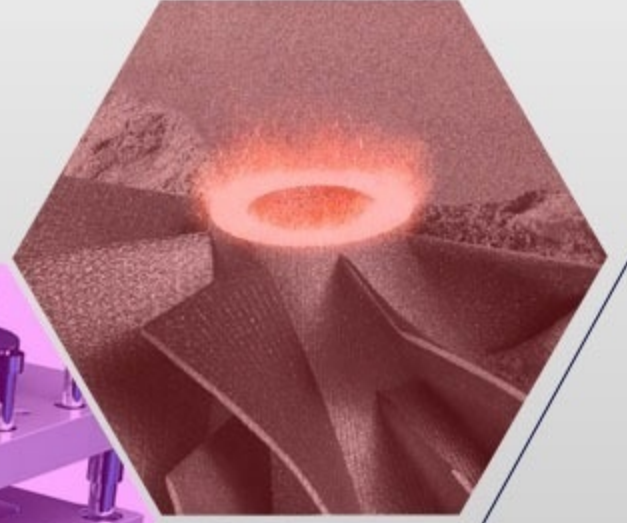




# İMİLAT TEKNOLOJİLERİ VE UYGULAMALARI

CİLT:2 SAYI:2 YIL: 2021

e-ISSN: 2717-7475



MANUFACTURING TECHNOLOGIES AND APPLICATIONS

VOLUME:2 ISSUE:2 YEAR: 2021



Cilt (Volume) : 2  
Sayı (Issue) : 2  
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) : 2  
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)**  
Ağustos 2021 (August 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](mailto:matecajournal@gmail.com), [mgunay@karabuk.edu.tr](mailto: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](mailto:matecajournal@gmail.com), [mgunay@karabuk.edu.tr](mailto: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)**

- AISI P20S Kalıp Çeliğinin İşlenebilirliğinin İncelenmesi** (*Investigation of Machinability of AISI P20S Mold Steel*)  
Mücahit COŞKUN, İbrahim ÇİFTÇİ, Halil DEMİR 1-9
- Cr(VI) elektrokaplama banyolarının Cr(III) banyolarına dönüştürülmesinde etkin faktörlerin belirlenmesi**  
(*Determination of effective factors in conversion of Cr(VI) electroplating baths to Cr(III) baths*)  
Ramazan KATIRCI, Abdulaziz ALTINSARI 30-40
- Effect of Mn and Zr Addition on Microstructure, Wear and Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V Composite Biomaterials Produced by Powder Metallurgy** (*Toz Metalurjisi ile Üretilen Ti-6Al-4V Kompozit Biyomalzemelerin Mikroyapı, Aşınma ve Korozyon Davranışlarına Mn ve Zr İlavasının Etkisi*)  
Harun ÇUĞ, Mohamed E. E. Erhaima 41-48
- Ferritik Paslanmaz Çeliğin Elektro Erozyon ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu**  
(*Optimization of Machining Parameters for Electro Discharge Machining of Ferritic Stainless Steel*)  
Oya ARAT, Hacı Bekir ÖZERKAN 49-58

### **Derleme Makale (Review Article)**

- An Evaluation on Machinability of Titanium Alloy and Nickel Based Superalloys Used in Aerospace Industry**  
(*Havacılık ve Uzay Endüstrisinde Kullanılan Titanyum Alaşımları ve Nikel Esaslı Süperalaşımların İşlenebilirliği Üzerine Bir Değerlendirme*)  
Hakan YURTKURAN 10-29

## AISI P20S Kalıp Çeliğinin İşlenebilirliğinin İncelenmesi

Mücahit Coşkun<sup>1,\*</sup> , İbrahim Çiftçi<sup>2</sup> , Halil Demir<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Yeşilyurt Demir Çelik Meslek Yüksekokulu, Samsun, Türkiye

<sup>2</sup>Çankırı Karatekin Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çankırı, Türkiye

<sup>3</sup>Karabük Üniversitesi, Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Karabük, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 08.03.2021

**Kabul:** 26.07.2021

#### Anahtar Kelimeler:

İşlenebilirlik

Kalıp çeliği

Frezeleme

Kesme kuvveti

Yüzey pürüzlülüğü

### ÖZET

Bu çalışmada, kalıpcılık sektöründe yaygın olarak kullanılan AISI P20S kalıp çeliği tercih edilmiştir. Farklı kesme parametreleri (kesme hızı, ilerleme miktarı ve kesme derinliği) kullanılarak gerçekleştirilen deneylerde değişkenlerin kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri incelenmiştir. Kaplamalı karbür kesici takım kullanılarak frezeleme yöntemi ile gerçekleştirilen bu deneylerde işleme parametreleri olarak kesme hızı ve ilerleme miktarının dört farklı değişkeni, kesme derinliğinin ise iki farklı değişkeni kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde artan kesme hızına bağlı olarak kesme kuvveti değerlerinde azalma meydana gelirken ilerleme miktarının artan değerlerinde ise kesme kuvveti değerlerinde artış tespit edilmiştir. En yüksek kesme kuvveti (138.1 N) 170 m/dak kesme hızı, 0.253 mm/diş ilerleme ve 1.5 mm kesme derinliğinde ölçülürken, en düşük kesme kuvveti değeri (45.23 N) ise 0.75 mm talaş derinliğinde, 260 m/dak kesme hızı, 0.075 mm/diş ilerlemede ölçülmüştür. Ayrıca artan kesme hızı değerleri yüzey pürüzlülüğünün azalmasına, artan ilerleme miktarı ve kesme derinliği değerlerinin ise yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olduğu görülmüştür. En düşük yüzey pürüzlülüğü (0.273  $\mu\text{m}$ ) 260 m/dak kesme hızı, 0.075 mm/diş ilerleme hızında ve 0.75 mm kesme derinliğinde ölçülürken, en yüksek yüzey pürüzlülük değeri (1.552  $\mu\text{m}$ ) ise 170 m/dak kesme hızı, 0.253 mm/diş ilerleme miktarı ve 1.5 mm kesme derinliğinde oluşmuştur. Sonuç olarak yüksek kesme hızı, düşük ilerleme miktarı ve kesme derinliği değerlerinin en iyi işleme çıktılarının elde edilmesinde etkili olduğunu söylemek mümkündür.

## Investigation of Machinability of AISI P20S Mold Steel

### ARTICLE INFO

**Received:** 08.03.2021

**Accepted:** 26.07.2021

#### Keywords:

Machinability

Mold steel

Milling

Cutting force

Surface roughness

### ABSTRACT

In this study, AISI P20S mold steel, which is widely used in the mold making industry, was preferred. The effects of the variables on the cutting force and surface roughness were investigated in the experiments performed using different cutting parameters (cutting speed, feed rate and depth of cut). In these experiments, which were carried out with the milling method using a coated carbide cutting tool, four different variables of cutting speed and feed rate and two different variables of cutting depth were used as machining parameters. When the obtained results are evaluated, it is determined that while the cutting force values decrease depending on the increasing cutting speed, an increase in the cutting force values is observed at the increasing values of the feed amount. The highest cutting force (138.1 N) is measured at 170 m/min cutting speed, 0.253 mm/tooth feed and 1.5 mm depth of cut, while the lowest cutting force (45.23 N) is measured at 0.75 mm depth of cut, measured at 260 m/min cutting speed, 0.075 mm/tooth feed. In addition, it was observed that increasing cutting speed values caused a decrease in surface roughness, while increasing feed rate and cutting depth values caused an increase in surface roughness. The lowest surface roughness (0.273  $\mu\text{m}$ ) was measured at 260 m/min cutting speed, 0.075 mm/tooth feed rate and 0.75 mm depth of cut, while the highest surface roughness value (1.552  $\mu\text{m}$ ) was measured at 170 m/min cutting speed, 0.253 mm/ tooth feed rate and 1.5 mm depth of cut. As a result, it is possible to say that high cutting speed, low feed rate and depth of cut values are effective in obtaining the best machining outputs.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Gelişen teknolojiyle endüstriyel sektör de gelişmiştir. Bununla beraber yapılacak veya üretilecek her ürün için birçok talaşlı imalat yöntemi bulunmaktadır. Talaşlı üretim yöntemlerinden biri frezeleme yöntemidir ve bu yöntem endüstride önemli bir yer kaplamaktadır. Frezeleme yöntemi, makine, uzay, havacılık, otomotiv ve makine imalatlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yöntem ile düzlemsel, eğik, dairesel parçalar ve karmaşıklığı fazla olmayan parçalar işlenebilmektedir. Frezeleme işleminde kullanılan kesici takımlarda birden fazla kesici kenar bulunmasından dolayı elde edilen ürünün yüzey kalitesi oldukça iyi elde edilebilmektedir. Ayrıca üretilmek istenen ürünün ölçüleri çok dar toleranslar dahilinde üretilebilmektedir [1].

Talaşlı üretimde tezgâhın, kesici takımın ve işleme yönteminin yanı sıra işleme parametreleri de önemlidir. Bu parametreler, kesme hızı, kesme derinliği ve ilerleme miktarıdır. Bu parametreler iş parçasında yüzey kalitesini etkilemektedir. Ayrıca oluşan kesme kuvveti ile takım ömrünü belirlemektedir. Bu nedenle talaşlı üretime başlamadan önce işleme parametrelerinin iyi belirlenmesi gerekmektedir [2].

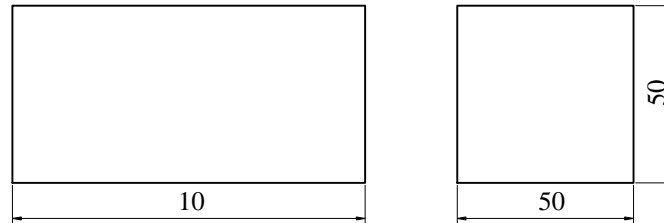
Kalıp imalatında, iş parçası malzemesinin seçimi önemli bir yer kaplamaktadır. Seçimi yapılacak çeliğin yalnızca mekanik özellikleri değil kimyasal özellikleri ve işlenebilirliği dikkate alınmalıdır [3]. Ayrıca kalıbın kullanım yerine ve boyutsal ölçülerine göre de ikincil bir işlem gerekebilir. Bu ikincil işlem genellikle ısıl işlem olmaktadır. Fakat ısıl işlem sırasında çelikte çatlama gibi deformasyonlar meydana gelebilmektedir. Dolayısıyla seçilecek kalıp çeliğinin ısıl işleme gerek duyulmadan kullanılabilir olması avantajlı bir durum olmaktadır. Ön sertleştirme işlemi ile üretilen AISI P20S çeliğinin 30-35 HRC sertlikte olduğu, ölçü tamlığının ve işlenebilirliğinin kolay olduğu belirtilmektedir.

Bu çalışmada; talaşlı imalatta kullanılan plastik kalıp çeliklerinin işleme sonrası ısıl işleme gönderilmesine gerek duyulmayan, sertleştirilmiş halde üretilmiş AISI P20S çeliğinden talaş kaldırılması için ihtiyaç duyulan işleme parametrelerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. İş Parçası ve Takım Özellikleri (Workpiece and Tool Properties)

Bu çalışmada iş parçası malzemesi olarak AISI P20S çeliği kullanılmıştır. İçeriğinde bulundurduğu kükürt (S) elementi nedeniyle yüksek yüzey parlaklığı beklenmeyen orta ve büyük hacimli plastik enjeksiyon kalıpları, destek plakaları, basınçlı döküm ve plastik enjeksiyon kalıpları için kalıp kasaları, kauçuk türü plastik ürünlerin baskı kalıpları, ekstrüzyon preslerinin kovanları, otomotiv ve gıda endüstrisi için plastik kalıpları ve yüksek sıvı basıncı altında metallerin şekillendirme kalıplarında kullanılmaktadır [3]. AISI P20S kalıp çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 1’de, mekanik özellikleri ise Tablo 2’de verilmiştir [4]. İş parçası malzemesinin boyutları Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. İş parçası malzemesi boyutları (Workpiece material dimensions)

Tablo 1. AISI P20S kalıp çeliğinin kimyasal bileşimi (Chemical composition of AISI P20S mold steel)

C	Si	Ni	Mn	Cr	Mo	S	P
0.35-0.45	0.20-0.40	0.30-0.50	1.30-1.60	1.80-2.10	0.15-0.25	0.05-0.10	Max 0.30

Tablo 2. AISI P20S kalıp çeliğinin mekanik özellikleri (Mechanical properties of AISI P20S mold steel)

Yoğunluk ( $g/cm^3$ )	Isıl İletkenlik ( $W/m.K$ )	Elastikiyet Modülü ( $GPa$ )	Akma Dayanımı ( $MPa$ )
7.83	34.0	210	880

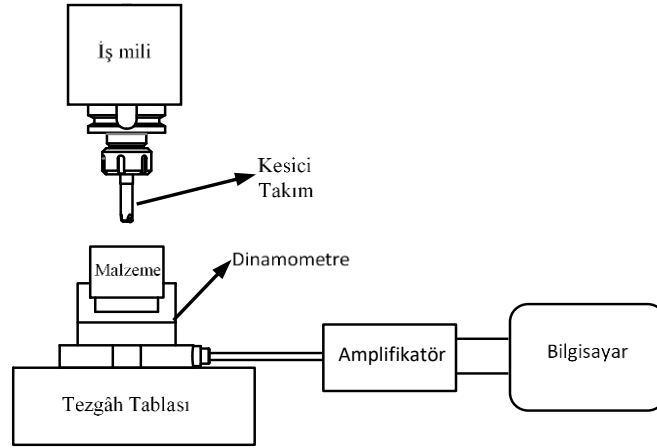
İşleme deneylerinde Mitsubishi firması tarafından üretilen PVD yöntemiyle kaplama işlemi gerçekleştirilmiş AOMT123608PEER-M kodlu karbür kesici takım kullanılmıştır. Kullanılan kesici takımın özellikleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Kesici takım geometrisi ve özellikleri (Cutting tool geometry and properties)

Takım Geometrisi	Takım Kodu	Takım Malzemesi	Kaplama	Kalite	Takım Tutucu Çapı	Diş Sayısı
	AOMT123608PEER-M VP15TF	Sementit karbür	MIRACLE TiAlN	P20	16 mm	1 adet

## 2.2. Takım Tezgâhı Özellikleri (Machine Tool Properties)

Deneylerde kullanılan iş parçaları FANUC kontrol ünitesine sahip Johnford VMC-550 CNC dik işlem merkezinde kesme sıvısı kullanılmadan işlenmiştir. Deney düzeneğinin şematik gösterimi Şekil 2'de ve kullanılan CNC dik işlem merkezinin özellikleri Tablo 4'te verilmiştir.



Şekil 2. Deney düzeneğinin şematik gösterimi (Schematic representation of the experimental setup)

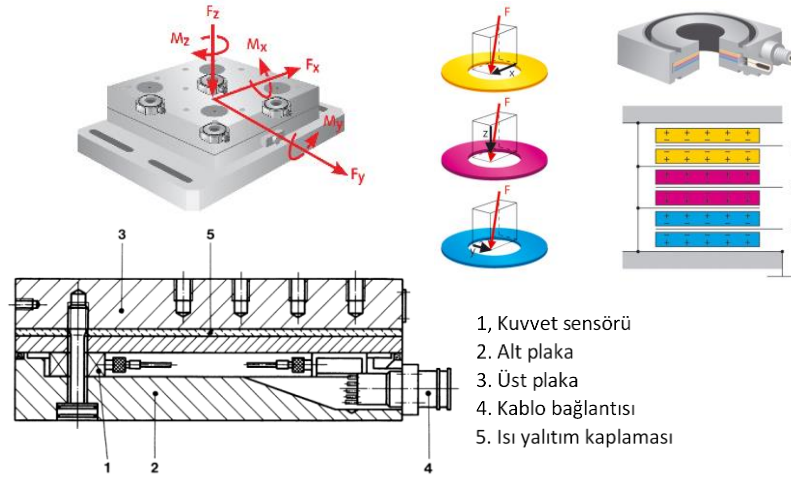
Tablo 4. CNC freze tezgâhının özellikleri (Features of CNC milling machine)

Model	Johnford VMC-550 Dik İşlem Merkezi
Kontrol tipi	Fanuc O-M serisi
X, Y, Z eksen hareketi	500x500x450 mm
Hassasiyeti	0,001 mm
Devir sayısı (En yüksek)	6000 dev/dak
Motor gücü	10 HP (7.5 kW)
X-Y-Z hızlı ilerleme	15-15-12 m/dak
Kesme ilerlemesi	1-4000 mm/dak

## 2.3. Kesme Kuvvetlerinin Ölçülmesi (Measurement of Cutting Forces)

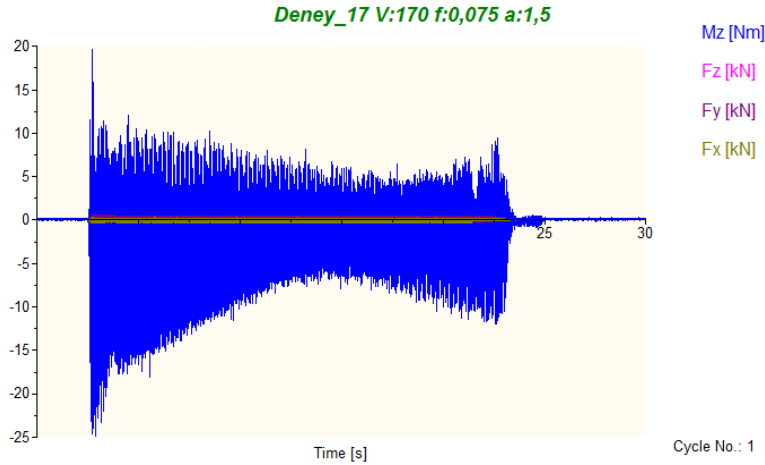
Talaş kaldırma esnasında oluşan kuvvetler KİSTLER 9257B tipi dinamometre ile ölçülmüştür (Şekil 3). Ölçülecek kuvvet, bir üst plaka vasıtasıyla tanımlanır ve taban ve üst plaka arasında yerleştirilen dört adet üç bileşenli kuvvet sensörü arasında dağıtılır. Bu dört kuvvet sensöründe tanımlanan kuvvet üç bileşene ayrılır. 3 bileşendeki kuvvet ölçümü için, bağımsız sinyaller bağlantı kablosunda bir araya getirilir. 6 bileşenli kuvvet ve moment ölçümü için, 8 ayrı sinyalin tümü

bağlantı kablosu vasıtasıyla şarj amplifikatörlerine doğrudan gönderilir [5]. Amplifikatöre gelen sinyaller bilgisayara aktarılır.



Şekil 3. Kistler 9257B dinamometresinin elemanları [30] (Elements of the Kistler 9257B dynamometer)

Bilgisayara aktarılan veriler Dynoware yazılımı ile incelenmiştir. Dynoware yazılımı kesme kuvvetlerinin bilgisayar yardımı ile ölçülmesini sağlayan bir programdır. Bilgisayara aktarılan verilerin Dynoware yazılımı ile görüntülenmesi Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Kesme kuvvetlerinin Dynoware yazılımı ile görüntülenmesi (Display of cutting forces with Dynoware software)

Kesme işlemi esnasında dinamometre üzerinde oluşan kuvvetlerin ölçülebilmesi için gereken süre işleme deneylerinin her biri için 30 saniye olarak ayarlanmıştır. Kesme kuvveti değerleri talaş kaldırma işlemi esnasında 3 eksende ölçülmüştür. Elde edilen kesme kuvveti değerleri Dynoware yazılımında görüntülenerek kuvvetlerin kararlı olduğu bölgenin başlangıç ve bitiş konumları esas alınıp bu bölgedeki değerlerin ortalamaları alınarak  $F_x$ ,  $F_y$  ve  $F_z$  kuvvetleri belirlenmiştir.

#### 2.4. Yüzey Pürüzlülüğünün Ölçümü (Measurement of Surface Roughness)

İşlenmiş yüzeyler üzerinde yüzey pürüzlülüğü ölçümleri için Marsurf PS1 yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı kullanılmıştır. Pürüzlülük ölçümleri için örnekleme uzunluğu 4 mm ve ölçüm uzunluğu 0.8 mm olarak alınmıştır. Kullanılan pürüzlülük ölçüm cihazının özellikleri Tablo 5'te verilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü olarak ortalama yüzey pürüzlülük ( $R_a$ ) değeri dikkate alınmıştır.

#### 2.5. Deneysel Parametreler (Experimental Parameters)

Deneysel çalışmalar iki farklı kesme derinliği, dört farklı kesme hızı ve dört farklı ilerleme miktarı kullanılarak karbür kesici takımlar ile gerçekleştirilmiştir. İşleme parametreleri Tablo 6'da verilmiştir.



Tablo 5. Pürüzlülük ölçüm cihazının özellikleri (Features of the roughness measuring device)

<b>Model</b>	Mahr (Marsurf PS1)
<b>Ölçüm yöntemi</b>	İzleyici uçlu cihazlar yöntemi
<b>Tarama hızı</b>	0.5mm/sn (ölçüm yaparken) 1mm/sn (geri dönüşte)
<b>Ölçme Kuvveti</b>	4 mN (0.4 gf)
<b>Uç malzemesi</b>	Elmas
<b>Ölçme sıcaklığı</b>	20 °C ± 1 °C
<b>Numune uzunluğu</b>	0.8 mm
<b>Değerlendirme uzunluğu</b>	4 mm
<b>İzleyici uç yarıçapı</b>	5 µm

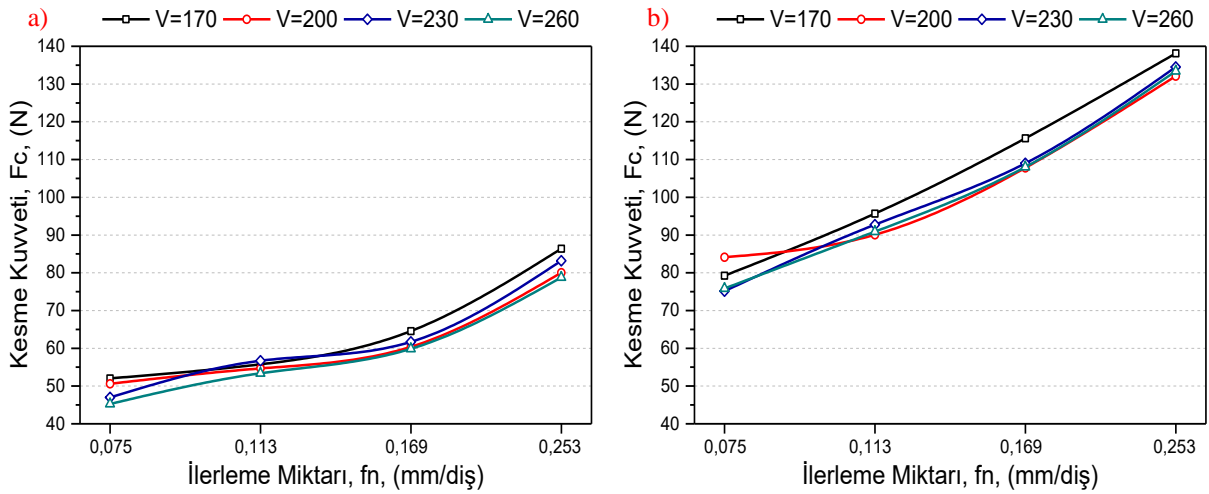
Tablo 6. Deney değişkenleri (Experiment variables)

<b>İş parçası malzemesi</b>	AISI P20S
<b>Kesme hızı (V)</b>	170, 200, 230, 260 m/dak
<b>İlerleme (f)</b>	0.075; 0.113; 0.169; 0.253 mm/diş
<b>Eksenel kesme derinliği</b>	0.75; 1.5 mm
<b>Radyal kesme genişliği</b>	8 mm
<b>Kesme boyu</b>	100 mm

### 3. DENEY SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ (EVOLUTION OF EXPERIMENT RESULTS)

#### 3.1. Kesme Kuvvetleri (Cutting Forces)

DeneySEL çalışmalar esnasında meydana gelen kesme kuvveti değerleri aynı anda üç düzlemde kuvvet ölçme kabiliyetine sahip bir dinamometre ile ölçülmüştür. Kesme kuvveti ölçümlerinde her bir parametre için yeni kesici takım kullanılmış olup toplamda otuz iki deney gerçekleştirilmiştir. Deneylerde ilerleme yönü freze tezgâhının Y eksenini boyunca tek yönde verilmiş olduğundan, en büyük kuvvetler Y ekseninde gözlenmiştir. Bu nedenle değerlendirmelerde kesme kuvveti olarak  $F_y$  bileşenleri dikkate alınmıştır. Deneyler sırasında meydana gelen kesme kuvveti grafikleri Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. İlerleme miktarı ve kesme hızının kesme kuvvetine etkisi (Effect of feed rate and cutting speed on cutting force)  
a) 0.75 mm kesme derinliği b) 1.5 mm kesme derinliği

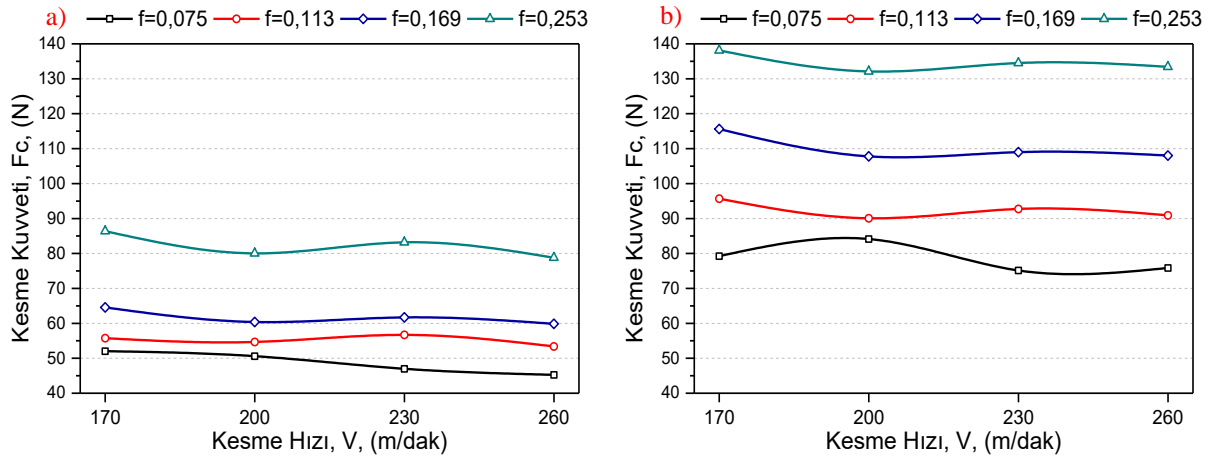
0,75 mm kesme derinliğinde ilerleme miktarlarının artmasıyla kesme kuvvetlerinin arttığı Şekil 5a’da görülmektedir. Kesme kuvvetlerindeki bu artışın sebebi talaş kesitinin artmasına atfedilebilir

[6]. İlerleme miktarı arttıkça talaş kesiti artar ve bu da kesme kuvvetlerinin artmasına sebep olur. Meydana gelen en yüksek kesme kuvveti değeri (86.36 N) ilerleme miktarının 0.253 mm/diş, kesme hızının 170 m/dak parametrelerinde oluşmuştur. En düşük kesme kuvveti değeri (45.23 N) ise 0.075 mm/diş ilerleme miktarı, 260 m/dak kesme hızında oluşmuştur. İlerleme miktarının 0.075 mm/diş'ten 0.113 mm/diş'e artışında kesme kuvveti değerleri 3.7 ile 9.7 N arasında değişirken ilerleme miktarlarının 0.113 mm/diş'ten sonra 0.169 mm/diş ve 0.253 mm/diş'e artırılması ile kesme kuvvetlerinde 5 N ile 21.8 N arasında değişimler meydana gelmiştir. Kesme kuvvetlerinde meydana gelen en fazla değişim %34.86 ile ilerleme miktarının 0.169 mm/diş'ten 0.253 mm/diş'e artışında 230 m/dak kesme hızında gözlenmiştir. En düşük değişim %7.21 olarak ilerleme miktarının 0.075 mm/diş'ten 0.113 mm/diş'e artışında 170 m/dak kesme hızında meydana gelmiştir. En düşük kesme kuvveti değeri ile en yüksek kesme kuvveti değeri arasında yaklaşık olarak %90.93'lük bir değişim meydana gelmiştir.

Şekil 5b'deki grafik incelendiğinde 1.5 mm kesme derinliğinde ilerleme miktarlarının artmasıyla kesme kuvvetlerinin de arttığı görülmektedir. Meydana gelen en yüksek kesme kuvveti değeri (138.1 N) ilerleme miktarının 0.253 mm/diş, kesme hızının 170 m/dak olduğu durumda oluşmuştur. En düşük kesme kuvveti değeri (75.1 N) ise 0.075 mm/diş ilerleme miktarı, 230 m/dak kesme hızında oluşmuştur. İlerleme miktarının 0.075 mm/diş'ten 0.113 mm/diş'e artışında kesme kuvveti değerleri 6 N ile 17.6 N arasında değişirken ilerleme miktarlarının 0.113 mm/diş'ten sonra 0.169 mm/diş ve 0.253 mm/diş'e artırılması ile kesme kuvvetlerinde 16.2 ile 25.5 N arasında değişimler meydana gelmiştir. Kesme kuvvetlerinde meydana gelen en fazla değişim %23.51 ile ilerleme miktarının 0.169 mm/diş'ten 0.253 mm/diş'e artışında 260 m/dak kesme hızında gözlenmiştir. En düşük değişim %7.07 olarak ilerleme miktarının 0.075 mm/diş'ten 0.113 mm/diş'e artışında 200 m/dak kesme hızında meydana gelmiştir. En düşük kesme kuvveti değeri ile en yüksek kesme kuvveti değeri arasında yaklaşık olarak %83.88'lik bir değişim meydana gelmiştir.

Şekil 5'deki grafikler kıyaslandığında kesme derinliğinin 0.5 mm'den 1. mm'ye çıkarılmasıyla, iş parçası malzemesinden talaş kaldırmak için gereken kuvvet değerlerinde artış meydana geldiği görülmektedir. Bu durum kesme derinliğinin artmasıyla kesici takımın iş parçası yüzeyinden kaldırdığı talaş miktarının artmasından dolayı, talaş kaldırma işlemi için daha fazla kuvvet gerektirmesinden kaynaklanmaktadır [6].

Kesme hızı ve ilerleme miktarının kesme kuvveti üzerine etkileri Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. Kesme hızı ve ilerleme miktarının kesme kuvvetine etkisi (Effect of cutting speed and feed rate on cutting force) a) 0.75 mm kesme derinliği b) 1.5 mm kesme derinliği

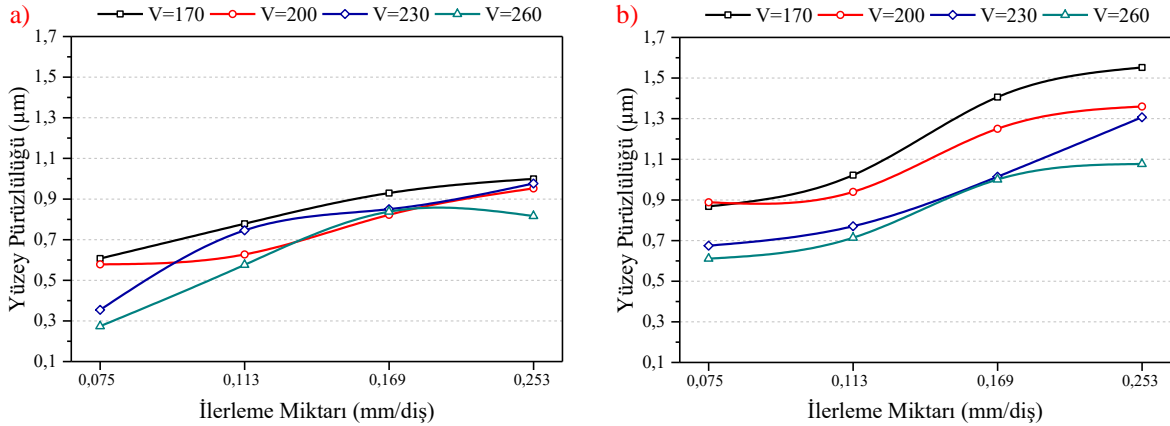
Şekil 6a'daki grafik incelendiğinde 0.75 mm kesme derinliğinde kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetlerinde düşüş meydana geldiği görülmektedir. Kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetlerinde meydana gelen düşüş takım talaş arayüzeyinde temas alanının azalmasıyla ve artan kesme hızıyla meydana gelen sıcaklığın artması sonucu takım talaş arayüzeyine yapışan malzemenin kayma dayanımının düşmesiyle açıklanabilir [7-9]. Kesme hızının 170 m/dak'dan 200 m/dak'ya artışında kesme kuvveti değerleri 1 N ile 6 N arasında değişirken, kesme hızının 200 m/dak'dan 230 m/dak

ve 260 m/dak'ya arttırılması ile kesme kuvvetlerinde 1.2 N ile 4.4 N arasında değişimler meydana gelmiştir. Kesme kuvvetlerinde meydana gelen en fazla değişim %7.36 ile kesme hızının 170 m/dak'dan 200 m/dak'ya artışında 0.253 mm/diş ilerleme miktarında meydana gelirken, en düşük değişim ise yaklaşık %1.95 olarak kesme hızının 170 m/dak'dan 200 m/dak'ya artışında 0.113 mm/diş ilerleme miktarında meydana gelmiştir.

Şekil 6b'deki grafik incelendiğinde 1.5 mm kesme derinliğinde kesme hızının artmasıyla kesme kuvvetlerinde düşüş meydana geldiği görülmektedir. 200 m/dak kesme hızında ve ilerleme miktarının 0.075 mm/diş olarak yapılan deneylerde bir önceki kesme hızı değerine (170 m/dak) göre kesme kuvvetinde yaklaşık olarak %6.17 artış meydana geldiği görülmektedir. Bunun sebebi olarak düşük ve orta hızlarda kesme işlemi gerçekleştirirken meydana gelen yığıntı talaş oluşumunun kesici uç geometrisini değiştirerek kesme işlemi için gereken kuvveti arttırdığından dolayı kaynaklandığını söyleyebiliriz [10]. Kesme hızının 170 m/dak'dan 200 m/dak'ya artışında kesme kuvveti değerleri 4.8 N ile 7.8 N arasında değişirken kesme hızının 200 m/dak'dan 230 m/dak ve 260 m/dak'ya arttırılması ile kesme kuvvetlerinde 1 N ile 9 N arasında değişimler meydana gelmiştir. Kesme kuvvetlerinde meydana gelen en fazla değişim %10.71 ile kesme hızının 200 m/dak'dan 230 m/dak'ya artışında 0.075 mm/diş ilerleme miktarında meydana gelirken, en düşük değişim ise yaklaşık %0.81 olarak kesme hızının 230 m/dak'dan 260 m/dak'ya artışında 0.253 mm/diş ilerleme miktarında meydana gelmiştir.

### 3.2. Yüzey Pürüzlülüğü (Surface Roughness)

Şekil 7'deki grafiklerden anlaşılacağı gibi kesme derinliğinin 0.75 mm den 1.5 mm ye çıkarılmasıyla iş parçası malzemesinin işlenen yüzeyinde oluşan pürüzlülük değerlerinde ciddi bir şekilde artış meydana geldiği görülmektedir. Kesme derinliğinin artması kesici takımın iş parçasının yüzeyinden kaldırdığı talaş miktarını arttıracığından, kesici takımda oluşan titreşimlerin artmasına neden olmaktadır. Kesici takımda oluşan titreşimlerin artması, işparçasının yüzey pürüzlülüğünün artmasına neden olmaktadır.



Şekil 7. İlerleme miktarı ve kesme hızına bağlı ortalama yüzey pürüzlülüğü değerleri (Average surface roughness values depending on the feed rate and cutting speed) a) 0.75 mm kesme derinliği b) 1.5 mm kesme derinliği

Şekil 7a'daki grafik incelendiğinde ilerleme miktarının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı görülmektedir. İlerleme miktarının artması kesici takımın iş parçası yüzeyinden kaldıracağı talaş hacminin artmasına neden olacağından dolayı kesici takımda oluşan titreşimleri arttırmaktadır, bu nedenle ilerleme miktarının artması işlenen yüzeyin pürüzlülüğünü arttırmaktadır [11-15]. Grafikteki verilere göre meydana gelen en yüksek yüzey pürüzlülüğü (0.999 µm) 0.253 mm/diş ilerleme miktarında ve 170 m/dak kesme hızında oluşmuştur. En düşük yüzey pürüzlülüğü (0.273 µm) değeri ise 0.075 mm/diş ilerleme miktarında ve 260 m/dak kesme hızında meydana gelmiştir.

Şekil 7b'deki grafiğin genel olarak incelenmesi ile ilerleme miktarındaki artışın yüzey pürüzlülük değerlerini de arttırdığı görülmektedir. Grafikteki verilere göre meydana gelen en yüksek yüzey pürüzlülüğü (1.552 µm) 0.253 mm/diş ilerleme miktarında ve 170 m/dak kesme hızında

oluşturmuştur. En düşük yüzey pürüzlülüğü değeri (0.611  $\mu\text{m}$ ) ise 0.075 mm/diş ilerleme miktarında ve 260 m/dak kesme hızında meydana gelmiştir.

Şekil 7a ve Şekil 7b'deki grafiklerden de anlaşılacağı gibi kesme hızına bağlı olarak yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde, kesme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün düştüğü görülmektedir. Artan kesme hızıyla yüzey pürüzlülüğünün düşmesinin nedeni azalan BUE eğilimi olarak gösterilebilir [16,17]. BUE kesici takımın ucunda oluşarak işlenen yüzeyin pürüzlülük değerinin artmasına neden olmaktadır. Kesme hızının artması BUE oluşma eğilimini azaltır ve bu durum da yüzey pürüzlülük değerinin azalmasına neden olur.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

AISI P20S plastik kalıp çeliğinin Sementit karbür kesici takımlar ile kuru kesme şartlarında işlenmesi esnasında işleme parametrelerinin kesme kuvvetleri ve işleme sonrası meydana gelen yüzey pürüzlülük değerlerinin üzerindeki etkileri deneysel çalışmalar yapılarak incelenmiştir. Çalışma boyunca 32 adet deney yapılmış ve elde edilen deneysel veriler değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlar söylenebilir;

- İlerleme miktarının artması ile kesme kuvvetlerinde ve yüzey pürüzlülüklerinde artış meydana gelmiştir. Bu artış yapılan deneylerin literatür ile paralel olduğunu göstermiştir.
- Kesme hızının artması ile işleme esnasında meydana gelen kesme kuvvetleri ve yüzey pürüzlülük değerleri azalmıştır.
- Artan kesme derinliği, kesme kuvveti ve yüzey pürüzlülük değerlerini arttırmıştır.
- En yüksek kesme kuvveti değeri (138.1 N) 1.5 mm kesme derinliğinde, kesme hızının 170 m/dak, ilerleme miktarının 0.253 mm/diş olduğu parametrede meydana gelmiştir. En düşük kesme kuvveti değeri (45.23 N) ise 0.75 mm kesme derinliğinde, kesme hızının 260 m/dak, ilerleme miktarının 0,075 mm/diş olduğu parametrede meydana gelmiştir.
- En yüksek yüzey pürüzlülük değeri (1.552  $\mu\text{m}$ ) 1.5 mm kesme derinliğinde, kesme hızının 170 m/dak, ilerleme miktarının 0.253 mm/diş olduğu durumda meydana gelmiştir. En düşük pürüzlülük değeri (0.273  $\mu\text{m}$ ) ise 0.75 mm kesme derinliğinde, kesme hızının 260 m/dak, ilerleme miktarının 0.075 mm/diş olduğu durumda meydana gelmiştir.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)


Bu çalışma Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından desteklenmiştir (Proje no: KBÜ-BAP 15/2-YL-046).

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. A. Gezgin, Prizmatik parçaların frezelenmesi esnasında kesici uç sayısının takım ömrü ve yüzey pürüzlülüğü açısından değerlendirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2007.
2. M.C. Çakır, Modern Talaşlı İmalatın Esasları, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 50-80, 2006.
3. M. Süngünyol, Y. Kayır, DIN 1.2311 ve 1.2738 Kalıp Çeliklerinin İşlenebilirliği, 3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu, 4-5 Ekim 2012, Ankara.
4. Korkmaz Çelik, Plastik Kalıp Çelikleri, <http://www.korkmazcelik.com/urunler/plastik-kalip-celikleri.html>, 20.11.2017.
5. Kistler, Measure Analyze Innovate, <https://www.kistler.com/en/product/type-9257b/>, 15.10.2017.
6. İ. Korkut, M.A. Dönertaş, Kesme parametrelerinin frezelemede oluşan kesme kuvvetleri üzerindeki etkileri, Gazi Üniversitesi Politeknik Dergisi, 6(1): 385-389, 2003.
7. İ. Çiftçi, Talaşlı İmalatta Yüzey Pürüzlülüğünün Tayini Ders Notları, Karabük Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Karabük, 2004.
8. Sandvik Coromant, Modern Metal Cutting, Practical Handbook, Sandvik, Sweden, 1994.
9. M.C. Shaw, Metal Cutting Principles, Oxford University Press, London, 1984.
10. B. Haddag, S. Atlati, M. Nouari, A. Moufki, Dry machining aeronautical aluminum alloy AA2024-T351: Analysis of cutting forces, chip segmentation and built-up edge formation, Metals, 6(9), 197, 2016.

11. K. Bouacha, M.A. Yallese, T. Mabrouki, J.F. Rigal, Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 28(3), 349-361, 2010.
12. D.S. Kilic, S. Raman, Observations of the tool–chip boundary conditions in turning of aluminum alloys, *Wear*, 262(7-8), 889-904, 2007.
13. R. Suresh, S. Basavarajappa, V.N. Gaitonde, G.L. Samuel, Machinability investigations on hardened AISI 4340 steel using coated carbide insert, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 33, 75-86, 2012.
14. A. Pal, S.K. Choudhury, S. Chinchankar, Machinability assessment through experimental investigation during hard and soft turning of hardened steel, *Procedia Materials Science*, 6, 80- 91, 2014.
15. B. Özlü, H. Demir, M. Türkmen, and S. Gündüz, The Investigation of Surface Roughness and Cutting Forces of Steels Cooled in Sand and Air After Hot Forging, *Technological Applied Science*, 14(1). 20–30, 2019.
16. İ. Çiftçi, Machining of austenitic stainless steels using CVD multi-layer coated cemented carbide tools, *Tribology International*, 39, 103-109, 2006.
17. S. Thamizhmanii, K. Kamarudin, E.A. Rahim, A. Sapparudin, S. Hassan, Tool Wear and Surface Roughness in Turning AISI 8620 Using Coated Ceramic Tool, *Proceedings of the World Congress on Engineering*, 2-4 July 2007, London.

## An Evaluation on Machinability of Titanium Alloy and Nickel Based Superalloys Used in Aerospace Industry

Hakan Yurtkuran<sup>1,\*</sup> 

<sup>1</sup>Yozgat Bozok University, Akdağmadeni Vocational School, Yozgat, Turkey

### ARTICLE INFO

**Received:** 20.05.2021

**Accepted:** 17.08.2021

**Keywords:**

Aerospace

Titanium

Superalloys

Machinability

Cutting tool

Surface integrity

### ABSTRACT

Superalloys are a group of materials that are commonly used in aerospace applications and are also called high temperature materials, as they have superior wear and corrosion resistance. Ni-based superalloys are used more often than Ti alloys in the aerospace industry as they have mechanical and physical properties such as superior temperature resistance and toughness, high corrosion resistance, excellent fatigue and creep resistance. Ti alloys, on the other hand, have the highest strength / weight ratio among metals, increasing their preference in these industries continuously. Casting, forging, powder metallurgy and machining methods are used in the process of shaping machine parts used in the aviation industry from superalloys. However, many components are mostly manufactured using machining methods due to the part geometry, desired size and surface quality requirements. In this context, in the production of parts from Ti alloys and Ni-based superalloys, which are difficult to process, the correct selection or optimization of processing parameters is very important in terms of minimization of processing costs and therefore sustainable manufacturing. In this study, factors such as cutting tool quality and cooling/lubrication technology were evaluated for criteria such as tool life, surface integrity and cutting forces, which have an important place in the machinability of titanium and nickel-based superalloys.

## Havacılık ve Uzay Endüstrisinde Kullanılan Titanyum Alaşımları ve Nikel Esaslı Süperalaşımların İşlenebilirliği Üzerine Bir Değerlendirme

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 20.05.2021

**Kabul:** 17.08.2021

**Anahtar Kelimeler:**

Havacılık

Titanyum

Süperalaşımlar

İşlenebilirlik

Kesici takım

Yüzey bütünlüğü

### ÖZET

Süperalaşımlar, üstün aşınma ve korozyon direnci gibi özelliklere sahip olduklarından havacılık ve uzay uygulamalarında sıkça kullanılan ve yüksek sıcaklık malzemeleri olarak da isimlendirilen malzeme grubudur. Ni esaslı süperalaşımlar, üstün sıcaklık mukavemeti ve tokluk, yüksek korozyon direnci, mükemmel yorulma ve sürünme dayanımı gibi mekanik ve fiziksel özelliklere sahip olduğundan havacılık ve uzay endüstrisinde Ti alaşımlarından daha sık kullanılmaktadır. Ti alaşımları ise metaller içerisinde en yüksek dayanım/ağırlık oranına sahip olması nedeniyle bu endüstrilerde tercih edilme grafiğini sürekli yukarıya taşımaktadır. Havacılık sektöründe kullanılan makine parçalarının süperalaşımlardan şekillendirilmesi sürecinde döküm, dövme, toz metalurjisi ve talaşlı imalat yöntemleri kullanılır. Bununla birlikte, parça geometrisi, istenilen ölçü ve yüzey kalitesi gereksinimlerinden dolayı birçok bileşen çoğunlukla talaşlı imalat yöntemleri kullanılarak imal edilmektedir. Bu bağlamda, işlenebilirliği zor olan Ti alaşımları ve Ni esaslı süperalaşımlardan parça üretiminde, işleme parametrelerinin doğru seçimi veya optimizasyonu işleme maliyetlerinin minimizasyonu ve dolayısıyla sürdürülebilir imalat açısından çok önemlidir. Bu çalışmada, titanyum ve nikel esaslı süperalaşımların işlenebilirliğinde önemli bir yeri olan takım ömrü, yüzey bütünlüğü ve kesme kuvvetleri gibi ölçütler için kesici takım kalitesi ve soğutma/yağlama teknolojisi gibi faktörler değerlendirilmiştir.

## 1. INTRODUCTION (GİRİŞ)

The quick growth in the aviation industry has laid the groundwork for the development of materials used in aircraft construction. The main factor is the reduction in weight and increased service life of aircraft components, resulting in lower costs. Therefore, a lot of research was done for improving materials by optimized properties to reduce weight, increase damage tolerance, fatigue and corrosion resistance. The main purpose of the continuous development of new materials in aviation applications is to increase fuel efficiency and performance, and to reduce costs. Since the selection of engineering materials for aerospace applications affects both economic and environmental topics, these materials are expected to have superior properties. Superalloys were first developed for military gas turbines during in the early 1950s. Since then, superalloys have been in continuous development and numerous new materials have been produced in this area. At the same time, superalloys are an valuable class of high temperature materials used in the strongest parts of jet and rocket engines where temperatures get to 1200-1400 °C [1].

On the other hand, high strength, hardness and toughness make it difficult to process these materials with traditional processing methods. These materials are used for a widespread variety of applications for instance power generation, high-tech automotive parts, especially in the aerospace industry [2]. Al, Ti, Mg and Ni-based alloys have become developable alloys for the aerospace industry thanks to their superior advantages [3]. Figure 1 shows the application areas of some superalloys. High temperature resistant alloys are the main resources used in the production of aviation-engine parts. These exotic superalloys are classified at four main categories: Nickel-based alloys, cobalt-based alloys, iron-based alloys, and titanium alloys. Iron-based superalloys contain significant amounts of Cr, Ni and very small amounts of Mo or W in addition to Fe. Fe-based superalloys and solid solution reinforced alloys are the weakest of superalloys owing to their low strength at high temperatures.

Classification	Features	Potential resource	Type	Application
Nickel based	High temperature creep, corrosion and thermal shock strength	Solid solution strengthened with Co, Cr, Fe, Mo, Ta, W, Re	Inconel 600, 625	Aviation and aerospace engine components
Cobalt based	Superior corrosion resistance and creep strength	Primary solid solution reinforcing Cr, W and Fe	Stellite Tristelle	The blades of the gas turbine and combustion elements. Nuclear energy reactor power plants
		Carbide Booster Ti, Hf, Ta and Nb	Tribaloy Vitalium	
Iron based	High corrosion resistance, high strength at lower temperature	Solid solution reinforcement $\gamma'$ precipitation hardening	Discaloy A286	Gas turbine disc and blades

Figure 1. Classification and application of superalloys (Süper alaşımların sınıflandırılması ve uygulanması) [4]

The biggest advantage of these alloys is that their price is more economical than other superalloys. They are also the easiest to process superalloys because they cannot maintain their strength at high temperatures, and contain higher amounts of nickel and chromium than stainless steels. Cobalt-based superalloys contain Co as the main element, with significant amounts of Ni, Cr, W and small amounts of Mo, Nb, Ta, Ti. At high temperatures, they show higher strength and thermal fatigue resistance compared to Fe and Ni-based superalloys, and excellent hot corrosion resistance with high Cr addition. Alternatively, Co-based superalloys are the most demanding type of superalloys in machining as they tend to have high hot hardness at high shear temperatures. It appears that two out of three of aircraft production is occupied by the aviation industry, especially for the production of aircraft engines, turbines, jet engines and related parts [5]. Aerospace

superalloys are usually found in cast, machined, forged and sinter forms (Figure 2). Parts generated by casting methods display excellent shear strength together with toughness. These properties produce machinability troubles thanks to low chip slicing. Forged and machined parts usually have high strength, superior fatigue and fracture resistance. More complex and almost net shaped parts are manufactured using powder metallurgy method. Parts in this production method present extremely low machinability and are very abrasive. In this review study, it is aimed to make a detailed evaluation on important machinability criteria such as superalloys that are critical in aerospace industry and insert materials, tool life, cutting environment and surface integrity, which are important for sustainable manufacturing.

Material type	Features	Machinability properties
Cast	Excellent shear strength	Chip breaking is difficult
Forging and Processing	Higher strength, superior fatigue and fracture strength	More abrasive, better tendency to deformation
Powder Metallurgy	More complex alloys can be produced, close to the net shape	Very low workability, very abrasive

Figure 2. Industrial processing techniques and properties of superalloys (Endüstriyel işleme teknikleri ve süper alaşımların özellikleri) [5]

## 2. SUPERALLOYS (SÜPERALAŞIMLAR)

In the aerospace industries, many models of superalloys, especially nickel and titanium, are used, which vary according to their usage areas. The main purpose of the alloying process is to optimize the material strength, its machinability properties and its strength at high temperatures. In aerospace practices, components must have a certain fault tolerance in both static and/or dynamic loads. To achieve this, existing traditional materials for instance steel and aluminum are being formed for the aviation industry. When developing new alloys, the goal is to increase endurance to crack expansion, environmental damage, creep stress and high temperature yield stress. The composition of current alloys and specific alloys widely used in aviation applications is shown in Figure 3 [6].

Airplane	Aluminum (weight %5)	Steel (weight %5)	Titanium (weight %5)	Other (weight %5)
Boeing 747	81	13	4	1
Boeing 747	78	12	6	1
Boeing 747	80	14	2	1
Boeing 747	70	11	7	1
DC-10	78	14	5	2
MD-11	76	9	5	2
MD-12	70	8	4	2

Figure 3. Current alloys for aircraft (Uçaklar için mevcut alaşımlar)

### 2.1. Titanium Alloys (Titanyum Alaşımları)

Ti alloys are structural materials widely utilized in the aviation industry, shipbuilding and chemical industries, turbo machines, machine and tool making, and medicine [7]. In addition to pure titanium, the alloys are widely used in medical products and implant production. These alloys are known to exhibit features such as superior biocompatibility, osseointegration, high wear and corrosion strength and superior compressive strength within the body [8]. The low thermal conductivity of the materials causes high temperatures in the cutting region. This temperature in the cutting region is high average 2.2 as much from AISI 1045 processing [9]. Demand for titanium is steadily improving in the aerospace industry, due to its outstanding weight-to-strength ratio and the



increasing need for electrochemical compatibility with composites in the field of aerospace. This alloys have superior mechanical properties, but they are hard-to-work materials with high chemical reactivity, low thermal conductivity, modulus of elasticity and production rates, as well as higher tool wear [10]. Modern aircraft designers, who widely use composite materials, also use certain proportions of titanium. Contrasted to aluminum, titanium is more consistent with composites in airplane designs / assemblies [11]. Titanium is resistant to flaking, stress corrosion and other alloy forms, from aluminum alloys, steels, etc. Titanium also resists corrosion factors by forming oxide in the surface layer in application environments. Titanium alloys are also frequently used in airframe subjected to air-kinetic heating due to its thermal stability [12]. In Figure 4, the application areas of the materials usually used in the sector and the modifications of the alloy are given by classifying them according to  $\alpha$ ,  $\alpha + \beta$ ,  $\beta$  type.

$\alpha$ titanium alloy	Applications
Ti-3Al-2.5V	When high pressure duct pipes of aircraft are produced with this alloy, they provide 40% weight savings compared to pipes made of steel. This alloy stands out with its acceptable corrosion strength, nice weldability and suitability to produce seamless hydraulic pipes.
Ti-5Al-2.5Sn [13]	Welded joints with good stability have oxidation resistance up to 1000 °F, making it suitable for manufacturing blades for aircraft and steam turbines. Its ability to maintain ductility and break toughness up to cryogenic temperatures allows this alloy to be used to store H <sub>2</sub> in the turbo pump of spacecraft.
Ti-6-2-4-2, Ti-5.5Al-3.5Sn-3Zr-1Nb- 0.25Mo-0.3Si	It is used to manufacture the RB211-535-E4 engine, spacers, blades and compressor discs of the Boeing 757 aircraft.
$\alpha + \beta$ titanium alloy	Applications
Ti-6Al-4V [13]	Approximately 80% of the total volume of Ti utilized in body parts (cladding panels, stiffeners, wing containers, spare parts, etc.) is produced of this alloy. It also has a large share by amount in jet engine components (60% of the total Ti) and aircraft bodies (80-90% of the total Ti). The impact resistance needed in cockpit glasses is supplied by this forged alloy. Forged alloy is widely used for rotor heads in helicopters of the BK117 and BK105.
$\beta$ titanium alloy	Applications
Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn [14]	Boeing 777 replaces the CP Ti material in conduit pipes, and the Boeing fuselage is significantly lighter Springs made of this alloy are less weight (up to 70%), less volume (up to 50%) and further corrosion strength than steel springs.

Figure 4. Titanium alloys and their application areas (Titanium alaşımları ve uygulama alanları)

*$\alpha$  titanium alloys:* The amount of  $\alpha$ -stabilizer elements in here separates into two classes as  $\alpha$ - $\alpha$  alloys and super  $\alpha$  alloys. The important reason for using  $\alpha$ -Ti alloys in engine parts used in aircraft is that they can retain their strength during most heat treatments.  $\alpha + \beta$  titanium alloys: Break toughness, superb shear strength, ductility of  $\alpha + \beta$  titanium alloys are better to  $\alpha$ -Ti alloys. The tensile and fatigue strength of these alloys are better to Ti-Ti alloys.  *$\beta$  titanium alloys:* Microstructural changes in the mechanical properties of  $\beta + \text{Ti}$  alloys through heat treatment allow the material to fit into the airframe parts, [13]. Especially Ti alloys in the  $\alpha + \beta$  phase are widely utilized in the human body because of their non-toxic and low allergenic characteristics. These lead to a better level of biocompatibility. Super elasticity and shape memory have become progressively more valuable features not only in bio-applications but also in distinct industries for instance automotive and aerospace [14]. Compared to other materials [29], titanium-based superalloys produced by traditional methods are relatively limited in production due to their relatively high cost and poor machinability [30]. An increasing number of specialty materials are obtainable in additive manufacturing technologies, involving titanium. Ti6Al4V alloy is typically utilized in the production of additive manufacturing parts using EBM (electron beam melting) technology [15].

## 2.2. Nickel-Based Superalloys (Nikel Esaslı Süper Alaşımlar)

The ability to retain high mechanical and chemical properties at elevated temperatures makes superalloys an excellent material for use in rotary and stationary components of jet engines. Components manufactured by superalloys are lighter than those produced from traditional steel. This means less fuel economy and a decline in pollution [16]. Approximately 50% by weight of aircraft engine alloys are nickel-based alloys [17]. These alloys present a higher strength / weight ratio than steel with higher density. The superalloys are an exceptional metal class with a combination of high temperature resistance, toughness and resistance to oxidizing environments [18]. Nickel-based superalloys are commonly applied in engine parts for instance engine compressor discs, turbine disc, bearing parts, housing, fins and other running parts [19–21]. In this context, advanced gas turbine engines are likely to achieve progressively upper levels of fuel budget, lower NO<sub>x</sub> emissions, lower noise and unit weight to meet the demand for life cycle costs in civil aeronautics. These challenges inevitably require that high pressure compressor and turbine disc rotors be made of materials that can withstand higher temperatures and stresses. High strength nickel-based superalloys are needed in the production of these critical parts, as the wrong material selection can threaten the safety of the passengers and the aircraft [22]. In terms of chemical composition, some nickel-based alloys can be classed as: (i) commercially pure Ni; (ii) Ni-Cu alloys; (iii) Ni-Mo alloys; (iv) Ni-Cr-Mo alloys and (v) Ni-Cr-Fe alloys. Proximate chemical structure and classic mechanical properties of the best known nickel-based alloys are given in Figure 5.

Nickel Alloy	Composition	General application in industry
	<i>Commercial Ni alloy</i>	
Ni-200	99Ni-0.2Mn-0.2F	Strong caustic
Ni-301	93Ni-4.5Al-0.6Ti	Fasteners, springs
	<i>Ni-Cu alloys</i>	
Monel 400	67Ni-31.5Cu-1.2Fe	Hydrofluoric acid
Monel K-500	63Ni-30Cu-3Al-0.5Ti	Fasteners, springs
	<i>Ni-Cr-Mo alloys</i>	
C-276	59Ni-16Cr-16Mo-4W-5Fe	Versatile CPI and pollution control
Inconel 625	62Ni-21Cr-9Mo-3.7Nb	Aviation industry
	<i>Ni-Cr-Mo alloys</i>	
Inconel 625	62Ni-21Cr-9Mo-3.7Nb	Nuclear waste
Hastelloy C-22	59Ni-22Cr-13Mo-3W-365-3Fe	Oxidation and reduction
Hastelloy C-2000	59Ni-23Cr-1.6Mo-1.6Cu-345	
	<i>Ni-Cr-Fe alloys</i>	
Inconel 600	76Ni-15.5Cr-8Fe	Nuclear waste
Inconel 690	58Ni-29Cr-9Fe	Nuclear waste

Figure 5. Approximate chemical compositions and applications of corrosion resistant nickel alloys (Korozyona dayanıklı nikel alaşımlarının yaklaşık kimyasal bileşimleri ve uygulamaları) [23]

50 percent of a plane engine is made by Inconel 718, which is the most commonly used Ni-Fe-Cr alloy [24]. It accounts for 25 and 45 percent of the yearly production volume for cast and machined nickel-based alloys, respectively [25]. Nickel-based superalloys cover 40-50 percent of engine weight in existing industrial aircraft and are used especially in the combustion and turbine segments in functioning temperatures surpass 1250 °C [26,27]. Commercially available and heavily used nickel-based alloys Inconel (587, 600, 625, 706, X750, etc.), Nimonic (75, 80A, 90, 263, PE 11, C-263, etc.), Rene (41, 95), Udimet (400, 500, 630, 700, etc.), Pyromet 860, Astroloy, Waspaloy, Unitemp AF2-IDA6, Cabot 214 and Haynes 230 [25]. Turbine wings and nozzle director blades are

formed by the complex casting method that can precisely control the grain boundary structure. Parts containing columnar grains manufactured by directional solidification (DS) casting generally have an operating temperature limit of about 25 °C higher than equivalent pieces. This is cause the grain boundaries of the DS fins are aligned near the main stretching path parallel to the size of the main foil [28]. Besides, adhesion, diffusion and oxidation wear of insert become more severe when machining nickel-based superalloys, and consequently tool life is shorter. For example, a one meter long nickel-based superalloy blade takes more than seven hours to rough and fine turning [29].

These alloys include the intermetallic combination Ni<sub>3</sub> (Al, Ta) in a nickel matrix with chromium, tungsten and rhenium as solid solution reinforcement elements. Here, tantalum increases high temperature and oxidation resistance, and it is alloyed with titanium to lessen the alloy's temperature. Thus, turbine blades made of this material can work at temperatures up to 520 °C [17]. Usually, the structure of nickel-based alloys is 38-76% Ni, up to 27% Cr and 20% Co by weight. In addition, these technical properties can be improved by adding refractory elements namely W, Ta and Mo. The amount of elements for instance Si, P, S, oxygen and nitrogen added to the alloy is regulated by the melting process. Conventional parts produced by casting from the alloys are turbine fins and brake discs [30]. In this method, the process is carried out with the highest level of precision in order to keep the machining processes to the lowest. Vacuum induction melting improves casting quality by disconnecting most of the rare elements from the alloy. In this context, turbine blade faults are mostly caused by vertical forces at the grain boundaries to which the weakest points of the structure are subjected [31]. This defect can be reduced or minimized by directional solidification casting. Structures with grain boundaries in the lengthwise trend to the forces operated by DS casting can be created. In addition, better parts can be manufactured using single crystal technique. Manufactured by single crystal or DS processes, these parts can operate at plus 250 °C higher than traditional polycrystalline blades [17]. Forged nickel-based alloys include approximately 10-20 percent by weight of Cr, up to 8 percent Al and Ti conjugated, 5-15% Co and Fe [25]. This type alloys offers moderately high temperature strength and well resistance to stress aging cracking at the weld. Since they have high strength suitable for working with turbine discs, their main usage field is the manufacturing of these turbine discs [30].

### **3. MACHINABILITY OF TITANIUM ALLOYS AND NICKEL BASED SUPERALLOYS (TİTANYUM ALAŞIMLARI VE NİKEL ESASLI SÜPERALAŞIMLARIN İŞLENEBİLİRLİĞİ)**

Machinability is the simplicity or complexity wherein a material can be processed in a variety of cutting conditions involving cutting speed, feed rate, and cutting depth [30]. It can also be defined as response size of the material machined with a particular tool that provides a suitable tool life, fine surface quality, and appropriate functional properties. The degree of machinability varies according to tool life, surface quality and the power consumption in the machining process [32]. On the other hand, the machinability can be evaluated mainly by measuring surface integrity and cutting force components during a cutting process.

Precision casting, forging and other modern manufacturing technologies are applied to produce machine parts by nickel-based and titanium alloys. But complicated alloys / materials cannot be simply produced employing these methods. For this reason, machining methods are used to manufacture complex quality elements required material / component design at reasonable costs nowadays. However, superalloys are known to be hard to process materials [33] by reason of their elevated temperature resistance, fast strain hardening, minimal thermal conductivity, and the existence of abrasive deposits in the structure [4,34]. At this point, it required the advancement of tools (carbides, ceramics and CBN) with superior thermal and chemical constancy for improving the machinability of aerospace alloys. Poor machinability of aircraft engine alloys exposes the tool

cutting edge to extreme thermal and mechanical pressures and these frequently cause rapid tool wear [30]. Usual cutting tool problems detected once machining air motor alloys are notching of the tip and / or cutting edge, side and crater wear, chipping, and breakage. Tools utilized to machine these alloys must have sufficient hot hardness to resist the high temperatures produced in higher speed [35]. High velocity machining of aircraft engine components is usually performed using coated carbide, ceramic and CBN / PCBN tools, but uncoated carbide are used in lower cutting velocity. Ceramic inserts exhibit low performances owing to their high wear amount by the high sense of titanium alloys with ceramic. For this reason, these types of insert are not preferred for processing titanium alloys [36,37].

When machining Ti alloys and Ni-based superalloys, fine and saw-tooth shaped chips are usually formed. Ni-based superalloys have an austenitic matrix and harden rapidly during machining like stainless steels. As a result, localization of the slip in the chip makes it difficult to remove the chip and generates abrasive saw-toothed sides [25]. These alloys also tend to link with the high temperature tool material produced during machining. The built-up edge (BUE) tendency in machining and the abrasive carbides in their structure undesirably influence machinability. These cause extreme temperatures and stresses in the cutting region and cause faster flank wear, cratering and chipping, dependent on the tool material and the cutting conditions [38]. Nickel-based superalloys harden by precipitation of a Ni<sub>3</sub> (Ti, Al) type  $\gamma'$  phase [39,40], titanium and aluminum can be used interchangeably. The machinability of these alloys is related to the chemical element content and heat treatment. Here, as the nickel content, which is the main element of nickel-based superalloys, the cutting temperature rises and the notch wear increases as the hardness increases, as shown in Figure 6. The chemical structure of superalloys should be related to hardness while deciding machining conditions [41], [42]. The hardness of Ni and Ti alloys rises considerably with heat treatment, so they are also called age hardening. Due to the creation of second phase units, the alloy is both robust and further abrasive, thus making it harder to machine. In this case, it is advantageous to process the material while it is soft [16]. Whenever possible, a positive insert is suggested for semi-final and final operations. Its positive geometry ensures efficient removal of chips from the workpiece. The grain size of the Inconel 718 was found to have little effect on flank wear, but notch wear was strongly associated with large grit [43]. Excitingly, the feed rate and grain size greatly influenced firstly tool wear and cutting force [44]. In addition, chip removing rate has been cited as one of the crucial machinability pointers to determine the cutting state, especially at high speed machining [45].

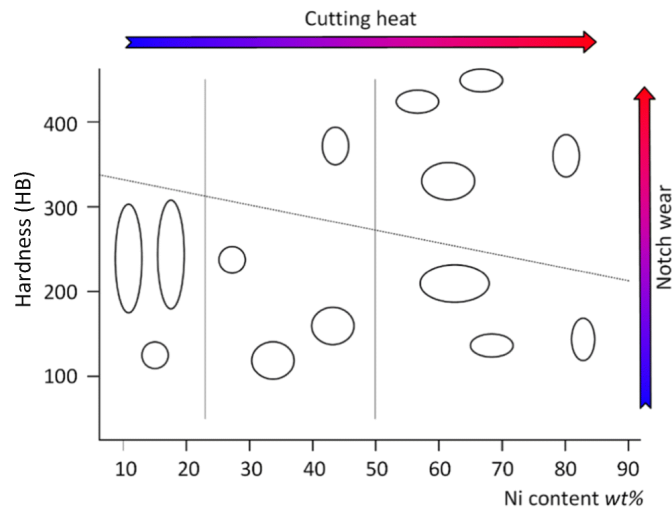


Figure 6. Machinability of superalloys (Süperalaşımların işlenebilirliği) [42]

Titanium alloys cover 30% of engine mass in the field of commercial and 40% in military [46]. The use of this material will increase with processing techniques that reduce faults that are harmful to the effective operation of the engine by early collapse of the relevant parts. One of the faults is the onset of fractures in the alloy that triggers structural breakdowns in the engine [30]. Machinability of nickel and titanium alloys can be improved using high concentration cooling technology, hot working, cryogenic machining, and the rotary tool technique [16]. The materials can be classified according to their machinability into (i) simple-to-work materials, (ii) conventional forged steels and iron, (iii) hard-to-work materials. When we create a category such as machinability index, it is possible to categorize such as surface properties, energy necessity, tool properties, chip morphology, bench and material hardness. Researchers face many difficulties in finding different ways to develop the material's workability without upsetting the industry's productivity and cost-cutting. As shown in Figure 7, there are many factors influencing the machinability of materials [47–49].

<b>Working material properties</b>	Microstructure	<b>Machine tools status</b>	Cutting tool material
	Grain size		Tool geometry
	Yield strength		Type of machining operation
	Tensile strength		Processing / cutting conditions
	Hardness		Processing features
	Chemical composition		Cutting fluid
	Young's modulus		Machine tool power
	Thermal conductivity		
	Thermal expansion		
	Working hardness		
	Fabrication		

Figure 7. Factors affecting machinability (İşlenebilirliği etkileyen faktörler) [48–50]

#### 4. EVALUATION FOR OUTSTANDING MACHINABILITY FACTORS (ÖNEMLİ İŞLENEBİLİRLİK FAKTÖRLERİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRME)

##### 4.1. Cutting Tool Material (Kesici Takım Malzemesi)

Advances in the cutting tool industry are becoming more and more promising to machine difficult-to-machine parts with ease and precision. Advanced cutting tools help optimize machinability. Because hard-to-machine materials need an advanced insert to endure high heat creation, toughness and impact resistance in machining [51]. Cutting tools utilized in the machining of superalloys have properties such as wear strength, excellent thermal shock, chemical consistency, high strength and toughness, efficient hot hardness at high temperatures at the cutting edge and workpiece [4]. In the machining of nickel-based superalloys and titanium alloys, uncoated and coated sintered carbide tools and ceramic and CBN tools are generally used in continuous cutting applications at high speeds [52]. In the machining of superalloys used in aviation, part size precision and surface impacts are largely dependent on the insert materials. Based on the properties of nickel-based superalloys, insert materials should usually provide the subsequent conditions;

- Good constancy, high oxidation and temperature resistance.
- Hardness and wear resistance.
- Adequate bending resistance and impact toughness.
- Good heat treatment and high thermal deformation performance.

- Insert materials often meet intense thermal and mechanical stress close to the cutting edge in machining [16].
- Coatings applied to tools increase the wear resistance of the insert against wear, loosening and friction.

Although the coating increases the cost, it can provide many more benefits due to the improvement of the tool performance [42]. The performance of various coating materials (TiCN / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / TiN, TiN / AlN, TiAlN) during turning of Inconel 718 in MQL was compared by Kamata and Obikawa. Results indicated that under MQL shear, TiCN / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> / TiN displayed the longest shear length at a shear rate of 3.6 km/h [53]. By applying nano-multilayer AlTiN / MexN PVD coatings to cemented carbide tools, a noticeably smaller friction coefficient is achieved at high temperatures. While nano-multilayer AlTiN / MoN coating is recommended for superior tool life once machining Inconel 718, AlTiN / VN coating is more suitable for machining TiAl6V4 alloy [54]. It has revealed that the nano-multilayer AlTiN / Cu coating is very functional in the processing of superalloy due to its proper combination of improved oiling properties and decreased thermal conductivity [55]. The nanocomposite coated cutting tool performed better than the AlTiN coating at higher speed conditions in the fine turning of the Inconel DA718 alloy. However, inserts with nanocomposite coating demonstrated a significant reduction in chip density, providing superior wear resistance [56]. There is a clear trend that coatings are being reformed from a single layer to multilayers, from macros to nanoscale, and from a single to multi-functional. Hence, research on the development of tool coating types, different processing technologies and their performance in cutting conditions continues to be important issues in the machining of superalloys.

#### **4.2. Cooling and Lubrication Technology (Soğutma ve Yağlama Teknolojisi)**

Chip flow and the lubrication between the tool-workpiece can be successfully provided by a cost-effective cooling technique through machining. Precise use of cooling maximizes process capacity, insert life and surface integrity [57,58]. Lubrication and cooling procedures have been used in industry for the past 200 years to overcome the problems arising through machining. Coolant is also linked with tool and mostly refers to styles normal wet, dry, minimum quantity of lubrication (MQL), high pressure cooling (HPC) and cryogenic types. The method considered environmentally friendly is the dry processing method. In dry cutting, the key reasons of tool wear are high cutting temperature and thermal shock, BUE formation, geometric deviations in processed parts, etc. It causes an rise in tool wear because of the quality of the processed surface [59]. Herein, a higher cutting temperature develops at high cutting speed, which reduces the strength of the workpiece material and also allows lower cutting force. A laser-assisted HSM in dry machining conditions was assessed using coated carbide, considering that a completely dry machining pattern was not suitable for machining superalloys [60]. The results revealed that the cutting force was significantly diminished, the surface quality was better by more than 25% and the MRR increased by about 800% compared to traditional machining [42]. However, their application areas are limited due to the geometric constraints and machining difficulties of cutting tools. Considering both the widespread use of a PCBN insert in the industry and its disadvantages, the coolant condition has attracted more attention from researchers. Dry and liquid cooling systems have shown that when tested at variable cutting BUE and flank wear are common wear patterns for cutting tools, but this is not always the case. Chip breaking is an important problem since there is no chip breaker in PCBN cutting tools. It deals with cutting parameters as well as tool geometry and grade. However, almost all of the factors cited as problems are not independent [42]. Conventional cutting fluids are shown in Figure 8. Water is often used as a suitable coolant to increase productivity in machining. Water-based fluids are preferred because of their low cost and heat conduction functionality [61]. In some

cases, water cooling is not an effective for chip removing and reduces machinability. Therefore, some additives are added to the water to overcome these problems and ensure efficient cooling. In severe cutting environments, compressed gas-based coolant or refrigerated pressurized fluids are used [59].

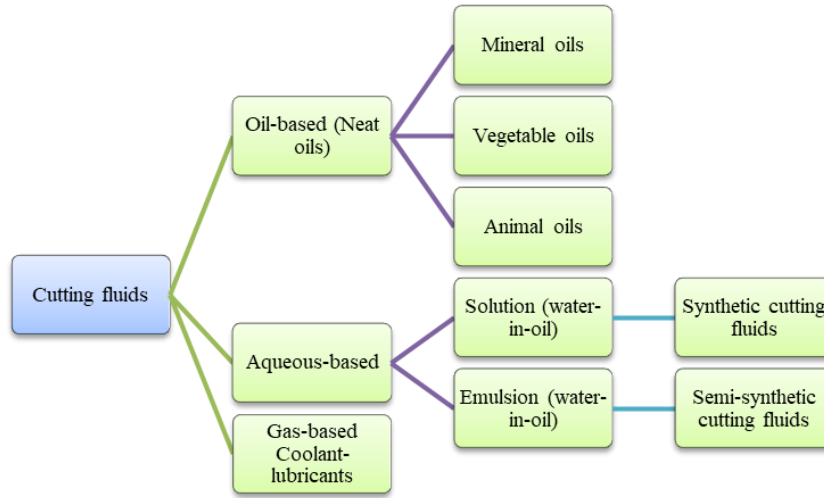


Figure 8. Traditional cooling types (Geleneksel soğutma tipleri) [62]

Cutting fluid is supplied in a variety of ways as soluble oil in cutting zone, vegetable oils, cryogenic coolants etc. The quantitative values of the flow rate are given in Figure 9. Machining close to MQL or dry machining has been used for years to address occupational hazards and environmental issues associated with coolant particles in the air. In this technique, coolant and minimum amount of lubricant are used in both areas. The blend of refrigerant and compressed air with the controlled flow is transmitted to the cut-off point through the pipe / nozzle. In the MQL, a little amount of vegetable lubricant or ecological synthetic ester is sprayed with compressed air in the tool chip interface [53]. In recent years, the use of nanoparticle fortified vegetable oils has found a widespread of applications and has taken its place among cooling technologies. The nanofluid has heat transfer ability, the effect of reducing friction coefficient and wear process to improve efficiency and reliability in machining. Nano-sized solid particles are added to water, oiling lubricants, etc. to improve the properties of lubricants or coolants. It is dispersed into base liquids such as. The excellent properties of the nanofluid are beneficial for cooling and lubrication in machining and reduce the friction coefficient [63]. Since nano liquid has convectonal transmission and wettability of cooling and lubricant, it especially reduces flank wear [64].

Cooling/Lubrication method	Cutting fluid/ Coolant	Flow rate
Dry	Without	N/A
Traditional cooling	Mineral, quasi-synthetic and synthetic-centered lubricants	0.5–10 L/min
MQL	Mineral, quasi-synthetic and synthetic and vegetable-centered lubricants	10–500 mL/hour
Cryogenic cooling	CO <sub>2</sub> ve LN <sub>2</sub>	0.3–4 kg/min
High pressure cooling	Mineral, quasi-synthetic and synthetic-centered lubricants	10–100 L/min

Figure 9. Characteristic of cooling lubrication methods (Soğutma yağlama yöntemlerinin karakteristiği) [65]

In current studies, it is recommended that cooling and lubrication methods are used in a minimum amount of cutting fluid in the processing of alloys used in the aerospace industry, within the scope of environmentally friendly and sustainable production. A cooling option with a minimum amount of coolant has been noted to be beneficial for processing Ti and Nickel alloys [66]. MoS<sub>2</sub> and graphite-centered nano-cutting liquids give good results at high cutting speeds, but graphite-based nano-fluids are improved in terms of good lubricating and cooling properties of their overall performance [67]. Although conventional coolants are not recommended to be used with ceramic tools because of their characteristics such as small thermal conductivity and shock resistance, the outcomes obtained using natural MQL are highly promising with regards to tool life and nose wear [68]. Air cooling is the method that provides safe and environmentally friendly processing that has attracted the attention of many academic and scientific researchers. When processing Ti6Al4V, the cutting forces increase due to the lower slip plane angle and chip temperature that occur when using cooled air cooling. However, tool wear and BUE formation decrease as a result of lower cutting forces contrasted to dry machining [69]. In the machining of Nimonic 80A alloy, flank wear occurred along the insert edge due to the abrasive mechanism and big BUE creation in dry cutting. Less BUE formation and longer tool life were achieved in air chilling and oil spray methods, and it was emphasized that the oil spray technique could be used as an alternative to the MQL method [70]. A recent study evaluated the overall performance of cooling approaches with a minimum amount of coolant when milling Ti6Al4V alloy. In this evaluation, it was specified that the CO<sub>2</sub>-snow cooling process performed better than the LN<sub>2</sub>, MQL and dry machining conditions, respectively [71]. In another study, the nanoagents protect the oil droplets, stopping the immediate release of cutting oil from the cutting area, resulting in better lubrication. However, a deterioration in tool lifecycle and surface roughness occurs with the rise of the hBN ratio in the cutting fluid [72].

## **5. EVALUATION FOR OUTSTANDING MACHINABILITY INDICATORS (ÖNEMLİ İŞLENEBİLİRLİK GÖSTERGELERİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRME)**

### **5.1. Cutting Forces (Kesme Kuvvetleri)**

The efficiency of the cutting process is determined by the cutting conditions (cutting speed, cutting depth and feed rate), cutting force that is affected by the shape of the cutting tool and the characteristics of the workpiece material. All methods of reducing cutting resistance extend tool life and improve the finish of machined parts. Cutting loads can be reduced by using textured tools in machining as described below [73]. Again, cutting resistance, which is likely to be directly affected by controllable and uncontrollable parameters during machining (feed, cut depth, cutting speed, insert geometry, chip shape, workpiece, temperature, etc.) has an impact on tolerance violations [74]. Additionally, in the force modelling, relative to chip flow direction is permitted better predictor of cutting forces when using round inserts as well as a third component. Cooling technologies also have an effect on the cutting force. For example, lower cutting forces in MQCL cutting conditions are due to lower friction forces at the tool/chip and tool/workpiece interfaces [75].

In addition, superior cooling and lubrication performances and light tool wear also help to generate lower cutting forces. In a study, it was stated that minimum residual stress and shear force could be obtained by using the MQL-SiO<sub>2</sub> nano lubrication system [76]. In another study, in according to the dry machining environment, it was stated that the cutting force was reduced by approximately 0.3 percent and 6 percent with NFMQL with a blend of BF-MQL and hBN [74]. The formation of chip segments with the complete breaking mechanism provided a high segmentation rate in the MQL condition. The chip thickness ratio measured in the flood and MQL is less than in dry cutting. As a result, it shows the need for lower energy consumption in the above mentioned



environments. On the other hand, the negative effects of the flood on the coating cause high cut forces in entire coolant conditions [77]. When using copper oxide-based nanofluid, the thin laminar structure creates less shear force and therefore lower shear temperature. [78]. Cryogenic cooling from the inside of the cutting tool with liquid nitrogen is further active than dry and conventional cutting oil applied end milling in producing appropriate machinability indicators such as lower force, improved surface texture and reduced cutting energy. Thus, the use of this cooling technology supports sustainability [79].

The use of coated or uncoated tools is another factor affecting cutting forces and thus machinability. The use of TiN/AlN multilayer coated tools resulted in a 9% reduction in surface roughness and cutting force [80]. Uncoated carbide cutting tool has greater cutting force than coated tool. In the study, a 39.79% lessening in cutting force was recorded when the coated tool was used when the highest cutting speed was selected. A higher insert temperature occurs in the coated tool than in the uncoated tool. At low cutting speed, the existence of adhering material and obvious friction marks were observed on the back surface of the chip [81]. Another factor affecting cutting forces is microstructure. In a study evaluating the cutting forces, especially when machining hard titanium alloys, thermal softening led to a reduction in yield stress when the temperature increased. Strain rate hardening also enhances the material hardness. The increase in hardness in machining also causes an rise in cutting forces [82]. In another study, the wavy cutting edge spent longer time in the cutting region than the standard helical cutting edge. In this case, the cutting force reduced the fluctuation range and improved the end milling dynamics [83].

## **5.2. Tool Life (Takım Ömrü)**

Factors affecting tool life during machining are cutting parameters, workpiece material and coolant. Tool life is investigated by wear evaluation as it is in reverse linked to each other. Wear mechanism and surface texture also significantly influence tool life. The friction at the cutting interfaces spoils the surfaces that are being formed and affects the wear (tool life) of the tool, which causes manufacturing costs. A hybrid cooling / lubrication technology reduces surface roughness with hybrid cooling, reducing friction between tool and workpiece [84]. Another important application used in extending tool life is cryogenic cooling. At the same time, having an environmentally friendly cooling feature allows the acceptance of fine cooling technologies [79]. When a tool life model based on tool wear has been developed, the said hybrid cryogenic MQL has 30 times longer insert life compared to machining with current liquid coolers. By using the hybrid cryogenic cooling system at low and medium cutting velocities, the longest tool life of 1198 minutes was obtained in thermomechanical tool wear [85]. In a study, the effective wear mechanisms in tool wear were specified as abrasive and adhesive wear. It was also found that among the four applications of coolant (liquid, dry, MQL, and nano-fluid MQL), the nano fluid gives better outcomes at various cutting parameters from the point of tool life and surface finish [86]. Coated carbide generally gives a longer tool life than an uncoated tool as it provides superior wear resistance, but this is not always true when applied with an incorrect coating and an unsuitable condition. For example, a GC3015 grade did not outperform an uncoated tool from the point of tool life at distinct cutting velocities and feed ratios, as long as the depth of cut did not exceed 1.0 mm [87]. The data reveal that increasing the cutting speed significantly reduces tool life and affects the coating on the tool. In general, coated tool has further tool life than uncoated tool material. Notch wear is a main problem when a ceramic tool has been used for the first time in a nickel-based superalloy machining experiment [88]. Notch and flank wear have been cited as major problems in dry turning of the Inconel 718 [89]. The problems in the ceramic cutting tool are strongly related to the cutting parameters. Notch, nose and flank wear mechanisms are seen in the machining of

superalloys with these tools. Nose wear was decreased by 50-65% and surface roughness under atomization-based coolant (ACF) was reduced by 39-51% due to solid lubricants that limit notch wear and tool edge breakage at the tool-chip interface [90]. Thinking the necessary properties of insert materials for machining nickel-based superalloys, ideally PCBN has a great application as it has an outstanding hardness at high temperatures. However, since these tools do not have chip breakers, there is a problem of chip breaking, and unbroken chips cause shortening of tool life or tool breakage [91]. A study examining the machinability of three different titanium alloys (Ti-64, Ti6264, Ti-5553) with carbide TiAlN-PVD coated and uncoated tools indicates that cutting tool wear is greater on uncoated inserts, indicating that the insert may be at elevated temperatures during machining. In addition, wear on the curved surfaces of the coated inserts operated in Ti-64 and Ti-6246 appears to be sticky in nature [92]. A research was performed on the chip removal performance of coated tools in milling of Ti6Al4V. In this research, the tool edge radius of uncoated, AlCrN centered, AlTiN centered and TiN coated end mills were 0.41  $\mu\text{m}$ , 0.90  $\mu\text{m}$ , 1.2  $\mu\text{m}$  and 1.5  $\mu\text{m}$ . According to the results, the wear of the uncoated micro end mill was high and chipping occurred on the cutting edge. The AlCrN centered coated mill set showed the maximum wear resistance [93]. A study on tool wear in milling of Ti-6Al-4V alloy using PVD and CVD coated tools was conducted. The cutting tool is coated with multi-layer TiAlN. It is stated that in tool wear, the effects of cutting depth on PVD and CVD coated inserts are more dominant, followed by cutting speed and feed rate [94].

### 3.4. Surface Integrity (Yüzey Bütünlüğü)

It is characterized by changes in surface integrity, topographical, mechanical and metallurgical properties of the surface. Ti alloys and Ni-based superalloys are one of the difficult materials to process due to their high temperature resistance, high speed deformation strengthening and small thermal conductivity, and the existence of finely structured abrasive precipitates. It is known that the processed surface structure has a great influence on the equipment performance of parts such as fatigue life, wear and corrosion strength, and is closely connected to cutting conditions. It was also found that the fine structure of the alloy produced by the laminating process, unlike casting and forging, also affects the surface finish of the laminated geographic feature after the laminating process [95]. As shown in Figure 10, classics related to surface topography (defects and roughness), microstructure changes (deformation, particle miniaturization and texture) and mechanical characteristics (fine hardness and residual stress).

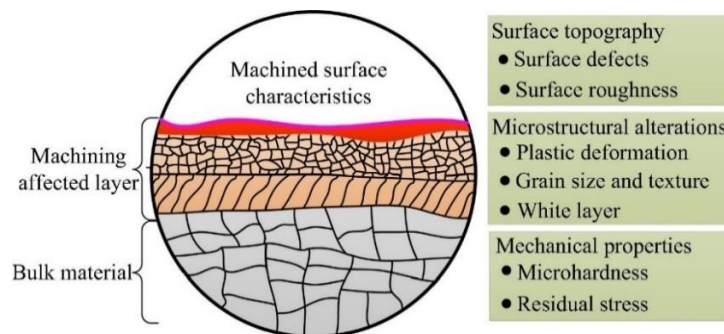


Figure 10. Scheme of machined surface integrity properties (İşlenmiş yüzey bütünlüğü özellikleri şeması) [96]

A variety of surface integrity analysis methods are used in the analysis of machined surfaces. A variety of tools and systems are used to measure and describe surface topography, as well as white light interferometric SEM and 3D laser imaging [97]. Three main systematic methods, including X-ray, mechanical earring, ultrasonic and magnetic method, and neutron diffraction method, are applied to regularly evaluate the residual stress of the treated surface [98]. Specially, the X-ray

procedure is thought one of the best sophisticated techniques. The depth gradient dispersal of remaining stress here is measured via electrolytic polishing, removing the substrate layer of material [99]. In one study, the surface integrity formed during high speed turning of two different nickel-based superalloys was evaluated using a CBN insert under jet flow cooling conditions. Surface faults occurred on the machined surface of the alloy, including carbide cracks, firing flow and contamination, which affected the coating of all cutting tools. In addition, high-precision deformation was observed under the surface of the alloy [100]. Besides cutting speed, feed rate and cutting depth, insert wear also has a major effect on the alteration of surface topography. This outcome is especially noticeable in the case of quick tool wear when machining Ti and Ni alloys [97]. The effect of deformation hardening, which means a rise in hardness and strength of a ductile metal during plastic deformation, on the behavior of the microstructure of Inconel 617 was examined. Unique models have been recommended to describe the plastic and deformation hardening behavior of this material. Among the five associations suggested for the characterization of deformation hardening parameters of metallic materials, it was stated that the one proposed by Ludwigson best fits the experimental data. In addition, the contact of dislocations with carbides and  $\gamma'$  particles has been clearly determined by transmission electron microscopy that they lead to high deformation hardening at 700 °C [101]. Surface materials processed by processing Ti and Ni alloys will increase deformation resistance and significantly reduce plasticity. This condition is called work hardening and is related to the effects of thermomechanical stress. [102]. Several studies have shown that hardening behavior is mostly dependent on grain size and plastic deformation, whilst softening behavior is associated with dynamic precipitation and recovery as well as cavitation formation [103]. Surface imperfections belong to a serious problem in micro-surface integrity. Regardless of other cutting parameters, worn cutting tools have higher surface damage than new tools. In a study, the formation mechanisms of surface faults machined in unique tool wear conditions were analyzed. Formed surface, which includes surface breaking, pits, tearing, hollows, side flow, smearing and surface burn, has been reported to be associated with high thermomechanical loads when thinking tool wear [97].

## **5. CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS (SONUÇ VE ÖNERİLER)**

In this study, Ni-based superalloy and Ti alloy, which are among the superalloys used in aerospace applications, have been introduced first. For these alloys, machinability factors such as cutting tool material, cooling/lubrication technology, and machinability indicators such as cutting force, tool life and surface integrity, which directly affect both the quality of the machined part and the machining costs, were evaluated.

Also known as elevated temperature materials, superalloys; nickel-based alloys, cobalt-based alloys, iron-based alloys and titanium alloys. Among these, it is striking that Ni-based alloys are used much more widely than Ti alloys and therefore more widely used in the aerospace industry. Since Ti alloys have the highest strength / weight ratio among metals, composite materials have found an increasing use in the aviation industry. These alloys, produced in three different alloy modifications of  $\alpha$ ,  $\alpha + \beta$ ,  $\beta$  type, have high corrosion resistance and chemical stability, excellent impact and abrasion resistance. Ni-based superalloys have mechanical and physical features such as superior temperature resistance and toughness, high corrosion resistance, excellent fatigue and creep resistance. Casting, forging, powder metallurgy and machining methods are used in the process of shaping components used in the aviation industry from superalloys. However, many components are mostly manufactured using machining methods due to the part geometry, the required size and surface quality requirements. On the other hand, superalloys are hard to process materials thanks to their great temperature resistance, quick strain hardening, low thermal

conductivity and the existence of abrasive deposits. In this context, it is seen that the researches made for improving the machinability of superalloys are increasing day by day.

In the studies on the processing of superalloys, it is observed that machinability indicators such as tool wear and life, surface integrity, cutting forces and surface roughness for machining operation type, coolant, cutting parameters and tool grade and geometry are evaluated. Cutting forces are one of the most important parameters to be determined for accurate machining. Optimization of other factors such as cooling/lubrication technology, tool life, energy consumption depends on the correct determination of cutting forces. Ceramic and CBN tools are used in the machining of Ti alloys and Ni-based superalloys, uncoated and coated inserts and continuous cutting applications at higher cutting speeds. It is seen that coating application with PVD and CVD technologies increases the cost of tooling, but it is seen that coated tools are used more widely due to the improvement of tool performance, but it is seen that nanocoating applications are increasing. When machining these alloys in dry cutting environment, high cutting forces and temperature, BUE creation on the cutting edge and high thermal-mechanical stresses cause rapid wear, especially in carbide tools. At the same time, these problems are the main causes of surface defects such as burning, tearing, micro cracks, increase in surface roughness, deformation hardening due to excessive plastic deformation, microhardness increase to a certain depth and residual stress formation on the processed material. With the correct selection or optimization of parameters for instance cutting speed, feed rate, cutting depth, insert geometry, these formations can be improved to some extent. Optimizing cutting forces will allow a more economical machining process to be prepared in the future. In this context, it is noticed that new cooling / lubrication technologies have been developed for enhancing tool life, keep surface integrity at the desired level and reduce machining costs. Depending on the type of processing, it is recommended to use techniques such as compressed air cooling, cryogenic cooling (LN<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>-snow), MQL and nano-fluid MQL. In particular, the industrial widespread use of MQL technology with numerous vegetable oil content will both reduce the use of lubricants in machining and will make significant contributions in terms of the damage caused by traditional cutting fluid to the operator and the environment. It seems possible to improve the machinability characteristics of superalloys with the correct selection and application of the cooling / lubrication system as well as the appropriate cutting parameters and cutting tool selection according to the material being processed.

## **REFERENCES**

1. M. Strandridge, *Aerospace Materials—Past, Present and Future*, *Aerosp. Manuf. Des.* 13: 2014.
2. K. Minet, A. Saharan, A. Loesser, N. Raitanen, *Superalloys, powders, process monitoring in additive manufacturing*, Elsevier Inc., 2019.
3. X.J. Wang, D.K. Xu, R.Z. Wu, X.B. Chen, Q.M. Peng, L. Jin, Y.C. Xin, Z.Q. Zhang, Y. Liu, X.H. Chen, *What is going on in magnesium alloys?*, *J. Mater. Sci. Technol.* 34: 245–247, 2018.
4. A. Tayal, N.S. Kalsi, M.K. Gupta, *Machining of superalloys: A review on machining parameters, cutting tools, and cooling methods*, *Mater. Today Proc.*, 2020.
5. S. Tools, *Turning difficult-to-machine alloys*, *Tech. Guid.* 21: 2002.
6. K. Jayakrishna, V.R. Kar, M.T.H. Sultan, M. Rajesh, *Materials selection for aerospace components*, in: *Sustain. Compos. Aerosp. Appl.*, Elsevier, 1–18, 2018.
7. X. Liu, P.K. Chu, C. Ding, *Surface modification of titanium, titanium alloys, and related materials for biomedical applications*, *Mater. Sci. Eng. R Reports.* 47: 49–121, 2004.
8. E.O. Ezugwu, Z.M. Wang, *Titanium alloys and their machinability—a review*, *J. Mater. Process. Technol.* 68: 262–274, 1997.
9. M. Storchak, P. Rupp, H.-C. Möhring, T. Stehle, *Determination of Johnson–Cook constitutive parameters for cutting simulations*, *Metals (Basel)*. 9(473): 2019.
10. N. Khanna, A. Garay, L.M. Iriarte, D. Soler, K.S. Sangwan, P.J. Arrazola, *Effect of heat Treatment Conditions on the Machinability of Ti64 and Ti54 M Alloys*, *Procedia CIRP.* 1: 477–482, 2012.

- 11.M.A. Imam, The 12 th World Conference on Titanium presents research and applications of “wonder metal,” JOM. 63: 16, 2011.
- 12.P. Singh, H. Pungotra, N.S. Kalsi, On the characteristics of titanium alloys for the aircraft applications, Mater. Today Proc. 4: 8971–8982, 2017.
- 13.S.M. Abbasi, A. Momeni, Effect of hot working and post-deformation heat treatment on microstructure and tensile properties of Ti-6Al-4V alloy, Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 21: 1728–1734, 2011.
- 14.A.M. Khorasani, M. Goldberg, E.H. Doeven, G. Littlefair, Titanium in biomedical applications—properties and fabrication: a review, J. Biomater. Tissue Eng. 5: 593–619, 2015.
- 15.S. Yoder, S. Morgan, C. Kinzy, E. Barnes, M. Kirka, V. Paquit, P. Nandwana, A. Plotkowski, R.R. Dehoff, S.S. Babu, Characterization of topology optimized Ti-6Al-4V components using electron beam powder bed fusion, Addit. Manuf. 19: 184–196, 2018.
- 16.E.O. Ezugwu, Key improvements in the machining of difficult-to-cut aerospace superalloys, Int. J. Mach. Tools Manuf. 45: 1353–1367, 2005.
- 17.S. Miller, Advanced materials mean advanced engines, Interdiscip. Sci. Rev. 21: 117–129, 1996.
- 18.T.M. Pollock, S. Tin, Nickel-Based Superalloys for Advanced Turbine Engines: Chemistry, Microstructure and Properties, J. Propuls. Power. 22: 361–374, 2008.
- 19.A. Günen, K.M. Döleker, M.E. Korkmaz, M.S. Gök, A. Erdogan, Characteristics, high temperature wear and oxidation behavior of boride layer grown on nimonic 80A Ni-based superalloy, Surf. Coatings Technol. 409: 126906, 2021.
- 20.A. Erdogan, T. Yener, K.M. Doleker, M.E. Korkmaz, M.S. Gök, Low-Temperature Aluminizing Influence On Degradation of Nimonic 80A Surface: Microstructure, Wear and High Temperature Oxidation Behaviors, Surfaces and Interfaces. 101240, 2021.
- 21.M.E. Korkmaz, M. Günay, Confirmation of Johnson-Cook Model Parameters for Nimonic 80A alloy by Finite Element Method, J. Polytech., 2019.
- 22.G. Kappmeyer, C. Hubig, M. Hardy, M. Witty, M. Busch, Modern machining of advanced aerospace alloys-Enabler for quality and performance, Procedia CIRP. 1: 28–43, 2012.
- 23.R.B. Rebak, Environmentally assisted cracking of nickel alloys -a review, Environ. Crack. Mater. 435–446, 2008.
- 24.A.R.C. Sharman, J.I. Hughes, K. Ridgway, Workpiece surface integrity and tool life issues when turning Inconel 718™ nickel based superalloy, Mach. Sci. Technol. 8: 399–414, 2004.
- 25.I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie, Machinability of nickel-base super alloys: a general review, J. Mater. Process. Technol. 77: 278–284, 1998.
- 26.R. Schafrik, R. Sprague, Gas turbine materials, Adv. Mater. Process. 5: 29–34, 2004.
- 27.S.L. Soo, R. Hood, D.K. Aspinwall, W.E. Voice, C. Sage, Machinability and surface integrity of RR1000 nickel based superalloy, CIRP Ann. 60: 89–92, 2011.
- 28.C. Ming, L. Xiaotian, S. Fanghong, X. Yucheng, X. Bingyuan, Studies on the grinding characteristics of directionally solidified nickel-based superalloy, J. Mater. Process. Technol. 116: 165–169, 2001.
- 29.D. Zhu, X. Zhang, H. Ding, Tool wear characteristics in machining of nickel-based superalloys, Int. J. Mach. Tools Manuf. 64: 60–77, 2013.
- 30.E.O. Ezugwu, J. Bonney, Y. Yamane, An overview of the machinability of aeroengine alloys, J. Mater. Process. Technol. 134: 233–253, 2003.
- 31.M. Zitnansky, J. Zrník, M. Martinkovic, Developing processes of property improvement of nickel base superalloys, J. Mater. Process. Technol. 78: 204–209, 1998.
- 32.E.M. Trent, P.K. Wright, Metal Cutting, Butterworth, Heinemann, 3rd Ed. Oxford, UK. 188(241): 1991.
- 33.M.E. Korkmaz, M. Günay, Experimental and Statistical Analysis on Machinability of Nimonic80A Superalloy with PVD Coated Carbide, Sigma J. Eng. Nat. Sci. 36: 1141–1152, 2018.
- 34.A. Thakur, S. Gangopadhyay, State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys, Int. J. Mach. Tools Manuf. 100: 25–54, 2016.
- 35.M. Rahman, W.K.H. Seah, T.T. Teo, The machinability of Inconel 718, J. Mater. Process. Technol. 63: 199–204, 1997.
- 36.B.M. Kramer, On tool materials for high speed machining, 1987.
- 37.F. Klocke, W. König, K. Gerschwiler, Advanced machining of titanium-and nickel-based alloys, in: Adv. Manuf. Syst. Technol., Springer, 7–21, 1996.
- 38.E.O. Ezugwu, A.R. Machado, I.R. Pashby, J. Wallbank, The effect of high-pressure coolant supply when machining a heat-resistant nickel-based superalloy, Lubr. Eng. 47: 751–757, 1991.
- 39.M.E. Korkmaz, P. Verleysen, M. Günay, Identification of Constitutive Model Parameters for Nimonic

- 80A Superalloy, *Trans. Indian Inst. Met.* 71: 2945–2952, 2018.
- 40.M.E. Korkmaz, M. Günay, P. Verleysen, Investigation of tensile Johnson-Cook model parameters for Nimonic 80A superalloy, *J. Alloys Compd.* 801: 542–549, 2019.
- 41.R. Arunachalam, M.A. Mannan, Machinability of nickel-based high temperature alloys, *Mach. Sci. Technol.* 4: 127–168, 2000.
- 42.W. Fan, W. Ji, L. Wang, L. Zheng, Y. Wang, A review on cutting tool technology in machining of Ni-based superalloys, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 110: 2863–2879, 2020.
- 43.S. Olovsjö, A. Wretland, G. Sjöberg, The effect of grain size and hardness of wrought Alloy 718 on the wear of cemented carbide tools, *Wear.* 268: 1045–1052, 2010.
- 44.H. Hayama, H. Kiyota, F. Itoigawa, T. Nakamura, Size effect in machining on initial tool wear in heat-resistant alloy cutting, in: *Key Eng. Mater., Trans Tech Publ*, 357–362, 2015.
- 45.D.G. Thakur, B. Ramamoorthy, L. Vijayaraghavan, Machinability investigation of Inconel 718 in high-speed turning, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 45(421): 2009.
- 46.Y. Honnorat, Issues and breakthrough in the manufacture of turboengine titanium parts, *Mater. Sci. Eng. A.* 213: 115–123, 1996.
- 47.K. Xu, B. Zou, C. Huang, Y. Yao, H. Zhou, Z. Liu, Machinability of Hastelloy C-276 using Hot-pressed sintered Ti (C 7 N 3)-based cermet cutting tools, *Chinese J. Mech. Eng.* 28: 599–606, 2015.
- 48.N.E.A. Kumar, A.S. Babu, Influence of input parameters on the near-dry WEDM of Monel alloy, *Mater. Manuf. Process.* 33: 85–92, 2018.
- 49.G.S. Krishnan, L.G. Babu, P. Kumaran, G. Yoganjaneyulu, J.S. Raj, Investigation of Caryota urens fibers on physical, chemical, mechanical and tribological properties for brake pad applications, *Mater. Res. Express.* 7(15310): 2019.
- 50.D. Johansson, S. Hägglund, V. Bushlya, J.-E. Ståhl, Assessment of commonly used tool life models in metal cutting, *Procedia Manuf.* 11: 602–609, 2017.
- 51.B. Satyanarayana, M.D. Reddy, P.R. Nitin, Optimization of controllable turning parameters for high speed dry machining of super alloy: FEA and experimentation, *Mater. Today Proc.* 4: 2203–2212, 2017.
- 52.A.R. Motorcu, Nikel esaslı süperalaşımaların ve titanyum alaşımlarının işlenebilirliği 1. bölüm: Sinterlenmiş karbür takımların performanslarının değerlendirilmesi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Fen Bilim. Derg.* 25: 302–330, 2009.
- 53.Y. Kamata, T. Obikawa, High speed MQL finish-turning of Inconel 718 with different coated tools, *J. Mater. Process. Technol.* 192: 281–286, 2007.
- 54.A. Biksa, K. Yamamoto, G. Dosbaeva, S.C. Veldhuis, G.S. Fox-Rabinovich, A. Elfizy, T. Wagg, L.S. Shuster, Wear behavior of adaptive nano-multilayered AlTiN/MexN PVD coatings during machining of aerospace alloys, *Tribol. Int.* 43: 1491–1499, 2010.
- 55.G.S. Fox-Rabinovich, K. Yamamoto, M.H. Aguirre, D.G. Cahill, S.C. Veldhuis, A. Biksa, G. Dosbaeva, L.S. Shuster, Multi-functional nano-multilayered AlTiN/Cu PVD coating for machining of Inconel 718 superalloy, *Surf. Coatings Technol.* 204: 2465–2471, 2010.
- 56.S. Capasso, J.M. Paiva, E.L. Junior, L. Settineri, K. Yamamoto, F.L. Amorim, R.D. Torres, D. Covelli, G. Fox-Rabinovich, S.C. Veldhuis, A novel method of assessing and predicting coated cutting tool wear during Inconel DA 718 turning, *Wear.* 202949, 432–433, 2019.
- 57.M. Danish, M.K. Gupta, S. Rubaiee, A. Ahmed, M.E. Korkmaz, Influence of hybrid Cryo-MQL lubricating strategy on the machining and tribological characteristics of Inconel 718, *Tribol. Int.* 163: 107178, 2021.
- 58.M.E. Korkmaz, M.K. Gupta, M. Boy, N. Yaşar, G.M. Krolczyk, M. Günay, Influence of duplex jets MQL and nano-MQL cooling system on machining performance of Nimonic 80A, *J. Manuf. Process.* 69: 112–124, 2021.
- 59.S. Deshpande, Y. Deshpande, A Review On Cooling Systems Used In Machining Processes, *Mater. Today Proc.* 18: 5019–5031, 2019.
- 60.H. Attia, S. Tavakoli, R. Vargas, V. Thomson, Laser-assisted high-speed finish turning of superalloy Inconel 718 under dry conditions, *CIRP Ann.* 59: 83–88, 2010.
- 61.Y.M. Shashidhara, S.R. Jayaram, Vegetable oils as a potential cutting fluid—an evolution, *Tribol. Int.* 43: 1073–1081, 2010.
- 62.S. Debnath, M.M. Reddy, Q.S. Yi, Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review, *J. Clean. Prod.* 83: 33–47, 2014.
- 63.J. Kananathan, M. Samykan, K. Sudhakar, S.R. Subramaniam, S.K. Selavamani, N.M. Kumar, N.W. Keng, K. Kadirgama, W.A.W. Hamzah, W.S.W. Harun, Nanofluid as coolant for grinding process: An

- overview, in: IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng., IOP Publishing, 12078, 2018.
- 64.H. Tyagi, P. Phelan, R. Prasher, Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector, *J. Sol. Energy Eng.* 131: 2009.
- 65.M. Sarikaya, M.K. Gupta, I. Tomaz, M. Danish, M. Mia, S. Rubaiee, M. Jamil, D.Y. Pimenov, N. Khanna, Cooling techniques to improve the machinability and sustainability of light-weight alloys: A state-of-the-art review, *J. Manuf. Process.* 62: 179–201, 2021.
- 66.M.K. Gupta, P.K. Sood, Machining comparison of aerospace materials considering minimum quantity cutting fluid: A clean and green approach, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.* 231: 1445–1464, 2016.
- 67.M.K. Gupta, M. Jamil, X. Wang, Q. Song, Z. Liu, M. Mia, H. Hegab, A.M. Khan, A.G. Collado, C.I. Pruncu, G.M.S. Imran, Performance Evaluation of Vegetable Oil-Based Nano-Cutting Fluids in Environmentally Friendly Machining of Inconel-800 Alloy, *Mater.* 12: 2019.
- 68.T. Kıvık, M. Sarikaya, Ç.V. Yıldırım, Ş. Şirin, Study on turning performance of PVD TiN coated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiCN ceramic tool under cutting fluid reinforced by nano-sized solid particles, *J. Manuf. Process.* 56: 522–539, 2020.
- 69.S. Sun, M. Brandt, M.S. Dargusch, Machining Ti–6Al–4V alloy with cryogenic compressed air cooling, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 50: 933–942, 2010.
- 70.M. Günay, M.E. Korkmaz, N. Yaşar, Performance analysis of coated carbide tool in turning of Nimonic 80A superalloy under different cutting environments, *J. Manuf. Process.* 56: 678–687, 2020.
- 71.S.C. Veldhuis, G.K. Dosbaeva, K. Yamamoto, Tribological compatibility and improvement of machining productivity and surface integrity, *Tribol. Int.* 42: 1004–1010, 2009.
- 72.Ç.V. Yıldırım, M. Sarikaya, T. Kıvık, Ş. Şirin, Tribology International The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns , tool life , roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel, *Tribology Int.* 134: 443–456, 2019.
- 73.V. Sharma, P.M. Pandey, Recent advances in turning with textured cutting tools: A review, *J. Clean. Prod.* 137: 701–715, 2016.
- 74.Ş. Şirin, M. Sarikaya, Ç.V. Yıldırım, T. Kıvık, Machinability performance of nickel alloy X-750 with SiAlON ceramic cutting tool under dry, MQL and hBN mixed nanofluid-MQL, *Tribol. Int.* 153: 2021.
- 75.S. Zhang, J.F. Li, Y.W. Wang, Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions, *J. Clean. Prod.* 32: 81–87, 2012.
- 76.N. Masmia, A.A.D. Sarhan, M.A.N. Hassan, M. Hamdi, Optimization of cutting conditions for minimum residual stress, cutting force and surface roughness in end milling of S50C medium carbon steel, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 86: 253–265, 2016.
- 77.R. J. A. N, A comprehensive investigation on the effect of flood and MQL coolant on the machinability and stress corrosion cracking of super duplex stainless steel, *J. Mater. Process. Technol.* 276: 116417, 2020.
- 78.A. Das, O. Pradhan, S.K. Patel, S.R. Das, B.B. Biswal, Performance appraisal of various nanofluids during hard machining of AISI 4340 steel, *J. Manuf. Process.* 46: 248–270, 2019.
- 79.M. Mia, Multi-response optimization of end milling parameters under through-tool cryogenic cooling condition, *Measurement.* 111: 134–145, 2017.
- 80.P.V. Badiger, V. Desai, M.R. Ramesh, B.K. Prajwala, K. Raveendra, Cutting Forces, Surface Roughness and Tool Wear Quality Assessment Using ANN and PSO Approach During Machining of MDN431 with TiN/AlN-Coated Cutting Tool, *Arab. J. Sci. Eng.* 44: 7465–7477, 2019.
- 81.G.C. Behera, J. Thrinadh, S. Datta, Influence of cutting insert (uncoated and coated carbide) on cutting force, tool-tip temperature, and chip morphology during dry machining of Inconel 825, *Mater. Today Proc.* 0–6, 2020.
- 82.M. Nouari, H. Makich, Experimental investigation on the effect of the material microstructure on tool wear when machining hard titanium alloys: Ti-6Al-4V and Ti-555, *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.* 41: 259–269, 2013.
- 83.A.A. Sultan, A.C. Okafor, Effects of geometric parameters of wavy-edge bull-nose helical end-mill on cutting force prediction in end-milling of Inconel 718 under MQL cooling strategy, *J. Manuf. Process.* 23: 102–114, 2016.
- 84.N.S.R. K, M. G, S. Anwar, M.A. Rahman, M. Erdi Korkmaz, M.K. Gupta, A. Alfaify, M. Mia, Investigation of surface modification and tool wear on milling Nimonic 80A under hybrid lubrication, *Tribol. Int.* 155: 106762, 2021.
- 85.A. Shokrani, I. Al-Samarrai, S.T. Newman, Hybrid cryogenic MQL for improving tool life in machining

- of Ti-6Al-4V titanium alloy, *J. Manuf. Process.* 43: 229–243, 2019.
- 86.A. Eltaggaz, P. Zawada, H.A. Hegab, I. Deiab, H.A. Kishawy, Coolant strategy influence on tool life and surface roughness when machining ADI, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 94: 3875–3887, 2018.
- 87.I.A. Choudhury, M.A. El-Baradie, Machining nickel base superalloys: Inconel 718, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 212: 195–206, 1998.
- 88.N. Richards, D. Aspinwall, Use of ceramic tools for machining nickel based alloys, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 29: 575–588, 1989.
- 89.K. Zhuang, D. Zhu, X. Zhang, H. Ding, Notch wear prediction model in turning of Inconel 718 with ceramic tools considering the influence of work hardened layer, *Wear.* 313: 63–74, 2014.
- 90.V. Sivalingam, Z. Zan, J. Sun, B. Selvam, M.K. Gupta, M. Jamil, M. Mia, Wear behaviour of whisker-reinforced ceramic tools in the turning of Inconel 718 assisted by an atomized spray of solid lubricants, *Tribol. Int.* 148: 106235, 2020.
- 91.M.Y. Wu, X. Zhao, W. Ji, Generation mechanism of saw-tooth chip in turning of GH4169 with PCBN tool, *J. Mech. Eng.* 52: 179–186, 2016.
- 92.A. Graves, M. Teike, S. Nogr, P. Crawforth, M. Jackson, The effect of Titanium Alloy Composition and Tool Coating on Drilling Machinability, *MATEC Web Conf.* 321: 13002, 2020.
- 93.Z. Liang, P. Gao, X. Wang, S. Li, T. Zhou, J. Xiang, Cutting performance of different coated micro end mills in machining of Ti-6Al-4V, *Micromachines.* 9: 2018.
- 94.R.I.R. Abdullah, B.I. Redzuwan, M.S. Abdul Aziz, M.S. Kasim, Comparative study of tool wear in milling titanium alloy (Ti-6Al-4V) using PVD and CVD coated cutting tool, *Ind. Lubr. Tribol.* 69 363–370, 2017.
- 95.J. Fei, G. Liu, K. Patel, T. Özel, Effects of Machining Parameters on Finishing Additively Manufactured Nickel-Based Alloy Inconel 625, *J. Manuf. Mater. Process.* 4(32): 2020.
- 96.X. Liang, Z. Liu, Experimental investigations on effects of tool flank wear on surface integrity during orthogonal dry cutting of Ti-6Al-4V, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 93: 1617–1626, 2017.
- 97.X. Liang, Z. Liu, B. Wang, State-of-the-art of surface integrity induced by tool wear effects in machining process of titanium and nickel alloys: A review, *Meas. J. Int. Meas. Confed.* 132: 150–181, 2019.
- 98.E. Brinksmeier, J.T. Cammett, W. König, P. Leskovar, J. Peters, H.K. Tönshoff, Residual Stresses — Measurement and Causes in Machining Processes, *CIRP Ann.* 31: 491–510, 1982.
- 99.C. Genzel, W. Reimers, Some new aspects in X-ray stress analysis of thin layers, *Surf. Coatings Technol.* 116–119, 404–409, 1999.
- 100.J. Zhou, Z. Chen, H. Persson, R.L. Peng, R. M'Saoubi, D. Gustasson, Comparative assessment of the surface integrity of AD730® and IN718 superalloys in high-speed turning with a CBN tool, *J. Manuf. Mater. Process.* 3: 2019.
- 101.C.V. Rao, N.C.S. Srinivas, G.V.S. Sastry, V. Singh, Effect of microstructure on work hardening behaviour of IN-617 alloy, *Mater. Sci. Eng. A.* 800: 140317, 2021.
- 102.D. Ulutan, T. Ozel, Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: A review, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 51: 250–280, 2011.
- 103.D.G. Thakur, B. Ramamoorthy, Effect of cutting parameters on the degree of work hardening and tool life during high-speed machining of Inconel 718, 483–489, 2012.



## Cr(VI) elektrokaplama banyolarının Cr(III) banyolarına dönüştürülmesinde etkin faktörlerin belirlenmesi

Ramazan Katırcı<sup>1\*</sup>, Abdulaziz Altınsarı<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Sivas Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Sivas, Türkiye,

<sup>2</sup>Karabük Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Karabük, Türkiye

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 10.06.2021

**Kabul:** 24.08.2021

#### Anahtar Kelimeler:

Cr(III) elektrokaplama

Cr(VI) elektrokaplama

banyosu

Kimyasal dönüşüm

Metal kaplama

### ÖZET

Krom (Cr) kaplama dekoratif ve fonksiyonel amaçlı yaygın biçimde kullanılmaktadır. Yüksek sertlik, parlak görünüm, mükemmel aşınma ve korozyon direncine sahiptirler. Cr(VI) toksik bir malzemedir. Bu yüzden Cr(VI) banyolarından elde edilen Cr kaplama, çalışan sağlığı ve çevre açısından büyük risk oluşturmaktadır. Bu yüzden benzer kalite ve özelliklere sahip, ayrıca toksik ve çevreye zararlı etkisi olmayan Cr(III) banyoları, Cr(VI)'ya iyi bir alternatiftir. Daha az zararlı ve kolay arıtılabilir olması tercih sebebidir. Bu makalenin amacı, mevcut Cr(VI) banyolarının uygun maliyetle Cr(III) banyosuna dönüştürülerek doğaya deşarjının önlenmesidir. Bunu sağlamak için 3 farklı firmadan Cr(VI) kaplama banyosu toplanmış, kimyasal dönüşüm yöntemi ile Cr(III) kaplama banyosuna dönüştürme çalışması yapılmıştır. Dönüşüm sırasında Cr kaplamanın kalitesini etkileyen önemli faktörleri belirlemek için deneysel tasarım metodolojileri uygulanmıştır. Ana faktörlerin etkilerini ve etkileşimlerini belirlemek ve dönüşüm sürecini optimize etmek için ½ kesirli faktöriyel deney tasarım metodu kullanılmıştır. Sonuçlar istatistiksel olarak değerlendirilmiş ve optimum dönüşüm parametreleri belirlenmiştir. İstatistiksel değerlendirme sonucunda girişkenliğe etki eden en önemli parametrenin kömürleme pH'ı olduğu gözlenmiştir. Bazik ortamda aktif kömürün ortamdaki safsızlıkları daha iyi uzaklaştırdığı tespit edilmiştir. Parlaklığa etki eden en önemli parametresinin ise Cr(III) kompleksleşme reaksiyon süresi olduğu bulunmuştur.

## Determination of effective factors in conversion of Cr(VI) electroplating baths to Cr(III) baths

### ARTICLE INFO

**Received:** 10.06.2021

**Accepted:** 24.08.2021

#### Keywords:

Cr(III) electroplating

Cr(VI) electroplating bath

Chemical conversion

Metal plating

### ABSTRACT

Chrome (Cr) plating is widely used for decorative and functional purposes. They have high hardness, bright appearance, excellent wear and corrosion resistance. Cr(VI) is a toxic material. Therefore, Cr coating obtained from Cr(VI) baths has a great risk in terms of employee health and the environment. Therefore, Cr(III) baths, which have similar quality and properties, and do not have toxic and harmful effects to the environment, are a good alternative to Cr(VI). It is preferred because it is less harmful and easily purified. The aim of this study is to convert existing Cr(VI) baths into Cr(III) baths at an affordable cost and to prevent their discharge into nature. In order to achieve this, Cr(VI) plating bath was collected from 3 different companies, and chemical conversion process was performed to convert it into Cr(III) plating bath. Experimental design methodologies were applied to identify the important factors affecting the quality of the Cr coating during conversion. The ½ fractional factorial experimental design method was used to determine the effects and interactions of the main factors and to optimize the conversion process. The results were evaluated statistically and optimum conversion parameters were acquired. As a result of the statistical evaluation, it was observed that the most important parameter affecting the throwing power was the the pH of activated carbon treatment. It has been determined that activated carbon in alkaline medium removes impurities better in the medium. It was found that the most important parameter affecting the brightness was the Cr(III) complexation reaction time.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Krom kaplama ticari olarak tüm dünyada yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem parlaklığı hem de korozyon direnci yüksektir. Ayrıca aşınmaya karşıda dirençlidir [1,2]. Krom kaplama (Sert krom, dekoratif krom) maalesef geleneksel Cr(VI) solüsyonlarından elde edilmektedir. Bilindiği gibi Cr(VI) banyoları hem toksik hem de kanserojendir [3]. Ciddi sağlık problemlerine sebep olması ve çevreye zarar vermesi nedeniyle ABD, Japonya, Avrupa gibi ülkelerde kullanımı sınırlandırılmıştır [4,5]. Cr(III) elektrokaplama banyolarından elde edilen krom kaplamalar Cr(VI) dan elde edilen kaplamalara önemli bir alternatiftir. Bu yüzden Cr(III) kaplamaların yaygınlaştırılması insan sağlığı ve çevre kirliliği açısından büyük önem arz etmektedir [6]. Bunu yapabilmek içinde Cr(III) kaplamanın hem ekonomik hem de işletim güçlüğü açısından uygun hale getirilmesi gerekiyor.

Cr(III) kaplama, Cr(VI)'ya kıyasla hem pahalı hem de işletimi daha zor bir prosestir. Cr(III) banyosu, sulu çözeltisinde doğrudan kaplanmaz. Çünkü Cr(III) iyonları kinetik olarak stabildir ve su ile  $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+3}$  kompleksini oluşturur [7,8]. Cr(III) iyonlarının indirgenme potansiyelini düşürmek için, formik asit, üre, asetat, glisin gibi kompleksleyici ajanların kullanılması gereklidir [9]. Kompleks ligandlar, Cr (III) iyonları ve su molekülleri arasındaki mesafeyi artırır ve Cr(III)- $\text{H}_2\text{O}$  kararlılığını bozar. Böylece Cr (III) iyonlarının katoda yaklaşmasını ve daha kolay indirgenmesini sağlar [10]. Organik kompleksler aynı zamanda, kaplamanın yüzey morfolojisinin geliştirilmesinde de önemli bir role sahiptir [8]. Ayrıca, Cr(III)'ün indirgenmesini zorlaştıran ikinci faktör, katottaki hidrojen gazı çıkışıdır. Suyun indirgenme potansiyeli  $[\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6]^{+3}$ 'den düşük olduğundan, katotta Cr kaplamasını önleyen aşırı hidrojen oluşumu gerçekleşir [1].

Cr(VI) kaplama banyosu bir veya daha fazla katalizör içermektedir. Cr (VI) banyolarında yaygın olarak kullanılan katalizörler sülfat ve florür içerikli bileşiklerdir. Florür katalizörü genellikle ortama silikaflorür ( $\text{SiF}_6^{-2}$ ) olarak eklenir. Sülfürik asit ve/veya sodyum sülfat, sülfat kaynağı olarak kullanılır [11,12]. Cr kaplama banyosunda kurşun, anot olarak kullanılır. Kurşun ağır metaldir, insan sağlığı ve çevre kirliliği açısından tehlikelidir [13].

Cr(VI) banyolarını Cr(III) banyolarına, kimyasal dönüşüm prosesi ile dönüştürmek mümkündür. Bu şekilde Cr(III) kaplamanın işletim maliyeti düşürülmüş ve daha ekonomik Cr(III) elektrokaplama banyosu elde edilmiş olur. Katırcı ve ekibi 2020 yılında Cr(VI)->Cr(III) dönüşümünü sağlayan proses geliştirmiştir. Bu çalışmada kimyasal dönüşüm prosesinde etkin faktörleri (aktif karbon, pH, kaynama süresi ve süzme işlemi) incelemişler ve kaplamanın parlaklığına, girişkenliğine, rengine ve siyahlığa etkileri araştırılmıştır. Ancak ön işlem aşamaları anlatılmamıştır. Ayrıca ön işlem aşamasında araştırılan faktörler ve sonuçları makalede yayınlanmamıştır [14]. Bu çalışmanın amacı bu sonuçları yayınlamak ve sektörel bilincin arttırılmasına katkı sağlamaktır. Böylece hem Cr(VI) kaplama banyosu atığının çevreye atılmasını önleyecek bilgi birikimi hem de mevcut Cr(VI) banyolarının Cr(III) elektrokaplama banyolarına dönüşümü için gerekli deneyim sektöre kazandırılmış olacaktır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

Cr(VI)'yı Cr(III)'e indirgeme aşaması sodyum metabisülfitle yapılmıştır. Atık Cr(VI) banyolarında metalik safsızlıkları uzaklaştırmak için alkali ortamda kimyasal yöntemle çöktürme işlemi uygulanmıştır. Banyo pH'ları sodyum hidroksit (NaOH) ve sülfürik asit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ile ayarlanmıştır. Kimyasal dönüşüm prosesi aşamasında kullanılan kimyasallar analitik kalitededir. Elektrokaplama işlemlerinde Hull-cell kullanılmıştır ve 55 °C de 2A 5 dk süreyle krom kaplama gerçekleştirilmiştir. Anot olarak grafit kullanılmıştır. Elektrolitik kaplama sonrası parlaklık ölçümleri MITECH TECHNOLOGY MG-268 model glossmetre cihazıyla yapılmıştır. Deney planları ve istatistiksel değerlendirmeler MINITAB 15 programı ile yapılmıştır. Standart bakır plaka üzerine yapılan krom kaplama tüm yüzeyi kaplamamaktadır (Şekil 1). Yüksek akım yoğunluğundan düşük akım yoğunluğuna doğru kaplama kalınlığı azalmaktadır. Düşük akım yoğunluğuna doğru yaklaşık 1-5 cm arasında kaplama almayan bölge oluşmaktadır. Kaplama almayan bölge cetvelle ölçülmüş ve girişkenlik değeri olarak belirlenmiştir. Burada en düşük değer en iyiyi en yüksek

değer ise en kötüyü temsil etmektedir. Değerlendirme ölçütü cetvelle ölçülen miktardır. Birimi santimetre (cm) dir.

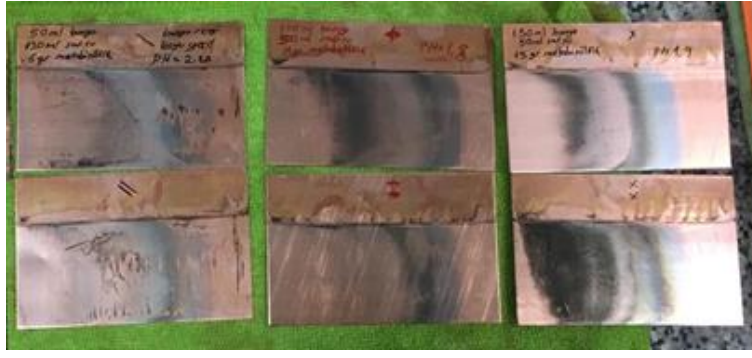


Şekil 1. Plakaların girişkenlik değerlerinin ölçümü (Measurement of the throwing power of the plates)

Cr(VI) banyosunun Cr(III) banyosuna dönüştürülmesi için iki aşama çok önemlidir. Bunlardan birincisi Cr(VI)'nın Cr(III)'e indirgenmesi için uygun kimyasalın seçilmesi, ikincisi ise çalışma sürecinde Cr(VI) banyosunda çözünen metalik ve organik safsızlıkların ortamdaki uzaklaştırılmasıdır. Cr(VI)'nın Cr(III)'e indirgeme aşamasında kullanılacak kimyasalın seçimi için literatür araştırmasından 3 kimyasal belirlenmiştir. Bunlar; hidrojen peroksit, metanol ve sodyum metabisülfittir. Full faktöriyel deney planları oluşturulmadan önce, klasik yöntemle Cr(VI)'nın Cr(III)'e indirgenme çalışmaları ve safsızlıkların ortamdaki uzaklaştırılması çalışmaları yapılmıştır.

İlk çalışmamızda hidrojen peroksit indirgeyici olarak kullanılmıştır. Ancak banyoda köpürmeler ve taşmalar meydana gelmiştir. Bu yüzden hidrojen peroksit kullanımından vazgeçilmiştir. İkinci olarak metanol indirgeyici kullanılmıştır. İndirgeme süresi 1 günden fazla sürdüğünden endüstride uygulanabilir bulunmamıştır. Üçüncü olarak literatürden metabisülfid kimyasalı tespit edilmiş ve indirgeyici olarak çalışmamıza dahil edilmiştir. İndirgemenin hızlı gerçekleşmesi ve banyoda herhangi bir taşma meydana getirmemesi sebebiyle bu kimyasal tüm çalışmamız boyunca kullanılmıştır. Ayrıca sodyum metabisülfidin banyoda yabancı atık bırakmaması da önemli bir avantajdır.

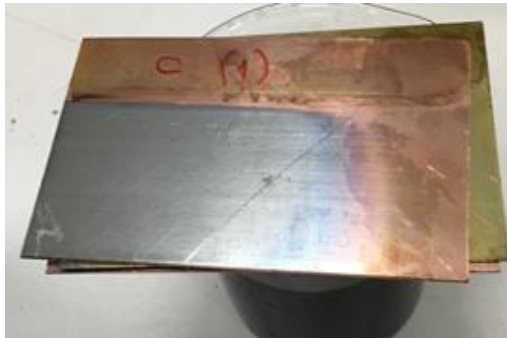
Krom banyosundan metalik safsızlıkların giderilmesi için selektif kaplama (dummy plating) ve çöktürme denemeleri yapılmıştır. Selektif kaplama hem uygulaması kolay hem de daha ucuz olduğu için öncelikli olarak çalışılmıştır. Selektif kaplama 1 amper akım 2 saat süreyle uygulanmıştır. Selektif kaplama işlemi sonrasında, Cr(III) kaplama banyosunda herhangi bir kaplama gözlenmemiştir (Şekil 2). Bu yüzden metalik safsızlıkları uzaklaştırmak için banyoda yüksek pH'da çöktürme işlemi yapılmıştır. Bunun için sodyum hidroksit ile pH 12'ye yükseltilmiş ve oluşan çökelek (bakır, nikel, demir) süzgeç kağıdında süzümüştür (Şekil 3). Süzme işleminden sonra indirgeme aşaması yapılmış ve gerekli kimyasalların ilavesinden sonra Cr(III) banyosu oluşturulmuştur. Bu işlem sonrası yapılan kaplamada Cr(III) kaplamanın yüzeyi önemli derecede iyileşmiştir (Şekil 4). Tüm krom kaplamalar bakır plaka üzerine yapılmıştır.



Şekil 2. Seçtif kaplama sonrası kaplama (Coating after the dummy plating)

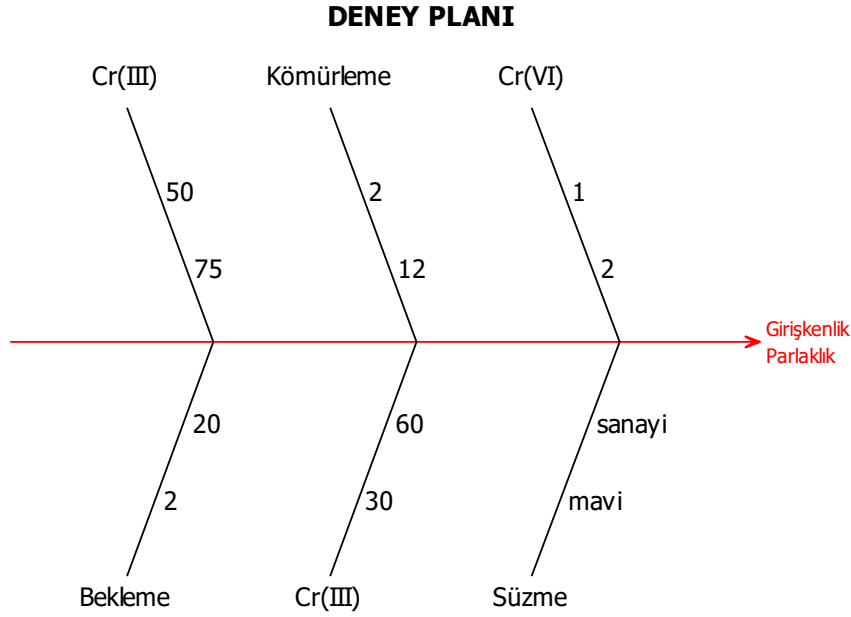


Şekil 3. Çöktürme işlemi için kurulan düzenek (The set up for the precipitation process)



Şekil 4. Metalik safsızlıkları çöktürme işleminden sonraki kaplama (Coating after the precipitation of metallic impurities)

Ön çalışmalarda hangi kimyasalın Cr(VI)'yı Cr(III)'e indirgediği ve safsızlıkların hangi yöntemle en iyi şekilde uzaklaştırıldığı belirlendikten sonra, kimyasal dönüşüm prosesinde etkin parametrelerin belirlenmesi için iki seviyeli  $\frac{1}{2}$  kesirli faktöriyel deney planları oluşturulmuştur. Ön deneysel çalışmalar ve literatür ışığında Şekil 5'te belirtilen parametreler, bağımsız değişkenler olarak, girişkenlik ve parlaklık parametreleri ise kalite değişkeni olarak belirlenmiştir. Deneyler tek tekrarlı olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5. Kalite değişkenleri (Girişkenlik, parlaklık) ve kaliteyi etkileyen bağımsız değişkenler, Kaynama Sıcaklığı (CrIII), Bekleme Süresi (saat), Kömürleme pH'ı, Kaynama Süresi (Cr(III), dk), Cr(III) pH, Cr(VI) kaynatma süresi (saat), Süzme (Quality variables (throwing power, brightness) and independent variables affecting quality, Boiling Temperature (CrIII), Waiting Time (hour), Carbonizing pH, Boiling Time (Cr(III), min), Cr(III) pH, Cr(VI) ) boiling time (hours), Filtering)

Farklı firmalardan toplanan Cr(VI) banyoları tek bir kapta toplanarak süzülmüştür. Süzme işleminden sonra Cr(VI) banyosundan organik safsızlıkları uzaklaştırmak için aktif kömürleme işlemi uygulanmıştır. Aktif kömür (toz) miktarı 4 g/L olarak belirlenmiştir. Kömürleme işlemi 1 saat 60 santigrat derecede yapılmış, işlem sonucunda sanayi tipi süzgeç kağıdıyla süzme yapılarak aktif kömür ortamdan uzaklaştırılmıştır. Aktif kömürle saflaştırma işleminden sonra sanayi banyolarında, 50-100 g/L arasında Cr metali olması beklenmektedir. Bu yüzden bunların miktarını belirlemek için volumetrik yöntem metodu kullanılmıştır. Analiz sonunda Cr miktarı 75-85 g/L olarak ölçülmüştür. Uzun süreli çalışmalarda anotta Cr(VI) iyonları oluşmaktadır. Bunu önlemek için normalde Ti/IrO<sub>2</sub> kaplı anot kullanılmaktadır. Ancak kısa süreli kullanımlarda Cr(VI) oluşması beklenmemektedir. Bu yüzden Hull-hücrelerinde kaplamalar 2 amper 5 dakikada ve grafit anot kullanılmıştır.

Minitab programına 6 parametre değişken olarak girilmiştir. 6 parametrenin klasik deney yöntemine göre tüm olasılıkların çalışılması için 64 deney düzeneği kurulması gerekmektedir. Ancak 1/2 kesirli faktöriyel deney tasarımı yöntemi kullanılarak deney sayısı 32'ye düşürülmüştür. Oluşturulan deney planı Tablo 1 de sunulmuştur. Her bir satır deney aşamasında değiştirilen parametreleri göstermektedir. Toplam 32 adet hull-cell çalışması yapılmıştır.

Tablo 1. 6 parametrelı ½ kesirli faktöriyel deney planı (½ fractional factorial experiment plan with 6 parameters)

Deney sırası	Cr6-kaynatma süresi (saat)	Süzgeç kağıdı tipi	Kömürleme (pH)	Kaynama Süresi, dk (CrIII)	Kaynama Sıcaklığı, °C (CrIII)	Bekleme Süresi (saat)
1	1	mavi	2	30	50	2
2	2	mavi	2	30	50	20
3	1	sanayi	2	30	50	20
4	2	sanayi	2	30	50	2
5	1	mavi	12	30	50	20
6	2	mavi	12	30	50	2
7	1	sanayi	12	30	50	2
8	2	sanayi	12	30	50	20
9	1	mavi	2	60	50	20
10	2	mavi	2	60	50	2
11	1	sanayi	2	60	50	2
12	2	sanayi	2	60	50	20
13	1	mavi	12	60	50	2
14	2	mavi	12	60	50	20
15	1	sanayi	12	60	50	20
16	2	sanayi	12	60	50	2
17	1	mavi	2	30	75	20
18	2	mavi	2	30	75	2
19	1	sanayi	2	30	75	2
20	2	sanayi	2	30	75	20
21	1	mavi	12	30	75	2
22	2	mavi	12	30	75	20
23	1	sanayi	12	30	75	20
24	2	sanayi	12	30	75	2
25	1	mavi	2	60	75	2
26	2	mavi	2	60	75	20
27	1	sanayi	2	60	75	20
28	2	sanayi	2	60	75	2
29	1	mavi	12	60	75	20
30	2	mavi	12	60	75	2
31	1	sanayi	12	60	75	2
32	2	sanayi	12	60	75	20

32 adet hull-cell çalışması sonucunda girişkenlik ve parlaklık parametreleri ölçülmüştür. İndirgeme ve saflaştırma aşamaları tamamlandıktan sonra, banyo içine Tablo 2 deki miktarlarda sakarin, malonik asit, sodyum sülfat ve borik asit ilaveleri yapılmış ve pH değeri ayarlanarak Cr(III) banyosu oluşturulmuştur [15]. Kompleksleşme oluşumu için Cr(III) banyosu iki farklı sürelerde (30 ve 60 dk) kaynatılmıştır. Bu şekilde Tablo 2'deki şartlarda 32 banyo oluşturulmuş ve her birinin 2 A 5 dk süreyle hull-cell plakaları çekilmiştir.

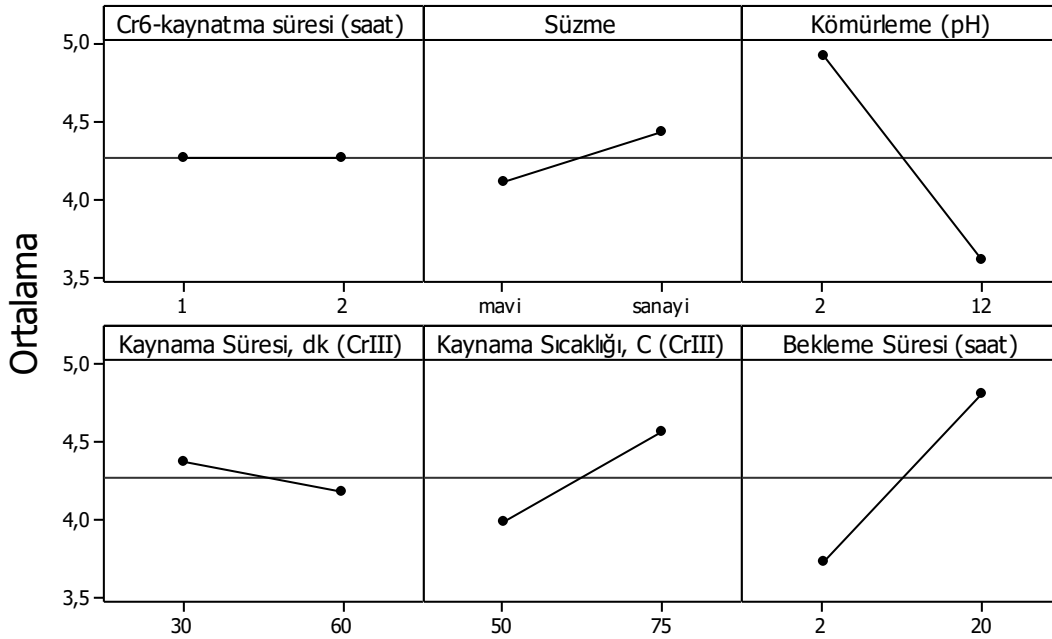
Tablo 2. Cr(III) banyosu formülü (Cr(III) bath formula)

KİMYASAL	MİKTAR
<b>Krom Sülfat</b>	10 g/L
<b>Sakarın</b>	20 g/L
<b>Malonik asit</b>	3 g/L
<b>pH</b>	3.5
<b>Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub></b>	150 g/L
<b>H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub></b>	60 g/L
<b>EHS</b>	1 mL/L

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Tablo 1'deki deneyler yapıldıktan sonra, ölçüm sonuçları Minitab programına girilmiştir. Minitab programında bağımsız değişkenlerin bağımlı değişkenler üzerindeki etkileri tablolar halinde çıkarılmıştır. Sonuçlar Şekil 6-9 da sunulmuştur. Bağımsız değişken olarak Cr(VI) kaynatma süresi, süzme (mavi veya sanayi tipi süzgeç kağıdı), aktif kömürleme pH'ı, Cr(III) banyosu kaynama süresi, Cr(III) banyosu kaynama sıcaklığı, Cr(III) banyosu oluşturulduktan sonra bekleme süresi belirlenmiş ve bunların girişkenlik ve parlaklığa etkileri araştırılmıştır.

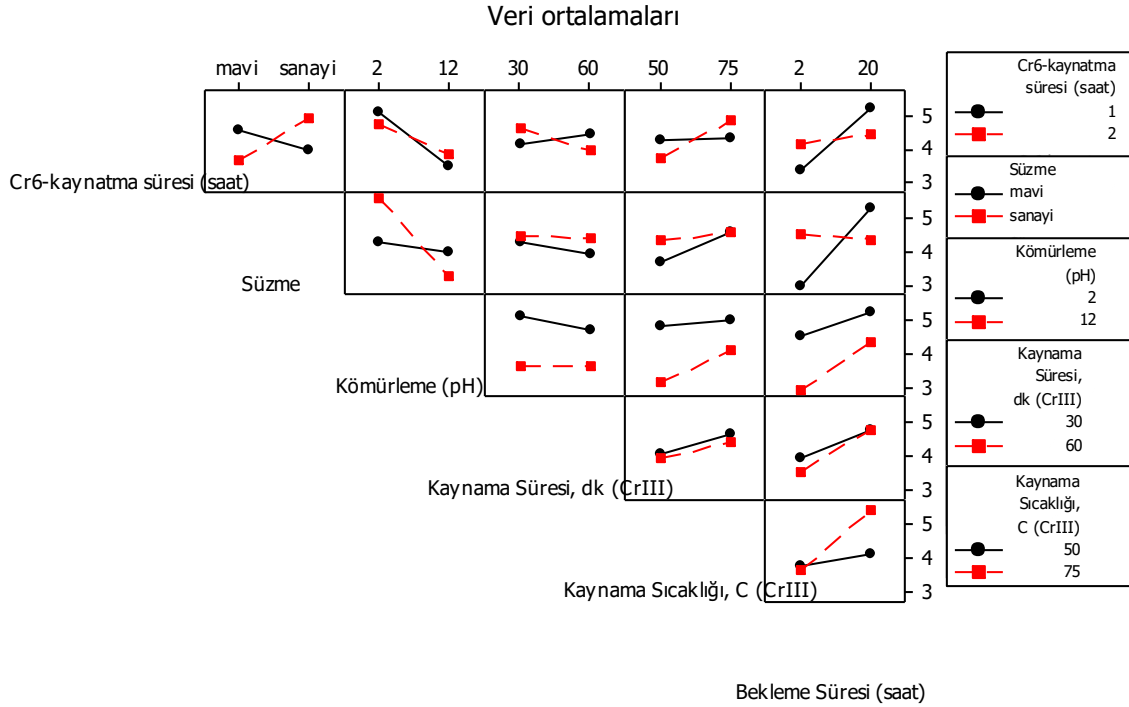
#### Veri ortalamaları



Şekil 6. Ana faktörlerin girişkenliğe etkisi (dik eksen girişkenlik miktarını göstermektedir. En düşük en iyidir) (The effect of main factors on throwing power (the vertical axis shows the amount of throwing power. The lowest is the best))

Şekil 6 incelendiğinde Cr(III) kaplamanın girişkenliğine en fazla etki eden parametrelerin kömürleme pH'ı ve bekleme süresidir. Bazı ortamda yapılan kömürlemenin Cr(III) kaplamaya olumlu yönde katkı yaptığı görülmektedir. Cr(III) banyosu oluşturulduktan sonra, kaplama öncesi bekleme süresi Cr(III) kaplamanın girişkenliğini azalttığı görülmektedir. Bu bize banyonun kararlılığının zamanla düştüğünü göstermektedir. Genel olarak şekil 6 yorumlandığında Cr(VI)

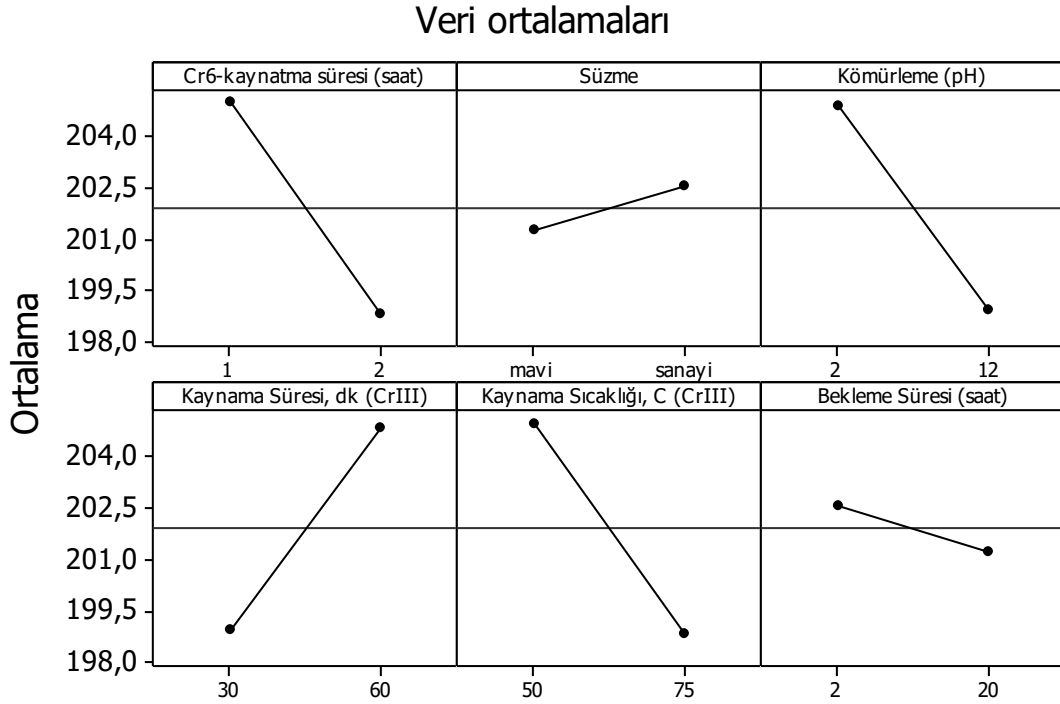
kaynatma süresinin, girişkenliğe bir etki etmediği, süzme işlemi sanayi tip süzgeç ile yapıldığında girişkenliği düşürdüğü, aktif kömürleme bazik ortamda (pH=12) yapıldığında girişkenliğin arttığı, kaynatma süresi 60 dakika olduğunda girişkenliğin arttığı, kaynama sıcaklığı yükseldikçe girişkenliğin düştüğü, bekleme süresi uzadığında girişkenliğin düştüğü görülmektedir.



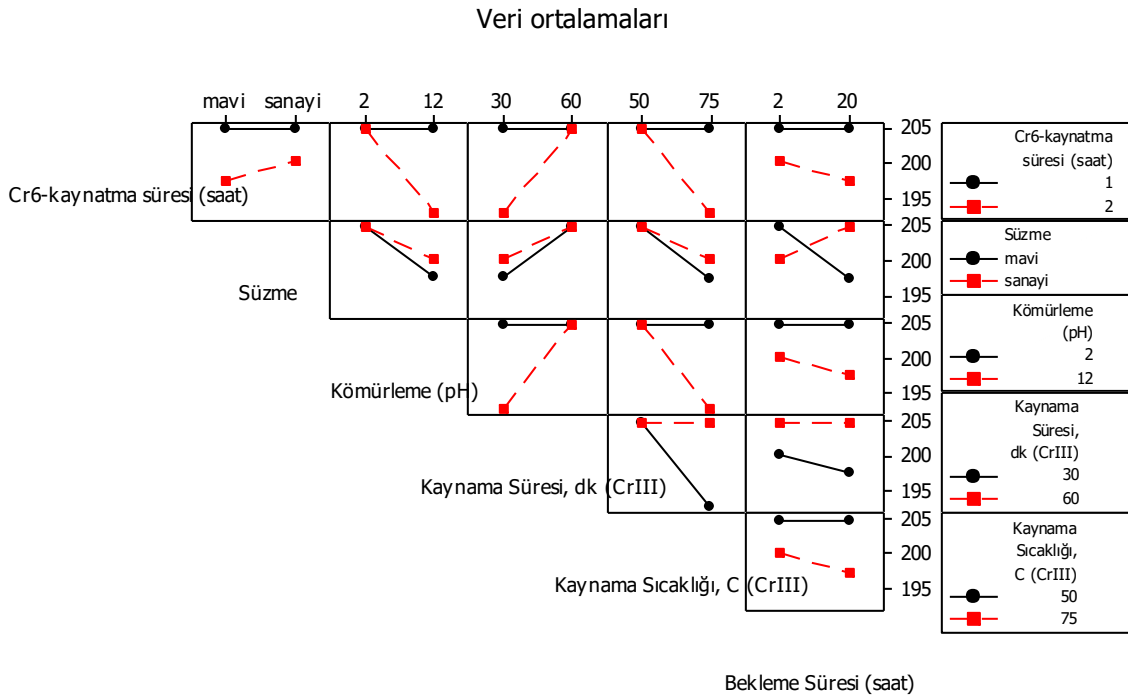
**Şekil 7.** Faktörlerin etkileşimleri (Dikey eksen girişkenliği, yatay eksen faktör değişimlerini göstermektedir) (Interactions of factors (Vertical axis shows throwing power, horizontal axis shows factor changes)).

Şekil 7 incelendiğinde Cr(VI) kaynatma süresinin banyonun stabilitesini artırdığı gözlenmiştir. Yani Cr(III) banyosu hazırlandıktan sonra bekleme süresi artsa bile Cr kaplamanın girişkenliği düşmemektedir. Kömürleme işlemi yüksek pH'da yapıldığında banyonun stabilitesi önemli derecede artmaktadır. Aynı şekilde süzme işlemi için sanayi kalite süzgeç kâğıdı kullanıldığında da banyo stabilitesi artmaktadır. Bunun sebebi mavi bant süzgeç kâğıdı banyoda faydalı kimyasalları tutuyor olabilir.





Şekil 8. Faktörlerin parlaklığa etkileri (Dikey eksen gloss cinsinden parlaklık değerini göstermektedir) (Effects of factors on the brightness (Vertical axis shows brightness value as gloss))



Şekil 9. Parlaklığa etki eden faktörlerin ikili etkileşimleri (Dikey eksen gloss cinsinden parlaklık değerini göstermektedir) (Bilateral interactions of the factors affecting the brightness (Vertical axis shows the brightness as gloss))

Şekil 8’de, temel değişkenlerin parlaklığa etkileri gösterilmiştir. Parlaklık ölçümleri universal değer olan 60° de yapılmıştır. Parlaklığın artmasına en yüksek pozitif etki yapan parametre Cr(III)

kompleksleme (kaynama süresi (CrIII)) süresidir. Kompleksleme süresi 60 dakika olduğunda maksimum parlaklık elde edilmektedir. Diğer parametrelerin parlaklığı azaltıcı etki yapmıştır.

Şekil 9, Cr(VI) kaynatma süresinin 1 saat ve kömürleme pH'ının 2 olduğunda banyo stabilitesinin önemli derecede arttığını göstermektedir. Diğer parametrelerin bozucu etkisi düşmektedir. Maksimum girişkenlik ve parlaklık için optimum değerler Tablo 3 de gösterilmiştir. Optimum girişkenlik ve parlaklık için, pH hariç diğer parametreler aynıdır. Yüksek girişkenlik için kömürleme pH'ının 12 de tutulması gerekirken, yüksek parlaklık için pH 2 de tutulması gerekmektedir. Yüksek parlaklık ve girişkenlik istenen bir durumdur. Bu yüzden bu iki şartında aynı anda sağlanabilmesi için optimum şartların oluşturulması önemlidir.

Tablo 3. Optimum girişkenlik ve parlaklık için, Cr(VI) banyosunun Cr(III) banyosuna dönüştürme şartları (Conditions for conversion of a Cr(VI) bath to a Cr(III) bath for optimum throwing power and brightness)

	GİRİŞKENLİK	PARLAKLIK
<b>Cr(VI) Kaynatma Süresi</b>	1 saat	1 saat
<b>Süzme</b>	Mavi Tip Süzgeç	Mavi Tip Süzgeç
<b>Kömürleme Ph</b>	12 (Bazik)	2 (Asidik)
<b>Cr(III) Kaynama Süresi</b>	60 dk	60 dk
<b>Kaynama Sıcaklığı</b>	50°	50°
<b>Bekleme Süresi</b>	2 saat	2 saat

Sanayiden elde edilen Cr(VI) banyolarının içeriğinin tam olarak çözümlenebilmesi mümkün değildir. Bu yüzden süzme, kömürleme gibi parametrelerin banyo içinde neleri değiştirdiği tam olarak tespit edilememektedir. Bununla beraber, bu grafikler yardımıyla kaliteye etkileri gözlemlenebilmektedir. Böylece kimyasal dönüşüm esnasında hangi parametrelerin, kalite değişkenlerine nasıl etki ettiği belirlenebilmektedir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada Cr (VI) banyosunun Cr(III) banyosuna dönüştürme aşamasında etkin faktörler araştırılmıştır. Dönüşümü etkileyen parametreler, kömürleme, pH 10 da Cr(VI) banyosunu kaynatma, süzme, Cr (III) banyosunun kaynama süresi, kaynama sıcaklığı ve bekleme süresi belirlenmiştir. Bu parametrelerin etkisi kesirli faktöriyel deneysel tasarım yöntemi ile incelenmiştir. Girişkenlik ve parlaklık kalite değişkenleri olarak belirlenmiştir. Girişkenliğe etki eden en önemli parametrenin kömürleme pH'ı olduğu gözlenmiştir. Aktif kömürleme işlemi, kaplama banyosundan organik ve inorganik safsızlıkları uzaklaştırmak için kullanılmaktadır. Aktif kömür, safsızlıkları yüzeydeki gözenekleri sayesinde adsorplayabilmektedir. Bazik ortamda aktif kömürün ortamdaki safsızlıkları daha iyi uzaklaştırdığı tespit edilmiştir. Parlaklığa etki eden en önemli parametresinin ise Cr(III) kompleksleşme reaksiyon süresidir. Reaksiyonun tamamlanması için sıcaklığın 50 °C de ve sürenin 60 dk'dan az olmaması gerekmektedir. Ancak bu sonuçlar laboratuvar şartlarında elde edilmiştir. Sanayi koşullarında 1-2 tonluk banyolarda uzun süre çalışıldığında nasıl tepki ile karşılaşılacağı bilinmemektedir. Bu ürünü sürdürülebilirliğini ölçmek için birkaç firmada 8-12 ay arası pilot çalışmaların yapıp, farklı parçalar üzerinde Cr kaplama denemelerinin yapılması gerekmektedir.

Sonuç olarak Cr(VI) banyolarından Cr(III) banyosu elde etmenin mümkün olduğu gözlenmiştir. Böylece doğaya, toksik Cr(VI)'yı deşarj etmeden, kimyasal dönüşüm sonrası kromu tekrar kullanmak mümkündür. Cr(VI) insan sağlığı üzerinde de çok önemli mesleki hastalıklara sebep olmaktadır. Resmi OSHA (Occupational Safety and Health Administration) web sitesinden alınan veriye göre, Cr(VI) maruziyetinin göz tahrişi ve hasarı, solunum yolu tahrişi, böbrek hasarı, karaciğer hasarı, solunum kanseri, dişlerde aşınma ve renk değişikliği, burun tahrişi gibi solunum yolu hastalıklarına sebep olmaktadır. Cr(VI) banyosunda, aşırı hidrojen gazı çıkışı olduğu için

Cr(VI) iyonlarını çalışma ortamına taşımaktadır. Çalışanlar iş ortamında solunum yoluyla bu iyonlara maruz kalmaktadır. Temas halinde ise alerjik hastalıklara sebep olmaktadır.



#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu proje Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'nun (TÜBİTAK) desteği ile gerçekleştirilmiştir (Proje no: 217M240).

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. M. Ehasanul Haque, M. Asadul Hoque, M. Mayeedul Islam, M. Saidul Islam, C. Mohammad Mustafa, R. Carlos Cardoso Martins, Effect of Various Operating Effect of Various Operating Parameters on Trivalent Chromium Electroplating, J. Sci. Res. Reports Nucl. Mater. Auth. Cairo, Egypt. Panagopoulos Tak. Sakon. 13: 1–9, 2017.
2. K.-S. Nam, K.-H. Lee, S.-C. Kwon, D.Y. Lee, Y.-S. Song, Improved wear and corrosion resistance of chromium(III) plating by oxynitrocarburising and steam oxidation, Mater. Lett. 58: 3540–3544, 2004.
3. A. Liang, Y. Li, H. Liang, L. Ni, J. Zhang, A favorable chromium coating electrodeposited from Cr(III) electrolyte reveals anti-wear performance similar to conventional hard chromium, Mater. Lett. 189: 221–224, 2017.
4. S. Ghaziof, K. Raeissi, M.A. Golozar, Improving the corrosion performance of Cr-C amorphous coatings on steel substrate by modifying the steel surface preparation, Surf. Coatings Technol. 205: 2174–2183, 2010.
5. S. Surviliene, V. Jasulaitiene, O. Nivinskiene, A. Češuniene, Effect of hydrazine and hydroxylaminophosphate on chrome plating from trivalent electrolytes, Appl. Surf. Sci. 253: 6738–6743, 2007.
6. C.W. Liao, H. Bin Lee, K.H. Hou, S.Y. Jian, C.E. Lu, M. Der Ger, Characterization of the Cr-C/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composite Coatings Electroplated from a Trivalent Chromium Bath, Electrochim. Acta. 209: 244–253, 2016.
7. J.-Y. Lee, M. Kim, S.-C. Kwon, Effect of polyethylene glycol on electrochemically deposited trivalent chromium layers, Trans. Nonferrous Met. Soc. China. 19: 819–823, 2009.
8. N. Van Phuong, S.C. Kwon, J.Y. Lee, J.H. Lee, K.H. Lee, The effects of pH and polyethylene glycol on the Cr(III) solution chemistry and electrodeposition of chromium, Surf. Coatings Technol. 206: 4349–4355, 2012.
9. S. Surviliene, O. Nivinskiene, A. Češuniene, A. Selskis, Effect of Cr(III) solution chemistry on electrodeposition of chromium, J. Appl. Electrochem. 36: 649–654, 2006.
10. Z. Zeng, Y. Sun, J. Zhang, The electrochemical reduction mechanism of trivalent chromium in the presence of formic acid, Electrochem. Commun. 11: 331–334, 2009.
11. C. Fink, Process of electrodepositing chromium and of preparing baths therefor, Patent no:1,581,188, 1926.
12. C. Fink, Process of producing chromium-plated articles with mirrorlike scratch finish or the like surfaces, Patent no:1,802,463, 1931.
13. C.J. Abner Brenner, Polly Burkhead, Physical Properties of Electrodeposited Chromium, Part J. Res. Natl. Bur. Stand. Phys. 40: 31–59, 1948.
14. R. Katirci, A. Altınsarı, The conversion of the waste Cr(VI) electroplating bath to Cr(III) electroplating bath, Int. J. Environ. Sci. Technol. 17: 4205–4216, 2020.
15. R. Katirci, A chrome coating from a trivalent chromium bath containing extremely low concentration of Cr<sup>3+</sup> ions, Int. J. Surf. Sci. Eng. 10: 73-85, 2016.

## Effect of Mn and Zr Addition on Microstructure, Wear and Corrosion Behavior of Ti-6Al-4V Composite Biomaterials Produced by Powder Metallurgy

Harun Çuğ<sup>1,\*</sup> , Mohamed E. E. Erhaima<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Karabük University, Engineering Faculty, Karabük, Turkey

<sup>2</sup>Karabük University, Graduate Education Institute, Karabük, Turkey

### ARTICLE

#### INFORMATION

Received: 09.08.2021

Accepted: 26.08.2021

#### Keywords:

Ti-6Al-4V

Composite

Wear

Corrosion

### ABSTRACT

In this study, composite biomaterials were produced by powder metallurgy (P/M) method. Ti-6Al-4V master alloy and different proportions of Mn and Zn have been added to this alloy. Dry wear test and electrochemical corrosion test in Hank fluid (Body fluid) were applied to the produced composite P/M materials. The addition of Mn in the produced materials was effective in improving the wear behavior of the Ti-6Al-4V composite material. In addition, the addition of Zr provided excellent corrosion resistance in Hank's solution. The superior properties of Ti-6Al-4V composite material with its microalloy approach are quite challenging for biomedical applications. The best wear resistance was achieved by adding 2%Mn to Ti-6Al-4V by weight. In addition, it was observed that the phases formed as a result of the addition of 2% Zr act as a barrier during corrosion.

## Toz Metalurjisi ile Üretilen Ti-6Al-4V Kompozit Biyomalzemelerin Mikroyapı, Aşınma ve Korozyon Davranışlarına Mn ve Zr İlavesinin Etkisi

### MAKALE BİLGİSİ

Alınma: 09.08.2021

Kabul: 26.08.2021

#### Anahtar Kelimeler:

Ti-6Al-4V

Kompozit

Aşınma

Korozyon

### ÖZET

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi kompozit biyomalzeme üretimi yapılmıştır. Ti-6Al-4V master alaşımı ve bu alaşıma farklı oranlarda Mn ve Zn ilave edilmiştir. Üretilen kompozit malzemelere kuru aşınma deneyi ve Hank sıvısı (Vücut sıvısı) içerisinde korozyon testi uygulanmıştır. Üretilen malzemelerde Mn ilavesi Ti-6Al-4V kompozit malzemenin aşınma davranışını iyileştirmede etkili olmuştur. Ayrıca Zr ilavesi Hank çözeltisinde 37°C'de mükemmel korozyon direnci sağlamıştır. Mikroalaşım yaklaşımı ile Ti-6Al-4V kompozit malzemenin üstün özellikleri, biyomedikal uygulamalar için oldukça iddialıdır. En iyi aşınma direnci ağırlıkça %2Mn Ti-6Al-4V ilavesiyle oluşturulmuştur. Ayrıca %2Zr ilavesi sonucu oluşan fazların korozyon esnasında bariyer olarak görev yaptığı görülmüştür.

## 1. INTRODUCTION

Titanium (Ti) composite materials have achieved admirable recognition in the last couple of decades by engineering applications such as biomedical and vehicle parts because of their superior corrosion resistance and outstanding mechanical properties in different environmental conditions [1]. The production of Ti composite materials are encountering some problems as regard manufacturing cost that resulted from their high melting point during casting, multiple processes along with shaping and design hindrance [2]. Powder metallurgy (PM) is the alternative production method to solve mentioned problems and makes economically complex-shaped parts simply for engineering applications [3]. To improve the mechanical properties of Ti composite materials Zr has been added to  $\beta$ -type Ti composite materials which present close young modulus values of human bone thus limiting the stress shielding effect during service time [4]. As to Ti-6Al-4V, it is the most used Ti composite materials for especially biomedical parts, the improving the corrosion resistance of Ti-6Al-4V was studied by elements such as Si [5], V [6], Mo [7] and Nb [8]. The

\* Corresponding author, e-mail: hcug@karabuk.edu.tr

<https://doi.org/10.52795/mateca.980472>

controlling of corrosion attacks by composite material elements could be accomplished by the composition amount, phase types and changing of microstructure [9]. Moreover, stable oxide particles make an important role to diminish the rate of corrosion as the passive layer occurs on the surface [10]. Many studies have been reported about the effect of the Zr on the corrosion resistance of Ti base composite materials [11-13]. However, the little report was published about Ti-6Al-4V composite materials among these literatures [14, 15]. As for Mn, it is stable on the microstructure that is suppressing the  $\beta$ -type phase thanks to the solid solution hardening effect [16]. Moreover, it is an essential element for human life to continue during daily life. Furthermore, it has similar effects with base Ti because cell viability is exceptional when the amount in the composition below 13% [17]. In this study, the Ti-6Al-4V materials produced by the PM method where the both Mn and Zr amount are determined with 0.5, 1 and 2 in wt% to be added. The electrochemical behavior of Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4V-xMn and Ti-6Al-4V-xZr was investigated in Hank's solution at 37 °C. The dry wear test of produced composite materials was accomplished at 25°C. To observe the microstructure, scanning electron microscopy (SEM) was utilized that supported by energy dispersion spectrometer (EDS).

## 2. MATERIAL AND METHOD

Ti-6Al-4V-xMn and Ti-6Al-4V-xZr composite materials (x=0, 0.5, 1 and 2 wt%) were produced by powder metallurgy method, where titanium powder (99.7%, d <149  $\mu$ m, Nanografi), aluminum (91%, d <50  $\mu$ m, Nanografi), vanadium (99.5%, d <44  $\mu$ m, Nanografi), manganese (99.5%, d <44  $\mu$ m, Nanografi) and zirconia (99.5%, d <44  $\mu$ m, Nanografi) for Ti6Al4V alloy powders were used. The produced composite materials labeled as base, 0.5Mn, 1Mn, 2Mn, 0.5Zr, 1Zr, 2Zr for Ti-6Al-4V, Ti-6Al-4V-0,5Mn, Ti-6Al-4V-1Mn, Ti-6Al-4V-2Mn, Ti-6Al-4V-0,5Zr, Ti-6Al-4V-1Zr and Ti-6Al-4V-2Zr, respectively. Powder metallurgy was used to manufacture the investigated composite materials. Mixing was carried out on a rocking mill machine for 60 minutes; In addition, 0.15 g of the lubricant oil was applied to evenly distribute the supplements in the Ti powder. The sintering temperature is applied at 800 C. The compact was sintered at 800 C for 1.8 ks at a pressure of 20 MPa under a vacuum of 4 Pa. The resulting sintered billet has a diameter of 8 mm and a height of 12 mm. These conditions were the same for all sample preparation.

The microstructure of investigated composite materials were characterized by scanning electron microscopy (SEM, Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem) where, metallographic techniques such as grinding and polishing were applied with the end of mirror surface after that etching is performed by Kroll's reagent (80H<sub>2</sub>O, 15 ml of HNO<sub>3</sub> and 5 ml of HF).

Electrochemical corrosion testing was performed for the Ti-6Al-4V-xMn and Ti-6Al-4V-xZr composite materials (8mmx8mm) at temperature of 36.5°C. Potentiodynamic tests were performed with parstat 4000 potentiostat machine which based on the three electrode setup, where specimens, Ag / AgCl ( 3.5 mol KCl ) and a pair of graphite rods are the working electrode, reference electrode and counter electrode, respectively. The sample preparation was accomplished by following procedure. Firstly, the samples were grinding by 2500 grit SiC and polished with diamond suspension of 3 $\mu$ m. Secondly, the surface cleaning was finished by ultrasonic cleaning in acetone and deionized water. The test duration is determined as 900s at a scan rate of 2 mV / s in a scanning interval of -0.75 V vs. Ag/AgCl to +0.50 V vs. Ag/AgCl. Hank's solution [18] is applied as a corrosive environment.

Wear tests carried out at 25°C. 8 mm bulk materials were exposed to wear along 40 m under load 60 N (6kg) with 0,5mm/s wear speed at 25 °C according to ASTM-G133 which was conducted in a tribometer. The counterbody component was steel AISI 52100 (analog ShKh15) with a hardness of 61 HRC. Before the wear test, the sample surfaces were first sanded with 1200 grit and dried with alcohol before the wear test. After the wear test, microstructure images of the samples were taken by digital microscope (Nikon SHUTTLEPIX Digital Microscope) and SEM (Carl Zeiss Ultra Plus Gemini Fesem). The wear volume of each specimen was found by multiplying the stroke distance and the cross-sectional area under 2D curves in the transverse direction of the wear track. The 2D area was measured with a Mitutoyo SJ-410 instrument using a standard probe with a diameter of 2

mm at five different locations depending on the depth (h) and width (L) of the wear scar. 2D area measurements were made according to the ISO 4287 standard. Hardness of samples was measured by micro-vickers (HV1) of load 10 N.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Microstructure

The phases were determined with  $\alpha$  and  $\beta$  phases for both investigated Mn and Zr added composite materials which are given in Fig.1 [3]. As to all investigated composite materials, the dark region is obtained as  $\beta$  phase, however, the light appears as  $\alpha$  phase. It is shown that base labelled composite material contains the fine acicular  $\alpha$ -phases and broader  $\beta$ -phase is around by lath- $\alpha$  phase. As to adding of Mn to Ti-6Al-4V, the amount of 0.5 wt% Mn enhanced the formation of a broader  $\alpha$ -phase that encircled the equiaxed  $\beta$ -phase. As for the Mn, addition is 1 wt%, the microstructure is reverted to the initial micrograph of Ti-6Al-4V which has the fine  $\alpha$ -phase placed on the boundaries of  $\beta$ -phase. Regarding the 2 wt% Mn addition, the  $\beta$ -phase formed clearly which is surrounded by lath- $\alpha$  phase. On the other hand, the  $\beta$ -phase became more dominant than  $\alpha$ -phase on the microstructure of 0.5Zr labelled composite material where the formed acicular  $\alpha$ -phase has outstretched arms along  $\beta$ -phase. The  $\beta$ -phase was replaced by intergranular  $\beta$ -phase with the addition of 1wt% Zr, however, the  $\alpha$ -phase is similar with 0,5wt% Zr added one. 2Zr labelled composite material contains laves phase [19] that occurred as lighter white and morphologically platelet which mostly was placed along the boundaries of  $\beta$ -phase and partially inside of the lath  $\alpha$ -phase.

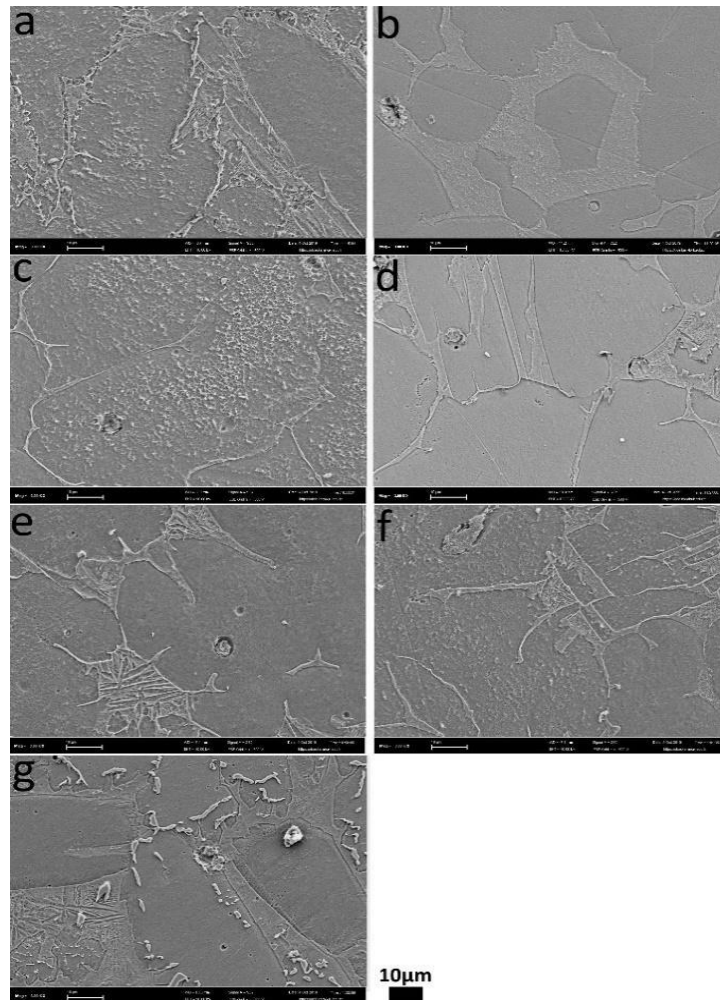


Figure 1. SEM micrographs of (a) base, (b) 0.5Mn, (c) 1Mn, (d) 2Mn, (e) 0.5Zr, (f) 1Zr and (g) 2Zr composite materials ((a) baz, (b) 0.5Mn, (c) 1Mn, (d) 2Mn, (e) 0.5Zr, (f) 1Zr ve (g) 2Zr kompozit malzemelerin SEM mikrografları)

### 3.2. Corrosion test

The potentiodynamic polarization curves enable to investigate the effect of Mn and Zr addition to the corrosion resistance of Ti-6Al-4V composite materials in the simulated body fluid environment. The potentiodynamic polarization curves for investigated composite materials that base, Mn and Zr added composite materials were illustrated in Fig.2 and the test results were given in Table 1. As seen in Fig. 2, the noticeable transition region is not obtained from active and passive curves. On the other hand, when we look at the Fig.3, the corrosion current density (CCD) of 2Zr labelled composite materials has the lowest value of  $0.004 \mu\text{A} / \text{cm}^2$  that followed by 2Mn and base labelled composite materials that values of  $0.350$  and  $0.526 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ , respectively. However, the highest ones as CCD were presented by 0.5Zr and 1Zr composite materials with the values of  $1.173$  and  $1.480 \mu\text{A} / \text{cm}^2$ , respectively. As to the corrosion rate values that are proportional to the CCD, as seen in Table 1. The different behaviour of corrosion resistance of investigated composite materials could have resulted from the changing of microstructure that showed distinctive phases formed based on the amount of %wt Mn and Zr. The role of the occurred phases here could be explained by the role of corrosion barrier where the homogeneously distributed phases impart to more resistance regions to corrosive attacks due to anodic and cathodic behaviour of materials was changed by these regions [20]. The addition of 0.5 %wt Mn to base changed the  $\alpha$  phase as broader and therefore worse corrosion resistance was obtained than the base. The finer  $\alpha$  phase gives rise to better corrosion resistance that is approved by 1Mn composite material containing both microstructure and CCD values closely with base composite material. The different corrosion behaviour of base and 1Mn labelled composite materials could have resulted from the lath  $\alpha$  phase forming a higher amount inside base one. Similarly, the lath  $\alpha$  phase is enclosed the  $\beta$ -phase homogeneously. On the other hand, a minor amount of Zr addition to base composite material makes microstructure different where a particular  $\alpha$  phase has the arms spread to  $\beta$ -phase. It is clear that from the microstructure image of the 1Zr composite material, acicular  $\alpha$  phase was more formed inhomogeneously than 0.5Zr that worsened the corrosion rate. However, the Laves  $\alpha$  phase obtained from the addition of 2Zr%wt impart to best corrosion resistance because of their distribution of grain boundaries homogeneously that give rise to a better barrier to corrosion attacks.

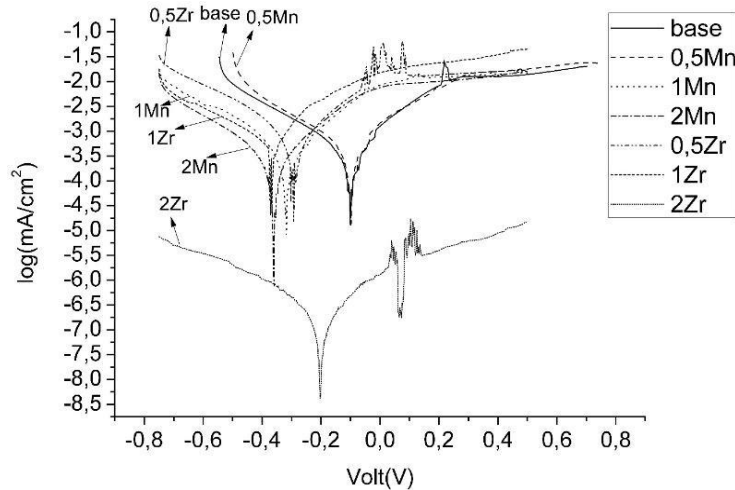


Figure 2. The potentiodynamic polarization curves of tested composite materials in Hank's solution (Hank'in çözümünde test edilen kompozit malzemelerin potansiyodinamik polarizasyon eğrileri)

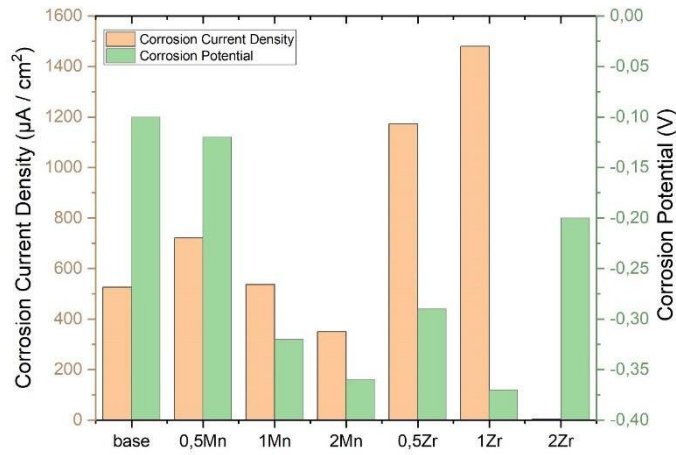


Figure 3. Variation of experimental corrosion potential and corrosion current density with Mn and Zr contents of Ti-6Al-4V composite materials (Ti-6Al-4V kompozit malzemelerin Mn ve Zr içerikleri ile deneysel korozyon potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğunun değişimi)

Table 1. The potentiodynamic corrosion test results (Potansiyodinamik korozyon testi sonuçları)

Materials	S.A (cm <sup>2</sup> )	d (g / cm <sup>3</sup> )	E.W	CC (µA)	CCD (µA / cm <sup>2</sup> )	CR (mm / year)	E <sub>corr</sub> (V)
Base	0.283	4.22	23.10	0.149	0.526	0.009	-0.10
0.5Mn	0.283	4.30	23.25	0.204	0.721	0.013	-0.12
1Mn	0.283	4.17	23.35	0.152	0.537	0.010	-0.32
2Mn	0.283	4.27	23.60	0.099	0.350	0.006	-0.36
0.5Zr	0.283	4.31	23.25	0.332	1.173	0.021	-0.29
1Zr	0.283	4.28	23.35	0.419	1.480	0.026	-0.37
2Zr	0.283	4.30	23.60	0.001	0.004	8x10 <sup>-6</sup>	-0.20

Labels: CC: Corrosion Current, CCD: Corrosion Current Density, CR: Corrosion Rate, E<sub>corr</sub> : Corrosion Potential, d: density, S.A: Surface Area, E.W: Equivalent Weight

### 3.3. Hardness Test

The hardness test results of the investigated composite materials are presented in Fig. 4. As seen from Fig.4, the highest and the lowest values were obtained from 0.5Zr (359HV) and 2Zr (419HV) labelled composite materials, respectively. When we investigate the effect of the amount Mn to hardness, there is an increase with the addition of 0.5 wt. % Mn (383HV) which is similar to almost 1 wt. % Mn (380HV) added one due to the enlarged  $\alpha$ -phase and  $\beta$ -phase. Further, the hardness is increasing with the addition of the 2 wt. % Mn (417HV) to base composite material (376HV) as the lath  $\alpha$ -phase. It is known that the grain boundaries impart more hindering to dislocation movement which is attributing to the rising of hardness. However, the smooth character of  $\alpha$  and  $\beta$  phase gives rise to lower hardness to Ti composite materials. As we look at the microstructure of the Zr added composite materials, it draws a parallel between the broader continuously formed  $\beta$ -phase and hardness increasing as the  $\beta$  phase is enlarged on the microstructure where, the hardness measurement was obtained as 359HV, 374HV and 419HV for 0.5Zr, 1Zr and 2Zr labelled composite materials, respectively. The highest hardness inside Zr added composite materials was measured at 2Zr labelled composite material contains Laves phase distribution especially on grain boundaries of  $\beta$  phase where the increasing hardness could be resulted from the extra boundaries to resist the dislocation movements [11].



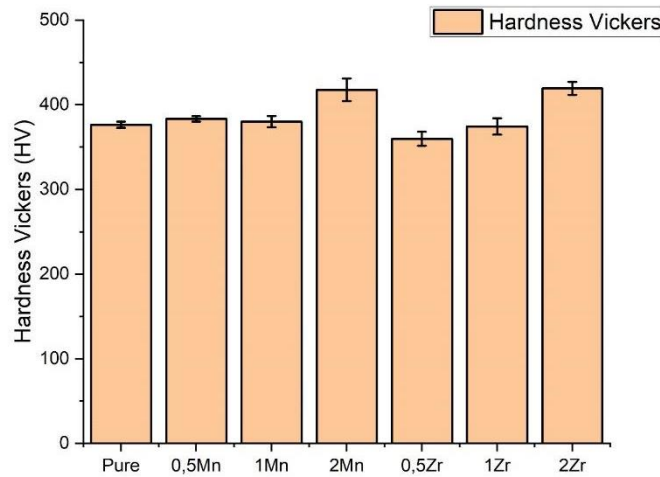


Figure 4. The micro vickers hardness test results of investigated composite materials (İncelenen kompozit malzemelerin mikro vickers sertlik testi sonuçları)

### 3.4. Wear Test

The wear volume of the investigated composite materials was illustrated in Fig.5-6. Moreover, the SEM images are providing the plastic deformation and oxidation type wear mechanisms that occurred during the wear test for all specimens. The morphology of wear tracks belonging to all specimens is obviously similar that indicates the wear mechanism mostly was imparted by the adhesive wear process. To understand the relationship wear volume loss of investigated composite materials between microstructures, the EDX study was utilized. The results obtained by EDX analysis showed that the oxide formation with the addition of Mn and Zr particles changed the wear volume proportionally with the MnO or ZrO<sub>2</sub>. As to Mn addition between 0.5wt% and 2%wt, the MnO formation is firstly is increased but after that, it is decreasing and lastly again increasing that was observed for 0.5%wt Mn, 1%wt Mn and 2%wt Mn addition, respectively. In addition, the ZrO<sub>2</sub> formation showed similar behavior with the addition of %wt Zr addition, where the amount of ZrO<sub>2</sub> is as 2Zr>1Zr>0.5Zr. It could be said that the stable oxide particle resists the high contact pressure during wear test. To compare the wear volume of investigated composite materials, it can be said the wear resistance of base composite material was improved by the addition of the Mn and Zr particles. The lowest wear volume loss is obtained at 2Mn and 2Zr composite materials which have almost close values however, 2Zr is lower than 2Mn. In addition, the hardness result confirms the wear resistance of composite materials as the harder material the more resistant to counter material.

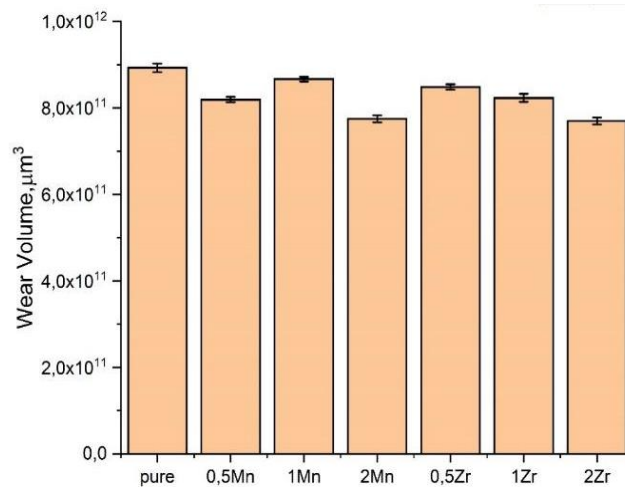


Figure 5. The wear volume of investigated composite materials (İncelenen kompozit malzemelerin aşınma hacmi)

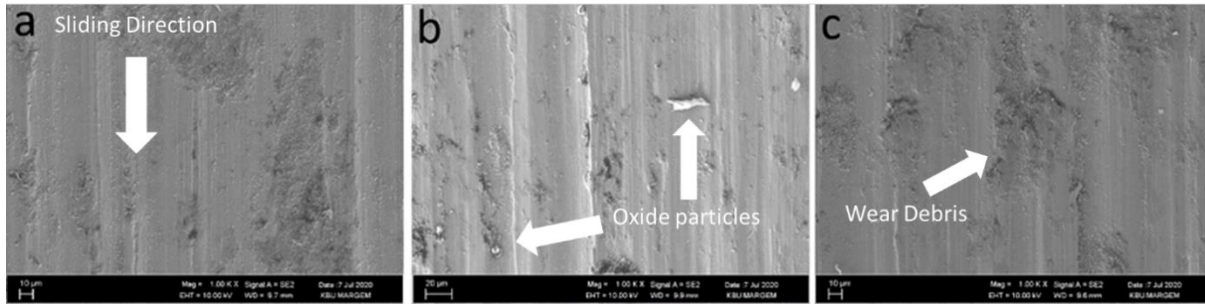


Figure 6. The worn surface of (a) base, (b) 2Mn and (c) 2Zr labelled composite materials ((a)Baz, (b) 2Mn ve (c) 2Zr etiketli kompozit malzemelerin aşınmış yüzeyi)

The worn surfaces of the base, 2Mn and 2Zr labelled composite materials are given in Fig. 6. It can be seen that wear scratches are parallel to sliding direction (Fig. 6a). This indicates that abrasive wear mechanism is formed [21]. Also, there are oxide particles on wear surfaces (Fig. 6b). Therefore, it shows that oxidation type wear mechanism formed on the wear surfaces of composite materials. Besides, abrasive wear marks, micro grooving and fractures are seen in some regions. Thus, it can be noted that abrasive wear mechanism is more dominant than adhesive wear. More regions exposed the oxidation, however, a small section of surface harmed by adhesive type wear. On the other hand, parallel lines are placed which resulted from the adhesive wear on the nearly all section of surface 2Mn labelled composite material. Nevertheless, mainly material-removing occurred at the surface of 2Zr labelled composite material which emerged from the abrasive wear as the characteristic of ZrO<sub>2</sub> formation.

#### 4. CONCLUSIONS



In a way that depends on differences in amounts of Mn and Zr particles on the Ti-6Al-4V composite material, the stable MnO and ZrO<sub>2</sub> formation gives rise to better hardness and consequently the more wear resistance was obtained. The microstructure of lath  $\alpha$ -phase was formed by 2Mn wt% addition to Ti-6Al-4V impart to the best corrosion resistance where the homogeneous formation on grain boundaries of  $\beta$ -phase mainly affects the corrosion attacks rate negatively. Similarly, the Laves phase occurred by addition of Zr particles as wt%2 amount on the grain boundaries of  $\beta$ -phases hindered the corrosion attacks as it makes a role as a barrier to them.

#### REFERENCES

1. G. Welsch, B. Rodney, C. E.W., Materials properties handbook: titanium alloys, ASM, 1993.
2. K. G. Budinski, Tribological properties of titanium alloys, *Wear*, 151(2): 203-217, 1991.
3. Y. Liu, L. Chen, H. Tang, C. Liu, B. Liu, B. Huang, Design of powder metallurgy titanium alloys and composites, *Materials Science and Engineering: A*, 418(1): 25-35, 2006.
4. Y. Okazaki, Y. Ito, A. Ito, T. Tateishi, Effect of alloying elements on mechanical properties of titanium alloys for medical implants, *Materials Transactions*, 34(12): 1217-1222, 1993.
5. G. Li, J. Li, X. Tian, X. Cheng, B. He, H. Wang, Microstructure and properties of a novel titanium alloy Ti-6Al-2V-1.5 Mo-0.5 Zr-0.3 Si manufactured by laser additive manufacturing, *Materials Science and Engineering: A*, 684: 233-238, 2017.
6. J. Lu, P. Ge, Y. Zhao, Recent development of effect mechanism of alloying elements in titanium alloy design, *Rare Metal Materials and Engineering*, 43(4): 775-779, 2014.
7. Y. Mao, M. Hagiwari, S. Emura, Creep behavior and tensile properties of Mo-and Fe-added orthorhombic Ti-22Al-11Nb-2Mo-1Fe alloy, *Scripta materialia*, 57(3): 261-264, 2007.
8. B. Fu, H. Wang, C. Zou, Z. Wei, The effects of Nb content on microstructure and fracture behavior of near  $\alpha$  titanium alloys, *Materials & Design*, 66: 267-273, 2015.
9. R. Schenk, The corrosion properties of titanium and titanium alloys, *Titanium in medicine*, 145-170, 2001.

10. D. Martins, W. Osorio, M. Souza, R. Caram, A. Garcia, Effects of Zr content on microstructure and corrosion resistance of Ti–30Nb–Zr casting alloys for biomedical applications, *Electrochimica Acta*, 53(6): 2809-2817, 2008.
11. F. Haftlang, A. Hanzaki, H. Abedi, D. Preisler, K. Bartha, The subsurface frictional hardening: a new approach to improve the high-speed wear performance of Ti-29Nb-14Ta-4.5 Zr alloy against Ti-6Al-4V extra-low interstitial., *Wear*, 422: 137-150, 2019.
12. S. Dai, W. Yu, C. Feng, X. Yu, Y. Zhang, Influence of Zr content on microstructure and mechanical properties of implant Ti–35Nb–4Sn–6Mo–xZr alloys, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(5): 1299-1303, 2013.
13. B. Fu, H. Wang, C. Zou, Z. Wei, The influence of Zr content on microstructure and precipitation of silicide in as-cast near  $\alpha$  titanium alloys, *Materials Characterization*, 99: 17-24, 2015.
14. E. Kobayashi, S. Matsumoto, H. Doi, T. Yoneyama, H. Hamanaka, Mechanical properties of the binary titanium-zirconium alloys and their potential for biomedical materials, *Journal of Biomedical Materials Research*, 29(8): 943-950, 1995.
15. C. Xia, Z. Zhang, Z. Feng, B. Pan, X. Zhang, M. Ma, R. Liu, effect of zirconium content on the microstructure and corrosion behavior of Ti-6Al-4V-xZr alloys, *Corrosion Science*, 112: 687-695, 2016.
16. S. Supriadi, T. Immanuel, C. Sutowo, G. Lucky, G. Senopati, B. Suharno, Effect of Mn in new  $\beta$  titanium alloy Ti-6Nb-6Mo on corrosion behavior and mechanical properties, *AIP Conference Proceedings*, 2020. India.
17. S. Yi, Effect of Manganese Addition on the Microstructure and Mechanical Properties of Ti-Nb Biomedical Alloys, *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 252: 2019.
18. S. L. De Assis, S. Woly nec, I. Costa, Corrosion characterization of titanium alloys by electrochemical techniques, *Electrochimica Acta*, 51(8-9): 1815-1819, 2005.
19. C. Rabadia, Y. Liu, L. Wang, H. Sun, L. Zhang, Laves phase precipitation in Ti-Zr-Fe-Cr alloys with high strength and large plasticity, *Materials & Design*, 154: 228-238, 2018.
20. İ. H. Kara, H. Ahlatcı, Y. Türen, Y. Sun, Microstructure and corrosion properties of lanthanum-added AZ31 Mg alloys, *Arabian Journal of Geosciences*, 11: 535, 2018.
21. M.E. Turan, Y. Sun, F. Aydın, Y. Akgul, Influence of multi-wall carbon nanotube content on dry and corrosive wear performances of pure magnesium, *Journal of Composite Materials*, 0(0), 1–9, 2018.

## Ferritik Paslanmaz Çeliğin Elektro Erozyon ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Optimizasyonu

Oya Arat<sup>1,\*</sup> , Hacı Bekir Özerkan<sup>2</sup> 

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Karabük, Turkey

### MAKALE BİLGİSİ

**Alınma:** 03.08.2021

**Kabul:** 29.08.2021

#### Anahtar Kelimeler:

Ferritik paslanmaz çelik

EEİ

İş parçası işleme hızı

Elektrot aşınma hızı

Yüzey pürüzlülüğü

Gri ilişkisel analiz

### ÖZET

Bu çalışmada, ferritik paslanmaz çelik malzemenin elektro erozyon ile işleme yöntemiyle işlenebilirliği araştırılmıştır. Deneyler boşalım akımı (A), vurum süresi ( $T_{on}$ ) ve vurum bekleme süresi ( $T_{off}$ ) olmak üzere üç farklı işleme parametresi kullanılarak Taguchi'nin  $L_9$  ortogonal dizisi uygulanarak deneyler yapılmıştır. Belirlenen parametrelerin iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH) ve ortalama yüzey pürüzlülüğüne (Ra) olan etkileri incelenmiştir. Deneysel sonuçlara göre iş parçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve yüzey pürüzlülüğü boşalım akımının artmasıyla birlikte artış göstermiştir. Ark süresinin artması ile İİH ve EAH değerleri artarken, elektrot aşınmasının azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca elde edilen deney sonuçları Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemi ile çoklu optimizasyonu yapılmıştır. Optimum işleme parametreleri, boşalım akım, vurum süresi ve vurum bekleme süresi için sırasıyla 6 A, 400  $\mu$ s ve 100  $\mu$ s olarak belirlenmiştir.

## Optimization of Machining Parameters for Electro Discharge Machining of Ferritic Stainless Steel

### ARTICLE INFO

**Received:** 03.08.2021

**Accepted:** 29.08.2021

#### Keywords:

Ferritic stainless steel,  
EDM

Material removal rate

Tool wear rate

Surface roughness

Grey relational analysis

### ABSTRACT

In this study, the machinability of ferritic stainless steel material by electrical discharge machining was investigated. Experiments were carried out by applying Taguchi's  $L_9$  orthogonal sequence using three different processing parameters: discharge current (A), pulse on ( $T_{on}$ ) and pulse off time ( $T_{off}$ ). The effects of the determined parameters on material removal rate (MRR), tool wear rate (TWR) and average surface roughness (Ra) were investigated. According to the experimental results, material removal rate, electrode wear rate and surface roughness increased with the increase of discharge current. It was determined that while the values of MRR and TWR increased with the increase of arc time, tool wear decreased. In addition, the experimental results obtained were optimized with Taguchi-based grey relational analysis method. The optimum processing parameters were determined as 6 A, 400  $\mu$ s, and 100  $\mu$ s for discharge current, pulse on time and pulse off time, respectively.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektro erozyon ile işleme (EEİ), karmaşık şekilli parçaların üretiminde, geleneksel işleme yöntemleriyle işlenmesi zor olan malzemelerin (sertleştirilmiş çelikler, karbürler, seramikler) işlenmesinde modern imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır [1,2]. EEİ özellikle; kalıp, kalıp zımbaları, küçük pompalar, motorlar, robotlar, nükleer güç reaktörlerinin parçaları, biyomedikal cihazlar gibi elektro-mekanik sistemlerin imalatında kullanılmaktadır [3,4]. Geleneksel

\*Sorumlu yazar, e-posta: oyaarat57@gmail.com

<https://doi.org/10.52795/mateca.978074>

talaşlı imalat yöntemlerinden farklı olarak bu yöntemlerde temel işleme prensip, bir dielektrik sıvı ortamında takım ve iş parçası arasında temas olmadan meydana gelen elektriksel kıvılcımlar tarafından üretilen ısı ile şekillendirilmez [5]. İş parçasının yüzeyine boşalan kıvılcım, noktasal olarak erime ve buharlaşmaya neden olur ve küçük metal parçacıklarının iş parçasından kopmasını sağlar [6]. Elektro erozyon yöntemi ile elektriksel iletken, çok yüksek sertlik ve mukavemetli ve karmaşık geometri malzemelerin kolaylıkla işlenebilmesi bu yöntemi modern imalat yöntemleri arasında seçkin bir noktaya getirmiştir [7].

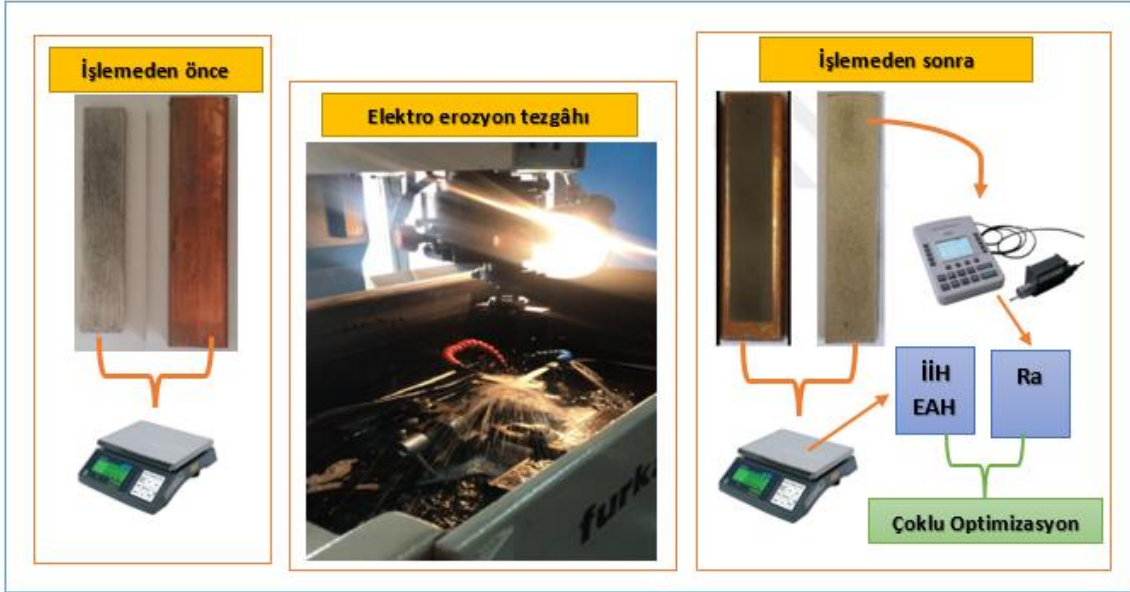
Elektro erozyon ile işlemede İİH (iş parçası işleme hızı), EAH (elektrot aşınma hızı) ve Ra (yüzey pürüzlülüğü) gibi performans parametreleri ölçülen faktörlerdir. İİH, iş parçası yüzeyinin aşınma oranını bir ölçüsü olurken EAH, takımın aşınma oranının bir ölçüsüdür ve her ikisi de genellikle birim zamandaki çıkarılan malzemenin hacmi olarak ifade edilir. Ra ise işlenmiş yüzeyin kalitesinin bir ölçüsüdür. Ra ısıdan etkilenen bölgenin kapsamı, katman kalınlığı ve mikro çatlak yoğunluğu gibi birçok bileşenleri içermektedir [8]. İşlemlerde İİH'nin hızlı olması EAH ve Ra değerlerinin düşük olmasına yönelik çalışmalar günümüzde devam etmektedir. Nas ve Akıncıoğlu, kriyojenik işlem uygulanmış nikel esaslı süper alaşımın EEİ ile işleme performansını araştırmışlardır. Yüzey pürüzlülüğü ve malzeme aşınma kaybı için en ideal parametrenin belirlenmesinde Grey-Taguchi yaklaşımını kullanmışlardır. Yapılan çalışmanın sonucunda Ra için en etkili parametrenin işlem uygulanmamış malzemede 300 µs vurum süresinde (A1B1), malzeme aşınma kaybı için sıg kriyojenik işlem uygulanmış malzemede 300 µs vurum süresi (A2B1) olarak belirlemişlerdir. Maksimum aşınma miktarı ve en düşük yüzey pürüzlülük değeri için gri ilişkisel derecesi hesaplandığında her ikisi için ideal parametre olarak işlem uygulanmamış malzemede 300 µs vurum süresinde (A1B1) olduğu tespit edilmiştir [9, 10]. Annamalai, AISI 4340 çeliğinin elektro erozyon ile işlenmesinde, seçilen işleme parametrelerinin İİH ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini incelemiştir. İİH ve yüzey pürüzlülüğünün; ark süresi, ark aralığı ve akım parametrelerinden etkilendiğini kanıtlamıştır. Akım değerindeki artışın İİH oranını önemli ölçüde artırdığı ve ark süresindeki artışın yine, İİH oranını artırdığını belirtmişlerdir. Ancak ark aralığındaki artışın İİH oranını etkilemediği belirtilmiştir [11]. Dastagiri ve Kumar, EEİ işlemi ile ilgili olarak; akım (I), voltaj (V), ark süresi (Ton) ve iş faktörü (η) gibi etkenlerin İİH, EAH, Ra ve sertlik (HRC) üzerindeki etkilerini incelemiştir. Deneyler tam faktöriyel tasarım ile gerçekleştirilmiş ve akım, voltaj, vurum süresi ve çevrim faktörü giriş parametreleri kullanılarak İİH, Ra ve sertliği tahmin etmek için bir matematiksel model geliştirmişlerdir. Tahmini değerler ile deney sonuçları birbirine çok yakın çıktığından, matematiksel modeli, malzemedeki kaldırma oranı ve ortalama yüzey pürüzlülüğü gibi parametreleri belirlemede kullanmışlardır [12]. Özerkan ve Çoğun, dielektrik sıvıya metal tozu katılmış EEİ'de, Ra, İİH, EAH, bağıl aşınma, iş parçası mikro yapısı ve iş parçası yüzey sertliği gibi temel performans çıktılarının işleme parametreleri ile gösterdiği değişimi incelemiştir. Bu amaçla, prizmatik çelik iş parçası, prizmatik bakır elektrot, borik asit ve grafit tozları katılmış gazyağı dielektrik kullanılarak farklı vurum sürelerinde işleme deneyleri yapılmıştır. Deneyler neticesinde, vurum süresinin ve dielektrik sıvı içine karıştırılan farklı tozların ve toz yoğunluklarının EEİ'de temel performans çıktıları üzerinde etkili olduğu görülmüştür [13]. Çakıroğlu ve Günay, L2 takım çeliğinin elektro erozyon ile tornalamasında malzeme kaldırma oranı, takım aşınması ve yüzey pürüzlülüğünü giri ilişkisel analiz ile optimizasyonu yapmışlardır [14,15].

Literatür incelendiğinde, EEİ yöntemiyle çeşitli malzemelerin işlenebilirliğinin araştırıldığı görülmektedir. Çalışmaların çoğu İİH, EAH ve Ra için işleme parametrelerinin ayrı ayrı değerlendirilmesi üzerine yapılan çalışmalardır. Ancak ferritik paslanmaz çeliğin elektro erozyon ile işlenmesinde işleme parametrelerinin araştırılmasına yönelik çalışmaların oldukça az olduğu görülmüştür. Bu yüzden imalat endüstrisinde yaygın olarak kullanılan bu malzemenin farklı imalat teknikleri ile işlenebilirliği araştırılarak yönetime uygun ideal işleme şartlarının tespit edilmesi çok önemlidir. Bu amaçla, ferritik paslanmaz çeliğin işlenmesinde elektro erozyon tekniği kullanılmış olup I, Ton ve Toff girdi değerlerine göre İİH, EAH ve Ra performans çıktıları eş zamanlı olarak Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz ile optimize edilmesi amaçlanmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERIAL AND METHOD)

### 2.1. Deneysel Ekipmanlar (Experimental Equipment)

Bu çalışmanın temel amacı farklı işleme parametreleri kullanılarak EEİ sonucunda İİH, EAH ve Ra üzerindeki etkisinin belirlenmesidir. Deneylerde iş parçası olarak ferritik paslanmaz çelik (5x15x80 mm), elektrot (takım) olarak da bakır malzeme (10x20x86 mm) kullanılmıştır. Deneyler, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Takım Tezgâhları Laboratuvarında bulunan FURKAN M25 A tipi elektro erozyon tezgâhı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tezgâhın teknik özellikleri Tablo1’de verilmiştir. Dielektrik sıvı olarak gaz yağı kullanılmıştır. Deneysel düzeneği Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deneysel düzeneği (Experimental setup)

Tablo1. M25 A dalma elektro erozyon tezgâhının genel özellikleri (General features of the M25 A electrical discharge machining)

<b>JENERATÖR</b>	
Güç 220 V, 50 Hz, 3f	3 KVA
Maksimum sürekli çalışma akımı	25 A
Güç seviyesi kontrolleri	5 Kademe; 1/16, 1/8, 1/4, 1/2, 1
Maksimum aşınmasız talaş kaldırma	Cu+/Çelik- 150 mm <sup>3</sup> /dak Gr+/Çelik- 170 mm <sup>3</sup> /dak
En ince yüzey	1.5 µm (Ra)
<b>MAKİNA GÖVDESİ</b>	
İş tablası ölçüleri (XY)	550x250 mm
Tabla hareket ölçüleri (XY)	300x200 mm
Tambur skala bölüntüsü	0,02 mm
İş haznesi	860x470x280 mm
Maksimum iş parçası ölçüleri (XYZ)	660x410x200 mm
<b>Z EKSENİ</b>	
Otomatik kafa mekanizması	Yüksek hassasiyetli, özel tasarım servo
Hareket kursu	160 mm
Okuma hassasiyeti	0.01 mm
Kaba hareket	200 mm

İş parçaları, işleme öncesi ve sonrası temizlenip kurutulduktan sonra 0.005 gr hassasiyete sahip HANA marka hassas terazi ile tartılmıştır. Yüzey pürüzlülük ölçümleri Marsurf M300 tipi yüzey pürüzlülük cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümlerinde hareket uzunluğu (L) 1.75

mm ve dalga boyu ( $\lambda$ ) 0.8 mm olarak ayarlanmıştır. Her deney sonucunda iş parçasının işlenmiş yüzeyinin baş, orta ve son kısımlarından ortalama yüzey pürüzlülük değeri olan Ra için üç ölçüm değeri alınarak ortalaması hesaplanmıştır.

Tablo 2. SJ-210 marka yüzey pürüzlülük cihazı teknik özellikleri (Technical characteristics of SJ-210 brand surface roughness device)

<b>Tarama ucu</b>	2 $\mu$ m
<b>Sürücü ünite hızı</b>	0.25-0.5-0.75 mm/s
<b>Ölçüm kuvveti</b>	0.75 mN
<b>Ölçüm mesafesi (Z)</b>	360 $\mu$ m (-200 $\mu$ m ile +160 $\mu$ m)
<b>Ölçüm uzunluğu (L)</b>	0.08-0.25-0.8- 2.5-8 mm

## 2.2. Deney Tasarımı ve Optimizasyon (Experiment Design and Optimization)

Literatür taraması ve yapılan ön deneyler neticesinde; işleme parametreleri olarak sanayide pratikte en sık kullanılan parametreler tercih edilerek, işleme akımı 6 A, 12 A ve 25 A, vurum süresi 12  $\mu$ s, 100  $\mu$ s ve 400  $\mu$ s ve vurum bekleme süresi 50  $\mu$ s, 100  $\mu$ s ve 200  $\mu$ s olarak belirlenmiştir. Belirlenen parametre ve seviyelerine göre Tablo 3’de verilen Taguchi  $L_9$  ortogonal deney tasarımı oluşturulmuştur. Her deney şartı için deneyler iki defa tekrar edilmiştir ve deneyler sonucunda elde edilen değerlerin ortalaması alınarak değerlendirmeler yapılmıştır. İş parçası işleme derinliği 0,5 mm olarak bütün deneylerde sabit tutulmuştur.

Tablo 3. Taguchi  $L_9$  ortogonal deney tasarımı (Taguchi  $L_9$  orthogonal experiment design)

Deney No	Boşalım akımı A	Vurum süresi $\mu$ s	Vurum bekleme süresi $\mu$ s
1	6	12	50
2	6	100	100
3	6	400	200
4	12	12	100
5	12	100	200
6	12	400	50
7	25	12	200
8	25	100	50
9	25	400	100

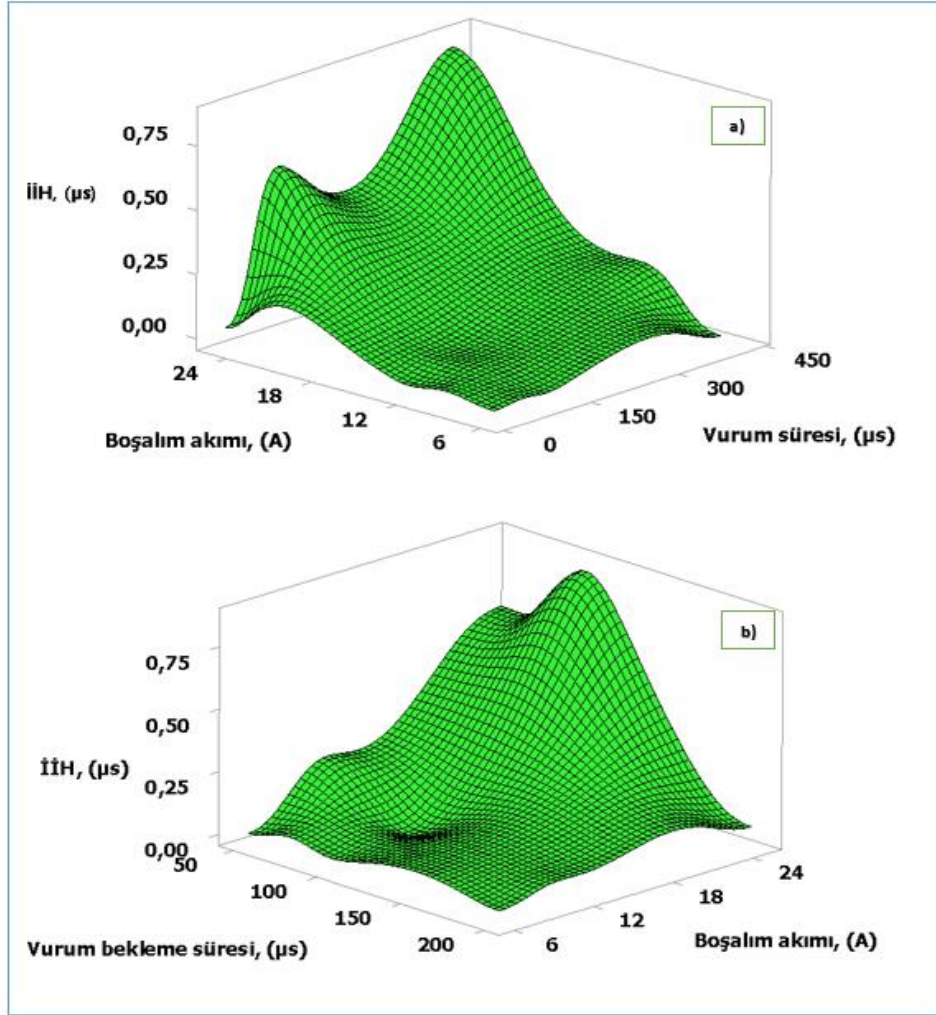
Deneyler Taguchi  $L_9$  ortogonal dizinine göre yapılmıştır. Girdi parametrelerine bağlı kalarak üç çıktı sonucu değerlendirilmiştir. Bu yüzden literatürde yaygın olarak tercih edilen Taguchi tabanlı Grey Relational Analysis yöntemi tercih edilerek çoklu optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Optimizasyon sürecinde İİH için "en büyük en iyi" yaklaşımı kullanılırken EAH ve Ra'yı en aza indirmek için "en küçük en iyi" yaklaşımı kullanılmıştır.

## 2. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSIONS)

### 2.1. İşleme Parametrelerinin İş Parçası İşleme Hızına Etkisi (The Effect of Machining Parameters on Material Removal Rate)

Ferritik paslanmaz çeliğin işlenmesinde, işleme parametrelerinin İİH üzerindeki etkisi Şekil 2’de gösterilmiştir. Şekil 2-a incelendiğinde boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla İİH’nin arttığı görülmektedir [4,16]. Bu durum daha yüksek enerji yoğunluğuna bağlanabilir, bu da elektrottan iş

parçasına daha fazla termal enerji aktarılması anlamına gelmektedir. Boşalım akımının artışı ile artan termal enerji, birim zamanda iş parçasının yüzeyinde yüksek miktarda erime ve buharlaşmaya neden olduğundan daha derin ve daha geniş krater oluşumlarına neden olmaktadır [14]. Şekil 2-b’de ise boşalım akımı ile vurum bekleme süresinin İİH üzerindeki etkilerini göstermektedir. Burada vurum bekleme süresinin ise İİH üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu görülmektedir. İş parçasından malzeme boşaltma işlemi dışında kalma süresi, vurum bekleme süresinin artışı ile arttığından dolayı İİH’in azalmasıyla sonuçlanmıştır. Ancak bu sürenin artışı ile malzemeden kopartılan mikro boyutlu işleme artıkları çok küçük olan takım-işparçası arasındaki işleme boşluğundan etkili bir şekilde uzaklaştırılması için imalatın vazgeçilmez değişkenlerinden biridir. Çok küçük değerler olduğundan İİH’ ya olan azaltıcı etkisi değerlendirmede ihmal edilebilir.



Şekil 2. İşleme parametrelerinin İİH üzerindeki etkisi; a) boşalım akımı-vurum süresi, b) boşalım akımı-vurum bekleme süresi (Effect of processing parameters on MRR; a) discharge current-pulse on time, b) discharge current-pulse off time)

## 2.2. İşleme Parametrelerinin Elektrot Aşınma Hızına Etkisi (The Effect of Processing Parameters on Tool Wear Rate)

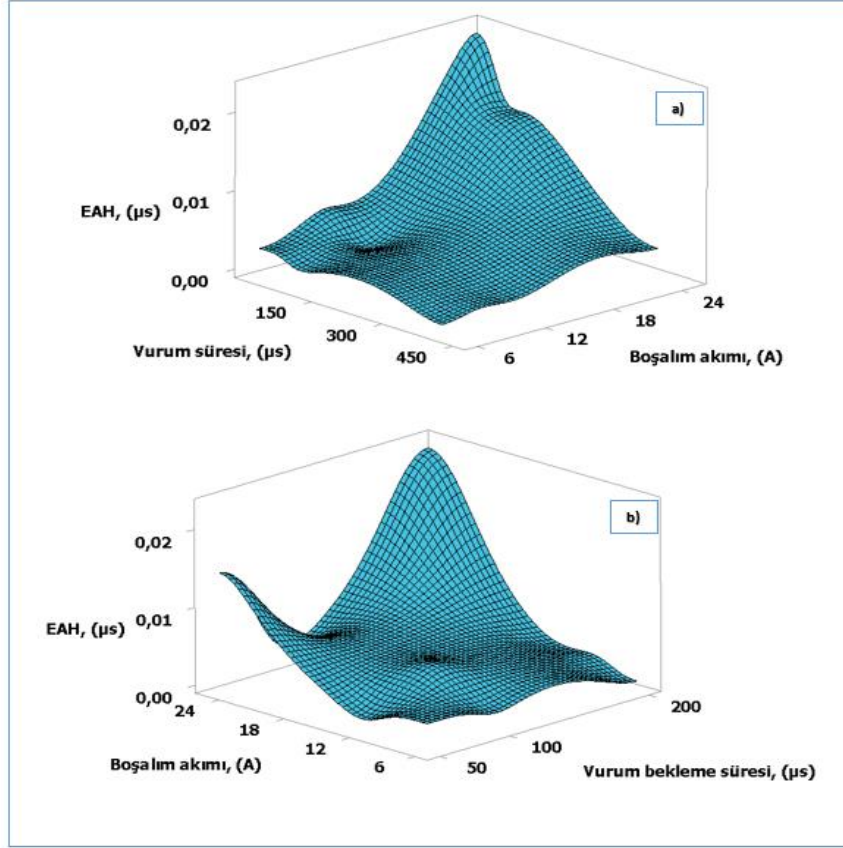
Şekil 3-a incelendiğinde, boşalım akımının artırılmasıyla EAH'ın arttığı görülmektedir. Enerji boşalımı sırasında akım iletkenini ve ısı üretimini etkileyen takım ve iş parçası arasında bir plazma kanalı oluşmaktadır. Bu durumun da yüksek miktarda ergime ve termal erozyonun elektrot yüzeyinde oluşan sıcaklığı artırdığı ve termal deformasyonun artmasına ve takımın aşınmasına neden olduğu görülmektedir [17,18].

Vurum süresi 12  $\mu$ s'den 400  $\mu$ s'ye çıkartıldığında takım aşınmasında azalma olduğu tespit edilmiştir. Bu durum dielektrik sıvı olarak kullanılan gaz yağının hidrokarbon bazlı bir sıvı



olmasından dolayı, karbonun EEİ sırasında gaz yağından iş parçasına ve/veya takım yüzeyine aktarılmasından kaynaklanmaktadır [15,19].

Vurum süresinin artmasıyla birlikte daha fazla karbon atomu yayılmıştır ve bu oluşum elektrot üzerinde takım aşınmasını azaltan koruyucu bir film oluşturmuştur [19]. Şekil 3-b'ye göre vurum bekleme süresinin artmasıyla takım aşınmasının düzensiz bir eğilime sahip olduğu görülmektedir. Vurum bekleme süresi en yüksek değere ulaştığında, takım aşınmasının arttığı gözlenmiştir. Bu durum oluşturulan deney tasarımındaki kombinasyondan kaynaklanmıştır [15].



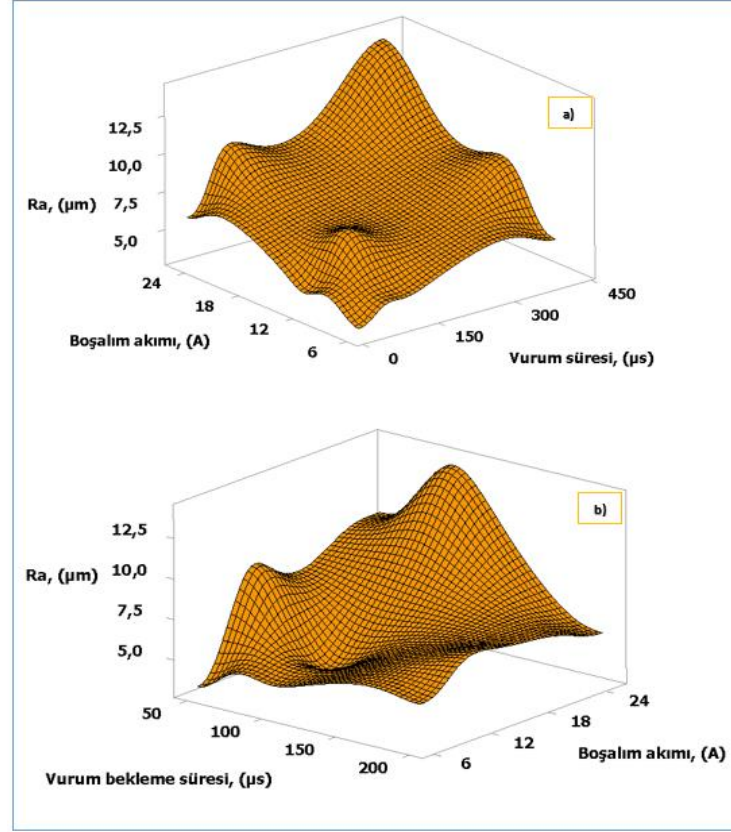
Şekil 3. İşleme parametrelerinin EAH üzerindeki etkisi; a) boşalım akımı-vurum süresi, b) boşalım akımı-vurum bekleme süresi (Effect of processing parameters on TWR; a) discharge current-pulse on time, b) discharge current-pulse off time)

### 2.3. İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi (The Effect of Processing Parameters on Surface Roughness)

İmalat sonrası yüzey kalitesi değerlendirilirken en önemli baskın kriter olan Ra değeri üretilen parçaların yorulma ömrüne oldukça büyük etkisi vardır. Bu yüzden işlenmiş yüzeylerde ki pürüzlülük deseni ve büyüklük değerlerinin incelenmesi önem arz etmektedir. EEİ ile işlemede hızlı işlemenin yanı sıra düşük pürüzlülük değeri ise genelde istenilen bir işlenebilirlik bütünüdür. Boşalım akımını artırarak iş parçasına daha fazla termal enerji aktarılması iş parçasından daha fazla malzeme boşaltılmasını sağladığı bilinen bir gerçektir. Böylece, iş parçası yüzeyinde daha derin ve daha geniş kraterler oluşur ve bu oluşum yüzey pürüzlülük değerinde bir artışa neden olur [20-22]. Şekil 4-a incelendiğinde boşalım akımı ve vurum süresinin artmasıyla Ra değeri artış göstermiştir. Vurum süresinin artışından kaynaklanan yüksek termal deformasyon, yüzeyde oluşan kraterin derinliğinde ve genişliğinde belirgin bir artışa ve dolayısıyla Ra değerinin artmasına neden olmuştur [10].

Bununla birlikte Şekil 4-b'de gösterilen Ra değerleri, vurum bekleme süresindeki artışa paralel bir eğilim göstermemiştir. Tablo 3 incelenecek olursa, vurum bekleme süresi seviyelerinin rastgele dağılması nedeniyle yüzey pürüzlülüğü önce çok az azalma gösterirken vurum bekleme süresi 200

$\mu s$  değerine yükseltildiğinde doğrusal bir azalma eğilimi sergilemiştir. Ayrıca,  $T_{off}$  arttıkça kıvılcımın düşme süresi her akım değerinde değişmiştir.  $T_{on}$  artmasıyla birlikte, iş parçası yüzeyi daha uzun süre ısı etkisinde kalmış ve ergime miktarı kademeli olarak artmıştır. Sonuç olarak, bu durum Ramasawmy ve Blunt tarafından belirtildiği gibi işlenmiş yüzey üzerinde çok yönlü düzensiz ve rastgele dağılmış daha derin kraterlerin oluşmasını sağlamış ve Ra değerinin artmasına sebep olmuştur [23].



Şekil 4. İşleme parametrelerinin Ra üzerindeki etkisi; a) boşalım akımı-vurum süresi, b) boşalım akımı-vurum bekleme süresi (Effect of processing parameters on Ra; a) discharge current-pulse on time, b) discharge current-pulse off time)

## 2.4. Optimizasyon Sonuçları (Optimization Results)

İkinci olarak, ferritik paslanmaz çelik malzemenin elektro erozyon ile işleme yöntemiyle işlenmesi sonucu elde edilen İİH, EAH ve Ra sonuçlarını Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz yöntemiyle işleme parametreleri optimize edilmiştir. Deney tasarımına ve analize dayalı çalışmalarda, özellikle farklı işleme koşulları ve işleme parametrelerinde, her sonuç belirli oranda çok etkili ve önemli olduğundan tüm sonuçların aynı anda optimize edilmiştir. Gerekli eşitliklerin kullanılması sonucunda elde edilen deney sonuçları ve hesaplanan değerler Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Deney sonuçları ve gri ilişkisel analiz sonuçları (Experiment results and gray relational analysis results)

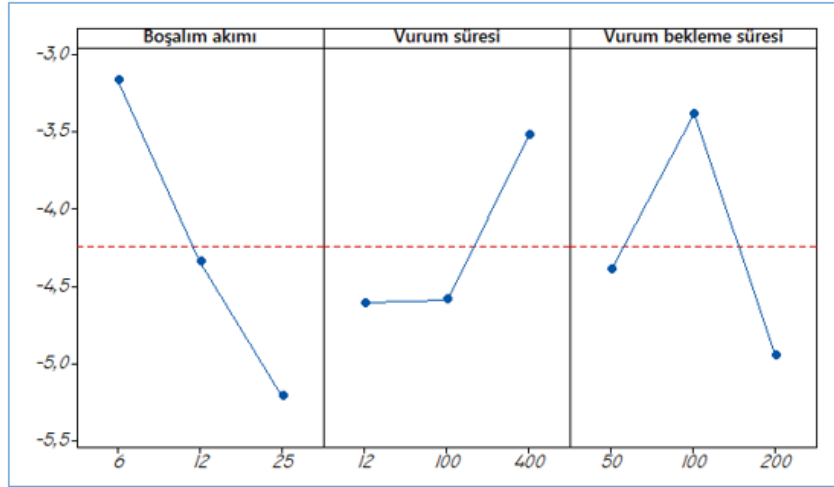
Deney no	DeneySEL sonuçlar			Normalize değerler			Katsayılar			GİD	S/N	Sıra
	İİH	EAH	Ra	İİH	EAH	Ra	İİH	EAH	Ra			
1	0.0053	0.0027	3.319	0.000	0.892	1.000	0.333	0.823	1.000	0.719	-2.86860	2
2	0.0106	0.0015	4.498	0.006	0.946	0.889	0.335	0.903	0.819	0.685	-3.28010	3
3	0.0144	0.0003	5.556	0.011	1.000	0.790	0.336	1.000	0.704	0.680	-3.34927	4
4	0.0137	0.0055	4.154	0.010	0.767	0.922	0.336	0.682	0.865	0.627	-4.04968	5
5	0.0621	0.0021	7.493	0.067	0.919	0.608	0.349	0.861	0.561	0.590	-4.57924	7
6	0.2184	0.0009	9.602	0.251	0.973	0.411	0.400	0.949	0.459	0.603	-4.39681	6

7	0.0449	0.0226	5.867	0.047	0.000	0.761	0.344	0.333	0.677	0.451	-6.91027	9
8	0.6071	0.0144	9.956	0.710	0.368	0.377	0.633	0.442	0.445	0.507	-5.90758	8
9	0.8533	0.0025	13.98	1.000	0.901	0.000	1.000	0.835	0.333	0.723	-2.81908	1

Bu tabloda yüksek gri ilişki derecesi (GİD) değeri, deney sonuçları ile normalleştirilmiş değerler arasındaki güçlü ilişkiyle beraber optimum seviyeyi göstermektedir. Ayrıca, GİD için yanıt tablosu Tablo 5'te verilmiştir. Bu tablodaki her parametreye karşılık gelen maksimum değer, optimum seviyeyi ifade etmektedir. Ayrıca, optimum parametre seviyesi Şekil 5'te verilen GİD için S/N oranı grafiğinden de belirlenebilmektedir. Buna göre, en iyi işleme parametreleri, 6 A boşalım akımı, 400  $\mu$ s vurum süresi ve 100  $\mu$ s vurum bekleme süresi olarak belirlenmiştir (A1B3C2). Düşük akım değerlerinde EAH ve Ra düşük miktarlarda olması doğal bir durumdur. Ancak küçük akımda yüksek vurum süresinde İİH artmıştır. Vurum süresinin artması kıvılcımın düştüğü noktaya daha uzun süreli deşarj olması anlamına gelir.

Tablo 5. GİD için yanıt tablosu (Response table for GRG)

Parametreler	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Fark
I, A	0.695*	0.607	0.560	0.135
Ton, ( $\mu$ s)	0.599	0.594	0.669*	0.074
Toff, ( $\mu$ s)	0.609	0.679*	0.574	0.105



Şekil 5. GİD için S/N oranı grafiği (S/N ratio graph for GRG)

### 3.5. Optimizasyonun Doğrulanması (Verification of Optimization)

Taguchi tabanlı gri ilişkisel analizde son adım, belirlenen optimum parametrenin doğrulanması işlemidir. Belirlenen optimum parametreler kullanılarak üç kez doğrulama deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçlarının ortalaması alındıktan sonra sırasıyla 0.0136  $\mu$ s 0.0004  $\mu$ s ve 5.619  $\mu$ m olarak elde edilen İİH, EAH ve Ra değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Sonuçlar değerlendirildiğinde, tahmini sonuçların daha iyi olduğu görülmektedir. Tahmin edilen GİD ile deney sonucu elde edilen GİD sonuçları arasında iyi bir korelasyon olduğu görülmüştür. Sonuçlar ışığında, başlangıçtaki parametrelerden optimum parametrelere doğru GİD 'deki gelişme 0.149, yani %20.1 oranında olmuştur. Doğrulama testinden elde edilen değerler, GİD değerlerinin güven aralığı sınırları ile uyumlu olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak İİH, EAH ve Ra için Taguchi tabanlı gri ilişkisel analiz metodolojisi başarıyla uygulanmıştır.

Tablo 6. Doğrulama deney sonuçları (Verification test results)

Başlangıç parametresi		Optimum parametre	
		Tahmini	Deneysel
Seviye	A2-B2-C1	A1-B3-C2	A1-B3-C2
İİH, ( $\mu$ s)	0.0578		0.0136
EAH, ( $\mu$ s)	0.0034		0.0004
Ra, ( $\mu$ m)	7.651		5.619
GİD	0.741	0.800	0.890
GİD'deki gelişme =0.149			
GİD'deki yüzde iyileşme = %20.1			

#### 4. SONUÇLAR(CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, elektrolitik bakır ile ferritik paslanmaz çeliği I, Ton ve Toff değiştirilerek işleme performansı çıktıkları olan İİH, EAH ve Ra üzerindeki etkisine ilişkin aşağıdaki sonuçlar çıkarılmıştır.

- Artan I ve Ton, yüksek enerjili bir deşarj darbesiyle ergitme ve buharlaşma fenomeni ile çıkarılan yüksek miktarda malzeme nedeniyle İİH artmıştır. En yüksek İİH değeri 25 A boşalım akımı, 400  $\mu$ s vurum süresi ve 100  $\mu$ s vurum bekleme süresi işleme parametreleri kombinasyonunda 0.8533  $\mu$ s olarak tespit edilmiştir. İİH'nın değişimine en yüksek etkiyi boşalım akımı yapmıştır.
- Daha yavaş elektrot aşınma oranlarını ve şekil dejenerasyonunu Toff değerinin değişimi yapmıştır. Sonrasında sırasıyla I ve Ton değişkenleri EAH' yı etkilemiştir. En düşük EAH 6 A boşalım akımı, 400  $\mu$ s vurum süresi ve 200  $\mu$ s vurum bekleme süresi işleme değerlerinde 0.0003  $\mu$ s olarak elde edilmiştir.
- Yüksek I ayarlarında işlenen tüm numunelerde, işleme boşluğunda oluşan yüksek enerji boşalmaları ile daha geniş ve daha derin kraterlerin oluşması nedeniyle daha yüksek Ra değerleri ölçülmüştür. En düşük Ra değeri 6 A boşalım akımı, 12  $\mu$ s vurum süresi ve 50  $\mu$ s vurum bekleme süresi 3.3190  $\mu$ m koşullarında ölçülmüştür.
- Taguchi tabanlı GİA ile optimum işleme parametre kombinasyonu; 6 A boşalım akımı, 400  $\mu$ s vurum süresi ve 100  $\mu$ s vurum bekleme süresi olarak belirlenmiştir (A1B3C2).

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma, Karabük Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi Birimi (KBÜBAP-18-YL-100) tarafından desteklenmiş olup, yazarlar bu destekten dolayı teşekkürlerini ifade etmektedir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. O. Erdem, C. Çoğun, L. Urtekin, H. B. Özerkan, İ. Uslan, Toz katkılı ve ısıtılmış dielektriğin elektroerozyon ile işlemede (EEİ) delik delme performansı üzerin etkisi, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31(3): 531-544, 2016.
2. V. Gohil, Y.M. Puri, Turning by electrical discharge machining: A review, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 231(2): 195-208, 2017.
3. R. Kumar, S. Roy, P. Gunjan, A. Sahoo, D.D. Sarkar, R.K. Das, Analysis of MRR and surface roughness in machining Ti-6Al-4V ELI titanium alloy using EDM process, Procedia Manufacturing, 20: 358-364, 2018.

4. N. Sharma, G. Singh, M. Gupta, H. Hegab, M. Mia, Investigations of surface integrity, bio-activity and performance characteristics during wire-electrical discharge machining of Ti-6Al-7Nb biomedical alloy, *Materials Research Express*, 6(9): 096568, 2019.
5. P.M. Kumar, K. Sivakumar, N. Jayakumar, Multiobjective optimization and analysis of copper-titanium diboride electrode in EDM of monel 400™ alloy, *Materials and Manufacturing Processes*, 33(13): 1429-1437, 2018.
6. P. Pant, P.S. Bharti, Electrical Discharge Machining (EDM) of nickel-based nimonic alloys: A review, *Materials Today: Proceedings*, 25: 765-772, 2020.
7. X. Yue, Q. Li, X. Yang, Influence of thermal stress on material removal of Cf\_SiC composite in EDM, *Ceramics International*, 46(6): 7998-8009, 2020.
8. J. E. Abu Qudeiri, A. Saleh, A. Ziout, A. H. I. Mourad, M. H. Abidi, A. Elkaseer, Advanced electric discharge machining of stainless steels: Assessment of the state of the art, gaps and future prospect, *Materials*, 12(6): 907, 2019.
9. E. Nas, S. Akıncıoğlu, Kriyojenik işlem görmüş nikel esaslı süper alaşımın elektro-erozyon işleme performansı optimizasyonu, *Akademik Platform Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1): 115-126, 2019.
10. S. Akıncıoğlu, Taguchi optimization of multiple performance characteristics in the electrical discharge machining of the TIGR2, *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*, 1-18, 2021.
11. N. Annamalai, Investigation and modeling of electrical discharge machining process parameters for AISI 430 steel, *International Journal of Engineering and Technology*, 0975-4024, 2013.
12. M. Dastagiri, A. H. Kumar, Experimental Investigation of EDM Parameters on Stainless Steel & En41b, *Procedia Engineering*, 97: 1551-1564, 2014.
13. B. Özerkan, C. Çoğun, Effect of powder mixed dielectric on machining performance in electric discharge machining (EDM), *Gazi University Journal of Science*, 18(2): 211-228, 2005.
14. R. Çakıroğlu, ElektroErozyon ile işlemede yüzey bütünlüğünün yorulma üzerine etkisinin incelenmesi, *Doktora Tezi, Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük*, 2020.
15. R. Çakıroğlu, M. Günay, Comprehensive analysis of material removal rate, tool wear and surface roughness in electrical discharge turning of L2 tool steel, *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4): 7305-7317, 2020.
16. T. Muthuramalingam, B. Mohan, Influence of discharge current pulse on machinability in electrical discharge machining, *Materials and Manufacturing Processes*, 28(4): 375-380, 2013.
17. S.N. Joshi, S.S. Pande, Thermo-physical modeling of die-sinking EDM process, *Journal of manufacturing processes*, 12(1): 45-56, 2010.
18. V.K. Yadav, P. Kumar, A. Dvivedi, Effect of tool rotation in near-dry EDM process on machining characteristics of HSS, *Mater Manuf Process*, 34: 779-90, 2019.
19. A. Muttamara, C. Kanchanomai, Effect of carbon in the dielectric fluid and workpieces on the characteristics of recast layers machined by electrical discharge machining, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(6), 3248, 2016.
20. M. Zhang, Q. Zhang, L. Dou, Q. Liu, C. Dong, Comparisons of single pulse discharge crater geometries in EDM and EAM, *Journal of Manufacturing Processes*, 22: 74-81, 2016.
21. K. H. Ho, S. T. Newman, State of the art electrical discharge machining (EDM), *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(13): 1287-1300, 2003.
22. O.A. Zeid, On the effect of electro discharge machining parameters on the fatigue life of AISI D6 tool steel, *Journal of Materials Processing Technology*, 68(1): 27-32, 1997.
23. H. Ramasawmy, L. Blunt, Effect of EDM process parameters on 3D surface topography, *Journal of Materials Processing Technology*, 148(2): 155-164, 2004.