



T.C.
KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERİN
TEL EROZYONU İLE KESME PERFORMANSININ
ARAŞTIRILMASI**

ERKAN KULOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KIRŞEHİR / 2022



T.C.
KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERİN
TEL EROZYONU İLE KESME PERFORMANSININ
ARAŞTIRILMASI**

ERKAN KULOĞLU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DANIŞMAN
Doç. Dr. Levent URTEKİN

KIRŞEHİR / 2022

Bu çalışma 31.08.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliğı Anabilim Dalı Makine Mühendisliğı, Programında Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Prof. Dr. Ali Osman KURBAN
Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Mühendislik Mimarlık Fakültesi

Doç. Dr. Levent URTEKİN
Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Mühendislik Mimarlık Fakültesi

Öğretim Gör. Dr. Asım GENÇ
Gazi Üniversitesi
Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi’nin aboneli olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Fen Bilimleri Enstitüsü’nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.



ÖNSÖZ

Yüksek Lisansa başlamamda ve yüksek lisans ders sürecinde kendisini tanıdığım günden bu yana gösterdiği sakin ve sabırlı hali ile her zaman bana örnek olmasının yanı sıra bir bilim adamının nasıl çalışması gerektiğini kendisinden öğrendiğim değerli danışmanım Doç. Dr. Levent URTEKİN' e büyük bir içtenlikle teşekkür ederim. Tezimin her aşamasında gerek sorularıyla gerekse altı ayda bir yapılan tez izleme komitesi sunumlarında tezin şekillenmesinde ve nihai hale gelmesinde katkıları olan değerli jüri üyelerim Prof. Dr. Ali Osman KURBAN ve Öğr. Gör. Dr. Asım GENÇ' e teşekkürlerimi içtenlikle sunarım.

Yüksek lisans eğitiminin başlangıcından itibaren manevi Desteğini hep hissettiren Genel Sekreterim Mehmet Zeki KÜÇÜK 'e, Tezin Deney sürecindeki katkılarından dolayı ÇEMAŞ DÖKÜM A.Ş 'ne ve Tezin her aşamasında bilgi ve tecrübeleriyle bana destek olan BATÜ Yapı İşl. Tek. Da. Bşk. Şeyhmus AYDIN' a, Makine Mühendisliği Bölümü; Arş. Gör. İbrahim Baki ŞAHİN' e ve Arş. Gör. Faik YILAN' a, teşekkür ederim.

Tezimi, varlıklarından her daim güç aldığım eşim Suzan, kızım Gökçe Nur ve oğlum Emir Kağan'a tüm fedakârlıkları için şükranlarımla ve sevgilerimle ithaf ederim.

Ağustos-2022

ERKAN KULOĞLU

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
TABLO LİSTESİ.....	ix
SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ.....	x
ÖZET.....	xi
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Amaç.....	1
1.2. Önem.....	1
1.3. Literatür Araştırması.....	1
2. GENEL KISIMLAR.....	4
2.1. Dökme Demirler.....	4
2.1.1. Dökme Demir Çeşitleri.....	6
2.1.1.1. Esmer Dökme Demir.....	6
2.1.1.2. Beyaz Dökme Demir.....	7
2.1.1.3. Temper Dökme Demir (Dövülebilen TD):.....	8
2.1.1.4. Küresel Dökme Demir.....	9
2.1.1.5. Alaşımli Dökme Demir.....	9
2.1.2. YKBDK Kullanım Alanları Ve Özellikleri.....	10
2.1.3. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirler.....	10
2.2. Tel Elektro Erozyon Yöntemi.....	11
2.2.1. Tel Elektro Erozyon Yönteminin İşleme Özellikleri.....	12
2.2.2. Tel Elektro Erozyon ile İşleme Mekanığı.....	12
2.2.3. Tel Elektro Erozyon Yönteminin İşleme Prensibi.....	13
2.3. Tel Elektro Erozyon Tezgâhlarının Donanımı.....	13
2.4. Tel Elektro Erozyon Yönteminin Avantaj Ve Dezavantajları.....	14
2.5. Tel Elektro Erozyon Yönteminin Uygulama Alanları.....	14
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	16
3.1. Yüksek Kromlu BDK Malzemeler Ve Özellikleri.....	16
3.2. Isıl İşlem Süreci.....	16
3.3. Sertlik Ölçümü.....	16

3.4. EDS ve SEM Analizi	17
3.5. Numunelerin İletkenliklerinin Ölçümü	17
3.6. Kesme İşleminde Kullanılan Tezgâh ve Teknik Özellikleri.....	18
3.7. Kesme Parametreleri	20
4. BULGULAR.....	23
4.1. Morfolojik Analizler	23
4.2. Sertlik Ölçümleri.....	25
4.3. Pürüzlülük Ölçümleri.....	26
4.4. Elektrik İletkenlik Ölçümleri	29
4.5. Kesme İşlemi Neticesinde Alınan Sonuçlar	29
4.5.1. İşlem Parametreleri	29
4.5.2. İşleme Parametrelerinin Tel kesim Akımına Etkisi.....	30
4.5.3. İşleme Parametrelerinin İşlem Süresine Etkisi	31
4.5.4. İşleme Parametrelerinin İşlem Hızına Etkisi	32
4.5.5. İşleme Parametrelerinin Yüzey pürüzlülüğüne Etkisi	32
4.5.6. Tel Hızının Akım Üzerine Etkisi.....	33
4.5.7. Tel Hızının İşleme Hızı Üzerine Etkisi	34
4.5.8. Tel Hızının Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisi	36
4.6. Kesme İşlemi Neticesinde Alınan Sonuçlar	37
4.6.1. Deneysel Çıktıların Optimizasyon ve Analizi	37
4.6.1.1. Taguchi Yöntemi	37
4.6.1.2. Sinyal/Gürültü (db) Grafikleri.....	40
4.6.1.3. İşleme süresi İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db).....	40
4.6.1.4. İşleme Hızı İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db).....	42
4.6.1.5. Tel Kesim Akımı İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db).....	43
4.6.1.6. Değişken analizi (ANOVA).....	45
4.6.1.7. İşleme parametrelerinin doğruluk analizi.....	45
4.6.1.8. İş parçası İşleme Süresi İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	47
4.6.1.9. Varyans Analizi	47
4.6.1.10. İş parçası Tel kesim akım İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	48
4.6.1.11. İş parçası İşleme hızı akım İçin ANOVA Analizi Sonuçları.....	49
5. TARTIŞMA VE SONUÇ.....	50
KAYNAKLAR.....	52

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2. 1. Demir, Dökme demir faz diyagramı	5
Şekil 2. 2. Tel Kesme Elektro Boşaltma İşleminin şematik diyagramı [34].....	14
Şekil 3. 1. Mikrosertlik cihazı	17
Şekil 3. 2. Taramalı Elektron Mikroskobu	17
Şekil 3. 3. Keithley 2400 Source Meter Unit (SMU) Cihazı	18
Şekil 3. 4. Deneyleerde kullanılan WEDM tezgahı	18
Şekil 3. 5. Mitutoyo SJ 210 yüzey pürüzlülüğü cihazı.....	22
Şekil 4. 1. EDS analiz sonuçları	23
Şekil 4. 2. Yumuşak numunelerin SEM görüntüleri	24
Şekil 4. 3. Ham numunelerin SEM görüntüleri.....	24
Şekil 4. 4. Sert numunelerin SEM görüntüleri	25
Şekil 4. 5. Numunelerin Vickers sertlik değeri ve oluşan izin görüntüsü	25
Şekil 4. 6. Ham numune yüzey topografyanın enine ve boyuna görüntüsü; Ton:110, Toff:60, Tel hızı 4, Su basıncı 8, Ra:4,336 µm.....	26
Şekil 4. 7. Ham numune yüzey topografyanın enine ve boyuna görüntüsü; Ton:115, Toff:56, Tel hızı 6, Su basıncı 10, Ra:4,755 µm.....	26
Şekil 4. 8. Yumuşak numune yüzey topografya enine ve boyuna görüntüsü; Ton:110, Toff:60, Tel hızı 4, Su basıncı 8, Ra:4,39 µm.....	27
Şekil 4. 9. Yumuşak numune yüzey topografya enine ve boyuna görüntüsü; Ton:115, Toff:56, Tel hızı 6, Su basıncı 10, Ra:4,75 µm.....	27
Şekil 4. 10. Sert numune yüzey topografya enine ve boyuna görüntüsü; Ton:110, Toff:60, Tel hızı 4, Su basıncı 8, Ra:4,97 µm.....	28
Şekil 4. 11. Yumuşak numune yüzey topografya enine ve boyuna görüntüsü; Ton:115, Toff:56, Tel hızı 6, Su basıncı 10, Ra:4,85 µm.....	28
Şekil 4. 12. Numunelerin Voltaj-Akım ilişkisi	29
Şekil 4. 13. Analiz için seçilen parametrelerin tel kesim akım üzerindeki etkisi.....	31
Şekil 4. 14. Deney analizi için seçilen parametrelerin işleme süresi üzerindeki etkisi	31
Şekil 4. 15. Deney analizi için seçilen parametrelerin işleme hızı üzerindeki etkisi	32
Şekil 4. 16. Analizi için seçilen parametrelerin yüzey pürüzlülüğü Üzerindeki etkisi	33
Şekil 4. 17. Akım - hız grafiği (4 m/s)	34

Şekil 4. 18. Akım - hız grafiği (6 m/s)	34
Şekil 4. 19. İşleme hızı - tel hızı grafiği (4 m/s).....	35
Şekil 4. 20. İşleme hızı - tel hızı grafiği (6 m/s).....	36
Şekil 4. 21. Yüzey pürüzlülüğü - tel hızı grafiği (4 m/s)	36
Şekil 4. 22. Yüzey pürüzlülüğü - tel hızı grafiği (6 m/s)	37
Şekil 4. 23. İşleme süresi için ortalamaları grafiği.....	41
Şekil 4. 24. İşleme süresi için sinyal/gürültü (db) grafiği	41
Şekil 4. 25. İşleme hızı için ortalamalar grafiği	42
Şekil 4. 26. İşleme hızı için sinyal/gürültü(db) grafiği	43
Şekil 4. 27. Tel kesim akımı için ortalamalar grafiği.....	44
Şekil 4. 28. Tel kesim akımı için sinyal/gürültü(db) grafiği	44
Şekil 4. 29. İşleme süresi residual grafiği	45
Şekil 4. 30. Tel kesim akımı residual grafiği	46
Şekil 4. 31. İşleme hızı residual grafiği.....	46

TABLO LİSTESİ

Tablo 2. 1. Dökme demirlerin kimyasal yapısı.....	9
Tablo 2. 2. Tel Elektrotların Özellikleri [24].....	15
Tablo 3. 1. Deneyler kullanılan WEDM tezgahının teknik özellikleri.....	19
Tablo 3. 2. Parametre Bilgileri.....	20
Tablo 4. 1. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri.....	29
Tablo 4. 2. Deney analizi için seçilen parametreler.....	30
Tablo 4. 3. İşleme Performansının Çıktıları İçin Kullanılan Taguchi (L18) Ortogonal Dizisi Sinyal/gürültü (dp) değerleri	39
Tablo 4. 4. Kullanılan faktörler ve seviyeleri	40
Tablo 4. 5. Gürültü oranları için tepki tablosu.....	40
Tablo 4. 6. Sinyal Gürültü Oranları için Tepki Tablosu.....	42
Tablo 4. 7. Sinyal Gürültü Oranları için Tepki Tablosu.....	43
Tablo 4. 8. Parametrelerin yüzdeler katkılarını	47
Tablo 4. 9. Tel kesim akımına etkileyen işleme parametreleri.....	48
Tablo 4. 10. İşleme hızına etkileyen işleme parametreleri	49

SİMGE VE KISALTIMA LİSTESİ

C	Kapasite
CNC	Bilgisayarlı Kesim Makineleri
DA	Boyutsal Doğruluk
EDM	Electrical Discharge Machining (Elektrik Erozyon İşleme)
HMK	Hacim merkezli kübik
MEDM	Micro Electrical Discharge Machining (Mikro Elektro Erozyon)
MRR	Material Removal Rate (Talaş Kaldırma Oranı)
P	Dielektrik Sıvı Basıncı
Ra	Aritmetik Ortalama Pürüzlülük
SF	Tabla İlerleme Hızı
SR	Yüzey Pürüzlülüğü
SV	Aralık Voltajı
V	Ana Güç Kaynağı Voltajı
VW	Tel İlerleme Hızı
YKBDD	Yüksek kromlu beyaz dökme demir
YMK	Yüzey merkezli kübik
WEDM	Wire Electrical Discharge Machining (Tel Elektrik Erozyon İşleme)
WT	Tel Gerilmesi

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK KROMLU BEYAZ DÖKME DEMİRLERİN TEL EROZYONU İLE KESME PERFORMANSININ ARAŞTIRILMASI

ERKAN KULOĞLU

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Levent URTEKİN

Yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin (YKBDD) aşınma direnci ve tokluklarının iyi olduğu bilinmektedir. Bu özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Yapısında bulunan krom karbürden dolayı mekanik mukavemetleri ve aşınma dirençleri diğer dökme demir ve düşük kromlu beyaz dökme demirlere göre üstünlük göstermektedir. Bu özelliklerin talaşlı imalat ile işlenebilirliğe bir dezavantaj olarak döndüğü söylenebilir. Talaşlı imalat süreçlerinde özellikle krom karbürün yapısında bulunmasından dolayı işlenebilirliği çok zordur. Tez çalışmasında özel olarak kalıplanan YKBDD numuneler sırasıyla yumuşatma, döküm(ısıl işlem görmemiş) ve sertleştirilmiş ısıl işlem süreçlerinden geçirilmiştir. Elde edilen numunelere tel elektro erozyon (*wire electrical discharge machining (WEDM)*) ile kesme işlemi uygulanmıştır. Yapılan işlemler neticesinde numunelerin sertlik, mikro yapı, SEM ve işleme sonrası yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir. Tel erozyonu ile yapılan işleme neticesinde ise işlem parametrelerine göre iş parçası işleme hızı (\dot{V}), akım (I) ve yüzey pürüzlülük (Ra) değişimi üç farklı numune için gerçekleştirilmiştir. Yapılan değerlendirme neticesinde ham, yumuşak ve sert numuneler içerisinde işlem hızı en yüksek ham numune olarak belirlenmiştir. Voltaj-akım oranında ise

sert numuneler en yüksek özdirenge sahip numuneler olarak hesaplanmıştır. Yüzey pürüzlülük sonuçlarına göre ise sertlik ve özdirenç ilişkisinin birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir. Yapılan ANOVA analiz sonucu değerlendirildiğinde en önemli işleme parametrelerinin malzeme (sert, yumuşak ve ham) ve vurum süresinin olduğu tespit edilmiştir. Tel hızı, su basıncı ve vurum bekleme süresinin katkısının ise çok az olduğu görülmüştür.



Ağustos 2022, 67 Sayfa

Anahtar Kelimeler: tel erozyonu, yüksek kromlu beyaz dökme demir, ısıl işlem

ABSTRACT

M.Sc. THESIS

INVESTIGATION OF CUTTING PERFORMANCE OF HIGH CHROME WHITE CAST IRON BY WIRE EROSION

Kirsehir Ahi Evran University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assoc. Dr. Levent URTEKİN

It is known that high chromium white cast irons (YKBDD) have good wear resistance and toughness. Because of these features, they have a wide usage area. Due to the chromium carbide in its structure, its mechanical strength and wear resistance are superior to other cast iron and low-chrome white cast irons. It can be said that these features turn into a disadvantage for machinability with machining. Machinability is very difficult due to the presence of chromium carbide in the machining processes. In the thesis study, specially molded YKBDD samples were subjected to softening, casting (not heat treated) and hardened heat treatment processes, respectively. The obtained samples were cut by wire electrical discharge machining (WEDM). As a result of the processes, the hardness, microstructure, SEM and surface roughness of the samples were determined. As a result of machining with wire erosion, the change of workpiece machining speed (I_H), current (I) and surface roughness (R_a) according to the process parameters were performed for three different samples. As a result of the evaluation, the processing speed was determined as the highest raw sample among the raw, soft and hard samples. In the voltage-current ratio, the hard samples were calculated as the samples with the highest resistivity. According to the surface roughness results, it is recommended to evaluate the relationship between hardness and resistivity together. When the result of the ANOVA analysis was evaluated, it was determined that the most important processing parameters were the material (hard, soft and raw) and the impact time. It has been observed that the contribution of wire speed, water pressure and percussion dwell time is very small.

August 2022, 67 Pages

Keywords: wire electrical discharge machining, high chromium white cast iron, heat treatment



1. GİRİŞ

1.1. Amaç

Cr içeriği %12-17 olan beyaz dökme demir işlenmesi zor bir metal grubundadır. Tezin amacı; Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin tel erozyonu ile işleme parametrelerinin araştırılması ve yüzey karakteristiğinin belirlenmesidir. Döküm sonrası yumuşatılmış ve sertleştirilmiş beyaz dökme demirlerin işlenebilirliğindeki zorlukların tel erozyon yöntemiyle aşılması düşünülmektedir. Yumuşatma ve sertleştirme sonrası malzeme iletkenliğindeki değişim, tane yapısındaki ve mekanik özelliklerindeki (sertlik vb) değişime bağlı olarak işlenebilirlikteki fark belirlenecektir. Çalışmaya bağlı olarak yüzey pürüzlülüğü, sertlik, tane büyüklük değişimi ve elektrik iletkenliği belirlenecektir.

1.2. Önem

Geleneksel imalat yöntemleri ile işlenmesi zor malzemeler için ciddi manada takım aşınması söz konusudur. Zamanla geleneksel yöntemlerden farklı yöntemler geliştirilmiş ve geleneksel olmayan yöntemler doğmuştur. Çalışma kapsamında geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden tel erozyon yöntemi ile iş parçası ile takım (tel) arasında fiziksel bir temas olmadan elektrik akım (puls) yardımı ile kesme işlemi gerçekleştirilecektir. Yapılan literatür çalışmasında yüksek kromlu beyaz dökme demirlerin geleneksel yöntemi ile işlenmesi ve kesilmesinin oldukça zor ve maliyetli olduğu bilinmektedir. Çalışma ile yüksek kromlu dökme demirlerin işlenmesinin geleneksel olmayan yöntemlerden tel erozyonu ile gerçekleştirilip gerçekleştirilemeyeceği ve işleme parametrelerinin belirlenmesi önem arz etmektedir.

1.3. Literatür Araştırması

Tel elektro erozyon yönteminde (MEDM) iş parçasından malzeme bir termo-elektrik erozyon yoluyla kaldırılır. MEDM'nin performansı aşağıdaki çıktı parametreleri takip edilerek ölçülmüştür; MRR, SF ve kalıp hassasiyeti [1]. Giriş parametreleri şunlardır: vuruş süresi ve bekleme süresi tepe akımı, tel hızı, tel gerilimi ve dielektrik sıvı basıncı şeklindedir. Han ve ark. [2], deşarj başına darbe enerjisinin MRR ve SF üzerindeki etkisini araştırdı.

MRR ve SF'nin önemli ölçüde darbe süresinin bağlı olduğu bulundu. Günümüzde MEDM, imalat sanayilerinde artan talebi karşılayan, denetimsiz saatlerce çalışabilen, pratik ve hızla gelişen bir üretim teknolojisi olarak dikkat çekmektedir. MEDM işlemi sırasında iş parçası ile tel elektrot arasında doğrudan temas olmadığından çekme, titreşim ve çatlak gibi sorunlar azalır. Dielektrik akışkan olarak genellikle su kullanılır. Düşük viskozitesi, çevre dostu olması ve kolay su bulunması nedeniyle yaygın olarak tercih edilmektedir [3-5]. MEDM işleminde seri üretimden ödün vermeden düşük maliyetle işlenmiş yüzeylerde yüksek sertlikte ve düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip ürünler elde edilmesi hedeflenmektedir. Liao ve arkadaşları [6] hem darbe hem de darbe ilerleme hızının MRR ve SF'yi güçlü bir şekilde etkilediğini bildirmiştir. Scott ve ark. [7] bir MEDM'de tel gerilimi yerine DC deşarjı nedeniyle telde feci bir hasar meydana geldiğini bildirmiştir. Tel üzerindeki yükü tespit etmek için bir izleme ünitesi önerilmiştir. N Tosun ve C Çogun [8] MEDM'de kesme parametrelerinin tel aşınma etkisini belirlemek için deneyler yapmışlardır. İş parçası ve elektrot olarak sırasıyla 10 mm AISI 4140 çelik ve pirinç tel kullanılmıştır. ANOVA tarafından takip edilen regresyon analizi, tel aşınma oranını (WRR) belirlemek için kullanılmıştır. WRR'nin darbe süresi ve açık devre voltajı ile arttığı bulundu. S. Kuriakose ve MS Shunmugam [9] yaptıkları çalışmada MEDM'de işlendiğinde titanyum alaşımlarının yüzey özelliklerini incelediler. Darbe süresi, tel hızı ve gerilimden güçlü bir şekilde etkilenen yüzey özelliklerini tespit etmişlerdir. Mahapatra ve Amar [10] MEDM'de farklı proses parametrelerinin performans parametreleri üzerindeki etkisini belirlemiştir. Zamandaki darbe ve tepe akımındaki artışla MRR'nin de arttığı bulundu; ancak MRR artan darbe kapalı süresi ve SV ile azalır. Rao ve arkadaşları [11] CNC MEDM'de girdi parametrelerinin çıktı özellikleri üzerindeki etkilerini incelemek için korelasyonlar geliştirdi. Manna ve Kumar [12] MEDM'de çeşitli kesme parametrelerinin etkisini araştırmak için Taguchi L-18 yaklaşımını kullanmışlardır. ANOVA, maksimum çıktı elde etmek için çeşitli girdi parametreleri arasındaki dengeyi bulmak için çok sayıda araştırmacı tarafından kullanılmıştır. Sharma ve ark. [13] MEDM sırasında performans özelliklerini Taguchi yöntemiyle bir hibrit optimizasyon tekniği kullanılarak yeni geliştirilmiş alaşımının kontrol parametrelerini en yüksek değeri maksimum MRR ve de minimum SR için analiz etmişlerdir. Lodhi ve Agarwal [14] 2014 takım çelikleri için deşarj akımı, tel gerilimi, tel hızı ve dielektrik akış oranını kontrol ederek MRR ve yüzey pürüzlülüğü analiz ederek Taguchi methodu kullanmışlardır. Basavaraju ve arkadaşları [15] Titanyum grade 7 alaşımında yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak

için MEDM ölçü sınırları ile sonuçlandırmışlardır. Darbe açık ve tepe akımı MRR çok ciddi etkilediğini bildirmişlerdir. T_{off} süresi artıkça WEDM işleme esnasında malzeme tahliyesinin hızı azalır. Ayrıca ton süresi ile yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Gauri ve Chakraborty [16] çalışmalarında ise çeşitli malzemelerin yüzey kalitesi ve MRR üzerindeki darbe süresi, tel besleme hızı, tel gerilimi gecikme süresi ve akım yoğunluğunun etkilerini incelemek için Taguchi yöntemini uygulamıştır. Taguchi yöntemi gibi istatistiksel bir çalışma, MEDM sürecinin optimal girdi parametrelerine yanıt olarak optimum çıktıyı elde etmek için deneysel sonuçların analizi kullanılarak gerçekleştirilebilir [17]. Manjaiah ve arkadaşları [18], AISI D3 çeliğinin MEDM proses parametrelerinin MRR ve SR'yi nasıl etkilediğini gösterdi. Çalışmaları sonucunda, diğer parametrelere göre maksimum MRR ve minimum SR için zamanında darbenin önemli olduğunu açıkladılar. Nimonic 80A alaşımının yüzey bütünlüğü ve işlenebilirliği üzerine MEDM trim kesim işleme ile yapılan ilk çalışma, deneylerin tasarımında ve planlanmasında Taguchi optimizasyonu kullanılarak araştırmışlardır [19]. Lodhi ve Agrawal [17], MEDM süreç parametrelerini optimize ederek Taguchi yöntemini kullanarak takım çelikleri için MRR ve SR'yi araştırdı. Majumder ve Maity [20], MEDM işleminde Ni-Ti şekil hafızalı alaşımın uygun kesme hızını etkileyen optimum SR'yi araştırmış ve Taguchi yöntemini uygulamıştır. Manna ve arkadaşları [21] Taguchi, L18 yaklaşımını kullanarak çeşitli kesme parametrelerinin etkisini analiz etti. Dört farklı değişken üzerinde ANOVA istatistiksel analizi ile optimize edilmiştir. Urtekin ve arkadaşları [22] AZ91 alaşımının WEDM işlenebilirliği deneysel olarak farklı parametrelerle incelenmiştir. İşleme hızının ve akımın numunelerin gözenekliliğini, yoğunluğunu ve mikro yapısını doğrudan etkilediğini bildirdiler.

Burada verilen literatür taramasından da anlaşılacağı üzere MEDM ile ilgili birçok çalışma olmasına rağmen yüksek kromlu beyaz dökme demirler ile ilgili herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada, YKBDD'lerin tel elektrik deşarjlı işleme ile işleme sonucunda, iş parçası talaş kaldırma oranı (MRR) ve yüzey pürüzlülüğünde (Ra) süreç parametrelerine göre üç farklı numune için değişimler belirlenmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. Dökme Demirler

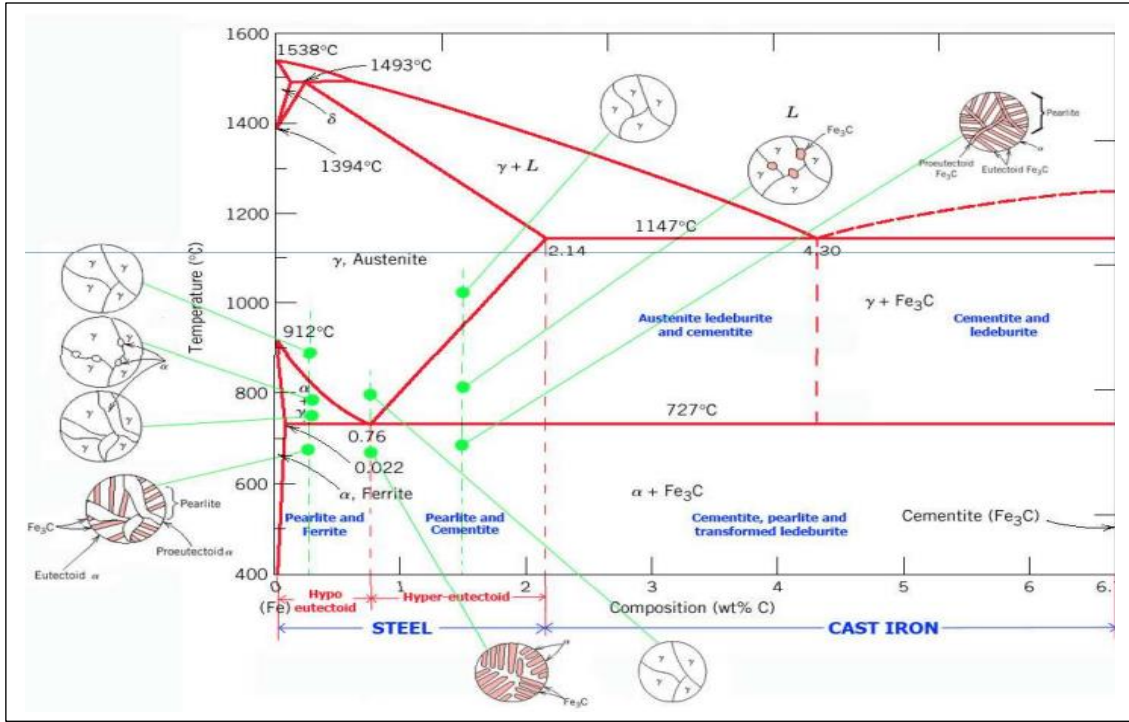
Yüksek fırından üretilen ham demir; özel döküm ocaklarında veya fırınlarda ikinci defa ergitilerek içerisindeki karbon, kükürt, fosfor ve silisyum gibi yabancı maddelerin oranının azaltılması için ısıtma işlemlere tabi tutulur. Bunun sonucu olarak da malzeme dökülebilme ve işlenebilme özellikleri kazanır. Bu şekilde elde edilen döküm demirler, genellikle, şöyle özetlenebilir:

1. Esmer ham demirden kupol ocaklarda üretilen dökme demirler 'esmer' veya 'kır dökme demir' olarak da ifade edilir.
2. Beyaz ham demirden kupol ocağında üretilen dökme demirler 'sert dökme demir' veya 'temper dökme demir' olarak adlandırılır ve yüksek döküm 'dür [23].

Yukarıda da açıklandığı gibi, dökme demirler, genellikle, %2-4 C ve %0,5-%3 Si içeren ve katılaşma esnasında ötektik reaksiyona uğrayan demir-karbon-silisyum alaşımlardır. Dökme demirin katılaşması esnasında yapının stabil (kararlı) ya da metastabil (yarı kararlı) olma durumu; bileşime ve katılaşma hızına bağlıdır. Si ve daha az olan P, Cu ve Ni katılaşmayı yavaşlatarak stabil yapının oluşmasını sağlarken Mn, Kr ve diğer karbür teşkil edici elementler ise katılaşmayı hızlandırır ve metastabil sistemin meydana gelmesine yardımcı olurlar. Si ötektikteki karbon miktarını azaltır. Demir- sementit faz diyagramı Şekil 2.1 de gösterilmiştir. Bu diyagramda demir ve grafit arasındaki dengeyi sürekli çizgi göstermektedir. Süreksiz çizgi ise demir ve sementit (Fe_3C) arasındaki dengesiz ilişkiyi göstermektedir. Fakat demir-karbon alaşımlarında grafitin çekirdeklenmesi çok zor olduğundan hemen hemen her zaman dengesiz reaksiyonlar elde edilir [23].

Katılaşma esnasında üç katı eriyik oluşur. Bunlar; katılaşmadan hemen sonra S-ferrit olarak tanınan HMK bir yapı oluşur. Soğumaya devam edildikçe y-östenit olarak bilinen YMK bir yapıya dönüşür. Çözünmüş karbonlu demir veya 'katı eriyik2 adı verilir. Çok sünek ve çok iyi şekil değiştirebilir. Demir düşük sıcaklıkta tekrar HMK yapı olan S-ferrit'e dönüşür. Ferrit hemen hemen saf demir olup sünek ve iyi şekil değiştirme özelliğine sahiptir. İntermetalik bileşik olarak da 'sementit' vardır. Kristalleşmiş demir karbür diye de anılır.

Çok sert ve kırılğan olup şekil değıştirme kabiliyeti yoktur. Ferrit ve östenit her ikisi de demir içinde arayer karbon atomlarının katı eriyiğidir [24].



Şekil 2. 1. Demir, Dökme demir faz diyagramı

YMK kristal kafesinde arayer boşlukları HMK yapıdaki boşluklardan daha büyük olduğu için YMK Demir'e daha çok sayıda karbon atomu yerleşebilir. Bu nedenle, karbonun östenit içindeki maksimum eriyebilirliği % 1.7C iken karbonun HMK demirde eriyebilirliği çok daha azdır. Katı demir içindeki karbonun eriyebilirlik sınırı geçildiğinde Fe₃C oluşur. Burada dökme demirler üzerinde yoğunlaştığında ötektoid reaksiyonlar Bölüm 6 da 'Çelikler ve Isıl İşlemler' konusu işlendiğinden dolayı, burada sadece ötektik reaksiyonlar üzerinde durulmuştur.

Ötektik reaksiyon; ötektik kompozisyonun %4.3 C'a yakın olan 1153 C de meydana gelir. Şayet karbon %4.3'den altındaysa ötektik altı dökme demir, karbon %4.3'un üzerinde ise ötektik üstü dökme demir elde edilir. Katılaşıma alt ve üst ötektik sıcaklıkların arasında olursa gri dökme demir meydana gelirken katılaşıma ötektik sıcaklık altında gerçekleşirse beyaz dökme demir elde edilir. Bazı hallerde her ikisi de oluşarak benekli dökme demir elde edilebilir. Bu ise pek arzulanan bir durum değildir. Fakat çillenmiş dökme demir haline getirilerek aşınma direnci iyi olması gereken parçaların yapımında kullanılabilir.

$$S_{11v}. (\%4.3C) = 1148C \text{ östenit } (\%2.08) + Fe_3C (\%6.67C) \quad (2.1)$$

Dökme demirlerin yapısı ve özellikleri, ötektik reaksiyon esnasında östenitin dönüşme şekline bağlıdır. Denge şartları mevcutsa östenit; grafit ve ferrite dönüşür. Katılaşma esnasında östenitten oluşan grafit parçacıklarına karbon atomları difüze ederek, arkasında düşük karbonlu ferrit bırakır. Şayet soğuma hızı yavaşsa difüzyon için zaman sağlar. Bunun sonucu olarak da grafit parçacıkları ince ve yakın olarak yerleştirilirse yakın difüzyon mesafesi sağlanır. Ferrit ve grafitin dengeli dönüşümü teşvik edilir. Katılaşma sırasında grafit oluşmadıkça reaksiyon meydana gelmeyecektir.

2.1.1. Dökme Demir Çeşitleri

2.1.1.1. Esmer Dökme Demir

Bileşimine katılan elementlerin oranında küçük bir değişim dökme demirde oldukça büyük değişikliğe yol açtığından geniş kullanım aralığına sahiptir. Dökme demir tek bir element içeren bir metal olarak düşünülmez en azından bileşiminden altı element bulunur. Tüm dökme demirler; demir, karbon, silisyum, mangan, fosfor ve sülfür içerirler. Alaşımli dökme demirlerin fiziksel özellikleri üzerine önemli etkileri olan diğer elementler de vardır. Ferrit olarak bilinen saf demir çok yumuşak olup endüstride kullanımı çok azdır. Dayanım, sertlik ve işlenebilirlik gibi tüm istenen özellikler, dökme demirdeki ferritten ziyade diğer elementlerle kontrol edilebilir. Ham demir, kupol fırında yeniden ergitilmedikçe çoğu ticari dökümler için uygun değildir.

Esmer dökme demir (gri), kırıldığında gri renkte görüldüğü için bu isim verilmiştir. Karbon pul şeklinde grafitir. Gri dökme demirler kolaylıkla işlenir ve yüksek basma dayanımına sahiptir. Çekme dayanımı ise 140-415 MP'a değişir. Fakat sünekliği çok düşüktür. Gri dökme demirin bileşiminde bulunan elementler hayli değişebilir. Fakat bu elementler, genellikle, alt sınırlar içerisinde.

Esmer dökme demirin mikro yapısı içerisinde küçük grafitler bulunur. Bunlar dökme demirin dayanımını hayli artırır. Bu pul şeklindeki grafitler küçükse ve metal içinde uniform şeklinde dağılmışsa dayanım daha büyüktür. Dağılanmış parçada beyaz renkli bileşen steadite olup fosfor ihtiva eden dökme demirin yapısal bileşeni olarak da bilinir. Steadite beyaz dendrite oluşumu olarak tanınır. Bu alfa demiri ve demir fosfatın ötektik yapısında ferrit veya saf demir de yüksek Si içeriğine sahiptir.

Bu gri dökme demirin bir elementi olarak görünür veya demir yavaş yavaş soğutulduğunda ferrite çoğu demirde bulunan demir- karbür ve ferritin lamelli şeklinden oluşur. Aynı

zamanda bu karbon çeliğinde bulunan perlite de benzerdir. Bu bileşenler, dökme demirin dayanım ve aşınma direnci üzerinde de etkilidir. Yapı içerisinde koyu lamel şeklindeki grafikler de mikro fotoğrafta görülmektedir.

2.1.1.2. Beyaz Dökme Demir

İçindeki karbon, demir-karbür (Fe_3C) oluşturduğu için kırılma yüzeyi beyaz olarak görünür. Bu karbür 'sementit' olarak tanınır. Demirin en sert bileşenidir. Yüksek oranda sementit karbür varsa beyaz dökme demir işlenmez. Bu yapıda bulunan perlit ve sementit temel bileşenlerdir. Bu mikrofotoğrafta koyu olan perlit ve beyaz olan ise sementit'i göstermektedir. Beyza dökme demir, soğutucu yüzeyi bulunan döküm kalıplarıyla üretilebilir. Demir yolu tekerleri, haddehane merdaneleri, ezme plakaları ve makas bıçakları gibi sert ve aşınma direnci olması gereken yerlerde kullanılır. Bu dökme demirde bulunması gereken elementler de tablo 2.1 de gösterilmiştir.

Beyza dökme demirde soğuma hızı çok önemlidir. Et kalınlığı küçük parçalar dökülürken soğuma hızı artırılırsa sementit oluşumu artar. Bu takdirde dökme demir sert dökme demir haline dönüşür. Bu nedenle bu durumu önlemek için Si miktarı ayarlanabilir. Karbon miktarının Si miktarına oranı, dökme demirin sertlik ve dayanım özellikleri için iyi bir ölçüdür. Aşınma direnci, içerisinde bulunan grafiti parçacıklarının ölçüsü azaldıkça artar. Bunun yanı sıra grafitler etrafındaki perlit yapı da artar. Demir-sementit denge diyagramında beyaz, perlitik ve ferritik olmak üzere üç ana bölge vardır. Gri dökme demirde karbon tümüyle grafit halinde beyaz dökme demirde karbon tümüyle sementit halinde ayrışırken perlitik dökme demirde ise hem perlit hem de grafit bulunur.

Sürtünme özelliğini artırma ise Mo oranı azaltılarak sağlanır. Darbe özelliği düşük olduğu için de statik yüklenmeye maruz kalan parçaların yapımında kullanılır. Bunun yanında, yapısındaki serbest grafitin bir yağlama maddesi gibi davranması nedeniyle sürtünmeyi azalttığı için işlenebilirliği iyidir.

Beyaz dökme demirde karbon oranı azaltılırsa kabuk kalınlığı artar. Sertliği düşürmek için Si oranı artırılabilir. Dolayısıyla de beyaz tabaka kalınlığı düşer. Bu dökme demirin sertliği yaklaşık 300 Bhn'e kadar çıkabilir. Kır dökme demire ısı-ışıl işlem uygulanarak da dayanım artırılabilir.

2.1.1.3. Temper Dökme Demir (Dövülebilir TD):

Temper dökme demir de beyaz dökme demirden yapılır. Beyaz dökme demirin temperlenmesi için kupol ocağı ve elektrik fırınından faydalanılır. Bu düzenekle boşaltma sıcaklıklarının daha doğru kontrolü ve metalin analizi yanında sürekli dökmeye de müsaade eder. Kupol ocağında elde edilen beyaz dökme demir parçalar; saç kutu içinde temper fırınından oksijence zengin olan toz içine gömülür. Hava sızdırmaması için kille sıvanır. Tavlama zamanı yaklaşık 815-1010°C sıcaklıkta 3-4 gün sürer. Bu işlemin sonunda sert demir karbürler, grafit veya temperleme kömürü halinde ayrılır. Dövülebilir dökme demirin çekme dayanımı 380 MPa'a uzama miktarı da %18'e kadar ulaşabilir.

Dövülebilir dökme demirlerin şoklama özelliği çok iyi ve işlenebilirliği de iyi olup, prensip olarak; demiryolu, otomotiv, boru ve tarım sanayiinde kullanılır. Bu dökümde beyaz dökme demirden daha fazla çekme miktarı oluşur. Bu nedenle besleme ve yollukları dikkatle tasarlamak gerekir. Temperleme işlemi sonunda döküm parça yüzeyinde karbondan arıtılmış ferritik bir yapı tabakası meydana gelir.

Yüksek frekanslı indüksiyon fırınında siyah temper döküm yapılır. Beyaz dökme demire göre daha fazla çekme olur. Geniş yolluklar ve kalın kesitli parçalara ayrı besleyiciler tasarlamak gerekir. Ayrıca maçalar da kolayca kırılacak şekilde yapılmalıdır. Yaklaşık 950°C sıcaklıkta grafit sertleşmeye uğrar. Sementit tamamen çözüldükten sonra soğuma yapılır.

Siyah temper dökme demir ile beyaz temper dökme demir arasındaki farklar kısaca şöyle özetlenebilir.

1. Siyah dökme demirdeki C ve grafit oranı beyaz dökme demirden oldukça azdır.
2. Siyah temper dökme demirde C oranı daha az olacağından ergitme işlemi kupol ocaklarında uygun değildir. Yüksek frekanslı indüksiyon fırınlarında da yapılırken beyaz temper döküm işlemi kupol veya Siemens Martin ocaklarında gerçekleştirilebilir.
3. Siyah temper dökme demirde yapı daha homojenken beyaz temper dökme demirde karşılıklı bir yapı mevcut olmakta iken kabuklu kısmını kaba taneli ferrit, kabuk altı, ferrit +perlit, orta kısmı ise ferrit +temper kömürü meydana getirir.
4. Siyah temper dökme demir kısmen dövülebilirken beyaz temper döküm daha akıcı ve dövülebilirdir.

2.1.1.4. Küresel Dökme Demir

Yapıdaki karbon küresel grafit şeklinde olduğundan dayanım ve sünekliği yüksektir. Kır dökme demire Mg-Cu-Fe-Si ve Mg-Ni gibi küçük oranda Mg ilave edilerek üretilir. Grafit üretmek için gerekli Mg mevcut kükürt miktarına bağlıdır. İlk magnezyum sülfite dönüştürülürken sülfür yok edilir. Grafiti küresel şekle dönüştürmek için magnezyum ilave edilir. Ancak bu işlemi kısa bir tavlama periyodu takip eder. Bu da belirli özellikler elde etmek için sıkça uygulanır. Bu işlemde, tavlama zamanı dövülebilir dökme demirin üretiminde kullanılabilen zamandan çok daha kısadır.

Fiziksel özelliklerini iyileştirildiği için küresel grafitli bu dökme demirler (DDK) ile krank milleri ve değişik makinelerin çeşitli parçaları yapılır. Ferritik bir yapı kazandırmak için yaklaşık 800 °C de ısıl işleme tabi tutulabilir

2.1.1.5. Alaşımli Dökme Demir

Bu dökme demirde; krom, nikel, volfram, vanadyum gibi alaşım elementleri içerdiğinden daha sert ve aşınma direnci yanında yüksek sıcaklığa dayanma direnci de iyidir. Gri dökme demirin aşınma davranışının iyi olması yanında paslanma özelliği de iyidir. Bu elementler grafitin ayrılmasını önler. Nikel ise sertlik artışının yanısıra perlit yapının martenzitik yapıya dönüşümünü kolaylaştırır. Ayrıca yüzeysel çatlama için dökme demire az miktarda Mo ilave edilir. Karbür alaşımlarını hızlandırmak içinde az oranda Vanadyum katılabilir. Bunlar dışında malzemelerin sertleşebilme özelliğini azalttığı için Si oranı çok az olmalıdır. Alaşımli dökme demirin en önemli özelliği bünyesinde bol miktarda östenit bulunmasıdır ki bu da kırılabilirliği azaltmaktadır.

Tablo 2. 1. Dökme demirlerin kimyasal yapısı

Elementler	Gri Dökme Demir %	[*] Beyaz Dökme Demir %	Yüksek Dayanımlı Esmer Dökme Demir %	[**] Küresel Grafitli Dökme Demir %	[***] Temper Dökme Demir %
Karbon	2,50–4,00	1,80–3,60	2,80–3,30	3,00–4,00	2,00–3,00
Silisyum	1,00–3,00	0,50–1,90	1,40–2,00	1,80–2,80	1,00–1,80
Manganez	0,40–1,00	0,25–0,80	0,50–0,80	0,15–0,90	0,20–0,50
Fosfor	0,05–1,00	0,06–0,18	0,15 Max.	0,10 Max.	0,01–0,10
Kükürt	0,05–0,25	0,06–0,20	0,12 Max.	0,03 Max.	0,02–0,17

[*] Isıl işlem ile temper dökme demire dönüştürülür. [**] Bileşiminde 0,01–0,10 magnezyum bulunmaktadır. [***] Bileşiminde % 0,0005–0,0050 boron ve % 0,0005–0,0150 alüminyum bulunmaktadır.

2.1.2. YKBDD Kullanım Alanları Ve Özellikleri

YKBDD'nin olağanüstü aşınma direnci, esas olarak, matrisin tokluğu da aşınma direncine katkıda bulunsa da, sert Cr-rich karbürlerin yüksek hacimli fraksiyonundan kaynaklanır [25]. Aşınma direnci için, kullanılan hemen hemen tüm YKBDD alaşımları, ağırlıkça %10-30 içeren hipoötektik alaşımlardır. %Cr ve 2 - 3.5 ağırlık. %C. 12 - 30 wt bileşim aralığında yüksek kromlu ütüler. %Cr, agregaları ve hammaddeleri manipüle eden, mekanik olarak işleyen bileşenler için yaygın olarak kullanılır [4]. Bu tür bileşenler arasında cevher kırıcılar (a) ve (b), silindirler (c), bilyalı değirmen gömlekleri (d) ve (e) ve toz haline getirme ekipmanı (f) bulunur. Kömür öğütme veya kuru bilyeli değirmenlerdeki merdaneler ve tablalar gibi korozyon içermeyen aşınma uygulamalarında, en popüler alaşımlar ağırlıkça 18 - 22 krom seviyelerine dayanmaktadır. Kombine aşınma ve korozyon direncinin gerekli olduğu ıslak aşınma uygulamalarında, örneğin ekstraksiyon işlemlerinde bulamaç pompalama işlemlerinde ağırlıkça Cr % 25 - 30 ve %30 - 40 wt içeren yüksek kromlu dökme demirler tercih edilir. Ağırlıkça % 1.5 - 2.4 Cr ve daha düşük karbon seviyelerine sahip malzemeler ferritik matris yapılarına sahiptir. Ferrit (δ -Fe), ostenitten daha yumuşak olduğu ve aşınma hizmeti sırasında önemli ölçüde sertleşmediği için aşınmaya dayanıklı yüksek kromlu dökme demirlerde normalde istenmez. Bununla birlikte, kombine korozyon ve aşınma direnci ve özellikle ısıya dayanıklı bileşenler için geliştirilmiş ferritik kromlu dökme demirler vardır [26].

2.1.3. Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirler

Özellikle krom içerikli, aşınmaya dayanıklı dökme demirler olarak bilinen beyaz dökme demirler, sürekli demir karbür (Fe_3C) oluşumunu engellemek için yeterli miktarda krom içerir. Normalde yüksek kromlu alaşımlar kütlece %10'dan fazla Cr içerecektir. Demir, alaşımların ve diğer mekanik özelliklerini ve mikro yapılarını değiştiren diğer alaşım elementleriyle birlikte karmaşık karbür oluşumu için gerekli olan önemli bir karbon yüzdesini içerecektir. YKBDD (yüksek Cr beyaz dökme demir) sadece döküm ürünler olarak değil, aynı zamanda sert kaplama ve kaplama malzemeleri olarak da kullanılabilir. En önemli alaşım elementleri, esas olarak Fe_3C ve Cr_7C_3 olan karbürler olarak bulunan karbon (C) ve kromdur (Cr). $(Cr,Fe)_3C$ ve $(Cr,Fe)_7C_3$ veya MC , M_2C vb. gibi kompleks

karbürler de mevcut olabilir [27]. YKBDD, demir-krom-karbon (Fe-Cr-C) üçlü sistemine dayanmaktadır. Bu alaşımlar, destekleyici bir matriste sert demir-krom (Fe-Cr) karbürden oluşur ve özellikle aşınmaya dirençli uygulamalar için uygundur [24]. Günümüzde kullanılan beyaz demir alaşımları, üretimlerinde ve işlenmesinde yer alan birçok metalurjik işlemin sağlam bir şekilde anlaşılmasını gerektiren yüksek alaşımlı malzemelerdir. Yüksek nominal krom konsantrasyonu, grafit oluşumunu önlemeye ve karbürü stabilize etmeye yardımcı olur. Bu arada, oda sıcaklığına soğutma sırasında perlit oluşumunu bastırmak için Mo, Mn, Cu veya Ni gibi sertleşebilirlik elementleri tipik olarak eklenir . Madencilik endüstrisinde, bu alaşımlar, kırma, eleme ve pompalama gibi çeşitli darbe ve aşındırıcı aşınma koşullarına maruz kalan çeşitli durumlarda kullanılmıştır [25].

2.2. Tel Elektro Erozyon Yöntemi

Tel kesme elektrik deşarjlı işleme, iş parçası ile takım arasındaki kıvılcım erozyonuna dayalı, iyi bilinen geleneksel olmayan bir işleme sürecidir. Bu işlem, diğer herhangi bir işleme işlemiyle oluşturulamayan sert malzemeleri ve karmaşık şekilleri kesebilir [27].

Mekanik sanayinin gelişmesiyle birlikte yüksek sertlik, tokluk ve darbe dayanımına sahip alaşımlı malzemelere olan talepler artmaktadır. Bununla birlikte, bu malzemelerin geleneksel işleme yöntemleriyle işlenmesi zordur. Bu nedenle, elektrolitik taşlama, süpersonik işleme ve elektrik boşaltmalı işleme (EDM) dahil olmak üzere geleneksel olmayan işleme yöntemleri uygulanmaktadır. Elektrot olarak ince bir tel ile Tel-EDM işlemi, malzemeleri kesmek için elektrik enerjisini termal enerjiye dönüştürür [28].

Tel kesme elektrik deşarjlı işleme, iyi bilinen geleneksel olmayan bir işleme işlemidir. İş parçası ve alet arasında üretilen termal elektrik enerjisine dayanan bir kıvılcım aşındırma işlemidir. Bu işlem, diğer herhangi bir işleme işlemiyle oluşturulamayan sert malzemeleri ve karmaşık şekilleri kesebilir. Yetenekleri ve özel bir alet şekli olmaması nedeniyle popülerdir. Bu işlemde alet, genellikle çinko ve bakır alaşımı olan ve kolayca bulunabilen pirinçten yapılmış bir teldir. Paslanmaz çelik, dövülebilirlik, süneklik ve korozyon direnci özelliklerinden dolayı endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır [29].

Tel Erozyon (elektrik deşarjlı işleme), son otuz yılın en hızlı büyüyen üretim teknolojilerinden biri olmuştur. Basit bir aletle, yani tel elektrotla, bir CNC tel EDM makinesi, neredeyse tüm 3 boyutlu karmaşık parçaları önemli bir hızla üretebilir. Ayrıca

yöntem, sert alaşımlar, PCD, CBN ve silikon levha 1, 2, 3 dahil olmak üzere çok çeşitli çalışma malzemelerine uygulanabilir [30] .

Termal erozyon teorisine dayanan bu model, boyutu ve yoğunluğu zamana bağlı olan yarı sonsuz bir katı üzerinde bir ısı kaynağı olarak deiyonize sudaki bir elektrik boşalmasının iş parçası üzerindeki termal etkisini açıklar. Bu model özellikle yüksek akım genliğine sahip shon deşarjları için çok uygundur. Bu deşarjlar için, anodik nokta yaklaşık olarak plazma kanalının enine kesitinin boyutunu takip eder ve anot ısınması esas olarak hızlandırılmış elektronların etkisinden dolayı meydana gelir [29].

Malzemelerin işlem parametrelerinin işleme üzerindeki etkisinin araştırılması çok önemli bir adımdır. Makinenin metalurjik özellikleri ve verimliliği, işleme süreci parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle proses parametrelerinin optimizasyonu çok önemlidir [27].

Geleneksel olmayan imal usullerinden biri olan tel elektro erozyon yöntemi karmaşık profilli iletken parçaların çok küçük hassasiyetle işlenebilmesini mümkün kılmaktadır. Tel elektro erozyon yöntemi; bir telin üzerinden yüksek yoğunlukta akım geçirilerek yapılan kesme yöntemidir [30].

2.2.1. Tel Elektro Erozyon Yönteminin İşleme Özellikleri

Tel kesme elektrik deşarj makinesi, sert malzemeyi kesmek için bir kıvılcım aşındırma işlemidir [23]. Bunun için malzeme iletken olmalıdır. Elektrot olarak 0,05-0,3 mm çapındaki pirinç, bakır, tungsten ve molibden teli deiyonize su (elektrik iletme için kullanılır) ile birlikte, elektrik kıvılcımlarından gelen ısıyı kullanarak telin metali kesmesine olanak tanır. İş parçası ile tel elektrot arasındaki boşluk mikroişlemci yardımıyla kontrol edilir ve 0.025mm ile 0.05mm arasında tutulur. Metal hareketli elektrot yardımı ile uzaklaştırılır ve uzaklaştırılan metal dielektrik yardımıyla yıkanarak temizlenir. WEDM'nin kendine has özellikleri nedeniyle karmaşık ve hassas şekilli malzemeler bu teknikle işlenebilir [31].

2.2.2. Tel Elektro Erozyon ile İşleme Mekaniği

Tel elektrik deşarjlı işleme (WEDM), ana akım işleme süreçleri tarafından işlenmesi çok zor olan keskin kenarları olan, değişen sertlikteki veya karmaşık şekillerdeki parçaları hassas bir şekilde işleyebilen özel bir termal işleme işlemidir. WEDM işleminin bu pratik teknolojisi, yaygın olarak kabul edilen temassız malzeme çıkarma tekniğini kullanan geleneksel EDM kıvılcımlama fenomenine dayanmaktadır. Sürecin başlangıcından bu yana, WEDM, alet ve

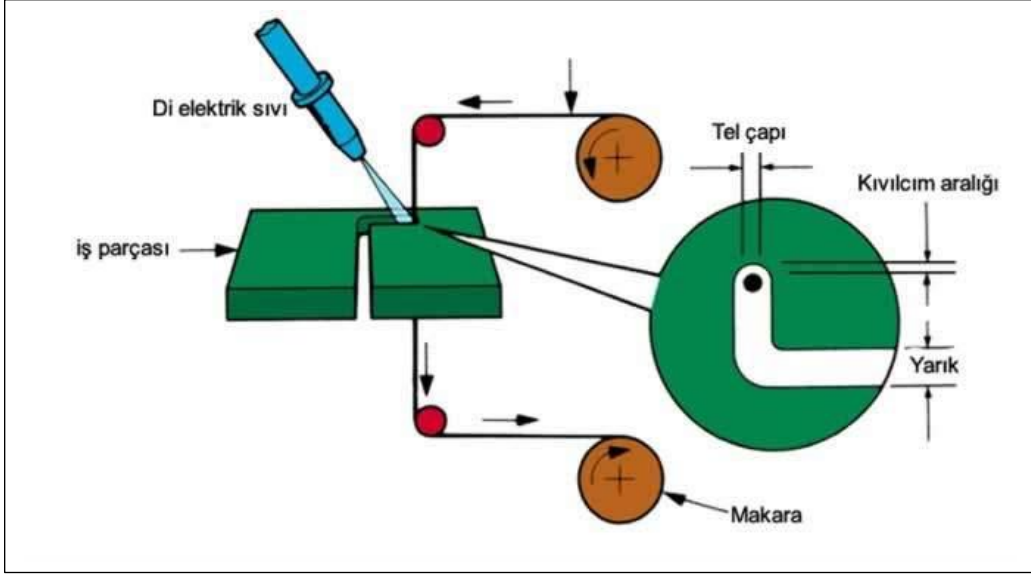
kalıp yapmanın basit bir yolundan, en yüksek derecede boyutsal doğruluk ve yüzey kalitesi ile mikro ölçekli parçalar üretmenin en iyi alternatifi haline geldi [31].

2.2.3. Tel Elektro Erozyon Yönteminin İşleme Prensi

MEDM'nin malzeme kaldırma mekanizması, elektrik deşarjları (kıvılcımlar) tarafından üretilen erozyon etkisini içeren geleneksel EDM işlemine çok benzer. MEDM'de malzeme, iş parçası ile sürekli olarak işleme bölgesine beslenen bir dielektrik sıvı akışıyla ayrılan tel arasında meydana gelen bir dizi ayrı kıvılcım tarafından iş parçasından aşınır [23]. Bununla birlikte, günümüzün MEDM işlemi, genel olarak dielektrik sıvı ile dolu bir tanka tamamen daldırılmış iş parçaları üzerinde gerçekleştirilir. Böyle bir batık MEDM yöntemi, özellikle iş parçasının değişen kalınlıklara sahip olduğu durumlarda, sıcaklık stabilizasyonunu ve verimli yıkamayı destekler. MEDM işlemi, katot ve anot arasında bir plazma kanalı oluşturan elektrik enerjisini kullanır [32].

2.3. Tel Elektro Erozyon Tezgâhlarının Donanımı

Elektro-termal metal çıkarma işlemi olan tel elektrik deşarj işleme (MMEDM), havacılık, nükleer ve otomotiv endüstrilerinde, işlenmesi zor çeşitli elektriksel iletken malzemelerde hassas, karmaşık ve düzensiz şekilleri işlemek için yaygın olarak kullanılmaktadır. MEDM, elektrotun sürekli hareket eden elektriksel olarak iletken bir tel olduğu geleneksel elektrik deşarj işleme (EDM) işleminin özel bir şeklidir. Tel, hatalı şekiller üretme eğilimini azaltmak için mekanik bir cihaz kullanılarak gergin tutulur. MEDM işleminde malzeme kaldırma mekanizması, dielektrik sıvıda tel alet ve iş parçası arasında hızlı, tekrarlayan ve ayrı kıvılcım deşarjları ile karmaşık bir erozyon etkisi içerir. Bu işlemde, malzeme telin önünde aşındığından ve takım ile iş parçası arasında herhangi bir nispi temas olmadığından, malzeme sertliği bu işlemle malzemelerin işlenmesi için sınırlayıcı bir faktör değildir ve ayrıca telde artık gerilme oluşumu da yoktur. [33].



Şekil 2. 2. Tel Kesme Elektro Boşaltma İşlemesinin şematik diyagramı [34]

2.4. Tel Elektro Erozyon Yönteminin Avantaj Ve Dezavantajları

MEDM' nin ana avantajı, malzemenin mekanik özelliklerinden (özellikle sertlik, kırılabilirlik ve direnç) bağımsız olarak, yüksek derecede doğrulukla yüksek karmaşık şekiller üretme kabiliyetidir. MEDM, elektriği ileten iki elektrot (iş parçası ve tel) arasında uygulanan bir dizi elektrik boşalması yoluyla malzeme kaldırmaya dayanır. Elektrotlar arasındaki boşluk olan boşluğa dielektrik sıvı enjekte edilir. Böylece işlem sırasında takım ile iş parçası arasında temas olmaz [35].

Tel kırılması ve kararsız işleme, işleme performansının azalması ve yüzey hasarı gibi zararlı etkileri nedeniyle MEDM işleminin en önemli yönlerinden ikisidir [36]. MEDM makineleri çoğu zaman operatör yardımı olmadan çalışır. Bu nedenle, makine parametrelerini çevrimiçi yeniden ayarlamak için tel kopmasını ve kararsız işlemeyi tahmin etmek arzu edilir [35].

2.5. Tel Elektro Erozyon Yönteminin Uygulama Alanları

MEDM, modern takımlama uygulamalarında kullanılan çeşitli malzemelerin işlenmesinde geniş çapta kabul görmektedir. Bazı çalışmalar [36-38], silikon ve sinterlenmiş karbürden yapılmış sıkıştırma kalıplarının işlenmesinde MMEDM'nin işleme performansını araştırdı. Seramiklerin hassas formda öğütülmesi için kullanılan dönen bir metal bağlı elmas çarkın giydirilmesi için silindirik MEDM kullanmanın fizibilitesi de incelenmiştir [39]. Küçük manyetik parçalar gerektiren minyatür sistemlerde kullanılan kalıcı NdFeB ve 'yumuşak' MnZn ferrit manyetik malzemelerin MEDM'si lazer kesim işlemi ile karşılaştırılarak çalışılmıştır [20]. Paslanmaz çelik, nitronik östentik paslanmaz, berilyum

bakır ve titanyum gibi çeşitli metaller kullanarak yüksek en-boy oranlı mezo ölçekli bir parçayı işlemek için kullanılan mikro-MEDM'nin işleme performansını araştırmak için bir çalışma da yapılmıştır [21]. MEDM süreci ayrıca gelişmiş seramiklerin işlenmesi için en umut verici alternatiflerden biri olarak gelişti. Yaygın olarak elmas taşlama ile işlenen gelişmiş seramiklerin EDM'si hakkında bir literatür araştırması ayrıca, EDM ve WEDM kullanarak bor karbür (B₄C) ve silikon infiltre silisyum karbür (SiSiC) işlemenin fizibilitesini incelediler [22]. Farklı talaş kaldırma işlemleri arasında WEDM, modern kompozit malzemelerin işlenmesinde etkili ve ekonomik bir araç olarak kabul edilir. Metal matrisli kompozitlerin (MMC), karbon fiberin ve güçlendirilmiş sıvı kristal polimer kompozitlerin işlenmesinde WEDM ve lazer kesim arasında birkaç karşılaştırmalı çalışma yapılmıştır [23].

Tablo 2. 2. Tel Elektrotların Özellikleri [24]

		Pirinç tel	Çinko kaplamalı	Dağınık pirinç
Özellikleri	Birim	Elektrot	Elektrot	Elektrot
Tel yüzeyinin erime noktası	°C	920	420	980
Gerilme direnci	N / mm ²	980	960	900

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Tel elektro erozyon işleme, mekanik özelliklerden (sertlik , mukavemet, sertlik vb.) WEDM işlemi, darbe deşarj noktasında elektrot malzemelerinin erimesine, buharlaşmasına ve iyonlaşmasına yol açan belirli bir metal hacmini bir saniyeden daha kısa bir sürede aşındırmak için binlerce elektrik deşarjından gelen termal enerjiyi kullanan şiddetli bir termal işlemdir [25].

3.1. Yüksek Kromlu BDD Malzemeler Ve Özellikleri

Bu çalışmada, numuneler ÇEMAŞ Döküm Sanayi A.Ş. tarafından tedarik edilen yüksek kromlu beyaz dökme demirler kullanılmıştır. Yüksek kromlu beyaz dökme demir seçiminin arkasındaki amaç, aşınmaya, korozyona ve yorulmaya karşı yüksek mukavemet gerektiren otomotiv, beyaz eşya, inşaat, kazan, kompresör, hidrolik pompa uygulamaları için geniş uygulama yelpazesidir. Şarj malzemesi olarak 430 paslanmaz çelik, pik karbon, açık çelik ve ferro kromdan oluşmaktadır. Ergitme işlemi, Eges marka 6 ton/saat kapasiteli indüksiyon ocağında yapılmıştır. Malzemeler eritildikten sonra OBLF GS 1000 II marka spektrometre ile analizleri kontrol edildikten sonra HWS SINTO HSP-3 tam otomatik yatay kalıplama hattına 90 mm çapında bilya modeli bağlanarak döküm işlemleri gerçekleştirilmiştir.

3.2. Isıl İşlem Süreci

Döküm parçasından çıkarılan numuneler elektrikli fırın kullanılarak ısıl işleme tabi tutulmuştur ve daha sonrasında soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta, parçalar yaklaşık 1 inç kalınlıkta olup sertleştirme ısıl işlemi için atmosfer kontrolsüz ısıl işlem fırınına 300°C 1,5 saat süre bekletiliyor. Sıcaklık döngüsü saatte 100°C olarak ayarlanmaktadır. Sonrasında numuneler 1040°C 4 saat zorlamalı soğutma prosesine tabi tutulmaktadırlar.

3.3. Sertlik Ölçümü

Numunelerin mikrosertlik değerleri Kütahya Dumlupınar Üniversitesi İleri Teknoloji Merkezi (İLTEM) bünyesinde yer alan DUROLİNE-M markalı mikrosertlik cihazı kullanılmıştır. Deneyde 100 gram yük altında 10 saniye bekleme süresinde numunelerin

köşelerinden uzak kalmak şartıyla alınmıştır. Her ölçüm en az 5 kez tekrarlanarak sonuçlar kaydedilmiştir. Şekil 3.1’de deneyin yapıldığı cihazın görseli verilmiştir.



Şekil 3. 1. Mikrosertlik cihazı

3.4. EDS ve SEM Analizi

Yüksek kromlu beyaz dökme demirleri tel erozyon ile kesme işlemi sonrasında yüzey görüntüleri DPÜ İLTEM bünyesinde bulunan FEI-NOVA marka NanoSEM model ile incelenmiştir. Ayrıca numune yüzeylerinden EDS dedektörü ile elementel analiz yapılmıştır. Şekil 3.2’de SEM cihazının görseli verilmiştir.



Şekil 3. 2. Taramalı Elektron Mikroskobu

3.5. Numunelerin İletkenliklerinin Ölçümü

Yumuşak, ham ve sert numunelerin tel erozyon ile kesme işlemi sonrasında akım-voltaj ölçümleri Keithley 2400 source meter aracılığıyla two-point probe metodu kullanılarak 0-3

V potansiyel aralığında oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Ölçümde kullanılan problemlerin yarıçapları 0,5 mm'dir. Her numune için en az iki defa tekrarlanmıştır. Bu cihaz (Şekil 3.3) oldukça hassas voltaj akım kaynağı ile ölçüm yapılmasını sağlar. Kompakt, tek kanallı, DC parametrik bir test cihazıdır. Bu cihaz -,+ aralığından potansiyel uygulayarak zamana bağlı I-V grafikleri elde edilir.



Şekil 3. 3. Keithley 2400 Source Meter Unit (SMU) Cihazı

3.6. Kesme İşleminde Kullanılan Tezgâh ve Teknik Özellikleri

Deneyisel çalışmalarda WEDM takım tezgahı Ultracut F1'dir (ELPULS 501) tip tezgahtır (Şekil 3.4). Tezgâha ait teknik özellikler Tablo 3.1 'de verilmiştir.



Şekil 3. 4. Deneylerde kullanılan WEDM tezgahı

Tablo 3. 1. Deneyler kullanılan WEDM tezgahının teknik özellikleri

Teknik Özellikleri	
Masa boyutu	670 x 490 mm
Maks. iş parçası yüksekliği	250 mm
Maks. iş parçası ağırlığı	800 kg
Ana tablo traversi (X,Y)	400, 300 mm
Konumlandırma doğruluğu	0.005 mm
Konumlandırma tekrarlanabilirliği	+/- 0,002 mm
Yardımcı Tablo traversi (u,v)	80, 80 mm
Maks. konik melek	+/- 30°/50 mm
Maks. JOG hızı	900 mm/min.
Çözünürlük	0,0005 mm
Maks. Tel makara kapasitesi	6 kg
Tel elektrot çapı	0,25 mm (standart) 0.1, 0.15, 0.20,0.30 mm (tercihsel)
Jeneratör	
Darbe tepe gerilimi	2 adım
CNC kontrolörü	EMT 100W-5
Kontrollü eksenler	X,Y,u,v Z eşzamanlı/bağımsız
Enterpolasyon	Doğrusal ve Dairesel

En az girdi ekleme	0,001 mm
En az emir girişi(X,Y,u,v)	0,0005 mm
Maks. Programlanabilir miktar (X,Y,u,v)	+/- 99999.999 mm
Giriş güç kaynağı	3 phase, AC 415 V, 50Hz
Bağlı yük	14 kVA, elektrik sistemi ve soğutma sisteminide içerir.
Ortalama güç tüketimi	10 kVA

3.7. Kesme Parametreleri

WEDM'deki süreç parametreleri, işleme sürecinin performans ölçülerini kontrol etmek için kullanılır. İşlem parametreleri, genellikle işlemenin gerçekleştirildiği koşulları belirleyen kontrol edilebilir işleme girdi faktörleridir. Bu işleme koşulları, çeşitli performans ölçütleri kullanılarak ölçülen süreç performans sonucunu etkileyecektir. Aşağıdaki Tablo 3.2 de parametreler hakkında bilgiler verilmiştir.

Tablo 3. 2. Parametre Bilgileri

Parametre	Tanım	Etki
Darbe Süresi $T_{Açık}$	Her döngüde akımın akış süresidir.	MRR, darbe zamanında uygulanan enerji miktarı ile doğru orantılıdır. Nabzın zamanında artması, daha fazla ısı enerjisinin üretilmesine yol açacaktır.
Darbe Kapatma Süresi $T_{Kapalı}$	Aynı anda iki kıvılcım arasındaki süredir ve darbe aralığı olarak da adlandırılır.	Daha düşük bir T_{off} değerıyla, belirli bir zamanda daha fazla sayıda deşarj olur ve bu da MRR'de artışa neden olur.

Kıvılcım Aralığı	İşleme sırasında elektrot ile iş parçası arasındaki mesafedir.	Kıvılcım aralığı malzeme ve elektrotun özelliklerine bağlıdır.
Tepe Akımı	Verilen darbe için elektrotlardan geçen akımın maksimum değeridir.	Tepe akım değerindeki artış, darbe deşarj enerjisini artırır ve bu da kesme oranını iyileştirebilir
Kıvılcım Aralığı Voltajı	İş parçası malzemesi ile tel arasındaki gerçek boşluk için belirli voltaj değeridir.	MRR, voltajdaki artışla artar ve sonra azalmaya başlar
Tel Besleme	Telin tel kılavuz yolu boyunca hareket ettiği ve kıvılcım oluşturmak için beslediği hıza tel besleme hızı denir.	MRR, tel beslemesindeki değişikliklerle neredeyse sabit kalır. Tel besleme hızı arttığında yeni tel hızla temas ettiğinden, tel besleme hızındaki artışla SR azalır
Tel Gerginliği	Üst ve alt tel kılavuzları arasındaki teldeki uzatmayı belirler.	Tel geriliminin artmasıyla teldeki titreşimler azalır, bu da işleme sırasında hatalarda azalmaya yol açar.
Dielektrik Basınç	WEDM işleminde kullanılan dielektrik akışkanın basıncıdır.	Dielektrik basıncındaki artış, işleme alanından daha fazla kalıntı taşır ve bu da SR'de azalmaya neden olur

3.8. Yüzey Pürüzlülüklerinin Ölçümü

İşlem öncesi ve sonrasında Ra pürüzlülük parametrelerindeki değişim, bir Mitutoyo SJ-210 yüzey pürüzlülüğü test cihazı (Mitutoyo, Kawasaki, Japonya) kullanılarak ölçüldü (şekil 3.5). Cihaz 17,5 mm ölçüm aralığına ve 360 µm (-200 µm ile +160 µm) dedektör aralığına sahiptir. Ayrıca 4 mN'lik bir ölçüm kuvvetine ve 5 µm'lik bir prob ucu elmas ucuna sahiptir. Ölçüm sırasında kalemin sürüş hızı 0,5 mm/s'de sabit tutuldu. Ek olarak, yüzey

topografyasını izlemek ve numunelerin yüzey pürüzlülüğünü daha fazla analiz etmek için ZeMaps ve MetroPro yüzey analiz yazılımı (Zygo Corporation, CT, ABD) kullanıldı.

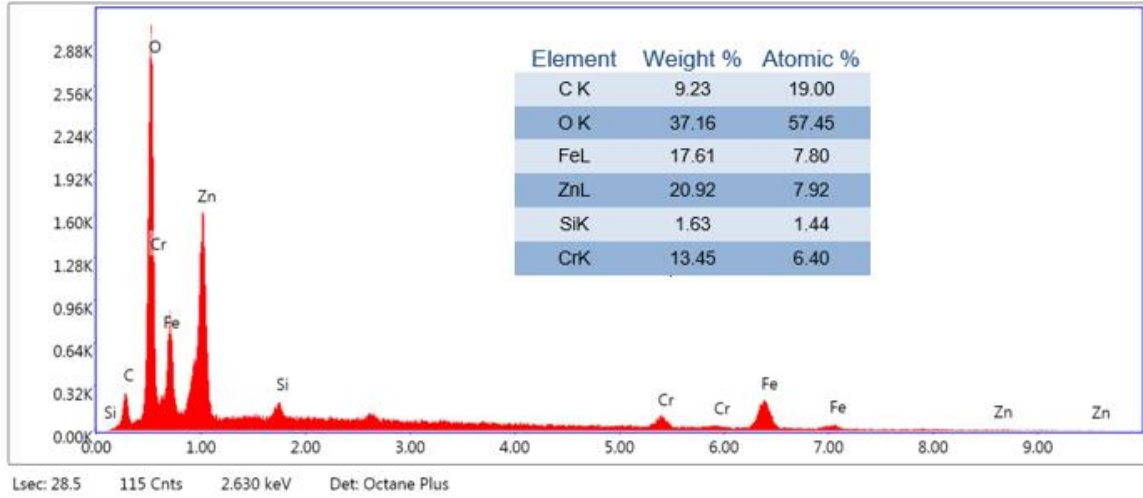


Şekil 3. 5. Mitutoyo SJ 210 yüzey pürüzlülüğü cihazı

4. BULGULAR

4.1. Morfolojik Analizler

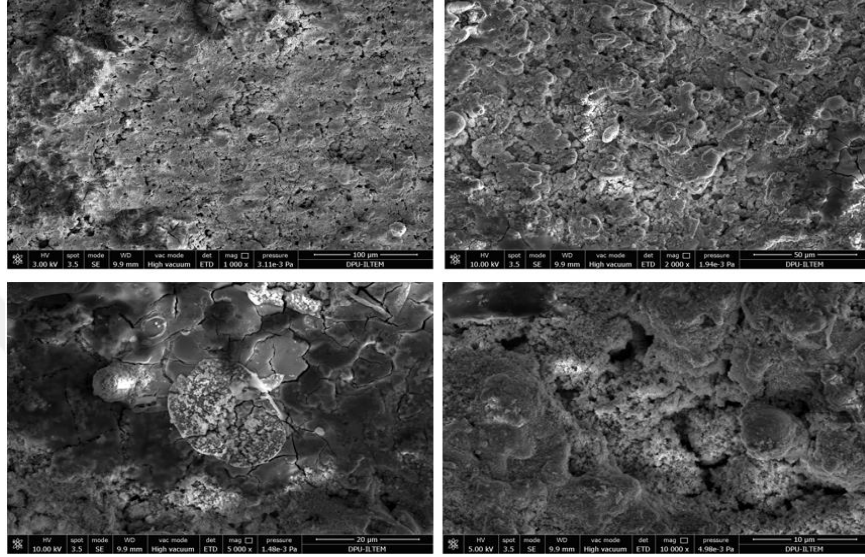
Numuneye ait EDS sonuçları Şekil 4.1 de verilmiştir. Alınan EDS ölçümlerine göre O, Zn elementlerinin yapı içerisinde daha baskın olduğu gözlemlenmiştir. Belirlenen krom oranı %12–14 arasında belirlenmiştir. Yumuşak, ham ve sert malzemelerin SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 4.2,4.3,4.4’de gösterilmektedir. Numunelerin yüzeyleri kraterler ile doludur. Krater bakımından zengin olan yüzeyler erimiş malzemeler tarafından oluşturulmuştur. Bu etkiler zamandaki vuruş süresinin artması ve kıvılcım aralığı voltajı azaldıkça daha belirgin hale gelmektedir. Bu olay, kıvılcım aralığının voltajı azaldıkça elektrik deşarjlarının iş parçasının yüzeyine daha yoğun bir şekilde çarpma eğiliminde olması ve yüzey pürüzlülüğünün bozulmasına yol açan kötü erozyon etkisinden kaynaklanmaktadır.



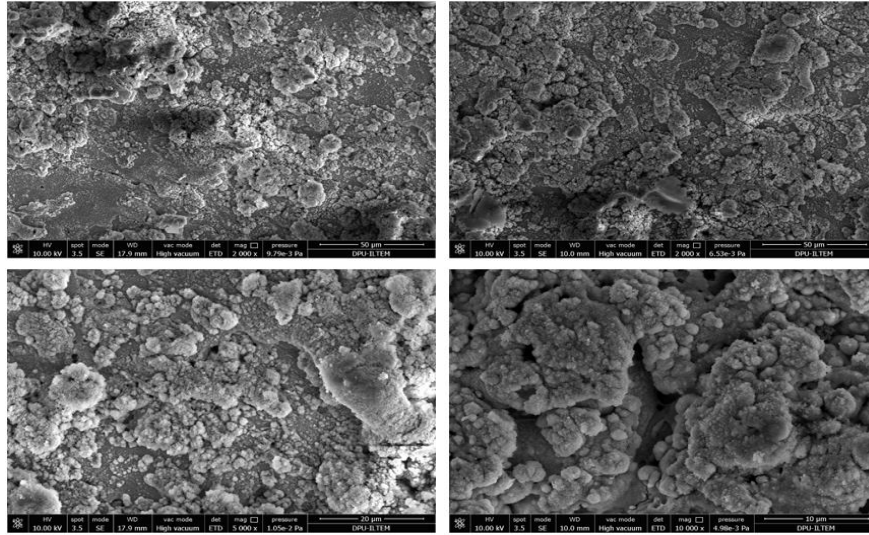
Şekil 4. 1. EDS analiz sonuçları

Darbe süresi arttıkça numunelerin yüzeye olan ısı transfer miktarı da artar ve sonuç olarak daha fazla malzeme erir. Erimiş malzeme beyaz bir tabaka oluşturan dielektrik sıvı tarafından yüzeyden giderilmezse yüzey pürüzlülüğü daha da kötüleşebilir. Kaba işleme geçişi sırasında malzemeleri olabildiğince hızlı kesmek için yüksek voltaj ve uzun darbe süresi ayarları kullanılmalıdır. Yüksek voltaj ve darbe kıvılcımındaki daha fazla termal

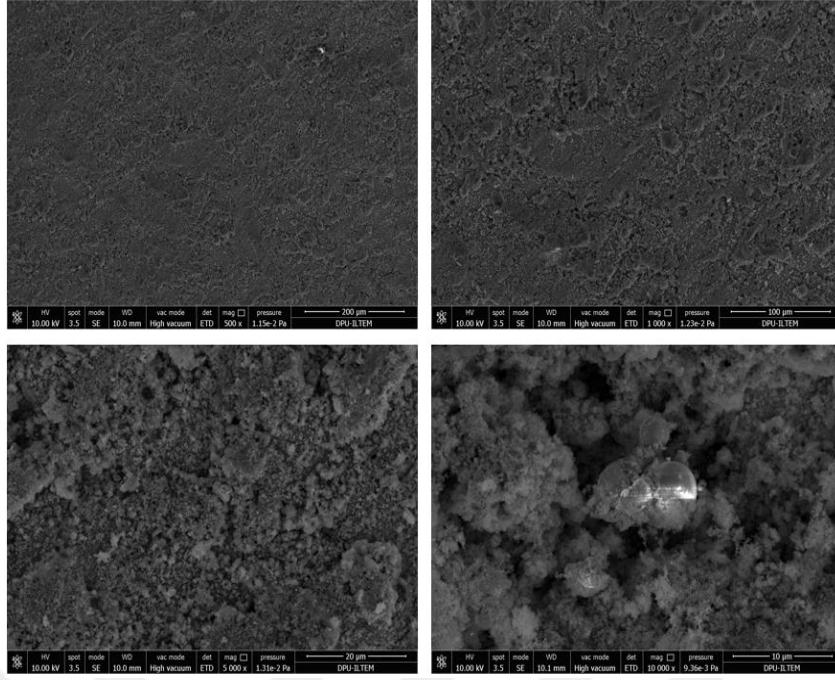
enerjiye eşittir. Bu nedenle iş parçası malzemesinin daha fazlasını buharlaştırır. Bu iş parçasında büyük kraterler ile sonuçlanır. Kraterlerin boyutlarının, kıvılcımların akımın miktarından etkilendiği düşünülmelidir. Mikro çatlaklar oluşumu genellikle plastik deformasyon ile ilişkilendirilmektedir. Genel olarak, tepe akımı ve darbe vuruş süresi arttıkça çatlakların yoğunlukları artar ve daha belirgindir. Bununla birlikte, bazı numunelerde çatlak oluşumuna rastlanılmamıştır.



Şekil 4. 2. Yumuşak numunelerin SEM görüntüleri



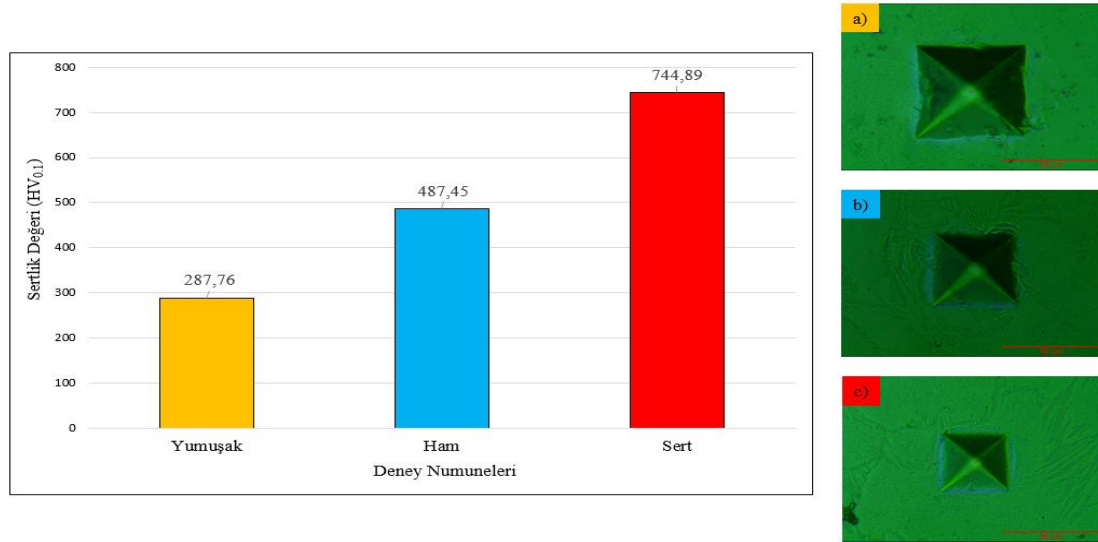
Şekil 4. 3. Ham numunelerin SEM görüntüleri



Şekil 4. 4. Sert numunelerin SEM görüntüleri

4.2. Sertlik Ölçümleri

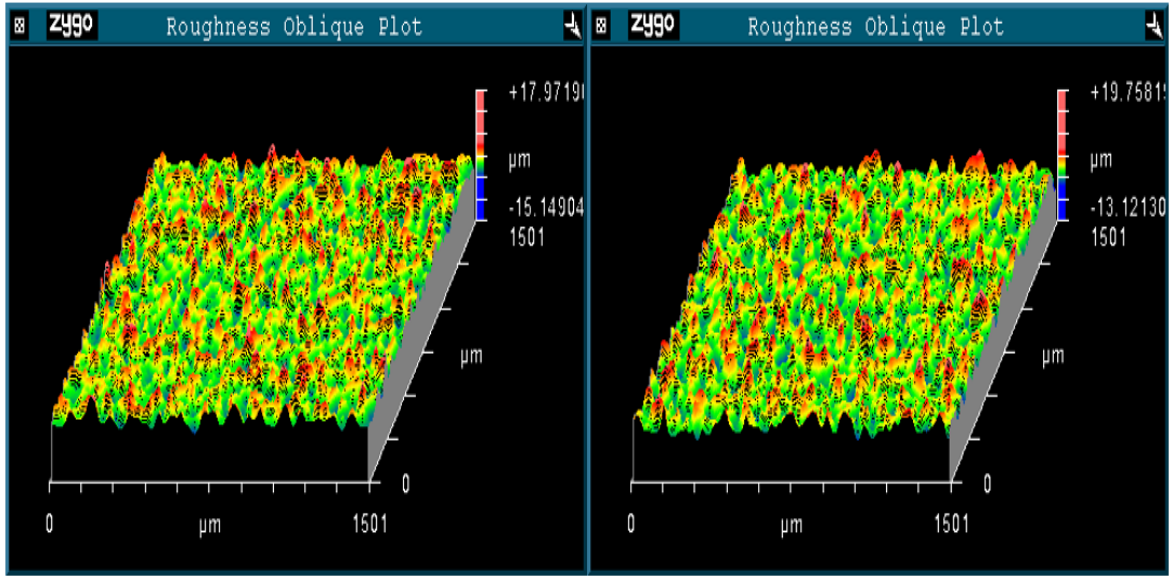
Şekil 4.5 te numunelerin Vickers sertlik değeri ve oluşan izin görüntüsü gösterilmektedir. Burada, sert malzemenin diğer dikkate alınan numuneler arasında en yüksek sertliğe sahip olduğunu gözlemliyoruz.



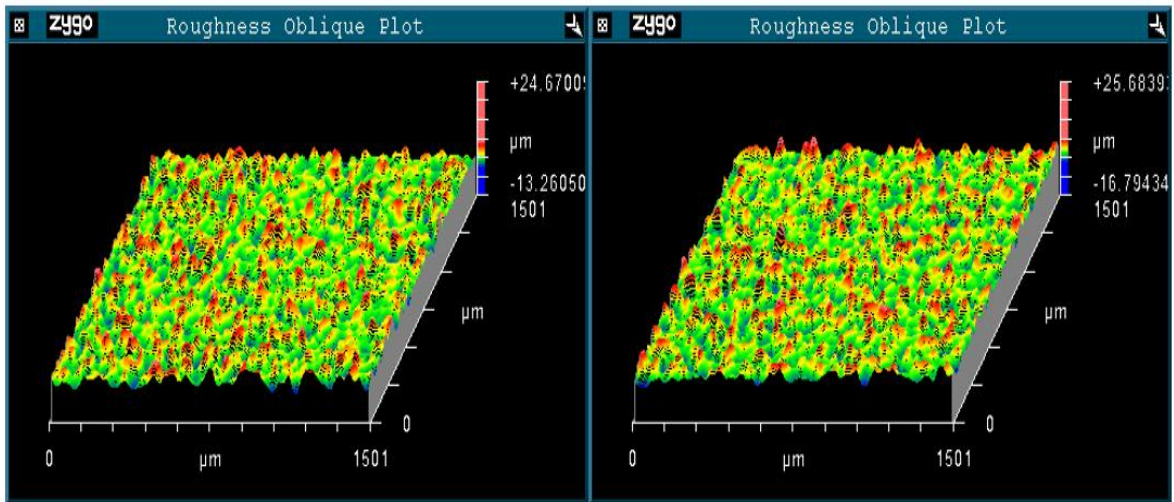
Şekil 4. 5. Numunelerin Vickers sertlik değeri ve oluşan izin görüntüsü

4.3. Pürüzlülük Ölçümleri

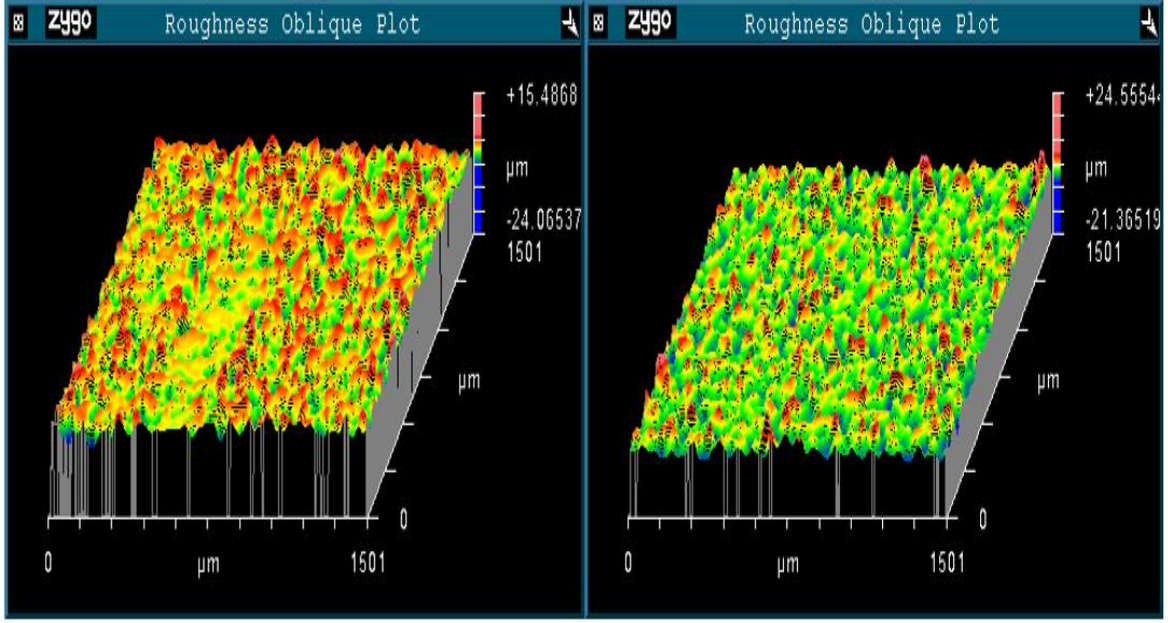
Uygun yüzey parametrelerinin değerlendirilmesi, bir bileşenin yalnızca aşınma ve hizmet ömrünü değil, aynı zamanda güvenilirliğinin de tahmin edilmesini sağlar. Ham, yumuşak ve sert malzemelerin farklı parametrelerde tel kesme işlemlerinin yüzey topografya analizleri görüntülenmiştir. Elde edilen görüntüler Şekil 4.6-4.7-4.8-4.9-4.10-4.11’de verilmiştir.



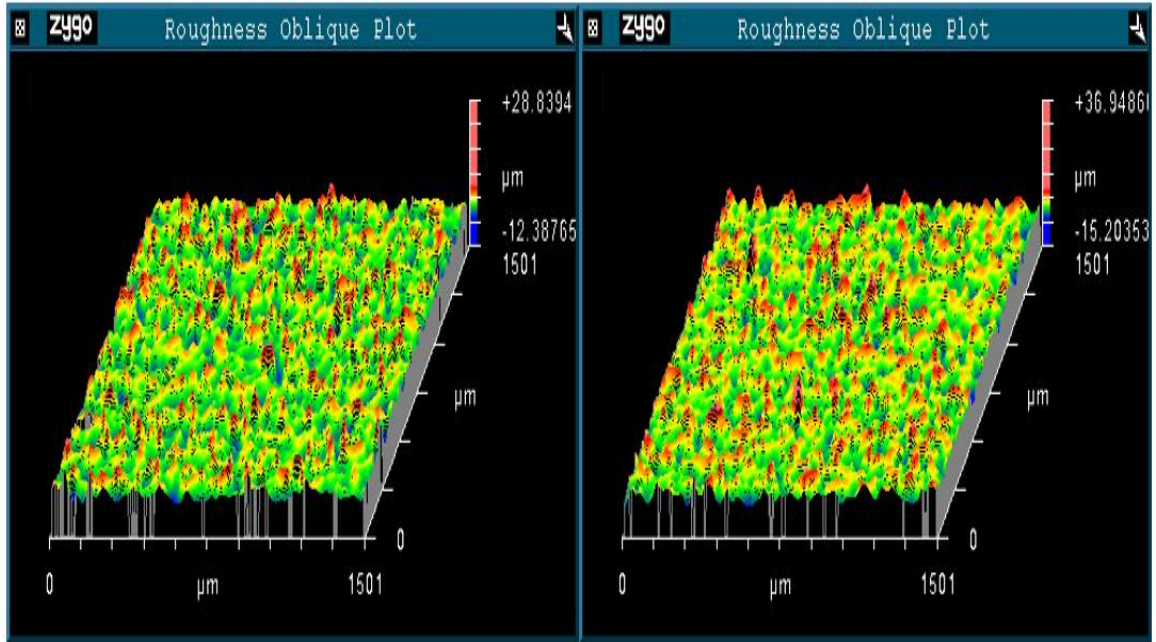
Şekil 4. 6. Ham numune yüzey topografyanın enine ve boyuna görüntüsü; Ton:110, Toff:60, Tel hızı 4, Su basıncı 8, Ra:4,336 μm .



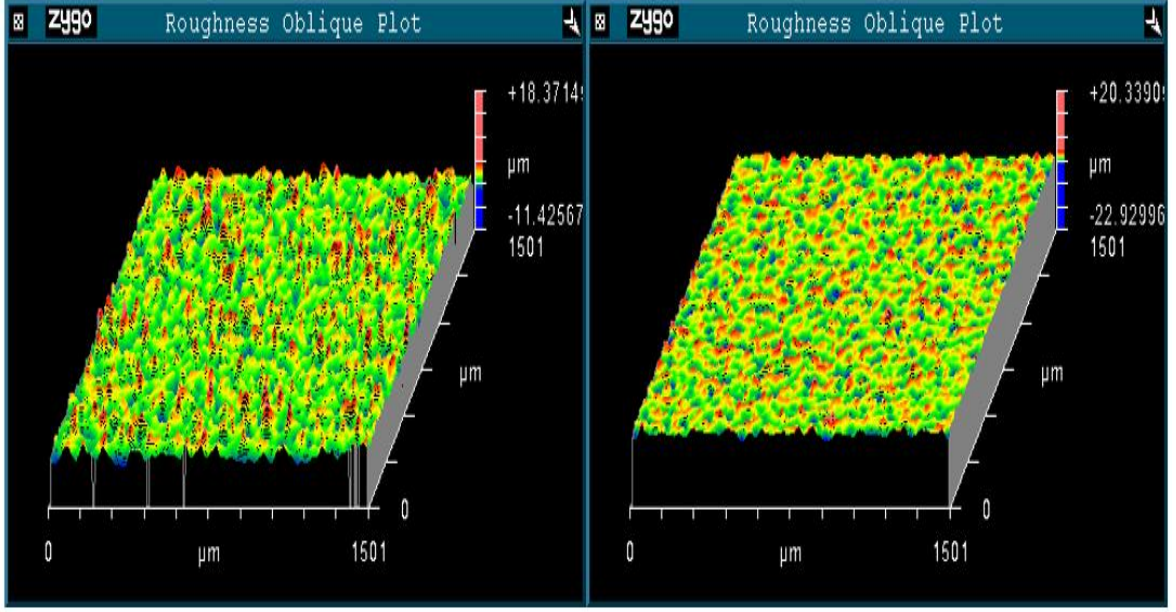
Şekil 4. 7. Ham numune yüzey topografyanın enine ve boyuna görüntüsü; Ton:115, Toff:56, Tel hızı 6, Su basıncı 10, Ra:4,755 μm .



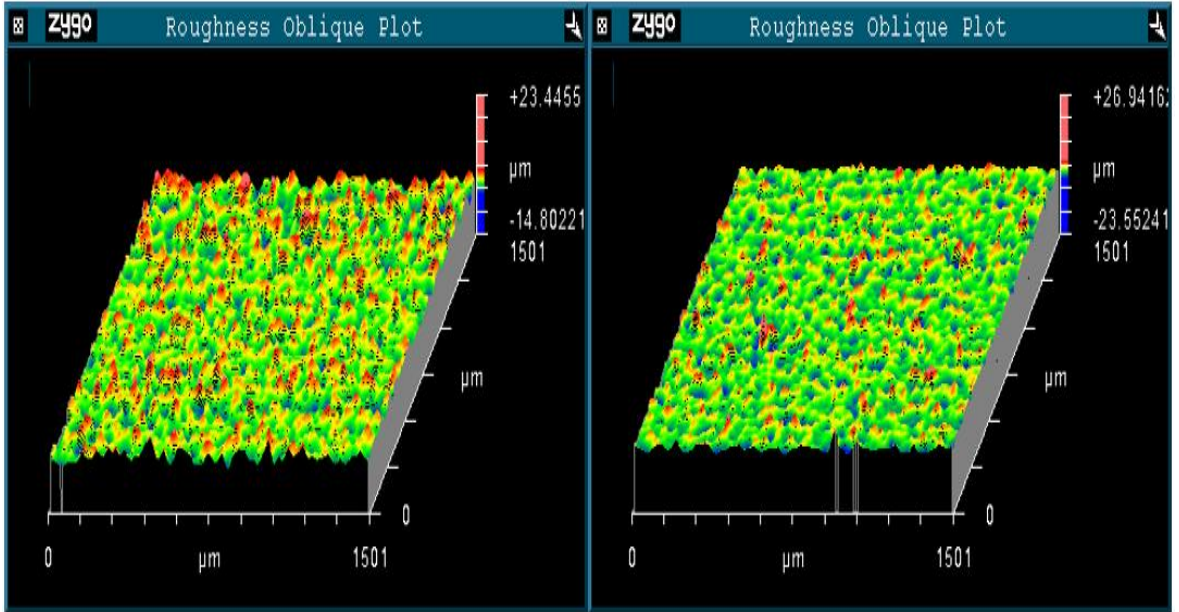
Şekil 4. 8. Yumuşak numune yüzey topografya enine ve boyuna görüntüsü; Ton:110, Toff:60, Tel hızı 4, Su basıncı 8, Ra:4,39 µm.



Şekil 4. 9. Yumuşak numune yüzey topografya enine ve boyuna görüntüsü; Ton:115, Toff:56, Tel hızı 6, Su basıncı 10, Ra:4,75 µm



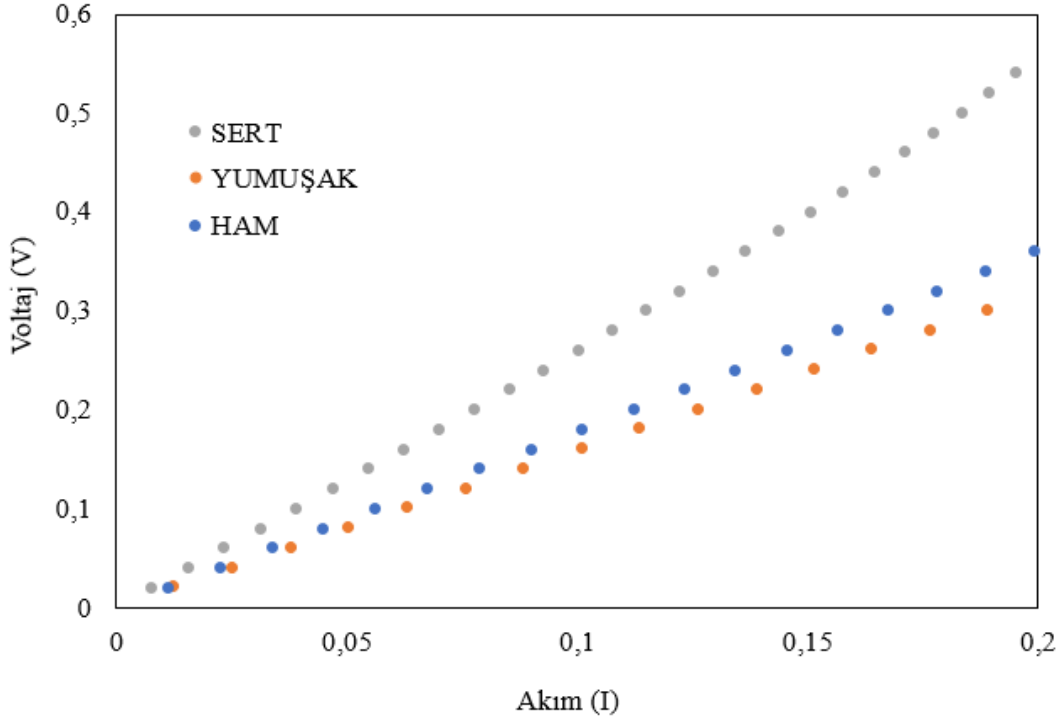
Şekil 4. 10. Sert numune yüzey topografya enine ve boyuna görüntüsü; Ton:110, Toff:60, Tel hızı 4, Su basıncı 8, Ra:4,97 μm .



Şekil 4. 11. Yumuşak numune yüzey topografya enine ve boyuna görüntüsü; Ton:115, Toff:56, Tel hızı 6, Su basıncı 10, Ra:4,85 μm .

4.4. Elektrik İletkenlik Ölçümleri

Voltaj-Akım oranı direnç değerini vereceğinden numunelerin direncinin düşük olması elektrik iletkenliğinin daha fazla olmasını sağlar.



Şekil 4. 12. Numunelerin Voltaj-Akım ilişkisi

4.5. Kesme İşlemi Neticesinde Alınan Sonuçlar

4.5.1. İşlem Parametreleri

Yapılan literatür taraması ile Tablo 4.1’de verilen parametrelerin, deneyler için uygun olacağı düşünülmüştür. Yapılan deneylerde Tel gerginliği sabit tutulmuştur. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri Tablo 4.1’de sunulmuştur. Tablo 4.2’de analiz için seçilen parametreler bulunmaktadır.

Tablo 4. 1. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri

Parametre Dizaynı	Proses parametreleri	Level 1	Level 2	Level 3
A	Güç ON (Ton) (ms)	110	115	125
B	GÜÇ OFF (Toff) (ms)	53	56	60

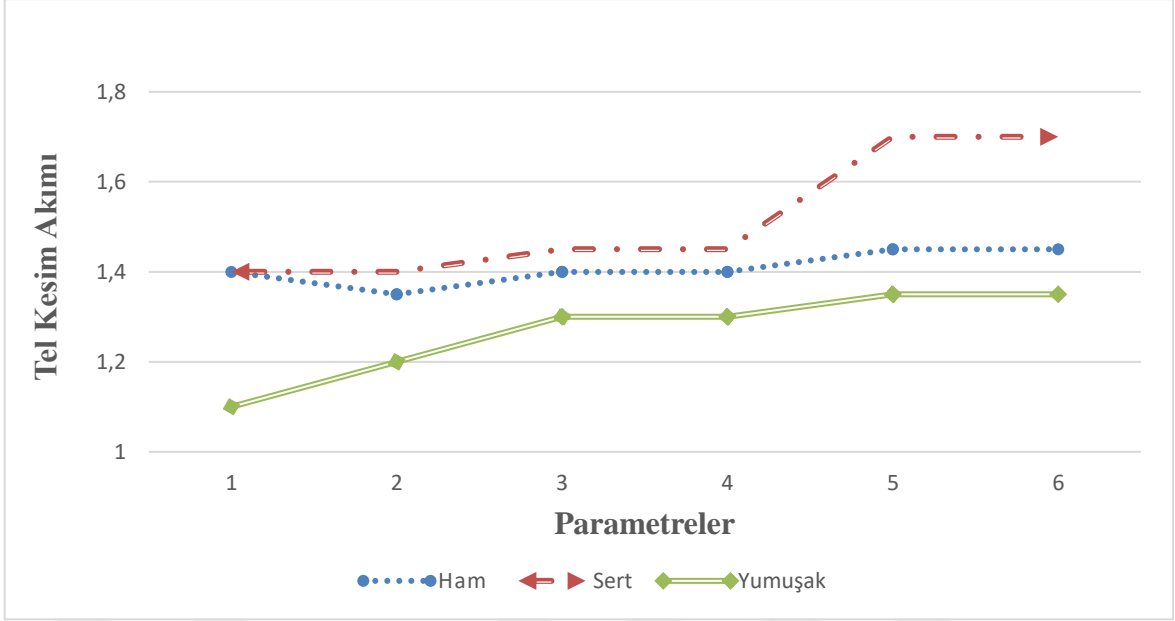
C	Yıkama Basıncı	8	10	12
D	TEL GERGİNLİĞİ	8	8	8
E	TEL HIZI	4	6	-
F	GÜÇ SEVİYELERİ	Düşük	Orta	Yüksek

Tablo 4. 2. Deney analizi için seçilen parametreler

Malzeme Türü	Ton	Toff	Tel hızı	Su Basıncı
1.HAM	110	60	4	8
2.HAM	110	53	6	12
3.Yumuşak	115	56	4	8
4.Yumuşak	115	60	6	12
5.Sert	125	53	4	12
6.Sert	125	60	6	10

4.5.2. İşleme Parametrelerinin Tel kesim Akımına Etkisi

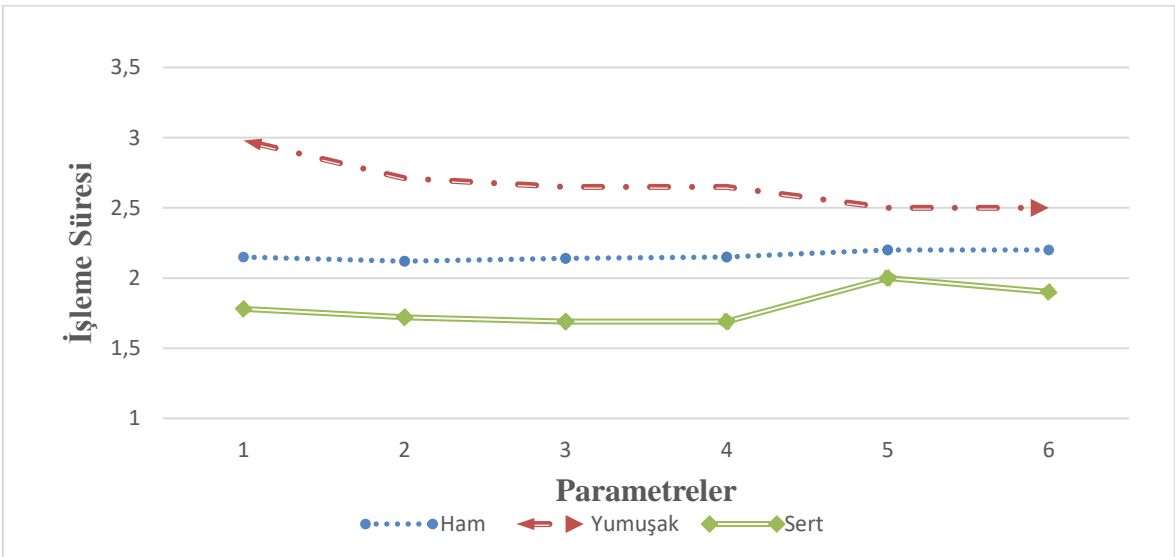
Tel erozyon ile işlemenin en etkili parametrelerinden olan, malzeme türü, vurum süresi ve vurum bekleme süresi, tel hızı ve su basıncının tel kesim akım üzerine etkisi yapılan deneylerle incelenmiştir ve elde edilen sonuçlar aşağıdaki grafikte sunulmuştur.(şekil 4.13)



Şekil 4. 13. Analiz için seçilen parametrelerin tel kesim akım üzerindeki etkisi

Deneysel çalışmalar sonucunda tel kesim akımının sert, ham ve yumuşak malzemelerde vurum süresi, vurum bekleme süresi ve tel hızının artmasıyla birlikte arttığı, en büyük artışın sert malzemede olduğu görülmüştür. Yumuşak ve ham malzemede sert malzemeye göre daha az artış olmuştur. En yüksek tel kesim akımı sert malzemede, 125 μ s Ton, 53 μ s Toff süresinde ve tel hızının 4 ve 6 m/s olduğu değerlerde gözlenmiştir.

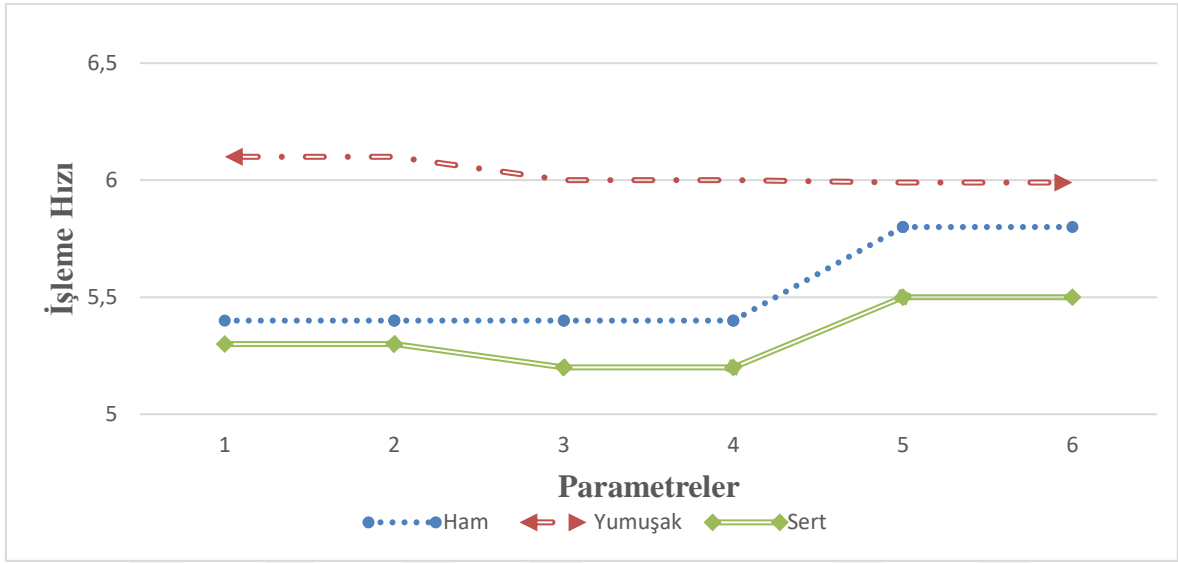
4.5.3. İşleme Parametrelerinin İşlem Süresine Etkisi



Şekil 4. 14. Deney analizi için seçilen parametrelerin işleme süresi üzerindeki etkisi

Yapılan deneysel çalışmanın sonucunda işleme parametrelerinin işleme süresine etkisi incelendiğinde vurum süresi, vurum bekleme süresi ve tel hızının artmasıyla işleme süresinin azaldığı görülmüştür. Ham ve yumuşak malzemelerde değişikliğin az olduğu tespit edilmiştir. Sert malzemede ise en büyük değişikliğin olduğu görülmüştür. En iyi işleme süresi sert malzeme de, 125 μ s Ton, 53 ve 60 μ s Toff süresinde ve tel hızının 4 ve 6 m/s olduğu değerlerde gözlenmiştir.(şekil 4.14)

4.5.4. İşleme Parametrelerinin İşlem Hızına Etkisi



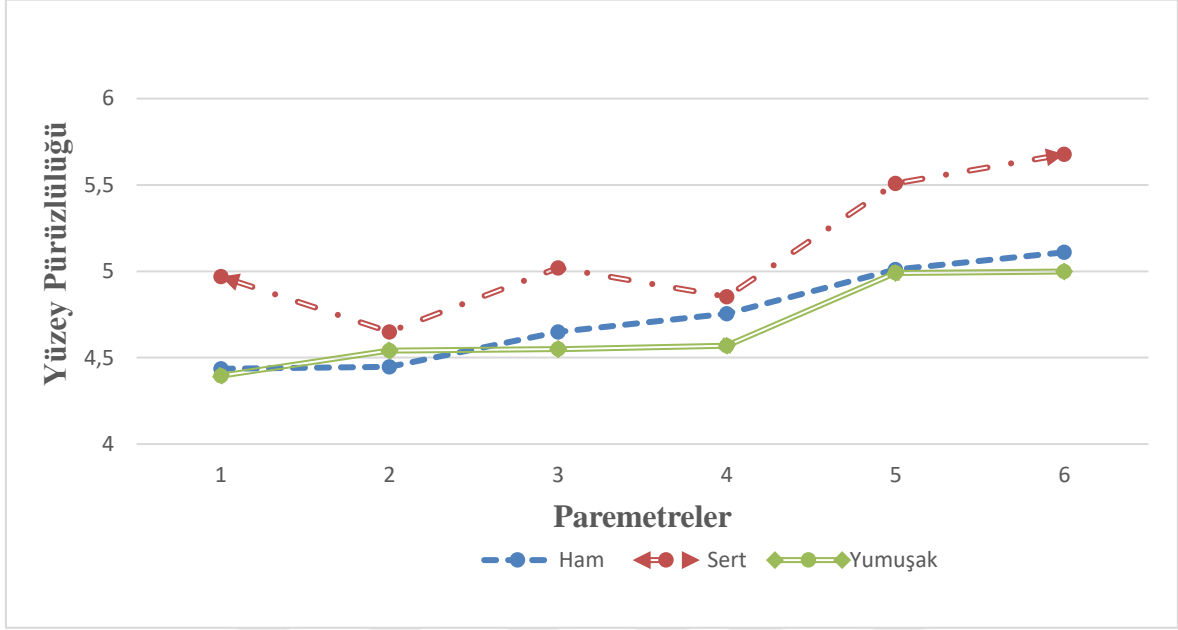
Şekil 4. 15. Deney analizi için seçilen parametrelerin işleme hızı üzerindeki etkisi

Yapılan deneysel çalışmanın sonucunda işleme parametrelerinin işleme hızına etkisi incelendiğinde vurum süresi, vurum bekleme süresi ve tel hızının artmasıyla işleme süresinin arttığı görülmüştür. Yumuşak malzemelerde işleme hızı değişiminin çok az olduğu tespit edilmiştir. Sert ve ham malzemelerde ise işleme parametrelerinin artmasıyla işleme hızının arttığı gözlenmiştir. En iyi işleme süresi sert malzeme de, 125 μ s Ton, 53 ve 60 μ s Toff süresinde ve tel hızının 4 ve 6 m/s olduğu değerlerde gözlenmiştir. . En yüksek işleme hızı sert ve ham malzemede, 115 ve 125 μ s Ton, 53 ve 56 μ s Toff süresinde ve tel hızının 4 ve 6 m/s olduğu değerlerde gözlenmiştir.(şekil 4.15)

4.5.5. İşleme Parametrelerinin Yüzey pürüzlülüğüne Etkisi

Elektro erozyonla işleme sırasında işlenmiş yüzeylerde ergime, buharlaşma ve dielektrik sıvının patlaması sonucu oluşan tepkisel kuvvetten dolayı çeşitli boyutlarda yüzey kraterleri oluşmaktadır. Bu nedenle işlenmiş yüzeyin topografyası düzensiz haldedir. Boşalım akımının artması ile daha geniş ve derin kraterlerin meydana geldiği bu işleme tekniğinin

fiziksel mantığında vardır. Yüksek enerji yoğunluğu daha geniş ve derin kraterlerin ergitilmesi ve bu da daha kısa zamanda fazla malzeme erozyon edilmesi anlamına gelmektedir. Grafiklerde görüldüğü gibi Ra değeri vurum süresi ve vurum bekleme süresi ile artış göstermiştir.

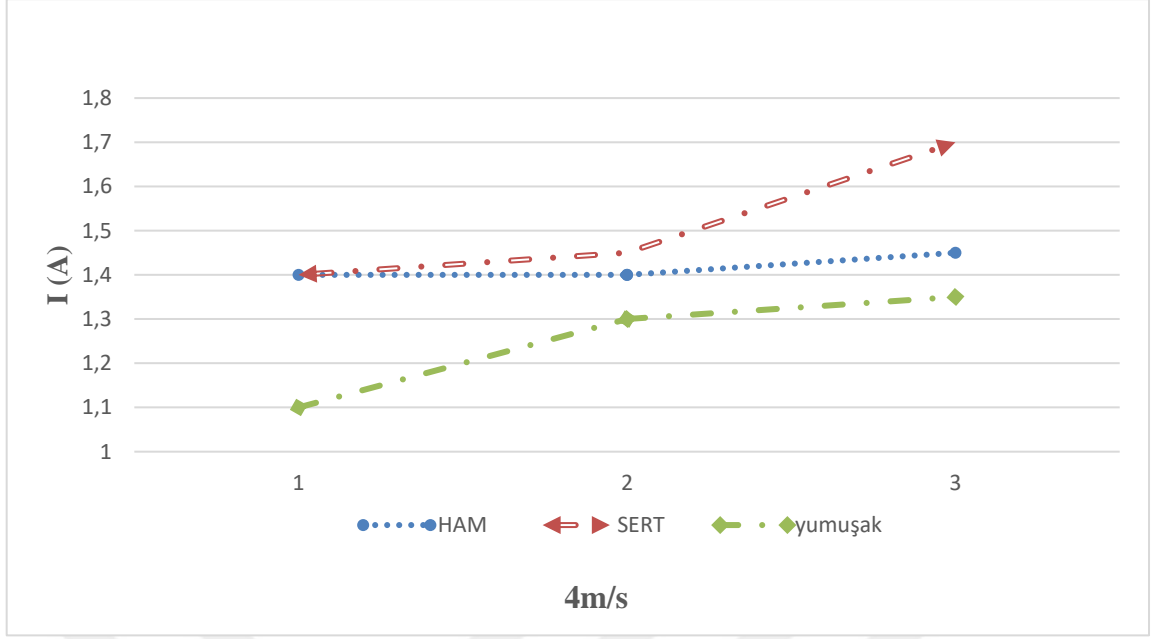


Şekil 4. 16. Analizi için seçilen parametrelerin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi

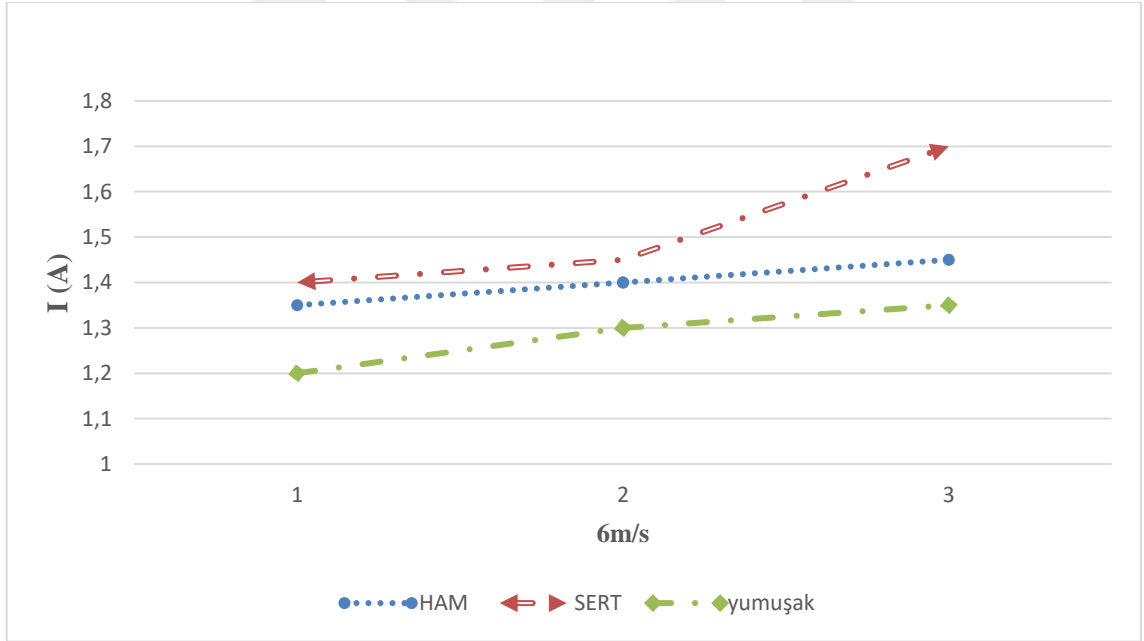
Ton ve Toff işleme parametreleri Ra değerini etkileyen önemli girdilerden biri olmuştur. Ton değeri, kıvılcımın yüzeye düşme süresi olduğundan bu değer artışı ile daha geniş ve derin ergitmeler meydana gelerek büyük kraterler oluşmuştur. En yüksek Ra değeri sert malzemede 5,6781, Ton=125 μs , Toff=60 μs , tel hızı=6 m/s değerinde, en düşük Ra ise 4,436 olarak Ton=110 μs , Toff=60 μs , tel hızı=4 m/s değerinde ölçülmüştür (Şekil 4.16)

4.5.6. Tel Hızının Akım Üzerine Etkisi

Şekil 4.17 ve 4.18 Akım (I) ve Hız arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Hız, akım (I) ile birlikte artmaktadır. Daha büyük deşarj akımı, deşarj kanalında daha yüksek sıcaklıklar üretebilir. Ardından, daha yüksek deşarj tepe akımı (I) altında daha fazla iş parçası malzemesi eriyecek veya buharlaşacaktır. Aşağıdaki şekiller incelendiğinde en çok artışın sert ve yumuşak malzemelerde olduğu görülmüştür. Ham malzemede değişimin çok az olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 4. 17. Akım - hız grafiği (4 m/s)

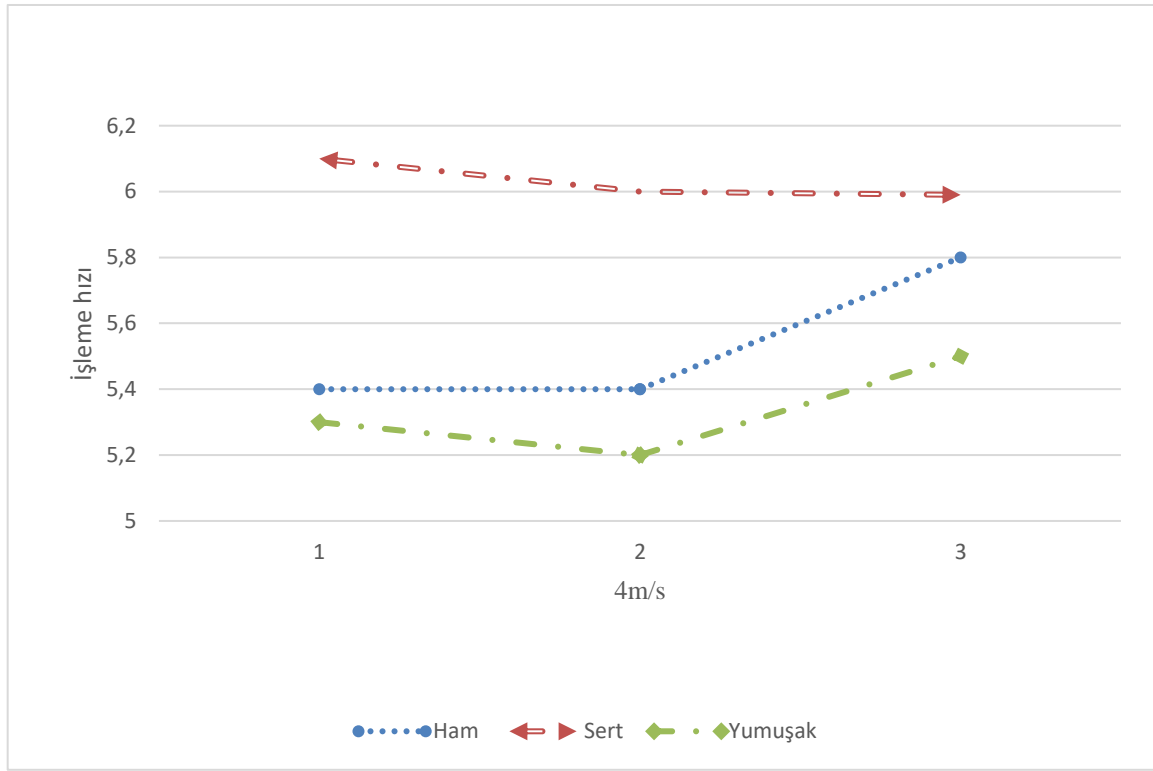


Şekil 4. 18. Akım - hız grafiği (6 m/s)

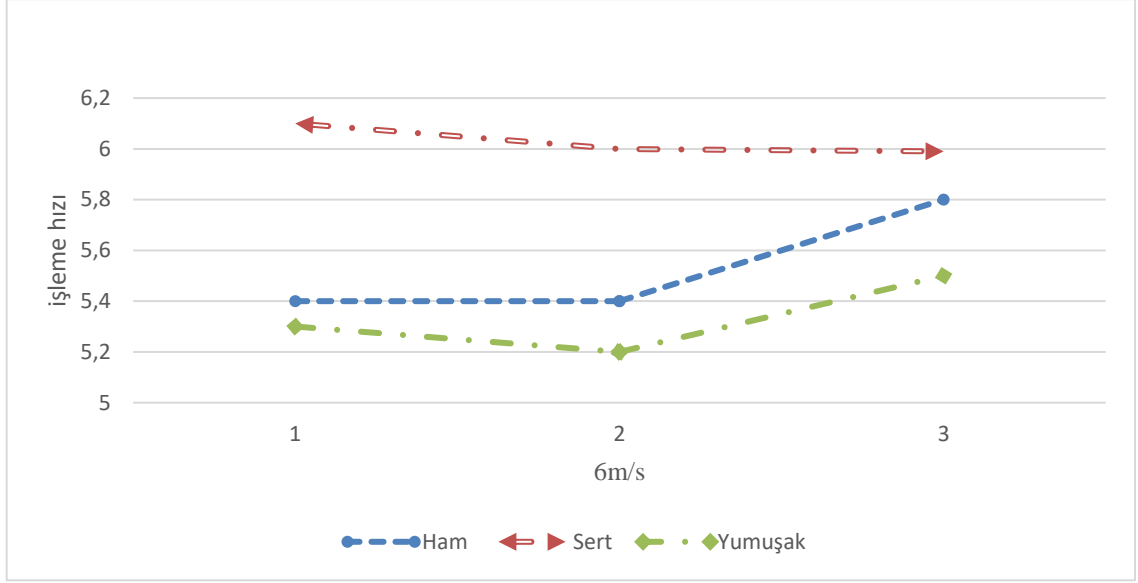
4.5.7. Tel Hızının İşleme Hızı Üzerine Etkisi

Şekil 4.19 ve 4.20 işleme hızı ve tel hızı arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Darbe genişliğinin artmasıyla (t_{on}) hız artar. Aksine, işleme hızı darbe genişliği boyunca azalır

(t_{on}). Boşaltma kıvılcımı, tek darbeli boşaltma işlemi sırasında daha uzun darbe genişliği altında daha uzun süre dayanabilir. Ardından, daha büyük ve daha derin deşarj krateri oluşacaktır. Aynı zamanda, darbe genişliği (t_{on}). Kalıntı, anormal deşarj durumuna neden olacak şekilde kesme çentiğinde dielektrik yalıtımını düşürebilir. Ardından, ark deşarjı sırasında iş parçası malzemesini çıkarmak yerine deşarj enerjisinin bir kısmı iş parçası yüzeyini yakacaktır. İşleme, t_{off} ile birlikte düşer. Artan darbe aralığı (t_{off}) boşaltma enerjisini azaltacak ve bu da işleme verimliliğinin düşmesine neden olabilir. Bu arada, darbe aralığının (t_{off}) etkisi I ve t_{on} ' a göre daha azdır. Bu fenomen, darbe aralığı ($t_{kapalı}$) daha uzun olduğunda boşaltma döküntülerinin dışarı atılması için daha fazla zamanın olması nedeniyle oluşur. Bu, boşaltma işleme için yararlıdır.



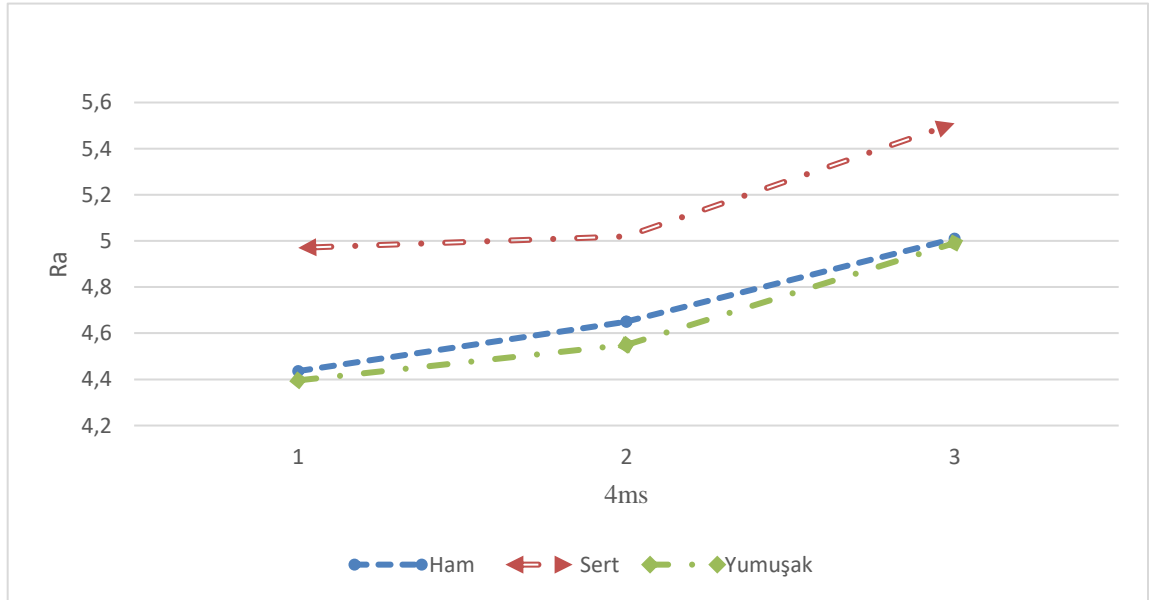
Şekil 4. 19. İşleme hızı - tel hızı grafiği (4 m/s)



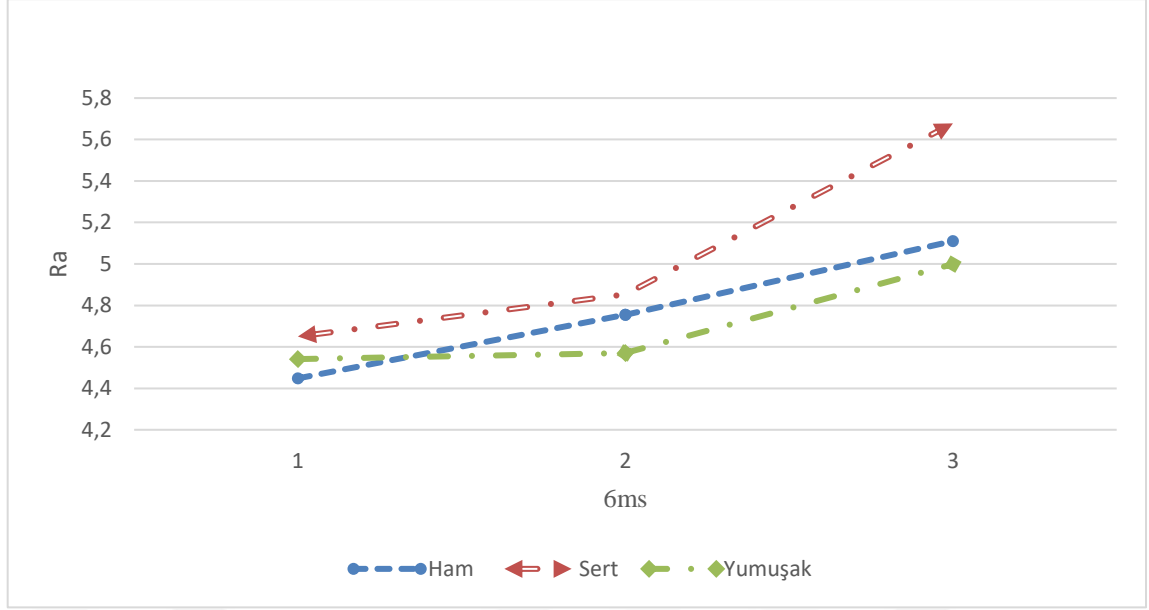
Şekil 4. 20. İşleme hızı - tel hızı grafiği (6 m/s)

4.5.8. Tel Hızının Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisi

Şekil 4.21 ve 4.22 de gösterildiği gibi proses parametreleri ve Ra arasındaki ilişki elde edilebilir. Tel hızının artmasıyla tüm malzemelerde yüzey pürüzlülüğün artmıştır. En fazla yüzey pürüzlülüğün sert malzemede, ham ve yumuşak malzemelerde ise birbirine yakın değerler görülmüştür. Hızın artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün de arttığı görülmüştür.



Şekil 4. 21. Yüzey pürüzlülüğü - tel hızı grafiği (4 m/s)



Şekil 4. 22. Yüzey pürüzlülüğü - tel hızı grafiği (6 m/s)

4.6. Kesme İşlemi Neticesinde Alınan Sonuçlar

4.6.1. Deneysel Çıktıların Optimizasyon ve Analizi

4.6.1.1. Taguchi Yöntemi

Taguchi Metodu, kontrol edilemeyen faktörlerin bir deneyin sonuçları üzerindeki etkisini azaltmaya çalışan bir deneysel tasarım tekniğidir. Yöntem, tasarımı dengelemek için ortogonal diziler kullanır, çünkü faktör düzeylerinin bağımsız değerlendirilmesinin birbirinden bağımsız olarak görülebilmesi önemlidir. Her koşul, diğer koşullardan bağımsız olarak eşit sayıda numuneye sahip olmalıdır. Yanıt değişkenini etkileyebilecek çok sayıda değişken vardır ve bu değişkenlerin birbirleriyle etkileşimleri olabilir (bir değişkenin sonucu yanıt değişkenini etkiliyorsa, diğer değişkenin de etkisi olabilir). Bu, sorunu son derece karmaşık hale getirecektir. Öte yandan, Taguchi yöntemi, ürün ve süreç değişkenliğine katkıda bulunan kontrol edilebilir faktörlerin seviyeleri ile kontrol edilemeyen faktörlerin seviyelerinin en uygun kombinasyonunu seçerek ürün ve proses değişkenliğini en aza indirmeye çalışır.

İşlem performansının çıktısını optimize etmek için işleme parametrelerinin en iyi kombinasyonu, sinyal-gürültü (s/n) oranı grafiği ile belirlenir. Taguchi deneysel tasarım yönteminde, deneysel çalışmadan elde edilen sonuçlardan sinyal-gürültü oranı hesaplanır. Taguchi yöntemine göre kalite değerinin minimum en iyi, maksimum en iyi ve nominal en

iyi hedef değerine göre sinyal-gürültü oranı aşağıdaki denkleme göre farklı şekillerde hesaplanır.

$$\text{En büyük en iyi : } -10 \log\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n iy^{-2}\right] \dots\dots\dots \text{Eşitlik 1}$$

$$\text{En küçük en iyi : } -10 \log\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n iy^2\right] \dots\dots\dots \text{Eşitlik 2}$$

Bu çalışmada, işleme parametrelerinin işleme performansı çıktısı üzerindeki etkilerini optimize etmek için sırasıyla Taguchi yöntemleri kullanılmıştır. İşlem performansının çıktısı için işleme parametrelerinin en iyi kombinasyonunu bulurken Taguchi (L18) ortogonal dizilerini kullanılır. Ardından, sinyal-gürültü oranı değerini hesaplayın ve optimal işleme koşullarını elde etmek için hesaplanan sinyal-gürültü oranı değeri yardımıyla bir sinyal-gürültü oranı grafiği çizilir. Sinyal/gürültü değeri hesaplanırken, hesaplama iş parçası işleme hızının en yüksek kalite özelliklerine dayanır. Performans çıktıları Tablo 4.3'te, kullanılan faktörler ve seviyeleri tablo 4.4 de verilmiştir.

Tablo 4. 3. İşleme Performansının Çıktıları İçin Kullanılan Taguchi (L18) Ortogonal Dizisi Sinyal/gürültü (dp) değerleri

Malzeme	Ton	Toff	Su Basıncı	Tel Hızı 1	İşleme Süresi	Tel Kesim Akımı	İşleme Hızı mm/sn	SNRA1	MEAN1	SNRA2	MEAN2	SNRA3	MEAN3
Ham	110	60	8	4	2,15	1,4	5,4	-6,6487	2,15	-2,9225	1,4	-14,647	5,4
Ham	115	56	10	4	2,14	1,4	5,4	-6,6082	2,14	-2,9225	1,4	-14,647	5,4
Ham	125	53	12	4	2,2	1,45	5,8	-6,8484	2,2	-3,2273	1,45	-15,268	5,8
Sert	110	60	10	4	2,98	1,4	6,1	-9,4843	2,98	-2,9225	1,4	-15,706	6,1
Sert	115	56	12	4	2,65	1,45	6	-8,4649	2,65	-3,2273	1,45	-15,563	6
Sert	125	53	8	4	2,5	1,7	5,99	-7,9588	2,5	-4,6089	1,7	-15,548	5,99
Yumuşak	110	56	8	4	1,69	1,3	5,2	-4,5577	1,69	-2,2788	1,3	-14,320	5,2
Yumuşak	115	53	10	4	1,69	1,3	5,2	-4,5577	1,69	-2,2788	1,3	-14,320	5,2
Yumuşak	125	60	12	4	2	1,35	5,5	-6,0206	2	-2,6066	1,35	-14,807	5,5
Ham	110	53	12	6	2,12	1,35	5,4	-6,5267	2,12	-2,6066	1,35	-14,647	5,4
Ham	115	60	8	6	2,15	1,4	5,4	-6,6487	2,15	-2,9225	1,4	-14,647	5,4
Ham	125	56	10	6	2,2	1,45	5,8	-6,8484	2,2	-3,2273	1,45	-15,268	5,8
Sert	110	56	12	6	2,711	1,4	6,1	-8,6625	2,711	-2,9225	1,4	-15,706	6,1
Sert	115	53	8	6	2,65	1,4	6	-8,4649	2,65	-2,9225	1,4	-15,563	6
Sert	125	60	10	6	2,5	1,7	5,99	-7,9588	2,5	-4,6089	1,7	-15,548	5,99
Yumuşak	110	53	10	6	1,72	1,2	5,3	-4,7105	1,72	-1,5836	1,2	-14,485	5,3
Yumuşak	115	60	12	6	1,69	1,3	5,2	-4,5577	1,69	-2,2788	1,3	-14,320	5,2
Yumuşak	125	56	8	6	1,9	1,35	5,5	-5,5750	1,9	-2,6066	1,35	-14,807	5,5

Tablo 4. 4. Kullanılan faktörler ve seviyeleri

Parametre Dizaynı	Proses parametreleri	Level 1	Level 2	Level 3
A	Güç On (Ton) (Ms)	110	115	125
B	Güç Off (Toff) (Ms)	53	56	60
C	Yıkama Basıncı	8	10	12
D	Tel Hızı	4	6	-
E	Güç Seviyeleri	1	2	3

4.6.1.2. Sinyal/Gürültü (db) Grafikleri

Taguchi yöntemine (L18) dayalı olarak, ortogonal dizinin sinyal-gürültü oranı (s/n), minimum-optimal ve maksimum-optimal denklemleri yardımıyla deneysel sonuçlar kullanılarak hesaplanır ve ardından sinyal /gürültü oranı (s/n) grafikleri yardımıyla işleme parametrelerinin en iyi kombinasyonunu belirlemek için kullanılır.

4.6.1.3. İşleme süresi İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db)

İşleme süresi için sinyal/gürültü (s/n) oranları daha küçük daha iyi eşitliği, Eşitlik1 yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmış olup elde edilen sonuçlar tablo 4.5’de gösterilmiştir. Hesaplanan bu değerlere göre İş parçası işleme hızı için sinyal/gürültü (s/n) grafiği Şekil 4.23 ve 4.24’deki gibi çizilmiştir

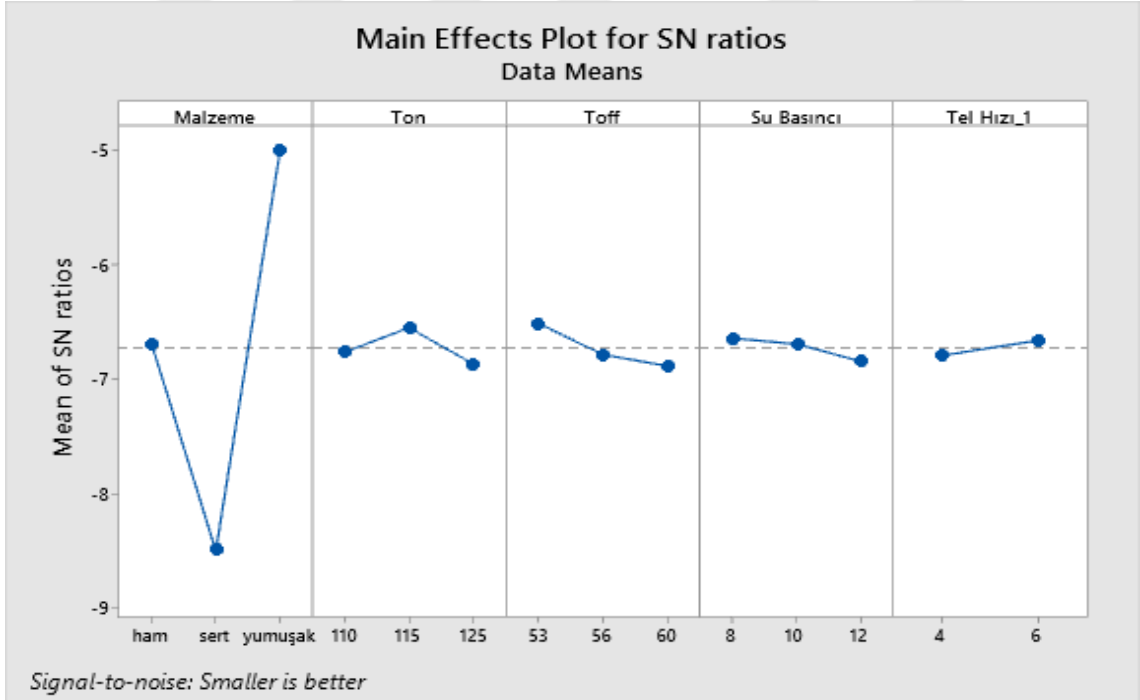
Taguchi Analizi: İşleme Süresi versus Malzeme, Ton, Toff, Su Basıncı, Tel Hızı Sinyal Gürültü Oranları için Tepki Tablosu Daha küçük daha iyidir.

Tablo 4. 5. Gürültü oranları için tepki tablosu

Level	Malzeme	Ton	Toff	Su Basıncı	Tel Hızı
1	-6,688	-6,765	-6,511	-6,642	-6,794
2	-8,499	-6,550	-6,786	-6,695	-6,662
3	-4,997	-6,868	-6,886	-6,847	
Delta	3,502	0,318	0,375	0,204	0,133
Rank	1	3	2	4	5



Şekil 4. 23. İşleme süresi için ortalamaları grafiği



Şekil 4. 24. İşleme süresi için sinyal/gürültü (db) grafiği

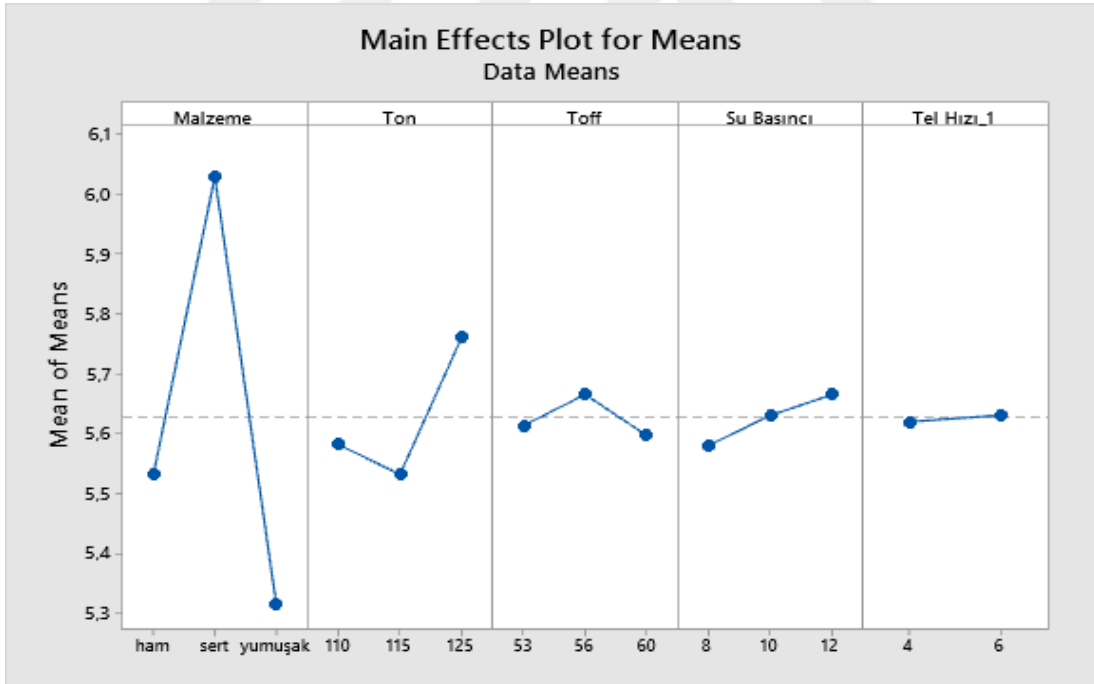
4.6.1.4. İşleme Hızı İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db)

İşleme hızı için sinyal/gürültü (s/n) oranları en büyük en iyi eşitliği, Eşitlik 2 yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmış olup elde edilen sonuçlar tablo 4.6'da gösterilmiştir. Hesaplanan bu değerlere göre İş parçası işleme hızı için sinyal/gürültü (s/n) grafiği Şekil 4.25 ve 4.26'da ki gibi çizilmiştir

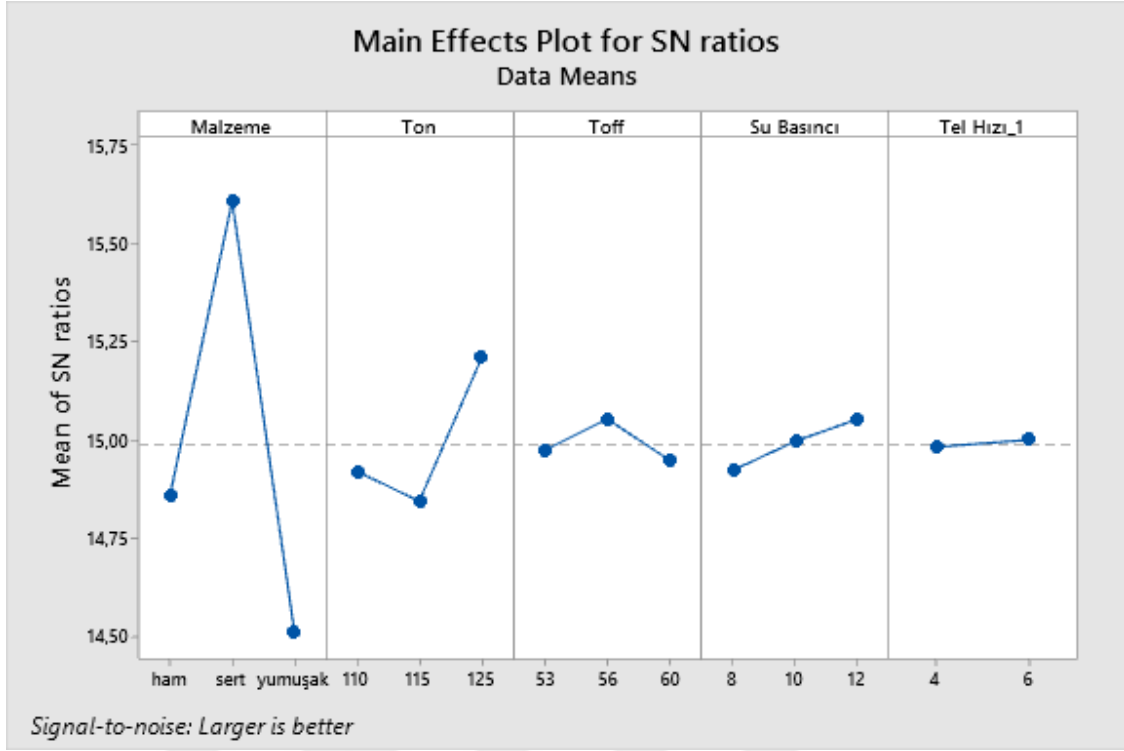
Taguchi Analizi: İşleme hızı versus Malzeme, Ton, Toff, Su Basıncı, Tel Hızı daha büyük daha iyidir

Tablo 4. 6. Sinyal Gürültü Oranları için Tepki Tablosu

Level	Malzeme	Ton	Toff	Su Basıncı	Tel Hızı
1	14,85	14,92	14,97	14,92	14,98
2	15,61	14,84	15,05	15,00	15,00
3	14,51	15,21	14,95	15,05	
Delta	1,10	0,36	0,11	0,13	0,02
Rank	1	2	4	3	5



Şekil 4. 25. İşleme hızı için ortalamalar grafiği



Şekil 4. 26. İşleme hızı için sinyal/gürültü(db) grafiği

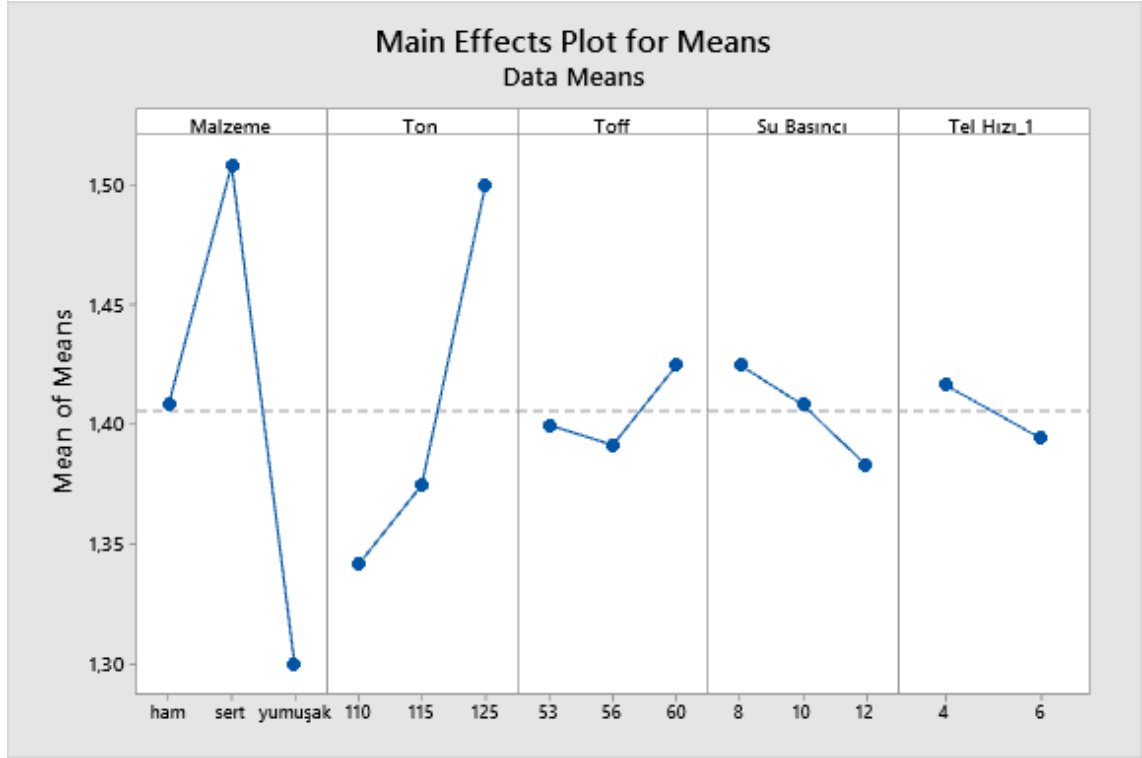
4.6.1.5. Tel Kesim Akımı İçin Sinyal/Gürültü Grafiği (db)

İşleme Akımı için sinyal/gürültü (s/n) oranları daha büyük daha iyi eşitliği, Eşitlik 2 yardımıyla aşağıdaki şekilde hesaplanmış olup elde edilen sonuçlar tablo 4.7’de gösterilmiştir. Hesaplanan bu değerlere göre İş parçası işleme hızı için sinyal/gürültü (s/n) grafiği Şekil 4.27 ve 4.28’de ki gibi çizilmiştir.

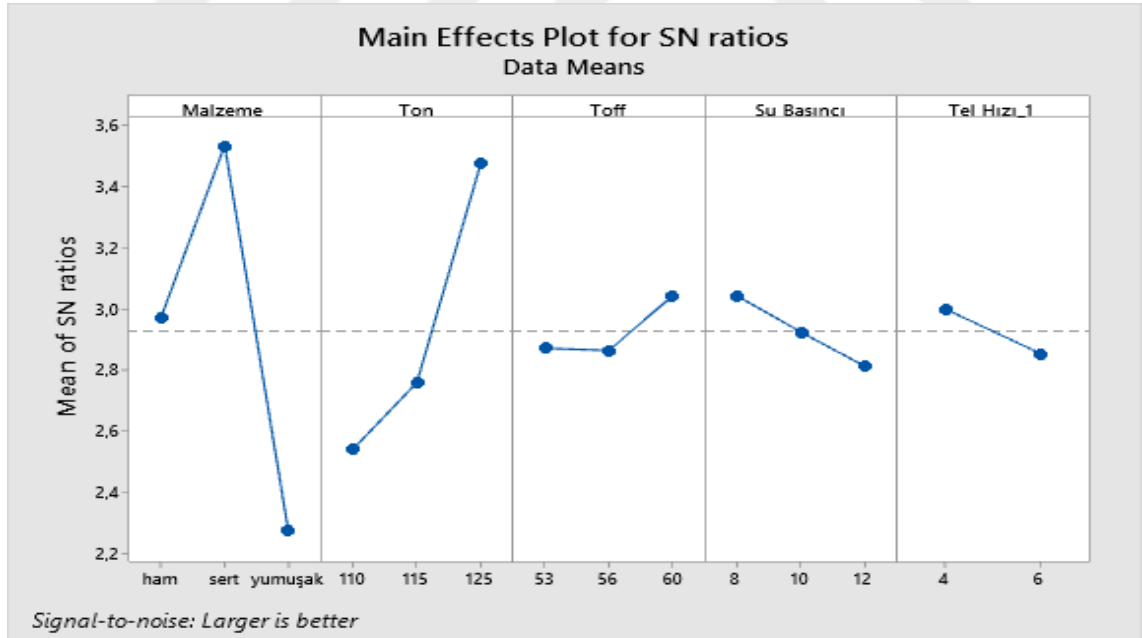
Taguchi Analizi: Tel kesim akımı versus malzeme, ton, toff, su basıncı, tel hızı daha büyük daha iyidir.

Tablo 4. 7. Sinyal Gürültü Oranları için Tepki Tablosu

Level	Malzeme	Ton	Toff	Su Basıncı	Tel Hızı
1	2,972	2,539	2,871	3,044	3,000
2	3,535	2,759	2,864	2,924	2,853
3	2,272	3,481	3,044	2,812	
Delta	1,263	0,942	0,179	0,232	0,146
Rank	1	2	4	3	5



Şekil 4. 27. Tel kesim akımı için ortalamalar grafiği



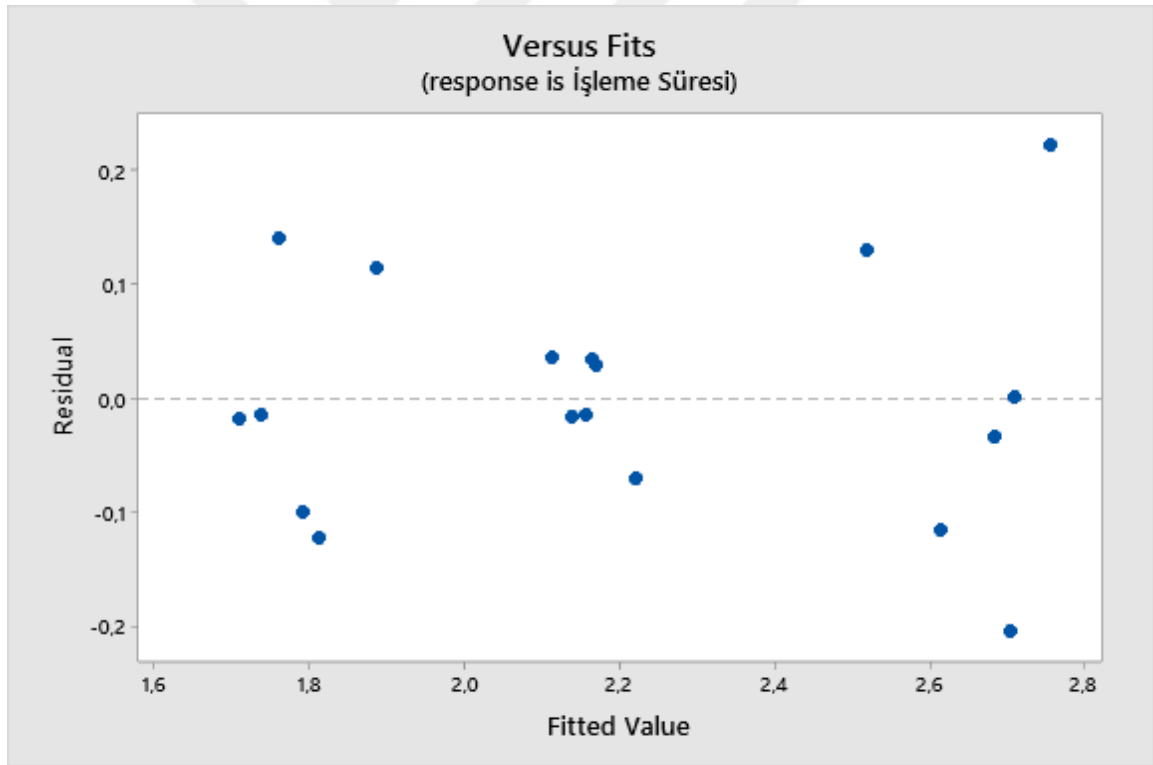
Şekil 4. 28. Tel kesim akımı için sinyal/gürültü(db) grafiği

4.6.1.6. Değişken analizi (ANOVA)

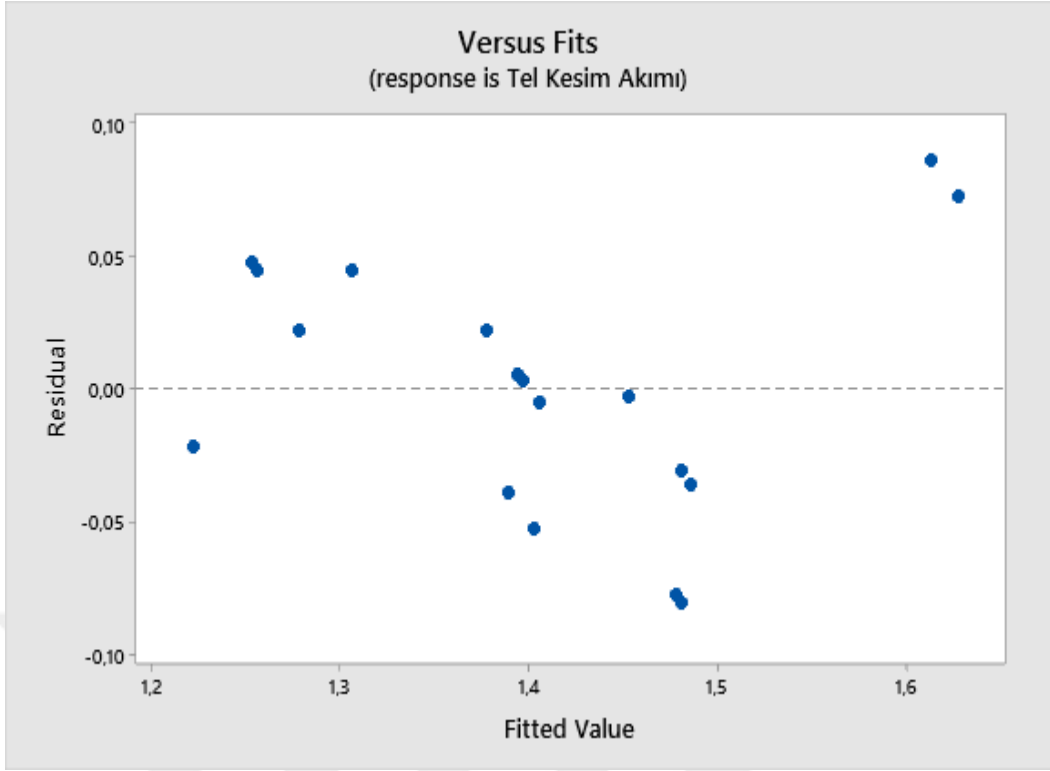
Deney veya araştırma sonuçlarının güvenilirliği istatistiksel analiz gerektirir. Taguchi yöntemi, tek bir yanıt özelliğini optimize etmeyi amaçlar. Bir çıktı için en büyüğü en iyisidir ve diğer çıktı için en küçüğü en iyisidir. Bu nedenle, çoklu çıktıların optimizasyonu karmaşıktır. Bu amaçla, parametrelerin sonuçlar üzerindeki yüzde etkisi ve güven düzeyi, çok değişkenli bir varyans analizi (ANOVA) kullanılarak belirlendi. Bu çalışmada Minitab programı kullanılarak bir varyans analizi yöntemi (ANOVA) uygulanmış ve işleme parametrelerinin işlem performansı çıktısı üzerindeki etkisi incelenmiştir.

4.6.1.7. İşleme parametrelerinin doğruluk analizi

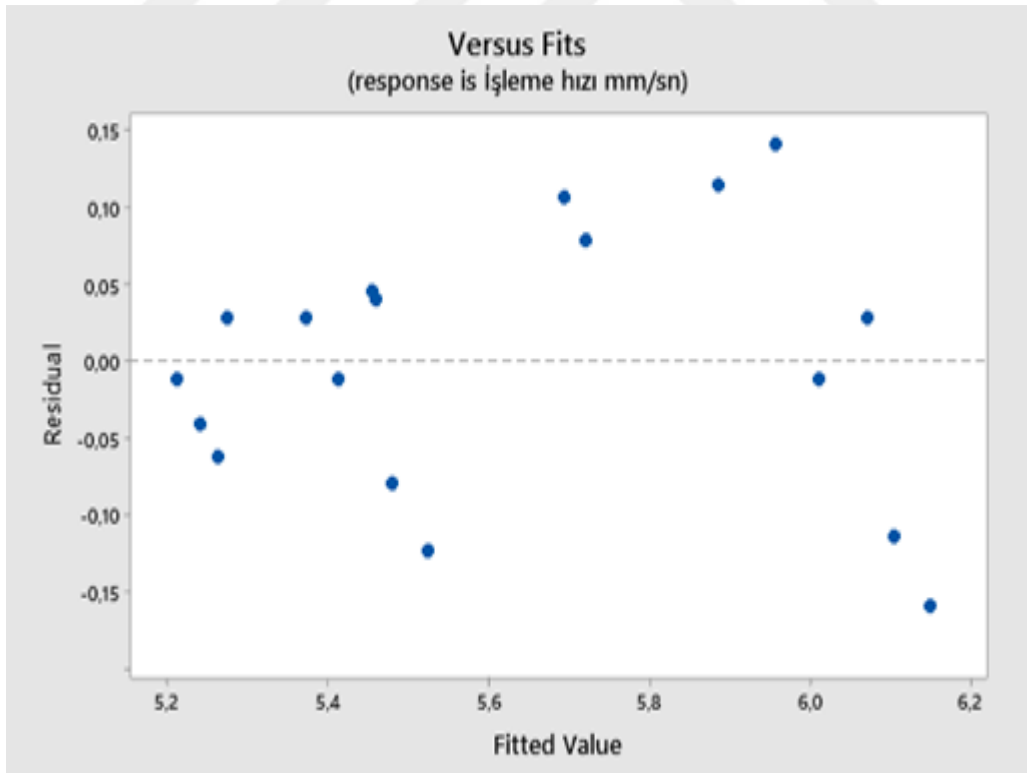
Residual grafiği regresyon ve ANOVA'daki uyum iyiliğini incelemek için kullanılan bir grafik türüdür. Residual grafikleri incelemek, sıradan en küçük kareler varsayımlarının karşılanıp karşılanmadığını belirlememize yardımcı olur.



Şekil 4. 29. İşleme süresi residual grafiği



Şekil 4. 30. Tel kesim akımı residual grafiği



Şekil 4. 31. İşleme hızı residual grafiği

Residual grafiğine (şekil 4.30 ve 4.31) bakıldığında 0 eksenine göre simetrik olduğu görülmektedir. Bu da bize yapılan deneylerin doğru ve tutarlı olduğunu göstermektedir.

4.6.1.8. İş parçası İşleme Süresi İçin ANOVA Analizi Sonuçları

ANOVA analizi İş parçası işleme hızına işlem parametrelerinin etkilerini ortaya çıkarmak için uygulanmıştır. P değerinin sıfıra yakın olması demek parametrelerin etkinliğinin fazla olduğunu göstermektedir. P değerleri 0,05 'ten daha küçük olduğu için işlemin güvenilirlik oranı %95'tir.

4.6.1.9. Varyans Analizi

Tablo 4. 8. Parametrelerin yüzdeler katkılarını

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Malzeme	2	2,35780	1,17890	49,59	0,000
Ton	2	0,01526	0,00763	0,32	0,734
Toff	2	0,03050	0,01525	0,64	0,552
Su Basıncı	2	0,00920	0,00460	0,19	0,828
Tel Hızı	1	0,00716	0,00716	0,30	0,598
Hata	8	0,19020	0,02378		
Total	17	2,61013			

Her bir parametrenin yüzde olarak katkısını bulmak için o parametrenin kareler toplamı, toplam kareler toplamına bölünür. Toplam kareler toplamı ise her parametrenin kareler toplamının toplanmasıyla elde edilir.

$$SST=SSA+SSB+SSC+SSD+SSE+SSF \quad (4.1)$$

Bu denklemde; SSA=Malzemelerin kareleri toplamı, SSB =Vurum süresinin kareleri, toplamı, SSC=Vurum bekleme süresinin kareleri toplamı, SSD=Su basıncının kareleri toplamı, SSE= Tel hızının kareleri toplamı, SSF=Hata değerinin kareleri toplamıdır.

$$SST=2,35780+0,01526+0,03050+0,00920+0,00716+0,19020= 2,61012$$

$$\text{Malzemelerin yüzde katkısı} = \left(\frac{SSA}{SST} \right) \times 100 = 90,33 \quad (4.2)$$

$$\text{Vurum süresinin yüzde katkısı} = \left(\frac{SSB}{SST} \right) \times 100 = 0,58 \quad (4.3)$$

$$\text{Vurum bekleme süresinin yüzde katkısı} = \left(\frac{\text{SSC}}{\text{SST}} \right) \times 100 = 1,16 \quad (4.4)$$

$$\text{Su basıncının yüzde katkısı} = \left(\frac{\text{SSD}}{\text{SST}} \right) \times 100 = 0,35 \quad (4.5)$$

$$\text{Tel hızının yüzde katkısı} = \left(\frac{\text{SSE}}{\text{SST}} \right) \times 100 = 0,27 \quad (4.6)$$

İşleme parametrelerinin işleme süresine etkilerine bakıldığında malzemenin en çok etkilediği, vurum bekleme süresinin ikinci etkilediği görülmüştür. Vurum süresinin, su basıncının ve tel hızının etkisinin yok sayılacak kadar az olduğu bulunmuştur.

4.6.1.10. İş parçası Tel kesim akım İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Varyans Analizi

Tel kesim akımına etkileyen işleme parametreleri büyükten küçüğe doğru sıralandığında malzeme, vurum süresi, su basıncı ve vurum bekleme süresidir. Tel hızının katkısının çok az olduğu görülmüştür.

Tablo 4. 9. Tel kesim akımına etkileyen işleme parametreleri

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Malzeme	2	0,130278	0,065139	13,21	0,003
Ton	2	0,083611	0,041806	8,48	0,011
Toff	2	0,003611	0,001806	0,37	0,704
Su Basıncı	2	0,005278	0,002639	0,54	0,605
Tel Hızı_1	1	0,002222	0,002222	0,45	0,521
Error	8	0,039444	0,004931		
Total	17	0,264444			

P değerleri 0,05 'ten daha küçük olduğu için işlemin güvenilirlik oranı %95'tir.

$$\text{SST} = 0,130278 + 0,083611 + 0,003611 + 0,005278 + 0,002222 + 0,039444 = 0,264444$$

$$\text{Malzemelerin yüzde katkısı} = \left(\frac{\text{SSA}}{\text{SST}} \right) \times 100 = 48,26 \quad (4.2)$$

$$\text{Vurum süresinin yüzde katkısı} = \left(\frac{\text{SSB}}{\text{SST}} \right) \times 100 = 31,61 \quad (4.3)$$

$$\text{Vurum bekleme süresinin yüzde katkısı} = \left(\frac{\text{SSC}}{\text{SST}} \right) \times 100 = 1,36 \quad (4.4)$$

$$\text{Su basıncının yüzde katkısı} = \left(\frac{\text{SSD}}{\text{SST}} \right) \times 100 = 1,99 \quad (4.5)$$

$$\text{Tel hızının yüzde katkısı} = \left(\frac{\text{SSE}}{\text{SST}} \right) \times 100 = 0,84 \quad (4.6)$$

4.6.1.11. İş parçası İşleme hızı akım İçin ANOVA Analizi Sonuçları

Varyans Analizi

İşleme hızına etkiyen işleme parametreleri büyükten küçüğe doğru sıralandığında ilk sırada malzeme, ikinci sırada vurum süresi ve üçüncü sırada su basıncının yer aldığı görülmüştür. Tel hızının ve vurum bekleme süresinin katkısının çok az olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4. 10. İşleme hızına etkiyen işleme parametreleri

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Malzeme	2	1,60493	0,802467	52,12	0,000
Ton	2	0,17560	0,087800	5,70	0,029
Toff	2	0,01523	0,007617	0,49	0,627
Su Basıncı	2	0,02190	0,010950	0,71	0,520
Tel Hızı_1	1	0,00056	0,000556	0,04	0,854
Error	8	0,12318	0,015397		
Total	17	1,94140			

P değerleri 0,05 'ten daha küçük olduğu için işlemin güvenilirlik oranı %95'tir.

$$SST=1,60493+0,17560+0,01523+0,02190+0,00056+0,12318= 1,9414 \quad (4.1)$$

$$\text{Malzemelerin yüzde katkısı} = \left(\frac{SSA}{SST} \right) \times 100 = 82,66 \quad (4.2)$$

$$\text{Vurum süresinin yüzde katkısı} = \left(\frac{SSB}{SST} \right) \times 100 = 9,04 \quad (4.3)$$

$$\text{Vurum bekleme süresinin yüzde katkısı} = \left(\frac{SSC}{SST} \right) \times 100 = 0,78 \quad (4.4)$$

$$\text{Su basıncının yüzde katkısı} = \left(\frac{SSD}{SST} \right) \times 100 = 1,12 \quad (4.5)$$

$$\text{Tel hızının yüzde katkısı} = \left(\frac{SSE}{SST} \right) \times 100 = 0,028 \quad (4.6)$$

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, YKBDD alaşımının talaşlı imalat ile işlenmesindeki ve kesilmesindeki zorluklar göz önüne alınarak geleneksel olmayan imalat yöntemlerinden tel erozyonu ile kesme işlemi gerçekleştirilmiş ve işlenebilirliği araştırılmıştır. YKBDD alaşımının tel erozyonu ile işlenebilirliği farklı parametrelere göre araştırılmış olup ana malzeme (ham malzeme), ısıl işlem ile yumuşatılmış ve sertleştirilmiş malzemeler üzerinde deneyler gerçekleştirilmiştir. Burada temel amaç üretilen alaşımların özdirençleri ve sertliklerinin işleme parametreleri arasındaki ilişkiyi belirlemektir. Deneysel sonuçlara göre Taguchi analizi yapılarak parametreler optimize edilmiştir. Bu deneysel sonuçlar ve optimizasyona göre aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

- Deneysel çalışmada kum kalıba döküm sonucu elde edilen YKBDD alaşımı üç farklı (ham, yumuşak ve sert) malzeme olarak tanımlanmış ve tüm numune türleri için HPL ayarları için daha yüksek akım ve işleme hızı değerleri elde edilmiştir.
- Voltaj-Akım oranı öz direnç ile ilgili olduğundan sert malzemelerde bu oranın yüksek olması elektrik iletkenliğinin düştüğüne buna bağlı olarak da işleme hızının sert malzemeler için azaldığı söylenebilir. Yumuşak ve Ham malzeme için ise voltaj-akım oranı hemen hemen aynı olduğu ve işleme hız değerlerinin yakın olması ile bunun doğrulandığı gözlemlenmiştir.
- İşleme hızlarının bağlı olarak pürüzlülük değerlerinde ciddi bir fark olmadığı belirlenmiştir. Buna karşın bu farkın sertlik artışı ile pürüzlülük değerinin kısmen de olsa arttığı gözlemlenmiştir. Tüm pürüzlülük sonuçları değerlendirildiğinde ise malzemelerin özdirenç ve sertliklerinin birlikte yorumlanması gerektiği sonucuna varılmıştır.
- Aynı güç seviyelerinde; sertleşme ile daha yoğun yapılar elde edildiğinden ve bir miktar daha yüksek özdirençleri nedeniyle daha düşük işleme hızı değerleri sergiledikleri ve buna bağlı olarak daha yüksek akım değerleri gerektiği belirlenmiştir.

- Tüm numunelerde yüzeyde krater oluşumundan dolayı malzemenin erimesi, buharlaşması ve hızlı katılaşması nedeniyle numune yüzeylerinde mikro çatlaklar gözlemlenmiştir.
- Taguchi analizi sonucunda, işleme hızı için ideal parametreler, sert malzeme Ton=125, Toff=53 ve Tel hızı=6 olduğunu gösterir. Malzeme, Ton, Toff ve tel hızının İşleme hızına yüzdelik katkıları sırasıyla %82,06, %9,62, %1,04 ve %0,18'dir.
- Taguchi tekniği tarafından önerilen iş parçası tel kesim akım için en uygun parametreler, Sert malzeme, Ton=125, Toff=60 ve Tel hızı=4'ü gösterir. Malzeme, Ton, Toff ve tel hızının tel kesim akıma yüzdelik katkıları sırasıyla %48,26, %31,61, %1,36 ve %0,84'tür.
- Taguchi analizi sonucunda, işleme süresi için ideal parametreler, Sert malzeme, Ton=125, Toff=56 ve Tel hızı=6 olduğunu gösterir. Malzeme, Ton, Toff ve tel hızının İşleme hızına yüzdelik katkıları sırasıyla %90,33, %0,58, %1,16 ve %0,27'dir.
- Yapılan ANOVA analiz sonucu değerlendirildiğinde en önemli işleme parametrelerinin malzeme (sert, yumuşak ve ham) ve vurum süresinin olduğu tespit edilmiştir. Tel hızı, su basıncı ve vurum bekleme süresinin katkısının ise çok az olduğu görülmüştür.
- İleriki çalışmalarda mikro yapı analizlerinin çalışmaya ilave edilmesi ve mikro yapı değişiminin özdirence olan ilgisinin belirlenmesi faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Singh, Hari, and R. Garg. "Effects of process parameters on material removal rate in WEDM." *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering* 32.1 (2009): 70-74.
2. Han, Fuzhu, Jun Jiang, and Dingwen Yu. "Influence of discharge current on machined surfaces by thermo-analysis in finish cut of WEDM." *International Journal of machine tools and manufacture* 47.7-8 (2007): 1187-1196.
3. Lok YK, Lee TC. Processing of advanced ceramics using the wire-cut EDM process. *J Mater Process Technol* 1997;63:839–43. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(96\)02735-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(96)02735-5).
4. Chaudhary A, Sharma S, Verma A. WEDM machining of heat treated ASSAB’88 tool steel: A comprehensive experimental analysis. *Mater Today Proc* 2021;50:946–51. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.354>.
5. Saha S, Pachon M, Ghoshal A, Schulz MJ. Finite element modeling and optimization to prevent wire breakage in electro-discharge machining. *Mech Res Commun* 2004;31:451–63. <https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2003.09.006>.
6. Liao, Y. S., and Y. P. Yu. "Study of specific discharge energy in WEDM and its application." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 44.12-13 (2004): 1373-1380.
7. Scott, Dan, Sreedhar Boyina, and K. P. Rajurkar. "Analysis and optimization of parameter combinations in wire electrical discharge machining." *The International Journal of Production Research* 29.11 (1991): 2189-2207.
8. Tosun, Nihat, and Can Cogun. "An investigation on wire wear in WEDM." *Journal of materials processing technology* 134.3 (2003): 273-278.
9. Kuriakose, Shajan, Kamal Mohan, and M. S. Shunmugam. "Data mining applied to wire-EDM process." *Journal of Materials Processing Technology* 142.1 (2003): 182-189.
10. Mahapatra SS, Patnaik A. Parametric optimization of Wire Electrical Discharge Machining (WEDM) process using taguchi method. *J Brazilian Soc Mech Sci Eng* 2006;28:422–9. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782006000400006>.

11. Rao, Pujari Srinivasa, Koonam Ramji, and Beela Satyanarayana. "Effect of WEDM conditions on surface roughness: A parametric optimization using Taguchi method." *International journal of advanced engineering sciences and technologies* 6.1 (2011): 41-48.
12. Kumar, Amresh, et al. "Multi-Objective Optimization of WEDM of Aluminum Hybrid Composites Using AHP and Genetic Algorithm." *Arabian Journal for Science and Engineering* 47.7 (2022): 8031-8043.
13. Sharma, Neeraj, et al. "Multi-quality characteristics optimisation on WEDM for Ti-6Al-4V using Taguchi-grey relational theory." *International Journal of Machining and Machinability of Materials* 21.1-2 (2019): 66-81.
14. Lodhi BK, Agarwal S. Optimization of machining parameters in WEDM of AISI D3 steel using taguchi technique. *Procedia CIRP* 2014;14:194–9. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.080>.
15. Basavaraju HR, Suresh R, Manjunath SS, Janardhan L. Study on effect of process parameters on MRR and surface roughness in wire electrical discharge machining of titanium grade 7 alloy. *Mater Today Proc* 2021;47:2481–5. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.555>.
16. Gauri, Susanta Kumar, and Shankar Chakraborty. "A study on the performance of some multi-response optimisation methods for WEDM processes." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 49.1 (2010): 155-166.
17. Manjaiah, M., S. Narendranath, and S. Basavarajappa. "A review on machining of titanium based alloys using EDM and WEDM." *Rev. Adv. Mater. Sci* 36.2 (2014): 89-111.
18. Goswami A, Kumar J. Trim cut machining and surface integrity analysis of Nimonic 80A alloy using wire cut EDM. *Eng Sci Technol an Int J* 2017;20:175–86. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2016.09.016>.
19. Lodhi B.K, Agarwal S. Optimization of machining parameters in WEDM of AISI D3 steel using taguchi technique. *Procedia CIRP* 2014;14:194–9. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.080>.
20. Lodhi, B.K., S. Agarwal, and Salaman Ahamad. "Optimization of WEDM parameters on surface roughness of EN41B steel." *Materials Today: Proceedings* 25 (2020): 816-820.
21. Kumar, Amresh, et al. "Investigating the influence of WEDM process parameters in machining of hybrid aluminum composites." *Advanced Composites Letters* 29 (2020): 2633366X20963137.

22. Urtekin L, Özerkan HB, Cogun C, Genc A, Esen Z, Bozkurt F. Experimental Investigation on Wire Electric Discharge Machining of Biodegradable AZ91 Mg Alloy. *J Mater Eng Perform* 2021;30:7752–61. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05939-2>.
23. Weissbach, W., *Malzeme bilgisi ve muayenesi*. 1998, Birsen Yayınevi: İstanbul. p. 348 sayfa.
24. Şahin, Y., *İmal usulleri*. 2003: Gazi Kitabevi.
25. Ngqase, M. and X. Pan. *An overview on types of white cast irons and high chromium white cast irons*. in *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. IOP Publishing.
26. Wiengmoon, A., J. Pearce, and T. Chairuangstri, *Relationship between microstructure, hardness and corrosion resistance in 20 wt.% Cr, 27 wt.% Cr and 36 wt.% Cr high chromium cast irons*. *Materials Chemistry and Physics*, 2011. **125**(3): p. 739-748.
27. Goyala, S., et al., *Optimization of Process Parameters of Wire Cut EDM for Stainless Steel-316*.
28. Liao, Y.S., J.T. Huang, and Y.H. Chen, *A study to achieve a fine surface finish in Wire-EDM*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2004. **149**(1): p. 165-171.
29. Spur, G. and J. Schönbeck, *Anode erosion in wire-EDM—a theoretical model*. *CIRP annals*, 1993. **42**(1): p. 253-256.
30. Luo, Y.F., *Rupture failure and mechanical strength of the electrode wire used in wire EDM*. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999. **94**(2): p. 208-215.
31. Haşçalık, A. and V. Savaş, *CNC Tel Erozyon Tezgâhında D5 Takım Çeliği İçin Kesme Parametrelerinin Araştırılması*. *Teknoloji*, 2000. **3**(4).
32. Sharma, N., R. Khanna, and R. Gupta, *Multi quality characteristics of WEDM process parameters with RSM*. *Procedia Engineering*, 2013. **64**: p. 710-719.
33. Ho, K.H., et al., *State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM)*. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2004. **44**(12): p. 1247-1259.
34. Kunieda, M. and C. Furudate, *High precision finish cutting by dry WEDM*. *CIRP Annals*, 2001. **50**(1): p. 121-124.

35. Fan, Y., et al., *Research on Precision Pulse Power Technology of WEDM*. Procedia CIRP, 2013. **6**: p. 267-273.
36. Saini, P.K. and M. Verma, *Experimental investigation of wire-EDM process parameters on MRR of Ti-6al-4v Alloy*. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), 2014. **4**(5).
37. Cabanes, I., et al., *An industrial application for on-line detection of instability and wire breakage in wire EDM*. Journal of Materials Processing Technology, 2008. **195**(1): p. 101-109.
38. Wang, W. and K. Rajurkar. *Monitoring sparking frequency and predicting wire breakage in WEDM*. in *Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers*. 1992. Publ by ASME.
39. Luo, Y., C. Chen, and Z. Tong, *Investigation of silicon wafering by wire EDM*. Journal of materials science, 1992. **27**(21): p. 5805-5810.
40. Levy, G. and R. Wertheim, *EDM-machining of sintered carbide compacting dies*. CIRP Annals, 1988. **37**(1): p. 175-178.
41. Rhoney, B.K., et al., *Wire electrical discharge machining of metal bond diamond wheels for ceramic grinding*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002. **42**(12): p. 1355-1362.
42. Kruusing, A., et al., *Micromachining of magnetic materials*. Sensors and Actuators A: Physical, 1999. **74**(1-3): p. 45-51.
43. Benavides, G., et al., *High aspect ratio meso-scale parts enabled by wire micro-EDM*. Microsystem Technologies, 2002. **8**(6): p. 395-401.
44. Sanchez, J., et al., *Development of optimum electrodischarge machining technology for advanced ceramics*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2001. **18**(12): p. 897-905.
45. Lau, W., et al., *Un-conventional machining of composite materials*. Journal of materials processing technology, 1995. **48**(1-4): p. 199-205.

46. Ramamurthy, A., et al., *Performance analysis of wire electrodes on machining Ti-6Al-4V alloy using electrical discharge machining process*. *Machining science and technology*, 2015. **19**(4): p. 577-592.
47. Zhang, Z., et al., *Study on machining characteristics of WEDM with ultrasonic vibration and magnetic field assisted techniques*. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016. **234**: p. 342-352.



ÖZGEÇMİŞ



Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Erkan KULOĞLU
Doğum Yeri	
Doğum Tarihi	
Uyruğu	<input checked="" type="checkbox"/> T.C. <input type="checkbox"/> Diğer:

Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	
Fakülte	Fırat Üniversitesi Tek. Eğt. Fak. Metal Eğitimi 1997 İnönü Üniversite Müh. Fak. Makine Müh. 2020
Bölümü	
Mezuniyet Yılı	

Yüksek Lisans	
Üniversite	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
Enstitü Adı	Fen Bilimleri Enstitüsü
Anabilim Dalı	Makine Mühendisliği
Programı	Yüksek Lisans
Mezuniyet Tarihi	2022

Doktora	
Üniversite	
Enstitü Adı	
Anabilim Dalı	
Programı	Program Adı
Mezuniyet Tarihi	

Makale ve Bildiriler	