

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEL EROZYON TEZGAHINDA
TEL AŞINMASININ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ**

Makina Yük. Müh. Nihat TOSUN

114346

114346

DOKTORA TEZİ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU

**Bu çalışma, Fırat Üniversitesi Araştırma Fonu (FÜNAF) tarafından
361 nolu proje olarak desteklenmiştir.**

ELAZIĞ

2001

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TEL EROZYON TEZGAHINDA
TEL AŞINMASININ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ**

Makina Yük. Müh. Nihat TOSUN

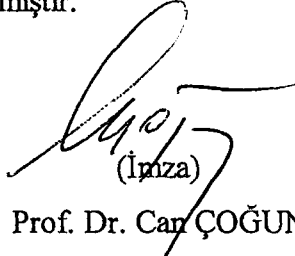
DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu Tez, 5 Ekim 2001 Tarihinde, Aşağıda Belirtilen Jüri Tarafından Oybirliği İle Başarılı Olarak Değerlendirilmiştir.



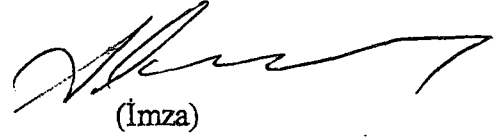
(İmza)

Doç. Dr. Ali İNAN
Danışman



(İmza)

Prof. Dr. Can ÇOĞUN
Üye



(İmza)

Yrd. Doç. Dr. Haşim PIHTILI
Üye

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../2001 tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

ÖZET**DOKTORA TEZİ****TEL EROZYON TEZGAHINDA
TEL AŞINMASININ VE YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN
DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ VE MODELLENMESİ**

Makina Yük. Müh. Nihat TOSUN

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

2001, Sayfa:107

Tel erozyon ile kesmenin en önemli performans karakteristikleri, kesilen yüzeyin yüzey pürüzlülüğü, kesme hızı ve kesme aralığıdır. Bu performans karakteristiklerinin mikro ölçekte fiziğinin tespit edilebilmesi için, krater bazında tel elektrot aşınmasının ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünün incelenmesi gereklidir. Bu çalışmada, tel elektrot üzerinde oluşan krater çapının ve derinliğinin puls süresi, tel ilerleme hızı, gerilim ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı ile gösterdiği değişim deneysel ve teorik olarak incelenmiştir.

Krater boyutları bir mikroskop yardımıyla ölçülmüştür. Deneylerde, 0.25 mm çapında pirinç tel ve iş parçası malzemesi olarak da Ç 4140 çeliği kullanılmıştır. Yapılan varyans analizi sonucu teldeki krater boyutları, telin ağırlık kaybı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerinde puls süresi ve gerilimin etkisi tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncına nazaran daha fazla olduğu saptanmıştır. Elde edilen deney sonuçları grafik olarak sunulmuş, daha önce yapılan çalışmalarla karşılaştırılmış ve regresyon analiz yöntemi kullanılarak matematiksel olarak modellenmiştir.

Anahtar kelimeler: Tel erozyon, krater boyutları, tel aşınması, iş parçası yüzey pürüzlülüğü, varyans analizi, regresyon analizi.



ABSTRACT

PhD Thesis

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION AND MODELING OF WIRE EROSION AND
SURFACE ROUGHNESS IN WIRE ELECTRICAL DISCHARGE MACHINE**

Nihat TOSUN

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

2001, Page: 107

The important performance characteristics of wire electrical discharge machining are workpiece surface roughness, cutting rate and overcut. A micro scale to investigation of wire electrode erosion and surface roughness of workpiece is required to determine the physics of the performance characteristics. In this study, the variation of the diameter and the depth of the wear craters on the wire are investigated experimentally and theoretically under different puls on time, wire speed, voltage and dielectric flushing pressure.

The crater sizes on the wire electrode are measured by using a microscope. The brass wire with diameter of 0.25 mm and SAE 4140 steel as workpiece material have been used in experimental. It is found analysis of variance observed that pulse time and voltage is effective on the crater sizes and the weight loss of the wire and surface roughness of workpiece whereas wire speed and dielectric flushing pressure is not effective. The experimental results have been presented graphically. This work has been compared with other published works and the results are modeled mathematically by using regression analysis method.

Key Words: Wire EDM, crater sizes, wire erosion, surface roughness, analysis of variance, regression analysis.

TEŞEKKÜR

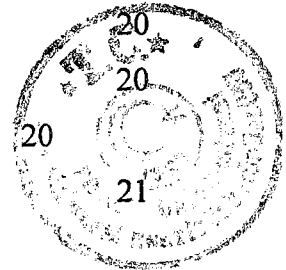
Hazırlamış olduğum bu doktora tezi çalışmasında; böyle bir konuda araştırma yapmam için imkan tanıyan ve çalışmamı hazırlamamda bana yardımcı olan Sayın danışman hocam Doç. Dr. Ali İNAN Bey'e, çalışmalarım sırasında daima her türlü ilgisini, desteğini eksik etmeyen ve görüşleriyle de yönlendiren Gazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerinden değerli hocam Sayın Prof. Dr. Can ÇOĞUN Bey'e, manevi desteklerini esirgemeyen doktora tezimin tez izleme komitesi üyelerinden Doç. Dr. Mustafa AKSOY Bey ile Yrd. Doç. Dr. Haşim PIHTILI Bey'e ve çalışmama maddi olarak destek sağlayan Fırat Üniversitesi Araştırma Fonu (FÜNAF)'a teşekkürlerimi arz eder, saygılar sunarım.

Nihat TOSUN

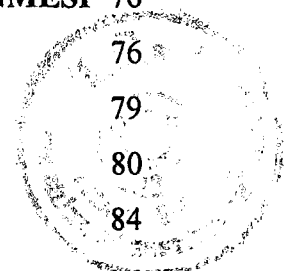


İÇİNDEKİLER

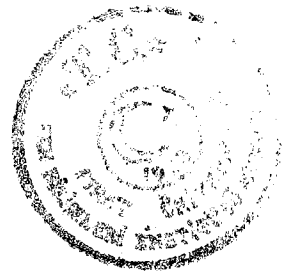
	Sayfa No:
TEŞEKKÜR	V
ŞEKİLLER LİSTESİ	IX
TABLolar LİSTESİ	XIII
SİMGELER LİSTESİ	XIV
1. GİRİŞ	1
2. TEL EROZYON (WEDM) İLE KESME	7
2.1. WEDM İle Metal Kaldırmanın Mekanığı	8
2.2. WEDM'nin Prensipleri	11
2.3. Dielektrik Sıvı	12
2.4. WEDM'nin Avantaj ve Dezavantajları	12
2.5. WEDM'nin Uygulama Alanları	13
2.5.1. Kalıp ve Zimba Parçaları	14
2.5.2. Saç Metal Pres Kalıpları	14
2.5.3. Ekstrüzyon Kalıpları	14
2.5.4. Prototip İmalatı	14
2.5.5. Torna Takımları	15
2.5.6. Özel Şekil Malzemeleri	15
2.5.7. Broşlar	15
2.5.8. Şablonlar	16
3. DENEYLER	17
3.1. Tel Erozyon Tezgahı	17
3.1.1. Tel Erozyon Tezgahının İşleme Parametreleri	17
3.1.1.1. Puls Süresi (ON time)	18
3.1.1.2. Puls Ara Süresi (OFF time)	18
3.1.1.3. Puls Ara Süresi Ayarı (MA=Puls OFF duration adjustment)	18
3.1.1.4. Yardımcı Güç Kaynağı Devresi (HP)	19
3.1.1.5. Ana Güç Kaynağı Pik Akımı (IP)	20
3.1.1.6. Ana Güç Kaynağı Vajı (V)	20
3.1.1.7. Aralık Vajı (SV)	20
3.1.1.8. Tabla İlerleme Hızı (SF)	21



3.1.1.9. Kapasite (C)	21
3.1.1.10. Tel Gerilmesi (WT)	21
3.1.1.11. Tel İlerleme Hızı (VW)	21
3.2. Kullanılan İşleme Parametreler	22
3.3. Tel Elektrot	23
3.4. Teldeki Krater Boyutlarının Tespiti	23
3.5. Teldeki Ağırlık Kaybının Tespiti	27
3.6. İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğünün Tespiti	28
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	29
4.1. Teldeki Krater Boyutlarının İncelenmesi	31
4.1.1. Puls Süresinin Krater Boyutlarına Etkisi	41
4.1.2. Tel İlerleme Hızının Krater Boyutlarına Etkisi	44
4.1.3. Gerilimin Krater Boyutlarına Etkisi	46
4.1.4. Dielektrik Sıvı Püskürtme Basıncının Krater Boyutlarına Etkisi	47
4.2. Teldeki Ağırlık Kaybının İncelenmesi	48
4.2.1. Puls Süresinin Telin Ağırlık Kaybına Etkisi	52
4.2.2. Tel İlerleme Hızının Telin Ağırlık Kaybına Etkisi	53
4.2.3. Gerilimin Telin Ağırlık Kaybına Etkisi	54
4.2.4. Dielektrik Sıvı Püskürtme Basıncının Telin Ağırlık Kaybına Etkisi	55
4.3. İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi	57
4.3.1. Puls Süresinin İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	61
4.3.2. Tel İlerleme Hızının İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	62
4.3.3. Gerilimin İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	62
4.3.4. Dielektrik Sıvı Püskürtme Basıncının İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi	63
5. DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ	64
5.1. Teldeki Krater Boyutlarının İstatistiksel Analizi	65
5.2. Telin Ağırlık Kaybının İstatistiksel Analizi	71
5.3. İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğünün İstatistiksel Analizi	73
6. DENEY SONUÇLARININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ	76
6.1. Teldeki Krater Derinliği ve Çapının Matematiksel Modeli	76
6.2. Telin Ağırlık Kaybının Matematiksel Modeli	79
6.3. Yüzey Pürüzlülüğünün Matematiksel Modeli	80
7. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER	84



KAYNAKLAR	86
EKLER	93
EK 1. Teldeki krater çapı ve derinliği, telin ağırlık kaybı ve iř parçası yüzey pürüzlülüğünü hesaplayan FORTRAN programı	93
EK 2. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)	94
EK 3. REGRESYON ANALİZ YÖNTEMİ	97



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. WEDM'nin şematik görünüşü

Şekil 2.2. WEDM işleminin şematik görünüşü

Şekil 2.3. Deşarj işleminin safhaları

Şekil 2.4. Tel elektrotun çalışan bölgesinin detaylandırılmış kesiti (Amstead vd 1987)

Şekil 2.5. WEDM işlemini etkileyen faktörler (Scott vd. 1991)

Şekil 3.1. Gerilim-zaman diyagramı

Şekil 3.2. Telde oluşan kraterlerin mikroskoptaki görüntüsü

Şekil 3.3. Teldeki kraterlerin boyutlandırılması

Şekil 3.4. Krater ölçme işleminde kullanılan mikroskop (a) ve tel çevirme aparatı (b,c)

Şekil 3.5. Kraterlerin telin dik kesitinden mikroskoptaki görüntüsü

Şekil 3.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçme detayları

Şekil 4.1. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

$$(P=6 \text{ kg/cm}^2, V=270 \text{ V})$$

Şekil 4.2. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

$$(P=6 \text{ kg/cm}^2, V=270 \text{ V})$$

Şekil 4.3. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

$$(P=12 \text{ kg/cm}^2, V=270 \text{ V})$$

Şekil 4.4. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

$$(P=12 \text{ kg/cm}^2, V=270 \text{ V})$$

Şekil 4.5. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

$$(P=18 \text{ kg/cm}^2, V=270 \text{ V})$$

Şekil 4.6. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

$$(P=18 \text{ kg/cm}^2, V=270 \text{ V})$$

Şekil 4.7. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

$$(P=6 \text{ kg/cm}^2, V=100 \text{ V})$$

Şekil 4.8. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

$$(P=6 \text{ kg/cm}^2, V=100 \text{ V})$$

Şekil 4.9. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

$$(P=12 \text{ kg/cm}^2, V=100 \text{ V})$$

Şekil 4.10. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

$$(P=12 \text{ kg/cm}^2, V=100 \text{ V})$$

Şekil 4.11. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)

Şekil 4.12. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)

Şekil 4.13. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.14. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.15. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.16. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.17. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.18. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi

($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.19. Kıvılcım enerjisine karşı krater hacmi

Şekil 4.20. Puls süresi ile kıvılcım enerjisine ve krater hacminin değişimi ($V=270 \text{ V}$)

Şekil 4.21. Puls süresi ile kıvılcım enerjisine ve krater hacminin değişimi ($V=100 \text{ V}$)

Şekil 4.22. Puls süresi ile kıvılcım enerjisine ve krater hacminin değişimi ($V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.23. Krater çapının gerilim ve puls süresine göre değişimi

Şekil 4.24. Krater derinliğinin gerilim ve puls süresine göre değişimi

Şekil 4.25. Krater çapının dielektrik sıvı basıncı ve puls süresi ile değişimi

Şekil 4.26. Krater derinliğinin dielektrik sıvı basıncı ve puls süresi ile değişimi

Şekil 4.27. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)

Şekil 4.28. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)

Şekil 4.29. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

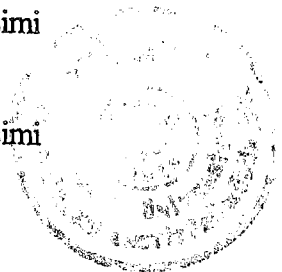
($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)

Şekil 4.30. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)

Şekil 4.31. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)



Şekil 4.32. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)

Şekil 4.33. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.34. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.35. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.36. Teldeki ağırlık kaybının gerilim ve puls süresine göre değişimi

Şekil 4.37. Teldeki ağırlık kaybının basınç ve puls süresine göre değişimi

($V_w=5 \text{ m/dak}$, $V=270 \text{ V}$)

Şekil 4.38. Teldeki ağırlık kaybının basınç ve puls süresine göre değişimi

($V_w=5 \text{ m/dak}$, $V=100 \text{ V}$)

Şekil 4.39. Teldeki ağırlık kaybının basınç ve puls süresine göre değişimi

($V_w=5 \text{ m/dak}$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.40. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)

Şekil 4.41. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)

Şekil 4.42. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)

Şekil 4.43. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)

Şekil 4.44. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)

Şekil 4.45. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)

Şekil 4.46. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.47. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.48. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi

($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.49. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün gerilim ve puls süresine göre değişimi



Şekil 4.50. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün basınç ve puls süresine göre değişimi

Şekil 5.1. Teldeki krater çapına kesme parametrelerinin seviyelerinin etkisi

Şekil 5.2. Teldeki krater derinliğine kesme parametrelerinin seviyelerinin etkisi

Şekil 5.3. Varyans analiz sonucuna göre parametrelerin krater çapına % olarak etkisi

Şekil 5.4. Varyans analiz sonucuna göre parametrelerin krater derinliğine % olarak etkisi

Şekil 5.5. Telin ağırlık kaybına kesme parametrelerinin seviyelerinin etkisi

Şekil 5.6. Varyans analiz sonucuna göre parametrelerin telin ağırlık kaybına % olarak etkisi

Şekil 5.7. İş parçası yüzey pürüzlülüğüne kesme parametrelerinin seviyelerinin etkisi

Şekil 5.8. Varyans analiz sonucuna göre parametrelerin iş parçası yüzey pürüzlülüğüne % olarak etkisi

Şekil 6.1. Krater derinliğine karşı krater çapı

Şekil 6.2. Krater derinliği ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki

Şekil 6.3. Krater çapı ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki



TABLÖLAR LİSTESİ

- Tablo 1.1.** Teldeki krater boyutlarının kesme parametreleri ile değişimi
- Tablo 1.2.** İş parçası yüzey pürüzlülüğünün kesme parametreleri ile değişimi
- Tablo 3.1.** Deneylerde değiştirilen kesme parametreleri ve değerleri
- Tablo 3.2.** Ç 4140 çeliğinin kimyasal bileşimi
- Tablo 4.2.** Birdeşarj boyunca alına yol
- Tablo 5.1.** Kesme parametreleri ve seviyeleri
- Tablo 5.2.** Teldeki krater çapı için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (η değerleri)
- Tablo 5.3.** Teldeki krater derinliği için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (η değerleri)
- Tablo 5.4.** Teldeki krater çapı için ANOVA sonuçları
- Tablo 5.5.** Teldeki krater derinliği için ANOVA sonuçları
- Tablo 5.6.** Telin ağırlık kaybı için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (η değerleri)
- Tablo 5.7.** Telin ağırlık kaybı için ANOVA sonuçları
- Tablo 5.8.** İş parçası yüzey pürüzlülüğü için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (η değerleri)
- Tablo 5.9.** İş parçası yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları



SİMGELER LİSTESİ

a	Regresyon katsayısı
η	S/N oranı (dB)
d	Krater çapı (mm)
E_d	Kıvılcım (deşarj) enerjisi (Joule)
f	Serbestlik derecesi
F_{A0}	Faktör A'nın hesaplanan F test değeri
h	Krater derinliği (mm)
I_d	Deşarj akımı (Amp)
n_k	Krater sayısı
P	Dielektrik sıvı püskürtme basıncı (kg/cm ²)
r	Korelasyon katsayısı
R_a	İş parçası ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)
S	Tel uzunluğu (mm)
S_d	Puls süresince telin aldığı yol (mm)
SS_A	Faktör A için karelerin toplamı
SS_m	Ortalamanın için karelerin toplamı
SS_T	Karelerin toplamı
t	Zaman (sn)
t_d	Puls süresi (μs)
t_g	Puls gecikme süresi (μs)
t_s	Puls ara süresi (μs)
V	Ana güç kaynağı gerilimi (V)
V_A	Faktör A'nın varyansı
V_d	Deşarj gerilimi (V)
V_e	Hatanın varyansı
v_k	Krater hacmi (mm ³)
V_w	Tel ilerleme hızı (m/dak)
Wl	Telin ağırlık kaybı (gr)
y	Deneylerden elde edilen sonuç (gözlem)



1. GİRİŞ

Bilgi çağına adım attığımız bu yıllarda hızla gelişen teknoloji ile birlikte, bilgisayar kontrolünün girmediği hiçbir alan kalmamıştır. Bu yeniliklerden bir tanesi de normal talaş kaldırma yöntemlerinden farklı olarak üzerinden akım geçen bir tel yardımı ile talaş kaldıran ve bilgisayar kontrollü olarak çalışan Tel Erozyon tezgahıdır. Tel erozyon tezgahı (WEDM=Wire Electrical Discharge Machine) ile metal işleme çeşitli endüstriyel dallarda yeni bir işleme metodu olarak genişleyerek kullanılmaktadır. Tel erozyon ile işleme, dielektrik sıvı ortamında üzerinden elektriksel akım geçirilen bir tel yardımıyla, kesme işlemi olarak tanımlanabilir. Elektrot ve iş parçasından uzaklaşan talaş (malzeme), elektro termal (ısıl mekanizma) sistemine bağlı olarak, deşarj boşalması esnasında ergime-buharlaşma-uzaklaşma çevrimi ile meydana gelir.

Son yıllarda, tel erozyon tezgahları hızla gelişmiş ve yeni uygulama alanları kazanılmıştır. WEDM genellikle, bilgisayar sayısal kontrol, daldırılmış (submerged) işleme, güvenilir otomatik tel sürme, programlanabilir çok eksenli hareket sistemi ve otomatik su/yağ dielektrik değiştirme gibi unsurlar ile malzemelerin işlenmesindeki kolaylığından dolayı çoğunlukla çok sert malzemelerin ve karmaşık şekilli parçalarının imalatı için en iyi alternatifi sağlar. Tel erozyon ile işleme tekniğinin başarısını, geleneksel metotlarla işlenemeyen metallerin kolayca işlenmesine atfetmek mümkündür. Ayrıca yüksek sertlikteki elektrik iletkenlik özelliğine sahip yeni alaşımların (Hastalloy, Mikralloy, Waspalloy, Nimonic, Udimet vs.) işlenmesinde etkinliği ispatlamıştır (Poyrazoğlu, 1994). Özellikle kalıp imalatında kullanımı yaygındır. Diğer tezgahlarda alınması mümkün olmayan kısımları, sadece telin yarıçapı kadar bir tolerans bırakarak kesebilmektedir. Bu nedenle dişi ve erkek kalıp yapımında çok kolaylık sağlar.

Elektriksel kıvılcımın aşındırma etkisi, uzun zamandır bilinmektedir. Buna, ilk referans olarak, Priestley'in 1768 yılındaki çalışmaları gösterilebilir. 1889 yılında Paschen adlı bir araştırmacı, çeşitli malzemelerin ark oluşum kabiliyetini belirleyen ve bu suretle önemli bir fiziki olaya açıklık getiren bir formülü ortaya koymuştur. Jeswani (1979) elektroerozyondaki takım aşınmasının boyutsal analizini yaparak puls enerjisi, erime gizli ısı, buharlaşma gizli ısı, erime sıcaklığı, buharlaşma sıcaklığı, ısı iletim

katsayısı, özgül ısı ve malzeme yoğunluğuna bağlı olarak takım elektrottan eriyen malzemenin hacmi ile ilgili ampirik bir denklem elde etmiştir. Ardali (1985) tel erozyon ile işlemede işlem akımı, vurum sıklığı, iş parçası malzemesinin ve kalınlığının, kesme hızına ve kesme fazlalığına (overcut) olan etkisini incelemiştir. Petrofes ve Gadalla (1988) tel kesme ve kalıp yapma makinalarındaki elektrik deşarjının uygulama prensiplerini gözden geçirmişlerdir. Dibinto ve arkadaşları (1989) elektro erozyon (EDM) işlemi için basit bir katot erozyon modeli sunmuşlardır. Bu çalışmada optimum puls zamanı, tek bir deneysel noktada modellenerek tahmin edilmiştir. Patel ve arkadaşları (1989) elektro erozyon yönteminde anot malzeme için bir erozyon modeli sunmuşlardır. Sunulan model, önceki makaledeki ısı kaynağı modeli ile birlikte plazma/anot ara yüzeyindeki sınır şartı olarak sıcaklık yerine işleme gücünü (machining power) kullanmıştır. Coğun ve Savsar (1990) elektroerozyondaki deşarj pulslarının özelliklerinin istatistiksel modellemesini yapmışlardır. Bu çalışmada, puls süresi, puls ara süresi ve deşarj akımı gibi farklı işleme şartlarında deşarj pulslarının gecikme sürelerinin rasgele davranışları incelenmiştir.

Tomalin (1989) yaptığı bir çalışmada, sert metallerin işlenmesinde değişik tel fiyatlarının bir değerlendirilmesini yapmıştır. Spur ve arkadaşları (1988) tarafından yapılan bir çalışmada, çok kristalli elmas (PCD=Polycrystalline diamond) kesici takım malzemeleri üzerinde kesme testleri yapmışlardır. Tel erozyonun gelecek on yıllık bir süre içinde aşırı potansiyele sahip bir büyümeye aday olduğu vurgulanmış ve farklı amaçlar için tel malzemelerinin seçimi ve elektro erozyon makinalarının otomasyonu tartışılmıştır (Schreiber, 1990). Ogata ve Mukoyama (1991) tel erozyon tarafından işlenen iş parçası yüzeyinde oluşan kalıcı gerilmeler (residual stresses) üzerine bir çalışma yapmışlardır.

Williams ve Rajurkar (1991) tel erozyon ile oluşturulmuş yüzeylerin karakteristiklerini sunmuşlardır. Yüzey pürüzlülük profilleri, işleme mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için analiz metodolojisi ve tahmini bir model ile belirlenmiştir. Gadalla ve Bedi (1991) yapmış oldukları çalışmalarında, boron nitrit ve titanyum borit kompozitlerindeki bileşimin ve tane boyutunun telli erozyon ile işlemedeki etkilerini incelemiştir. Scott vd. (1991) tel erozyondaki kesme parametrelerinin, işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkileri için, bir optimizasyon çalışması sunmuşlardır. Çalışmada puls süresi, deşarj akımı ve tel ilerleme hızı arttıkça yüzey pürüzlülüğü

artmış ve dielektrik sıvı püskürtme basıncının artması ile yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Spur ve Schoenbeck (1993) boyutu ve yoğunluğu zamana bağlı olan yarı sonsuz bir katı üzerindeki bir ısı kaynağı olarak anot üzerinde bir deşarjın etkisini tanımlamışlardır. Problemin analizi sonlu elemanlar metodu kullanılarak yapılmıştır.

Tel erozyonla işleme esnasındaki tel kırılması, işleme verimliliğini azaltır ve işlenmiş yüzeyleri hasara uğratar. Wang ve Rajurkar (1992) yaptıkları çalışmada, işleme verimliliğinin artırılması ve telin kopmasını engellemek için, çevrim içi kontrollü kıvılcım frekansını tarayan bir tel erozyon monitörünü tanıtmışlardır. Rajurkar ve Wang (1993), tel kopmasının fiziki oluşumu için ısı bir model ile analiz yapmışlardır. Bu çalışmada deşarj akımı, puls süresi, puls frekansı ve tel gerilmesinin artırılması ile yüzey pürüzlülüğünün de arttığını göstermişlerdir. Kögmen (1993) elektro erozyondaki krater oluşumunun bilgisayar destekli modellenmesini ve simülasyonunu yapmıştır. Banerjee ve arkadaşları (1993) deşarj kanalındaki sıcaklık dağılımından giderek basit bir sonlu fark ısı modelini kullanarak deşarj kanalındaki sıcaklık dağılımını ve buradan yola çıkarak da tel kopmasını incelemişlerdir. Bu çalışmada değişik giriş gücü, puls süresi, tel ilerleme hızı ve tel çapı gibi parametrelerin etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda artan güç ve puls süresi ile deşarj kanalı yarıçapının büyüdüğü ve dolayısıyla sıcaklığın da arttığı vurgulanmış, tel ilerleme hızının etkisinin ise güç ve puls süresine nazaran çok az miktarda olduğu belirtilmiştir. Luo (1999) WEDM'deki telin mekanik mukavemeti ve tel kopma mekanizması üzerine bir çalışma yapmıştır. Kıvılcım basıncı ve tel gerilmesinin tel kopması için iki büyük sebep olduğunu vurgulamıştır.

Kozak ve arkadaşları (1994) yaptıkları çalışmalarında, PCD blokların tel erozyonun işleme hızı üzerindeki deşarj enerjisinin ve deşarj sıcaklığının etkisini teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Tarnag vd. (1995) WEDM'de kesme performansının iyileştirilmesi amacıyla yaptıkları çalışmada, iş parçası olarak paslanmaz çelik kullanmış ve işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğü için yapay sinir ağları kullanılarak, puls süresi, puls ara süresi, gerilim, servo voltaj, deşarj akımı, kapasite ve tabla ilerleme hızının optimum değerlerini belirlemiş ve ayrıca gerilim, deşarj akımı, puls süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirtilmiştir.

Heberling ve arkadaşları (1996) tel erozyon kullanılarak standart sertlikteki test bloklarını değişik kalınlıklarda işlemiş ve Rockwell sertlik testi için uygun kalınlık ile ilgili fikir ayrılığını çözmek için bir deneme yapmışlardır. Liao ve arkadaşları (1997a)

tel erozyon ile işleme esnasında voltaj dalga şeklinin karakteristiklerine dayanan yeni bir bilgisayar destekli puls ayırt etme sistemi geliştirmişlerdir. Böylece tel kırılması sırasında, kıvılcım voltaj form datalarının büyük bir kısmını kayıt ve analiz etmişlerdir. Çalışma neticesinde, tabla ilerleme hızı, voltaj, puls süresi ve tel ilerleme hızının artması ile yüzey pürüzlülüğü artmış; dielektrik sıvı püskürtme basıncının artması ile yüzey pürüzlülüğü azalmıştır. Liao ve arkadaşları (1997b), tel erozyondaki işleme parametrelerinin optimizasyonu üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, Taguchi deneysel tasarım metodu ve varyans analizi kullanılarak işleme performansına etki eden önemli faktörler belirlenmiştir. Ayrıca regresyon analiz metodu kullanılarak işleme performansı ile ilgili matematiksel modelleme yapılmıştır. Spedding ve Wang (1997a,b) yapay sinir ağları kullanarak yapılan modellemede yöntemin parametrelerinin optimizasyonunu yapmış ve tel erozyonda işlenmiş yüzeyi tanımlamışlardır. Bu çalışmada, puls süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün de arttığı gösterilmiştir. Huang ve arkadaşları (1999) tel erozyondaki işleme performansı üzerine yaptıkları bir optimizasyon çalışmasında, puls süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün arttığını göstermişlerdir. Gökler ve Ozanoğlu (1998, 2000) WEDM işlemindeki kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Bu çalışmada tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı tüm deneylerde sabit tutulmuştur. Rozenek ve arkadaşları (2001) tel erozyonda metal matrisli kompozit malzeme ve 0.25 mm çaplı pirinç tel kullanarak puls süresi, puls ara süresi, deşarj akımı ve voltaj gibi işleme parametrelerinin kesme hızı ve yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma neticesinde deşarj akımı ve puls süresinin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün de arttığı vurgulanmıştır. Bu çalışmada, yine tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı tüm deneylerde sabit tutulmuştur.

Araştırmacılar, çoğunlukla teknolojik açıdan önem arz eden yüzey pürüzlülüğü ve işleme hızı üzerinde çalışmışlardır. Tel erozyon tezgahında teldeki krater boyutlarına ve iş parçası yüzey pürüzlülüğüne ait yapılan çalışmalarda kesme parametrelerinin etkisi Tablo 1.1 ve Tablo 1.2 verilmiştir. Fakat yüzey pürüzlülüğünü oluşturan ana etmen olan kraterlerin incelenmesi üzerine oldukça az sayıda çalışma vardır. Bu çalışmanın amaçlarından biri telde oluşan kraterlerin işleme parametrelerinden nasıl etkilendiğinin incelenmesidir. Bu tür bir çalışmanın konuya bilimsel anlamda ışık

tutacağı kesindir. Teldeki kraterlerin işleme parametrelerine bağlı olarak boyut değişimlerini inceleyen araştırmacılar vardır. Banerjee ve arkadaşları (1997), tarafından yapılan çalışmada tek bir deşarj için teldeki krater teşekkülü ve üç boyutlu süreksiz sıcaklık dağılımı, sonlu fark modeli yardımıyla belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, 0.25 mm çaplı pirinç tel ve 10.54 mm kalınlığında AISI 1050 iş parçası malzemesi kullanılmıştır. Deneyler sadece boşalım kapasite değeri değiştirilerek yapılmış ve teorik çalışma neticesinde ise güç, puls süresi ve tel ilerleme hızının artmasıyla krater hacminin arttığı vurgulanmıştır. Bu çalışmada, dielektrik sıvı püskürtme basıncının etkisinden bahsedilmemiştir.

Tablo 1.1. Teldeki krater boyutlarının kesme parametreleri ile değişimi.

Teldeki krater boyutları		
Kesme Parametreleri	Banerjee vd. (1997)	Sodick (1998)
Puls süresi ↑	↑	*
Gerilim/Akım ↑	*	*
Tel ilerleme hızı ↑	↑	↑
Dielektrik sıvı püskürtme ↑ basıncı	*	*

Tablo 1.2. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün kesme parametreleri ile değişimi.

İş parçası yüzey pürüzlülüğü								
Kesme Parametreleri	Scott vd. (1991)	Rajurkar ve Wang (1993)	Tamg vd. (1995)	Liao vd. (1997b)	Speddin g ve Wang (1997 a,b)	Sodick (1998)	Huang vd. (1999)	Rozenek vd. (2001)
Puls süresi ↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑
Gerilim/Akım ↑	↑	↑	↑	*	*	↑	*	↑
Tel ilerleme hızı ↑	↑	↑↓	*	↓	↑↓	↑	*	*
Dielektrik sıvı püskürtme basıncı ↑	↓	↑↓	*	↑	*	*	↓	*

(*) Araştırılmamıştır.

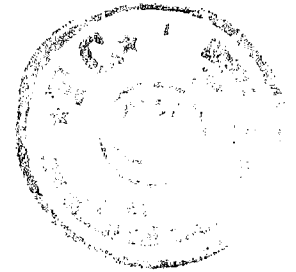
(↑) artış

(↓) düşüş

(↑↓) hem artış hem de düşüşün olduğu değişim

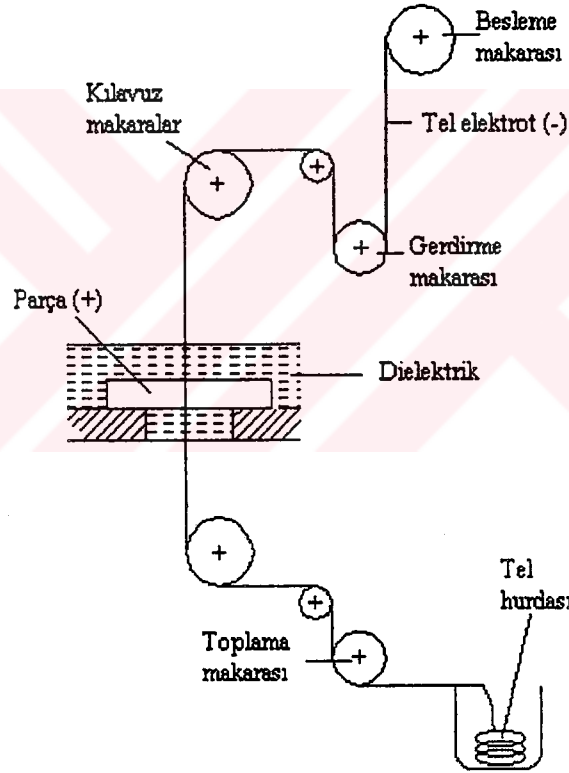


Krater boyutları ve yüzey pürüzlülüğü ile ilgili yapılan çalışmalar incelendiğinde (Tablo 1.1 ve 1.2), puls süresi, gerilim, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı gibi işleme parametrelerinin telde oluşan kraterlerin boyutları üzerindeki etkisini deneysel olarak inceleyen tek ve kapsamlı bir çalışmaya rastlanamamıştır. Teldeki krater oluşumunda bu parametrelerin etkisi ile ilgili yayınlanan çalışmaların yeterli olmadığı gözlenmiştir. Bu nedenle, tel erozyon ile kesmede; teldeki krater boyutlarına (krater çap ve derinliği), telin ağırlık kaybına ve iş parçası yüzey pürüzlülüğüne işleme parametrelerinin etkisinin incelenmesi amacıyla bir dizi deneysel çalışma yapılmıştır. Deneysel sonuçlar grafikler halinde sunulmuş, elde edilen veriler yardımıyla puls süresi, gerilim, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncına bağlı olarak lineer regresyon analiz ve nonlinear Gauss-Newton yöntemleri kullanılarak teldeki krater çap ve derinliği, telin ağırlık kaybı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünün matematiksel modelleri elde edilmiştir. Ayrıca yapılan varyans analizi sonucu kesme parametrelerinin teldeki krater boyutları, telin ağırlık kaybı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğüne % olarak etkisi belirlenmiştir.



2. TEL EROZYON (WEDM) İLE KESME

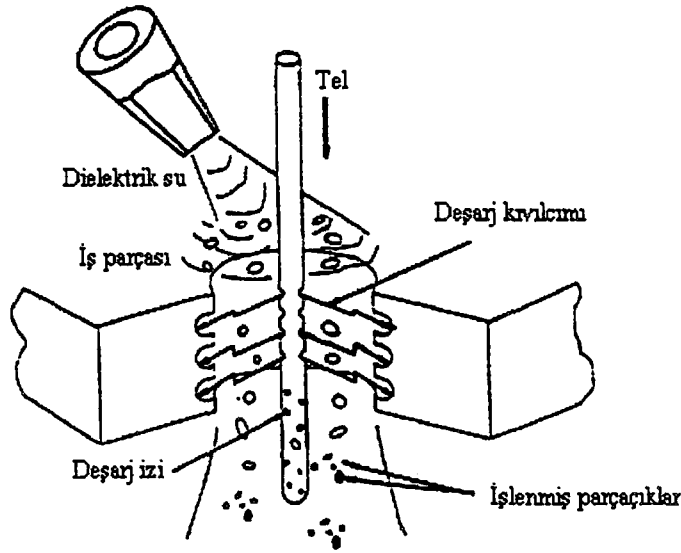
Tel elektrot iş parçası içinden geçer ve bir makarayla beslenirken, metal kaldırma kıvılcım erozyonunun bir sonucu olarak yapılır (Şekil 2.1). Genellikle tel çapı 0.03 ila 0.3 mm arasındadır. Çoğu zaman iş tablasının yatay hareketli modern makinalar üzerinde CNC vasıtasıyla kontrol edilir ve kesme yolu belirlenir. Bazı WEDM makinalarında da tel kesme yolunu belirlemek için yatay olarak hareket eder. Tel elektrot bir defa kullanılır ve daha sonra iş parçasından geçtikten sonra tel aşındığından dolayı atılır.



Şekil 2.1. WEDM'nin şematik görünüşü.

Deiyonize suyun veya diğer dielektrik akışkanın düzenli akışı, iş parçası ve elektrot telini soğutmada kullanılır ve kesme bölgesine püskürtülür (Şekil 2.2). Dielektrik akışkan erimiş metale doğru püskürtülerek sürekli bir şekilde kesme alanının içini süpürür. Püskürtme, erimiş metalin tümünü dışarı taşıyamaması önemlidir. Bazı küçük

parçacıklar ard arda deşarj işleminin tekrar etmesi için aralık içinde kalır (Schreiber 1990, Ozanözgü 1998).



Şekil 2.2. WEDM işleminin şematik görünüşü.

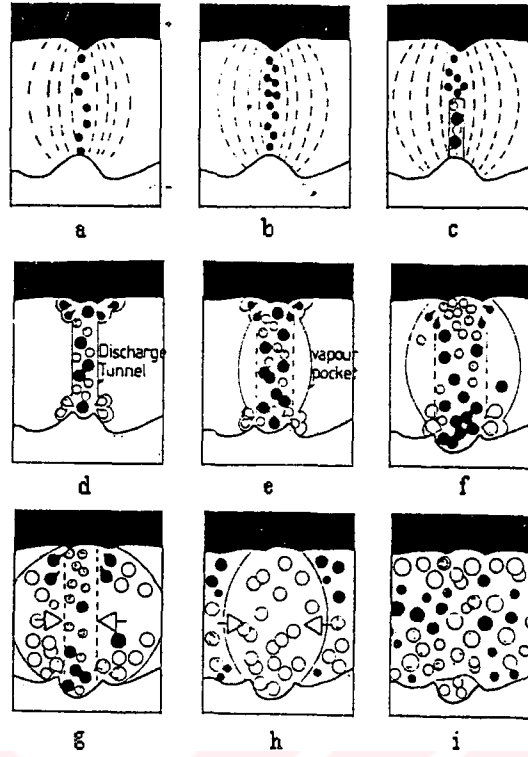
WEDM'nin ana kısımları; tel, iş tablası, kontrol ünitesi, güç kaynağı ve dielektrik kaynağıdır. Sayısal kontrol (NC) sistemli bir elektrik devresi, tel çapı düzeltme (wire diameter correction), ardışık kesme işlemleri vs. gibi fonksiyonları yapabilir. Tel ilerleme hızı, tabla hareketi, dielektrik sirkülasyonu ve güç gibi fonksiyonların tümü klavye vasıtasıyla kontrol edilebilir. Servo sistem NC takım tezgahlarının sürücü sistemidir ve genellikle bir elektrik sürücü motoru ile çalışır. CNC pek çok makinanın çok yönlülüğü için büyük oranda etki eder ve hiç kuşkusuz, yeni WEDM'lerde de standarttır (Scott vd. 1991).

2.1. WEDM ile İşlemenin Mekaniği

Tel erozyon, geleneksel elektrik erozyonla işlemenin (EDM) özel bir şeklidir. Burada elektrot, sürekli olarak hareket eden iletken bir teldir. Tel erozyon (WEDM)'deki talaş kaldırmanın mekanizması, doğru akım vurumlu bir güç kaynağı vasıtasıyla oluşan elektrik kıvılcımlarından oluşan erozyonu içine alır. Kıvılcımlar

dielektrik sıvının etkisi altında birbirine yakın yerleştirilen iki elektrot arasında oluşacaktır.

Güç kaynağı tarafından iki elektrotun neden olduğu şarj güçlü bir elektrik alanı oluşturur. Bu elektrik alanı elektrotların birbirlerine en yakın olduğu yerde en güçlüdür (Şekil 2.3.a). Negatif yüklü partiküller negatif polariteli telden fırlatılır (Şekil 2.3.b). Bunlar malzeme üzerinde bir köprü oluşturur. Elektrot takımından fırlatılan negatif yüklü parçacıklar (elektronlar) aralıkta bulunan dielektrikteki nötr parçacıklarla çarpışır ve yeni pozitif ve negatif yüklü parçacıklar oluşur. Bu yüklü parçacıkların oluşumu sırasında dielektrik sıvının izolasyonu bozulur. Deşarjın ilk safhasını oluşturan akım akmaya başlar (Şekil 2.3.c). Dielektrik sıvının molekül ve iyonları iki ayrı noktada toplanır (kutuplaşır) ve bu iki uç arasında dar ve düşük dirençli bir kanal şeklinde yönlendirilir. Akımın esas akışına bir yol açar. Patlama hızında negatif ve pozitif parçacık oluşumu devam eder ve pozitif parçacıklar negatif elektroda, negatif parçacıklar pozitif iş parçasına doğru taşınmaya başlar. İş parçasına çarpan negatif parçacıkların etkisiyle küçük bir alanı erimeye başlar (Şekil 2.3.d). Deşarj tüneli yanlamasına genişlemeye başlar ve akım akışı maksimuma ulaşır. Sıcaklık yükselirken bir buhar bölgesi oluşur ve bu buhar bölgesi içerisindeki basınç yükselmesi olur. Dielektriğin buharlaşması nedeniyle, plazma kanalındaki basınç 20 atm gibi kadar yüksek bir değere hızla ulaşır (Şekil 2.3.e) (McGeough ve Rassuman, 1982). Akımın yüksek yoğunluğu güçlü bir manyetik alan oluşturur. Bu manyetik alan iyonlaşmış kanalı sıkıştırır ve yerel ısıtma ile sonuçlanır. Buradaki sıcaklık yaklaşık olarak 8000 ila 12000°C arasındadır. Buharlaşma hızlı bir biçimde genişlemeye devam eder (Şekil 2.3.f). Voltaj pulsunun sonunda, voltaj kesildiği zaman, basınç da birdenbire düşer ve süper ısıtılmış metal patlama şeklinde buharlaşır. İş parçası yüzeyinde daha büyük bir krater ve elektrot yüzeyinde daha küçük bir krater oluşur. Yüklü parçacıkların sayısında ani bir düşme olur. Deşarj kanalı yok olur ve işleme sonucu oluşan parçacıklar dielektrik sıvı içine karışır. Dielektrik sıvı kıvılcım aralığında talaşların birikmesini önlemek için sürekli püskürtülür (Şekil 2.3.g). Buhar tüneli söner ve malzeme çifti yüzeyleri hızla soğur (Şekil 2.3.h). Yeni bir elektriksel kıvılcım deşarjı üretmek için yeniden elektrik uygulamadan önce dielektrikteki iyonların tamamen yok olması için zaman tanınır (Şekil 2.3.i) (Scott vd. 1991, Kögmen 1993, Poyrazoğlu 1994).



Şekil 2.3. Deşarj işleminin safhaları.

Anot ve katottan ayrılan metalin miktarı arasındaki ilişki, toplam akım akışı içindeki elektron ve pozitif iyonların oranına bağlıdır. Elektron akımı, pozitif iyonlar elektronlardan 10^4 mertebesinde daha büyük ve elektronlardan daha az hareketli olduğundan dolayı deşarjın en erken safhasında daha yüksektir. Bu nedenle, anot-iş parçasının erozyonu başlangıçta katot-takımından daha büyüktür. EDM ilerlerken, plazma kanalı genişlikte artar ve iç-elektrot aralığı karşında akım yoğunluğu azalır. Azalan elektronlara bağlı olarak akımın bir kesimi ile, pozitif iyonlardan katılım artar ve orantılı olarak daha fazla metal daha sonra katot-takımdan erir (McGeough ve Rassuman 1982, Kögmen 1993).

Metalografik inceleme teknikleri iş parçası yüzeyinden katılaşmış ve erimiş ince bir metal tabakasının varlığını göstermiştir. Bu tabaka ana metalden genellikle daha serttir (Pandey ve Jilani 1986). Bağımsız olarak uygulanan kıvılcımlar, elektrot malzemelerini eritir ve her bir deşarj elektrot yüzeyinde bir krater oluşturur.

Kıvılcımların bağımsızlığı jeneratör devresi tarafından sağlanır ve teorik olarak bütün kıvılcımlar işleme esnasında birbirine benzer. Aynı zamanda farklı geometrik



2.3. Dielektrik Sıvı

WEDM'de genellikle dielektrik sıvı olarak su kullanılır. Su hızlı elektrot aşınmasına sebep olduğundan, geleneksel EDM için uygun değildir. Fakat suyun düşük viskozitesi ve hızlı soğutma oranı WEDM için idealdir (Huntress 1978, ASM 1989). Su kullanılmadan önce iyon değiştirme safhasından geçirilmelidir (Scott vd. 1991).

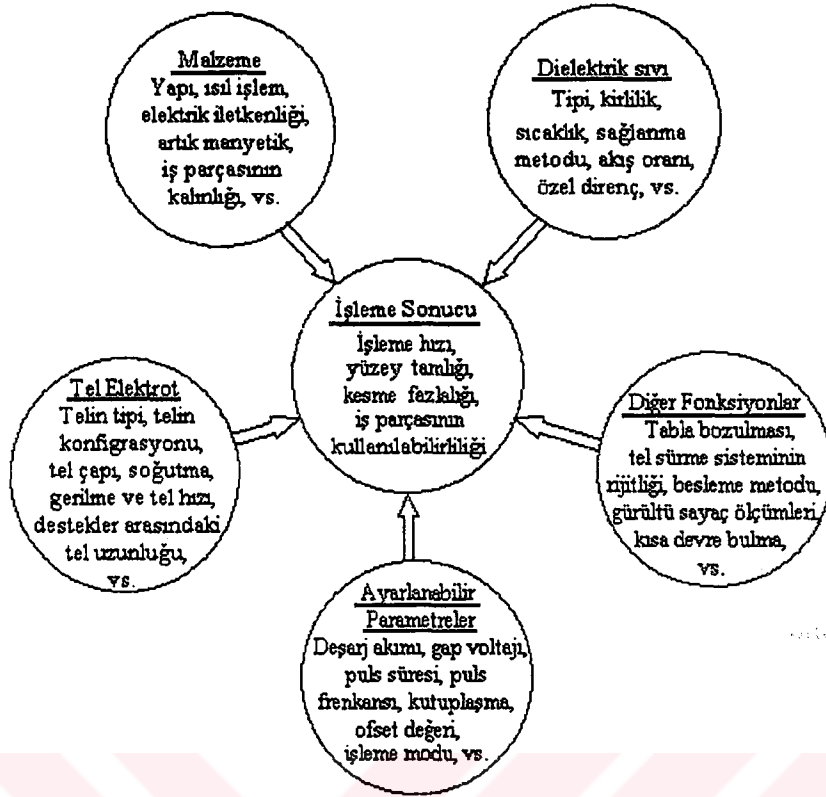
2.4. WEDM'nin Avantaj ve Dezavantajları

WEDM'nin önemli bir avantajı, diğer tüm geleneksel olmayan işleme yöntemlerindeki gibi iş parçası ve tel elektrot arasında fiziksel bir temasın olmamasıdır. Sonuç olarak, kesme için itme kuvvetine ihtiyaç yoktur. Kuvvet sadece tel elektrotu taşıyan başlığın düşey hareketi için gereklidir.

Bu makinelerin esnekliğinden dolayı büyük bir talep vardır ve bu yöntem üç temel yeteneğe sahiptir. Bunlar;

- Geleneksel metotlar vasıtasıyla kolay işlenemeyen sert metal ve alaşımlarını işleyebilmektedir. Böylece sertleştirilmiş çelikten, tungsten karbürden yapılan takımların ve kalıpların işlenmesinde ve havacılık endüstrisinde kullanılan döküm alaşımları, nitralloy, waspalloy, nimonic ve udimet gibi malzemelerin işlenmesinde kullanılır.
- Otomatik olarak herhangi bir karmaşık şekli yeniden imal edebilmektedir.
- İşleme yapılırken herhangi bir temas olmaksızın iş parçası erir. İşleme esnasında büyük kuvvetlere ihtiyaç duymaz. Bu nedenle, bağlama zorluğuna sahip herhangi bir iletken malzemeyi işlemek kolaydır. Erimiş parçacıklar Şekil 3.4'te görülen kıvılcım aralığından dielektrik su vasıtasıyla uzaklaştırılır (Drozda ve Wick 1989).

Çeşitli avantajlara sahip olan WEDM işlemi bir çok probleme de sahiptir. WEDM, çok sayıda parametre tarafından kontrol edilir. Doğasında var olan problemlerle bir dizi karmaşık fiziksel olaylara sahip olduğu açıktır. İşleme hızı, yüzey tamlığı, doğruluğu ve diğer performans ölçümleri, bunlara etki eden çok sayıda faktörler ile birlikte Şekil 2.5'te görülmektedir.



Şekil 2.5. WEDM işlemini etkileyen faktörler (Scott vd. 1991).

WEDM ünitelerinin karakteristiğinden dolayı, tek bir faktör bile işleme sonucuna etki edebilmektedir. Enerji hem kıvılcım yoğunluğu hem de zaman tarafından belirlenir. Bu parametreler, böylece hem işleme hızı hem de yüzey pürüzlülüğünü etkiler. Bunlar herhangi bir metal kesme işleminin çok önemli iki kabulüdür (Alekseyev ve Korenblum 1989, Hatschek 1984, Tarmykin ve Zlatkin 1967). Daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde etmek için deşarj enerjisi azaltılmıştır (Suzuki ve Kishi 1989). Deşarj enerjisi, deşarj akımı, aralık voltajı, puls süresi, puls frekansı ve elektrot karakteristikleri tezgah parametrelerinin bir fonksiyonudur (Ricci vd. 1987). Bu parametrelerin ve diğer kontrol faktörlerinin yanlış ayarlanması, arzu edilmeyen yüzey hasarlarına ve düşük işleme hızlarına sebep olur.



2.5. WEDM'nin Uygulama Alanları

WEDM'nin bazı pratik uygulama alanları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

2.5.1. Kalıp ve Zimba Parçaları

Kalıp ve zimba parçalarının imalatı, çok sık olarak WEDM tipi makineler kullanılarak yapılmaktadır. Küçük koniklere ve tam boyuta ihtiyaç duyulan durumlarda, pahalı kesme elektrotları kalıp imalatı için kullanılır. Bu elektrotlar tel erozyon için mükemmel bir uygulama sağlar. Kalıp işi, yüksek elektrot yüzey kalitesi ister, bu ise genellikle WEDM yöntemi kullanılarak elde edilir. Özellikle kalıp imalatında kullanımı yaygındır. Dişi kalıp ve zimba yapımında çok kolaylık sağlar.

2.5.2. Saç Metal Pres Kalıpları

Normal olarak takım çeliklerinde olduğu gibi sertleştirilmiş metallere üretilirler. Saç metal pres kalıpları WEDM kullanılarak uygun bir şekilde kesilir. İşlem ısı işleminden sonra kesmeyi kolaylaştırır. Bu suretle çarpılma önlenir. Kalıp imalatında WEDM'nin kullanımı önemli tasarruflar sağlar. Bazı uzmanlar takım parçalarının geleneksel metotlarla ihtiyaç duyulan üçte bir zamandan daha az bir zamanda üretilbileceğini söylemişlerdir (Drozda ve Wick 1989, Technical report series 1992, Ozanözgü 1998).

2.5.3. Ekstrüzyon Kalıpları

Ekstrüzyon kalıpların imalatında testereleme ve eğeleme kullanılmaktadır. Bu pahalı işlem WEDM'nin kullanımı ile ortadan kalkmaktadır. Taşlama ve frezelemede grafit işlenirken etrafı kirletir. Bu problem WEDM ile ortadan kalkar (Owen 1992)



2.5.4. Prototip İmalatı

Hızlı prototip imalatı (rapid prototyping) WEDM ile mümkündür. WEDM işlemi kullanılarak, kompleks şekilli bloklar çabuk ve kolay bir şekilde kesilebilir. Saç metal tabakalar da tek bir pasoda parçaların düzineleri veya yüzlercesini üretmek için kesilebilir ve yığılabılır. Prototip işinde WEDM'nin özellik belirten bir avantajı, prototip imalatında kullanılan NC programlamanın parçaların üretimi için sadece küçük düzenlemeler ile kullanılabilmesidir. İşlemdaki NC'nin kullanılmasıyla meydana getirilen esneklik üretimi hızlandırır (Drozda ve Wick 1989).

2.5.5. Torna Takımları

Tel erozyon işlemi, takımları imal etmek için form veya optik taşlamanın usandırıcılığını ve yüksek maliyetini ortadan kaldırır. Çelik bir gövde üzerinde lehimlenmiş karbürden oluşan torna takımları, genellikle pahalı elmas diskler kullanılarak taşlanır. Çelik gövde genellikle frezelenerek hazırlanır. Daha sonra, karbür bu çelik gövdeye lehimlenir ve form taşlama kullanılarak üretim işlemini tamamlanır. WEDM ile, bu pahalı işlem ortadan kaldırılır. Bazı torna takımlarının özellikleri karmaşıktır. Bu özel torna takımları özellikle WEDM makineleri kullanılarak kesilebilir.

2.5.6. Özel Şekil Malzemeleri

Karbür, elmas veya diğer standart olmayan malzemeler WEDM işlemi kullanılarak kesilebilir. Çoğu kez uzay çağı teknolojisi tarafından arzu edilen ve oluşturulan yeni malzemeler, geleneksel kesme takımları kullanılarak ekonomik olarak kesilemezler. Sentetik elmaslar veya elmas bileşimlerini taşlamak hemen hemen imkansız ve çok pahalıdır, fakat WEDM ile etkili bir şekilde kesilebilirler.



2.5.7. Broşlar

Broşlama (tığ çekme), aslında kama yuvası açmak için geliştirilmiştir. Bununla birlikte genellikle düz, iç ve dış silindir veya yarı silindir ve düz olmayan yüzeylerin seri imalatında kullanılır. Broşlama takımlarının imalatı WEDM için mükemmel bir uygulama alanıdır.

2.5.8. Şablonlar

Tel erozyon tezgahı ile büyük bir beceriye ihtiyaç duyulmadan çabuk ve doğru olarak kesilmektedir. Şablonların tasarımındaki değişikliklere basit bir CNC programı çabuk bir biçimde uyarlanabildiğinden bir avantaj sağlar. Böylece çok sayıda değişik şablon imal edilebilir.



3. DENEYLER

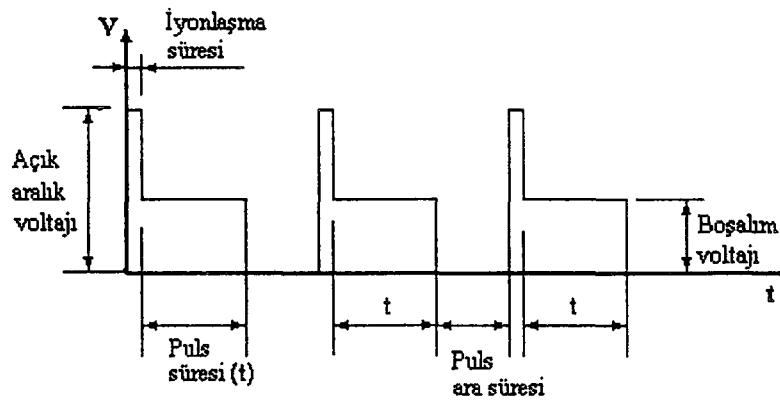
3.1. Tel Erozyon Tezgahı

Deneysel çalışmalar, Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü CNC laboratuvarındaki SODICK firmasına ait A320D/EX21 Tel Erozyon tezgahında yapıldı. Bu tel erozyon tezgahının teknik özellikleri aşağıdaki gibidir:

- CNC kumandalı
- 1/1000 mm hassasiyetli
- Tablo hareketi : (max) X=320 mm Y=205 mm
- İşlenebilecek kalınlık : (max) Z=150 mm
- Koniklik açısı : 10 derece (max)
- Tel ilerleme hızı : (max) 250 mm/sn
- Tel çapları : 0.1 , 0.25 , 0.3 mm
- APT ile programlama

3.1.1. Tel Erozyon Tezgahının İşleme Parametreleri

SODICK A320D-EX21 tel erozyon tezgahına ait kesme ile ilgili parametreler aşağıda ayrıntılı bir biçimde açıklanmıştır. Gerilim-zaman diyagramı Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Gerilim-zaman diyagramı.

3.1.1.1. Puls Süresi (ON time)

Parametre aralığı 100 ns-1 μ s'dir. Puls süresi parametresi her kıvılcımda tele uygulanan elektrik zamanının uzunluğunu kontrol eder. Bu yüzden, daha yüksek bir seviyede puls süresini ayarlamak daha büyük enerji üretimine sebep olur. Kullanılabilir özel ve değişik bir seri numaralara sahiptir. En düşük numara en kısa puls süresidir.

Puls süresi, tel için güç ekleyebilen bir faktördür. Puls süresi artırıldığı zaman, makine daha hızlı kesecek fakat yüzey daha pürüzlü olur ve doğruluk artan kesme hızından dolayı azalabilir. Genellikle, kaba işleme için puls süresi son pasodaki puls süresinden daha yüksektir. Eğer puls süresi aşırı büyük olursa tel kırılmaya karşı dayanıksız olacaktır.

3.1.1.2. Puls Ara Süresi (OFF time)

Parametre aralığı 1 μ s-25 μ s arasındadır. Bu parametre her bir kıvılcım arasındaki zamanın uzunluğunu kontrol eder. Bu yüzden, daha yüksek bir seviyede puls ara süresi parametresini ayarlamak daha büyük olan kıvılcımlar arasındaki zaman demektir. Ve daha düşük enerji üretimi ile sonuçlanır.

Puls ara süresi esnasında parçacıkların aralığın dışına püskürtüldüğünden, çok önemlidir. Puls ara süresi EDM yönteminde yer almazsa, tel iş parçasına degecek şekilde kısa devre yapar veya kırılır. Puls ara süresi, telden sürekli güç alan bir faktördür. Artan off time, genellikle daha yavaş kesme, artan süreklilik ve daha az tel kırılması anlamına gelmektedir. Genellikle puls süresi ve puls ara süresi yaptıkları etkilerinden dolayı bir arada göz önüne alınır. Puls ara süresi, puls süresinden daha düşük olmamalıdır.

3.1.1.3. Puls Ara Süresi Ayarı (MA=Puls OFF duration adjustment)

Parametre aralığı, M:0-9 ve A:0-9 arasında değişmektedir. MA parametresi adaptif kontrolün duyarlılığını ve miktarını kontrol eder. Makinanın adaptif kontrol

devresi, kesme işleminin kötü olduğunu belirlendiği zaman (malzemenin sert bölgesi, zayıf püskürtme, vs.), MA değerine bakar. MA iki sayısal numaradır. İlk rakam M, duyarlılığı kontrol eder. Daha düşük ilk rakam, adaptif kontrol sisteminin daha az duyarlılığıdır. Daha yüksek sayı, daha fazla duyarlılıktır. Bu demektir ki; MA için düşük bir ilk rakam (mesela 1), çalışma bölgesindeki probleme çok duyarlı olmayacak şekilde kontrol yapacaktır. 9 ayarı onu çok duyarlı yapacaktır. 1 ayarı iyi püskürtme ile kaba kesme yapılacağı zaman arzu edilir.

İkinci rakam A, puls ara süresi için daha fazla kontrol etmektedir. Kontrol, bir şeyin (M'ye dayanarak) yanlış olduğunu belirlediğinde, problem belirginleşinceye kadar MA'nın ikinci rakamındaki değer özelleştirilerek puls ara süresini artıracaktır. Daha sonra, normal ayarlarına geri döner. Puls ara süresi, parametre değişikliğini gerçek olarak görülmez, bu dahili olarak yapılır.

Mesela, MA değeri 22 olsun. Bu durumda, duyarlılık oldukça düşük olacaktır ve eğer bir problem belirlenirse, puls ara süresi abartılı olarak değiştirilemez. Fakat MA değeri 89 olursa, duyarlılık çok yüksek olacaktır. Eğer bir problem belirlenirse, puls ara süresi problem çözülünceye kadar büyük bir miktar artırılabilir.

Bir problem halinde, tel programlanmış yolun verilen bir miktarı boyunca geri gider. Eğer problem çözülemezse, bir kısa devre alarmı ortaya çıkar. Eğer problem çözülürse, kontrol ileri doğru yönde tekrar çalışacaktır.

3.1.1.4. Yardımcı Güç Kaynağı Devresi (HP)

Parametre aralığı H:00-99, P:0-4 arasında bulunmaktadır. HP'nin iki rakamından birincisi olan H, artan açık aralık voltajını kullanan yüksek bir voltaj devresidir. Eğer DC elektrik arkı meydana gelirse, HP'nin son rakamı P puls süresi olur. P parametresi, MA parametresinin kesmenin kararsız olduğunu belirlediği zaman kullanılır. Daha hızlı kesmek için yani tele daha fazla güç eklemek için bu değer artırılır.

IP 16'dan daha az bir değere ayarlanmadığı zaman, H parametresi yüksek voltaj devresini seçer ve normal olarak 0'a ayarlanır. Bu parametre kaba işleme için nadiren kullanılır. P parametresi, kararsız işleme esnasında oluşan EDM kıvılcımının devam



etme süresini seçer. IP 15'dan daha fazla bir değere ayarlanmadığı zaman P kullanılmaz.

3.1.1.5. Ana Güç Kaynağı Maksimum Akımı (IP)

Parametre aralığı 00-17 arasındadır. IP akımın en üst noktası anlamına gelir. I akım için elektronik bir semboldür. IP tele uygulanan akım miktarını kontrol eder. Daha yüksek numaralar daha yüksek akım demektir. Bir EDM kıvılcım enerjisi; IP, V (ana güç kaynağı voltajı) ve puls süresi vasıtasıyla belirlenmektedir.

IP tele güç ekleyen faktörlerden biridir. Puls süresi ile aynı derecede, daha yüksek IP, daha hızlı işleme hızı demektir. Fakat geometrik tamlık ve yüzey kalitesini düşürecektir.

3.1.1.6. Ana Güç Kaynağı Voltajı (V)

Parametre aralığı 60-270 volt arasındadır. V voltajı tele güç ekleyen bir faktördür. IP parametresiyle birlikte deşarj puls enerjisini ayarlar. Tel için gerçek gücü ince ayarlamamanın bir yolu olarak puls süresi, ve kaba bir ayarlama olarak da voltajı düşünebiliriz. Daha yüksek sayı daha büyük voltaj demektir.

Voltaj iş parçası kalınlığının bir fonksiyonudur. Kalın iş parçaları daha büyük bir voltaj, ince parçalar için daha düşük bir voltaj gerekmektedir.

3.1.1.7. Aralık Voltajı (SV)

Parametre aralığı 00-31 arasında değişmektedir. SV servo voltaj anlamına gelir. Bu tel ve iş parçası arasındaki aralık voltajını ayarlar. Düşürülen bu ayar daha küçük bir aralık meydana getirir. Aşırı düşük değer kesmeyi kararsız yapar, çünkü parçacıklar aralık içinde kalır. Bu parametre kesme performansını ve aşırı yanmayı (overburn)



kontrol eder. Bu parametre gerçek olarak tele güç eklemes. Eğer yüksek bir değere ayarlanırsa, kesme hızı yavaşlayacaktır.

3.1.1.8. Tabla İlerleme Hızı (SF)

Parametre aralığı 2-40 mm/dak arasındadır. SF servo ilerleme anlamına gelir. Bu tablanın maksimum ilerleme hızını ayarlar. SV ve SF kesme hızını artırır veya azaltan faktörlerdir. SF daima verilen bir iş parçasını gerçek bir şekilde kesebilecek makinadan daha hızlı ayarlanmalıdır.

3.1.1.9. C (Kapasite)

Parametre aralığı 0-0.2 μ F arasındadır. C kapasitans anlamına gelir. Sodick WEDM Mark 21'de kapasitans çok gerekli değildir. Kapasitans tele daha fazla güç eklemenin bir yoludur. Sadece Mark 21 kontrol ünitesi üzerinde cüruf kesme esnasında kullanılır.

3.1.1.10. Tel Gerilmesi (WT)

Parametre aralığı 380-2200 gr arasında değişmektedir. WT otomatik bir tel çekici ile donatılan makinalarda tel gerilmesini ayarlar.

3.1.1.11. Tel İlerleme Hızı (VW)

Parametre aralığı 3-15 m/dak arasında değişmektedir. VW otomatik bir çekici ile donatılan makinalar üzerinde tel hızını ayarlar.

3.2. Kullanılan İşleme Parametreleri

Yapılan deneylerde, puls süresi, gerilim, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı değişken olarak alınırken; puls ara süresi, tabla ilerleme hızı, tel gerginliği, tel çapı ve malzemesi sabit olarak alınmıştır. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri ve değerleri Tablo 3.1'de görülmektedir.

Tablo 3.1. Deneylerde kullanılan kesme parametreleri ve değerleri.

Deney Parametreleri	Değerleri
Puls süresi (ns)	300, 500, 700, 900
Gerilim (volt)	270, 100, 80
Tel ilerleme hızı (m/dak)	5, 8, 12.5
Dielektrik sıvı püskürtme basıncı (kg/cm ²)	6, 12, 18
Puls ara süresi (μs)	16
Tabla ilerleme hızı (mm/dak)	7.6
Aralık voltajı (volt)	21
Tel gerginliği (gr)	1800
Kapasite (μF)	0
MA kodu	16
HP kodu	02
IP kodu	17

Deney şartları faktöriyel tasarıma uygun olarak belirlenmiştir. Faktöriyel denemeler de çoğu kez değişik ve birbirleri ile ilişkili olmayan faktörlerin belli bir karaktere olan etkileri inceleme konusu yapılmaktadır. Bir başka anlatımla bir faktörün durumu diğer faktör ve faktörlerin değişik seviyelerinde ele alınmakta ve faktörler arasında karşılıklı etkileşim (interaksiyon) olup olmadığı ortaya çıkarılmaktadır.

Faktöriyel denemede deneysel planı oluştururken her faktör belirlenen seviyelerde alınır. Her faktörün iki seviyedeki deneysel dizaynı 2ⁿ faktöriyel tasarım olarak adlandırılır. Deneysel dizaynı oluşturan her faktör üç seviyede oluşturuluyorsa 3ⁿ faktöriyel tasarım olarak ifade edilir. Bu çalışmada, Tablo 3.1'de gösterilen kesme parametrelerine göre, deney şartlarından gerilim, dielektrik sıvı püskürtme basıncı ve tel ilerleme hızı 3ⁿ faktöriyel tasarıma, puls süresi ise 4ⁿ faktöriyel tasarıma göre

belirlenmiştir. Yapılan bu faktöriyel tasarıma göre $3^3 \cdot 4^1 = 108$ değişik kesme şartında deneyler yapılmıştır.

3.3. Tel Elektrot

Deneylerde, çekme mukavemeti 900 N/mm^2 olan, 0.25 mm çapında İtalya TFE firması tarafında üretilen CuZn37 Master Brass olarak adlandırılan pirinç tel kullanıldı. Kullanılan makaralardaki net tel ağırlığı 3.8 kg'dır. Makara tipi DIN 125 olup, makara çapı 125 mm ve makara genişliği 125 mm şeklindedir.

3.4. Teldeki Krater Boyutlarının Tespiti

Krater aşınması deneylerinde, iş parçası malzemesi olarak 0.28 mm kalınlığında Ç4140 çeliği kullanıldı. İş parçası kalınlığının 0.28 mm seçilmesinin nedeni, WEDM teli üzerinde birbirinden bağımsız yani birbiri üstüne binmeyen tek kraterlerin oluşumunun elde edilmesi amacıyla. Önce 10 mm kalınlığındaki bu iş parçası malzemesi ile deneme deneyleri yapıldı. 10 mm kalınlığındaki iş parçası ile yapılan deneylerde, kraterlerin birbiri üstüne bindiği görüldü ve tel üzerinde bağımsız kraterlere rastlanamadı. Aynı deneme deneyi 5 mm kalınlığındaki iş parçası ile yapıldı. Daha sonra, sırasıyla 1 ve 0.5 mm kalınlığındaki sac iş parçaları ile yapıldı fakat bağımsız krater oluşumu elde edilemedi. 0.28 mm sac ile yapılan deneyler sonunda birbirinden bağımsız tek kraterler elde etmek mümkün oldu. Böylece krater boyutlarının tespit edilmesi için yapılan deneylerde 0.28 mm kalınlığındaki iş parçasının uygun olduğuna karar verildi. $\phi 50$ mm çapında 0.28 mm kalınlığında numuneler hazırlanarak krater boyutları ölçme deneyleri yapıldı.

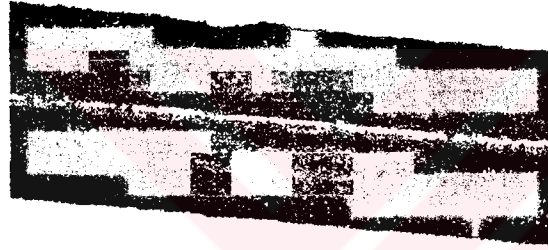
Ç4140 (SAE/AISI 4140, DIN 42CrMo4) çeliğinin kullanılmasının sebebi, piyasada kalıp çeliği olarak yaygın kullanılmasıdır. Bu çeliğinin kimyasal bileşimi Tablo 3.2'deki gibidir.

Tablo 3.2. Ç 4140 çeliğinin kimyasal bileşimi.

Kimyasal Bileşim (%)							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Sertlik
0.35-0.44	0.15-0.35	0.60-0.90	0.040 en çok	0.040 en çok	0.80-1.10	0.15-0.25	217 HB30

Krater boyutları iş parçası işlendikten sonra WEDM teli üzerinde oluşan kraterlerin derinlik ve çapının ölçülmesi ile tespit edildi. Aynı deney şartında, 12 adet kratere ait çap ve derinlik ölçülerek ortalaması alındı.

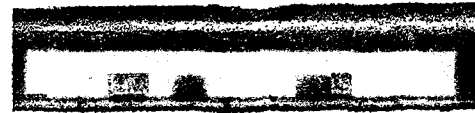
Tel üzerinde meydana gelen kraterler Şekil 3.2.a,b,c'de görülmektedir. Telde oluşan kraterleri ölçmek için Mitutoyo TM-500 ölçme mikroskobu (x50 büyütme) kullanıldı (Şekil 3.4.a). Bu mikroskobun mikrometresi 0.005 mm hassasiyete sahiptir.

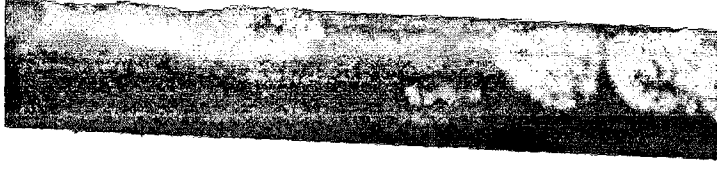


a)



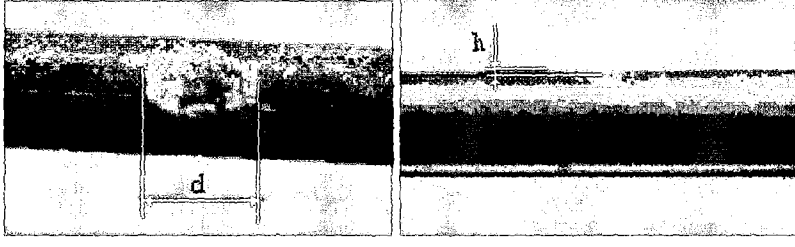
b)





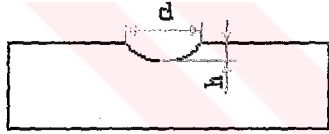
c)

Şekil 3.2. Telde oluşan kraterlerin mikroskoptaki görüntüsü.



a)

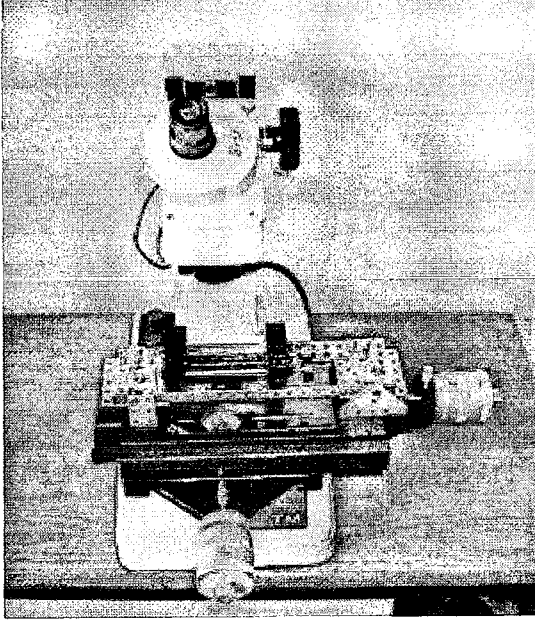
b)



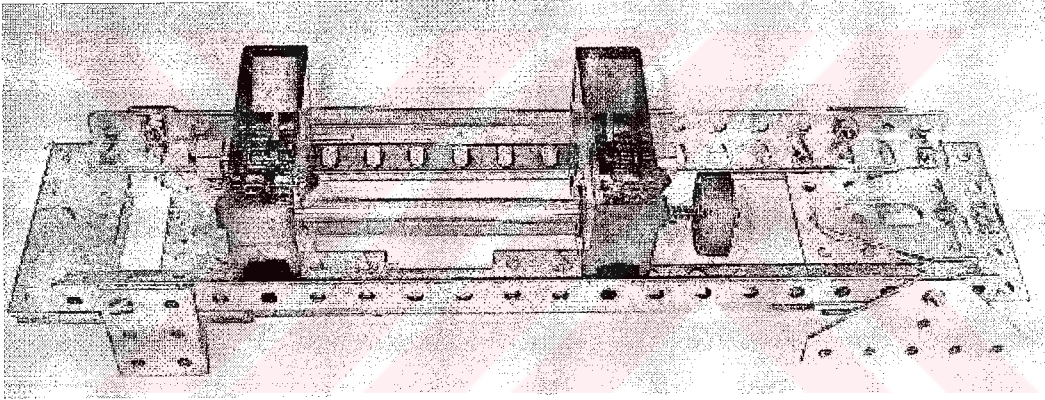
c)

Şekil 3.3. Teldeki kraterlerin boyutlandırılması.

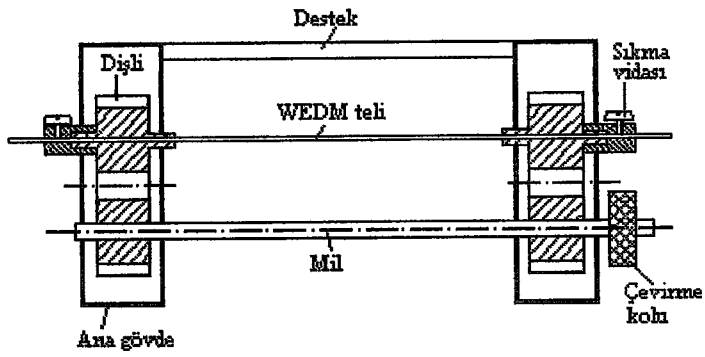
Krater aşınması, Şekil 3.3.a'daki d çapı ve Şekil 3.3.b'deki h derinliği ile gösterilen büyüklüklerin ölçümü yapılarak tespit edildi. Krater çapı ve derinliği şematik olarak Şekil 3.3.c'de görülmektedir. Ölçme işlemine yardımcı olması amacıyla telin bağlandığı ve teli burmadan çevirebilen bir tel çevirme aparatı tasarlanıp imal edildi. Tel çevirme aparatı Şekil 3.4.b ve Şekil 3.4.c'de görülmektedir. Bu aparat mikroskobun üzerine monte edildi.



a)



b)



c)

Şekil 3.4. Krater ölçme işleminde kullanılan mikroskop (a) ve tel çevirme aparatı (b,c).

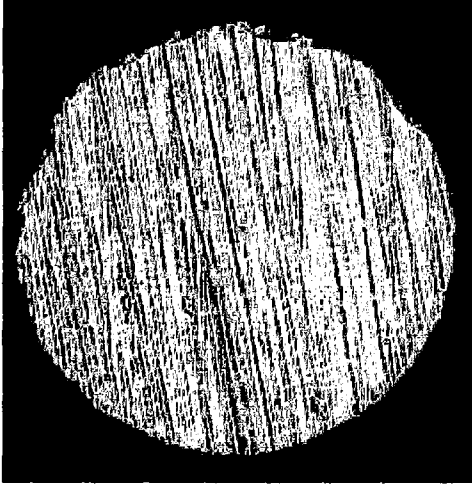
Şekil 3.4.c'de görülen tel çevirme aparatının her iki ana gövdesine yerleştirilmiş olan dişlilerin içerisinden geçirilen tel, gerildikten sonra sıkma vidası ile sabitlendi. Daha sonra tek kraterden Şekil 3.3'te h ile gösterilen krater yüksekliği ve d ile gösterilen krater çapı ölçüldü. Kraterin çap ve yüksekliğinin bu şekildeki görüntüleri çevirme kolunun döndürülmesi vasıtasıyla. Çevirme kolu çevrildiğinde, çevirme kolu mili üzerinde bulunan her iki dişli karşısındaki dişliyi aynı anda ve aynı oranda çevirmektedir. Böylece telin burulmadan kendi eksenini etrafında dönmesi sağlanmaktadır. Şekil 3.4'te destek olarak adlandırılan mil, ana gövdelerin birbirine doğru yaklaşmasını ve uzaklaşmasını önleyerek telin gerginliğini korumaktadır. Krater derinliği ölçülürken, çevirme kolu 90° çevrilmek suretiyle kraterin en derin yeri belirlendikten sonra mikroskobun mikrometresi kullanılarak ölçülmüştür.

3.5. Teldeki Ağırlık Kaybının Tespiti

Telin ağırlık kaybı ile ilgili aşınma deneylerinde, iş parçası olarak Ø50 mm çapında Ç4140 kalıp çeliği kullanıldı. 50 mm çapındaki bu malzemeden 10 mm kalınlığında mekanik testere ile kesilerek deney numuneleri hazırlandı.

Tellerin ağırlık ölçümleri, 10^{-5} hassasiyetine sahip Mitutoyo Precisa 262SMA-FR terazisinde yapıldı. Deney sonrasında kullanılan telden 15 m'lik numuneler alınarak tartıldı. 15 m'lik işlenmemiş telin ağırlığından işlenmiş telin ağırlığı çıkarılarak ağırlık kaybı tespit edildi. Deney yapılmamış 15 m tel ağırlığı 6.279 gr olarak ölçülmüştür. Böylece tel aşınması, teldeki ağırlık kaybından gidilerek farklı bir şekilde tespit edildi.

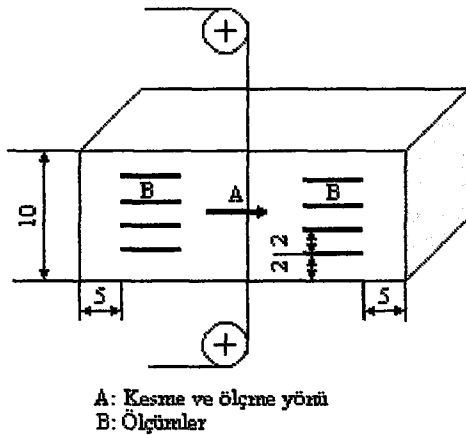
Kraterlerin telin dik kesitinden mikroskoptaki görüntüsü Şekil 3.5'te görülmektedir.



Şekil 3.5. Kraterlerin telin dik kesitinden mikroskoptaki görüntüsü.

3.6. İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğünün Tespiti

Yüzey pürüzlülüğü deneylerinde, $\varnothing 50$ mm çapında ve 10 mm kalınlığında Ç4140 kalıp çeliği kullanıldı. Deney sonrası her numuneden 8 adet yüzey pürüzlülüğü ölçümü tekrar edilerek ortalama değer alındı. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, Mitutoyo SJ-201 yüzey pürüzlülük muayene cihazı ile yapıldı. Ölçümlerde kesme uzunluğu λ_c (the cutoff length) 0.8 mm ve numune sayısı ℓ (the sampling number) 5 olarak seçildi. Bu durumda travers boyu yaklaşık $0.8 \times 5 = 4$ mm olmaktadır. Ölçme işlemi Şekil 3.6'da görüldüğü gibi kesilen yüzeyde ve kesme yönüne paralel olarak yapıldı. Yüzey pürüzlülüğüne ait ölçme detayları şekil 3.6'da görülmektedir.



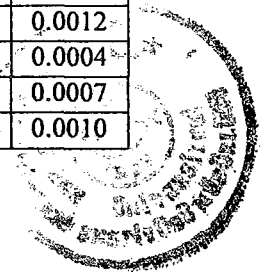
Şekil 3.6. Yüzey pürüzlülüğü ölçme detayları

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan 108 deneysel çalışma neticesinde ölçülen teldeki krater çap ve derinliğine, telin ağırlık kaybına ve iş parçası yüzey pürüzlülüğüne ait sonuçlar Tablo 4.1'de görülmektedir.

Tablo 4.1. Tel aşınması ve iş parçası yüzey pürüzlülüğüne ait deney sonuçları.

Deney no:	Puls süresi (ns)	Gerilim (volt)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Dielektrik sıvı püskürtme basıncı (kg/cm ²)	Krater derinliği (mm)	Krater çapı (mm)	Telin ağırlık kaybı (gr)	Ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)	Krater hacmi (mm ³) x10 ⁻³	Deşarj enerjisi (Joule)
1	300	270	5	6	0.011	0.120	0.329	2.45	0.0629	0.0004
2	500	270	5	6	0.013	0.141	0.45	2.61	0.1026	0.0007
3	700	270	5	6	0.016	0.164	0.513	2.95	0.1711	0.0010
4	900	270	5	6	0.018	0.189	0.739	3.24	0.2556	0.0012
5	300	270	8	6	0.012	0.125	0.279	2.47	0.0745	0.0004
6	500	270	8	6	0.014	0.149	0.393	2.75	0.1235	0.0007
7	700	270	8	6	0.017	0.171	0.494	2.98	0.1978	0.0010
8	900	270	8	6	0.019	0.196	0.586	3.28	0.2902	0.0012
9	300	270	12.5	6	0.013	0.129	0.234	2.48	0.0861	0.0004
10	500	270	12.5	6	0.015	0.158	0.342	2.79	0.1488	0.0007
11	700	270	12.5	6	0.018	0.184	0.439	3.09	0.2424	0.0010
12	900	270	12.5	6	0.022	0.225	0.449	3.30	0.4429	0.0012
13	300	270	5	12	0.010	0.117	0.373	2.26	0.0543	0.0004
14	500	270	5	12	0.013	0.136	0.468	2.58	0.0956	0.0007
15	700	270	5	12	0.015	0.151	0.657	2.89	0.1361	0.0010
16	900	270	5	12	0.017	0.184	0.831	3.01	0.2286	0.0012
17	300	270	8	12	0.012	0.120	0.293	2.32	0.0688	0.0004
18	500	270	8	12	0.013	0.138	0.413	2.59	0.0984	0.0007
19	700	270	8	12	0.016	0.170	0.502	2.91	0.1837	0.0010
20	900	270	8	12	0.019	0.189	0.609	3.06	0.2701	0.0012
21	300	270	12.5	12	0.012	0.121	0.288	2.38	0.0699	0.0004
22	500	270	12.5	12	0.014	0.139	0.369	2.69	0.1077	0.0007
23	700	270	12.5	12	0.017	0.180	0.459	2.94	0.2189	0.0010
24	900	270	12.5	12	0.022	0.218	0.593	3.13	0.4162	0.0012
25	300	270	5	18	0.010	0.105	0.418	2.25	0.0438	0.0004
26	500	270	5	18	0.012	0.126	0.553	2.56	0.0757	0.0007
27	700	270	5	18	0.014	0.143	0.821	2.87	0.1139	0.0010
28	900	270	5	18	0.017	0.174	1.057	3.00	0.2047	0.0012
29	300	270	8	18	0.011	0.110	0.345	2.28	0.0530	0.0004
30	500	270	8	18	0.012	0.127	0.459	2.57	0.0769	0.0007
31	700	270	8	18	0.015	0.155	0.511	2.88	0.1433	0.0010
32	900	270	8	18	0.018	0.180	0.737	3.03	0.2321	0.0012
33	300	270	12.5	18	0.012	0.116	0.298	2.28	0.0643	0.0004
34	500	270	12.5	18	0.013	0.131	0.372	2.66	0.0888	0.0007
35	700	270	12.5	18	0.015	0.162	0.49	2.89	0.1564	0.0010



Deney no:	Puls süresi (ns)	Gerilim (volt)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Dielektrik sıvı püskürtme basıncı (kg/cm ²)	Krater derinliği (mm)	Krater çapı (mm)	Telin ağırlık kaybı (gr)	Ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)	Krater hacmi (mm ³) x10 ⁻³	Deşarj enerjisi (Joule)
36	900	270	12.5	18	0.020	0.210	0.64	3.05	0.3505	0.0012
37	300	100	5	6	0.008	0.080	0.112	1.47	0.0204	0.0002
38	500	100	5	6	0.009	0.094	0.126	1.72	0.0316	0.0003
39	700	100	5	6	0.012	0.106	0.153	2.02	0.0539	0.0004
40	900	100	5	6	0.013	0.130	0.187	2.36	0.0874	0.0005
41	300	100	8	6	0.008	0.086	0.103	1.70	0.0235	0.0002
42	500	100	8	6	0.010	0.101	0.11	1.78	0.0406	0.0003
43	700	100	8	6	0.012	0.118	0.14	2.41	0.0665	0.0004
44	900	100	8	6	0.015	0.142	0.17	2.56	0.1205	0.0005
45	300	100	12.5	6	0.010	0.099	0.098	1.74	0.0390	0.0002
46	500	100	12.5	6	0.011	0.113	0.108	1.92	0.0559	0.0003
47	700	100	12.5	6	0.013	0.125	0.128	2.47	0.0809	0.0004
48	900	100	12.5	6	0.015	0.145	0.167	2.73	0.1256	0.0005
49	300	100	5	12	0.008	0.069	0.107	1.45	0.0152	0.0002
50	500	100	5	12	0.009	0.081	0.115	1.70	0.0236	0.0003
51	700	100	5	12	0.010	0.105	0.151	1.98	0.0438	0.0004
52	900	100	5	12	0.012	0.122	0.18	2.29	0.0710	0.0005
53	300	100	8	12	0.008	0.081	0.092	1.59	0.0209	0.0002
54	500	100	8	12	0.009	0.099	0.109	1.76	0.0350	0.0003
55	700	100	8	12	0.011	0.117	0.131	2.15	0.0598	0.0004
56	900	100	8	12	0.014	0.139	0.167	2.44	0.1077	0.0005
57	300	100	12.5	12	0.008	0.091	0.088	1.72	0.0263	0.0002
58	500	100	12.5	12	0.010	0.107	0.106	1.91	0.0455	0.0003
59	700	100	12.5	12	0.012	0.123	0.128	2.34	0.0722	0.0004
60	900	100	12.5	12	0.014	0.139	0.158	2.71	0.1077	0.0005
61	300	100	5	18	0.006	0.065	0.079	1.43	0.0101	0.0002
62	500	100	5	18	0.007	0.082	0.107	1.68	0.0187	0.0003
63	700	100	5	18	0.009	0.102	0.132	1.95	0.0372	0.0004
64	900	100	5	18	0.011	0.117	0.177	2.27	0.0598	0.0005
65	300	100	8	18	0.006	0.078	0.077	1.44	0.0144	0.0002
66	500	100	8	18	0.008	0.090	0.09	1.74	0.0257	0.0003
67	700	100	8	18	0.010	0.108	0.129	2.09	0.0463	0.0004
68	900	100	8	18	0.012	0.122	0.156	2.40	0.0710	0.0005
69	300	100	12.5	18	0.007	0.086	0.072	1.49	0.0205	0.0002
70	500	100	12.5	18	0.009	0.096	0.085	1.88	0.0330	0.0003
71	700	100	12.5	18	0.011	0.110	0.116	2.19	0.0530	0.0004
72	900	100	12.5	18	0.012	0.124	0.147	2.68	0.0734	0.0005
73	300	80	5	6	0.006	0.073	0.089	1.46	0.0127	0.0001
74	500	80	5	6	0.007	0.087	0.098	1.63	0.0210	0.0002
75	700	80	5	6	0.009	0.104	0.113	1.90	0.0386	0.0003
76	900	80	5	6	0.011	0.119	0.138	2.26	0.0619	0.0004
77	300	80	8	6	0.007	0.074	0.086	1.49	0.0152	0.0001
78	500	80	8	6	0.009	0.095	0.097	1.65	0.0323	0.0002
79	700	80	8	6	0.010	0.112	0.112	1.93	0.0498	0.0003
80	900	80	8	6	0.012	0.123	0.133	2.45	0.0722	0.0004
81	300	80	12.5	6	0.007	0.084	0.085	1.51	0.0196	0.0001

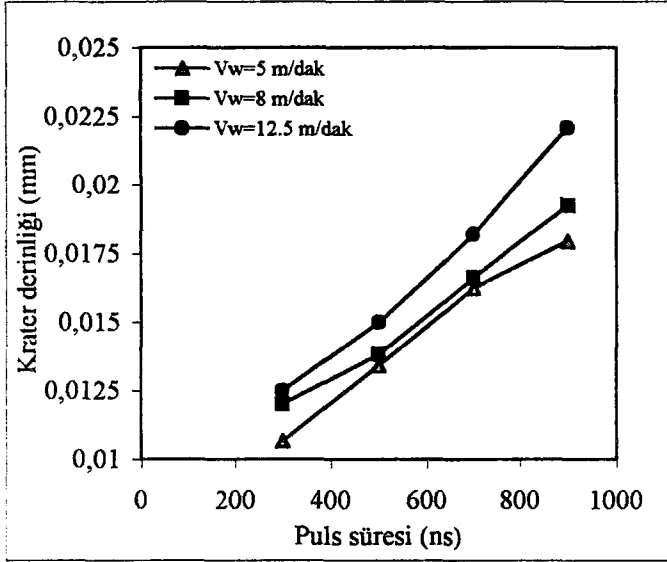
Deney no:	Puls süresi (ns)	Gerilim (volt)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Dielektrik sıvı püskürtme basıncı (kg/cm ²)	Krater derinliği (mm)	Krater çapı (mm)	Telin ağırlık kaybı (gr)	Ortalama yüzey pürüzlülüğü (μm)	Krater hacmi (mm ³) x10 ⁻³	Deşarj enerjisi (Joule)
82	500	80	12.5	6	0.009	0.104	0.092	1.66	0.0386	0.0002
83	700	80	12.5	6	0.011	0.116	0.106	2.00	0.0588	0.0003
84	900	80	12.5	6	0.013	0.128	0.13	2.59	0.0848	0.0004
85	300	80	5	12	0.006	0.069	0.088	1.44	0.0113	0.0001
86	500	80	5	12	0.007	0.082	0.097	1.63	0.0187	0.0002
87	700	80	5	12	0.008	0.100	0.113	1.85	0.0317	0.0003
88	900	80	5	12	0.011	0.117	0.128	2.25	0.0598	0.0004
89	300	80	8	12	0.007	0.078	0.085	1.48	0.0169	0.0001
90	500	80	8	12	0.008	0.087	0.095	1.64	0.0240	0.0002
91	700	80	8	12	0.010	0.100	0.112	1.92	0.0398	0.0003
92	900	80	8	12	0.011	0.121	0.126	2.42	0.0639	0.0004
93	300	80	12.5	12	0.007	0.079	0.082	1.50	0.0173	0.0001
94	500	80	12.5	12	0.008	0.092	0.092	1.65	0.0269	0.0002
95	700	80	12.5	12	0.011	0.102	0.112	1.95	0.0456	0.0003
96	900	80	12.5	12	0.012	0.127	0.125	2.55	0.0769	0.0004
97	300	80	5	18	0.006	0.049	0.064	1.35	0.0058	0.0001
98	500	80	5	18	0.006	0.070	0.075	1.44	0.0117	0.0002
99	700	80	5	18	0.009	0.089	0.092	1.78	0.0284	0.0003
100	900	80	5	18	0.010	0.108	0.12	2.24	0.0463	0.0004
101	300	80	8	18	0.006	0.073	0.056	1.40	0.0127	0.0001
102	500	80	8	18	0.008	0.083	0.069	1.51	0.0219	0.0002
103	700	80	8	18	0.009	0.105	0.087	1.91	0.0393	0.0003
104	900	80	8	18	0.011	0.114	0.112	2.35	0.0568	0.0004
105	300	80	12.5	18	0.006	0.075	0.055	1.40	0.0134	0.0001
106	500	80	12.5	18	0.008	0.090	0.068	1.52	0.0257	0.0002
107	700	80	12.5	18	0.011	0.105	0.083	1.94	0.0483	0.0003
108	900	80	12.5	18	0.011	0.122	0.101	2.38	0.0650	0.0004

4.1. Teldeki Krater Boyutlarının İncelenmesi

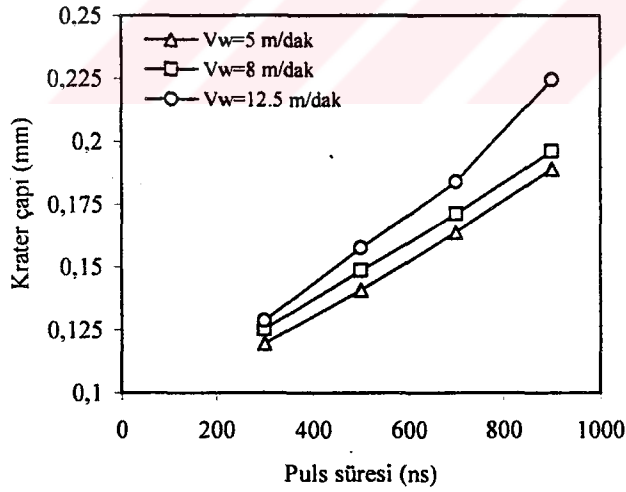
Puls süresi, gerilim, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı gibi kesme parametrelerinin krater boyutlarına etkisi Şekil 4.1- 4.18'de verilmiştir.

Krater çap ve derinlik ölçümlerine ait grafikler incelendiğinde, tel üzerinde oluşan kraterlerin en büyük çap ve derinlik değeri; 270 volt gerilim, 12.5 m/dak tel ilerleme hızı, 6 kg/cm² dielektrik püskürtme basıncı ve 900 ns puls süresi ayarlarında elde edilmiştir. Bu koşullarda ölçülen krater çapı 0.225 mm ve krater derinliği ise 0.022 mm değerindedir. Teldeki en küçük krater boyutları 80 volt gerilim, 5 m/dak tel ilerleme hızı, 18 kg/cm² dielektrik püskürtme basıncı ve 300 ns puls süresi neticesinde

elde edilmiştir. Bu şartlarında krater çapı 0.049 mm ve krater derinliği ise 0.006 mm olarak ölçülmüştür.

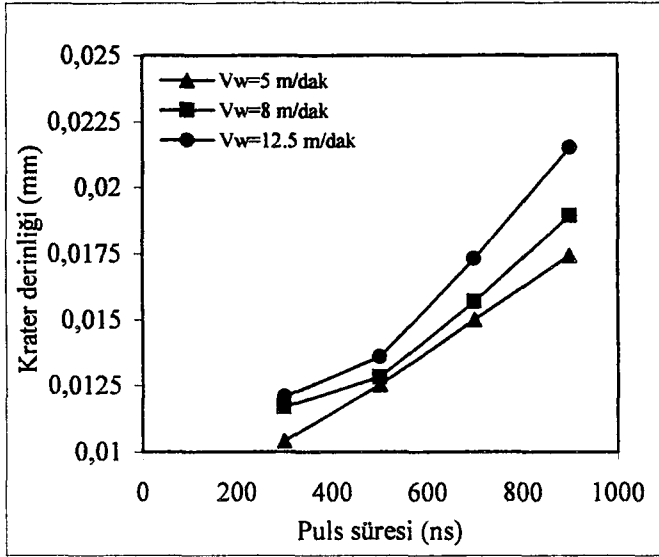


Şekil 4.1. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)

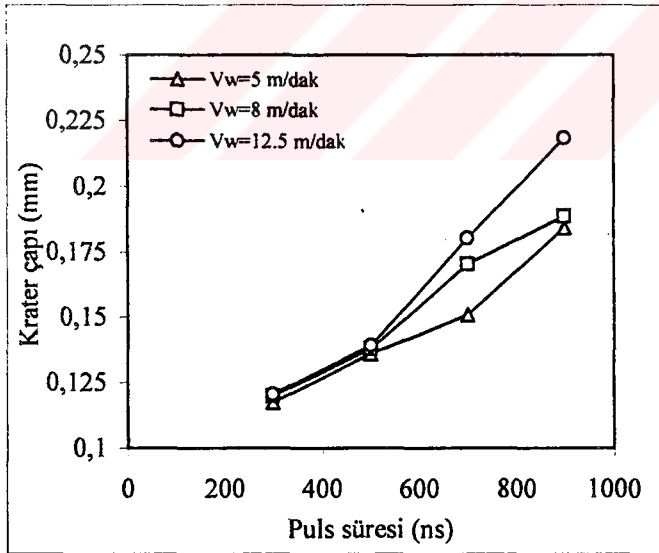


Şekil 4.2. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)



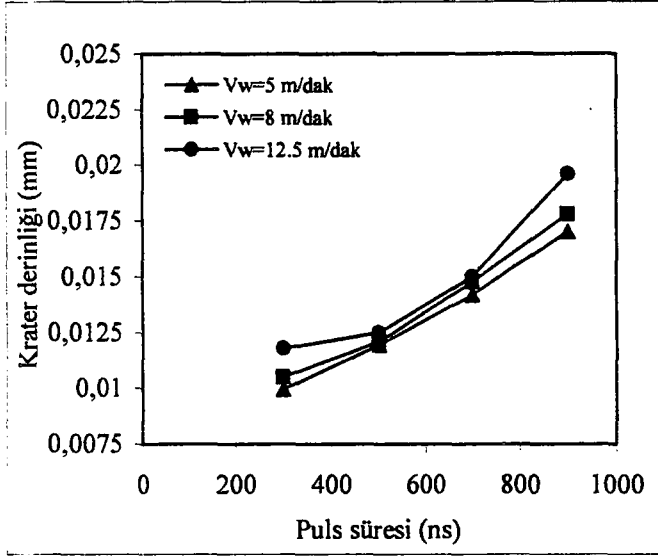


Şekil 4.3. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)

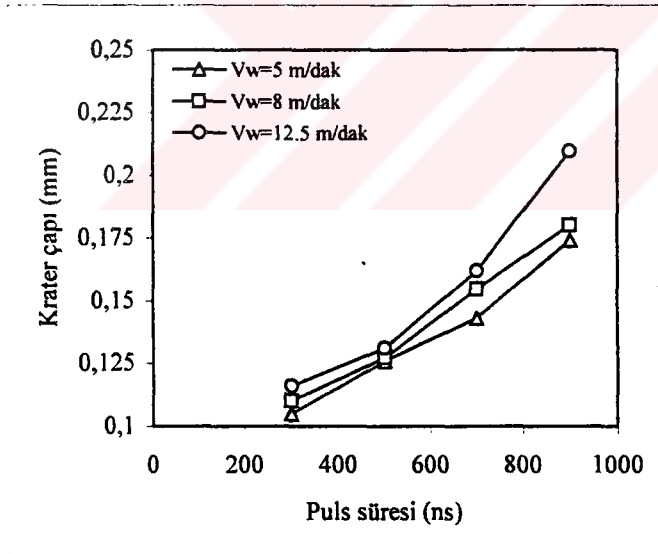


Şekil 4.4. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)



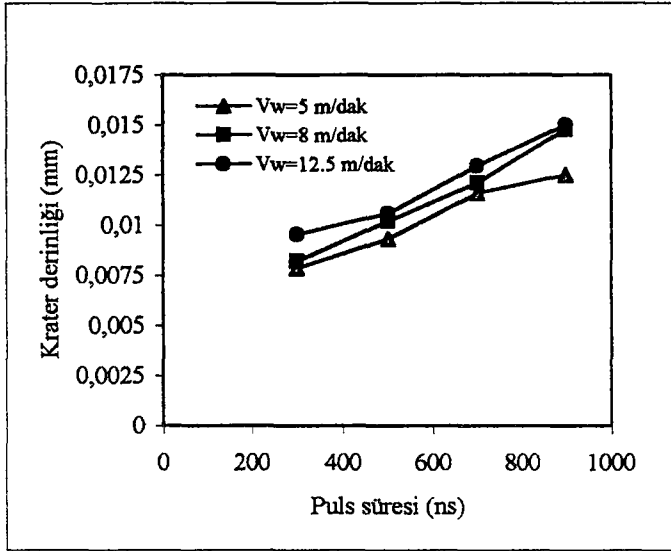


Şekil 4.5. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)

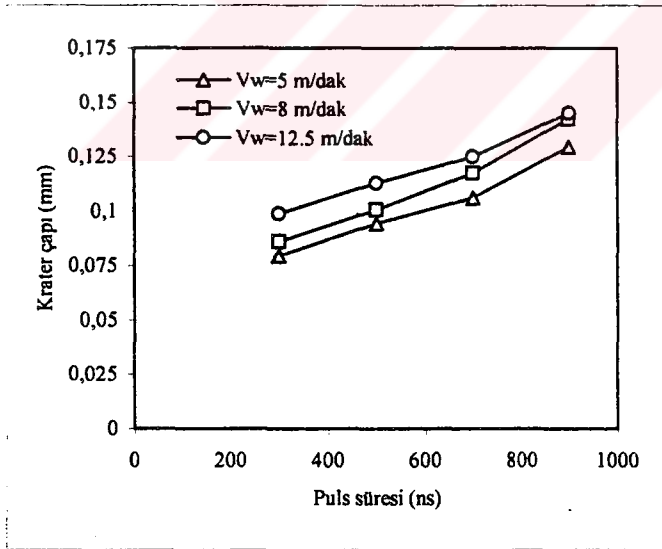


Şekil 4.6. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)



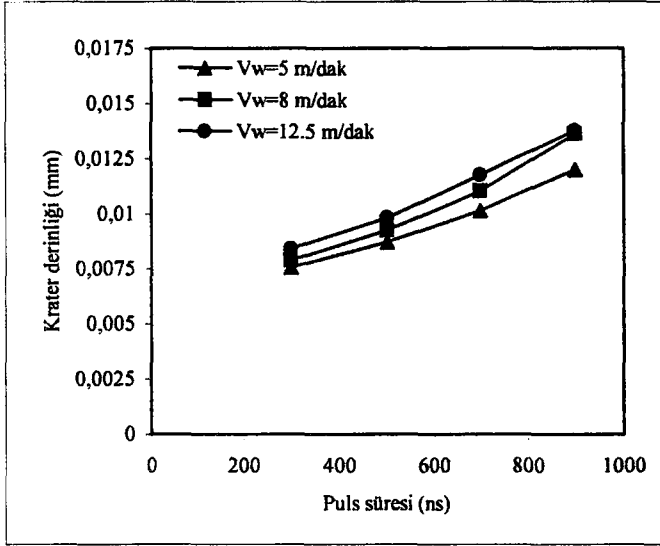


Şekil 4.7. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)

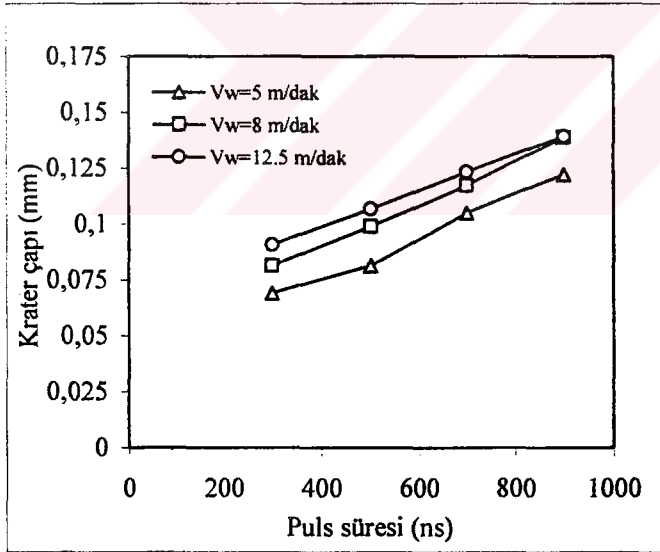


Şekil 4.8. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)



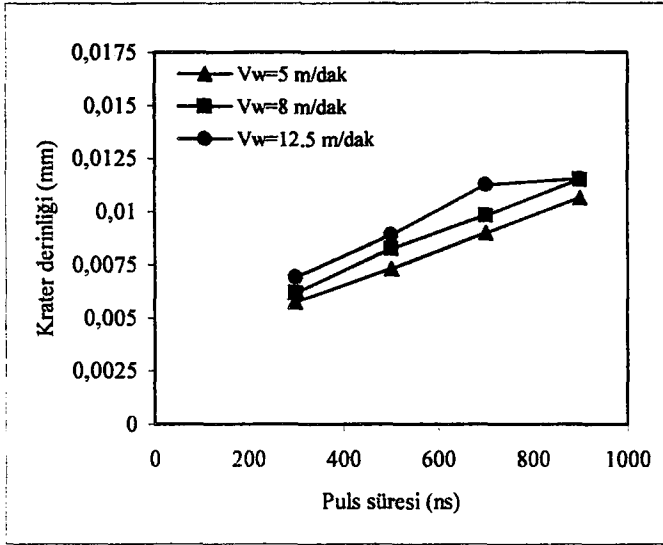


Şekil 4.9. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)

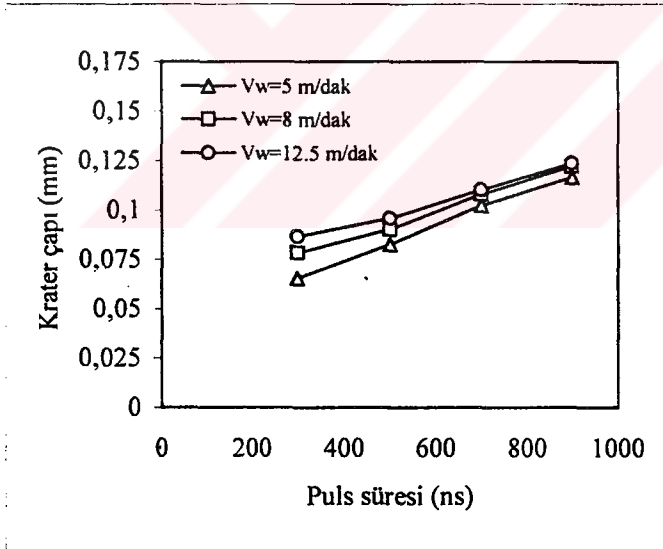


Şekil 4.10. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)



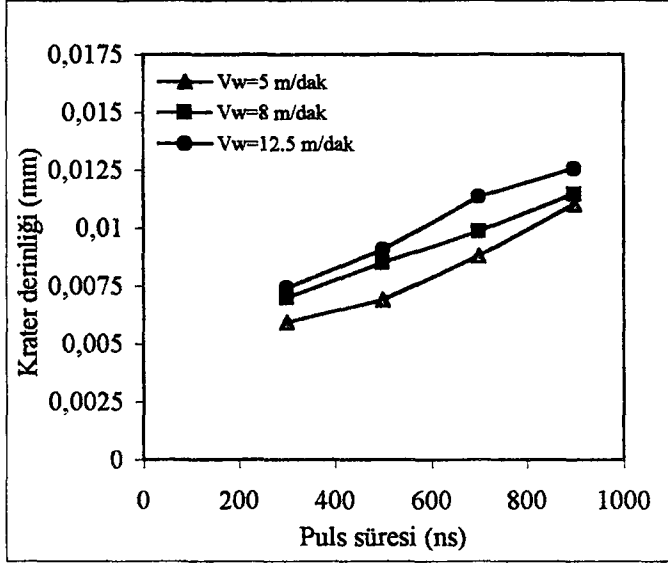


Şekil 4.11. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)

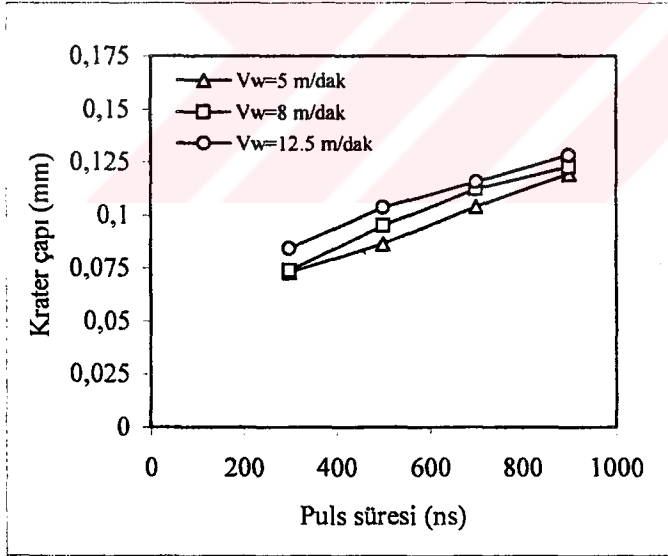


Şekil 4.12. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)



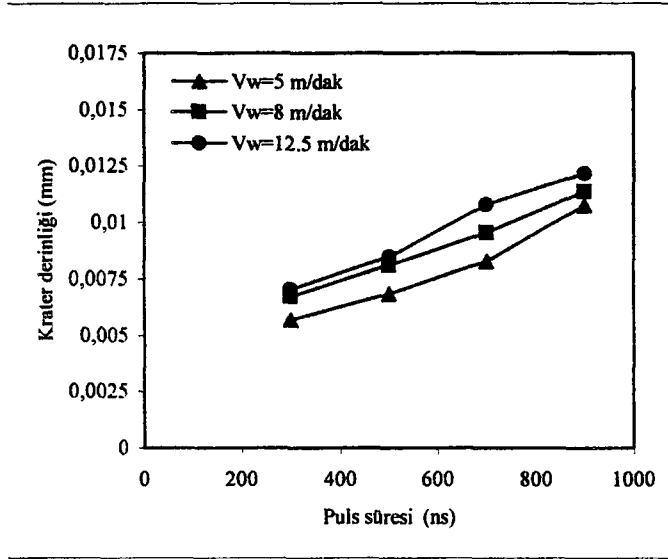


Şekil 4.13. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

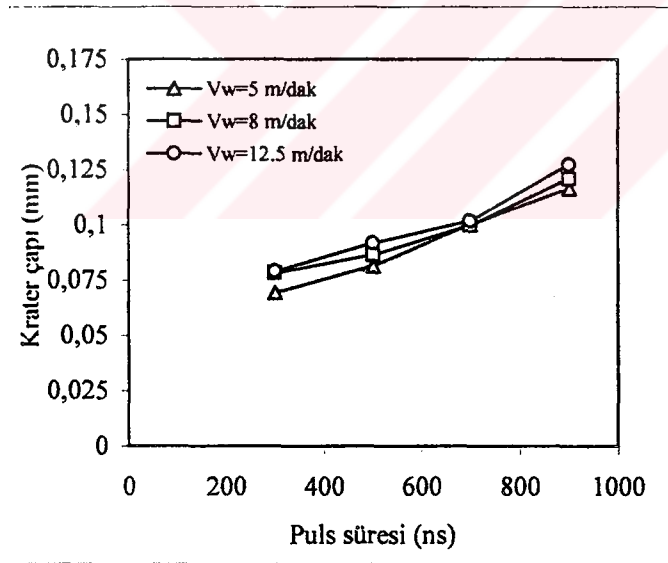


Şekil 4.14. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)



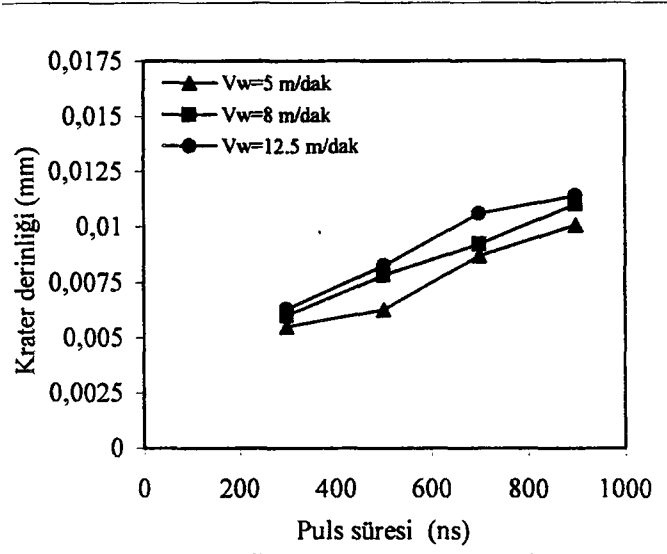


Şekil 4.15. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

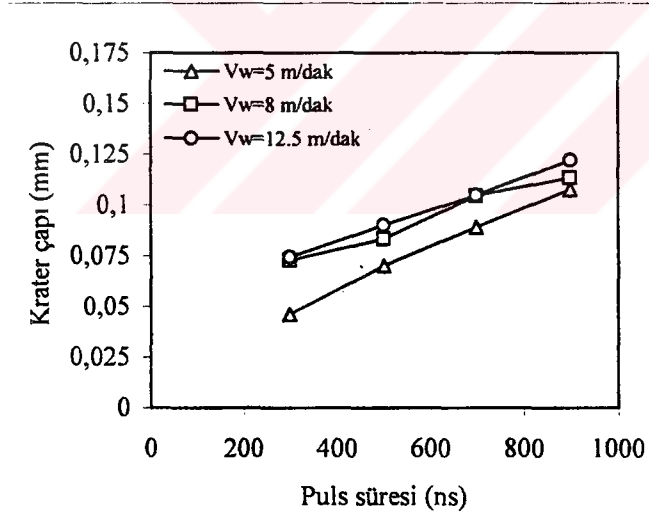


Şekil 4.16. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)





Şekil 4.17. Krater derinliğinin puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)



Şekil 4.18. Krater çapının puls süresi ve tel ilerleme hızına göre değişimi
($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

4.1.1. Puls Süresinin Krater Boyutlarına Etkisi

Şekil 4.1- Şekil 4.18 incelendiğinde, puls süresi arttıkça teldeki kraterlerin çap ve derinliğinin de buna bağlı olarak arttığı görülmektedir. Krater boyutu kıvılcım enerjisine bağlıdır ve krater boyutu puls süresi ile orantılıdır (ASM 1989). Puls süresinin artması daha büyük enerji üretimine sebep olur (Sodick 1998). Büyük enerji deşarjları daha büyük kraterler, düşük enerji deşarjları daha küçük kraterler oluşturur (Doyle vd. 1985). Banerjee ve arkadaşları (1997) çalışmalarında, puls süresinin artması ile ısıdan etkilenen bölgenin genişliğinin ve krater hacminin arttığını belirtmişlerdir ancak deneysel bir sonuca rastlanamamıştır.

Krater hacmi ile kıvılcım enerjisi (deşarj enerjisi, puls enerjisi) arasında bir orantı olduğu birçok çalışmada belirtilmiştir. Bu çalışmada da bu iki parametre arasındaki ilişki araştırılmıştır. Krater hacmi (v_k) ile kıvılcım enerjisiyle (E_d) bir bağıntı elde etmek üzere:

$$v_k = k \cdot E_d \quad (4.1)$$

şeklinde bir doğru orantının varolduğu kabul edildi. Burada k sabittir. V_d deşarj enerjisi, I_d deşarj akımı ve t_d puls süresi olmak üzere kıvılcım enerjisi (4.2)'de gösterilen denklemlerle hesaplanabilir:

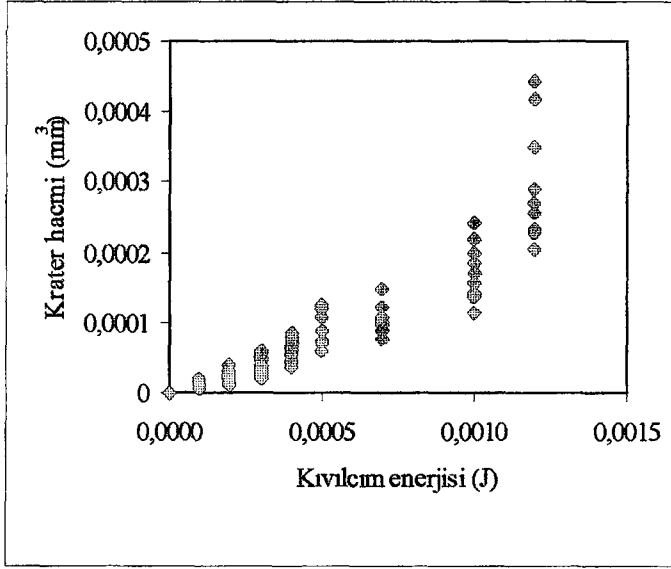
$$E_d = V_d \cdot I_d \cdot t_d \quad (4.2)$$

Kraterleri bir küre parçası olarak kabul edersek, krater hacmi (Gieck, 1971):

$$v_k = \frac{\pi h}{6} \left(\frac{3}{4} d^2 + h^2 \right) \quad (4.3)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Kıvılcım enerjisi (E_d) ile krater hacmi (v_k) denklem (4.2) ve (4.3) yardımıyla hesaplandı (Tablo 4.1). Krater hacmi ve kıvılcım enerjisi arasındaki ilişki Şekil 4.19'da verilmiştir.



Şekil 4.19. Kıvılcım enerjisine karşı krater hacmi.

Krater hacmi ve kıvılcım enerjisi arasında (4.4)'teki bağıntı elde edilmiştir.

$$v_k = 0.19E_d \quad (4.4)$$

ve korelasyon katsayısı

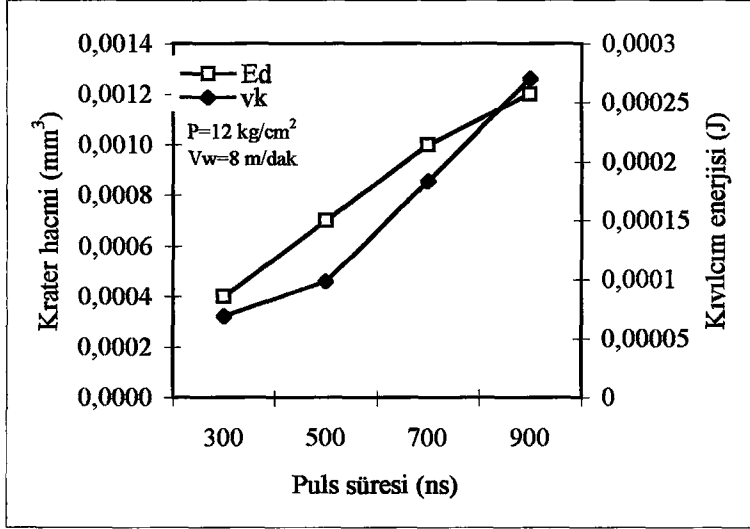
$$r=0.8851$$

şeklinde elde edildi. Denklem (4.2), denklem (4.4)'de yerine konulur ve yeniden düzenlenirse krater hacmi;

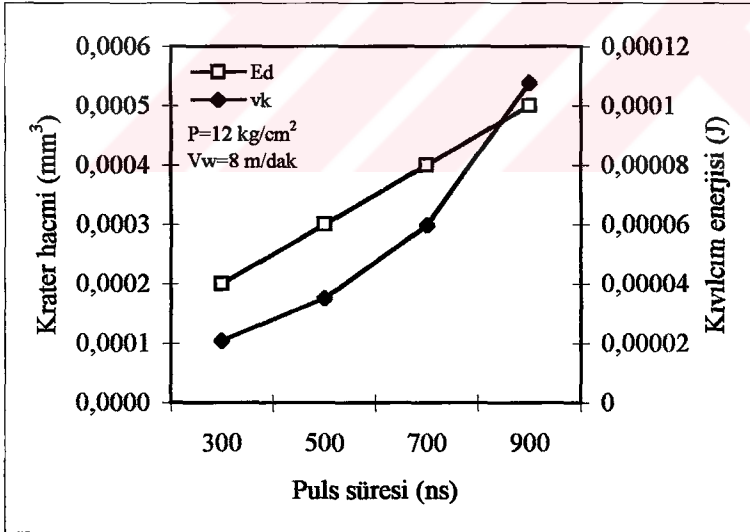
$$v_k = 0.19(V_d \cdot I_d \cdot t_d) \quad (4.5)$$

şeklinde elde edilir. Elde edilen (4.5) nolu denkleme göre puls süresinin artmasıyla kıvılcım enerjisi ve dolayısıyla krater hacmi artmaktadır. Bu durum Şekil 4.20'den Şekil 4.22'ye kadar olan grafiklerden de açık bir şekilde görülmektedir. Kesin ve sabit bir k değerinin bulunamamasının nedeni, değişik puls sürelerinde ergimiş metalin tel yönündeki ısı transferinin değişimi ve oluşan plazma kanalının krater üzerinde oluşturduğu basıncın değişimi nedeniyle kraterden uzaklaşan metalin orantısallığının

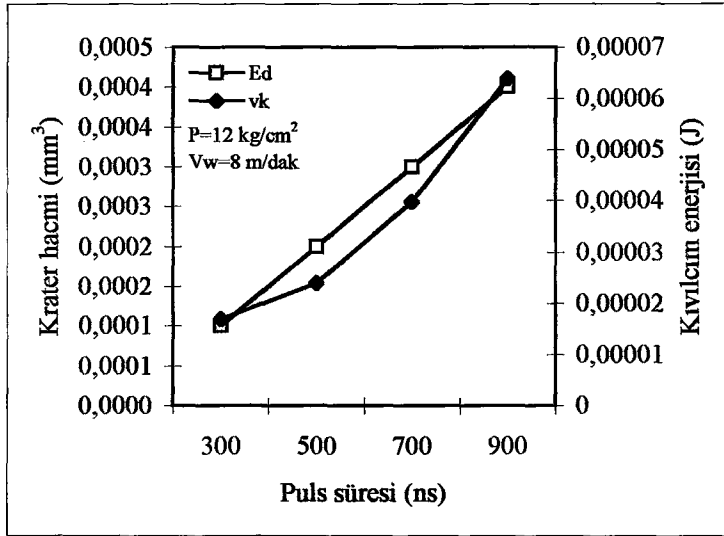
bozulmasıdır. Yinede değişik gerilim koşullarında ve farklı puls sürelerinde E_d iler v_k arasındaki tutarlı değişim belirgindir.



Şekil 4.20. Puls süresi ile kıvılcım enerjisi ve krater hacminin değişimi ($V=270$ V)



Şekil 4.21. Puls süresi ile kıvılcım enerjisi ve krater hacminin değişimi ($V=100$ V)



Şekil 4.22. Puls süresi ile kıvılcım enerjisi ve krater hacminin değişimi (V=80 V)

4.1.2. Tel İlerleme Hızının Krater Boyutlarına Etkisi

Şekil 4.1'den Şekil 4.18'e kadar olan grafikler incelendiğinde, tel ilerleme hızı arttıkça teldeki kraterlerin çap ve derinliğinin de buna bağlı olarak arttığı görülmektedir.

Tel ilerleme hızının artmasıyla krater boyutlarında artışın sebeplerinden biri şöyle izah edilebilir: Deşarj esnasında tel ilerledikçe plazma kanalı belirli bir miktar yol alacaktır. Bu ise krater boyutlarını arttıracaktır. Yani telin daha uzun bir kısmı plazma kanalının karşısına geçecektir. Tel V_w hızıyla ilerlerken, t_d puls süresinde aldığı yol:

$$S_d = V_w \cdot t_d \quad (4.6)$$

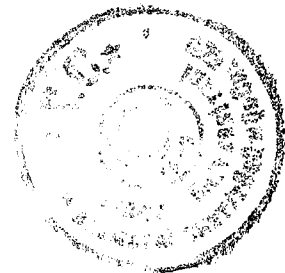
denklemleriyle elde edilir. Denklem (4.6) yardımıyla kullanılan deşarj süreleri boyunca alınan yol Tablo 4.2'de verilmiştir. Tablo 4.2'de elde edilen sonuçlar göstermektedir ki, sabit puls süreleri için tel ilerleme hızı arttıkça deşarj sırasında alınan yol da artacaktır. Çalışmada krater boyutlarındaki büyümenin alınan yoldan daha büyük olduğu görülmektedir. Bu da krater boyutlarındaki büyümeye telin ilerlemesinin dışında başka etkilerin de sebep olduğunu göstermektedir. Denklem (4.6)'ya göre tüm gerilim değerleri için eşit çıkmaktadır. Halbuki telin hiç ilerlemediğini düşünürsek bile değişik gerilmelerde ve akımda değişik krater boyutları elde edilecektir.

Tablo 4.2. Bir deşarj boyunca alınan yol

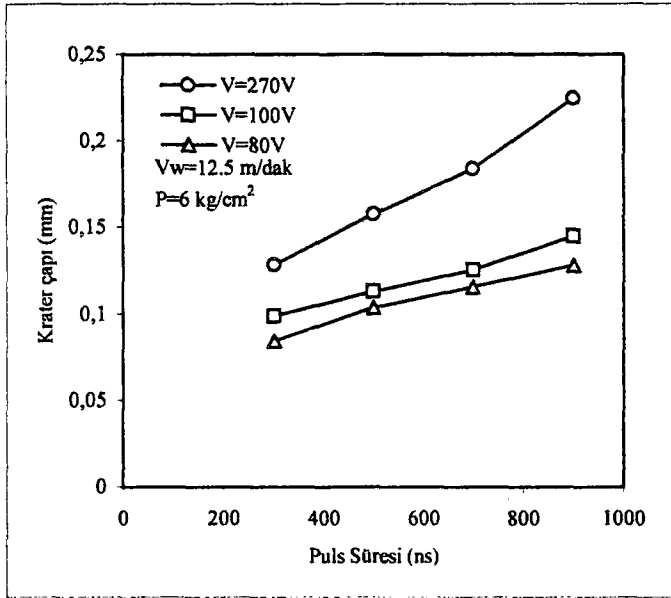
Puls süresi (ns)	Tel ilerleme hızı (m/dak)	Deşarj sırasında alınan yol (mm) $\times 10^{-4}$
300	5	0.0150
500	5	0.0250
700	5	0.0350
900	5	0.0450
300	8	0.0240
500	8	0.0400
700	8	0.0560
900	8	0.0720
300	12.5	0.0375
500	12.5	0.0625
700	12.5	0.0875
900	12.5	0.1125

Banerjee ve arkadaşları (1993) ve (1997), tel ilerleme hızı arttıkça tel ekseninde boyuna sıcaklık dağılımındaki artışın ihmal edilebilecek kadar küçük ve dolayısıyla tel malzemesinin erime oranında önemli bir değişim olmayacağını belirtmişlerdir. Daha sonra sunulacak varyans analizi sonucunda tel ilerleme hızının krater boyutlarına etkisinin puls süresi ve gerilimin etkisinden çok daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4).

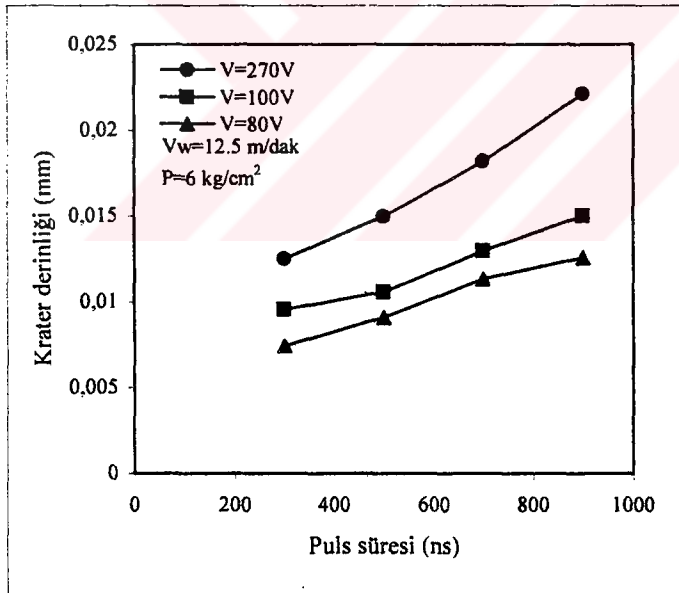
Sodick (1998), kaba kesme için tel ilerleme hızının artırılmasını önermiştir. Sodick (1998)'e göre, kaba kesme işleminde; iş parçası malzemesi hızlı işlenirken, tel büyük gerilmeler altında kalmaktadır. Bu da tel üzerinde karıncalanma (pitting) ve tel çapının azalması ile sonuçlanır.



4.1.3. Gerilimin Krater Boyutlarına Etkisi



Şekil 4.23. Krater çapının gerilim ve puls süresine göre değişimi



Şekil 4.24. Krater derinliğinin gerilim ve puls süresine göre değişimi

Şekil 4.23 ve 4.24'teki grafikler incelendiğinde, gerilim değerinin artması ile krater boyutlarında artma olduğu görülmektedir. Gerilimin artması daha büyük puls enerjisi üretimine sebep olur (Sodick 1998). Elde edilen (4.5) nolu denkleme göre gerilim değerinin artması ile puls enerjisi ve dolayısıyla krater hacmi artmaktadır.

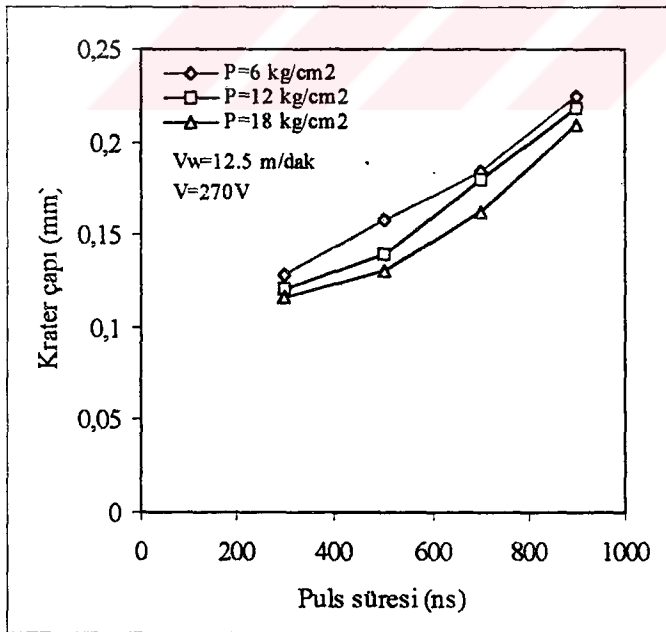


Gerilim değeri artmasıyla deşarj kanalı yarıçapı büyümektedir. Ayrıca, Banerjee ve arkadaşları (1997), gerilim artması ile ısıdan etkilenen bölgenin genişliğinin ve krater hacminin arttığını belirtmişlerdir.

4.1.4. Dielektrik Sıvı Püskürtme Basıncının Krater Boyutlarına Etkisi

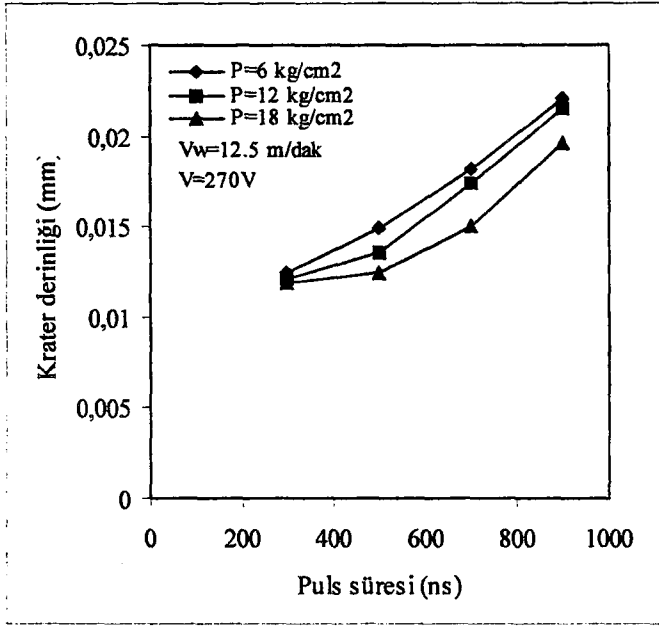
Şekil 4.25 ve 4.26'daki grafikler incelendiğinde, dielektrik sıvı püskürtme basıncının artması ile krater boyutlarında bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Püskürtme basıncı arttıkça, krater bölgesinin ve tel gövdesinin hızlı soğuması gerçekleşir. Bu ise, ergime kraterinde daha az hacimde malzemenin ergimesine neden olacak ve dolayısıyla kraterden uzaklaştırılacak malzeme miktarı da az olacaktır. Dalma tipi tel erozyon ile kesmede tel erozyona nazaran krater boyutlarının genelde büyük olmasının sebebi, dielektrik sirkülasyonunun yavaş ve dielektrik sıvıların suya nazaran daha az soğutucu nitelikte olmasıdır (Çoğun ve Erden 1987).

Dielektrik sıvı püskürtme basıncının krater boyutlarına etkisi, puls süresi, gerilim ve tel ilerleme hızının etkisinden daha düşüktür (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4).



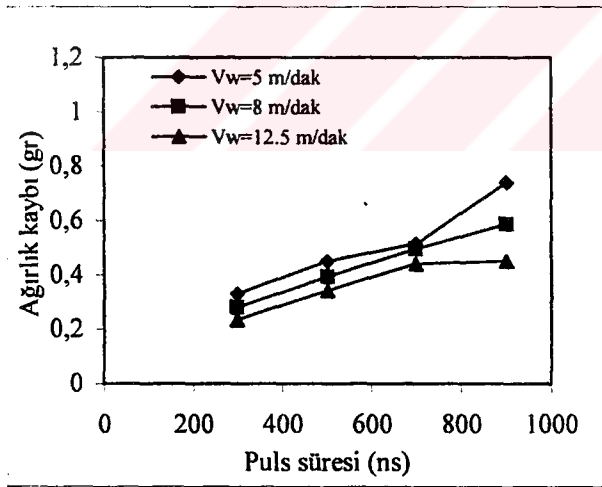
Şekil 4.25. Krater çapının dielektrik sıvı basıncı püskürtme ve puls süresi ile değişimi



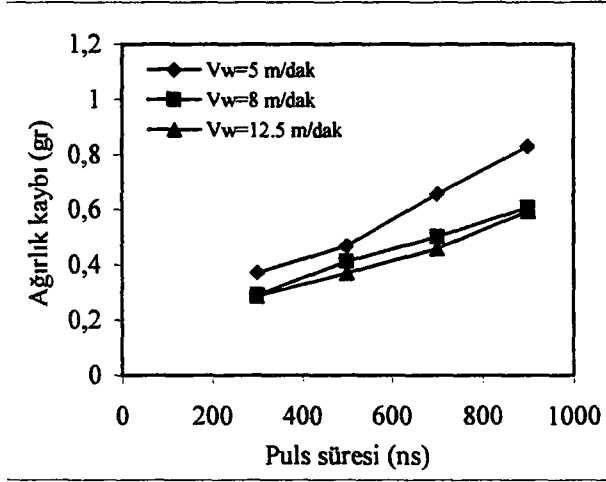


Şekil 4.26. Krater derinliğinin dielektrik sıvı püskürtme basıncı ve puls süresi ile değişimi

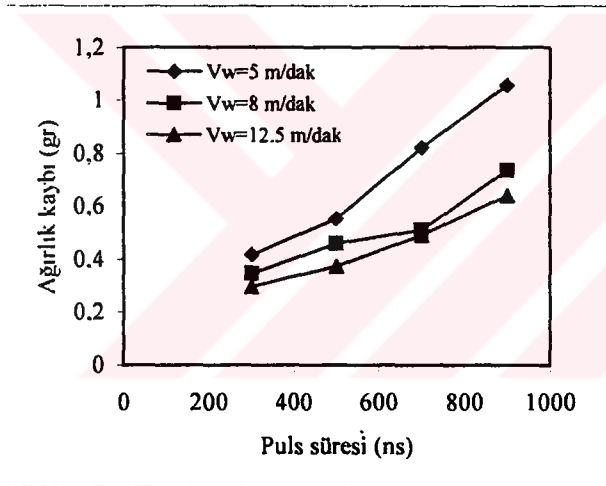
4.2. Teldeki Ağırlık Kaybının İncelenmesi



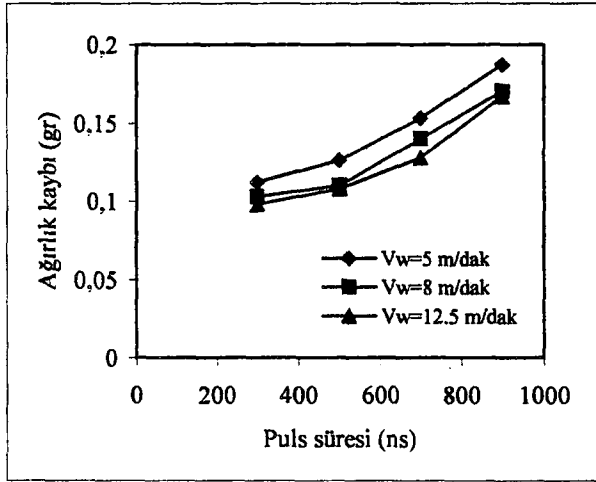
Şekil 4.27. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)



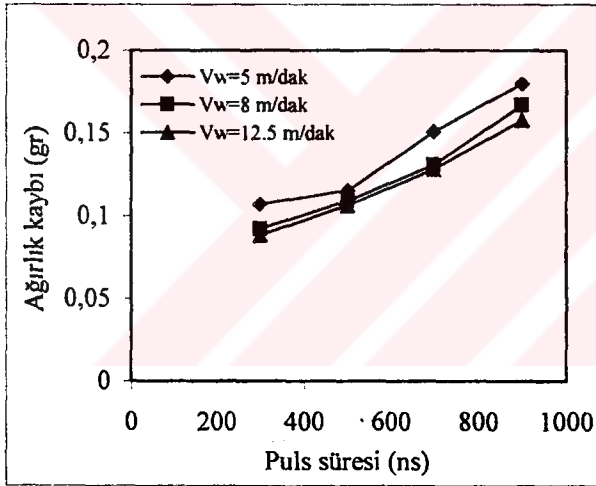
Şekil 4.28. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)



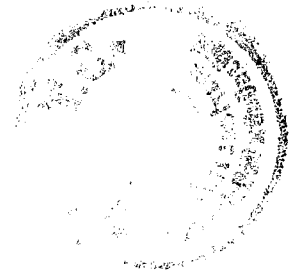
Şekil 4.29. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)

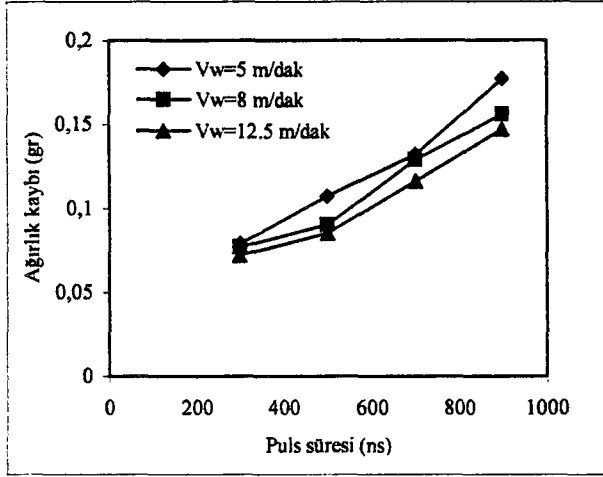


Şekil 4.30. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)

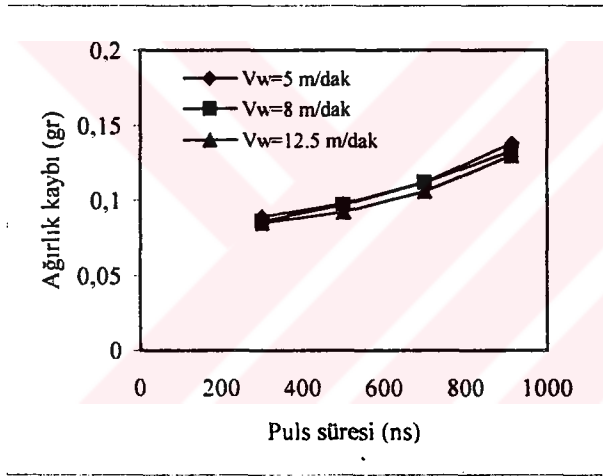


Şekil 4.31. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)



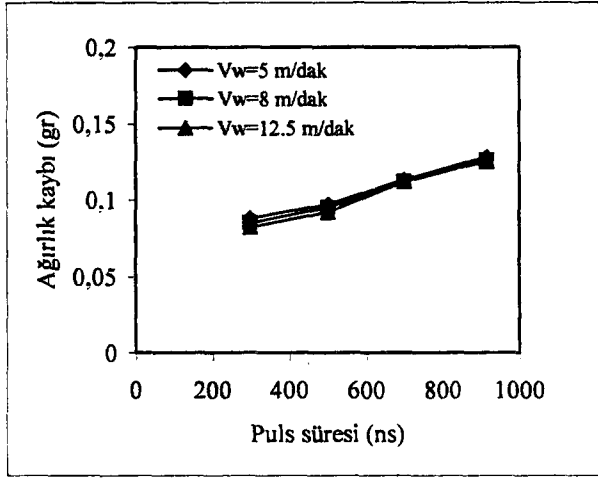


Şekil 4.32. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=100 \text{ V}$)

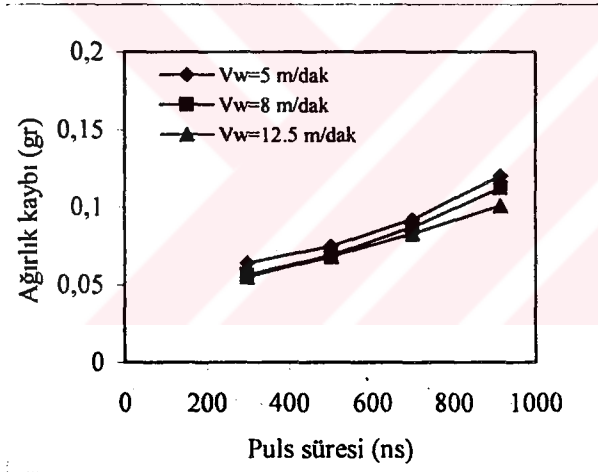


Şekil 4.33. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)





Şekil 4.34. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)



Şekil 4.35. Teldeki ağırlık kaybının puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

4.2.1. Puls Süresinin Telin Ağırlık Kaybına Etkisi

Şekil 4.27'den Şekil 4.35'e kadar telin ağırlık kaybına ait grafikler incelendiğinde, teldeki en büyük ağırlık kaybı; 270 volt gerilim, 5 m/dak tel ilerleme hızı, 18 kg/cm^2 dielektrik sıvı püskürtme basıncı ve 900 ns puls süresi neticesinde elde

edilirken, en küçük ağırlık kaybı ise 80 volt gerilim, 12.5 m/dak tel ilerleme hızı, 18 kg/cm² dielektrik sıvı püskürtme basıncı ve 300 ns puls süresi neticesinde elde edilmiştir. 270 volt gerilim, 5 m/dak tel ilerleme hızı, 18 kg/cm² dielektrik sıvı püskürtme basıncı ve 900 ns puls süresi neticesinde 1.057 gr'lık bir ağırlık kaybı meydana gelirken; 80 volt gerilim, 12.5 m/dak tel ilerleme hızı, 18 kg/cm² dielektrik sıvı püskürtme basıncı ve 300 ns puls süresi neticesinde ise 0.055 gr olarak meydana gelmiştir.

Grafikler incelendiğinde, puls süresi arttıkça teldeki ağırlık kaybının da arttığı görülmektedir. Puls süresinin artması denklem (4.5)'den de görüleceği üzere krater hacmini artırmaktadır. Dolayısıyla, telin ağırlık kaybı da artmıştır.

4.2.2. Tel İlerleme Hızının Telin Ağırlık Kaybına Etkisi

Şekil 4.27'den Şekil 4.35'e kadar olan grafikler incelendiğinde, tel ilerleme hızı arttıkça teldeki ağırlık kaybının azaldığı görülmektedir. Tel ilerleme hızı arttıkça teldeki kraterlerin boyutları artmaktadır. Fakat tel ilerleme hızındaki artıştan dolayı birim boydaki tel üzerinde daha az krater oluşacaktır. Telde oluşan kraterlerin sayısı:

$$n_k = \frac{t}{t_g + t_d + t_s} \quad (4.7)$$

denklemlerle elde edilebilir. Burada t_g puls gecikme (iyonizasyon) süresi, t_d deşarj (puls) süresi, t_s puls ara süresi ve t ise S uzunluğundaki telin V_w hızıyla ilerlerken geçen süre olup şu şekilde bulunur:

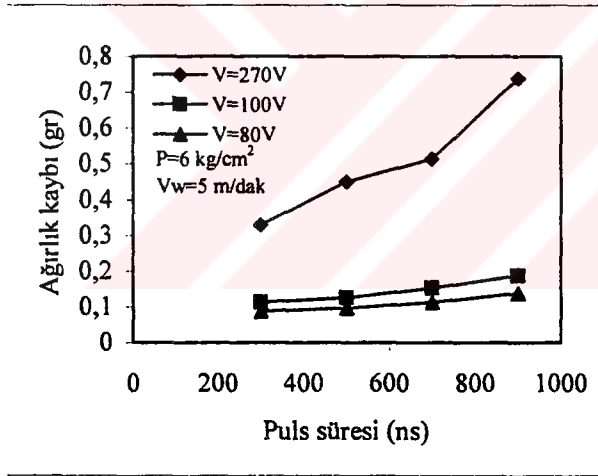
$$t = \frac{S}{V_w} \quad (4.8)$$

Çoğun ve Savsar (1990) tarafından yapılan çalışmada sunulan deneysel verilerden gecikme süresinin puls ve puls ara süresinin toplamının yaklaşık olarak 1/10 katı olduğu anlaşılmaktadır. Denklem (4.8), denklem (4.7)'de yerine konursa tel üzerinde oluşacak krater sayısı:

$$n_k = \frac{S}{1.1(t_d + t_s).V_w} \quad (4.9)$$

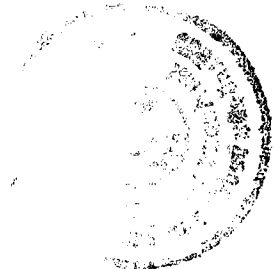
şeklinde elde edilir. Denklem (4.9)'a göre tel ilerleme hızı V_w arttıkça telde oluşan kraterlerin sayısı azalmaktadır. Azalan krater sayısı ise daha az ağırlık kaybı demektir. Elde edilen deneysel sonuçlarla teorik yaklaşım (denklem (4.9)) tutarlıdır.

4.2.3. Gerilimin Telin Ağırlık Kaybına Etkisi

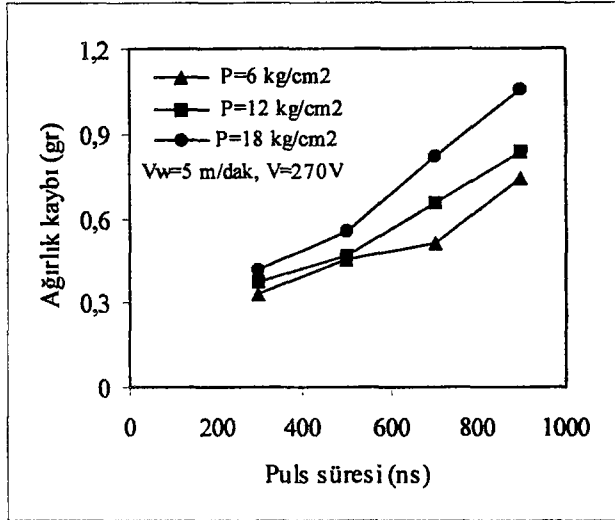


Şekil 4.36. Teldeki ağırlık kaybının gerilim ve puls süresine göre değişimi

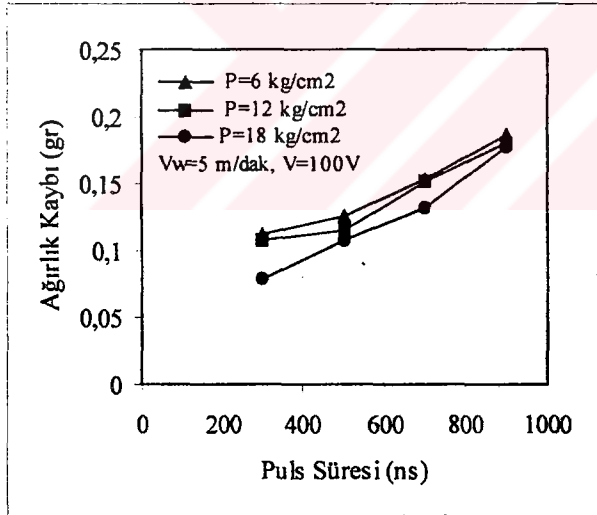
Gerilim değerinin artması ile telin ağırlık kaybında bir artma olduğu tespit edilmiştir. Gerilim değerinin artması denklem (4.5)'de görüldüğü gibi daha büyük enerji üretimine ve krater hacminin artmasına sebep olur. Artan krater hacminden ötürü, telin ağırlık kaybı artmıştır.



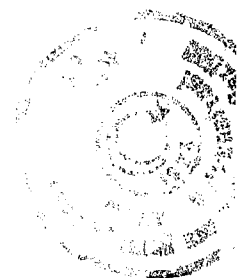
4.2.4. Dielektrik Sıvı Püskürtme Basıncının Telin Ağırlık Kaybına Etkisi

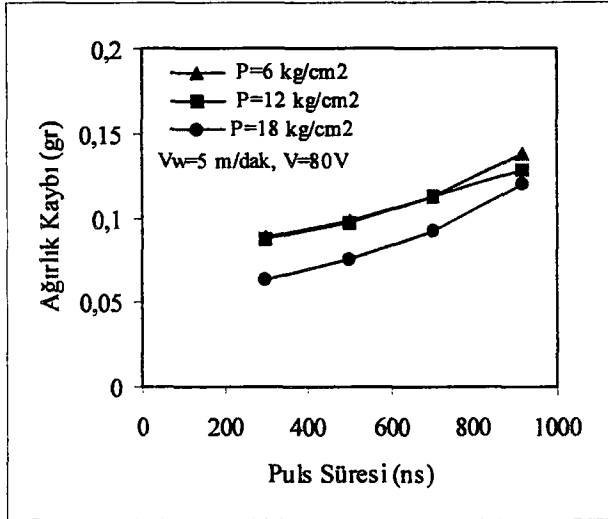


Şekil 4.37. Teldeki ağırlık kaybının basınç ve puls süresine göre değişimi
(V_w=5 m/dak, V=270 V)



Şekil 4.38. Teldeki ağırlık kaybının basınç ve puls süresine göre değişimi
(V_w=5 m/dak, V=100 V)





Şekil 4.39. Teldeki ağırlık kaybının basınç ve puls süresine göre değişimi
($V_w=5$ m/dak, $V=80$ V)

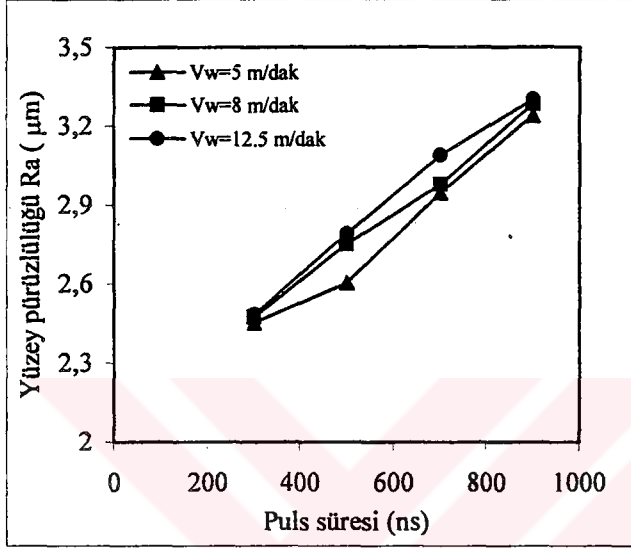
Şekil 4.37'den Şekil 4.39'a kadar olan grafik incelendiğinde, dielektrik sıvı püskürtme basıncının artması ile 80 ve 100 volt gerilim değerlerinde telin ağırlık kaybı azalmıştır. Püskürtme basıncı arttıkça, krater boyutları ve dolayısıyla krater hacmi azalmaktadır. Krater hacminin azalması ise telin ağırlık kaybını küçültecektir.

270 volt gerilimde ise bu durum tam tersine olarak dielektrik sıvı basıncının artması ile ağırlık kaybı da artmıştır. Bu durum şöyle izah edilebilir. 270 volt gerilimde tel ve iş parçası kraterlerinden 80 ve 100 volta göre daha fazla malzeme eriyecektir. Bu ise kesme bölgesinde daha fazla eriyen malzeme demektir. Teorik olarak iyonize olan sıvının kesme bölgesini boşaltabilmesi için belirli bir zamana ihtiyaç vardır. Eğer dielektrik sıvı ne kadar hızlı bir şekilde kıvılcım bölgesine enjekte edilirse iyonizasyon (gecikme) süresi o kadar kısılacaktır (Eker, 1997). İyonizasyon için gerekli olan bu sürenin kısılması denklem (4.7) ye göre tel üzerinde daha fazla krater oluşması demektir. Dolayısıyla dielektrik sıvının artması ile tel üzerinde oluşan krater sayısı artacağından telin ağırlık kaybı da artmıştır.

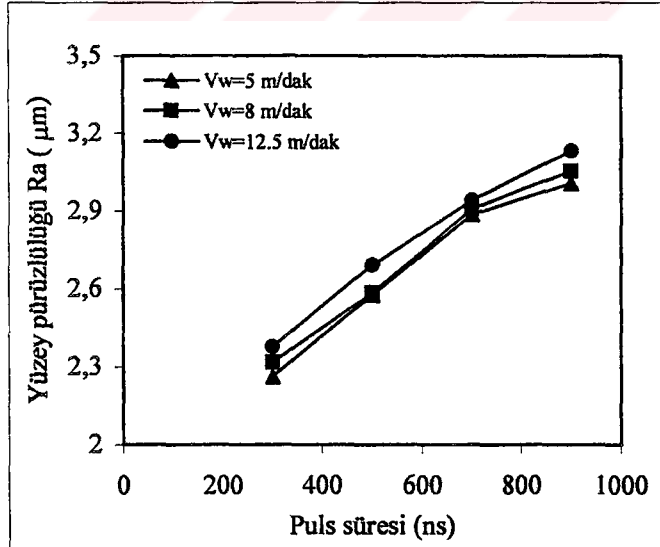


4.3. İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğünün İncelenmesi

İş parçası yüzeyindeki kraterlerden kopan/ayrılan bu parçacıkların büyüklüğü yüzey pürüzlülüğünü etkilemektedir. Kesme parametrelerine bağlı olarak, iş parçası yüzeyinden ayrılan bu parçacıkların büyüklüğü değişmektedir.

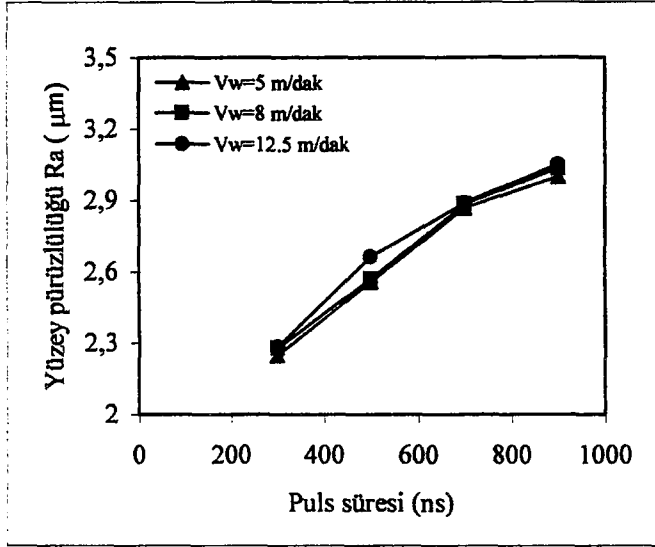


Şekil 4.40. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=6 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)

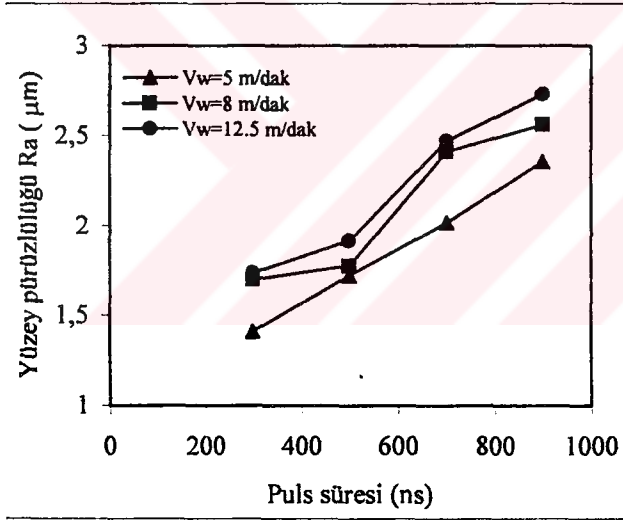


Şekil 4.41. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=12 \text{ kg/cm}^2$, $V=270 \text{ V}$)



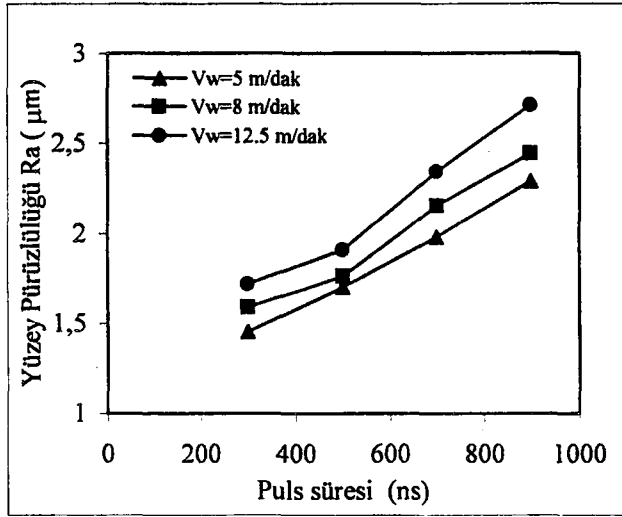


Şekil 4.42. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=18$ kg/cm², $V=270$ V)

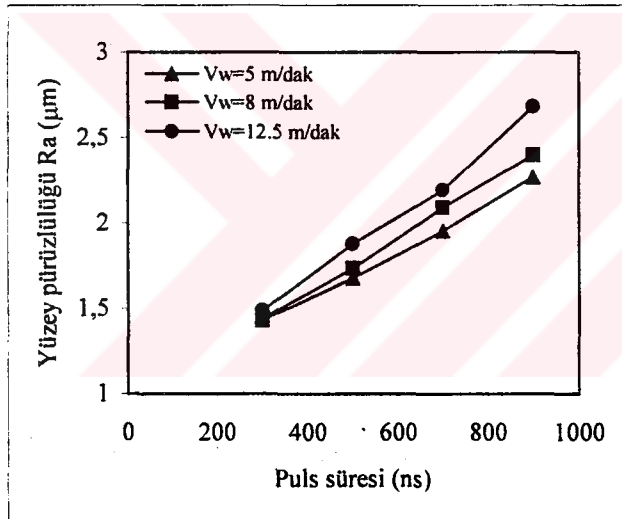


Şekil 4.43. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=6$ kg/cm², $V=100$ V)



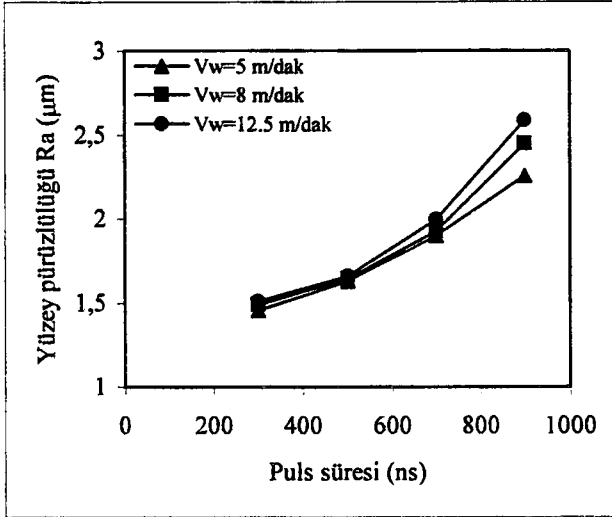


Şekil 4.44. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
(P=12 kg/cm², V=100 V)

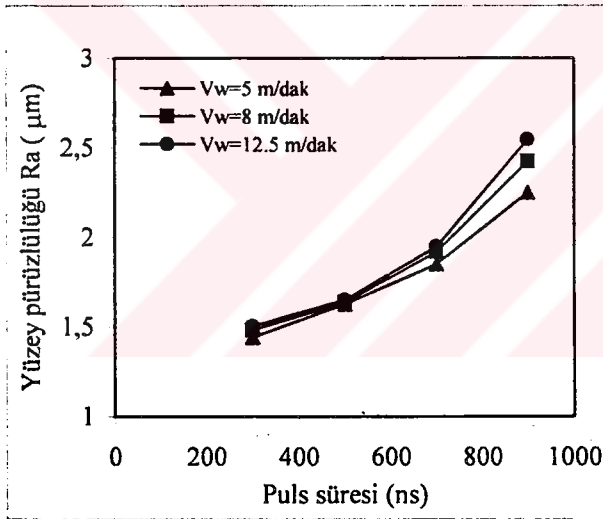


Şekil 4.45. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
(P=18 kg/cm², V=100 V)



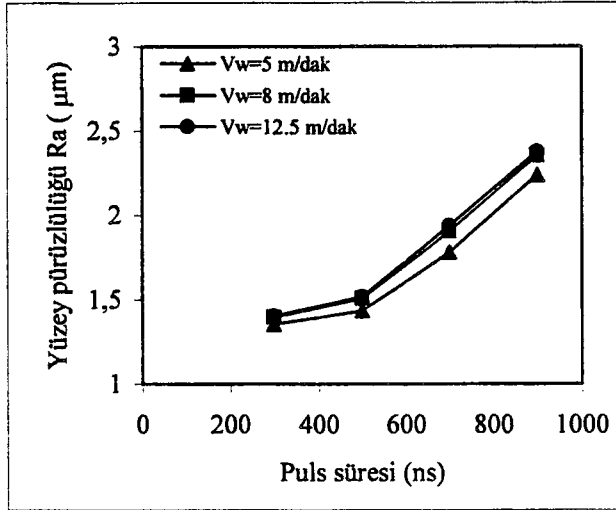


Şekil 4.46. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
(P=6 kg/cm², V=80 V)



Şekil 4.47. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
(P=12 kg/cm², V=80 V)





Şekil 4.48. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün puls süresi ve tel ilerleme hızı ile değişimi
($P=18 \text{ kg/cm}^2$, $V=80 \text{ V}$)

Şekil 4.40'tan Şekil 4.48'e kadar olan grafikler incelendiğinde, en büyük iş parçası yüzey pürüzlülüğü değeri 270 volt gerilim, 12.5 m/dak tel ilerleme hızı, 6 kg/cm^2 dielektrik sıvı püskürtme basıncı ve 900 ns puls süresi neticesinde elde edilirken, en küçük iş parçası yüzey pürüzlülüğü ise 80 volt gerilim, 5 m/dak tel ilerleme hızı, 18 kg/cm^2 dielektrik sıvı püskürtme basıncı ve 300 ns puls süresi neticesinde elde edilmiştir. En büyük yüzey pürüzlülüğü 3.30 μm iken, en küçük yüzey pürüzlülüğü ise 1.35 μm olarak ölçülmüştür.

4.3.1. Puls Süresinin İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Puls süresi arttıkça iş parçası yüzey pürüzlülüğünün de arttığı görülmektedir (Şekil 4.40 - Şekil 4.48). Puls süresinin artmasıyla iş parçası yüzey pürüzlülüğünün arttığı bir çok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Scott vd. 1991, Rajurkar ve Wang 1993, Tarng vd. 1995, Liao vd. 1997, Spedding vd Wang 1997a ve 1997b, Sodick 1998, Hang vd. 1999, Rozenek vd. 2001).

İş parçasından kopan parçacıkların oluşturduğu kraterin boyutu kıvılcım enerjisine bağlıdır ve krater boyutu puls süresi ile orantılıdır (ASM 1989). Düşük enerji deşarjları, daha küçük kraterler oluşturur ve iyi bir yüzey pürüzlülüğü için gereklidir (Doyle vd. 1985). Kesme hızı, puls süresi ile artar ancak daha kötü bir yüzey elde edilir

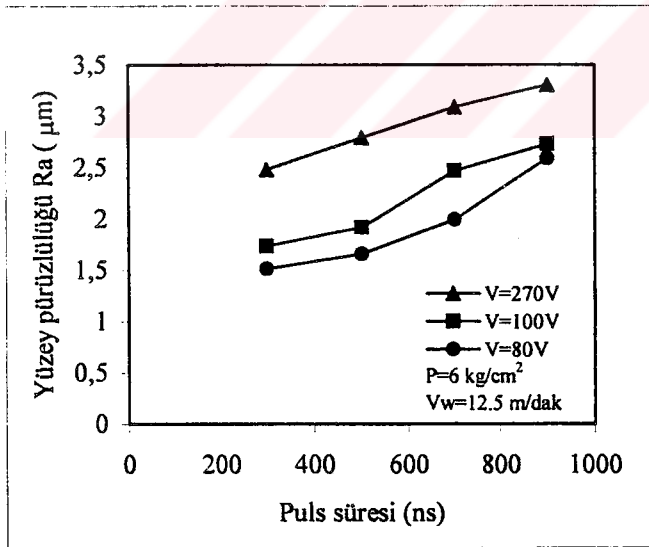


(Amstead vd. 1987, Olivo 1990). Denklem (4.5)'e göre daha büyük puls süresi daha büyük enerji üretimi demektir. Bu nedenle puls süresinin artması (daha büyük enerji) iş parçası yüzeyinde daha büyük krater oluşturacağından dolayı iş parçasının yüzey pürüzlülüğünü artırmaktadır.

4.3.2. Tel İlerleme Hızının İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

Şekil 4.40'tan Şekil 4.48'e kadar olan grafikler incelendiğinde, tel ilerleme hızı arttıkça iş parçası yüzey pürüzlülüğü de artmaktadır. Tel ilerleme hızının artmasıyla, iş parçası yüzey pürüzlülüğünün arttığı bir çok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Scott vd. 1991, Rajurkar ve Wang 1993, Liao vd. 1997, Spedding ve Wang 1997a ve 1997b). Sodick (1998), kaba bir yüzey kesme için tel ilerleme hızının artırılmasını ve iyi bir yüzey için ise daha yavaş bir tel ilerleme hızı önermiştir.

4.3.3. Gerilimin İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi

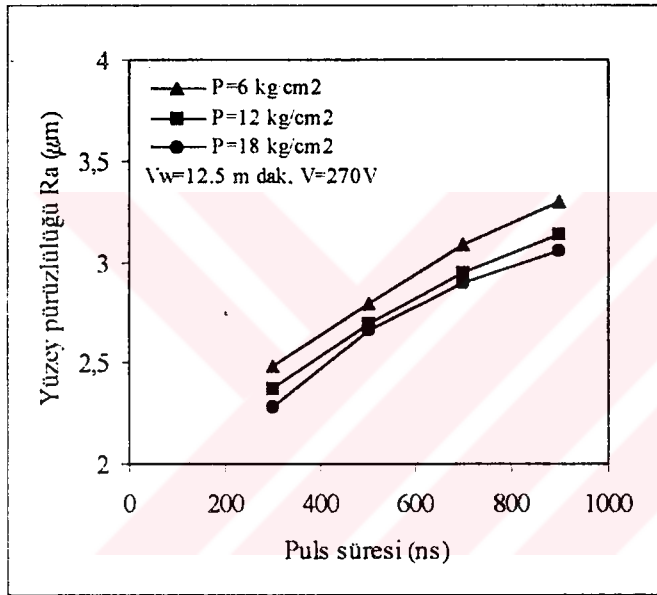


Şekil 4.49. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün gerilim ve puls süresine göre değişimi

Şekil 4.49'da verilen grafik incelendiğinde, gerilim değerinin artması ile iş parçasının yüzey pürüzlülüğünde bir artma olduğu tespit edilmiştir. Gerilim değerinin

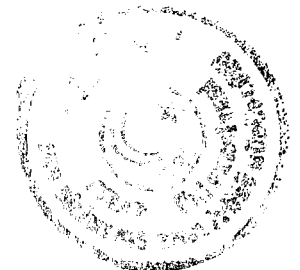
artmasıyla iş parçası yüzey pürüzlülüğünün arttığı bir çok araştırmacı tarafından belirtilmiştir (Scott vd. 1991, Rajurkar ve Wang 1993, Tarng vd. 1995, Liao vd. 1997, Sodick 1998, Rozenek vd. 2001). Denklem (4.5)'e göre daha büyük gerilim daha büyük enerji üretimi demektir. Bu nedenle daha büyük enerji iş parçası yüzeyinde daha büyük krater oluşturacağından, gerilimin artmasıyla iş parçasının yüzey pürüzlülüğü de artırmaktadır.

4.3.4. Dielektrik Sıvı Püskürtme Basıncının İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisi



Şekil 4.50. İş parçası yüzey pürüzlülüğünün basınç ve puls süresine göre değişimi

Şekil 4.50'de verilen grafik incelendiğinde, dielektrik sıvı püskürtme basıncının artması ile iş parçası yüzey pürüzlülüğünde bir azalma olduğu tespit edilmiştir. Bir çok araştırmacı, dielektrik sıvı püskürtme basıncının artması ile iş parçası yüzey pürüzlülüğünün azaldığını belirtmiştir (Scott vd. 1991, Rajurkar ve Wang 1993, Liao vd. 1997).



5. DENEY SONUÇLARININ İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

Bu çalışmada, deney sonuçlarının istatistiksel analizinde varyans analizi metodu ve F testi kullanılmıştır. Varyans analizi (ANOVA-analysis of variance) metodu, deney sonuçlarını yorumlamanın bir yolu olarak 1930 yılında Ronald Fisher tarafından geliştirilmiştir (Ross 1996). Varyans analizi, işlem parametrelerinin istatistiksel olarak önemli olup olmadığına bakmak için yapılır. Bu metot, işlem parametrelerinin optimum kombinasyonunu ve performans karakteristikleri üzerinde bu parametrelerin etkisini belirlemek için kullanılabilir (Lin vd. 2000). F testi, işlem parametrelerinin performans karakteristikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olup olmadığını belirlemek amacıyla kullanılmaktadır. Genellikle F değeri daha büyük olduğu zaman, işlem parametresi değiştirildiğinde performans karakteristikleri üzerinde önemli bir etki yapar (Liao 1997, Lin 2000).

Varyans analizinde deneysel değerler ile arzu edilen değerler arasındaki sapmayı hesaplamak için bir kayıp fonksiyonu (loss function) kullanılır. Bu kayıp fonksiyonu neticesinde elde edilen veriler daha sonra arzu edilen değerden sapan performans karakteristiklerini belirlemek için bir dönüşüm yapılır. Bu dönüşüm, sinyal-gürültü oranı S/N (signal-to-noise ratio) olarak adlandırılır ve η ile gösterilir. S/N oranının analizinde, çeşitli kayıp fonksiyonları vardır. Bu kayıp fonksiyonları ve varyans analizinde kullanılan diğer hesaplamalar hakkında bilgiler detaylı bir şekilde Ek-2'de verilmiştir. Bu çalışmada teldeki krater boyutları, telin ağırlık kaybı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünün varyans analizinde "daha düşük daha iyidir" (LB, lower is better) kayıp fonksiyonu kullanıldı. LB için kayıp fonksiyonu aşağıdaki şekildedir:

$$L_{ij} = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r y_i^2 \quad (5.1)$$

Burada r bir denemedeki testlerin sayısı y ise her bir gözlem için yanıttır. Bu kayıp fonksiyonu için S/N oranı ise:

$$S/N_{LB} = -10 \log(L_{ij}) \quad (5.2)$$



şeklinde ifade edilir.

Deney sonuçlarının S/N oranlarının tespitinde Tablo 5.1'de görülen faktörler ve seviyeleri kullanıldı. Bu çalışmada gerilim, puls süresi, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı olmak üzere dört kontrol faktörü bulunmaktadır. Çalışmada kullanılan herhangi bir kesme parametresinin değiştirilme sayısı seviyeyi, değişkenin aldığı değerde o seviyenin değerini gösterir. Örneğin bu çalışmada puls süresinin birinci seviyesi 300 ns, ikinci seviyesi 500 ns, üçüncü seviyesi 700 ns ve dördüncü seviyesi 900 ns olmak üzere toplam 4 seviyeli olarak seçilmiştir. Gerilim, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı basıncı ise 3 seviyeli olarak seçilmiştir.

Tablo 5.1. Kesme parametreleri ve seviyeleri.

Sembol	Kesme parametreleri	Birim	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
A	Puls süresi	ns	300	500	700	900
B	Gerilim	V	80	100	270	-
C	Tel ilerleme hızı	m/dak	5	8	12.5	-
D	Dielektrik basıncı	kg/cm ²	6	12	18	-

5.1. Teldeki Krater Boyutlarının İstatistiksel Analizi

Tablo 1'de verilen kesme parametrelerinin her bir seviyesine göre teldeki krater çapına ve derinliğine ait η değerleri Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'te verilmiştir. Kesme parametrelerinin her bir seviyesinin krater boyutları üzerindeki etkileri ise Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de görülmektedir. Şekildeki A1, A2, A3 ve A4 puls süresinin, B1, B2 ve B3 gerilimin, C1, C2 ve C3 tel ilerleme hızının ve D1, D2 ve D3 ise dielektrik sıvı basıncının kullanılan her bir seviyesini göstermektedir (Tablo 5.1).



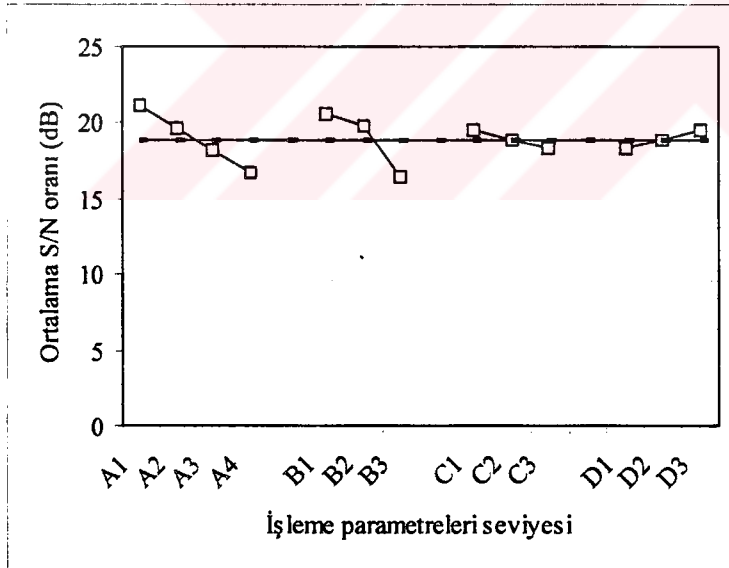
Tablo 5.2. Teldeki krater çapı için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (η değerleri).

Kesme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Puls süresi (A)	21.0837*	19.5976	18.1330	16.7624
Gerilim (B)	20.5449*	19.7232	16.4144	-
Tel ilerleme hızı (C)	19.5606*	18.8235	18.2984	-
Dielektrik basıncı (D)	18.3770	18.8379	19.4675*	-

Toplam ortalama S/N oranı= 18.8942 dB

*Optimum seviyeler

Tablo 5.2'de gösterilen herhangi bir parametre için optimum değer, o parametrenin tüm seviyeleri içerisinde elde edilen en büyük S/N değeridir. Optimum seviye ise bu çalışma için minimum krater boyutlarını elde etmek için kesme parametrelerinin seçilmesinin uygun görüldüğü değeridir.

**Şekil 5.1.** Teldeki krater çapına kesme parametrelerinin seviyelerinin etkisi.

Tablo 5.3. Teldeki krater derinliği için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (η değerleri).

Kesme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Puls süresi	41.7026*	40.2383	38.4612	37.0137
Gerilim	41.3168*	40.0282	36.7169	-
Tel ilerleme hızı	40.0588*	39.2938	38.7092	-
Dielektrik basıncı	38.7615	39.2608	40.0396*	-

Toplam ortalama S/N oranı=39.3540 dB

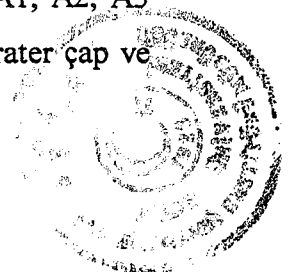
*Optimum seviyeler

Minimum yani optimum krater boyutları Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'ten de görüldüğü gibi 300 ns puls süresi, 80 volt gerilim, 5 m/dak tel ilerleme hızı ve 18 kg/cm² dielektrik sıvı püskürtme basıncı neticesinde elde edilmiştir. Bu sonuçlar deney sonuçları ile tutarlıdır.



Şekil 5.2. Teldeki krater derinliğine kesme parametrelerinin seviyelerinin etkisi.

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 teldeki kraterlerin derinlik ve çapı için S/N cevap grafiğidir. Daha büyük S/N oranları arzu edilen (daha düşük daha iyidir) krater çap ve derinliği değerlerini vermektedir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'deki puls süresini (A1, A2, A3 ve A4) dikkate alırsak puls süresi arttıkça S/N oranının küçülmesi teldeki krater çap ve



derinliğinin artması anlamına gelmektedir. Grafiklerdeki ortalama çizgisi, çalışmada kullanılan kesme parametrelerinin seviyeleri içerisinde elde edilen krater çap ve derinliğinin elde edileceği ortalama değerleri göstermektedir.

Teldeki krater boyutları için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 5.4 ve Tablo 5.5'te görülmektedir. Tabloda gösterilen F_{A0} değeri bir faktörün F testi değeri olup, faktörün F test değeri:

$$F_{A0} = \frac{V_A}{V_e} \quad (5.3)$$

ile hesaplanır. Burada V_A , faktör A'nın varyansı ve V_e ise hatanın varyansıdır. Bu F_{A0} değeri, istatistik kitaplarında bulunan F testi tablolarındaki parametrelerin serbestlik dereceleri kullanılarak okunan F değeri karşılaştırılır. Eğer bu değer tablodaki değerden büyükse yani:

$$F_{A0_{hesaplanan}} > F_{A0_{tablo}} \quad (5.4)$$

olması durumunda A faktörü önemlidir demektir. Yani, o kesme parametresinin (faktör) önemli bir etkisi olduğu aksi durumda etkisinin olmadığı sonucuna varılır.

Herhangi bir faktörün yüzde dağılımı (percent contribution), o faktörün karelerinin toplamının tüm faktörlerin karelerinin toplamına oran ile elde edilir. Yani:

$$P = \left[\frac{SS_A}{SS_T} \right] \times 100 \quad (5.5)$$

şeklindedir. Faktör A'nın karelerinin toplamı:

$$SS_A = \frac{\sum \eta_{Ai}^2}{N} - SS_m \quad (5.6)$$

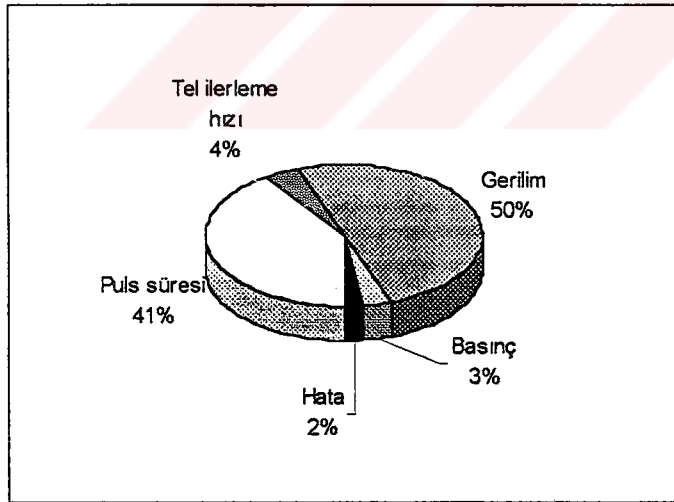
şeklindedir. Burada N herhangi bir A parametresinin seviye sayısı, η S/N oranı ve SS_m ise ortalamanın kareleri toplamıdır.



Bir istatistik anlayıştaki serbestlik derecesi f (degree of freedom), verilerden tahmin edilen bilginin her bir parçası olarak düşünülür. Bağımsız her bir çift için serbestlik derecesi 1'dir. Yani kullanılan faktörlerin seviye sayılarının bir eksiği serbestlik derecesini verir.

Tablo 5.4. Teldeki krater çapı için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (f)	Karelerin toplamı (SS_A)	Varyans (V_A)	F_{A0}	% Dağılım
Puls süresi	3	281.1482	93.7160	23.1938	40.63
Gerilim	2	344.2200	172.1100	42.5956	49.74
Tel ilerleme hızı	2	28.9444	14.4722	3.5817	4.18
Dielektrik basıncı	2	21.5750	10.7875	2.6698	3.12
Hata	4	16.1622	4.0405	-	2.33
Toplam	13	692.0499	-	-	100

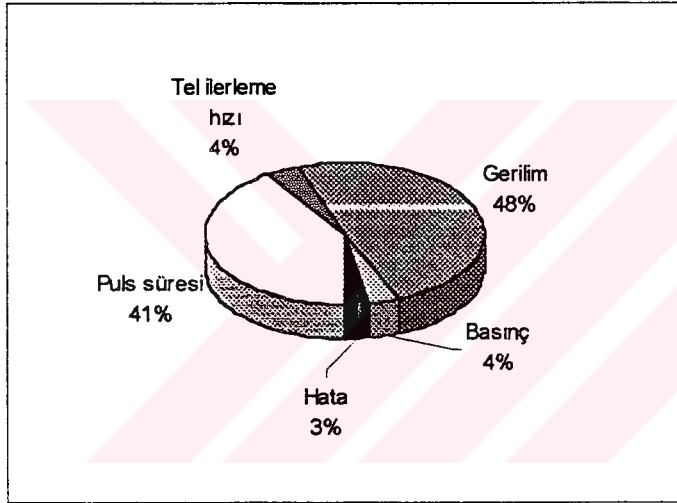


Şekil 5.3. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin krater çapına % olarak etkisi.



Tablo 5.5. Teldeki krater derinliği için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (<i>f</i>)	Karelerin toplamı (<i>SS_A</i>)	Varyans (<i>V_A</i>)	<i>F_{A0}</i>	% Dağılım
Puls süresi	3	339.4394	113.1464	19.4470	40.85
Gerilim	2	405.4230	202.7115	34.8409	48.79
Tel ilerleme hızı	2	32.9834	16.4917	2.8345	3.97
Dielektrik basıncı	2	29.8752	14.9376	2.5673	3.59
Hata	4	23.2727	5.8181	-	2.80
Toplam	13	830.9938	-	-	100



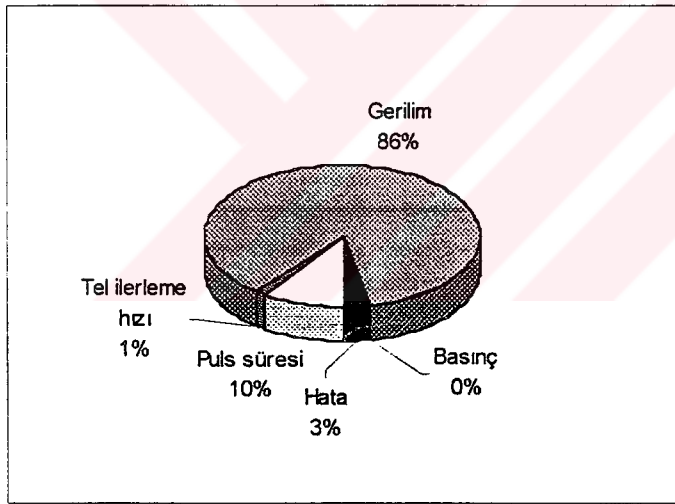
Şekil 5.4. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin krater derinliğine % olarak etkisi.

Şekil 5.3 ve Şekil 5.4'ten görüldüğü gibi krater boyutları üzerinde en büyük etkiyi gerilim gösterirken bunu sırasıyla, puls süresi, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı izlemektedir. Bu grafiklerden de görüleceği üzere krater boyutlarına gerilim ve puls süresinin etkisi önemli bir dereceye sahip iken tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncının etkisi oldukça düşük bir değerdedir. Ayrıca krater boyutları için deneysel hata oldukça düşük bir seviyededir. Tablo 5.4 ve Tablo 5.5'te hesaplanan bu F_{A0} değerine göre tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncının krater boyutlarına etkisinin önemsiz olduğu söylenebilir.

Telin ağırlık kaybına için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 5.7'de görülmektedir.

Tablo 5.7. Telin ağırlık kaybı için ANOVA sonuçları.

İşleme parametreleri	Serbestlik derecesi (f)	Karelerin toplamı (SS_A)	Varyans (V_A)	F_{A0}	% Dağılım
Puls süresi	3	442.5029	147.5009	4.6782	9.58
Gerilim	2	3985.7076	1992.8538	63.2068	86.28
Tel ilerleme hızı	2	51.4222	25.7111	0.8154	1.11
Dielektrik basıncı	2	13.5211	6.7605	0.2144	0.30
Hata	4	126.1164	31.5291	-	2.73
Toplam	13	4619.2704	-	-	100



Şekil 5.6. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin telin ağırlık kaybına % olarak etkisi.

Şekil 5.6'dan görüldüğü gibi telin ağırlık kaybı üzerinde en büyük etkiyi gerilim gösterirken bunu sırasıyla, puls süresi, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı izlemektedir. Şekil 5.6 görüleceği üzere telin ağırlık kaybına gerilim ve puls süresinin etkisi önemli bir dereceye sahip iken tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncının etkisi oldukça düşük bir değerdedir. Ayrıca telin ağırlık kaybı için deneysel hata oldukça düşük bir seviyededir. Tablo 5.7'deki F_{A0} değerinin



karşılaştırılması neticesinde tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncının telin ağırlık kaybına etkisinin önemsiz olduğu söylenebilir.

5.3. İş Parçası Yüzey Pürüzlülüğünün İstatistiksel Analizi

Tablo 1'de verilen kesme parametrelerinin her bir seviyesine göre iş parçası yüzey pürüzlülüğüne ait η değerleri Tablo 5.8'de verilmiştir. Kesme parametrelerinin her bir seviyesinin iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi ise Şekil 5.7'de görülmektedir.

Tablo 5.8. İş parçası yüzey pürüzlülüğü için her bir seviyedeki faktörlerin etkisi (η değerleri).

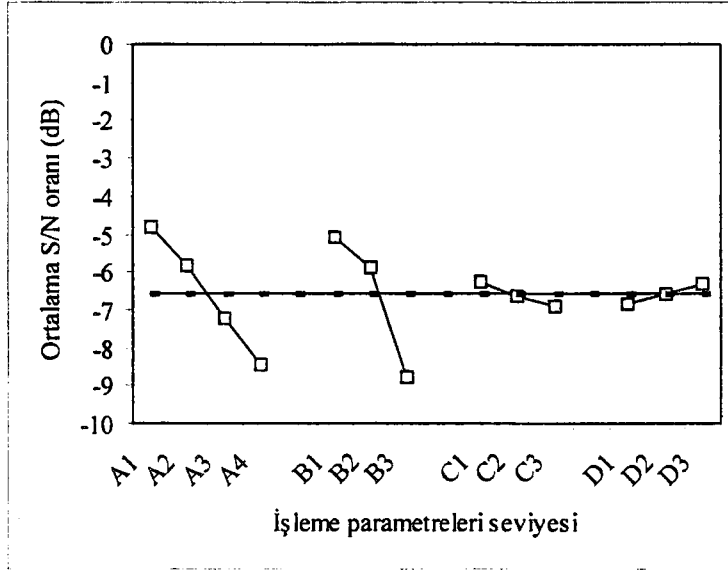
İşleme parametreleri	Ortalama S/N oranı (dB)			
	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3	Seviye 4
Puls süresi	-4.8206*	-5.8363	-7.2292	-8.4492
Gerilim	-5.0996*	-5.8781	-8.7737	-
Tel ilerleme hızı	-6.2397*	-6.6062	-6.9055	-
Dielektrik basıncı	-6.8610	-6.5943	-6.2960*	-

Toplam ortalama S/N oranı= -6.5838 dB

*Optimum seviyeler

Minimum iş parçası yüzey pürüzlülüğü Tablo 5.8'den de görüldüğü gibi 300 ns puls süresi, 80 volt gerilim, 5 m/dak tel ilerleme hızı ve 18 kg/cm² dielektrik sıvı püskürtme basıncı neticesinde elde edilmiştir. Bu sonuçlar deney sonuçları ile tutarlıdır.





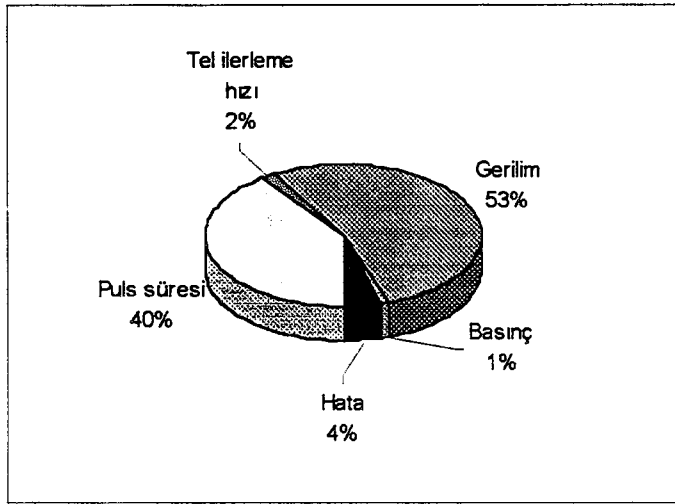
Şekil 5.7. İş parçası yüzey pürüzlülüğüne kesme parametrelerinin seviyelerinin etkisi.

İş parçası yüzey pürüzlülüğü için yapılan varyans analizinin sonuçları Tablo 5.9'da görülmektedir.

Tablo 5.9. İş parçası yüzey pürüzlülüğü için ANOVA sonuçları.

Kesme parametreleri	Serbestlik derecesi (f)	Karelerin toplamı (SS _A)	Varyans (V _A)	F _{A0}	% Dağılım
Puls süresi	3	204.2277	68.0759	12.8064	40.11
Gerilim	2	269.8759	134.9379	25.3846	53.01
Tel ilerleme hızı	2	8.0065	4.0032	0.7531	1.57
Dielektrik basıncı	2	5.7522	2.8761	0.5410	1.13
Hata	4	21.2629	5.3157	-	4.18
Toplam	13	509.1253	-	-	100





Şekil 5.8. Varyans analizi sonucuna göre parametrelerin iş parçası yüzey pürüzlülüğüne % olarak etkisi.

Şekil 5.8'den görüldüğü gibi iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkiyi gerilim gösterirken bunu sırasıyla, puls süresi, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı izlemektedir. Bu grafiklerden de görüleceği üzere iş parçası yüzey pürüzlülüğüne gerilim ve puls süresinin etkisi önemli bir dereceye sahip iken tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncının etkisi oldukça düşük bir değerdedir. Ayrıca iş parçası yüzey pürüzlülüğü için deneysel hata oldukça düşük bir seviyededir. Tablo 5.9'daki F_{A0} değerinin karşılaştırılması neticesinde tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncının iş parçası yüzey pürüzlülüğüne etkisinin önemsiz olduğu söylenebilir.

6. DENEY SONUÇLARININ MATEMATİKSEL MODELLENMESİ

Bu çalışmada, lineer olmayan regresyon analiz yöntemi yardımıyla teldeki krater boyutları, telin ağırlık kaybı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü ile ilgili deneysel sonuçların matematiksel modellemesi yapıldı. Regresyon analizi ile ilgili olarak yapılan hesaplamalara ait bilgiler Ek 3'te verilmiştir.

Matematiksel model oluşturulurken, teldeki krater derinliği ve çapının, telin ağırlık kaybının ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünün kontrol parametreleri olan puls süresi (on time), deşarj voltajı, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı ile ilişkisi saptanmaya çalışıldı.

6.1. Teldeki Krater Derinliği ve Çapının Matematiksel Modeli

WEDM telinde oluşan kraterin derinliği (h) ve çapına (d) ait matematiksel model elde edilirken; puls süresi (t_d), gerilim (V), tel ilerleme hızı (V_w), ve dielektrik sıvı püskürtme basıncına (P) bağlı olarak lineer olmayan regresyon modeli:

$$h, d = 10^{a_1} \cdot t_d^{a_2} \cdot V^{a_3} \cdot V_w^{a_4} \cdot P^{a_5} \quad (6.1)$$

güç fonksiyonu şeklinde ifade edilmiştir. Bu denklemin her iki tarafının logaritması alınarak lineer hale dönüştürülerek lineer çoklu regresyona göre çözüm yapıldı. Daha sonra krater derinliğine ait a katsayıları MATLAB Ver. 5.0'da hazırlanan bir program yardımıyla elde edildi. Hazırlanan program yardımıyla a katsayıları:

$$a_1 = -9.7062$$

$$a_2 = 0.4891$$

$$a_3 = 0.4197$$

$$a_4 = 0.1697$$

$$a_5 = -0.1285$$



ve korelasyon katsayısı;

$$r = 0.9792$$

şeklinde elde edildi. Bu katsayılar denklem (6.1) yerine konur ve düzenlenirse Telin krater derinliğine ait matematiksel model:

$$h = \frac{t_d^{0.4891} \cdot V^{0.4197} \cdot V_w^{0.1697}}{e^{9.7062} \cdot P^{0.1285}} \quad (6.2)$$

şekilde elde edilir. Benzer şekilde; krater çapına ait katsayılar ise:

$$a_1 = -6.9542$$

$$a_2 = 0.4469$$

$$a_3 = 0.3887$$

$$a_4 = 0.1588$$

$$a_5 = -0.1102$$

ve korelasyon katsayısı;

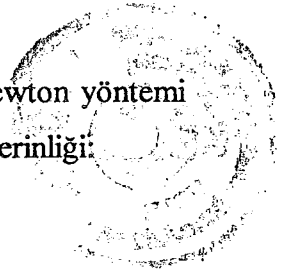
$$r = 0.9853$$

şeklinde elde edildi. Bu katsayılar denklem (6.1) yerine konur ve düzenlenirse telin krater çapına ait matematiksel model:

$$d = \frac{t_d^{0.4469} \cdot V^{0.3887} \cdot V_w^{0.1588}}{e^{6.9542} \cdot P^{0.1102}} \quad (6.3)$$

şekilde elde edilir.

Ayrıca krater derinliği ve çapına ait matematiksel model Gaus-Newton yöntemi kullanarak da elde edildi. Nonlinear Gaus-Newton yöntemine göre krater derinliği:



$$h = \frac{0.0001 t_d^{0.5061} \cdot V^{0.4055} \cdot V_w^{0.1697}}{P^{0.1172}} \quad (6.4)$$

ve korelasyon katsayısı

$$r = 0.98$$

şeklinde elde edildi. Krater çapı ise:

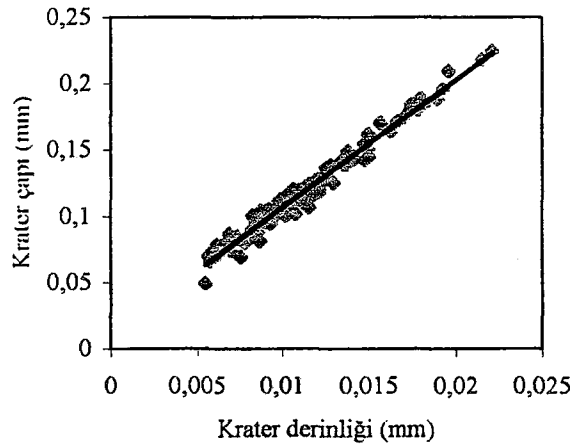
$$d = \frac{0.0008 t_d^{0.4673} \cdot V^{0.3884} \cdot V_w^{0.1467}}{P^{0.092}} \quad (6.5)$$

ve korelasyon katsayısı

$$r = 0.9860$$

şeklinde elde edildi. Görüldüğü gibi her iki yöntemde katsayılar ve hatalar birbirine çok yakındır. Korelasyon değerlerinin büyüklüğü ise formülasyonda öngörülen güç fonksiyonunun uygun bir model olduğunu göstermektedir.

Krater derinliği ve çapının birbirleri ile olan ilişkileri için Excel programında Şekil 6.1'deki grafik ve (6.6) nolu denklem elde edildi.



Şekil 6.1. Krater derinliğine karşı krater çapı.



Şekil 6.1'den krater çapı ile yüksekliği arasında şu bağıntı elde edildi:

$$d = 9.6236 h + 0.0101 \quad (6.6)$$

ve korelasyon katsayısı:

$$r=0.9879$$

şeklindedir. Yapılan analiz sonucunda krater derinliği ile krater çapı arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu görülmüştür.

6.2. Telin Ağırlık Kaybının Matematiksel Modeli

Puls süresi, deşarj voltajı, tel ilerleme hızı, ve dielektrik sıvı püskürtme basıncına bağlı olarak iş parçası telin ağırlık kaybına ait matematiksel model:

$$W_l = 10^{a_1} \cdot t_d^{a_2} \cdot V^{a_3} \cdot V_w^{a_4} \cdot P^{a_5} \quad (6.7)$$

güç fonksiyonu şeklinde ifade edilmiştir. Yapılan hesaplama sonucu a katsayıları:

$$a_1 = -11.1046$$

$$a_2 = 0.5567$$

$$a_3 = 1.3221$$

$$a_4 = -0.2102$$

$$a_5 = -0.0615$$

ve korelasyon katsayısı:

$$r = 0.9583$$



şeklinde elde edildi. Bu katsayılar denklem (6.7)'de yerine konur ve düzenlenirse telin ağırlık kaybına ait matematiksel model:

$$W_l = \frac{t_d^{0.5567} \cdot V^{1.3221}}{e^{-11.1046} \cdot V_w^{0.2102} \cdot P^{0.0615}} \quad (6.8)$$

şekilde elde edilir

6.3. Yüzey Pürüzlülüğünün Matematiksel Modeli

Puls süresi, deşarj voltajı, tel ilerleme hızı, ve dielektrik sıvı püskürtme basıncına bağlı olarak iş parçası yüzey pürüzlülüğüne ait matematiksel model:

$$R_a = 10^{a_1} \cdot t_d^{a_2} \cdot V^{a_3} \cdot V_w^{a_4} \cdot P^{a_5} \quad (6.9)$$

güç fonksiyonu şeklinde ifade edilmiştir. Yüzey pürüzlülüğüne ait a regresyon katsayıları:

$$a_1 = -3.33$$

$$a_2 = 0.3766$$

$$a_3 = 0.3441$$

$$a_4 = 0.0837$$

$$a_5 = -0.0576$$

ve korelasyon katsayısı:

$$r = 0.9672$$

şeklinde elde edildi. Bu katsayılar denklem (6.9)'da yerine konur ve düzenlenirse iş parçası yüzey pürüzlülüğüne ait matematiksel model:

$$R_a = \frac{t_d^{0.3766} \cdot V^{0.3441} \cdot V_w^{0.0837}}{e^{3.33} \cdot P^{0.0576}} \quad (6.10)$$

şekilde elde edilir.

Ayrıca iş parçası yüzey pürüzlülüğüne ait matematiksel model Gaus-Newton yöntemi kullanarak da elde edildi. Nonlinear Gaus-Newton yöntemine göre yüzey pürüzlülüğü denklemi:

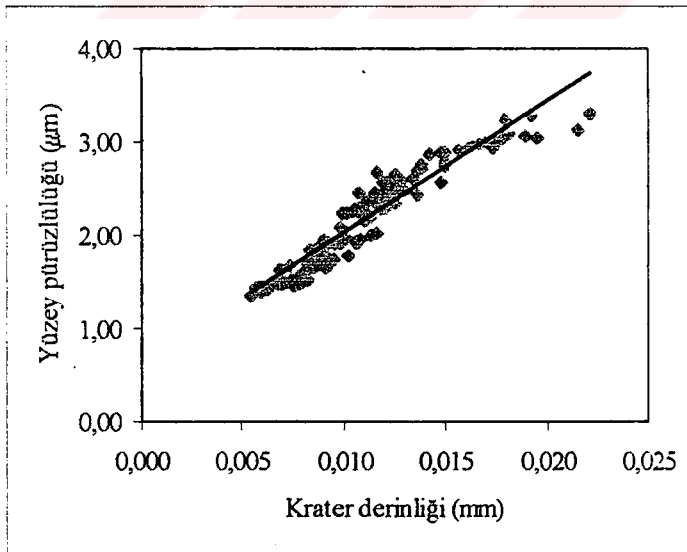
$$R_a = \frac{0.048 t_d^{0.3613} \cdot V^{0.3213} \cdot V_w^{0.0765}}{P^{0.0561}} \quad (6.11)$$

ve korelasyon katsayısı:

$$r = 0.9691$$

şeklinde elde edildi.

Telin krater derinliği ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünün birbirleri ile olan ilişkileri Şekil 6.2'de görülmektedir.



Şekil 6.2. Krater derinliği ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki.

Şekil 6.2'den telin krater derinliği ile iş parçası yüzey pürüzlülüğü arasında şu bağıntı elde edildi:

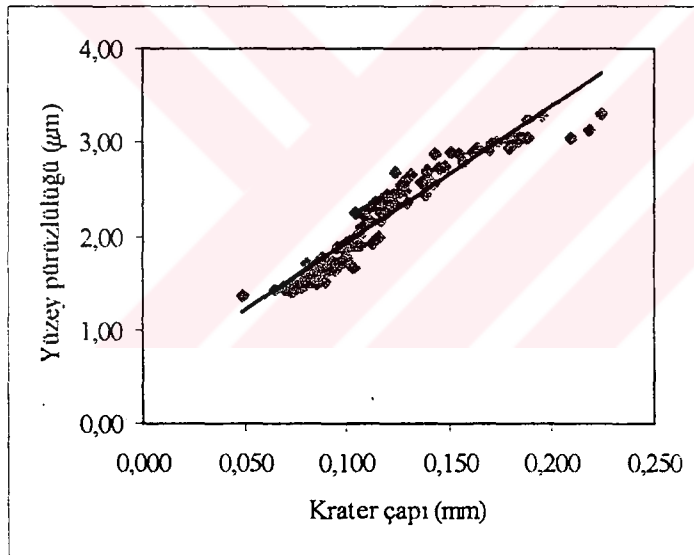
$$R_a = 141.03h + 0.6115 \quad (6.12)$$

ve korelasyon katsayısı:

$$r = 0.9511$$

şeklinde elde edildi. Yapılan analiz sonucunda krater derinliği ile iş parçası yüzey pürüzlülüğü arasında doğrusal bir ilişkinin olduğu görülmüştür.

Telin krater çapı ile iş parçası yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişkileri Şekil 6.3'te görülmektedir.



Şekil 6.3. Krater çapı ile yüzey pürüzlülüğü arasındaki ilişki.

Şekil 6.3'den telin krater derinliği ile iş parçası yüzey pürüzlülüğü arasında şu bağıntı elde edildi:

$$R_a = 14.477d + 0.485 \quad (6.13)$$

ve korelasyon katsayısı:



$$r = 0.9511$$

şeklinde elde edildi.

Şekil 6.2 ve 6.3'teki grafikler, (6.12) ve (6.13) nolu denklemler incelendiğinde, telin krater boyutları ile iş parçası yüzey pürüzlülüğü arasında bir ilişkinin var olduğu görülmektedir. Bu denklem ve grafiklerden teldeki krater boyutlarının artmasının, iş parçası yüzey pürüzlülüğünün artması demek olduğu sonucu çıkmaktadır. Bu ise tezin amaçlarından yüzey pürüzlülüğünü oluşturan ana etmen olan kraterlerin incelenmesi konusu açısından önem arz etmektedir. Yapılan bu matematiksel modeller kullanılarak, tel elektrotun aşınma miktarı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü önceden yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir. Bu matematiksel modellerden yola çıkarak, deney yapmaya ihtiyaç duymadan, arzu edilen iş parçası yüzey pürüzlülüğü ve tel elektrot aşınması için uygun olan kesme parametrelerini seçmek mümkün olacaktır.

Krater çap ve derinliğine, telin ağırlık kaybına ve iş parçası yüzey pürüzlülüğüne ait matematiksel modellerin elde edilmesinde kullanılan her iki yöntemde de katsayılar ve hatalar birbirine çok yakındır. Elde edilen korelasyon katsayısı r değerleri 1'e çok yakındır. Bu ise kullanılan matematiksel modelin (güç fonksiyonu) doğruluğunu göstermektedir.

Elde edilen bu matematiksel modeller kullanılarak gerilim, puls süresi, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncının girilen değerleri için teldeki krater çap ve derinliğini, telin ağırlık kaybını ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünü hesaplayan FORTRAN programlama dilinde bir program yazıldı. Yapılan bu program Ek 1'de verilmiştir.



7. GENEL SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, tel erozyon tezgahında, puls süresi, gerilim, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı gibi kesme parametrelerinin teldeki krater boyutları (krater çap ve derinliği), telin ağırlık kaybı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerindeki etkisi deneysel ve teorik olarak incelenmiştir.

Gerilim, puls süresi arttıkça teldeki krater boyutları, telin ağırlık kaybı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü artmaktadır. Tel ilerleme hızının artması ile teldeki krater boyutları ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü artmakta, buna karşılık telin ağırlık kaybı azalmaktadır. Dielektrik sıvı püskürtme basıncının artması ile teldeki krater boyutları, telin ağırlık kaybı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır.

Yapılan varyans analizi sonucu teldeki krater boyutları, telin ağırlık kaybı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerinde en büyük etkiyi sırasıyla; gerilim, puls süresi, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı göstermiştir. F-testi analizinde ise teldeki krater boyutları, telin ağırlık kaybı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü üzerinde gerilim ve puls süresi önemli bir derecede etkili olurken, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncının etkisinin önemsiz olduğu tespit edilmiştir.

Bu çalışmada, teldeki krater çapı ve derinliği, telin ağırlık kaybı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü, işleme parametreleri olarak seçilen gerilim, puls süresi, tel ilerleme hızı ve dielektrik sıvı püskürtme basıncı cinsinden matematiksel olarak ifade edilmesinde çeşitli fonksiyonlar denenmiş ve güç fonksiyonunun iyi sonuç verdiği regresyon analizi ile teyit edilmiştir. Elde edilen matematiksel modeller kullanılarak, seçilen kesme parametreleri neticesinde; tel elektrotun aşınma miktarı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğü deney yapmaya gerek duyulmadan önceden yaklaşık olarak tahmin edilebilecektir.

Değişik işleme parametrelerinde elde edilen tel üzerinde oluşan kraterlerin derinliği ile çapı arasında doğrusal bir ilişki olduğu tespit edilmiştir. Benzer şekilde krater derinliği ve krater çapı ile iş parçası yüzey pürüzlülüğü arasındaki değişimin doğrusal olduğu ve krater derinliği ve krater çapının artmasıyla iş parçası yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerinin arttığı görülmüştür.



Bu parametrelere ilave olarak da ileriye dönük Őunların yapılması önerilebilir;

- Farklı tel çapları ve tel malzemeleri kullanılarak deneyler yapılabilir,
- Dielektrik sıvı sıcaklığının etkisini incelemek amacıyla, dielektrik sıvıyı ısıtmak suretiyle deneyler yapılabilir,
- Tabla ilerleme hızı ve puls ara süresinin etkisini incelemek amacıyla farklı tabla ilerleme hızı ve puls ara sürelerinde deneyler yapılabilir.



KAYNAKLAR

1. Alekseyev G.A. and Korenblum M.V., "Analysis of the High Efficiency Wire Cut EDM", Proceedings of the International Symposium for Electro machining, (ISEM-9) Nagoya, 374-377, 1989.
2. Amstead B.H., Ostwald P.F. and Begeman M.L., Manufacturing Processes, Eighth Edition, John Wiley & Sons Inc., 1987.
3. Ardali, A.T., Experimental Investigation on Machining Parameters in Wire Electrical Discharge Machining (Wire E.D.M.), Master Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, METU, Ankara, Türkiye, March 1985.
4. ASM International, Metals Handbook: Machining, Ninth edition, vol 16, USA, 1989.
5. Balleys, F. and Buemi, C., "High-precision Tapering Made Easy", American Machinist, 140 (6), 33-34, Jun 1996.
6. Banerjee S., Prasad B.V.S.S.S., Mishra P.K., "A Simple Model to Estimate the Thermal Loads on an EDM Wire Electrode", Journal of Materials Processing Technology, 39, 305-317, 1993.
7. Banerjee S., Prasad B.V.S.S.S., Mishra P.K., "Analysis of Three-Dimensional Transient Heat Conduction for Predicting Wire Erosion in the Wire Electrical Discharge Machining Process", Journal of Materials Processing Technology, v 65, n 1-3, p 134-142, Mar 1997.
8. Benedict G.F., Non-Traditional Manufacturing Processes, New York: Marcel Dekker, 1987.
9. Chapra S.C. and Canale R.P., Numerical Methods for Engineers, Second edition McGraw-Hill Inc., Singapore, 1990.
10. Coğun, C., "Keeping Electrical Discharge Machining under Control", Machine Design, April 1990.
11. Coğun, C., Erden A., Elektro-Erozyon ile Kesme Performansının Bilgisayar Yardımı ile Belirlenmesi ve Denetimi, ODTÜ Makine Tasarım ve İmalat Dergisi, 1(5), 206-212, 1987.

12. Çoğun C., Savsar M., "Statistical Modelling of Properties of Discharge Pulses in Electrical Discharge Machining", *Int. Journal of Machine Tools and Manufacture*, 30(3), 467-474, 1990.
13. Dekeyser W.L. and Snoeys R., "Geometrical Accuracy of Wire EDM", *Proceedings of the International Symposium for Electro machining, (ISEM-9) Nagoya*, 226-232, 1989.
14. Dibinto, D.D., Eubank, Ph.T., Patel, M.R., Barrufet, M.A., "Theoretical Models of The Electrical Discharge Machining Process I. A Simple Cathode Erosion Model", *Journal of Applied Physics*, 66 (9), 4095-4103, 1989.
15. Dobbins D.B., "Wire-cut EDM-How Many Axes?", *Tooling & Production*, 54 (10), Jan.1989.
16. Dobbins D.B., "EDM Flexes its Flexibility", *Manufacturing Engineering*, Jan. 1993.
17. Doyle L.E., Keyser C.A., Leach J.L., Schrader G.F. and Singer M.B., *Manufacturing Processes and Materials for Engineering*, Third edition, Prentice-Hall Inc., USA, 1985.
18. Drozda T.J. and Wick C., *Tool and Manufacturing Engineers Handbook*, vol. 1, 1989.
19. Eker G., "Tel Erozyonlarda Püskürtme ve Kaplamalı Tellerin Kesme Hızına Etkisi", *Makine ve Market*, 10, 90-91, 1997.
20. Gadalla, A. M., Bedi, H. S., "Effect of composition and grain size on electrical discharge machining of BN-TiB//2 composites", *Journal of Materials Research*, 6 (11), 2457-2462, Nov 1991.
21. Gettelman K., "Wire EDM Challenges Aerospace", *Modern Machine Shop*, October 1992.
22. Gökler M.İ. and Ozanözü A.M., "Experimental Investigation of Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness in WEDM Process", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 40, 1831-1848, 2000.
23. Hatschek R.L., "New Twists in Multiaxis CNC Traveling-Wire EDM", *American Machinist*, Special Report, 764, March 1984.
24. Hatschek R.L., "EDM Update'84", *American Machinist*, 113-124, March 1984.



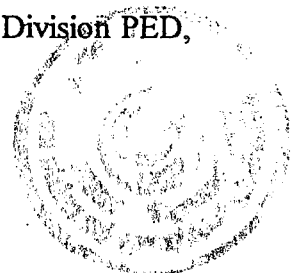
25. Heberling, T.G., Fee, A.R., Tobolski, E.L., "Minimum thickness requirements for Rockwell hardness testing", *Journal of Testing & Evaluation*, 24 (2), 131-139, Mar 1996.
26. Huang J.T., Liao Y.S. and Hsue W.J., "Determination of Finish-Cutting Operation Number and Machining Parameters Setting in Wire Electrical Discharge Machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 87, 69-81, 1999.
27. Huntress E.A., "Electric Discharge Machining", *American Machinist*, 83-98, August 1978.
28. Jennes M., Snoeys R. and Dekeyser W., "Comparison of Various Approaches to Model the Thermal Load on the EDM-Wire Electrode", *Annals of CIRP*, 33, 93-98, January 1984.
29. Jeswani M.L., "Dimensional Analysis of Tool Wear in Electrical Discharge Machining", *Wear*, 55, 153-161, 1979.
30. Kinoshita N. and Fukui M., "A Fundamental Study for Improving the Performance of WEDM", *SME 1980 Western Metal and Tool Conference and Exposition*, March 1980.
31. Kinoshita N. Fukui M., and Gamo G., "Control of Wire EDM Preventing From Breaking", *Annals of the CIRP*, vol. 31, January 1982.
32. Koelsch J.R., "EDM Hits the Floor Running", *Manufacturing Engineering*, June 1993.
33. Kozak J., Rajurkar K.P. and Wang S.Z., "Material Removal in WEDM of PCD Blanks", *Production Engineering Division, PED*, vol. 64, p. 823-833, ASME, 1993.
34. Kozak, J., Rajurkar, K. P., Wang, S. Z., "Material removal in WEDM of PCD blanks", *Journal of Engineering for Industry, Transactions of the ASME*, 116 (3), 363-369, Aug 1994.
35. Kögmen, M., *Computer Aided Modelling and Simulation of Crater Formation in Electrical Discharge Machining*, Master Thesis, The Graduate School of Natural and Applied Sciences, METU, Ankara, Türkiye, June 1993.
36. Liao, Y.S., Chu, Y.Y., Yan, M.T., "Study of Wire Breaking Process and Monitoring of WEDM", *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 37 (4), 555-567, 1997a.



37. Liao Y.S., Huang J.T., Su H.C., "A Study on the Machining-parameter Optimization of Wire Electrical Discharge Machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 71, 487-493, 1997b.
38. Lin J.L., Wang K.S., Yan B.H. and Tarng Y.S., "An Investigation into Improving Worn Electrode Reliability in the Electrical Discharge Machining Process", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 16, 113-119, 2000.
39. Luo Y.F., "Rupture Failure and Mechanical Strength of the Electrode Wire used in Wire EDM", *Journal of Materials Processing Technology*, 94, 208-215, 1999.
40. Masuzawa T., Fojino M. and Kobayashi K., "Wire Electro-Discharge Grinding for Micro Machining, *Annals of CIRP*, 34, 431-434, January 1985.
41. Matsadu J. Tomishige S., Tanaka K. and Yano H., "Evaluation of Performance of WEDM by Parameter Design", *Proceedings of the International Symposium for Electro machining, (ISEM-9) Nagoya*, 68-71, 1989.
42. Mcgeough J.A. and Rassuman H., "A Macroscopic Model of Electro Discharge Machining", *International Journal of Machine Tool Design and Research*, 22 (4), 333, 1982.
43. Nagao S., *an Illustrated Guide to Electrical Discharge Machining, Details and the Effective use of Techniques*, the Gijutshu Hyoronsha Ltd., 1986.
44. Ogata, I., Mukoyama, Y., "Residual Stress On Surface Machined By Wire Electric Discharge", *International Journal of the Japan Society for Precision Engineering*, v 25, n 4, p 273-278, Dec 1991.
45. Olive C.T., *Advanced Machine Tool Technology and Manufacturing Process*, C. Thomas Olive Associates, Albany, New York, 1990.
46. Owen J.V., "Intelligent EDM", *Manufacturing Engineering*, June 1992.
47. Ozanözgü, A. M., *Experimental Investigation of Effects of Cutting Parameters on Surface Roughness in WEDM Process*, Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, ODTÜ, Ankara, 1998.
48. Ozler L., *Östenitik Manganlı Çeliğin Sıcak Talaşlı İşlenmesinde Kalem Ömrünün Teorik ve Deneysel olarak Araştırılması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, Türkiye, 1998.
49. Pandey P.C. and Jilani S.T., "Plasma Channel Growth and the Resolidified Layer in EDM", *Precision Engineering*, 8 (2), 104, 1986.

50. Patel, M.R., Barrufet, M.A., Eubank, Ph.T., Dibinto, D.D., "Theoretical Models of The Electrical Discharge Machining Process II". The Anode Erosion Model, Journal of Applied Physics, 66 (9), 4104-4111, 1989.
51. Petrofes, N. F., Gadalla, A. M., "Processing Aspects Of Shaping Advanced Materials By Electrical Discharge Machining", Advanced Materials and Manufacturing Processes, 3(1), 127-153, 1988.
52. Poyrazoğlu, O., Elektriksel Kıvılcımla Aşındırma Metodu ile İşleme: EDM Elektroerozyon Tekniği, TEKEV, Teknik Eğitim Vakfı Yayınları, Yayın No: 7, Ankara, 1994.
53. Rajagopal K. and Noble C.F., "Some Characteristics of Wire Electrode EDM", Proceedings of the 20th International Conference on Machine Tool Design and Research, Birmingham, 557-565, 1979.
54. Rajurkar K.P. and Wang W.M., "Thermal Modelling and On-line Monitoring of Wire-EDM", Journal of Materials Processing Technology, 38, 417-430, 1993.
55. Ricci W.S., Blumenthal W.R. and Skeeel H.A., "Electrical Discharge Machinability of Ceramics", Proceedings of Eastern Manufacturing Technology Conference, Springfield, Massachusetts, session 6, November 1987.
56. Ross P.J., Taguchi Techniques for Quality Engineering, Second Edition, McGraw-Hill, USA, 1996.
57. Rozenek M., Kozak J., Dabrowski L. and Lubkowski K., "Electrical Discharge Machining Characteristics of Metal Matrix Composites", Journal of Materials Processing Technology, 109, 367-370, 2001.
58. Schreiber, R. R., "Hot Off The Wire", Manufacturing Engineering, 104 (6), 39-44, June 1990.
59. Scott D., Boyina S. And Rajurkar K.P., "Analysis and Optimization of Parameter Combination in Wire Electrical Discharge Machining", International Journal of Production Research, 29(11), 2189-2207, 1991.
60. Snoeys R., Dekeyser W. and Tricarico C., "Knowledge Based System for WEDM", Annals of CIRP, 37, 197-202, January 1988.
61. Sodick Inc., Wire EDM Machine Operation, 1998.

62. Spedding, T.A, Wang, Z.Q., "Parametric Optimization and Surface Characterization of Wire Electrical Discharge Machining Process, Precision Engineering", 20 (1), 5-15, Jan 1997a.
63. Spedding, T.A, Wang, Z.Q., "Study on Modeling of Wire EDM Process", Journal of Materials Processing Technology, 69, 18-28, 1997b.
64. Spur, G., Puttrus, M., Wunsch, U. W., "Wire EDM of PCD", Industrial Diamond Review, 48 (529), 264-266, June 1988.
65. Spur, G.; Schoenbeck, J., "Anode Erosion in Wire-EDM - a Theoretical Model", CIRP Annals, v 42, n 1, p 253-256, 1993.
66. Suzuki Y. and Kishi m., " Improvement of Surface Roughness in Wire EDM", Proceedings of the International Symposium for Electro machining, (ISEM-9) Nagoya, 80-83, 1989.
67. Taramykin Y.P. and Zlatkin Y.I., "Methods and Equipment for Electrical Discharge Machining with Wire Electrodes", Machines and Tooling, 38 (9), 23-25, 1967.
68. Tarng, Y.S., Ma, S.C., L., K.C., "Determination of Optimal Cutting Parameters in Wire Electrical Discharge Machining", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 35 (12), 1693-1701, 1995.
69. Technical Report Series, " EDM Forms Tough Cuts", Manufacturing Engineering, April 1992.
70. TFE, Precision Flowing in Wire, Catalog, Italy, 2000.
71. Trezise K.E., "A Physicist's View of Wire EDM", Proceedings of the International Conference on Machine Tool Design and Research, 23, 413-419, 1982.
72. Tomalin D., "Better Wire: Lowers EDM Costs", Modern Machine Shop, 61 (11), 66-71, Apr 1989.
73. Tsai K.M. and Wang P.J., "Predictions on surface finish in electrical discharge machining based upon neural network models", International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, 1385-1403, 2001.
74. Wang, W.M. and Rajurkar, K.P., "Monitoring sparking frequency and predicting wire breakage in WEDM", Sensors and Signal Processing for Manufacturing American Society of Mechanical Engineers, Production Engineering Division PED, 55, 49-64, Publ by ASME, New York, NY, USA, 1992.



75. Wilkins, C., "EDM wire covers all the angles, Cutting Tool Engineering", 48 (3), 5pp , Apr 1996.
76. Williams, R. E., Rajurkar, K. P., "Study of wire electrical discharge machined surface characteristics, Journal of Materials Processing Technology" v 28 n 1-2. p 127-138, Sep 1991.
77. Yurtsever, N., Deneysel İstatistik Metotları, T.C. Tarım Orman ve Köy İşleri Bakanlığı Yayınları, Ankara, 1984.
78. Zhang J., Huang Y. and Chengte Y., "The Research on premonition of Wire Breaking of WEDM-HS", Proceedings of the International Symposium for Electro machining, (ISEM-9) Nagoya, 223-225, 1989.



EKLER

EK 1. Teldeki krater çapı ve derinliği, telin ağırlık kaybı ve iş parçası yüzey pürüzlülüğünü hesaplayan FORTRAN programı.

```

C    BU PROGRAM WEDM'DEKİ VERİLEN KESME PARAMETRELERİNE
C    KARŞILIK TELDE OLUŞACAK KRATERİN ÇAPI (d) VE DERİNLİĞİ (h)
C    TELİN AĞIRLIK KAYBI (Wl)
C    İŞ PARÇASI YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜ (Ra) HESAPLAR
5    PRINT *, 'GERİLİM DEĞERİNİN GİRİNİZ (volt):'
      READ(*,*) V
      PRINT *, 'PULS SÜRESİNİ GİRİNİZ (ns):'
      READ(*,*) Ton
      PRINT *, 'TEL İLERLEME HIZINI GİRİNİZ (m/dak):'
      READ(*,*) Vw
      PRINT *, 'DİELEKTRİK SIVI PÜSKÜRTME BASINCINI GİRİNİZ (kg.m-2):'
      READ(*,*) P
      h=(Ton**0.4903*V**0.4187*Vw**0.1771)/(10**9.7331*P**0.1274)
      d=(Ton**0.4481*V**0.3895*Vw**0.159)/(10**6.9674*P**0.1107)
      Wl=(Ton**0.5883*V**1.3508)/(10**11.3729*Vw**0.2129*P**0.102)
      Ra=(Ton**0.3619*V**0.3508*Vw**0.1061)/(10**3.2721*P**0.0749)
      WRITE(*,*)'Krater derinliği=',h,'mm'
      WRITE(*,*)'Krater çapı=',d,'mm'
      WRITE(*,*)'Telin ağırlık kaybı=',Wl,'gr'
      WRITE(*,*)'İş parçası yüzey pürüzlülüğü=',d,'mikron'
      WRITE(*,*)'Yeni Veri Girmek İstiyorsanız 1 Tuşuna Basınız'
      READ(*,*) DEVAM
      IF(DEVAM.EQ.1) GOTO 5
      STOP
      END

```



EK 2. VARYANS ANALİZİ (ANOVA)

Varyans analizi (ANOVA-analysis of variance) metodu, deney sonuçlarını yorumlamanın bir yolu olarak 1930 yılında Ronald Fisher tarafından geliştirilmiştir (Ross 1996). Varyans analizi, işlem parametrelerinin istatistiksel olarak önemli olup olmadığına bakmak için yapılır. Bu metotta değişimin (varyasyon) miktarını ifade eden bir değer içindeki çeşitli tekrarlamaları güçlendirmek için bir dönüşüm yapılmaktadır. Bu dönüşüm, sinyal-gürültü oranı (S/N ratio, the signal-to-noise ratio) olarak adlandırılır ve η ile gösterilir. S/N oranı, arzu edilen değerden sapan performans karakteristiklerini ölçmek için kullanılmaktadır. S/N oranının analizinde, performans karakteristiklerini belirlemek için çeşitli kayıp fonksiyonları vardır. Karakteristiklerin tipine bağlı olarak, daha düşük daha iyidir (LB, lower is better), nominal daha iyidir (NB, nominal is better) ve daha yüksek daha iyidir (HB, higher is better) olmak üzere üç çeşit kayıp fonksiyonu vardır. Performans karakteristiği ne olursa olsun, en büyük S/N oranı en iyi performans karakteristiğine karşılık gelir.

LB, NB ve HB kayıp fonksiyonları için S/N oranları şu şekilde hesaplanmaktadır.

1- Daha düşük daha iyidir (LB):

$$S/N_{LB} = -10 \log \left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r y_i^2 \right) \quad (1)$$

Burada r bir denemede testlerin sayısı y ise her bir gözlem için yanıttır.

2- Nominal daha iyidir (NB):

$$S/N_{NB1} = -10 \log V_e \quad (\text{sadece varyans}) \quad (2)$$

$$S/N_{NB2} = +10 \log \left(\frac{V_m - V_e}{r.V_e} \right) \quad (\text{ortalama ve varyans}) \quad (3)$$

3- Daha yüksek daha iyidir (HB):

$$S/N_{HB} = -10 \log\left(\frac{1}{r} \sum_{i=1}^r \frac{1}{y_i^2}\right) \quad (4)$$

Yukarıda belirtilen V_m ve V_e sırasıyla ortalamanın ve hatanın varyansı olup aşağıdaki eşitliklerle hesaplanmaktadır.

$$V_m = \frac{SS_m}{f_m} \quad (5)$$

Burada SS_m ortalamanın karelerinin toplamı ve f_m ise ortalamanın serbestlik derecesidir ve V_e şu şekilde hesaplanır:

$$V_e = \frac{SS_e}{f_e} \quad (6)$$

Burada SS_e hatanın karelerinin toplamı ve f_e ise hatanın serbestlik derecesidir. Ortalamanın karelerinin toplamı SS_m :

$$SS_m = \frac{(\sum \eta_i)^2}{n} \quad (7)$$

eşitliği ile bulunur. Burada n testlerin toplam sayısıdır. Toplam gözlemlerin karelerinin toplamı:

$$SS_T = \sum \eta_i^2 - SS_m \quad (8)$$

ile elde edilir. Faktör A'nın karelerinin toplamı:



$$SS_A = \frac{\sum \eta_{Ai}^2}{N} - SS_m \quad (9)$$

şeklindedir. Burada N herhangi bir A parametresinin seviye sayısıdır. Hataların kareleri toplamı ise:

$$SS_e = SS_T - \sum SS_A \quad (10)$$

ile belirlenebilir.



EK 3. REGRESYON ANALİZ YÖNTEMİ

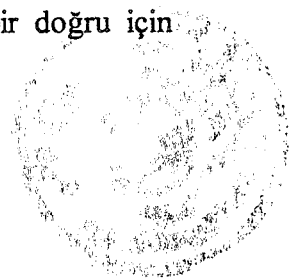
Regresyon analiz iki veya daha fazla değişken arasında herhangi bir ilişkinin olup olmadığını, varsa bu ilişkinin derecesinin belirlenmesinde kullanılan metottur. Bir başka deyişle bir y değişkeninin diğer bir x değişkeni ile bağımlılığı inceleme konusu yapılarak bunlar arasındaki ilişkiler karşılıklı olarak incelenir. Matematikte bu ilişkiye fonksiyon adı verilir. Değişkenler bağımsız değişkenler ve bağımlı değişkenler olmak üzere ayırım yapılırlar. Doğrusal regresyonda bağımlı değişkenin bir tek bağımsız değişkene olan regresyonu inceleme konusu yapılırken, çoklu regresyonda birden fazla bağımsız değişkenin tek bir bağımlı değişkene olan etkileri inceleme konusu yapılır.

Regresyon analiz metodu deneysel araştırmayı, matematiksel metotları ve istatistik analizi içine alır. Bir araştırmacı amaç fonksiyonunu belirleme amacıyla ya bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi araştırır yada optimum çözümü elde etmek için bağımsız değişkenlerin katsayılarını tespit etmek ister. Bu nedenle önceden belirlene modelin katsayıları deneysel dataların yardımıyla tahmin edilir.

Regresyon fonksiyonu, bir tek bağımsız değişken durumunda iki boyutlu koordinat sisteminde bir eğriyi ifade eder. İki bağımsız değişken durumunda sabit regresyon kontürlerini meydana getirir. İki'den fazla bağımsız değişken olması durumunda ise bunlar regresyon yüzeyleri ile temsil edilirler. Çoğu kez birden çok faktörün seviyelerinin ele alındığı faktöriyel denemeler regresyon yüzeylerini hesaplamak amacıyla planlanmış denemeler olarak kabul edilir. Regresyon yüzeylerinin analizi, matematiksel metotlarla geliştirilmiş olan en küçük kareler metodunun kullanılması ile yapılır.

Basit Regresyon

$(x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3), \dots, (x_n, y_n)$ gibi bir takım gözlemlerden meydana gelen düz bir doğru en küçük kareler yaklaşımının en basit örneğidir. Düz bir doğru için matematiksel ifade aşağıdaki gibi yazılır.



$$y = a_0 + a_1 \cdot x + e \quad (1)$$

Burada a_0 ve a_1 eğimi temsil eden katsayılarıdır. e ise matematiksel model ve gözlemler arasındaki hatadır. (1) nolu denklem tekrar düzenlenirse;

$$e = y - a_0 - a_1 \cdot x \quad (2)$$

Böylece hata, önceden lineer denklem yardımıyla elde edilen yaklaşık değer $(a_0 + a_1 \cdot x_i)$ ve y 'nin gerçek değeri arasındaki fark olduğu görülür (Chapra ve Canale 1990).

Regresyon Katsayılarının Elde Edilmesi

Deneyisel gözlemlerdeki amaç x ve y arasındaki ilişkiyi gösteren en iyi hattı bulmaktır. Bu hattı temsil eden denkleme regresyon denklemi denir. Gözlemlere en iyi uyan hat en küçük kareler metodu yardımıyla bulunması yani a_0 ve a_1 katsayılarının elde edilmesidir. Bu işlem ise hataların (artıkların) karelerinin toplamının minimize edilmesi ile olur. Yani tahmin edilen y_i değerlerindeki hata değerinin en küçük olmasıdır. Hataların toplamı;

$$\sum_{i=1}^n e_i = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i) \quad (3)$$

şeklinde ifade edilir ve hataların karelerinin toplamı ise:

$$Sr = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i)^2 \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. x ve y arasındaki ilişkiyi ifade eden a_0 ve a_1 katsayıları, hataların karelerinin toplamının her bir katsayıya göre kısmi türevlerinin alınarak sıfıra eşitlenmesi ile elde edilir. Kısmi türevleri:



$$\begin{aligned}\frac{\partial Sr}{\partial a_0} &= -2 \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i) \\ \frac{\partial Sr}{\partial a_1} &= -2 \sum_{i=1}^n [(y_i - a_0 - a_1 \cdot x_i) \cdot x_i]\end{aligned}\quad (5)$$

şeklinde elde edilir. Bu değerlerin sıfıra eşitlenmesi ile bir minimum Sr değeri elde edilir. Denklemde $\sum_{i=1}^n a_0$ yerine $n \cdot a_0$ yazılırsa iki bilinmeyenli iki lineer denklem takımı elde edilir. ve aşağıdaki gibi yazılır.

$$n \cdot a_0 + \sum_{i=1}^n x_i \cdot a_1 = \sum_{i=1}^n y_i \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \cdot a_0 + \sum_{i=1}^n x_i^2 \cdot a_1 = \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i \quad (7)$$

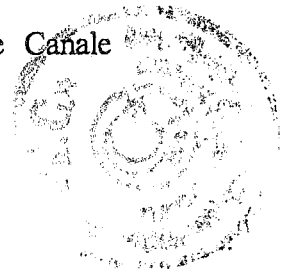
Bu denklemler normal denklemler olarak adlandırılırlar. Denklemler sayısal çözümlendiğinde ise a_1 katsayısı:

$$a_1 = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - \sum_{i=1}^n x_i \cdot \sum_{i=1}^n y_i}{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \quad (8)$$

şeklin de elde edilir. Elde edilen a_1 katsayısı denklem (6) yerine konarak a_0 katsayısı elde edilir.

$$a_0 = \bar{y} - a_1 \cdot \bar{x} \quad (9)$$

Denklem (9)'daki $\bar{y}$ ve $\bar{x}$ değerleri sırasıyla her bir y ve x değişkenlerinin aritmetik ortalamalarını ifade eder ve aşağıdaki gibi yazılabilir (Chapra ve Canale 1990):



$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad \text{ve} \quad \bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (10)$$

Çoklu Regresyon

Regresyon fonksiyonları inceleme konusu yapıldığında gözlem değeri üç yada daha fazla grupelemeye tabi tutulacaksa bunlar arasındaki ilişki, artık eğrilerle temsil edilemez. Çünkü üç yada daha fazla boyutlu olduklarından regresyon yüzeyleri söz konusu olur. Örneğin herhangi bir x_1 değişkeninin x_2 değişkeni ile birlikte bir türüne yada sonuca etkisi varsa bu ilişkiyi bir eğri ile gösterme olanağımız yoktur. Bu ilişki ancak yüzeylerle temsil edilebilirler. x_1 , x_2 ve y arasındaki ilişkiyi grafiksel olarak gösterebilmek için üç karşılıklı dikey eksene ihtiyaç olmaktadır. Bu eksenler arasında meydana gelen noktalar ise yüzeyleri meydana getirirler.

Çoklu regresyonda bir bağımsız değişken ile birden fazla bağımsız değişken inceleme konusu yapılarak cevap fonksiyonu araştırılır. Çoklu regresyon için lineer fonksiyon aşağıdaki gibi yazılabilir.

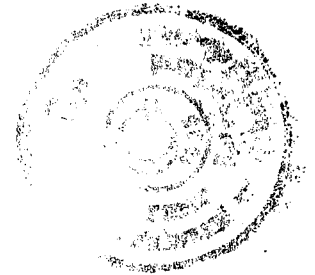
$$y = a_0 + a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + a_4 \cdot x_4 + \dots + a_m \cdot x_m \quad (11)$$

Basit regresyonda olduğu gibi bilinmeyen katsayılar hataların karelerinin toplamının bilinmeyen her bir katsayıya göre ayrı ayrı kısmi türevleri alınarak sıfıra eşitlenmesiyle elde edilir. Hataları karelerinin toplamı:

$$Sr = \sum_{i=1}^n (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_{1i} - a_2 \cdot x_{2i} - \dots - a_m \cdot x_{mi})^2 \quad (12)$$

şeklinde yazılır ve bilinmeyen katsayılara göre kısmi türevleri alınır:

$$\frac{\partial Sr}{\partial a_0} = -2 \sum (y_i - a_0 - a_1 \cdot x_{1i} - a_2 \cdot x_{2i} - \dots - a_m \cdot x_{mi})$$



$$y = a_0 \cdot z_0 + a_1 \cdot z_1 + a_2 \cdot z_2 + \dots + a_m \cdot z_m \quad (16)$$

Burada $z_0, z_1, \dots, z_m$ farklı $m+1$ fonksiyonlarıdır. Basit ve çoklu lineer regresyonda $z_0=1$, $z_1=x_1, z_2=x_2, \dots, z_m=x_m$ olduğu kolay bir şekilde görülür. Lineer olmayan regresyonda ise $z_0=x^0, z_1=x, z_2=x^2, z_3=x^3, \dots, z_m=x^m$ şeklindedir. Denklem (16) matris rotasyonda genel olarak aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\{Y\} = [Z]\{A\} + \{E\} \quad (17)$$

Burada $[Z]$, bağımsız değişkenler matrisidir ve bu matris aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$[Z] = \begin{bmatrix} z_{01} & z_{11} & z_{21} & \dots & z_{m1} \\ z_{02} & z_{12} & z_{22} & \dots & z_{m2} \\ z_{03} & z_{13} & z_{23} & \dots & z_{m3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ z_{0n} & z_{1n} & z_{2n} & \dots & z_{mn} \end{bmatrix} \quad (18)$$

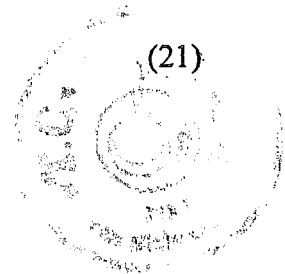
Burada m değişkenlerin sayısı ve n data sayısıdır. $\{Y\}$ ise bir kolon vektörü olup bağımlı değişkenlerin gözlem değerini ifade eder ve aşağıdaki gibi yazılır.

$$\{Y\}^T = [y_1, y_2, y_3, \dots, y_n] \quad (19)$$

Denklem (17)'deki $\{A\}$ sütun vektörü bilinmeyen katsayılar ve $\{E\}$ sütun vektörü ise hatalar olup aşağıdaki gibi yazılabilirler:

$$\{A\}^T = [a_0, a_1, a_2, \dots, a_m] \quad (20)$$

$$\{E\}^T = [e_1, e_2, e_3, \dots, e_n] \quad (21)$$



Daha önceki bölümlerde ifade edildiği gibi hataların karelerinin toplamı bu model için aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$Sr = \sum_{i=1}^n (y_i - \sum_{j=1}^{m+1} a_j \cdot z_{ji})^2 \quad (22)$$

Her bir katsayıya göre hataların karelerinin minimize edilmesi yani kısmi türevlerinin alınması ve sıfıra eşitlenmesi ile normal denklemler elde edilir. Bu denklemler matris formunda aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$[[Z]^T [Z]] \{A\} = [Z]^T \cdot \{Y\} \quad (23)$$

Denklemin çözümü matrisin inversinin alınması ile elde edilir ve $\{A\}$ vektörü aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\{A\} = [[Z]^T [Z]]^{-1} [Z]^T \cdot \{Y\} \quad (24)$$

Lineer Olmayan Regresyon

Gauss-Newton yöntemi, lineer olmayan eşitlikler ve veriler arasındaki hataların karelerinin toplamını minimize etmek için kullanılan bir algoritmadır. Bu teknik, bir yaklaşımdaki orijinal lineer olmayan denklemi, lineer formda ifade etmek için Taylor serisini kullanır. Daha sonra, hataların minimize etme yönünde, parametrelerin yeni tahminlerini bulmak için en küçük kareler teorisi kullanılır (Chapra ve Canale 1990).

Lineer olmayan denklem ve veriler arasındaki ilişki aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$y_i = f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m) + e_i \quad (25)$$

Burada y_i , bağımlı değişkenlerin ölçülen değeridir. $f(x_i; a_0, a_1, \dots, a_m)$, bağımsız değişken x_i 'nin ve $a_0, a_1, \dots, a_m$ 'nin lineer olmayan bir fonksiyonu olan denklemdir. e ise rasgele bir hatadır.

İki parametrelili bir durum için, lineer olmayan bu model ilk türevleri alındıktan sonra Taylor serisine göre açılırsa:

$$f(x_i)_{j+1} = f(x_i)_j + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 \quad (26)$$

Burada j başlangıç tahmini ve $j+1$ ise tahmin $\Delta a_0 = a_{0,j+1} - a_{0,j}$ ve $\Delta a_1 = a_{1,j+1} - a_{1,j}$ şeklindedir. Denklem (26) denklem (25) da yerine konursa:

$$y_i - f(x_i)_j = \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0} \Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1} \Delta a_1 + e_i \quad (27)$$

şeklinde veya matris formunda ise:

$$\{D\} = [Z_j] \{\Delta A\} + \{E\} \quad (28)$$

şeklinde elde edilir. Burada $[Z_j]$ başlangıç tahmini j 'deki değerlendirilen fonksiyonun kısmi türevlerinin matrisidir.

$$[Z_j] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial a_0} & \frac{\partial f_1}{\partial a_1} \\ \frac{\partial f_2}{\partial a_0} & \frac{\partial f_2}{\partial a_1} \\ \vdots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial a_0} & \frac{\partial f_n}{\partial a_1} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Burada n veri sayısını ve $\partial f_i / \partial a_k$ i inci veride değerlendirilen k inci parametreye göre fonksiyonun kısmi türevidir. $\{D\}$ vektörü, ölçümler ve fonksiyon değerleri arasındaki farklardır.

$$\{D\} = \begin{Bmatrix} y_1 - f(x_1) \\ y_2 - f(x_2) \\ \vdots \\ y_n - f(x_n) \end{Bmatrix} \quad (30)$$

ve $\{\Delta A\}$ vektörü, parametrelerin değerlerindeki değişikliklerdir.

$$\{\Delta A\} = \begin{Bmatrix} \Delta A_0 \\ \Delta A_1 \end{Bmatrix} \quad (31)$$

Denklem (28)'da en küçük kareler teorisi uygulanırsa, aşağıdaki denklem elde edilir.

$$[[Z_j]^T [Z_j]] \{\Delta A\} = [Z_j]^T \cdot \{D\} \quad (32)$$

Böylece $\{\Delta A\}$ için (32) nolu denklem çözülürse:

$$a_{0,j+1} = a_{0,j} + \Delta a_0$$

ve

$$a_{1,j+1} = a_{1,j} + \Delta a_1$$

parametrelerinin değerleri hesaplanır.

$$|\varepsilon_a|_k = \left| \frac{a_{k,j+1} - a_{k,j}}{a_{k,j+1}} \right| \cdot 100 \quad (34)$$

şeklinde bir hesaplama ile kabul edilebilir bir durdurma kriterinin altına düşene kadar tekrar ettirilir (Chapra ve Canale 1990).

Deneysel çalışmalarda denklemdeki katsayılar lineer olmayan regresyon tekniği kullanılarak elde edilirler. Bununla beraber alternatif olarak lineer olmayan denklem matematiksel dönüşümler kullanılarak lineer forma dönüştürülür ve daha sonra basit yada çoklu lineer regresyondan datalara en uygun eğri elde edilir.

Lineer regresyon datalardan en iyi doğruyu elde etmek için kullanılan bir tekniktir. Bununla beraber bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkinin lineer olduğu önceden kabul edilir. Diğer taraftan dönüştürülebilir bir formdaki datalar lineer regresyonla da ifade edilebilir. Örnek olarak aşağıdaki gibi eksponansiyel formdaki bir denklem ele alınabilir (Yurtsever 1984, Ozler 1998).

$$y = a_1 \cdot e^{b_1 \cdot x} \quad (35)$$

Burada a_1 ve b_1 birer sabiti ifade eder ve y ile x arasında lineer olmayan bir ilişki vardır.

Denklem (35) ele alınırsa, lineer olmayan denklemin önce her iki tarafının doğal logaritması alınarak;

$$\ln y = \ln a_1 + b_1 \cdot x \cdot \ln e \quad (36)$$

şeklinde elde edilir ve $\ln e = 1$ yazılırsa:

$$\ln y = \ln a_1 + b_1 \cdot x \quad (37)$$

şeklinde lineer şekle dönüştürülür ve lineer regresyon kullanılmak suretiyle çözüm elde edilir.

Önemlilik testi

Çok değişkenli regresyonlar da y bağımlı değişken ile $z_1, z_2, z_3, \dots, z_m$ bağımsız değişkenleri arasında doğrusal bağımlılığın bir ölçüsü:

$$r^2 = \frac{St - Sr}{St} \quad (38)$$

ve

$$r = \sqrt{\frac{St - Sr}{St}} \quad (39)$$

şeklinde tanımlanır. Burada r korelasyon katsayısıdır. Mükemmel bir eğri için $Sr=0$ ve $r=r^2=1$ regresyon denkleminin ifade ettiği ilişkinin %100 doğru bir şekilde olduğunu gösterir. St veriler ve aritmetik ortalamaları arasındaki hataların karelerinin toplamı olup şu şekilde ifade edilir:

$$St = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (40)$$

ve aritmetik ortalama ise:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad (41)$$

şeklinde elde edilir.

