, milling and drilling in line with consumer needs so that they can be used as structural elements in mechanical systems. Since it has different structural properties, it exhibits different properties in the machining method. Cutting speed (V_c), feed rate (f) and depth of cut (a_p) are defined as machinability input variables, while output variables are cutting force (F_c), surface roughness (R_a) and tool wear (TW) during the machining of materials. Aluminum alloys exhibit a tendency to stick due to the adhesion wear

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: cem.alparslan@erdogan.edu.tr
<https://doi.org/10.52795/mateca.1008145>

mechanism in the CT during the cutting process with the effect of high ductility. This tendency brings about an increase in the F_c and a reduce in the machined surface quality [7]. Accordingly, independent variables such as V_c , f , a_p , CT material and coolant must be controlled in order to minimize tool wear which is among the machining outputs [8, 9]. In this study, current studies in the literature about the effects of these independent variables on TW during cutting of aluminum-based alloys were investigated in detail and presented in a comparative way.

2. CUTTING TOOL WEAR MECHANISMS (KESİCİ TAKIM AŞINMA MEKANİZMALARI)

TW is one of the most significant factor showing the machinability index of materials. Minimum tool wear is a necessary criterion for maximum productivity in machining theory. Different CT materials and coatings can be preferred for machining aluminum alloys. Among these, high-strength diamond and diamond-coated tools provide a better tool life and a good surface quality [10]. However, diamond and diamond-coated tools are expensive compared to other tools. Coated/uncoated carbide tools cost less than diamond tools. Efficient results can be obtained in the cutting of aluminum-based alloys in terms of cost criteria. HSS (High speed steel) CTs can also be used for roughing machining operations. TW that occurs during machining in CTs reveals with the effect of deformations [11]. TW is a tribological feature that causes an increase in R_a in the area where the CT contacts, due to the effect of the machining mechanism [12]. Surface quality is a factor that affects tool life, dimensional tolerance of the machined material and the economy of the machining process. Many types of wear can occur in CTs during the cutting of aluminum-based materials. Some of these wear types are flank, crater, notch wear, built up edge (BUE), built up layer (BUL) and thermal crack. Flank wear is formed on the surface of the CT where it comes into contact with the machined material. It is formed by the continuous friction of the worn area on the machined surface. It causes excessive wear on the CTs depending on time (Fig. 1a) [13]. Notch wear is the result of excessive localized damage on both the bevel surface and the flank surface of the insert at the a_p line. It occurs due to the hardened surface structure with adhesion and deformation. It is particularly common in the machining of stainless steel materials (Fig. 1b) [14]. BUE occurs when ductile materials are machined at low V_c . It causes a change in cutting edge geometry (Fig. 1c) [15]. Crater wear occurs when high-temperature chips strike the CT surface. Crater wear is known to result from diffusion or dissolution wear at high V_c . In other words, it occurs due to the effect of the chemical reaction between the workpiece and the CT (Fig. 1d) [16]. Thermal crack occurs with the effect of sudden increase and decrease in tool-chip temperatures during material machining. It usually occurs with interrupted cutting and the use of coolant in milling (Fig. 1e) [17].

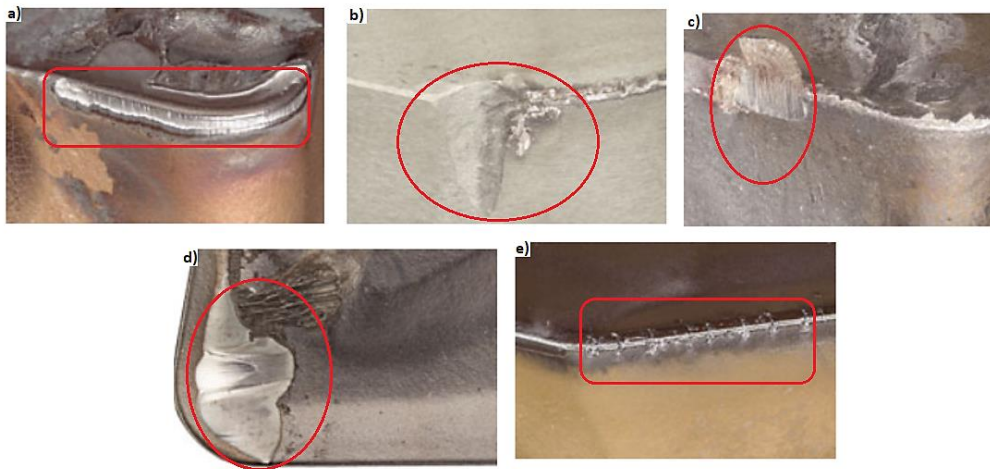


Figure 1. Wear mechanisms on the CT, a) Flank wear, b) Notch wear, c) BUE, d) Crater wear and e) Thermal crack [18]
(Kesici takımındaki aşınma mekanizmaları, a) Serbest yüzey aşınması, b) Çentik aşınması, c) Yığıntı talaş, d) Krater aşınması ve e) Termal çatlak)

3. TOOL WEAR IN MACHINING OF ALUMINIUM-BASED ALLOYS (ALÜMİNYUM ESASLI ALAŞIMLARIN İŞLENMESİNDE TAKIM AŞINMASI)

Aluminum alloys are divided into two groups as wrought and cast. In addition, it can be categorized according to the properties of alloying elements such as strain-hardenable and heat-treated alloys. The machinability of many wrought aluminum alloys is excellent. While cast alloys containing zinc, magnesium and copper as main alloying elements cause machining difficulties, the use of small tool rake angle has been found to improve machinability. Alloys containing silicon as the main alloying element require the use of large rake angle, low speed and feed, which increases the cost [19].

3.1. Wrought Aluminium Alloys (Dövme Alüminyum Alaşımları)

Wrought aluminum alloys are ideal for applications where a lighter metal is needed for performance and safety, speed or energy efficiency. Aluminum wheels on racing cars and bodies of aircraft are a perfect example of this. It has low density compared to steel. It is an ideal material for aviation applications. In addition, wrought alloys can be easily shaped due to their good plastic deformation ability. Examining the outputs obtained in the machining of these alloys is very important in terms of the performance of these alloys. It has been determined that many studies have been done on tool wear related to wrought alloys in the literature. Ping et al. were investigated surface integrity and tool wear using different V_c (250 and 750 m/min), f (0.06 and 0.08 mm/tooth) and a_p (0.5 and 1.5 mm) in milling of 7050-T7451 aluminum alloy. It was observed that as the V_c increased, the F_c , R_a and BUE decreased. It was determined that the R_a increased with the increase of BUE formation on the machined surface at low V_c . In addition, it was revealed that the formation of BUE increased with increasing of f [20]. Gao et al. researched the wear behavior of tungsten-carbide (WC) grain size and cobalt (Co) content on the CT in the micro-milling process of 7075 aluminum alloy. They used constant V_c of 20 m/min, f of 2 μm and a_p of 50 μm parameters. It was observed that the end mill with finer grain size exhibited better wear resistance and the end teeth flank wear length of the micro end mill increased with the increase of WC grain size. It was also revealed that the micro end mill exhibits less wear resistance with the increase of Co content (Fig. 2) [21].

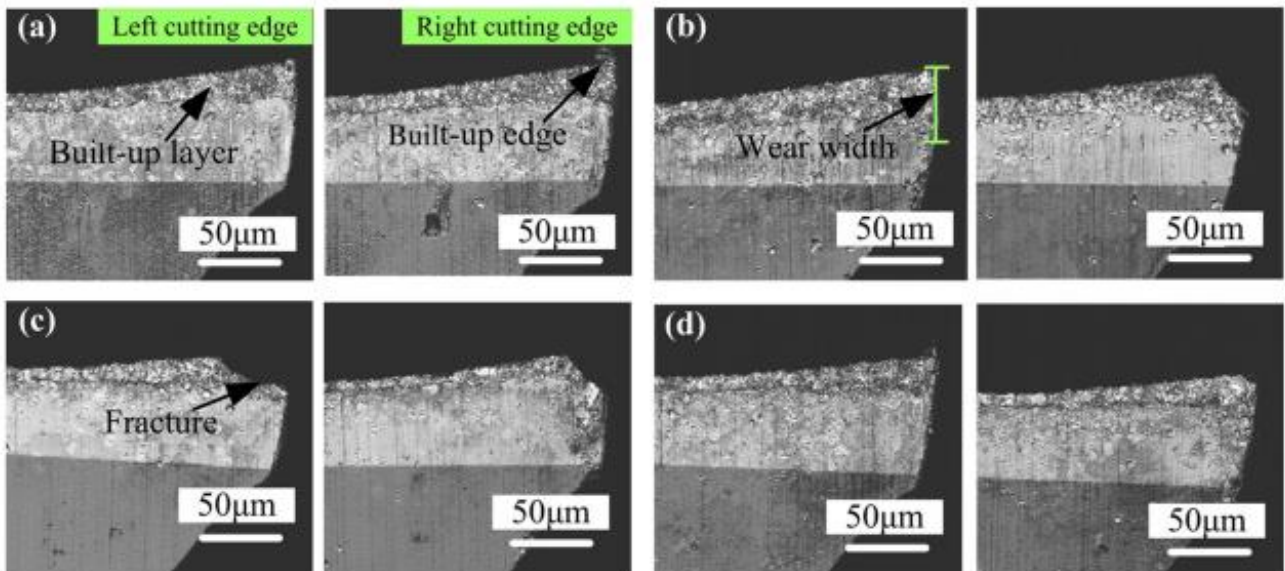


Figure 2. Wear morphologies on micro end mills for machining length of 480 mm, a) K55SF, b) DK500UF, c) DK450UF and d) DK120UF [21] (480 mm işleme uzunluğu için mikro parmak frezelerde aşınma morfolojileri)

Wang et al. were examined TW in micro-milling of Al-6061 alloy diameter of 1 mm and TiAlN coated carbide tool. Different radial a_p (100, 200 and 300 μm), axial a_p (100, 150 and 200 μm) and feed per tooth (1, 2 and 3 $\mu\text{m}/\text{tooth}$) parameters were used. The order of importance and optimum values for the independent variable parameters were determined as axial a_p : 300 μm , feed per tooth: 1 μm and radial a_p : 150 μm , respectively. While it was observed that the main wear forms were coating peeling (Fig. 3a), tool tip breakage (Fig. 3b) and adhesive (Fig. 3c) was detected as the wear mechanism [22].

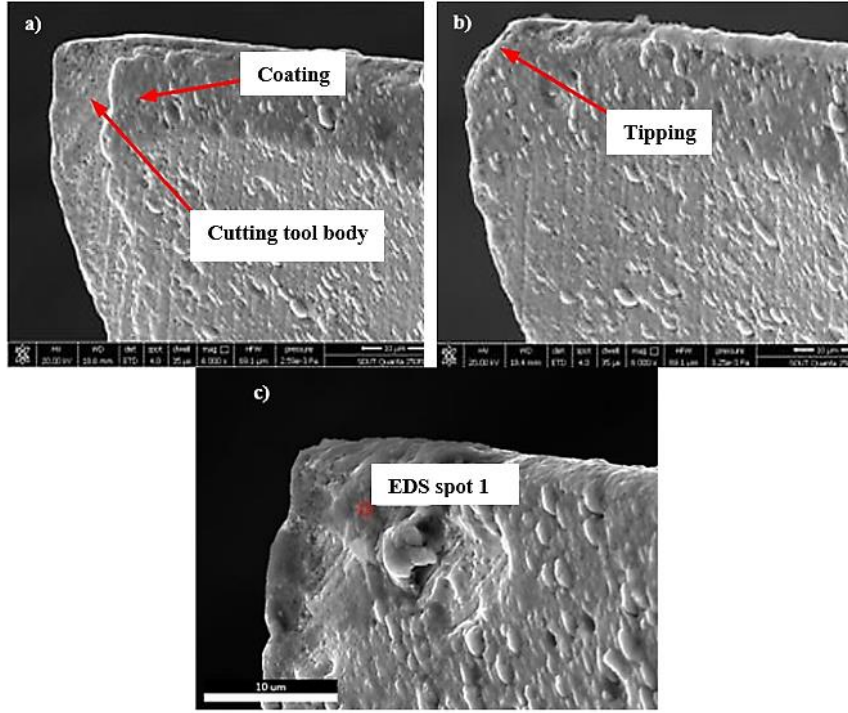


Figure 3. SEM (Scanning electron microscope) and EDS (Energy dispersive X-ray spectroscopy) images on TiAlN coated tool wear, a) Coating peeling, b) Breakage near edge nose of tool and c) Adhesive wear on tool [22] (TiAlN kaplamalı takımın takım aşınması görüntüleri, a) Kaplama soyulması, b) Takımın kenar ucuna yakın kırılma ve c) Takımda adhesiv aşınma)

Zhang et al. researched the wear behavior of CTs during ultrasonic elliptical vibration cutting (UEVC) and conventional cutting (CC) of Al-7055-T7451 alloy. TW was investigated using different V_c (600, 900, 1200, 1500 and 1800 m/min), a_p (1.5; 2; 2.5; 3 and 3.5 mm), feed (0.025, 0.05, 0.075, 0.1 and 0.125 mm/z) and vibration frequencies (5000, 10000, 15000, 20000 and 25000 Hz). It was observed that obtained under the same cutting parameters approximately four times better surface quality with UEVC. Microcracks and large adhesion areas were observed on the machined surface using CC, while better surface quality was observed using UEVC. It was determined that tool wear was 3-5 times higher in CC under the same cutting parameters. While tipping, spalling wear, adhesive and oxidative wear occurred as tool wear in CC, mild adhesive and abrasive wear was observed in UEVC (Fig. 4) [23].

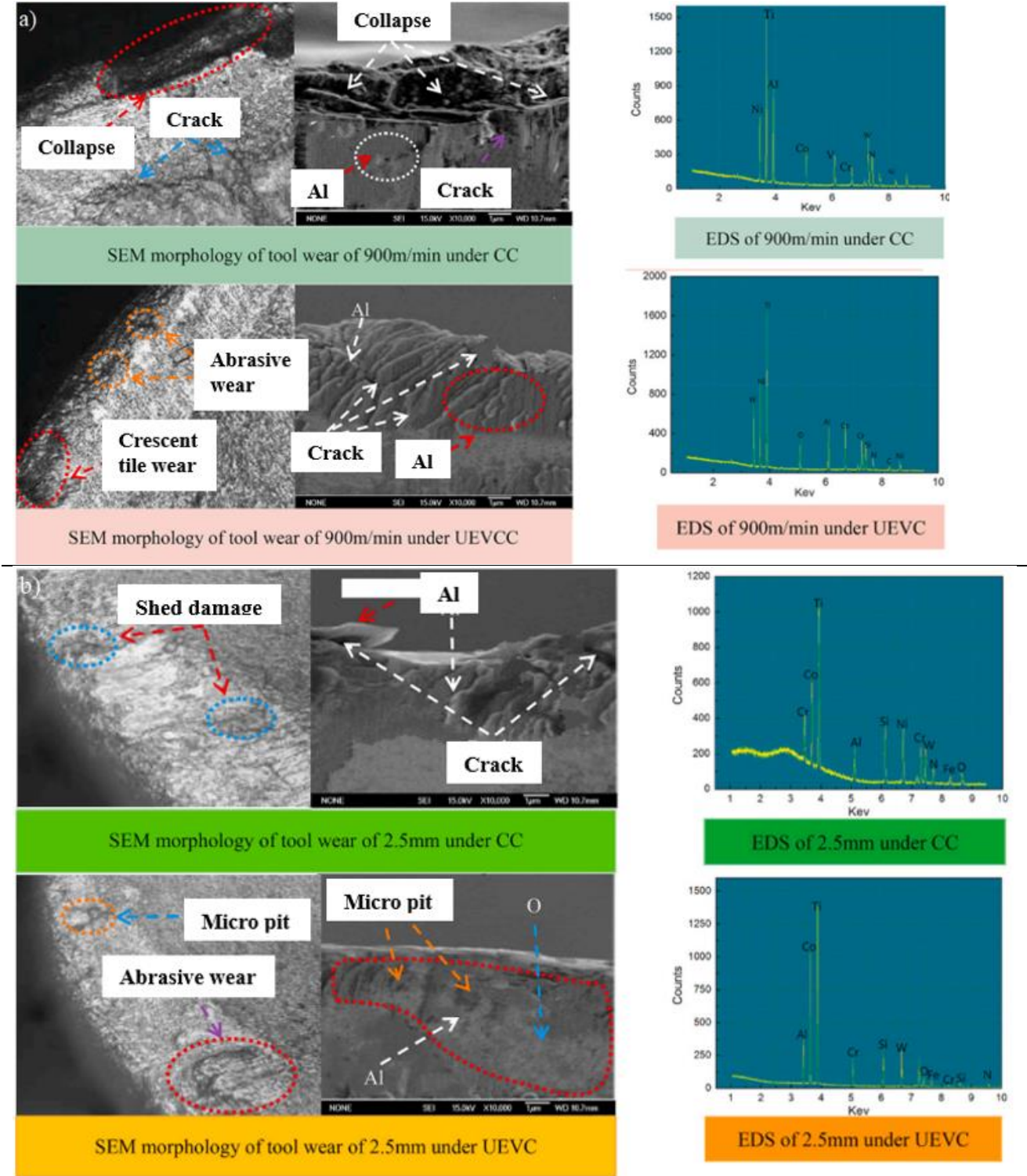


Figure 4. Tool wear in CC and UEVC, a) SEM and EDS tool wear images for 900 m/min and b) SEM and EDS tool wear images for a_p of 2.5 mm [23] (CC ve UEVC'de takım aşınması, a) 900 m/dak için SEM ve EDS takım aşınma görüntüleri ve b) 2,5 mm kesme derinliği için SEM ve EDS takım aşınma görüntüleri)

3.2. Cast Aluminium Alloys (Döküm Alüminyum Alaşımları)

The use of light alloys in mechanical systems causes weak tribological properties. Different alloying elements can be added to improve the tribological properties in the casting technique. Thus, cast aluminum alloys can be widely used in the manufacture of engine blocks and bearing

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: cem.alparslan@erdogan.edu.tr
<https://doi.org/10.52795/mateca.1008145>

materials in the automotive sector. However, machining processes are required for cast alloys to be used as final products in mechanical systems. Workpieces machined in the appropriate tolerance ranges can be used precisely in mechanical systems. It has been observed that current studies on this subject have been done in the literature. Bayraktar and Afyon examined the impacts of Zn and Cu additions on the thrust force, Ra and tool wear of the Al-7Si alloy manufactured by the permanent mold casting method. Constant V_c (120 m/min), f (0.15 mm/rev), depth of cut (15 mm) and uncoated carbide drills were used for drilling tests. While the minimum thrust force and Ra were determined in the drilling of Al-7Si-4Zn-3Cu alloy (Fig. 5c), maximum BUE formation was observed in the drilling of Al-7Si (Fig. 5a) and Al-7Si-4Zn alloy (Fig. 5b) [24].

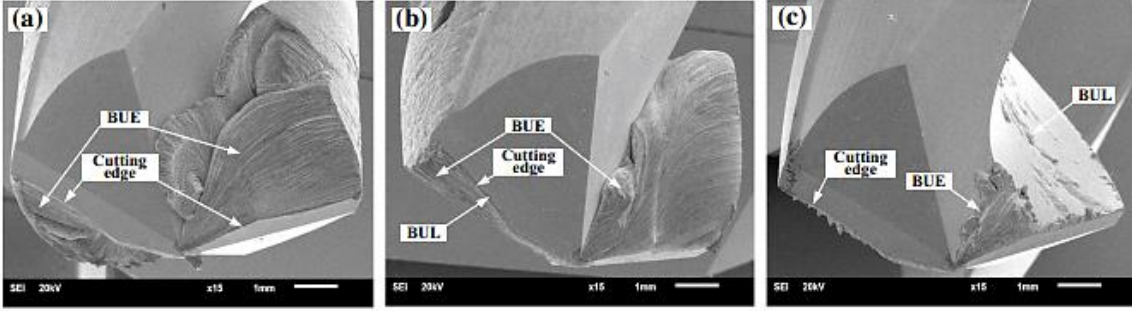


Figure 5. BUE ve BUL formation on the drills, a) Al-7Si, b) Al-7Si-4Zn and c) Al-7Si-4Zn-3Cu [24] (Matkaplarda yığıntı talaş ve yığıntı katman oluşumu)

Hekimoğlu et al. researched the F_c , Ra and TW in the milling of Al-35Zn alloy manufactured by the permanent mold casting method. The experiments were carried out at different V_c (600, 1200, 1800 rpm), feed (0.05; 0.1 and 0.15 mm/tooth) and constant a_p (1.5 mm) using uncoated and TiAlN coated carbide end mills. The F_c , Ra, BUE and BUL decreased with the increasing of V_c in both CTs, while it increased with the increasing of f . It was found that uncoated carbide tools outperformed in terms of F_c , Ra and tool TW (Fig. 6) [25].

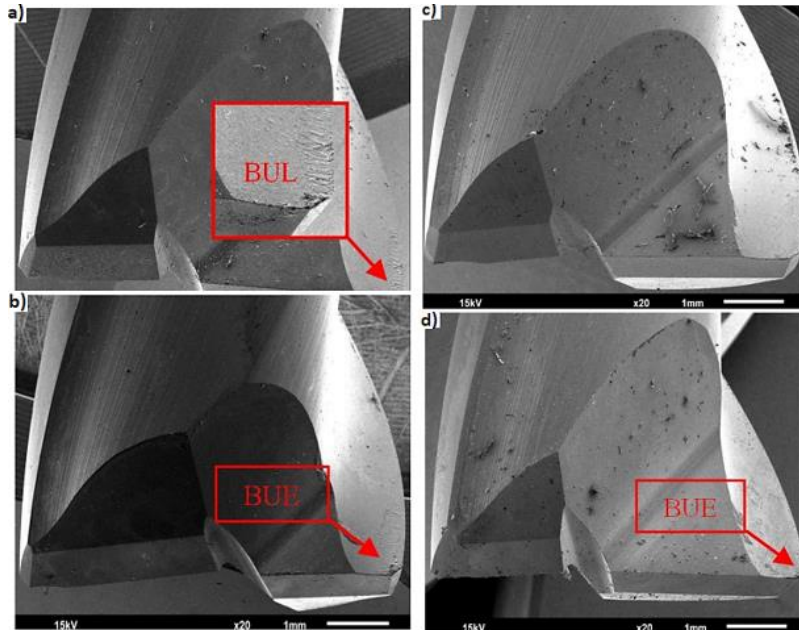


Figure 6. Wear on the CT edge, a) Wear on TiAlN coated tool for V_c : 600 rev/min, f : 0.05 mm/tooth), b) Wear on TiAlN coated tool for V_c : 1800 rev/min, f : 0.15 mm/tooth), c) Wear on uncoated tool for V_c : 600 rev/min, f : 0.05 mm/tooth) and d) Wear on uncoated tool for V_c : 1800 rev/min, f : 0.15 mm/tooth) [25] (Kesici takımında aşınma, a) V_c : 600 dev/dak ve f : 0,05 mm/diş için TiAlN kaplamalı takımında aşınma, b) V_c : 1800 dev/dak ve f : 0,15 mm/diş için TiAlN kaplamalı takımında aşınma, c) V_c : 600 dev/dak ve f : 0,05 mm/diş için kaplamasız takımında aşınma ve d) V_c : 1800 dev/dak ve f : 0,15 mm/diş için kaplamasız takımında aşınma)

Bayraktar et al. examined the impacts of Cu and Si additions on Fc, Ra and tool wear in Al-25Zn alloy manufactured by permanent mold casting method. Different V_c (250, 350 and 450 m/min), f (0.05; 0.1 and 0.15 mm/rev), constant a_p (1.5 mm) and CVD- Al_2O_3 coated carbide insert were used in the experiments. It was revealed that while the Fc and Ra decrease with increasing of V_c , they increase with increase of f . While Fc and Ra increased with the addition of Si, they decreased with the addition of Cu. The least BUE formation was determined under Cu addition, 450 m/min V_c and 0.05 mm/rev feed conditions (Fig. 7) [26].

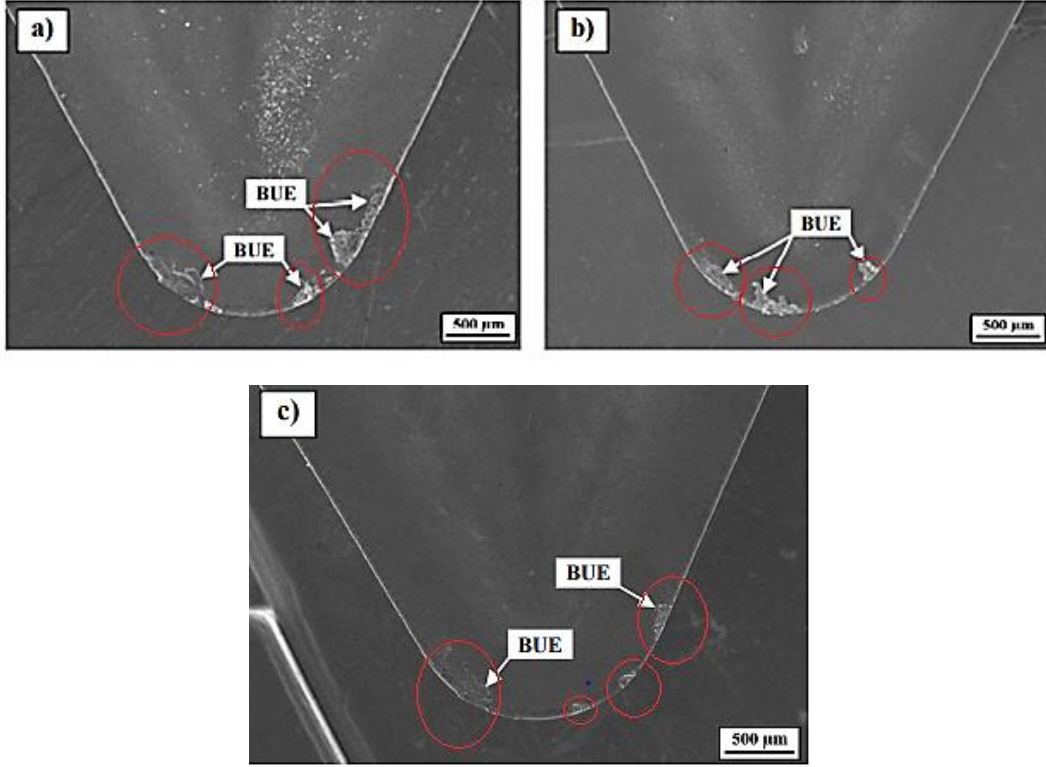


Figure 7. BUE formations at the different V_c values for Al-25Zn-3Cu alloy, a) 250 m/min, b) 350 m/min and c) 450 m/min [26] (Al-25Zn-3Cu alaşımı için farklı kesme hızı değerlerinde yığıntı talaş oluşumları)

Ghoreishi et al. examined TW in high speed face milling of Al/SiC metal matrix composites using different V_c (1000-2500 m/min), f (0.01-0.1 mm/tooth), a_p (0.25-2 mm) and coolant (Dry and CO_2). It was observed that the tool wear rate increased more than 2.5 times with the increase of V_c from 1000 m/min to 2500 m/min. In addition, it was revealed that the tool wear rate increased five times with an increasing of a_p from 0.25 mm to 2 mm, while the tool wear rate increased eight times with an increasing of f from 0.01 mm/tooth to 0.1 mm/tooth [27]. Pul investigated effects of different MgO reinforcement ratios (5, 10 and 15%) on tool wear and Ra during the turning of Al-MgO metal matrix composite materials with carbide (C), cubic boron nitride (CBN) and coated cubic boron nitride (CBNC) CTs. For this, different V_c (150, 200, 250 and 300 m/min), f (0.075, 0.15 and 0.225 mm/rev) and constant a_p (1 mm) were used. It was determined that while the Ra values decreased with the increasing of V_c , it increased with the increasing of f . It was observed that the highest Ra values were measured at a V_c of 150 m/min and a f of 0.225 mm/rev. It was revealed that BUE and abrasive wear mechanism were effective in all CTs and ideal results were obtained with C tools and 10% reinforcement ratio (Fig. 8) [28].

Recently, many researches have been carried out on tool wear during machining of wrought and casting aluminum alloys. General information about these studies were given in Table 1.

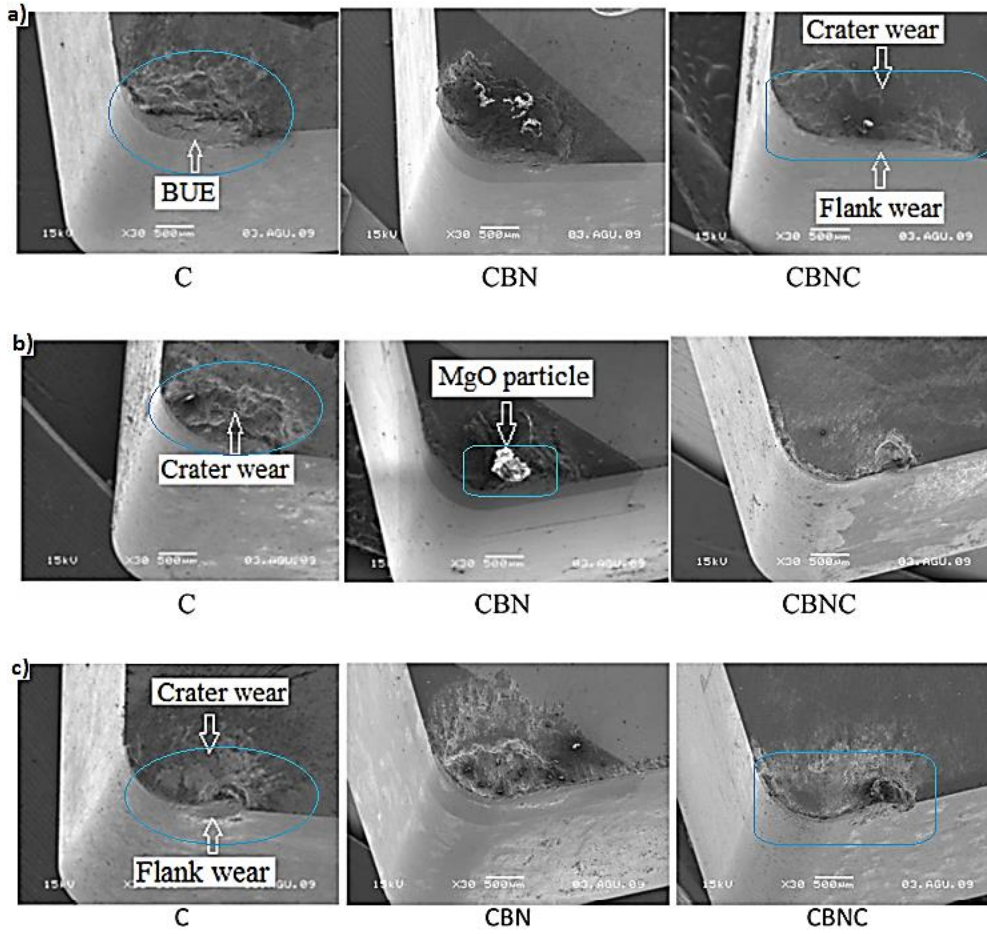


Figure 8. Tool wear images for C, CBN and CBNC tool materials in different reinforced rates, a) %5 MgO, b) %10 MgO and c) %15 MgO [28] (Farklı takviye oranlarında C, CBN ve CBNC kesici takım malzemeleri için takım aşınma görüntüleri)

Table 1. Literature researches on tool wear (Takım aşınması üzerine literatür çalışmaları)

| Authors | Alloy | CT | Operation | Operation parameters | Result |
|---------------------------|---|--|-----------------|---|---|
| M. Kumar ve P. Kumar [29] | Fly ash and Mg reinforced Al MMCs and Pure Aluminum | Uncoated HSS | CNC Milling | V_c : 1500, 2000 and 3500 rpm f : 100, 150 and 200 mm/min and SiC and Al ₂ O ₃ abrasive material having concentration of abrasive %20, %25, %35 (1200 mesh size) | BUE formation is highest in the tool at a cutting speed of 1500 rpm and a feed rate of 200 mm/min. Flank wear occurred at a feed rate of 200 mm/min. Optimum machining parameters; Cutting speed of 2500 rpm, feed rate of 200 mm/min, axial depth of cut of 20 mm and radial depth cut of 1 mm. Minimum tool wear in optimum parameters is 0.213mm. |
| Okokpujie et al. [12] | 6061 aluminum alloy | Uncoated HSS | CNC Milling | V_c : 1500, 2000, 2500, 3000 and 3500 rpm f : 100, 150, 200, 250 and 300 mm/min 10, 15, 20, 25 and 30 mm axial depth of cut, 1, 1.5, 2, 2.5 and 3 mm radial depth of cut | The radial depth of cut has the most influence parameter on tool wear. Abrasive wear was occurred at cutting speed 250-750 m/min. |
| Zhang et al. [20] | 7050-T7451 aluminum alloy | TiN-coated hard alloy indexable face cutter. | CNC Milling | V_c : 250, 500, 750, 1000 and 1250 m/min f : 0.06, 0.08, 0.10, 0.12 and 0.14 mm/rev and a_p : 0.5-1.5 mm | Adhesive wear was occurred at 750-1000 m/min. Oxidation wear was occurred at 1000-1250 m/min. |
| Rui-Song et al. [30] | TiB ₂ particles reinforced 7050 Al MMC | Coated carbide, PCBN and PCD | Universal Lathe | V_c : 19, 25, 31, 37, 43, 49 and 55 m/min, f : 20, 30, 40, 50, 60 and 70 mm/min and a_p : 0.2, 0.4, 0.6 and 0.8 mm | Abrasive, adhesive, diffusion and oxidation wears were observed on the CTs. |

| Authors | Alloy | CT | Operation | Operation parameters | Result |
|----------------------|--------------------------------------|--|-----------|---|--|
| Pattnaik et al. [31] | %100 Rolled aluminum | WC SPUN, WC SPGN, WC+TiN, WC+Ti(C, N)+Al ₂ O ₃ and PCD | CNC Lathe | V_c : 336, 426 and 540 m/min f : 0.045, 0.06 and 0.09 mm/rev and a_p : 2 mm | The least tool wear was observed in PCD and WC SPGN tools. |
| Muharrem Pul [32] | 7075, 2024 and 6061 aluminum alloy | Uncoated cemented carbide | CNC Lathe | V_c : 200, 250, 325 and 400 m/min f : 0.250, 0.350 and 0.400 mm/rev and a_p : 2.5 mm | Al 2024 alloy exhibited performance more better than the other alloys. |
| Bican et al. [33] | 2024, 6061 and 7075 aluminum alloy | CVD-(TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN) coated | CNC Lathe | V_c : 40, 60, 80 and 120 m/min f : 0.3 mm/rev and mm a_p : 1 | The highest BUE formation was observed in machining of 2024 aluminum alloy. BUL rates in machining of 2024 and 6061 aluminum alloys was higher than 7075 aluminium alloy. The optimum machining parameters for minimum flank wear were determined as V_c of 60 m/min, f of 0.05 mm/rev and a_p of 0.4 mm. |
| Sahoo et al. [34] | SiCp particle reinforced 7050 Al MMC | Uncoated WC | CNC Lathe | V_c : 60, 120 and 180 m/min f : 0.05, 0.1 and 0.15 mm/rev and a_p : 0.2, 0.3 and 0.4 mm | It was observed that the cutting speed had the maximum effect on tool wear. |

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: cem.alparslan@erdogan.edu.tr
<https://doi.org/10.52795/mateca.1008145>

4. CONCLUSIONS (SONUÇLAR)

In this study, current studies on tool wear during machining of aluminum-based alloys were investigated and these studies were presented in a comparative way. It was determined that aluminum-based alloys were generally produced as cast and wrought in industrial applications. It was demonstrated that the machinability of wrought alloys was excellent and the machinability of cast alloys could be developed by adding various alloying elements. While V_c , f and a_p were used as machinability input parameters or independent variables, F_c , R_a and tool wear were examined as output or dependent variables. The main forms of wear was generally identified as tool tip cracking and coating peeling for wrought aluminum alloys. It was revealed that the wear mechanisms were adhesive and abrasive wear. It was observed that the type of wear occurring in the tools used in the machining of such alloys was BUE. It revealed that BUE formation could be reduced by a combination of high V_c , low f and a_p . It was found that the surface quality of wrought aluminum was better than cast aluminum alloys during machining. It was observed that alloying elements had an effect on the machining properties of cast aluminum alloys. Among these elements, it was determined that Zn and Cu improve the machinability of alloys due to their lubricating effects. Although it improved the castability and mechanical properties of the alloys, it was shown that the addition of Si worst the machinability due to its abrasive feature. It was determined that BUE and BUL formations occurred in CTs in the machining of these alloys.

As a result of this study, it was revealed that the F , R_a , BUE and BUL formation decreased with the increasing of V_c in machining of aluminium alloys, while it increased with the increasing of f . It was determined that a combination of high V_c and low f should be selected as optimum cutting conditions. In future studies, the effects of elemental additions such as Chromium, Manganese and Nickel on tool wear can be investigated in detail in terms of both wrought and casting techniques. Optimum cutting conditions during cutting tests can be determined by methods such as Taguchi, Gray relational analysis (GRA), ANN (Artificial neural network) and ANOVA (Analysis of variance). In addition, alternatives in machining theory can be ranked by multi-criteria decision techniques such as TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution), ELECTREE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité), AHP (Analytic Hierarchy Process), VIKOR (Visekriterijumsko Kompromisno Rangiranje) and COPRAS (Complex Proportional Assessment).

REFERENCES (KAYNAKLAR)

1. G. Wittbecker, Aluminium Market Outlook, CRU Group, London, UK, 2018.
2. M.C. Santos, A.R. Machado, W.F. Sales, M.A. Barrozo, E.O. Ezugwu, Machining of aluminum alloys: a review, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86(9-12): 3067-3080, 2016.
3. Q. Luo, G. Robinson, M. Pittman, M. Howarth, W. M. Sim, M. R. Stalley, H. Leitner, R. Ebner, D. Caliskanoglu, P. E. Hovsepian, Performance of nano-structured multilayer PVD coating TiAlN/VN in dry high speed milling of aerospace aluminium 7010-T7651, *Surf. Coatings Technology*, 200: 123–127, 2005.
4. H. Demir, S. Gündüz, The effects of aging on machinability of 6061 aluminium alloy, *J Materials and Design*, 30(5): 1480–1483, 2009.
5. P. E. Hovsepian, Q. Luo, G. Robinson, M. Pittman, M. Howarth, D. Doerwald, R. Tietema, W. M. Sim, A. Deeming, T. Zeus, TiAlN/VN superlattice structured PVD coatings: a new alternative in machining of aluminium alloys for aerospace and automotive components, *Surf Coat Technol*, 201(1–2): 265–272, 2006.
6. I. Zagórski & T. Warda, Effect of technological parameters on the surface roughness of aluminium alloys after turning, *Advances in Science and Technology Research Journal*, 12(2): 144-149, 2018.
7. A. Gomaz-Parra, M. Alvarez-Alcon, J. Salguero, M. Batista, M. Marcos, Analysis of the evolution of the built-up edge and built-up layer formation mechanisms in the dry turning of aeronautical aluminium alloys, *Wear*, 302: 1209–1218, 2013.

8. A. Manna, B. Bhattacharya, Influence of machining parameters on the machinability of particulate reinforced Al/SiC–MMC, *Int. J. Adv. Manuf. Technology*, 25: 850–856, 2005.
9. R. K. Bhushan, S. Kumar, S. Das, Effect of machining parameters on surface roughness and tool wear for 7075 Al alloy SiC composite, *Int. J. Adv. Manuf. Technology*, 50:459–469, 2010.
10. P. Roy, S. K. Sarangi, A. Ghosh, A. K. Chattopadhyay, Machinability study of pure aluminum and Al-12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts, *Int. Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 27: 535-544, 2009.
11. A. Rivero, G. Aramendi, S. Herranz, L. N. Lopez de Lacalle, An experimental investigation of the effect of coatings and cutting parameters on the dry drilling performance of aluminium alloys, *Int J Adv Manuf Technol*, 28: 1–11, 2006.
12. I.P. Okokpujie, O.M. Ikumapayi, U.C. Okonkwo, E.Y. Salawu, S.A. Afolalu, J.O. Dirisu & O.O. Ajayi, Experimental and Mathematical Modeling for Prediction of Tool Wear on the Machining of Aluminium 6061 Alloy by High Speed Steel Tools, *Open Engineering*, 7(1): 461-469, 2017.
13. M. P. Groover, *Fundamentals of modern manufacturing*, 4th ed., John wiley& Sons,Inc, USA, 1999.
14. A. R. Machado, *Machining of Ti6Al4V and Inconel 901 with a High pressure coolant system*, Ph.D. Thesis, University of Warwick, Coventry, England, 1990.
15. G. List, M. Nouari, D. G' ehin, S. Gomez, J. P. Manaud, Y. Le Petitcorps, F. Girot, Wear behavior of cemented carbide tools in dry machining of aluminium alloy, *Wear* 259: 1177- 1189, 2005.
16. A. R. Machado, J. Wallbank, *Machining of titanium and its alloys – a review*, *Proc. of the Inst. Mech. Eng. J. Eng. Manufacture*, I IMECHE, London, England, Part B 204: 53-60, 1990.
17. C. A. Anderson, G. Milan, M. B. Silva, A. R. Machado, Some observations on wear and damages in cemented carbide tools, *J. of the Braz. Soc. Of Mech. Sci. & Eng*, 28(3): 269-277, 2006.
18. Sandvik Coromant, *Wear on cutting edges*, <https://www.sandvik.coromant.com/tr/tr/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx>, 05.03.2021.
19. V. Songmene, R. Khettabi, I. Zaghbani, J. Kouam, & A. Djebara, Machining and machinability of aluminum alloys. *Alum. Alloys Theory Appl*, 377-400, 2011.
20. Z. Ping, Y. Xiujie, W. Penghao, Y. Xiao, Surface integrity and tool wear mechanism of 7050-T7451 aluminum alloy under dry cutting, *Elsevier Vacuum*, 184: 1-12, 2021.
21. P. Gao, X. Wang, Z. Liang, J. Xiang, W. Li, J. Xie, Effects of WC grain size and Co content on microscale wear behavior of micro end mills in aluminum alloy 7075 machining, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104: 2401-2413, 2019.
22. W. H. Wang, X. Cheng, O. L. Sun, F. Wang, X. M. Yang, Study on tool wear for micromilling of 6061 aluminium alloy, *The 2nd International Workshop on Materials Science and Mechanical Engineering* 504, 2019.
23. Z. Ping, Z. Xiancheng, C. Xian, Y. Xiao, W. Youqiang, Analysis on the tool wear behavior of 7050-T7451 aluminum alloy under ultrasonic elliptical vibration cutting, *Elsevier Wear*, 466-467, 2021.
24. Ş. Bayraktar, F. Afyon, Machinability properties of Al–7Si, Al–7Si–4Zn and Al–7Si–4Zn–3Cu alloys, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42: 187, 2020.
25. A. P. Hekimoğlu, Ş. Bayraktar, Y. Turgut, Investigation of Effect of Cutting Speed and Feed Rate on Machining of the Al-35Zn Alloy, *2nd International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studied*, November 30- December 2 2018, Samsun, Turkey.
26. Ş. Bayraktar, Ç. Çamkerten, N. Salihoğlu, Investigation of the Effect on Copper and Silicon Additives on Machinability in Turning of Al-25Zn Alloy with CVD-Al₂O₃ Coated Tools, *GU J Sci, Part C*, 8(1): 79-93, 2020.
27. R. Ghoreishi, A. H. Roohi, A. D. Ghadikolaei, Evaluation of tool wear in high-speed face milling of Al/SiC metal matrix composites, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41: 146, 2019.
28. M. Pul, Investigation of effects of MgO ratio on the surface quality and tool wear in turning Al–MgO composites, *Proc IMechE Part B: J Engineering Manufacture* 1–10, 2017.
29. M. Kumar, P. Kumar, Experimental investigations on tool wear during abrasive assisted drilling of aluminum matrix composite using anova, *Optimization in Engineering Research*, 1(2): 40-54, 2020.
30. J. Rui-Song, W. Wen-hu, S. Guo-dong and W. Zeng-qiang, Experimental investigation on machinability of in situ formed TiB₂ particles reinforced Al MMCs, *Journal of manufacturing processes*, 23: 249-257, 2016.

31. S. K. Pattnaik, N. K. Bhoi, S. Padhi, S. K. Sarangi, Dry machining of aluminum for proper selection of cutting tool: tool performance and tool wear, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 98(1-4): 55-65, 2018.
32. M. Pul, Comparison of surface roughness and tool wear in turning of 7075, 6061 and 2024 aluminum alloys, *International Journal of Engineering Research and Development*, 9(2): 65-75, 2012.
33. O. Bican, M. Pul, Comparison of the effect of alloy type on some machining properties in turning different aluminum alloys, *Journal of Engineering Sciences And Researches*, 3(1): 9-17, 2021.
34. A. K. Sahoo, S. Pradhan, Modeling and optimization of Al/SiCp MMC machining using Taguchi approach, *Measurement*, 46(9): 3064-3072, 2013.

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

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

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

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 08.11.2021

Kabul: 20.12.2021

Anahtar Kelimeler:

Çevre dostu işleme,

MMY,

Nanoakışkan,

Tornalama,

Kesme sıvısı,

ÖZET

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

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

ARTICLE INFO

Received: 08.11.2021

Accepted: 20.12.2021

Keywords:

Eco-friendly machining,

MQL,

Nanofluid,

Turning,

Coolant

ABSTRACT

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

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

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

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

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

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

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

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

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

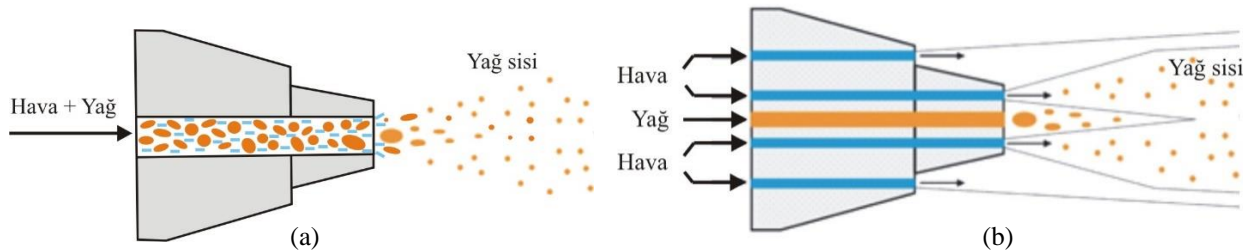
2. MMY TEKNİĞİ VE BU TEKNİKTE NANOAKIŞKAN KULLANILMASI (MQL TECHNIQUE AND USING NANOFLUID IN THIS TECHNIQUE)

2.1. MMY Tekniği (MQL Technique)

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

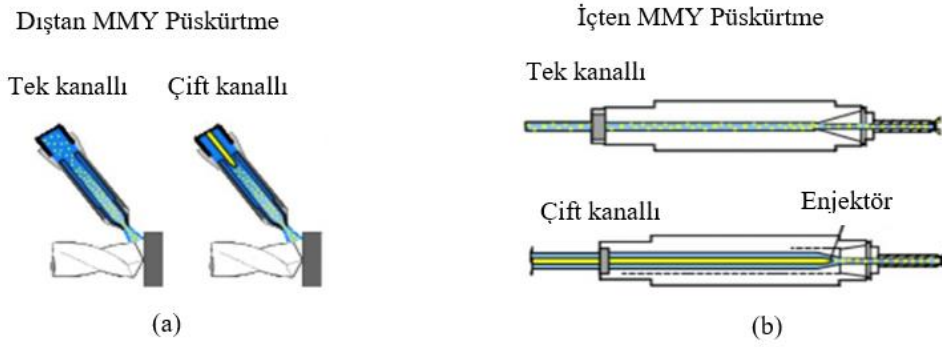
MMY tekniği, geleneksel soğutma yöntemlerine göre kesme sıvısı tüketim maliyetlerinin azaltılması ve çalışanın kesme sıvısına maruz kalması sonucu oluşabilecek potansiyel risklerin önlenmesi amacıyla 1990'ların başında Japonya ve Almanya'da geliştirilmiştir [19]. Bu teknikte az miktarda bitkisel yağ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

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



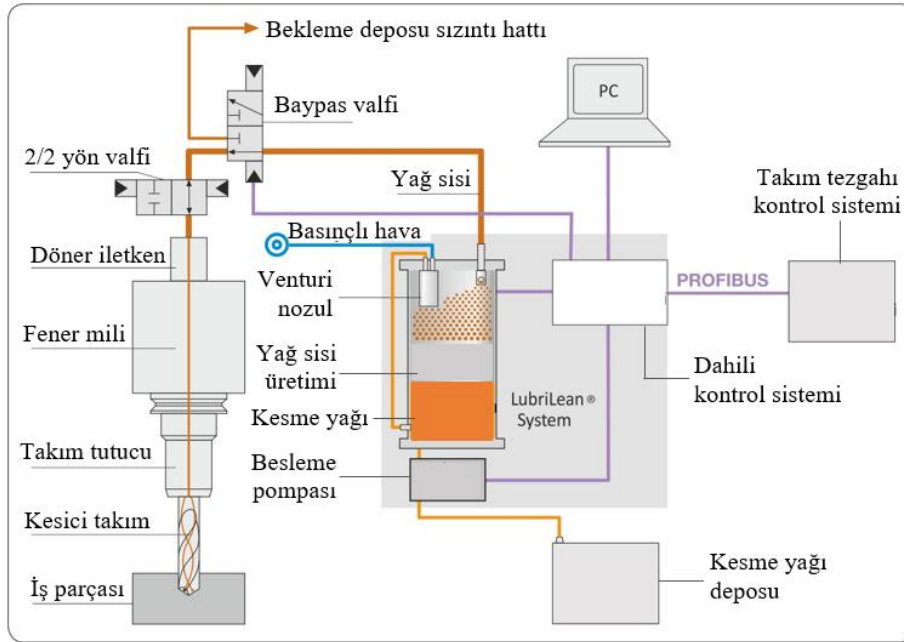
Şekil 1. Tek kanallı (a) ve çift kanallı (b) harici MMY uygulamaları (Single channel (a) and dual channel (b) external MQL applications) [21]

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



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

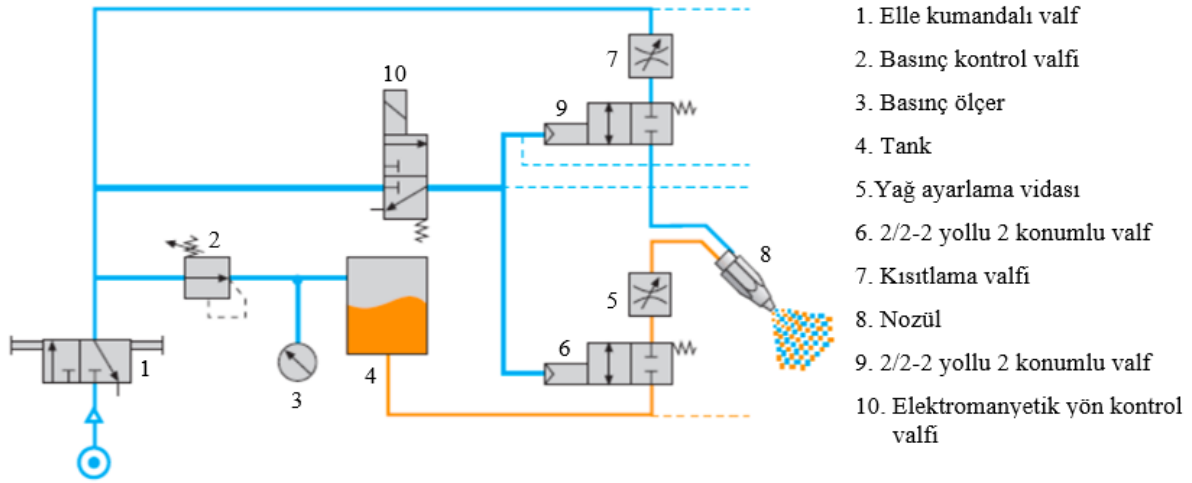
İçten MMY sistemlerinde yağ sisi oluşturmak için özel bir alet kullanılmaktadır. Bu alet sayesinde damlacıkların büyüklüğü 0,3-1µm'ye kadar düşürülebilmektedir. Damlacıkların kütleleri ne kadar az olursa ataletleri de o kadar az olur. Yağ sisi bu sayede çok uzak mesafelere taşınabilir. Keskin dönüşler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



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

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

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



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

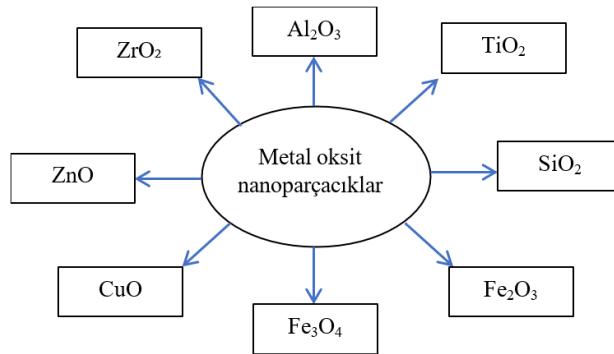
2.2. MMY Tekniğinde Nanoakışkan Kullanılması (Using Nanofluids in MQL Technique)

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



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

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



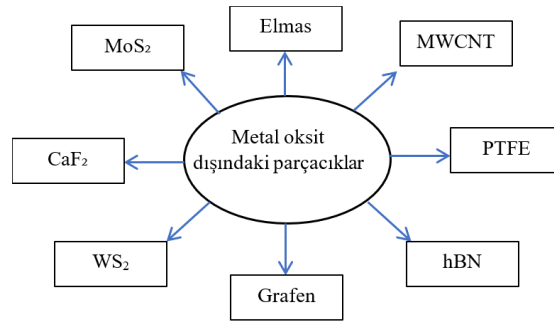
Şekil 6. Nanoakışkan oluşturmada kullanılan çeşitli metaloksit parçacıklar (Various metal oxide particles used to form nanofluids) [28]

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

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

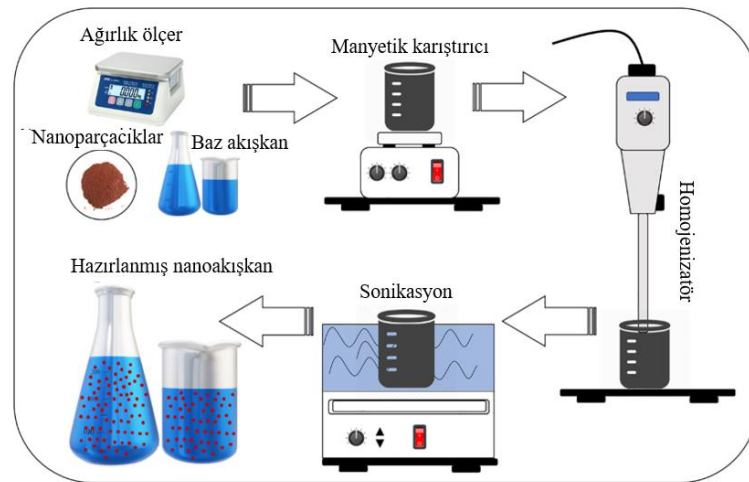
| Nanoparçacık | Termal İletkenlik (W/m.K) | Yoğunluk (g/cm ³) |
|--------------------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Al ₂ O ₃ | 40 | 3.97 |
| TiO ₂ | 11.7 | 4.23 |
| SiO ₂ | 7.6 | 2.4 |
| Fe ₂ O ₃ | 7 | 5.34 |
| Fe ₃ O ₄ | 17.65 | 5.18 |
| CuO | 29.8 | 6.5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

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



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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

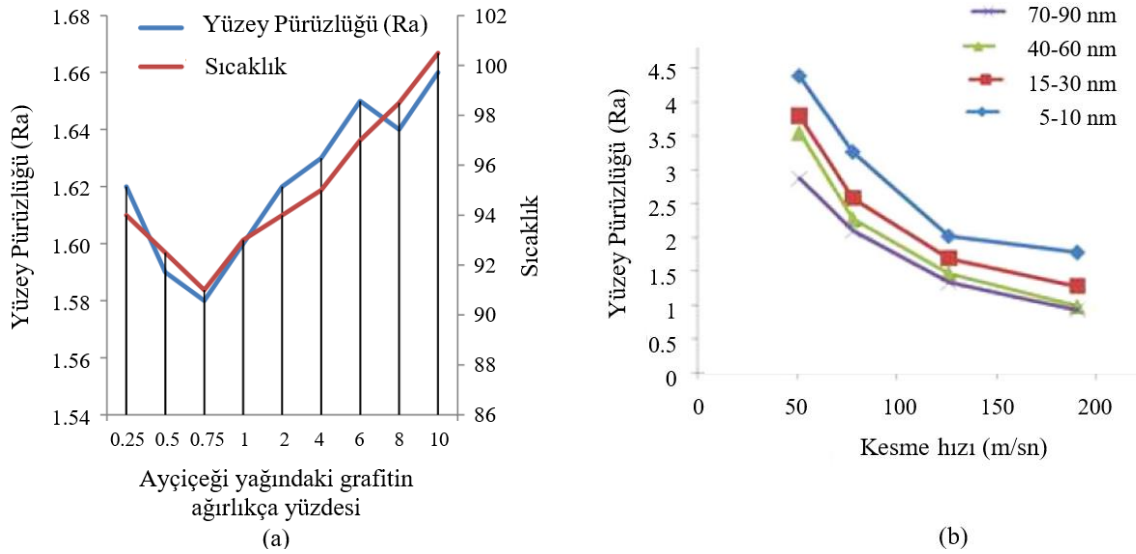
Kumar Sharma ve arkadaşları yine AISI 304 çeliğinin karbür kesici uç ile tornalanmasında kesme hızı, ilerleme, kesme derinliği ve nanoparçacık yüzdesi değişkenlerinin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğüne olan etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışma sonunda kesme sıvısı olarak nanoakışkan kullanıldığında,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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

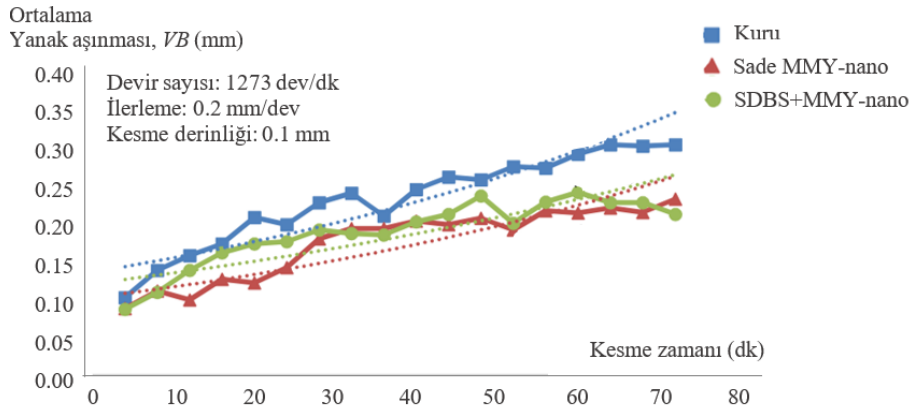
Tablo 4. AISI 1045 çelik alaşımların tormalanmasında MMY-nanoakışkan tekniği kullanılan çalışmalar (Studies using MQL-nanofluid technique in turning AISI 1045 steel alloys)

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

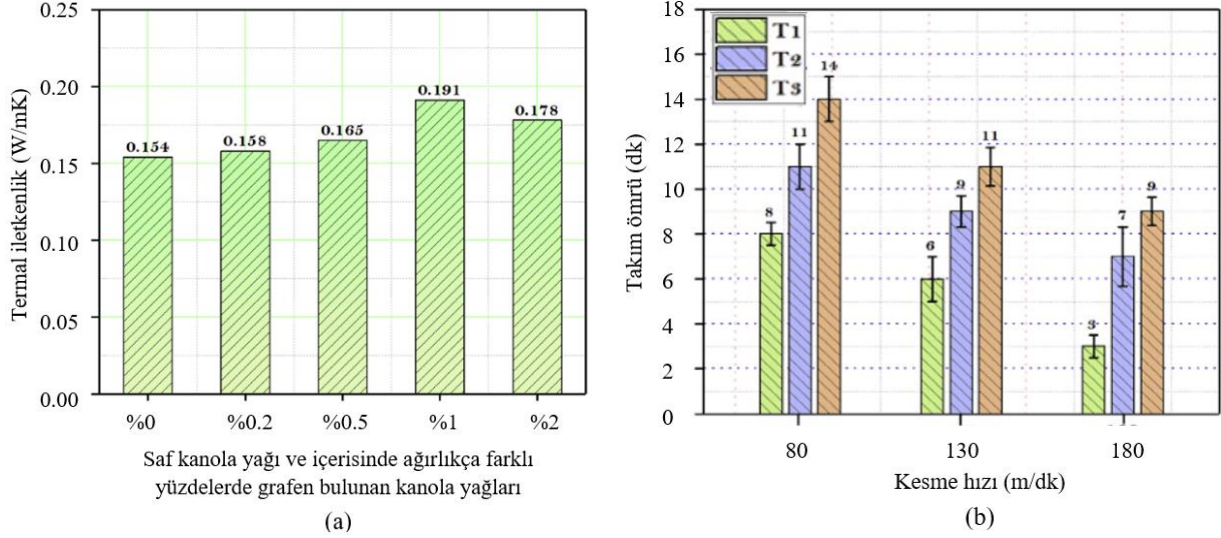
| Ltr. No | İş Parçası | Kesici Takım | Kesme Sıvısı | Nanoparçacık | Soğutma Yöntemi | İncelenen Çıktılar | Yıl |
|---------|------------------|---------------------------|--------------------------------|--|----------------------------------|--|------|
| [43] | AISI 1018 Çeliği | TiAlN Kaplamalı Karbür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

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

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

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

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



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

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

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

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

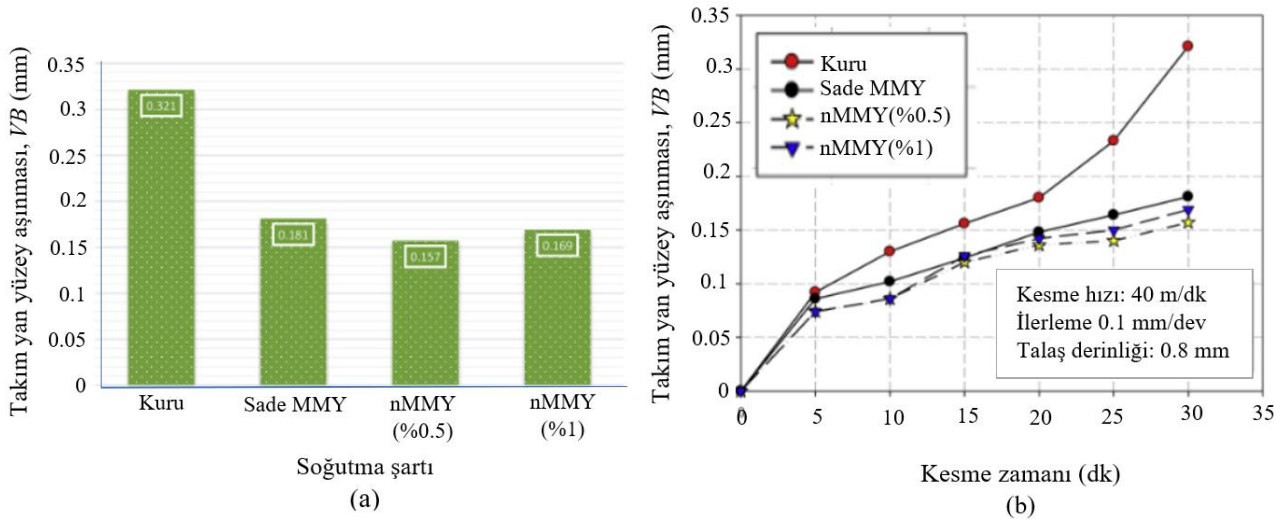
Tablo 6. Titanyum alaşımların tornalanmasında MMY-nanoakışkan tekniği kullanılan çalışmalar (Studies using MQL-nanofluid technique in the turning of titanium alloys)

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

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

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

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

İncelenen çalışmalarda gözlenen sonuçlar dikkate alınarak aşağıdaki değerlendirmeler yapılabilir:

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

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

KAYNAKLAR(REFERENCES)

1. M. Akkurt, Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Takım Tezgahları, Birsan Yayınevi, 23-90, 117-181, Ankara, 1998.
2. N. Tosun, C. Kuru, E. Altıntaş ve E.O. Erdin, Hava ve geleneksel soğutma yöntemi ile frezelemede yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 25(1): 141-146, 2010.
3. N.R. Dhar, N.T. Ahmed, S. Islam, An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, 748-753, 2007.
4. A. Çakır, AA 7075 ve AA 2024 Alüminyum malzemelerin delinmesinde soğutma koşullarının kesme performansına etkisinin araştırılması, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2015.
5. R. Autret, S.Y. Liang, Minimum quantity lubrication in finish hard turning, <http://hardingeus.com/usr/pdf/hardturn/LIANG3.PDF>, 2003
6. E. Yücel, M. Günay, M. Ayyıldız, Ö. Erkan ve F. Kara, (t.y.), Talaşlı imalatta kullanılan kesme sıvılarının insan sağlığına etkileri ve sürdürülebilir kullanımı, 6th International Advanced Technologies Symposium, 16-18 Mayıs 2011, Elazığ.
7. N.R. Dhar, M. Kamruzzaman, M. Ahmed, Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI 4340 steel, Journal of Materials Processing Technology, 172(2): 299–304, 2006.
8. K. Holmes, Minimum quantity lubrication (MQL) is a key technology to lower manufacturing costs for automotive, aerospace, defense and other industries, Manufacturing Business and Technology Forum, Dearborn, MI. 2008.
9. M.K. Gupta, M. Mia, C.I. Pruncu, W. Kapłonek, K. Nadolny, K. Patra, T. Mikolajczyk, D.Y. Pimenov, M. Sarikaya, V.S. Sharma, Parametric optimization and process capability analysis for machining of nickel-based super alloy, The International Journal Advance Manufacturing Technology, 102: 3995–4009, 2019.
10. B.K. Sato, A.R. de Sales, J.C. Lopes, L.E. de AS, H.J. de Mello, P.R. de Aguiar, E.C. Bianchi, Influence of water in the MQL technique in the grinding of steel AISI 4340 using CBN wheels, REM – International Engineering Journal 71(3):391–396, 2018.
11. R.L. Rodriguez, J.C. Lopes, S.D. Mancini, L.E. de Ângelo Sanchez, F.M.F. de Almeida Varasquim, R.S. Volpato, H.J. de Mello, P.R. de Aguiar, E.C. Bianchi, Contribution for minimization the usage of cutting fluids in CFRP grinding, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 103: 487–497, 2019.
12. S. Pervaiz, S. Kannan, H.A. Kishawy, An extensive review of the water consumption and cutting fluid based sustainability concerns in the metal cutting sector, Journal of Cleaner Production, 197: 134–153, 2018.
13. Ç.V. Yıldırım, M. Sarikaya, T. Kıvak, Ş. Şirin, The effect of addition of Hbn nano particles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625, Tribology International, 134:443–456, 2019.
14. K. Venkatesan, A.T. Mathew, S. Devendiran, N.M. Ghazaly, S. Sanjith, R. Raghul, Machinability study and multi-response optimization of cutting force, Surface roughness and toolwear on CNC turned Inconel 617 super alloy using Al₂O₃ Nanofluids in Coconutoil, Procedia Manufacturing, 30:396–403, 2019.
15. R.K. Singh, A.K. Sharma, Bishwajeet, V. Mandal, K. Gaurav, A. Nag, A. Kumar, Influence of graphene-based nanofluid with minimum quantity lubrication on surface roughness and cutting temperature in turning operation, Materials Today: Proceedings, 5(11):24578–24586, 2018.
16. A.K. Sharma, A.K. Tiwari, R.K. Singh, A.R. Dixit, Tribological investigation of TiO₂ nanoparticle based cutting fluid in machining under minimum quantity lubrication (MQL), Materials Today: Proceedings, 3(6):2155–2162, 2016.
17. Park, Kyung-Hee, Gi-Dong Yang, ve Dong Yoon Lee, Tool wear analysis on coated and uncoated carbide tools in inconel machining, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 16 (7): 1639–45, 2015.
18. A. Çakır, S. Yağmur, U. Şeker, Farklı şartlarda uygulanan minimum miktarda soğutma yönteminin AA2024 alüminyum alaşımının tornalanması sürecine olan etkisinin deneysel olarak incelenmesi, 7th International Advanced Technologies Symposium, (IATS'13), 30 Ekim-3 Kasım 2013, İstanbul.

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

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

Alüminyum 7075-T6 Malzemenin Isı Desteği ile İşlenebilirliğinin İncelenmesi

Ümit KARABUĞA^{1*}, Şener KARABULUT², Abdulkadir GÜLLÜ³

¹Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye

²Hacettepe Üniversitesi, Ankara Sanayi Odası 1. OSB Meslek Yüksekokulu, Ankara, Türkiye

³Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Ankara, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 02.12.2021

Kabul: 21.12.2021

Anahtar Kelimeler:

AA7075-T6

Isı destekli işleme

Minimum miktarda yağlama

Yüzey pürüzlülüğü

ÖZET

Yüksek mukavemete sahip alaşımların talaşlı imalatında Termal Destekli İşleme (TAM) yöntemi son yıllarda araştırmalara konu olmaktadır. Geleneksel işleme ile çelişkili görünen bu yöntemde, işlenecek malzemenin dayanımını ve sertliğini azaltarak kesme kuvvetlerini düşürmek, takım aşınmasını azaltmak ve malzemeyi daha kolay işlenebilir hale getirerek ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmek için harici bir ısı kaynağı kullanılmaktadır. Bu çalışmada; yüksek mukavemete sahip AA 7075-T6 alaşımı, sabit kesme derinliğinde, üç farklı kesme hızı, üç farklı ilerleme oranı ve üç farklı soğutma/yağlama yöntemi kullanılarak yüzey frezeleme işlemine tabi tutulmuştur. Malzemede oluşan yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, işleme sonrasında malzemenin yapısı ve işleme sırasındaki gürültü değerleri ölçülmüş ve sonuçları değerlendirilmiştir. Tüm deneylerde en iyi yüzey kalitesine Minimum Miktarla Yağlama (MMY) ile Termal Destekli İşlemenin (TAM) birlikte uygulandığı deneyde (Vc:290 m/dak, Fz:0.2 mm/diş) ulaşıldığı görülmüştür. Kesme hızı 200 m/dak'dan 240 m/dak'a çıktığında yüzey kalitesinde %80'e varan iyileşmeler görülmüştür. MMY kullanmadan yapılan deneylerde, AA 7075 T6 alaşımının ısı altında takıma yapışarak krater oluşturduğu gözlemlenmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde, en düşük takım aşınmasının MMY+TAM deneyinde olduğu görülmüştür. MMY ile yapılan deneylerin, kulaklık kullanımını gerektirecek derecede yüksek gürültü oluşturduğu (86 dB) tespit edilmiştir. Sonuç olarak; yüksek kesme hızlarında, MMY ile TAM'ın birlikte uygulandığı deneylerde yüzey pürüzlülüğünün, diğer deneylere göre düşük olduğu tespit edilmiştir.

Investigation of Machinability of Aluminum 7075-T6 Material with Heat Support

ARTICLE INFO

Received: 02.12.2021

Accepted: 21.12.2021

Keywords:

AA7075-T6

Thermal assisted machining

Minimum quantity

lubrication

Surfaces roughness

ABSTRACT

The Thermal Assisted Machining method in the machining of high-strength alloys has been the subject of research in recent years. In this method, which seems contradictory to conventional machining, an external heat source is used to reduce the strength and hardness of the material to be machined, reduce cutting forces, reduce tool wear, make the material easier to machine and improve surface roughness. In this study, the high strength AA 7075-T6 alloy was face milled at a constant depth of cut, using three different cutting speeds, three different feed rates and three different cooling/lubrication methods. The surface roughness of the material, tool wear, the structure of the material after machining and the noise values during machining were measured and the results were evaluated. In all experiments, it was observed that the best surface quality was achieved in the experiment (Vc:290 m/min, Fz:0.2 mm/tooth) in which Minimum Quantity Lubrication and Thermal Assisted Machining were applied together. As the cutting speed increased from 200 m/min to 240 m/min, improvements in surface quality up to 80% were observed. Experiments without using MQL, it was observed that AA 7075 T6 alloy adhered to the tool under heat and formed a crater. When the SEM images were examined, it was seen that the lowest tool wear occurred in the MQL+TAM test. It has been determined that the experiments with the MQL create a loud noise (86 dB) that requires the use of headphones. At high cutting speeds, it was determined that the surface roughness was lower than the other tests in the experiments where MQL and TAM were applied together.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Farklı fiziksel ve mekanik özelliğe sahip mühendislik malzemelerine duyulan ihtiyaç, bu malzemeler üzerine yapılan çalışmaları da arttırmaktadır. Otomotiv, savunma ve havacılık alanlarında sıkça kullanılan Alüminyum alaşımları için yapılan araştırmalar da benzer şekilde artmaktadır. Çeliğe göre daha düşük dayanım özelliklerine sahip olan alüminyum; ilave alaşım elementleri ile mukavemet değerlerinde ve fiziksel özelliklerinde iyileşmeler göstermektedir. Ayrıca alüminyumun yoğunluğundaki sınırlı değişim ile kullanım alanı artmaktadır. Doğada çokça bulunan alüminyum, yüksek korozyon direncine de sahiptir. Alüminyum alaşımları hafiflikleri, yüksek dayanım ve korozyon direncine sahip olmaları sebebi ile sanayide sıkça tercih edilmektedir [1]. AA 7075 alaşımı, hafifliğinin yanı sıra yüksek mukavemeti sayesinde, havacılık ve otomotiv sanayinde sıklıkla kullanılmakta ve diğer sektörlerde de kullanımı yaygınlaşmaktadır [2].

İşleme şartlarının, alüminyumun işlenebilirliğinde değişkenlikler oluşturduğu bilinmektedir. Bazı alüminyum alaşımlarının işlenmesinde talaş; sürekli talaş biçiminde oluşmakta, oldukça kalın çıkmakta ve kırılması da zor olmaktadır. Ayrıca malzemenin sünek olmasından dolayı takıma yapışması da işleme problemi oluşturmaktadır [3]. AA7075 alüminyum alaşımı, yaşlandırma etkisinin en çok görüldüğü alaşımlardan biridir. Alaşımın en mukavim temperi olan T6'nın şekillendirilebilirliği oldukça kötüdür. [4]. Kesici takımında BUE oluşumu, takımın geometrik formunu ve yüzey pürüzlülüğünü bozarak bu malzemelerden uygun nihai ürünlerin elde edilmesini zorlaştırmaktadır [5]. Alüminyum işlerken takım ömrünü artırmak ve yüzey pürüzlülüğünü düşürmek için farklı soğutucu ve yağlayıcılar kullanılmaktadır. Geleneksel talaş kaldırma yöntemlerinde yaşanan zorlukları aşmak için termal destekli (ısı destekli) imalat yöntemleri de ön plana çıkmaktadır. Termal destekli işleme (TAM), daha uzun takım ömrü için alternatif bir yol olarak değerlendirilmektedir. Bu metot; iş parçasının dayanımını ve sertliğini azaltarak, kesme kuvvetlerini düşürmek ve malzemeyi makinede daha kolay işlenebilir hale getirmek için harici bir kaynaktan ısının kullanılmasına dayanmaktadır [6].

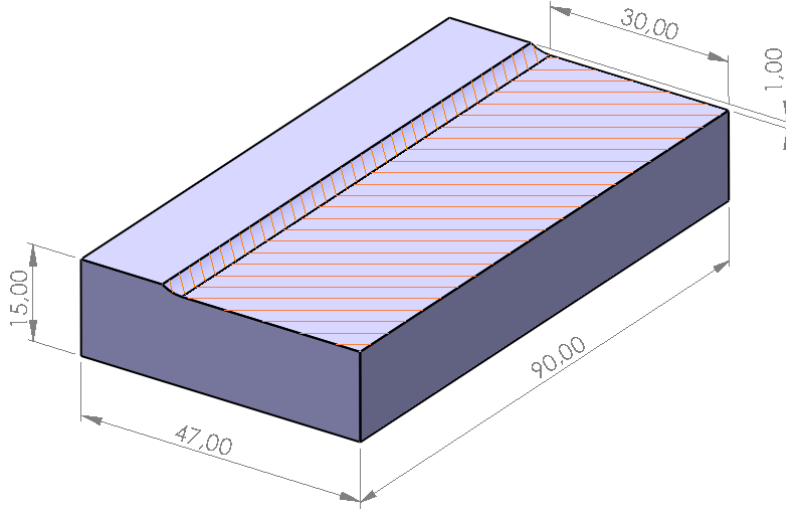
Iqbal ve arkadaşları frezeleme işlemlerinde kesici takım aşınmasına etki eden kriterleri incelemişlerdir. Deneylerde sertliğin takım ömrüne etki eden en önemli parametre olduğunu gözlemlemişlerdir [7]. Şahinoğlu ve arkadaşları, AA7075 alüminyum alaşımı üzerinde yaptıkları tornalama işleminde, iş mili titreşimi ile yüzey pürüzlülüğü arasında bir korelasyon olduğunu ve artan iş mili titreşimi ile yüzey kalitesinin kötüleştiğini tespit etmişlerdir. [8]. Jomaa ve arkadaşları Alüminyum AA7075-T651 alaşımına kuru şartlarda işlemişler, ilerleme oranındaki artışın kesici takımında BUE oluşumunu arttırdığını, kesme hızındaki artışın da BUE oluşumunu azalttığını tespit etmişlerdir [9]. Bankar ve arkadaşları AA 7075 alüminyum alaşımını kuru şartlarda, geleneksel soğutma ile ve MQL soğutma şartlarında frezelemişler, kesme bölgesindeki sıcaklık ile yüzey pürüzlülüğünü incelemişlerdir. MQL ile işlemenin en iyi işleme yöntemi olduğunu gözlemlemişlerdir [10]. Birmingham ve arkadaşları Ti-6Al-4V alaşımını fırında ön ısıtma yaptıktan sonra, CNC Torna tezgâhında oksii-asetilen alev kaynağı ile ısıtarak, termal destekli işlemeye tabi tutmuşlar, ön ısıtma sıcaklığı 150 ve 250 °C olan termal destekli işleme deneylerinde takım ömründe %7'ye kadar iyileşme tespit etmişlerdir [6]. Alkali ve arkadaşları, AISI 316L malzemeyi freze tezgahında geleneksel işleme yöntemi ve oksii-asetilen ısı kaynağı kullanılarak TAM yöntemi ile frezelemişler, TAM ile yapılan deneylerde, kesici takım ömrünün arttığını ve yüzey pürüzlülüğünün azaldığını tespit etmişlerdir. [11].

İncelenen deneysel çalışmalarda, termal destekli işleme (Thermal Assisted Machining, TAM) yöntemi ile yüksek alaşımli çeliklerin işlenmesi üzerine bazı çalışmaların yapıldığı görülmüştür. Bu çalışmalarda MMY ile işlemenin yüzey kalitesini iyileştirdiği, TAM yönteminin, takım ömrüne ve yüzey kalitesine olumlu etki ettiği, ancak anlamlı sonuçlar çıkarmak için, daha fazla deneysel çalışmalara ihtiyaç olduğu görülmüştür. TAM yöntemi ile yüksek mukavemete sahip Alüminyum alaşımlar için termal destekli işleme ile ilgili çalışmaya rastlanmamıştır. Bu çalışma ile AA 7075-T6 malzemenin TAM yöntemi ile işlenmesinde, literatürde oluşan boşluğu doldurmak için bir başlangıç yapılması hedeflenmiştir. Bu çalışmada, AA7075-T6 alaşımı kuru şartlarda, MMY şartlarında ve MMY+TAM şartlarında yapılan frezeleme işleminin, yüzey pürüzlülüğüne ve kesme işlemine etkileri incelenmiştir.

2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Deneysel Parçaları (Test Pieces)

Deneysel çalışmada 90x47x15 mm ölçülerinde, AA 7075-T6 alaşımı iş parçası kullanılmıştır. İş parçası Şekil 1'de gösterilmiştir. Malzemenin kimyasal bileşimi ve fiziksel özellikleri Tablo 1'de [12] verilmiştir.



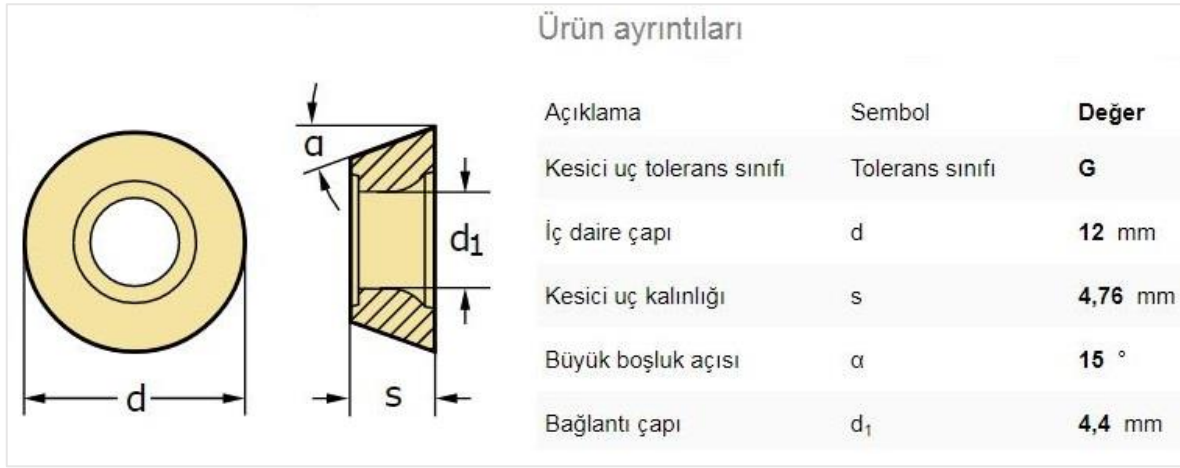
Şekil 1. İş parçasının talaş kaldırılacak bölgesi. (The chipping area of the workpiece.)

Tablo 1. İş parçasının kimyasal ve fiziksel özellikleri. (Chemical and physical properties of the workpiece.)

| Kimyasal Bileşim | | | | | | | | |
|---------------------------------------|----------------------------|---------|-----------|------------------|-----------|----------------------|-------------|----------|
| | Fe | Si | Cu | Mn | Mg | Zn | Cr | Ti |
| Bulunan Bileşim Elementleri, % | 0.19 | 0.08 | 1.33 | 0.18 | 2.32 | 5.69 | 0.21 | 0.021 |
| (Olması Gereken, %) | (0-0.5) | (0-0.4) | (1.2-2.0) | (0-0.3) | (2.1-2.9) | (5.1-6,1) | (0.18-0.28) | (0-0.20) |
| Fiziksel Özellikler | | | | | | | | |
| Çekme Dayanımı (MPa) | Akma Dayanımı (MPa) | | | Uzama (%) | | Sertlik (HBW) | | |
| 443.2 | 315.5 | | | 11.4 | | 170 | | |

2.2. Makine ve Ekipman (Machinery and Equipment)

Deneysel Frontier marka MCV 866 model, Mitsubishi M80 kontrol ünitesi 3 eksen CNC dik işleme tezgâhında yapılmıştır. Kesici takım olarak, Walter RDGT 1204 MWK10 kaplamasız, karbür kesici uç kullanılmıştır [13]. Yüzey frezeleme için, Ø50 mm takım tutucu üzerine bir adet kesici uç takılarak deneyler yapılmış ve her deneyde kesici kenar değiştirilmiştir. Kesici uç şekli ve ölçüleri Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Kullanılan kesici uç ölçüleri. (The used insert sizes.)

MMY ile yapılan deneylerde Viscol Viscut C kesme yağı, Werte STN 40 püskürtme cihazı kullanılmıştır. Termal destekli işleme deneylerinde, rafine bütan gazı ile 75 dakika çalışma süresine ve 1200 °C açık alev sıcaklığına sahip Dremel marka Versaflame 2200 model ısıtma tertibatı kullanılmıştır.

2.3. Deney Parametreleri (Experimental Parameters)

Deneyler üç farklı yöntemle yapılmıştır. Bunlar; Kuru, MMY şartları ve MMY+TAM şartlarıdır. İşleme parametreleri Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. İşleme parametreleri (Machining Parameters)

| Kesme parametresi | Birimi | Seviye 1 | Seviye 2 | Seviye 3 |
|-----------------------|--------|----------|----------|----------|
| Kesme hızı, V_c | m/dak | 200 | 240 | 290 |
| İlerleme oranı, f_z | mm/diş | 0.14 | 0.16 | 0.20 |
| Kesme ortamı | - | Kuru | MMY | MMY+TAM |
| Kesme derinliği, ap | mm | 1 | | |
| Talaş genişliği, ae | mm | 33 | | |

Tablo 3. Deney sıralaması (Experimental order)

| Deney No | Kesme Hızı m/dak | İlerleme Oranı mm/diş |
|----------|------------------|-----------------------|
| 1. | 200 | 0.14 |
| 2. | 200 | 0.16 |
| 3. | 200 | 0.20 |
| 4. | 240 | 0.14 |
| 5. | 240 | 0.16 |
| 6. | 240 | 0.20 |
| 7. | 290 | 0.14 |
| 8. | 290 | 0.16 |
| 9. | 290 | 0.20 |

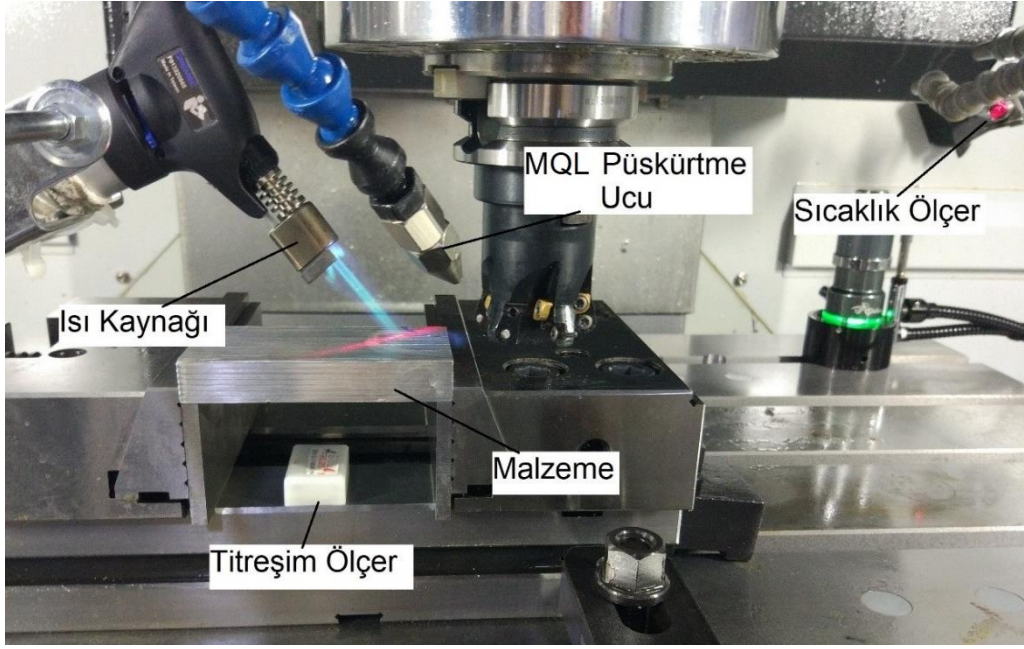
Deney tasarımında, üç farklı soğutma yöntemi (Kuru, MMY ve MMY+TAM), üç farklı kesme hızı (200; 240 ve 290 m/dak), üç farklı ilerleme oranı (0.14; 0.16 ve 0.20 mm/diş) ve 1 mm sabit

kesme derinliği kullanılarak 27 deney yapılmıştır. Tablo 3'deki deneyler her bir soğutma yöntemi için tekrar edilmiştir.

2.4. Deney Düzenegi (Experimental Setup)

Deney malzemelerinin üzerinden, 50 mm çapındaki takım tutucu ile takımın yaklaşık 2/3'ü (33 mm) işleme esnasında iş parçasına temas edecek şekilde, tek pasoda 1 mm talaş kaldırmak üzere deney tasarımı yapılmıştır.

Toplam 27 deneyin ilk 9'u kuru işleme şartlarında, sonraki 9'u MMY yağlama ile son 9'u ise MMY+TAM şartlarında yapılmıştır. Deney düzenegi Resim 1'de gösterilmiştir.



Resim 1. Deney düzenegi (Experimental setup)

MMY+TAM deneylerinde kullanılan ısı kaynağı, malzemeye $\sim 45-50^\circ$ açı ile kesici takımın ~ 15 mm önüne alev püskürtecek şekilde yerleştirilmiştir.

2.5. Ölçme Cihazları ve Yöntemleri (Measuring Devices and Methods)

Deneyler sonrasında numunelerinin yüzey pürüzlülüğü, Mitutoyo SJ-210 marka pürüzlülük ölçüm cihazı ve Mitutoyo sabit referans düzlemi yardımı ile ISO 4287, $\lambda_c=2.5$ 'e göre üç farklı bölgede yapılmış ve kayıt altına alınmıştır. Mikro sertlik ölçümü, Emcotest DuraScan-70 G5 marka cihaz ile HB 10'a göre (2.5 mm bilye çapı ve 62.5 kgf yük) üç noktadan yapılmıştır. Kesici uç hasarlarının incelenmesi için, kesici uçlar JEOL JSM-6060LV Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope-SEM) ile görüntülenmiştir.

Deneyler sonrasında numunelerinin optik görüntüleri, Leica DM 4000M metal mikroskobu ile alınmıştır. Numuneler optik görüntü öncesi sırasıyla 200-1200 arası SiC zımparalar ile ATM Saphir 330 manyetik çift diskli zımparalama cihazında zımparalanmış, sonrasında 6 μ m, 3 μ m ve 1 μ m'lik keçe ve solüsyon kullanılarak ATM Saphir 250 manyetik cihazında parlatılmıştır. MMY+TAM deneyleri esnasında iş parçasının yüzey sıcaklığı, Raytek 2MI 2M cihaz ile ölçülmüş, bilgisayar ve program yardımı ile sıcaklıklar bir saniye aralıklarla kayıt altına alınmıştır. Deneyler esnasında oluşan gürültü, UNI-T UT353 cihaz ile ölçülmüştür.

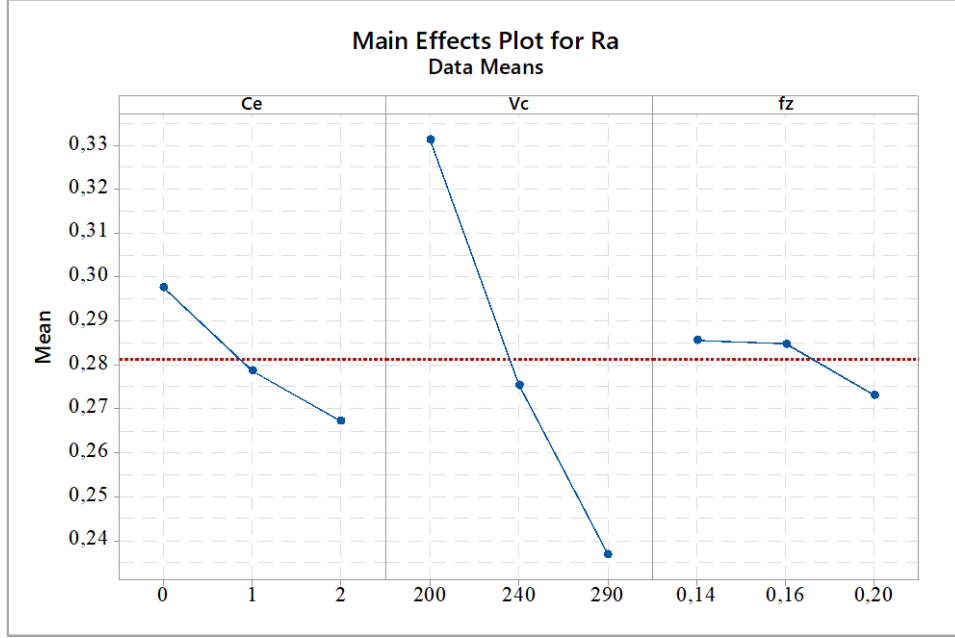
3. DENEY SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ (EXPERIMENTAL RESULTS AND EVALUATION)

Deney planına göre, ilk 9 deney kuru şartlarda ve farklı kesme hızı (V_c) ile İlerleme değerlerinde (fz) yapılmıştır. Sonraki 9-18 arası deneyler ilk 9 deneydeki kesme parametreleri ile Minimum Miktarla Yağlama yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Son 18-27 arası deneyler de ilk 9 deneydeki

kesme parametreleri ile MMY ve Termal Destekli İşleme yöntemleri birlikte kullanılarak yapılmıştır. Her bir deneyde yeni bir kesici uç ya da kesici kenar kullanılmıştır.

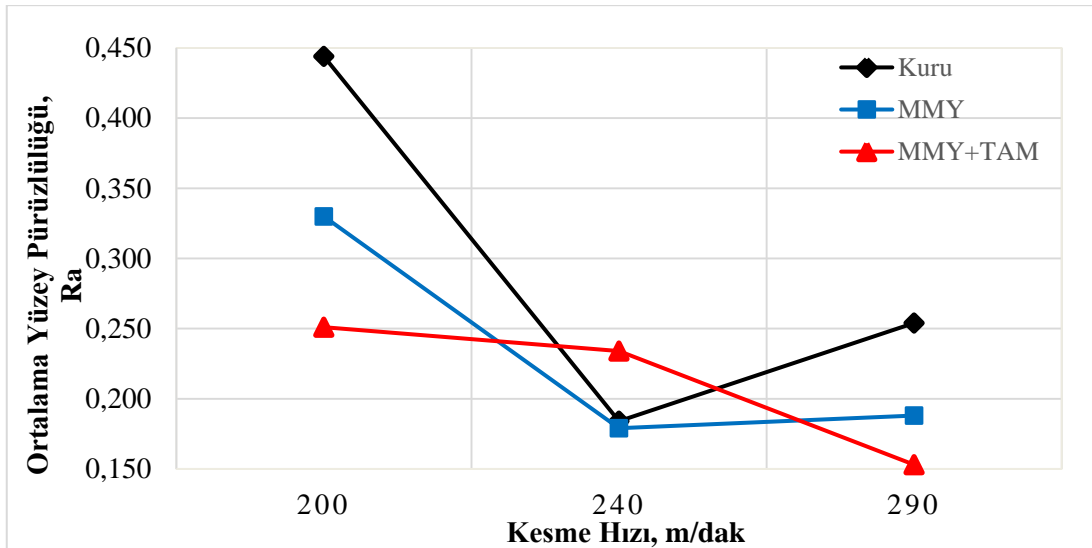
3.1. YüzeY Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Şekil 3'deki grafikte, yüzeY pürüzlülüğüne en çok etki eden değişkenin kesme hızı (Vc) olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Deney girdilerinin yüzeY pürüzlülüğüne etkisi (The effect of experimental inputs on surface roughness)

Deneyler sonucunda ölçülen yüzeY pürüzlülük değerleri Tablo 3'te gösterilmiştir. Sabit ilerleme oranında (0.2 mm/diş), kesme hızı ile ortalama yüzeY pürüzlülüğü arasındaki ilişki Şekil 4'te görülmektedir.



Şekil 4. Kesme hızının yüzeY pürüzlülüğüne etkisi (The effect of cutting speed on surface roughness)

Tablo 3. Yüzey pürüzlülük değerleri (Surface roughness data)

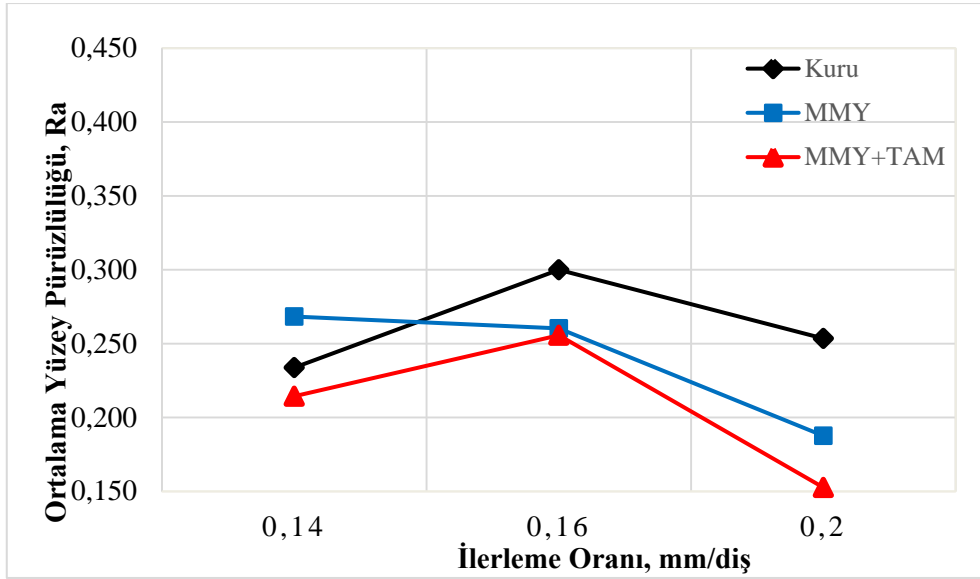
| İşleme şartı | Kesme hızı, V_c | Diş başı ilerleme, f_z | Ort. pürüzlülük, R_a |
|--------------|-------------------|--------------------------|------------------------|
| Kuru | 200 | 0.14 | 0.309 |
| Kuru | 200 | 0.16 | 0.344 |
| Kuru | 200 | 0.2 | 0.444 |
| Kuru | 240 | 0.14 | 0.164 |
| Kuru | 240 | 0.16 | 0.459 |
| Kuru | 240 | 0.2 | 0.184 |
| Kuru | 290 | 0.14 | 0.234 |
| Kuru | 290 | 0.16 | 0.300 |
| Kuru | 290 | 0.2 | 0.254 |
| MMY | 200 | 0.14 | 0.264 |
| MMY | 200 | 0.16 | 0.282 |
| MMY | 200 | 0.2 | 0.330 |
| MMY | 240 | 0.14 | 0.273 |
| MMY | 240 | 0.16 | 0.362 |
| MMY | 240 | 0.2 | 0.179 |
| MMY | 290 | 0.14 | 0.268 |
| MMY | 290 | 0.16 | 0.260 |
| MMY | 290 | 0.2 | 0.188 |
| MMY+TAM | 200 | 0.14 | 0.383 |
| MMY+TAM | 200 | 0.16 | 0.368 |
| MMY+TAM | 200 | 0.2 | 0.251 |
| MMY+TAM | 240 | 0.14 | 0.218 |
| MMY+TAM | 240 | 0.16 | 0.236 |
| MMY+TAM | 240 | 0.2 | 0.234 |
| MMY+TAM | 290 | 0.14 | 0.214 |
| MMY+TAM | 290 | 0.16 | 0.256 |
| MMY+TAM | 290 | 0.2 | 0.153 |

Grafik incelendiğinde, kesme hızının (V_c) 200'den 240'a çıkması ile tüm soğutma yöntemlerinde ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) azalmıştır. Kesme hızının 240'tan 290'a çıktığında ise yüzey pürüzlülüğünde; kuru ve MMY şartlarında kısmi artışlar varken, MMY+TAM yönteminde azalma görülmüştür.

Sonuçlar incelendiğinde, artan kesme hızlarının kesmeyi kolaylaştırıp, titreşimi azaltarak yüzey pürüzlülüğüne olumlu etki ettiği [14] değerlendirilmektedir. Soğutma yöntemleri incelendiğinde, özellikle yüksek kesme hızlarında (240-290 m/dak) Minimum Miktarda Yağlama ile Termal Destekli İşlemenin birlikte uygulandığı deneylerde yüzey pürüzlülüğü diğer deneylere göre düşük çıkmıştır. Sabit kesme hızında (290 m/dak), ilerleme oranı ile ortalama yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki Şekil 5'de görülmektedir.

İlerlemenin yüzey pürüzlülüğüne etkisi, kesme hızınının kadar anlamlı sonuçlar vermemiştir. Deneylerde kullanılan kesici uç ile, üretici firmanın tavsiye ettiği 0.14 mm/diş ilerleme oranında iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. İlerlemenin 0.16 mm/diş olduğu deneylerde en kötü yüzey kalitesi elde edilirken, 0.20 mm/diş ilerleme oranında ise kısmen iyi yüzey elde edilmiştir. Yüzey kalitesi ilerleme oranı arttıkça kötüleşir [15]. Burada da bu durum gerçekleşmiştir. Ancak 0.20 mm/diş de 0.16 mm/diş'e göre kısmi iyileşme oluşmasının çıkan talaşın malzeme yüzeyine sıvanması sebebiyle oluştuğu öngörülmektedir.

Kuru işleme şartlarında en iyi yüzey kalitesine 0.14 mm/diş ilerlemede ulaşılırken, MMY ve MMY+TAM deneylerinde 0.20 mm/diş ilerlemede en iyi yüzey kalitesi elde edilmiştir. En düşük yüzey pürüzlülüğüne ise MMY ile TAM'ın birlikte uygulandığı deneylerde ulaşıldığı görülmüştür. Literatürde de MMY ile yapılan deneylerin yüzey pürüzlülüğünü ciddi oranda iyileştirdiği belirtilmiştir [16]. MMY+TAM deneylerinde ısıtma ile malzeme mukavemeti azalmış, yağlama ile de malzemenin kesici takıma yapışması önlenerek yüzey pürüzlülüğü düşmüştür [17].

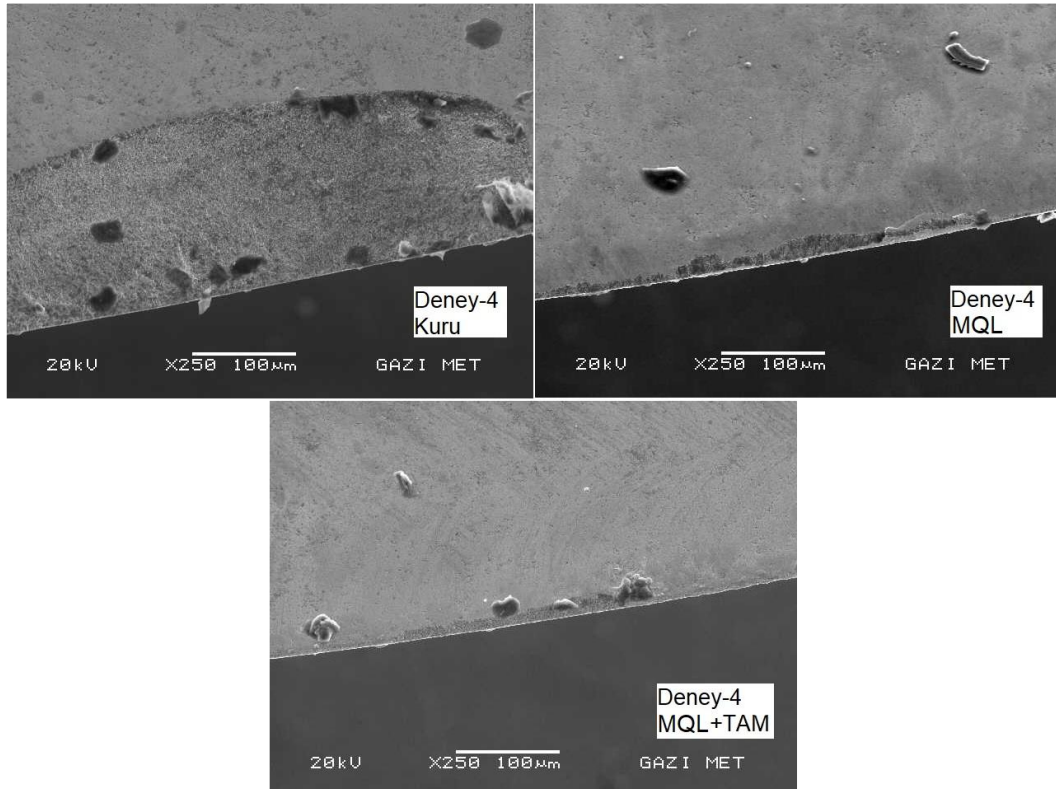


Şekil 5. İlerleme oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisi (The effect of feed rate on surface roughness)

Tüm deneyler incelendiğinde MMY ile TAM İşleme şartlarının birlikte uygulandığı deneylerde, diğer iki yöntemle göre (Kuru ve MMY) daha iyi yüzey pürüzlülük değerleri elde edilmiştir. Bunda kesme kuvvetlerindeki azalmanın ve buna bağlı olarak düşük titreşimin etkisi olduğu düşünülmektedir. Tüm deneylerde, en düşük yüzey pürüzlülük değerine MMY+TAM'ın birlikte uygulandığı deneyde ($V_c=290$ m/dak, $F_z=0.2$ mm/diş) ulaşılmıştır.

3.2. Kesici Takım ve Malzeme Yapısı (Cutting Tool and Material Structure)

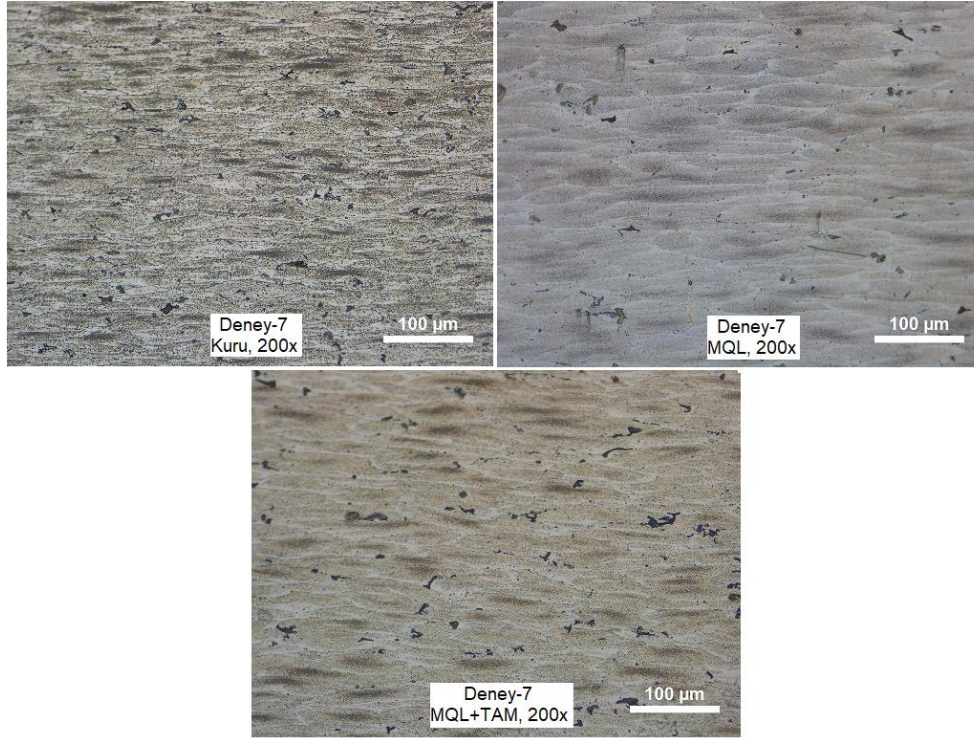
İşleme şartlarının (Kuru, MMY, MMY+TAM) kesici takım aşınmasına etkilerini görmek için her işleme şartında aynı deneye ait (aynı kesme parametrelerinin kullanıldığı) kesici uçların, Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Mikroskopu-SEM) ile görüntüleri çekilmiştir.



Resim 2. 4 numaralı deneye ait kesici uçların SEM görüntüleri (SEM images of cutting insert for 4.th experiment)

Resim 2’de dört numaralı deneylerde kullanılan kesici uçların SEM görüntülerine bakıldığında, kuru işleme şartlarında kullanılan kesici uçta 0.6 mm’den büyük bir krater aşınma gözlenmektedir. Alüminyum alaşımlarının işlenmesinde, talaşın sürekli oluşu, kolay kırılmaması ve sünekliğinden dolayı takıma yapışarak kesmeyi zorlaştırdığı bilinen bir durumdur. Yağlayıcı kullanmadan yapılan deneylerde, alüminyumun ısı altında takıma yapışarak krater oluşturduğu yapılan deneylerde de görülmüştür.

MMY ve MMY+TAM deneylerinde, kesici takımın benzer şekilde serbest yüzey aşınmasına maruz kaldığı görülmektedir. Fakat bu aşınmaların kuru işleme şartlarına göre daha düşük (0.2-0.3 mm) olduğu görülmüştür. Malzemeye uygulanan ön ısıtmanın, mukavemeti azaltarak kesme kuvvetlerini düşürmesi, takım aşınmasını azaltmıştır. Üstelik bu aşınma türü takım ömrü açısından tercih edilen bir aşınma türüdür.



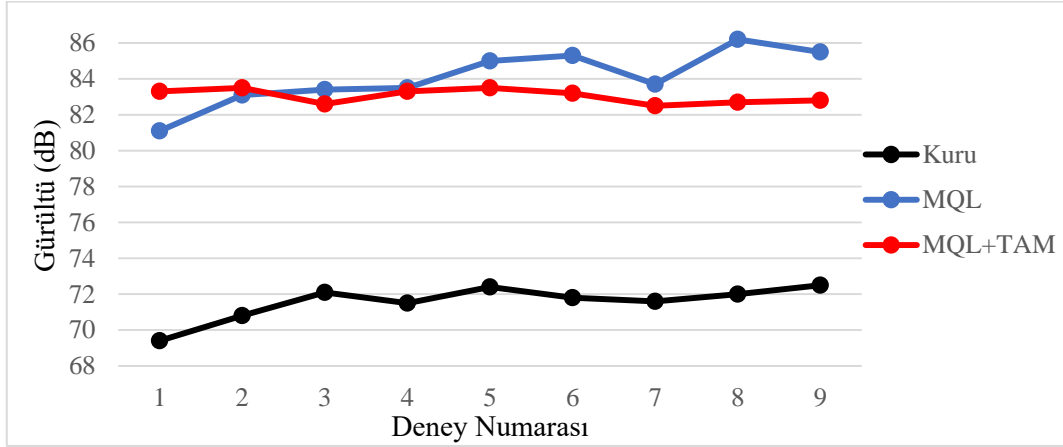
Resim 3. 7 numaralı deneye ait malzemelerin optik görüntüleri (Optical images of the materials of experiment number 7)

Aynı kesme parametrelerinde, farklı soğutma yöntemleri uygulanan 7 numaralı deneylere ait optik görüntüler Resim 3’te verilmiştir.

Optik görüntülere bakıldığında, kuru şartlarda ve MMY+TAM’ın birlikte uygulandığı şartlarda, dolayısıyla kesici takım ile malzeme arasında yüksek ısının olduğu deneylerde (Kuru ve MMY+TAM) malzemenin yapısındaki boşlukların arttığı görülmüştür. Boşlukların artması, malzemenin daha fazla enerji absorbe etmesinden kaynaklanmaktadır. Enerjinin artmasıyla tane sınırlarındaki dislokasyonlar artmakta ve buna bağlı olarak kırılma yüzeylerinde daha büyük boşluklar oluşmaktadır [18].

3.3. Gürültü (Noise)

Deneyler yapılırken meydana gelen gürültü değerleri kayıt altına alınmıştır. Gürültü değerleri Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Deneilerde oluşan maksimum gürültü değerleri (Maximum noise values in the experiments)

Şekil 6’da da görüldüğü gibi, Minimum Miktarla Yağlama (MMY) ile yapılan deneylerde kulaklık kullanımını gerektirecek derecede yüksek gürültü oluşmaktadır. Deneilerde MMY’in gürültü seviyesini 69 dB’den 86 dB’ye kadar çıkarttığı gözlemlenmiştir. MMY ile yapılan bu deneilerdeki gürültü değerleri, kulaklık kullanımını gerektirecek seviyededir.

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)



Bu çalışmada AA7075-T6 Alüminyum alaşımı, sabit kesme derinliğinde, 3’er farklı kesme hızı ve ilerleme oranında CNC Freze tezgahında işlenmiştir. Farklı parametrelerde yapılan tüm deneyler hem kuru şartlar altında, hem MMY soğutma yöntemi ile hem de MMY+TAM şartlarında tekrarlanmıştır. Bu deneyler sonucunda, malzemede oluşan yüzey pürüzlülüğü, takım aşınması, işleme sonrasında malzemenin yapısı ve işleme sırasındaki gürültü değerleri gözlemlenmiştir. Değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır.

- Kesme hızı 200 m/dak’dan 240 m/dak’a çıktığında yüzey kalitesinde %80’e varan iyileşmeler görülmüş, 240 m/dak’dan 290 m/dak’a çıktığında ise yüzey kalitesinde daha düşük iyileşmeler olduğu görülmüştür.
- İlerleme oranının yüzey pürüzlülüğüne etkisi, kesme hızınının kadar anlamlı olmadığı görülmüştür.
- Yüksek kesme hızlarında (240-290 m/dak) Minimum Miktarla Yağlama ile Termal Destekli İşlemenin birlikte uygulandığı deneilerde elde edilen yüzey pürüzlülüğünün diğer deneilere göre düşük çıktığı tespit edilmiştir.
- Tüm deneilerde en iyi yüzey kalitesine MMY ile TAM’ın birlikte uygulandığı 9. deneyde ($V_c=290$ m/dak, $F_z=0.2$ mm/diş), ($R_a=0.153$) ulaşılmıştır.
- Kuru şartlardaki deneilerde, alüminyum alaşımının ısı altında takıma yapışarak (BUE) krater oluşturduğu görülmüştür.
- SEM görüntüleri incelendiğinde, en düşük takım aşınmasının MMY+TAM deneyinde olduğu görülmüştür.
- MMY ile yapılan deneilerin kulaklık kullanımını gerektirecek derecede (86 dB) gürültü oluşturduğu tespit edilmiştir. MMY sisteminde yağın basınç ile püskürtülmesi gürültü seviyesini arttırmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. B. Özakın, Alüminyum alaşımlarının farklı ortamlardaki geirli medli korozyon davranışının incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum, Türkiye 2014.
2. I. Kaya, Al 7075 alaşımının şekillenme ve ısı işleme özelliklerinin iyileştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2005.
3. M. Erdoğan, Demir Dışı Alaşımlar, Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, Cilt-1, Nobel Yayınevi, Ankara, 2000.
4. S. Kılıç, İ. Kacar, Farklı ısı işlem uygulanmış 7075 alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilme sınır diyagramının deneysel olarak belirlenmesi, Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 8(1):512–520, 2019.
5. S. Açar, AA 7075-T6 Alüminyum alaşımının minimum miktarda yağlama yöntemiyle talaşlı işlenebilirliğinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2014.
6. M. J. Bermingham, S. Palanisamy, M. S. Dargusch, Understanding the tool wear mechanism during thermally assisted machining Ti-6Al-4V, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 62:76–87, 2012.
7. A. Iqbal, K. A. Al-Ghamdi, G. Hussain, Effects of tool life criterion on sustainability of milling, Journal of Cleaner Production, 139:1105–1117, 2016.
8. A. Şahinoğlu, Ş. Karabulut, A. Güllü, Study on spindle vibration and surface finish in turning of al 7075, Solid State Phenomena., 261:321–327, 2017.
9. W. Jomaa, V. Songmene, P. Bocher, Surface finish and residual stresses induced by orthogonal dry machining of AA7075-T651, Materials (Basel), 7:1603–1624, 2014.
10. N. D. Bankar, P. G. D. Shelke, P. M. D. Irfan, Experimental investigation of Aluminum 7075 using dry , wet and MQL condition, Int. Res. J. Eng. Technol., 6(10):957–962, 2019.
11. A. U. Alkali, T. L. Ginta, A. M. Abdulrani, H. Fawad, M. Danish, Study on the machinability of 316L stainless steel using flame assisted machining, ARPN J. Eng. Appl. Sci., 11(14):8743–8749, 2016.
12. Seykoç Alüminyum, AA7075, <https://www.seykoc.com.tr/icerik/7075?dil=tr>, 27.11.2021.
13. Walter Tool, <https://www.walter-tools.com/en-gb/search/pages/default.aspx/product/rdgt1204m0-g88-wk10>, 27.11.2021.
14. İ. Tekait, Takım tezgâhlarındaki kesici takım titreşiminin yüzey pürüzlülüğüne etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2008.
15. M. Hüseyinoğlu, 7075 Alüminyum Alaşımının Freze İle İşlenmesinde Minimum Soğutma Sıvısı Kullanmanın Performans Karakteristiklerine Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 2008.
16. E. Çelik, Ş. Şirin, T. Kıvak, AISI 2507 süper dubleks paslanmaz çeliğinin hibrit soğutma/yağlama yöntemleri altında tornalanmasında yüzey kalitesinin incelenmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9(2):929–942, 2021.
17. Y. S. Liao, H. M. Lin, Y. C. Chen, Feasibility study of the minimum quantity lubrication in high-speed end milling of NAK80 hardened steel by coated carbide tool, Int. J. Mach. Tools Manuf., 47(11):1667–1676, 2007.
18. M. Hüseyin Çetin, Ş. Korkmaz, M. Emin Çetin, A. E. Belrzaeg, AA7075-T6 Alaşımının farklı sıcaklıklardaki çekme davranışının deneysel ve nümerik yöntemler ile incelenmesi, Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 6(4):902–915, 2018.

Orta ve İleri Düzey Robotik Kodlama Eğitimleri için İnternet Odaklı Sensör Kartı Tasarım ve İmalatı

Samed KAYA¹ , Gürcan SAMTAŞ^{2*} 

¹Düzce Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, Türkiye

²Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Düzce, Türkiye

MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 11.11.2021

Kabul: 26.12.2021

Anahtar Kelimeler:

Nesnelerin interneti

IoT

Robotik kodlama

Sensör modülü

ÖZET

Son dönemlerde dünyada teknolojiye dijital dönüşüm çalışmaları başlatılmıştır. Bu konudaki literatür incelendiğinde nesnelerin interneti konusu eğitim alanında değil, daha çok endüstriyel alanlarda kullanıldığı görülmektedir. Öğrenciler erken yaşlarda elektronik ve yazılım konusunda eğitim alırlarsa, başta geleceğin teknolojisi olan otomasyon olmak üzere savunma sanayi, uzay ve havacılık teknolojileri gibi birçok alanda farklı projeler geliştirebileceklerdir. Bu çalışmada, dijital dönüşüm çalışmalarından biri olan robotik kodlama eğitimleri, bir diğer üst seviye olan “Nesnelerin İnterneti” konusuyla birleştiren, gerekli olan tüm sensör ve devre elemanları, piyasadaki ihtiyaca göre tespit edilmiş ve literatürden farklı olarak; modüler, kolay ara yüzü, çocukların motor gelişimine katkı sağlayabilecek bütün sensörleri barındıran bir sensör kartı tasarlanmış ve kasasıyla beraber imalatı yapılmıştır. Bu sayede imal edilen kart ile, otomasyon ve haberleşme konularının temel olarak öğrenilmesi hedeflenmektedir. Tasarlanan cihaz, çift çekirdekli ve dahili kablosuz bağlantıları bulunan mikroişlemci ile gerekli sensörleri bulunduran elektronik bir sensör kartıdır. Hem kendi üzerinde, hem de internete bağlanabilen herhangi bir cihazla bağlantı kurarak, üzerine yazılmış olan algoritmayı çalıştırabilmektedir. Çalışmada ilk olarak elektronik kart imalatı, daha sonra dış kabuk imalatı ve son olarak test yazılımı yapılarak kart sisteminin üretimi tamamlanmıştır.

Internet-Oriented Sensor Card Design and Manufacture for Intermediate and Advanced Robotics Coding Trainings

ARTICLE INFO

Received: 11.11.2021

Accepted: 26.12.2021

Keywords:

Internet Of Things

IoT

Robotic coding

Sensor module

ABSTRACT

Recently, digital transformation studies in technology have been started in the world. When the literature on this subject is examined, it is seen that the subject of the Internet of Things is not used in the field of education, but mostly in industrial fields. If students receive education on electronics and software at an early age, they will be able to develop different projects in many fields such as automation, which is the technology of the future, as well as defense industry, space and aviation technologies. In this study, digital conversion, which is one of the works of robotic coding training, another top-level “Internet of objects” topic, incorporating all that is required for the sensor and circuit components, unlike the literature were identified and according to the needs of the market, modular, easy interface, children with a card that can contribute to the development of the motor sensor is designed and manufacture with all the sensors have been made to the chassis. In this way, it is aimed to learn automation and communication issues mainly with the manufactured card. The designed device is an electronic sensor board that has the necessary sensors with a dual-core microprocessor and built-in wireless connections. It is able to run the algorithm written on it, connecting to any device that can be connected both on its own and on the Internet. In the study, first, electronic card manufacturing, then outer shell manufacturing and finally the production of the card system by making test software was completed.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nesnelerin İnterneti (IoT); nesnelerin, benzersiz kimlikleri ile kendi aralarında oluşturduğu, dünya çapında bir ağ ve bu ağdaki nesnelerin belirli bir protokol ile birbirleriyle iletişim kurarak bağlantılı olmaları olarak tanımlanır. Ayrıca bu kavramı kabaca; çeşitli haberleşme protokolleri sayesinde birbirleri ile haberleşen ve birbirine bağlanarak, bilgi paylaşarak akıllı bir ağ oluşturmuş cihazlar sistemi olarak da tanımlamak mümkündür [1]. Nesnelerin interneti konusu, pandemi dönemiyle beraber daha çok kullanılmaya başlamıştır. Samarraei ve Özyer yaptıkları çalışmada nesnelerin internetini kullanarak bir akıllı ev projesi gerçekleştirmiştir. Bu proje ile evde bulunan tüm elektronik cihazlar, internet bağlantısı kullanarak telefon uygulaması üzerinden kontrol edilebilir hale getirilmiştir [2]. Ercan ve Kutay yaptıkları çalışmada nesnelerin internetinin endüstri ortamlarında kullanımını araştırmıştır. Ulaştıkları sonuçlarda; nesnelerin interneti ile kontrol edilen makinalarda insan hatasını en aza indirerek gerçek zamanlı bilgi aktarımını sorunsuz şekilde yaptığı gözlemlenmiştir [3]. Nesnelerin interneti konusunu ülkemizde son zamanlarda daha popüler hale gelmiştir. Günümüzde; üretim, haberleşme, savunma ve diğer tüm alanlarda bu konu, teknolojik olarak gelişim halindedir. Görkem ve Bozuklu bu konuyu ele alarak, nesnelerin internetinin ülkemizdeki mevcut durumu üzerine bir araştırma çalışma yapmışlardır. Yaptıkları çalışma sonucunda nesnelerin interneti konusu ülkemizde daha çok, şehirlerin enerji yönetim sistemlerinin, alışveriş imkanlarının, lojistiğin ve endüstriyel kontrolün akıllı hale gelmesiyle yol aldığını ifade etmişlerdir [4]. Yapılan literatür araştırmalarında, şimdiye kadar yapılan çalışmalarda her iki konuyu da birleştiren bir çalışma bulunmamaktadır. Sadece robotik kodlama eğitimi için yapılmış olan ürünler ve benzer ürünlerin öğrenciler üzerindeki etkilerini araştıran çalışmalar bulunmaktadır [5-7]. Ayrıca bir rekabet ortamında yeni teknolojiler ile öğrencileri tanıştırmayı hedefleyen birçok yarışma yapılmaya başlanmıştır [8, 9]. Dolayısıyla literatürdeki çalışmalara bakıldığında, şimdiye kadar yapılan çalışmalarda robotik kodlama eğitimi ve nesnelerin internetini birleştiren bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sonuçlara ve mikroişlemciler hakkında yapılan çalışmalara dayanarak internet bağlantısı destekleyen mikroişlemciler ile bir sensör kartı tasarımı ve imalatı yapılacaktır [10, 11]. Bu çalışmalardan çıkan sonuçlarda, bu tür cihazların öğrenme ve öğretme konusunda pozitif yönde bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir.

Literatür incelenmiş olup, piyasada kullanılan ürünlerden HaloCode isimli kartın ESP32 işlemcisinin, giriş çıkış pinlerinin ve basit uygulama kitapçığının olması gibi temel benzerlikleri olduğu görülmüştür [14]. Ancak proje sonucunda imalatı yapılan kartın, çocuklar için daha ilgi çekici ve dayanıklı bir tasarıma sahip olması, çok daha fazla giriş çıkış pininin ve uyumlu sensörünün olması, üzerinde röle, encoder, potansiyometre, motor sürücü entegresi, LCD ekran, butonlar, joystick ve LDR gibi sensörlerin dahili olması sebebiyle harici ekipmana ihtiyaç duymadan kullanılması projeyi öne çıkartmıştır. Bir diğer benzer ürün ise; başta basit bir robotik kodlama kartı olarak tasarlanan ancak küçük bir Wi-Fi işlemcisi eklenip iot kiti haline getirilen TinyLab IOT Kit isimli üründür [15]. Bu üründe işlemci olarak 32 bit 160 Mhz hızıyla çalışan iot eğitim kitine nazaran, 8 bit ve 20 Mhz çalışma hızına sahip işlemci kullanılmıştır. Bu nedenle büyük boyutlu projelerde yetersiz kalmaktadır. Harici takılabilen bir sensör bulundurmayan bu ürün ile yapılabilecek uygulamaların sayısı üzerinde bulunan birkaç adet sensörle sınırlı kalmıştır. Projedeki kart ise Wi-Fi, bluetooth, SPI, UART, I2C protokolleri sayesinde benzer amaçlar için üretilmiş hemen bütün elektronik cihazlarla haberleşmesinin yanı sıra, işlemci pinlerine paralel bağlı soketler kullanılarak piyasada bulunan çoğu sensör kartı da bu çalışmadaki deney seti ile kullanılabilir. Diğer taraftan literatür incelendiğinde nesnelerin interneti konusunu kullanan benzer ürünlerin akademik bir çalışma olarak değil, bir pazarlama ürünü olarak üretildiği ve piyasaya sunulduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmanın en büyük farklarından birisi üzerinde dahili Wi-Fi ve bluetooth bağlantılarının yanı sıra birçok sensörü bulundurması ile birlikte, akademik ve açık kaynaklı bir çalışma olduğu için üzerine sürekli geliştirmeler yapılabilir olmasıdır. Bu farklardan dolayı bu çalışma özgün bir çalışmadır.

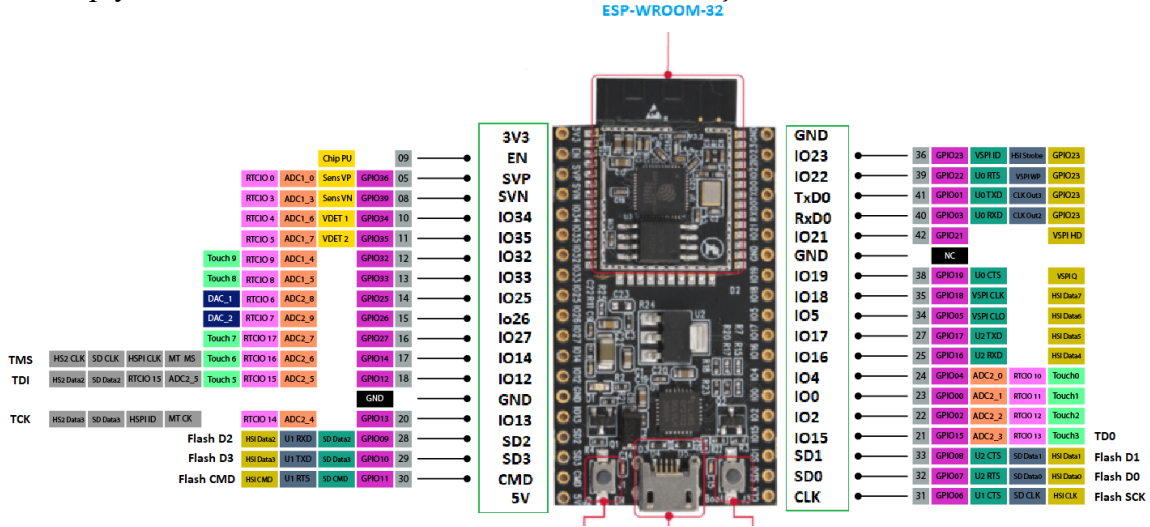
Bu çalışmada, dijital dönüşüm çalışmalarından biri olan robotik kodlama eğitimleri, bir diğer üst seviye olan “Nesnelerin İnterneti” konusuyla birleştiren, gerekli olan tüm sensör ve devre elemanları, piyasadaki ihtiyaca göre tespit edilmiş, bütün sensörler barındıran bir sensör kartı

tasarlanmış ve imalatı yapılmıştır. Dolayısıyla bu çalışma, yeni nesil eğitimlerin temelini oluşturmaktadır. Bu geliştirilen kart ile uzaktan robotik kodlama eğitimleri yapılabilecektir. Erken yaşta bu tür eğitimleri alıp, temel otomasyon projeleri ile çalışan öğrenciler, sonraki zamanlarda kendine daha da büyük fikirler edinerek ileri teknoloji ürünleri geliştirebileceklerdir.

2. ELEKTRONİK KART VE DIŞ KABUK TASARIMI (ELECTRONIC BOARD AND SHELL DESIGN)

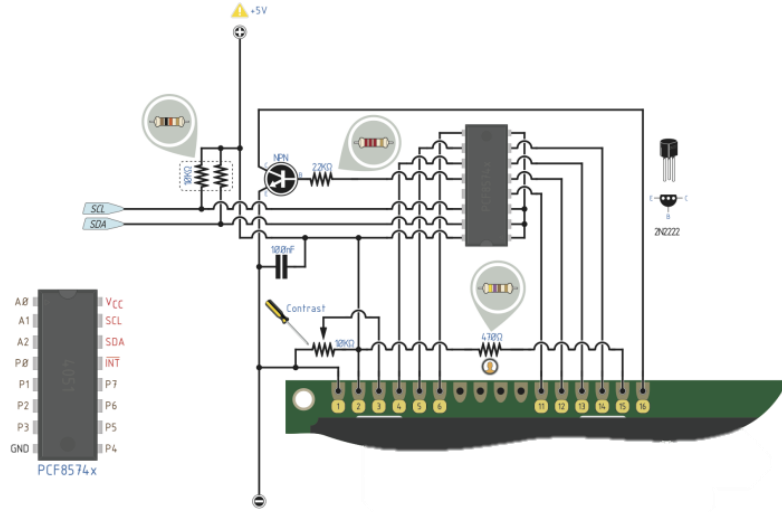
2.1. Elektronik Kart Tasarımı (Electronic Card Design)

Çalışmada kart tasarımı Autodesk Eagle programında yapılmıştır. Bu programın seçilme nedeni öğrenciler için ücretsiz kullanım lisansı vermesinden dolayıdır. Eagle programında Sparkfun markasının dijital kütüphanelerinde bulunan malzemeler baz alınmıştır. Tasarlanan kart, imalatı kolay olması için 2 katmanlı, 1.6 mm kalınlığında, bakır kalınlığı en az 1 Oz değerinde ve yüzler arası geçişi sağlayan delikler ise en az 0.3 mm çapında seçilmiştir. Çalışmanın tasarım aşamasında, ilk olarak kullanılacak olan elektronik komponentler için araştırma yapılmıştır. İşlemci seçiminde, dahili kablosuz internet bağlantısı ve bluetooth bağlantısı olması ana kriter olmuştur. Buna dayanarak yapılan araştırmalar sonucunda Espressif marka, ESP32 model mikroişlemci kullanılmıştır (Şekil 1). İşlemci hakkında gerekli teknik veriler incelendikten sonra mikroişlemci ile kullanıma uygun olan ve piyasada en çok kullanılan sensörler için araştırma yapılmıştır. Bunun için öncelikle piyasada bulunan benzer devre kartları incelenmiştir.



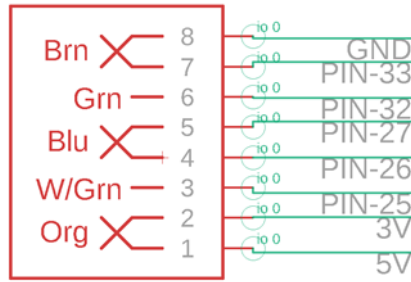
Şekil 1. ESP32 mikroişlemcisinin pin çıkışları (Pinouts of the ESP32 microprocessor) [12]

Tasarlanan kart boyutlarının ortalama bir tablet bilgisayar boyutlarında olmasından dolayı sadece en önemli olan sensörler kullanmaya karar verilmiştir. Robotik kodlamada temel olarak dijital ve analog giriş çıkışlar kullanıldığı için öncelik olarak bu terimleri öğretecek olan buton, iki eksenli ve butonlu joystick, encoder (adım sayıcı), LDR (ışık şiddeti sensörü), buzzer ve 5V röle kullanılmıştır. Ayrıca kullanıcı geri bildirim vermek için bir adet 20x4 karakterli kristalize LCD ekran kullanılmıştır. Standart koşullarda bu ekranı mikroişlemci ile haberleştirmek için yüksek sayıda iletişim pinine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak tasarlanan kartta boş iletişim pinlerine ihtiyaç olduğundan LCD ekranı kullanmak için I2C protokolü ile iletişim sağlayabilen “PCF8574T” isimli bir ara devre entegrasyonu kullanılmıştır (Şekil 2). Bu sayede boş pin sayısı korunmuştur.



Şekil 2. PCF8574T entegre şematik görüntüsü (PCF8574T integrated schematic view) [13]

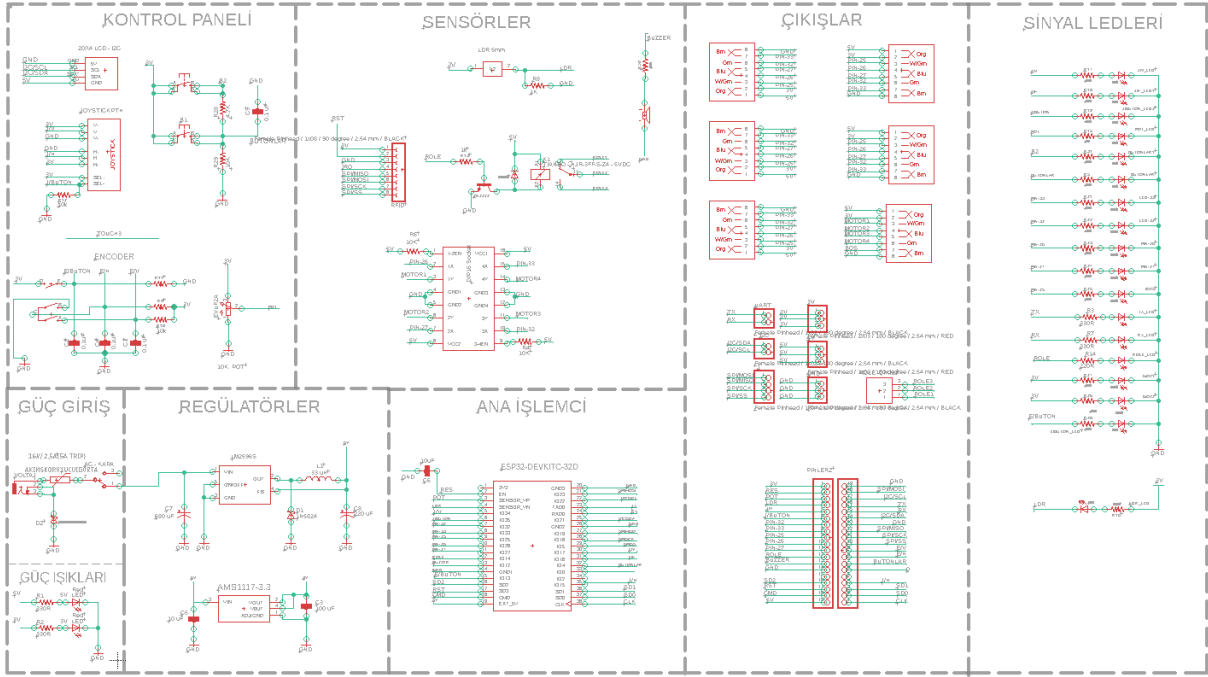
Kullanılan sensörlerin sinyal çıkışlarını alabilmek için pinlere paralel olarak RJ45 soketler kullanılmıştır (Şekil 3). Sekiz adet pinden beş tanesi boşta kullanılan sinyal pinleri için ayrılmıştır. Kalan pinler ise topraklama ve güç pinleri olarak ayrılmıştır. Bu sayede farklı kartlarla sorunsuz şekilde haberleşme yapılması sağlanmıştır.



Şekil 3. RJ45 Soket pin çıkışlarının şematik görüntüsü (Schematic view of RJ45 Socket pinouts)

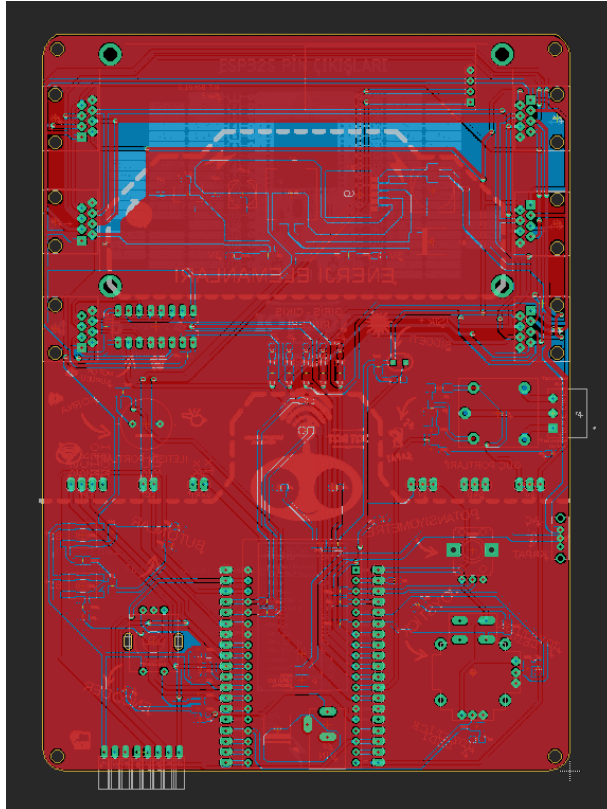
Şekil 3’de, Brn (Kahverengi), Grn (Yeşil), Blu (Mavi), W/Grn (Beyaz/Yeşil) ve Org (Turuncu) renkleri ifade etmektedir. Kartın piyasadaki tüm sensörlerle uyumlu şekilde olması için ‘pin header’ adında geçen soketler ve jumper kablolar ile bağlantı kurulabilecek şekilde güç ve iletişim portları yapılmıştır. İletişim protokolü olarak ESP32 mikroişlemcisinin desteklediği SPI, I2C ve UART protokolleri bulunmaktadır. Bu portlara kartın ortasında yer verilmiştir.

Kullanılacak sensörleri ve yapılacak olan tasarım üzerine yapılan araştırmalardan sonra şematik oluşturma çalışmalarına başlanmıştır. Şematik oluştururken, güç ve sinyal pinlerinin doğru şekilde bağlanmasına özellikle dikkat edilmiştir. Öncelikle sistemi besleyen voltaj girişi ve devreyi koruyan sigorta, diyot gibi komponentlerin bağlantıları belirlenmiştir. Ardından mikroişlemcinin şematik görüntüsü eklenerek sinyal çıkışları ve işlemci güç pinlerinin bağlantıları yapılmıştır. Sistemin bu şekilde sorunsuz çalışabileceğine karar verildikten sonra daha önceden belirlenen sensörlerin gerekli kütüphane dosyaları çalışmaya eklenerek bağlantıları yapılmıştır (Şekil 4).



Şekil 4. Tüm devrenin şematik bağlantısı (Schematic connection of the whole circuit)

Şematik çalışma planı tamamlandıktan sonra sıra elektronik komponentlerin kartta konumlandırılmasına ve bakır yollarının çizilmesine gelmiştir. Öncelikle kabataslak olarak tüm komponentler bir çizim içerisinde toplanmıştır. Bu sayede kartı tasarlamak için gerekli olan dış boyutlar 175x125 mm boyutlarında olmuştur (Şekil 5). Üretim maliyetini ve zamanını düşürmek için standart imalat kurallarına göre bir tasarıma başlanmıştır. Bunun için kullanılacak olan direnç, diyot, transistör, regülatör gibi elemanların imalatını kolaylaştırmak için tek taraflı montaj edilebilen YME (yüzey montaj devre elemanları) kılıfında seçilmiştir.



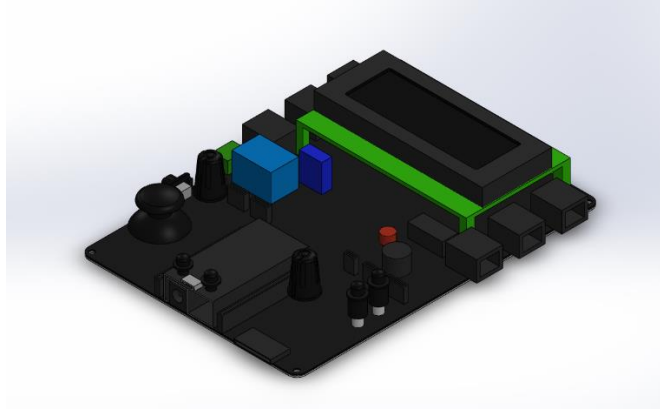
Şekil 5. Kartın dış ölçülerinin ve üst bakır katmanının görüntüsü (Image of card outer dimensions and top copper layer)

Sistemde en çok kullanılan bağlantını topraklama hattı olduğundan üst bakırın tamamen topraklama hattı olarak kullanılmasına karar verilmiştir. Ayrıca bu sayede kartta oluşabilecek kısa devreler için ek bir koruma yolu sağlanmıştır. Tüm elemanlar standart üretim kurallarına göre yerleştirildikten sonra kartın tasarım aşaması tamamlanmıştır. Ardından kartın üç boyutlu görüntüsü alınmıştır. Bu sayede imal edilen kartın dış kabuğu tasarlanmıştır.

Kart üzerinde boş bırakılan 5 adet sinyal pinine bağlı olan soketler ile, sıcaklık, nem, basınç gibi piyasada bulunan birçok sensörler kullanılabilir. Ayrıca aynı hatlar üzerinde bulunan enerji ve topraklama hatları sayesinde harici bir güç kaynağına gerek kalmamaktadır.

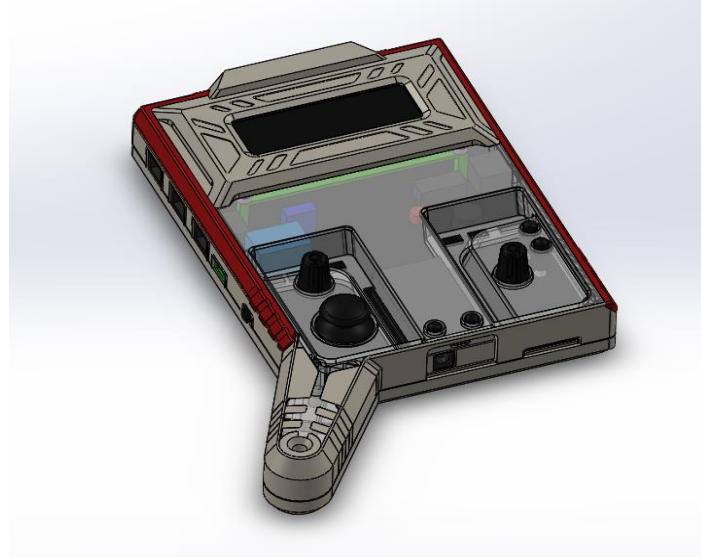
2.2. Sensör Kartı Dış Kabuk Tasarımı (Sensor Board Outer Shell Design)

Üç boyutlu modeli alınan elektronik kart, bilgisayar destekli tasarım programı içerisinde tekrardan montaj çalışması olarak oluşturulmuştur. Ardından üç boyutlu model üzerinden katı model oluşturulmaya başlanmıştır (Şekil 6).



Şekil 6. Komponentler eklenmiş kartın üç boyutlu görüntüsü (Three-dimensional view of the card with components added)

Tasarıma başlamadan önce montaj üzerinden gidilerek kabaca bir dış kabuk tasarımı yapılmıştır. Tasarımı oluştururken dışarıdan müdahale yapılacak olan sensörlerin kontrolüne engel olmayacak şekilde bir tasarım planlanmıştır. Encoder, joystick, butonlar ve giriş çıkış portlarının boşluklu olması sağlanmıştır. Model bir üst kapak, bir alt kapak ve iki adet dış görseli güçlendiren çitadan oluşturulmuştur. Ayrıca içeride kalan sensörlerin kabuk dışından da kontrol edilebilmesi için küçük parçalar tasarlanmıştır. Bu sayede dış kabuk tüm kartla uyumlu hale getirilmiştir (Şekil 7). Tasarımda dikkat edilen bir diğer kural ise; tasarımın üç boyutlu yazıcıdan üretime uygun olmasıdır. Bundan dolayı kartın kalınlığı en az 1.5 mm olmuştur. Üç boyutlu yazıcılarda iç doluluğu istenilen şekilde ayarlanabildiğinden ürüne ağırlık katmadan hacmini arttırabilir şekilde üretim planlanmıştır.



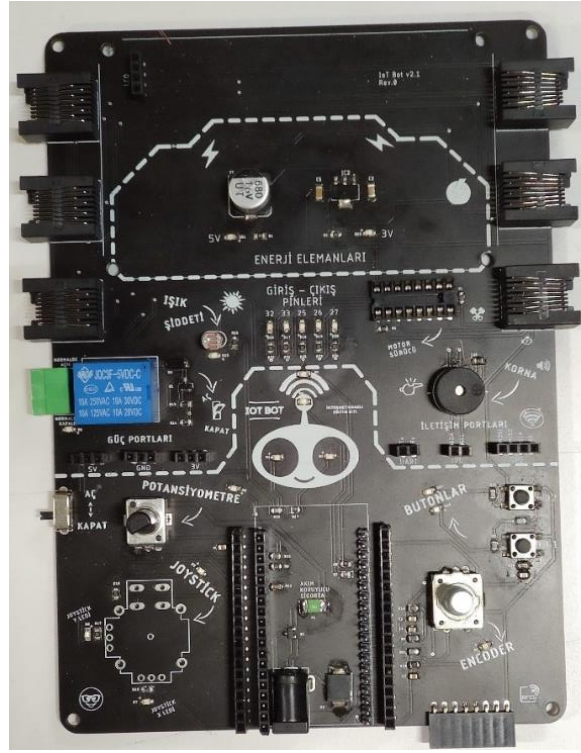
Şekil 7. Tasarlanan dış kabuğun görüntüsü (Image of the designed outer shell)

3. SENSÖR KARTI İMALATI (SENSOR BOARD MANUFACTURING)

3.1. Elektronik Kartın İmalatı (Electronic Card Manufacturing)

Tasarımı biten kartın ilk olarak elektronik komponent temini yapılmıştır. Ardından bakır kaplı plakaya işlenmiş elektronik kart imalatı (PCB) yapılmıştır. Bu aşamada iki yüzlü plaka üzerine bilgisayarda tasarlanmış olan yollar ve katmanlar arası geçişi sağlayan delikler (via) işlenmiştir. Ardından yalıtkanlığı sağlaması için bakır katmanın üzerine bir boya katmanı ve gerekli bilgilendirmeler için yazı katmanı eklenmiştir. Bu işlemler ardından boş elektronik kartının imalatı tamamlanmıştır.

Hazırlanan boş kartlar üzerine elektronik komponentlerin montajını yapmak için dizgi işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 8). Tasarım dosyasından alınan komponentlerin konum ve açı bilgilerinin bulunduğu bir liste ile dizgi makinasına yükleme yapılarak dört işlemde dizgi işlemi tamamlanmıştır. İlk olarak, komponentlerin lehmleneceği altın kaplı noktalara makine yardımıyla sıvı lehim yerleştirilmiştir. Tüm altın kaplı yerler sıvı lehim ile kaplandıktan sonra ikinci aşama olan komponentleri yerlerine yerleştirme işlemi yapılmıştır. Tasarım dosyasından alınan bilgilere göre yerleştirilen komponentler, üçüncü aşama olarak ısıtılmış fırının içerisinde ilerleyen hareketli bir konveyörde lehimi eritip komponentlerin montajlanması sağlanmıştır. Bu sayede tek yüzeyden montajlanan komponentlerin montaj işlemi tamamlanmıştır. Son aşama olarak delik içinden montajlanan komponentler el havyası ile montajlanarak elektronik kartın dizgi işlemi tamamlanmıştır (Şekil 8).



Şekil 8. Dizgi işlemi tamamlanmış kart (Completed card)

İmalatı tamamlanan kartın test edilmeden önce üzerinde kalan lehim pastası kalıntılarının arındırılması için özel temizleme sıvıları içerisinde temizliği yapılmıştır. Temizliği biten kartın uygun bir ortamda güç girişlerinden enerji verilerek elektronik bağlantılar test edilmiştir. Bu aşamada mikroişlemci içerisinde çalıştırılacak olan herhangi bir yazılım olmadığı için sadece enerji hatlarının kontrolü yapılmıştır. Güç verildiğinde herhangi bir sorun olmadığı gözlemlendikten sonra bir sonraki aşama olan dış kabuk imalatına geçilmiştir.

3.2. Sensör Kartı Dış Kabuk İmalatı (Manufacturing of Sensor Board Outer Shell)

Elektronik kart imalatı tamamlandıktan sonra kartı koruyucu dış kabuk imalatına başlanmıştır. Daha önceden bilgisayar ortamında tasarlanmış olan dosyaların üç boyutlu yazıcıdan işlenebilmesi için STL (Stereolithography) formatında çıktı alınmıştır. Alınan dosyalar bir dilimleyici programına eklenerek model ayarları yapılmıştır. Tasarlanan modeller üç boyutlu yazıcının baskı alanının büyük olduğundan dolayı ikiye bölünerek basılmıştır. Baskı ayarları yapılırken iç doluluk oranı %50 seçilerek parçanın kütlesinin çok fazla olmaması sağlanmıştır. Ayrıca katman kalınlığı olarak pürüzsüz bir yüzey istendiğinden dolayı 0.2 mm yükseklik seçilmiştir. Bu ayarlar yapıldıktan sonra dilimleyici program üzerinden üç boyutlu yazıcıya yollamak için bilgisayar destekli üretim dosyaları elde edilmiştir. Dört seferlik ve toplamda 120 saatlik bir baskı ardından ürünler sorunsuz şekilde elde edilmiştir (Şekil 9).



Şekil 9. Üç boyutlu yazıcıdan elde edilmiş dış kabuk görüntüsü (Outer shell image obtained from a 3D printer)

4. TEST YAZILIMI OLUŞTURMA (CREATING TEST SOFTWARE)

Dış kabuk imalatı tamamlandıktan sonra sensör kartının dışına montajlanmıştır. Bu sayede son tasarıma ulaşılmıştır. Enerji testlerini geçen kartın sensörlerden gelen verileri doğru bir şekilde iletip ilemediğini görmek için, kart üzerinde bulunan tüm sensörleri bulunduran bir algoritma çıkarılmıştır. Bu algoritma sırasıyla tüm sensörlerin kütüphane dosyaları ve çalışma aşamalarını içermektedir. Ardından çıkarılan bu algoritma karta yüklemek için Arduino IDE derleyicisi üzerinden C++ dilinde yazılarak kontrol edilmiştir. Derleme işlemi tamamlandıktan sonra kart ile USB üzerinden bağlantı kurularak test yazılımının karta yüklenmesi sağlanmıştır. Test yazılımı yüklenen kart sırasıyla tüm sensörleri test ederek gerekli bilgilendirmeleri üzerinde bulunan ekrandan kullanıcıya bildirmiştir. Tüm sensörlerin sorunsuz şekilde çalıştığını gördükten sonra kart son haline ulaşmıştır (Şekil 10).



Şekil 10. Sensör kartının son görüntüsü (Final image of the sensor board)

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, dijital dönüşüm çalışmalarından biri olan robotik kodlama eğitimleri, bir diğer üst seviye olan “Nesnelerin İnterneti” konusuyla birleştirilmiştir. Bu sayede otomasyon ve haberleşme konularını temel olarak öğrenilmesine yardımcı olacak bir kart tasarımı ve imalatı yapılmıştır. Bu çalışmadan elde edilecek sonuçları şu şekilde sıralamak mümkündür;

- Çalışmada kart tasarımı Autodesk Eagle programında yapılmıştır.
- Tasarlanan kart, imalatı kolay olması için 2 katmanlı, 1.6 mm kalınlığında, bakır kalınlığı en az 1 Oz değerinde ve bakır yüzler arası geçişi sağlayan delikler ise en az 0.3 mm çapında seçilmiştir.

- Çalışmada Espressif marka, ESP32 model mikroişlemci kullanılmıştır.
- Seçilen işlemcinin üzerinde bulunan dahili Wi-Fi ve bluetooth bağlantıları sayesinde iot uygulama örnekleri yapılabilmektedir.
- Çalışmada, piyasada bulunan kartlar incelenerek eksik noktalarının belirlenerek, yeni bir eğitim kiti tasarımı yapılmıştır.
- Çalışmada, Robotik kodlamada temel olarak dijital ve analog giriş çıkışlar kullanıldığı için bu duruma dikkat ederek bu terimleri öğretecek olan buton, iki eksenli ve butonlu joystick, encoder (adım sayıcı), potansiyometre, motor sürücü, led, LDR (ışık şiddeti sensörü), buzzer ve 5V röle kullanılmıştır. Ayrıca kullanıcı geri bildirim vermek için bir adet 20x4 karakterli kristalize LCD ekran kullanılmıştır.
- Çalışmada tasarlanan kartta boş iletişim pinlerine ihtiyaç olduğundan LCD ekranı kullanmak için I2C protokolü ile iletişim sağlayabilen "PCF8574T" isimli bir ara devre entegrasyonu kullanılmıştır. Daha sonra bağlanan bu ekran işlemci içerisine yazılan yazılım ile kullanılmıştır.
- Kartta kullanılan sensörlerin sinyal çıkışlarını alabilmek için pinlere paralel olarak bağlanan RJ45 soketler kullanılmıştır.
- İmalatı yapılan ana kartın dış boyutları 175x125 mm ebatlarındadır
- Dış kapak; bir üst kapak, bir alt kapak ve iki adet dış görseli güçlendiren çıtadan oluşturulmuştur. Ayrıca içeride kalan sensörlerin kapak dışından da kontrol edilebilmesi için küçük parçalar tasarlanmıştır.
- Çalışmada kullanılan sensör kartı özgün olarak tasarlanmış ve imalatı (PCB) yapılmıştır
- Sensör kartı dış kapak imalatı için üç boyutlu yazıcı kullanılmış, baskı ayarları yapılırken iç doluluk oranı %50 seçilmiştir. Ayrıca katman kalınlığı olarak pürüzsüz bir yüzey istendiğinden dolayı 0.2 mm yükseklik seçilmiştir.
- Kart içerisine yazılacak olan programlar için Arduino IDE derleyicisi üzerinden C++ dili kullanılmıştır.
- Kart için yazılan test yazılımı github sayfasına "IOTBOT-Firmware" isminde yüklenerek herkesin ulaşabileceği hale getirilmiştir [16].

Geliştirilen bu deney seti Arduino kartların geliştirilmiş halidir. Kart üzerindeki sensörler kullanarak standart kitlerde yapılan; led ışık yakma, röle açma kapatma, sıcaklık ölçme ve benzeri basit uygulamaları internetle birleştirip akıllı cihazlar ve uygulamalar yapılabilmektedir. Örneğin üzerindeki röleye bağlanan bir ışık, kahve makinesi ya da ısıtıcı kombi internet aracılığıyla başka bir karttan ya da mobil uygulamadan veri olarak kontrol edilebilir. Her türlü Arduino uyumlu sensörlerden okunan veriler açık sunuculara iletilip çift yönlü iletişim kurulabilir. Bağlantı noktası olarak yayın yapabilmesi özelliği sayesinde internet bağlantısı olmayan yerlerde dahi eğitici bir kit olarak kullanılabilir. Sonraki yapılacak çalışmalarda tasarlanan bu kartın günümüz eğitimlerine ayak uyduracak şekilde uzaktan eğitimde kullanılabilmesi için geliştirmeler yapılacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri kapsamında desteklenmiştir. Yazarlar, Düzce Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğüne desteklerinden dolayı teşekkür eder (Proje no: 2021.06.06.1206).

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Karel yüz yüze teknoloji, Nesnelerin interneti nedir, <https://www.karel.com.tr/blog/internet-things-nesnelerin-interneti-nedir- cihazlarin-etkilesim-trendleri>, 10.11.2021.
2. Y.S.H. Al-Samarraei, Smart home design with IoT (Home automation), Yüksek Lisans Tezi, Çankaya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara, Türkiye, 2018.
3. E. Tuncay, K. Mahir, Endüstride nesnelerin interneti (IoT) uygulamaları, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 16(3): 599-607, 2016.

4. G. Levent, B. Mehmet, Nesnelerin interneti: Yapılan çalışmalar ve ülkemizdeki mevcut durum, *Gaziosmanpaşa Bilimsel Araştırma Dergisi*, 13: 47-68, 2016.
5. G. Süleyman, Y. İkbal, Bilişim teknolojileri öğretmenleri ve öğrencilerinin robotik ve kodlama dersine ilişkin görüşleri, *Düzce üniversitesi sosyal bilimler enstitüsü dergisi*, 8(1): 178-196, 2018.
6. B.A. Kök, Beşinci sınıf öğrencilerinin grup çalışması ile robotik kodlama deneyimlerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyonkarahisar, Türkiye, 2019.
7. F.N. Aksu, Bilişim teknolojileri öğretmenleri gözünden robotik kodlama ve robotik yarışmaları, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, Türkiye, 2019.
8. F. Başçiftçi, K.A. Gündüz, nesnelerin interneti uyumlu mikrodenetleyiciler üzerine bir araştırma., *Selçuk Üniversitesi Sosyal ve Teknik Araştırmalar Dergisi*, 18: 62-71, 2019.
9. H. Altınpulluk, Nesnelerin interneti teknolojisinin eğitim ortamlarında kullanımı, *Açık öğretim Uygulamaları ve Araştırmaları Dergisi*, 4(1): 94-111, 2018.
10. E. Öztemel, Eğitimde yeni yönelimlerin değerlendirilmesi ve eğitim 4.0, *Üniversite Araştırmaları Dergisi*, 1(1): 25-30, 2018.
11. M. Topaloğlu, E. Tekkanat, G. Malakçı, Akıllı Cihaz ve İnsan Etkileşimi: Nesnelerin İnterneti, *Ege Eğitim Teknolojileri Dergisi*, 3(1): 11-19, 2019.
12. James Wilson, Esp32 Pinout, Datasheet, Features & Applications, <https://www.theengineeringprojects.com/2020/12/esp32-pinout-datasheet-features-applications.html>, 16.09.2021.
13. Alberto Piganti, Conectar Una Pantalla LCD Hitachi 44780 Vía I2C, <http://diwo.bq.com/conectar-una-pantalla-lcd-hitachi-44780-via-12c/>, 02.10.2021.
14. Makeblock-HaloCode, <https://www.makeblock.com/steam-kits/halocode> ve <https://www.robotistan.com/halocode-iot-tabanlı-kodlama-platformu>, 23.12.2021.
15. TinyLab IoT Kit, <https://www.tinylab.cc/> ve <https://www.elektrovadi.com/urun/tinylab-iot-kit-tinylab-kitabi-hediyeli>, 23.12.2021.
16. GITHUB, <https://github.com/samed5497/IOTBOT-Firmware>, 23.12.2021