Bir Üretim İşletmesinde Tel Erozyon Kesim Parametrelerinin Yanıt Yüzey Yöntemi İle Eniyilenmesi

Şule Meryem Ceylan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mayıs 2018

Optimization of Wire Erossion Discharge Machining Parameter with Response Surface Methodology at Manufacturing Company

Şule Meryem Ceylan

MASTER OF SCIENCE THESIS

Department of Industry Engineering

May 2018

Bir Üretim İşletmesinde Tel Erozyon Kesim Parametrelerinin Yanıt Yüzey Yöntemi İle Eniyilenmesi

Şule Meryem Ceylan

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Endüstri Mühendisliği Bilim Dalında
YÜKSEK LİSANS TEZİ
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Doç. Dr. Ezgi Aktar Demirtaş

Mayıs 2018

ONAY

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans öğrencisi Şule Meryem Ceylan'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Bir Üretim İşletmesinde Tel Erozyon Kesim Parametrelerinin Yanıt Yüzey Yöntemi İle Eniyilenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

Danışman **:** Doç Dr. Ezgi Aktar Demirtaş

İkinci Danışman **:** Dr. Öğr. Üyesi Yeliz Buruk Şahin

Yüksek Lisans Tez Savunma Jürisi:

Üye : Doç Dr. Ezgi Aktar Demirtaş

Üye : Prof. Dr. İnci Sarıçiçek

Üye : Doç. Dr. Sevil Şentürk

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve ..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN
Enstitü Müdürü

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Doç. Dr. Ezgi Aktar Demirtaş. danışmanlığında hazırlamış olduğum "Bir Üretim İşletmesinde Tel Erozyon Kesim Parametrelerinin Yanıt Yüzey Yöntemi İle Eniyilenmesi" başlıklı YÜKSEK LİSANS tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 25/05/2018

Şule Meryem CEYLAN

İmza

ÖZET

Endüstrinin sürekli artan ihtiyaçlarına cevap verebilmek için hem yeni tip malzemeler hem de yeni işleme teknikleri geliştirilmektedir. Önceki malzemelerin sahip olduğu kesme-kopma mukavemeti, aşınma direnci gibi özellikler hep daha ileriye taşınarak yeni nesil çelikler geliştirilmektedir. Elde edilen bu yeni nesil çelikler ise edindikleri kazanımlara rağmen işleme dezavantajlarına sahiptir. Bu noktada, tel erozyon kesim makinası gibi klasik talaşlı imalatın yetersiz kaldığı işleme teknikleri kullanılmaktadır.

Bu çalışma CPOH çeliğinin Cut 300 model tel erozyon makinası ile kesiminin süreç parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü (Ra, Rz) ve kesme süresi performans karakteristiklerinin eniyilenmesi sağlamak üzere yapılmıştır. Deneyler süreç parametrelerinden akım, puls on süresi, puls of süresi ve tel ilerleme hızı faktörleri üzerinden yapılmıştır. Deneylerde malzeme kalınlığı, tel çeşidi ve soğutucu sıvı püskürtme basıncı gibi faktörler sabit tutulmuştur. Deney planı olarak ise Yanıt Yüzey Yönteminin sıklıkla başvurulan bir çeşidi olan Merkezi Kompozit Tasarım kullanılarak oluşturulmuştur. Varyans analizi ile yanıt değişkenler için anlamlı etkisi olan faktörler ve seviyeleri tespit edilmiştir.

Tüm amaçları tek tek eniyileyen analizler yapılmış varyans analizi tabloları oluşturulmuştur. Çok amaçlı eniyilemede ise çekicilik fonksiyonları kullanılmıştır. Hem tek amaçlı eniyilemede hem de çok amaçlı eniyilemede akım, puls on süresi ve tel ilerleme hızı faktörlerinin kritik etki yarattığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Deney Tasarımı, Yanıt Yüzey Yöntemi, Merkezi Kompozit Tasarım, CPOH Çeliği, Tel Erozyon Yöntemi, Hassas Kesim

SUMMARY

Both new types of materials and new processing techniques are being developed to meet the ever-increasing needs of the industry. The mechanical properties of previous materials such as tensile strength, yielde strength and fatigue strength to corrosion and heat abrasion are always being improved and new generation steels are being developed. These new generation steels have the disadvantages of processing as well as their advantage and gains. At this point, processing techniques such as wire erosion cutting machine are used which are inadequate in classical machining. Even wire erosion cutting technology constantly renews and improves itself.

This study was carried out to optimize the Rz, Ra surface roughness and cut-off time performance characteristics of the process parameters of CPOH steel with Cut 300 wire erosion machine. Experiments were performed on the parameters of current, pulse on duration, pulse off duration and wire feed rate factors. As an experimental plan, Response Surface Method was developed using Central Composite Design which is a frequently used type. Variance analysis was used to identify factors and levels of significance for response variables.

Variance analysis tables were set up for each response with one aim optimization analysis. A quadratic model is proposed for all response optimization functions. In multi-response optimization, desirability functions are used. Both single-response optimization and multi-objective optimization have been found to have a critical impact on the current, pulse-on-time, and wire-feed rate factors.

Keywords: Design of Experiments, Response Surface Methodology, Central Composite Design, CPOH Steel, Wire Electrical Discharge Machine, Fine Blanking

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmamı gerçekleştirirken bana yol gösteren, çalışmalarımı gerçekleştirmemde bana yardımcı olan, her zaman çalışmalarıma zaman ayıran ve hoşgörüsünü hiç eksik etmeyen değerli danışman hocam Doç. Dr. Ezgi Aktar Demirtaş'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bütün çalışmalarımda hiç bir zaman desteğini eksik etmeyen, her konuda yanımda olan ve bana yardım eden, özellikle deneysel aşamayı ve analizleri gerçekleştiriken bilgi ve birikimiyle bana destek olan ikinci danışman hocam olan değerli Dr. Öğr. Üyesi Yeliz Buruk Şahin'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Çalışmam süresince maddi ve manevi desteğini eksik etmeyen ve her zaman yanımda olan aileme çok teşekkür ederim.

Deneysel çalışmamı gerçekleştirmede bana yardımcı olan desteklerini sunan Truva Kalıp Makina Ltd. Şti.'ne teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET vi
SUMMARY vii
TEŞEKKÜR viii
İÇİNDEKİLER ix
ŞEKİLLER DİZİNİ xii
ÇİZELGELER DİZİNİ xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ xv
1.GİRİŞ VE AMAÇ 1
2. GENEL BİLGİLER 3
2.1.Elektro Erozyon Yöntemİ 3
2.1.1. Talaş kaldırma mekanizması 4
2.1.2. Elektro erozyon çeşitleri 9
2.1.2.1. Elektro erozyon 9
2.1.2.2. Tel erozyon 11
2.1.2.3. Freze erozyon 12
2.1.2.4. Taşlama erozyon 12
2.1.2.5. Ultrasonik destekli erozyon 13
2.1.2.6. Oyma erozyon 13
2.1.2.7. Mikro elektro erozyon 13
2.1.2.8. Mikro tel erozyon 14
2.2. Tel Erozyon Yöntemi 14
2.2.1. WEDM'in Avantaj ve Dezavantajları 16
2.2.2. WEDM uygulama alanları 18
2.2.2.1. Kalıp ve kalıp parçaları 18
2.2.2.2. Prototip imalatı 19
2.2.2.3. Torna takımları 19
2.2.2.4. Özel malzemeler 20
2.2.2.5. Broşlar ve şablonlar 20

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.2.3. Tel erozyon tezgâhında işleme parametreleri 20
2.2.3.1. Akım yoğunluğu (A) 21
2.2.3.2. Puls on süresi (Ton) 21
2.2.3.3. Puls off süresi (Toff) 22
2.2.3.4. Tel ilerleme hızı (Ws) 22
2.2.3.5. Tel gerginliği (Wb) 23
2.2.3.6. İşleme voltajı 23
2.2.4. Tel karakteristikleri ve seçimi-dielektrik sıvı 23
2.3. Hassas Kesim Prosesi ve Kalıplaması 25
2.3.1 Hassas kesim tekniğinde kalıplama 27
2.3.2. Tipik karakteristikleri ve uygulama alanları 27
2.3.3. Hassas kesim parçalar ve üretim kalıpları için uygun malzeme 28
3. DENEY TASARIMI VE YANIT YÜZEY YÖNTEMİ 29
3.1. Deney Tasarımı 29
3.1.1. Tam faktöriyel tasarım 31
3.1.2 Kesirli faktöriyel tasarım 35
3.2. Yanıt Yüzey Yöntemi 36
3.2.1. Merkezi kompozit tasarım 38
3.2.2. Box-Behnken tasarım 41
4. LİTERATÜR TARAMASI 42
5. MATERYAL VE YÖNTEM 52
5.1. Materyal 52
5.2. Yöntem 56
5.2.1. Süreç parametrelerinin seçimi 58
5.2.2. Yanıt değişkenlerin ölçülmesi 60
6.BULGULAR VE TARTIŞMA 63
6.1. Merkezi Kompozit Tasarım İçin Hazırlanan Deney Planı 63
6.2. Rz Yüzey Pürüzlülüğü Yanıtı İçin Model Seçimi 64

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

6.3. Rz Yüzey Pürüzlülüğü Yanıtı İçin ANOVA ve Regresyon Analizi 65
6.4. Ra Yüzey Pürüzlülüğü Yanıtı İçin Model Seçimi 70
6.5. Ra Yüzey Pürüzlülüğü Yanıtı İçin ANOVA ve Regresyon Analizi 71
6.6. Kesme Süresi Yanıtı İçin Model Seçimi 76
6.7. Kesme Süresi İçin ANOVA ve Regresyon Analizi 77
6.8. Rz, Ra Değerleri ve Kesme Süresi Yanıtlarının Eşzamanlı Eniyilenmesi 82
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 85
KAYNAKLAR DİZİNİ 87

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil **Sayfa**

2.1. EDM çevrimindeki birinci aşama 4
2.2. EDM çevrimindeki ikinci aşama 5
2.3. EDM çevrimindeki üçüncü aşama 5
2.4. EDM çevrimindeki dördüncü aşama 6
2.5. EDM çevrimindeki beşinci aşama 6
2.6. EDM çevrimindeki altıncı aşama 7
2.7. EDM çevrimindeki yedinci aşama 8
2.8. EDM çevrimindeki sekizinci aşama 8
2.9. EDM çevrimindeki dokuzuncu aşama 9
2.10. Dalma erozyon tezgâhı şematik görünüm 10
2.11. Tel erozyonun şematik gösterimi 12
2.12. Tel erozyon tezgâhı çalışma prensibi 15
2.13. Çevrim süresi gösterimi 22
2.14. Hassas kesim çevrim adımları 26
3.1. 2^2 tasarım 32
3.2. RSM ısı basınç örneği 37
3.3. 2^2 CCD deneme düzeni 40
3.4. BBT sembolik gösterimi. 41
5.1. CPOH malzeme sınıflandırılması 53
5.2. CPOH çeliği 54
5.3. Taşlama tezgâhı 56
5.4. Cut 300 tel erozyon tezgâhı 57
5.5. Deneylerde kesimde kullanılan numune formu 58
5.6. Süreç parametrelerine ait balık kılçığı diyağramı 59
5.7. Yüzey pürüzlülük ölçme cihazı 61
5.8. Parça konumlandırılması ve fikstürü 62
6.1. A:Akım faktörünün Rz yanıtına etkisi 68
6.2. B: Puls On süresi faktörünün Rz yanıtına etkisi 69

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil **Sayfa**

6.3. D: Tel ilerleme hızı faktörünün Rz yanıtına etkisi 70
6.4. A: Akım faktörünün Ra yanıtına etkisi..... 74
6.5. Puls On süresinin Ra yanıtına etkisi 75
6.6. D: Tel ilerleme hızı faktörünün Ra yanıtına etkisi 76
6.7. A:Akım faktörünün kesme süresi yanıt değişkenine etkisi 80
6.8. B:Puls on süresi faktörünün kesme süresi yanıt değişkenine etkisi 81
6.9. D:Tel ilerleme hızı faktörünün kesme süresi yanıt değişkenine etkisi 82
6.10. Çekicilik değeri için yüzey grafiği (Akım ve Puls On süresi)..... 83

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge **Sayfa**

3.1. ANOVA tablosu 33
3.2. Merkezi Kompozit Tasarım eksen noktaları 39
3.3. İki faktörlü CCD deney düzeni 39
3.4. Üç değişkenli BBT örneği 41
5.1. Deneylerde kullanılan CPOH malzemeye ait kimyasal bileşim 53
5.2. CPOH ısıl işlem koşulları 55
5.3. Deney tasarımında kullanılan faktörler ve düzeyleri 60
6.1. CCD için deney planı 64
6.2. Rz yüzey pürüzlülüğü yanıt değişkeni için model seçimi 65
6.3. Rz yüzey pürüzlülüğü yanıtı için varyans analizi tablosu 66
6.4. Rz yüzey pürüzlülüğü yanıtı için R^2 değerleri 66
6.5. Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için model seçimi 71
6.6. Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için varyans analizi tablosu 72
6.7. Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için R^2 değerleri 73
6.8. Kesme süresi yanıtı için model seçimi 77
6.9. Kesme süresi yanıtı için varyans analizi tablosu 78
6.10. Kesme süresi yanıtı için R^2 değerleri 79
6.11. Tüm yanıtların birlikte yerel en iyi çözüm sonuçları 83
6.12. Yanıtlar için oluşturulan tahmin aralıkları 84

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltmalar	Açıklama
WEDM	Tel Erozyon Kesim
ANOVA	Varyans Analizi
EDM	Elektro Erozyon Yöntemi
CNC	Bilgisayarlı Sayısal Kontrol
RSM	Yanıt Yüzey Yöntemi
CCD	Merkezi Kompozit Tasarım
BBT	Box Behnken Tasarımı
ANN	Yapay Sinir Ağları
MRR	Talaş Kaldırma Oranı
SEM	Elektron Mikroskobu Taraması
WRR	Tel Aşınma Oranı
TWR	Tel Aşınma Oranı
SEM	Elektron Mikroskobu Taraması
SR	Yüzey Pürüzlülüğü
OC	Aşırı Kesim
CMM	Koordinat Ölçüm Cihazı
ANFIS	Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi
MRSN	Çok Amaçlı Sinyal Gürültü Oranı

1. GİRİŞ VE AMAÇ

Deney tasarımı endüstrinin gelişmesiyle süreçlerin daha etkin incelenmesi için giderek daha çok başvurulan ve iyi sonuçlar veren bir yöntemdir. Deney tasarımı sürecin ilgilenilen kalite karakteristiğine etki eden kontrol edilebilir değişkenlerin değerlerini sistematik olarak değiştirerek süreç performansını etkileyecek değişken değerlerini belirlemede kullanılan bir tekniktir. Aynı anda birçok faktörün etkisinin görülmesinde, faktörler arasında etkileşimlerin anlaşılmasında, kaliteyi, güvenilirliği etkileyen faktörlerin araştırılmasında, ürünün fonksiyonunu ya da sürecin işleyişini gösterecek hipotetik model kurulması gibi çok farklı alanlarda kullanılmaktadır.

Deney tasarımı özellikle, maliyetlerin yüksek ve işleme sürelerinin uzun olduğu süreçlerde en kısa sürede ve en düşük maliyette oldukça etkin çözümler sağlamaktadır. Deney tasarımı yönteminin birçok çeşidi vardır, bu yöntemlerden çalışma yapılacak olan sürece en uygun olanı seçilmelidir.

İmalat sanayinde, sac metal kalıplarının talaşlı imalat ile işlenmesinde en önemli süreç çıktısı yüzey pürüzlülüğüdür. Talaşlı imalat esnasında istenen sonuçları almak için tam ve güvenilir veri hayati bir önem taşımaktadır. Tel erozyon kesim (Wire Electrical Discharge Machining - WEDM) üretim şekli popüler ve geleneksel olmayan bir üretim metodu olarak ortaya çıkmıştır. Bu teknikle girift ve karmaşık şekilli ve sert olmasına rağmen iletken olan malzemeler işlenebilir. WEDM'in pazara giriş zamanı 1970'lere dayanmaktadır. Kalıpçılık, elektronik, otomotiv endüstrisi gibi birçok alanda işleme yaparak sektöre girmiştir. Endüstrinin hızla gelişmesiyle yüksek sertlikte ve dayanımda malzemeler geliştirilmiştir. Bu tip malzemelerin geleneksel imalat yöntemleri ile işlenebilirlikleri çok zordur. WEDM hem yüksek sertlikte hem de karmaşık şekilli malzemelerin işlenebilmesini sağlamaktadır. WEDM iletken malzemelerde elektro termal enerjiyi kullanmaktadır. İşleme esnasında elektronlar tel ile malzemeyi erozyona uğratarak talaş kaldırmaktadır, bu sırada ortamda dielektrik sıvı bulunur. İş parçasının kesilen kısımları tele çok yakındır, bu kısımlar kıvılcımlara ve yüzeyden eriyerek uzaklaştırılmış erimiş metallere maruz kalır. Bu yüzden, eriyen bölgenin malzeme özellikleri önemli bir karakteristiktir.

WEDM yöntemi bahsedilen yüksek teknik gerekliliklerin yanısıra yüksek maliyetli bir işleme tekniğidir. Bu yüzden makinanın kestiği iş paçasının en kısa sürede kesilmesi istenir. Bunun yanı sıra kesilen iş parçasının da yüksek ölçü doğruluğunda ve iyi yüzey kalitesinde olması beklenir.

Çalışmada hassas kesim kalıplarında çalışan bölgeler olan kesme, bükme ve form verme çeliklerinin malzemesi olarak kullanılan CPOH çeliğinin WEDM yöntemi ile işlenmesi incelenmiştir. Performans göstergeleri olarak yüzey pürüzlülük değerleri olan Rz ve Ra ile makina saat ücretlerinin de yüksek olmasından dolayı eniyilemek için kesme süresi seçilmiştir. CPOH çeliği sahip olduğu üstün özelliklerden dolayı işlemesi zor bir soğuk iş takım çeliğidir. Bu yüzden hem verilmek istenen profillerin girift olması hem de yüksek hassasiyet ile işleme gerektirmesinden dolayı WEDM tekniği ile işlenmektedir.

Çalışmanın ikinci bölümünde, üst dalı olan elektro erozyon yöntemi ve alt dalları, elektro erozyonun bir çeşidi olan tel erozyon yönteminden avantaj ve dezavantajlarından ayrıca hassas kesim metodundan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde deney tasarımı metodundan, Yanıt Yüzey Yöntemi ve Merkezi Kompozit tasarımından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde ise literatür araştırması yapılmış olup önceki çalışmalar ve kullanılan yöntemler hakkında bilgiler verilmiştir. Beşinci bölümde kullanılan materyaller, makinalar ve ölçüm cihazlarından bahsedilmiştir. Altıncı bölümde deneylerin Desin Exper programı ile analiz edilen sonuçları sunulmuştur. Faktörlerin etkileri ve seviyeleri incelenmiş, grafikler oluşturulmuştur. Yedinci bölümde ise analiz sonuçlarına ve ileriki çalışmalar için önerilere yer verilmiştir.

2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde tez çalışmasının ana konusu olan elektro erozyon yöntemi hakkında genel bilgiler ayrıca bir elektro erozyon yöntemi olan tel erozyon yöntemi hakkında ise detaylı bilgiler verilecektir. Deneylerde hassas kesim kalıp malzemelerinden CPOH çeliği kullanıldığı için, hassas kesim yönteminden de bahsedilmiştir.

2.1. Elektro Erozyon Yöntemi

18. yüzyılın sonlarına doğru 1770 yıllarında İngiliz bir fizikçi olan Joseph Priestley, zamanının bulunan metalleri üzerinde yaptığı çalışmada, elektrik deşarjının aşındırıcı etkisini gözlemlemiştir. Priestley'in elektrik kontaklarında aşındırıcı etki üzerine yapmış olduğu çalışmaları temel alarak, Sovyet araştırmacılar B.R. ve N.I. Lazarenko elektriksel deşarjın aşındırıcı etkisini kullanarak metal işleme konusunda kontrollü bir süreç geliştirme fikrine varmışlardır. Böylece ilk bilimsel çalışmalar yapılarak ve konu üzerine temeller atılarak 20. yüzyıla gelinmiştir. Bu süreç başarı ile gerçekleştikten sonra 1952 yılında üretici Charmilles'in, elektro erozyon işlemeye ilgisinden dolayı ilk olarak buamaca yönelik makine üretilmiş ve 1955 yılında Milan Avrupa Takım Tezgahları Fuarı'nda sergilenmiştir (Özkul, 2012).

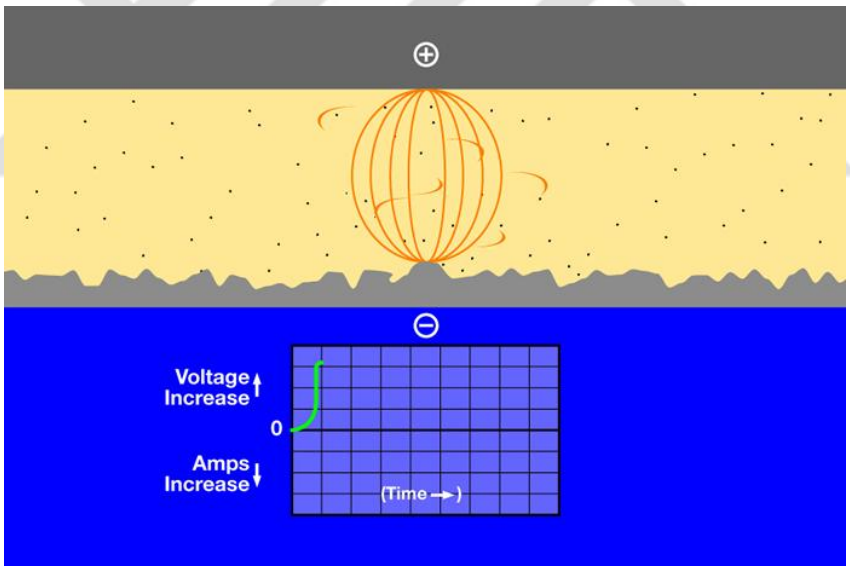
Kullanıma başlanma tarihi günümüze çok yakın olan bu teknik, aşındırıcı takım görevini yapan bir tel elektrot ile iş parçası arasında meydana gelen kıvılcım çevrimi sayesinde talaş kaldırmaktadır. Kıvılcımlar, malzeme yüzeyinden ergiterek kaldırdırdığı materyali mikron seviyesinde aşındırma ile şekillendirme işlemini gerçekleştirir. EDM sırasında elektrot ile iş parçası arasındaki mesafe 0,0125 mm ile 0,05 mm arasındadır, diğer bir ifadeyler, iş parçası ile elektrot birbirlerine temas etmezler. Bu mesafe takım ve iş parçası arasında elektrik arkı oluşması için yeterlidir. Ortamdan malzeme ve kalıntı uzaklaştırmasını ise dielektrik sıvısı yapmaktadır. Takım olarak kullanılan elektrot katot, iş parçası ise anot olarak yüklüdür (Özkul, 2012).

Aşındırıcı takım ile iş parçasının birbirine temas etmemesi bu yöntemin avantajlarından biridir, bu nokta ilerleyen bölümlerde karşılatırmalı olarak daha detaylı verilecektir.

2.1.1. Talaş kaldırma mekanizması

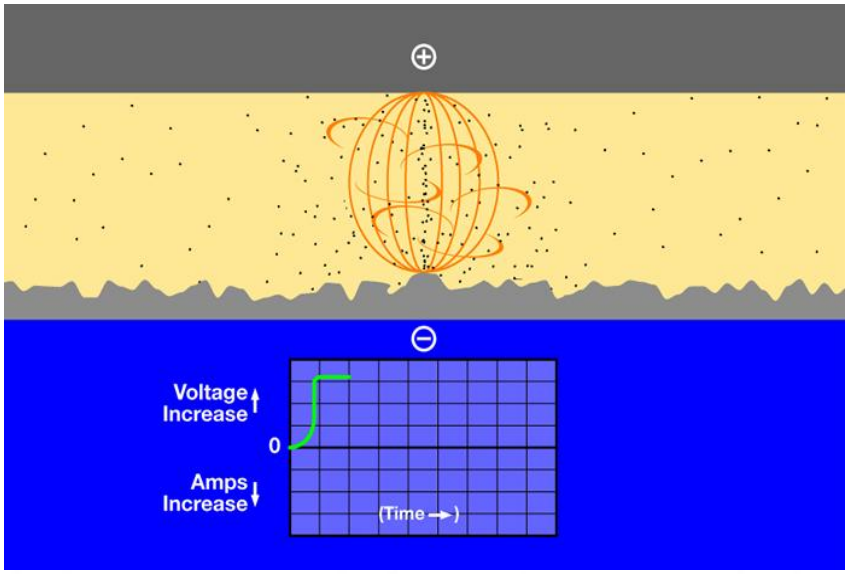
Elektro erozyon işlemede (Electrical Discharge Machining - EDM) talaş kaldırma çevrimi dokuz adımda gerçekleşmektedir. Bu çevrim mikro saniyeler mertebesinde ardışık meydana gelen on ve off düzeninden oluşmaktadır ve saniyede iki yüz elli bin defa gerçekleşmesi ile iş parçasından talaş kaldırmaktadır.

İzleyen grafikler temsili olarak bu çevrimi ifade etmektedir ve çevrim esnasındaki akım ve voltajın konumunu göstermektedir.



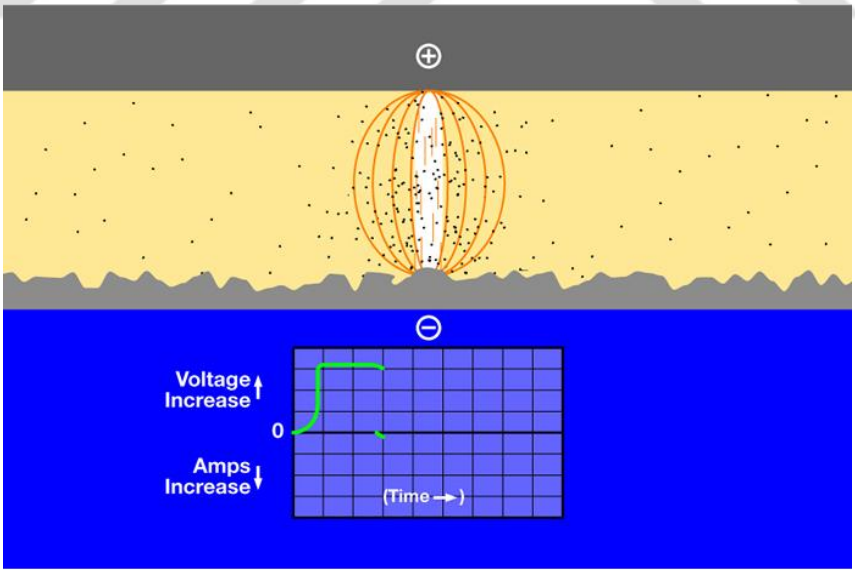
Şekil 0.1. EDM çevrimindeki birinci aşama (Anonim, 2012)

Yüklü elektrot iş parçasının yanına yaklaştırılır, EDM teknolojisinde dielektrik sıvı olarak bilinen yalıtkan sıvı iş parçası ve elektrot arasındadır. İş parçası ve elektrot birbirine temas etmez. Şekil 2.1'de görüldüğü gibi bu aşamada voltaj artmaktadır ancak akım sıfır konumundadır. Ancak yeterince büyük bir elektrik potansiyeli bu yalıtkanlık özelliğini bozarak iş parçasından parçalar kopmasına neden olabilir (Anonim, 2012).



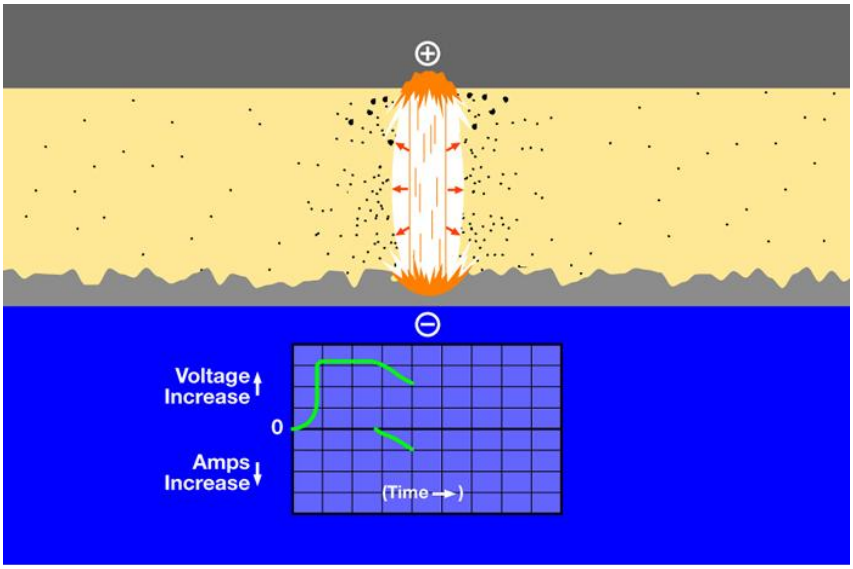
Şekil 0.2. EDM çevrimindeki ikinci aşama (Anonim, 2012).

Şekil 2.2'de ise voltaj maksimum noktaya ulaşmıştır fakat akım halen sıfırdadır (Anonim,2012). Bu safhada iyonik parçacıkların sayısı artarken, dielektrik sıvının yalıtkanlık özelliği alanının en güçlü kısmında merkezlenmiş dar bir kanal boyunca azalmaya başlar.



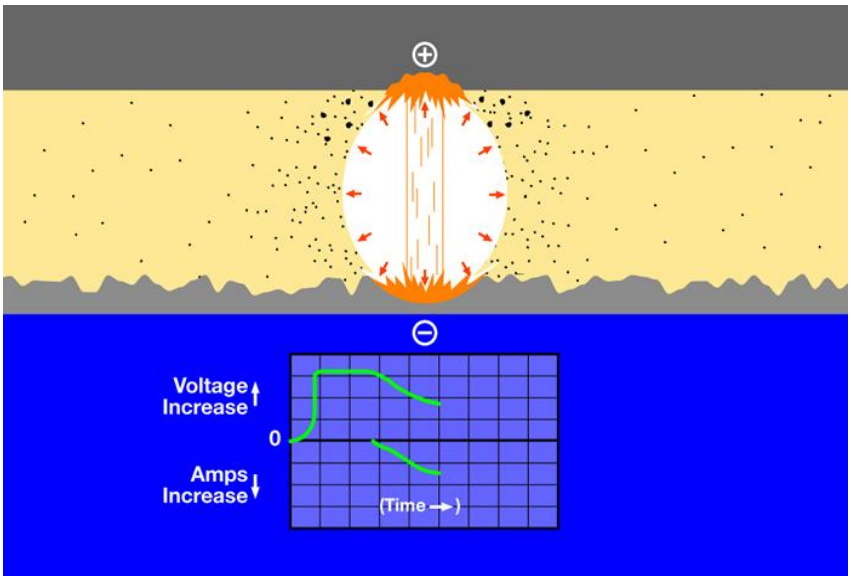
Şekil 0.3. EDM çevrimindeki üçüncü aşama (Anonim, 2012).

Şekil 2.3'te ise voltajın azalmaya başlama safhasına geçtiği, akımın ise dielektrik sıvının yalıtkalınk özelliğini aşarak iş parçası ile elektrot arasında kıvılcım oluşmaya başladığı görülür (Anonim, 2012).



Şekil 0.4. EDM çevrimindeki dördüncü aşama (Anonim, 2012).

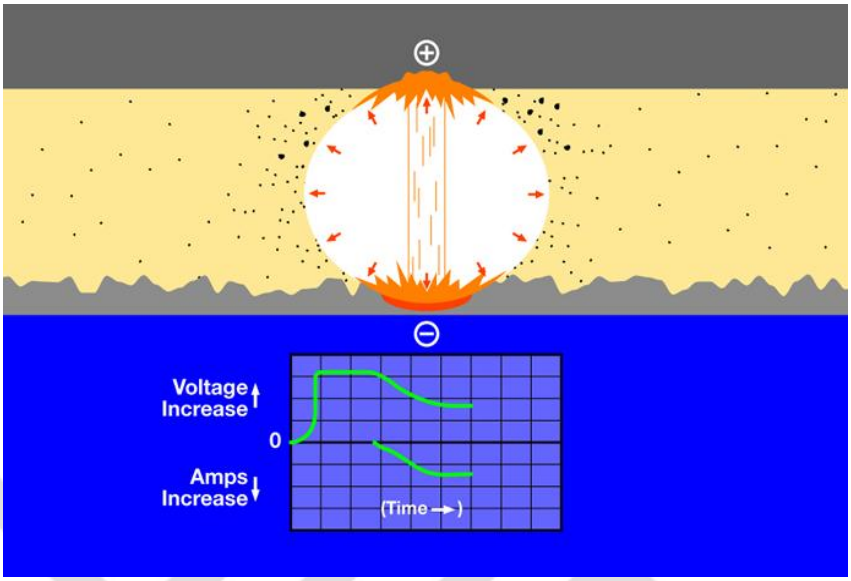
Şekil 2.4.'te görüldüğü üzere akım artmaya devam etmekte voltaj ise düşmeye devam etmektedir. Bu safhada akımın artışına bağlı olarak hızlı bir şekilde sıcaklık oluşmaktadır. Oluşan sıcaklık ile iş parçasından ve elektrottan biraz aşınma ve dielektrik sıvıdan bir kısım buharlaşma meydana gelir. Böylece iş parçası ile elektrot arasında dar bir boşaltım kanalı oluşmaya başlar (Evran, 2009).



Şekil 0.5. EDM çevrimindeki beşinci aşama (Anonim, 2012).

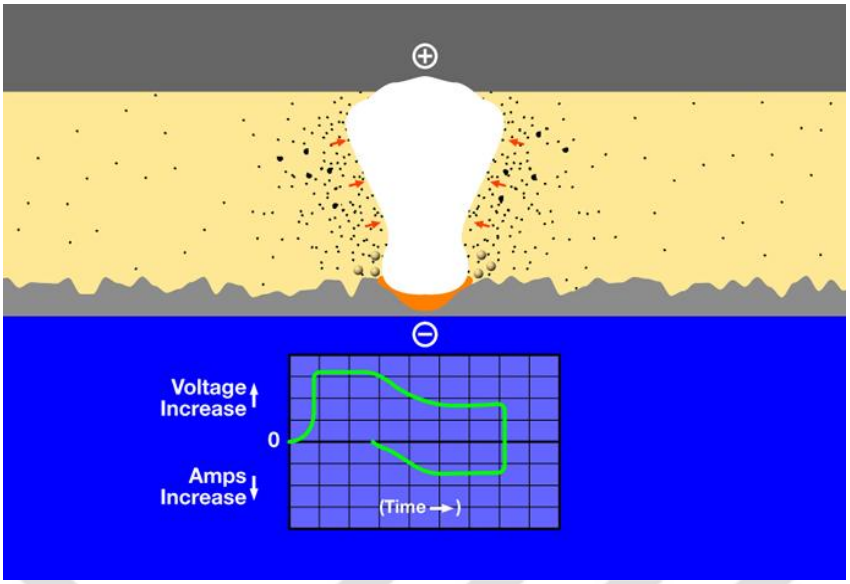
Şekil 2.5'te akım yükselmeye devam ederken voltajın düştüğü görülmektedir. Ayrıca bu şekilde görüldüğü üzere bir buhar baloncuğu dışarı doğru genişlemeye çalışmaktadır. Ancak iyonların baskısı ile boşaltım kanalına doğru bu genişleme

sınırlandırılır ve bu iyonlar son derece yoğun elektro manyetik alan tarafından çekilmektedir (Evran, 2009).



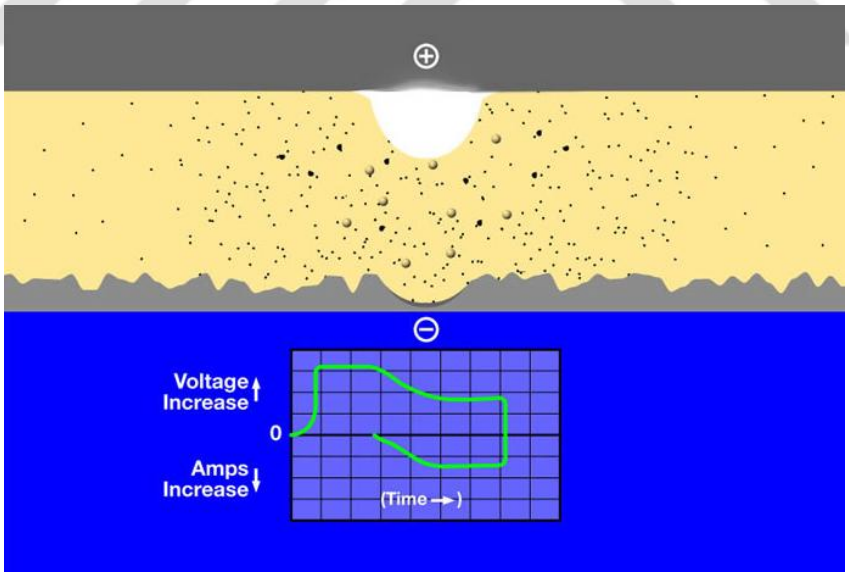
Şekil 0.6. EDM çevrimindeki altıncı aşama (Anonim, 2012).

Şekil 2.6'da puls on/ton on süresinin sonlarına doğru akım ve voltajın dengeli hale geldiği görülmektedir. Bu aşamada buhar baloncuğunun içindeki ısı ile basınç maksimum düzeye ulaşmış böylece bir miktar talaş kaldırılmış olup metal, boşaltım kanalı altında erğimiş bir halde bulunmaktadır ancak buhar baloncuğunun basıncı ile yerinde tutulmaktadır. Bu safhada boşaltım kanalı içinden yoğun bir akım geçen karbon, dielektrik sıvı ve buharlaştırılmış bir metalden oluşan ısıtılmış bir plazma şeklindedir (Evran, 2009).



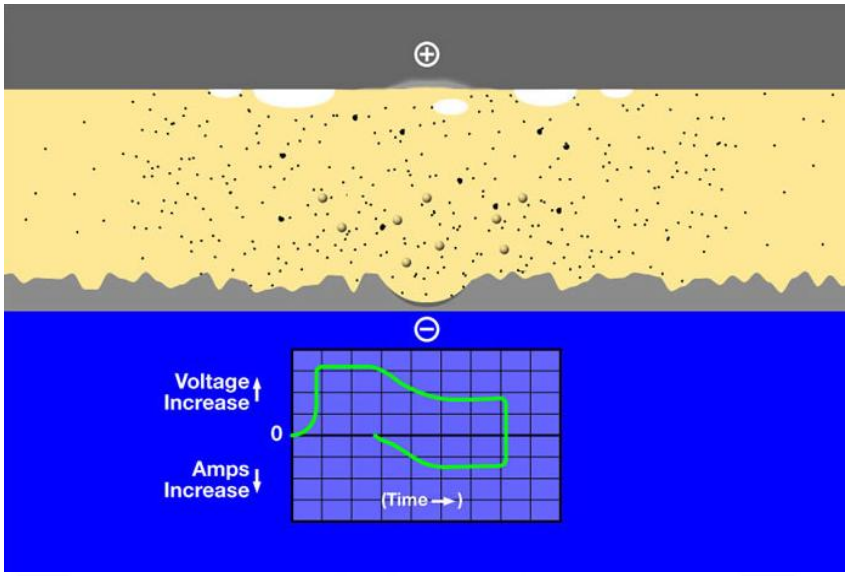
Şekil 0.7. EDM çevrimindeki yedinci aşama (Anonim, 2012).

Şekil 2.7.'de puls off/ton off süresinin başlangıcında akım ve voltajın sıfıra düşüşü görülmektedir. Bu safhada sıcaklık hızlı bir şekilde azalır, buhar baloncuğu sönmeye başlar ve böylece iş parçasından erimiş metal ortamdan uzaklaştırılır (Evran, 2009).



Şekil 0.8. EDM çevrimindeki sekizinci aşama (Anonim, 2012).

Şekil 2.8'de dielektrik sıvı içeri dalarak parçacıkları dışarı püskürtür ve böylece iş parçasını soğutarak erimiş metal nedeni ile yeni bir tabakanın oluşması gerçekleşir (Evran, 2009).



Şekil 0.9. EDM çevrimindeki dokuzuncu aşama (Anonim, 2012).

Şekil 2.9'da ise iş parçasından atılan metal küçük küreler şeklinde dielektrik sıvı içerisinde katılaşır. Kalan buhar ise yüzeye yükselir. Yeterli bir puls ara /ton off süresi olmaz ise kalıntılar ara bölgeden uzaklaşamayacak ve böylece iş parçası ve elektrotta hasar oluşabilecektir (Evran, 2009). Bu durumda iş parçasında yüzey pürüzlülük değeri artarken, tel elektrotta ise kırılmalar meydana gelebilmektedir.

2.1.2. Elektro erozyon çeşitleri

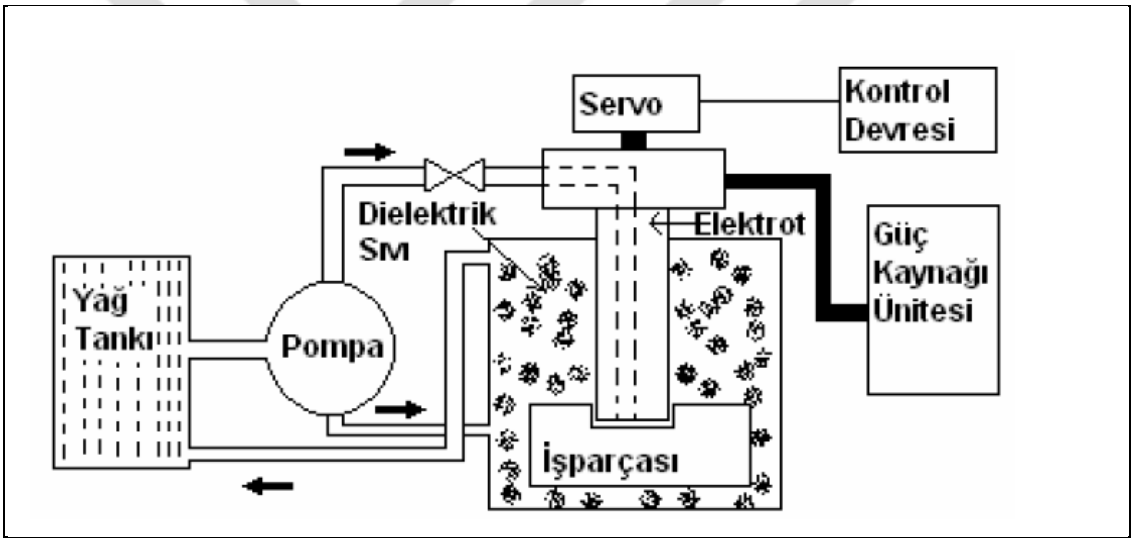
Yüksek hassasiyette iş parçası işleme yeteneğine sahip olan bu talaşlı imalat yönteminin çeşitleri mevcuttur. Aşağıda bu yöntemin çeşitlerinden bahsedilecektir.

2.1.2.1. Elektro erozyon

Gelişen endüstrinin ihtiyacını karşılamak için yeni tür malzemeler ortaya çıkmıştır. Bu malzemelere örnek olarak süper alaşımlar, medikal sanayinde kullanılan malzemeler veya yüksek dayanımlı özel çelikler verilebilir. Bu malzemeler yüksek dayanım, sertlik, termal koşullarda oluşabilecek korozyona karşı dirençli olma ya da fazla yük altında çalışan mekanizmalarda uzun süreler dayanabilme özelliklerine sahiptir. İşte bu ek özellikler malzemelerin aynı zamanda işlenebilirliklerini zorlaştırmıştır.

Bu noktada günümüzde EDM yaygın olarak kullanılan ve geleneksel işleme yöntemlerinin dışında bir talaşlı imalat tekniğidir. Özellikle CNC ve benzeri tezgâhlarda yapılması zor olan parçaların, çok sert malzemelerin ve karmaşık biçimlerin kolaylıkla işlenebilmesi bu yöntemin kullanımını yaygınlaştırmıştır. EDM tezgâhında, kontrollü elektrik arklarıyla talaş kaldırılır. Her bir ark iş parçası üzerinde küçük bir krater meydana getirir. Arkın sürekli dolaşmasıyla şablonun (takım) şekli karşı tarafa geçirilir. Klasik tezgâhların aksine bu teknikle sertleştirilmiş parçalar ve sert maden uçlar kolaylıkla işlenebilir. Bu özellik, tezgâha çok önemli bir uygulama sahası açmaktadır (Coşkun ve Işık, 2008).

Şekil 2.10'da dalma erozyon tezgâhının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 0.10. Dalma erozyon tezgâhı şematik görünüm

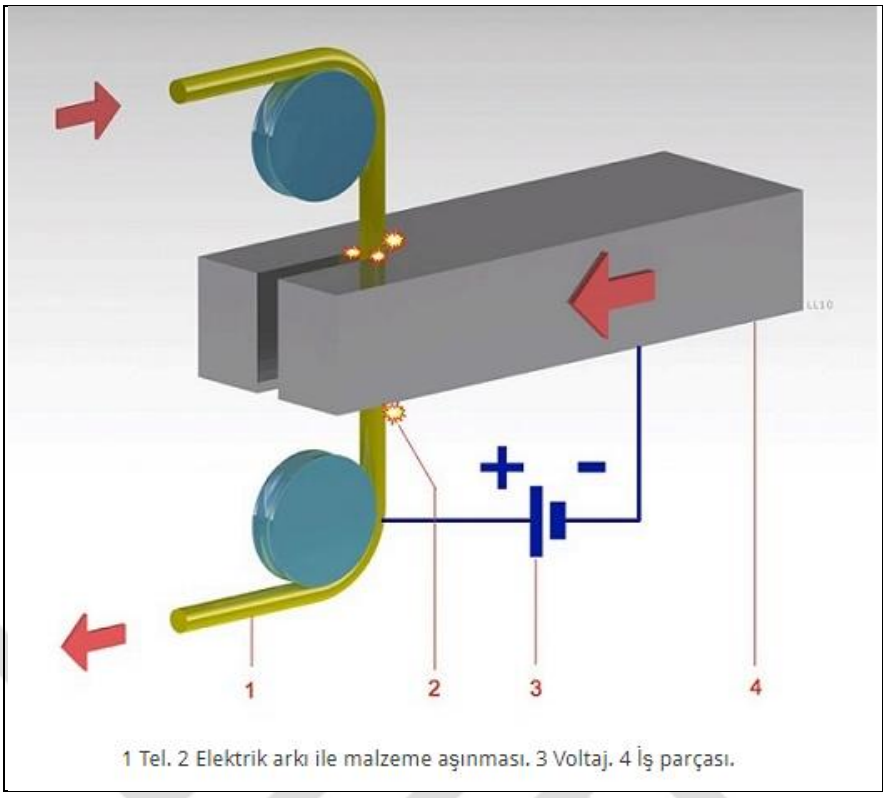
EDM tezgâhının önemli bir avantajı da kesme kuvvetinin olmamasıdır. Kesme kuvveti olmadığı için titreşimler meydana gelmemekte ve hassasiyet artmaktadır.

Çoğunlukla, bakır elektrot olan takım katot (-), çelik iş parçası ise anottur (+). Fakat çelik elektrotlar, alüminyum elektrotlar, çelik işlemede kullanılan tungsten ve bakır elektrotlar ile kaba işlem için kullanılan grafit elektrotlar bu genellemenin dışındadır. Bu elektrotlar (+) yüklü, ters kutuplu takımlar olarak kullanılabilir (Baylan, 2015).

2.1.2.2. Tel erozyon

Tel erozyon, üzerinden yüksek yoğunlukta akım geçirilen pirinç, bakır gibi yüksek iletkenliğe sahip bir tel yardımıyla kesme yöntemidir. Geleneksel olmayan imal usulleri arasında yer alan bu yöntemle, sert ve karmaşık profilli iletken parçaların mikron hassasiyetinde işlenebilmesi mümkündür. Bu tezgâhlarda, farklı elektriksel kutuplara bağlanan tel elektrot, iş parçasına yaklaştırıldığında elektriksel boşalımlarla yüksek bir sıcaklık meydana gelmekte ve yerel metal ergime yolu ile talaş kaldırılmaktadır. Talaş kaldırma hızı, her bir kıvılcımdaki enerji miktarı ve her kıvılcımın zaman aralığına göre değişmektedir (Doğan, 2010).

Günümüzde tel erozyon teknolojisi, üretim mühendisliği alanında önemli bir rol oynamaya başlamıştır. Bu tezgâhlar, sanayide yapımı zor veya karmaşık olan birçok iş parçasının oldukça düşük yüzey pürüzlülüğünde üretilmesinde kolaylık sağlamaktadır. Ancak yapılan araştırmalarda yüzey pürüzlülüğünün işleme parametreleriyle yakından ilgili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca klasik işleme yöntemlerine göre imalatı zor olan sert malzemelerin iletken olmak şartıyla işlenebilmesinden dolayı, özellikle kalıp elemanlarının ısıl işlem gördükten sonra işlenebilmesini mümkün kılmaktadır (Baylan, 2015). Tel erozyonun şematik gösterimi Şekil 2.11'de verilmiştir.



Şekil 0.11. Tel erozyonun şematik gösterimi (Baylan, 2015).

WEDM alt ve üstte Şekil 2.11'de görüldüğü gibi iki sarıcı makara yardımıyla hareket eden elektrodun, elektrik enerjisiyle meydana gelen ısı vasıtasıyla malzemeden talaş kaldıran bir yöntemdir.

2.1.2.3. Freze erozyon

Bu yeni yöntem, bir freze çakısı gibi kendi ekseni etrafında dönen bir silindirik elektrot yardımıyla elektro boşalımlarla şekil verme işlemidir. Dişi kalıp imalatında, istenen derinlik verilmek suretiyle kalıp çerçevesi ve iç kısım kolaylıkla işlenebilir. Talaş kaldırma şekli elektro erozyon yani dalma erozyona benzerdir. Freze erozyonda standart silindirik elektrotlar kullanılarak, karmaşık elektrot tiplerinin imalatları ve maliyetleri azaltılmıştır (Doğan, 2010).

2.1.2.4. Taşlama erozyon

Dönel erozyon olarak da bilinen bu erozyon yönteminde, abrasiv taşlama taşı elektrik iletkenliği olan bir tekerlek, takım elektrotu olarak kullanılmaktadır. Taşlama

yöntemine benzer şekilde elektro boşalımlarla iş parçası şekillenir. Bu yöntem, karpitler ve çesitli elmas formları gibi kesici takımların bilenmesinde tercih edilmektedir (Doğan, 2010).

2.1.2.5. Ultrasonik destekli erozyon

Bu yöntem, ultrasonik frekanslarla titreyen bir takım elektrotu kullanılarak elektriksel boşalımlarla talaş kaldırma yöntemidir. Ultrasonik titreşim, küçük ya da mikro düzeydeki deliklerin delinmesinde mükemmel bir işleme kararlılığı ve sürekliliği sağlar (Doğan, 2010).

2.1.2.6. Oyma erozyon

Bu yöntem iş parçasının içine doğru ilerleyen bir delik ya da bir eğri olarak tanımlanmış bir yolda işlem yapabilme yeteneğine sahip bir sistemdir. Sistem, sanki yere bir tünel kazarcasına, parçayı işleyebildiğinden oldukça orijinaldir. Oyma erozyon tezgâhında kullanılan elektrotun şekli eğilebilen bir çubuk gibidir (Doğan, 2010).

2.1.2.7. Mikro elektro erozyon

Mikro elektro erozyon, dalma erozyonunun küçük bir şekli olarak ele alınabilir. Bu yöntemde takım elektrotu 10.000 rpm kadar döndürülerek V kanalları kolaylıkla işlenebilir. 5 mikrondan daha küçük elektrot çapları mevcuttur. Farklı şekillerin ve mikro deliklerin işlenmesinde kullanılır. Elektrotlar tel erozyonu olarak bilinen yöntemin aksine zıt kutuplu olarak yapılmışlardır. En yaygın olan Mikro erozyon elektrotları 20 Zm ile 250 Zm arasında değişmektedir. Mikro erozyonun en önemli üretim alanlarından bir tanesi de X-Y-Z eksenlerinde hareket eden bir bilgisayarlı sayısal kontrol (CNC) programıyla 1 Zm toleranslı parçaları imal etmektir. Mikro elektro erozyon ± 1-2 Zm toleransında 10 Zm ile 200 Zm arasındaki delikleri delebilmektedir. Bu işlemin çok küçük ve hassas olması nedeniyle, mikro elektro erozyon uygulamaları mikroskopla incelenebilir (Doğan, 2010).

2.1.2.8. Mikro tel erozyon

Bu yöntemde çapı, 10 μm kadar olan bir tungsten tel elektrotu kullanılır. Bu sistemle ölçüleri 0,1-1 mm arasında değişen ince plakalar işlenmektedir. Bu makineler oldukça düşük enerji seviyelerinde kontrol edilebilen bir görüntüleme sistemi, enerji jeneratörü ve hareket eden bir tel elektrotundan ibarettir (İmamoğlu, 2007).

2.2. Tel Erozyon Yöntemi

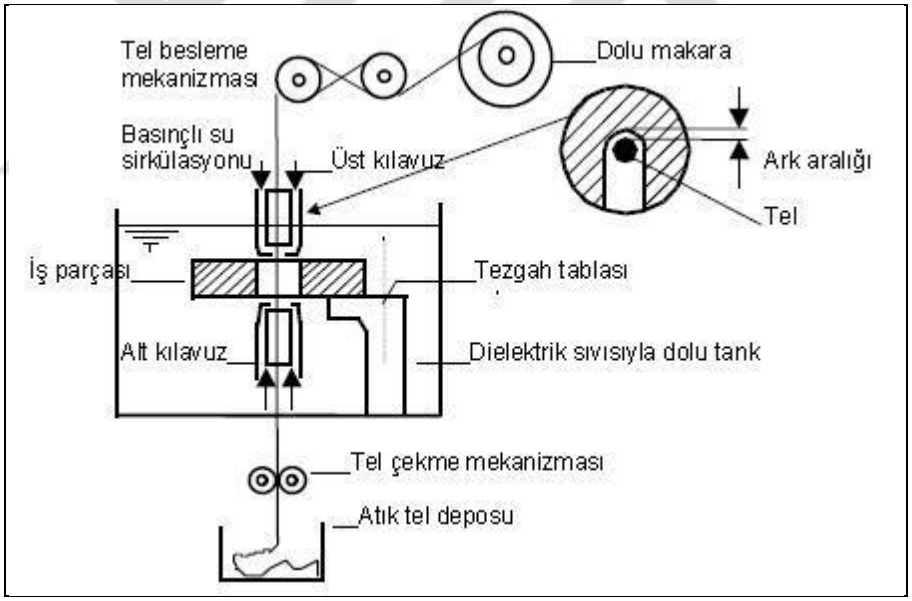
Tel erozyonla işleme, bugün endüstride kullanılan, geniş bir alanda tanınmış ve geleneksel olmayan işleme yöntemidir. Tel erozyon, geleneksel elektro erozyonla işlemenin özel bir şeklidir. Elektro erozyonla işleme ile tel erozyonla işlemenin talaşş kaldırma mekanizmaları benzerlik gösterdigi halde, işlevsel karakteristikleri aynı değildir. Tel erozyon tezgâhı, bir mikro işlemci tarafından yönetilen ve iş parçası içinde kesintisiz olarak gezinen ince bir tel elektrot kullanır. WEDM, ısı etkili bir işleme tekniğidir. Bu yöntemde, dielektrik sıvı içindeki tel elektrot ve iş parçası arasında fiziksel temas olmaksızın işleme süreci boyunca tel, iş parçasını ardışık kıvılcımlarla aşındırmak sureti ile üretilecek parçaya istenilen boyutsal özellikleri kazandırır (Doğan, 2010).

Bu yöntemin ortaya çıkmasını sanayi şartlarındaki gelişmeler tetiklemiştir. Şöyle ki günümüz de makina endüstrisindeki gelişmeler malzemelerden yüksek dayanım, sertlik ve etki direnci beklemektedir. Fakat bu tip malzemelrin ise geleneksel yöntemler ile işlenmesi zordur. Yeni nesil malzeme üretim alanında yüksek dayanımlı fakat düşük ağırlıklı malzeme üretimi ön plana çıkmıştır. Bazen bu malzemelerin işlenebilirliği zor olmaktadır. WEDM yüksek ölçüsel doğruluk ve yüzey kalitesini elde etmede kalıp ve aparat yapımında mikro ölçekteki parça üretmede en iyi çözümü sunmaktadır. WEDM geleneksel olmayan, termo elektrik bir süreçtir ki bu süreçte talaş iş parçasından peş peşe gelen kıvılvımlarla kaldırılır ve iş parçası ve ince elektrot yoğun olmayan bir diiyonize sıvı içerisindedir. Dielektik sıvı sürekli olarak ergimiş metali ortamdan uzaklaştırmaktadır. Tel elektrot sürekli olarak CNC kontrollü bir sistem ile ortama beslenmektedir. Makinanın güç sağlayıcı sisteminden hızlı bir döngüde elektriksel kıvılcımlar gönderilir. Bu kıvılcımlar iş parçası ve elektrot arasında yüksek bir ısı oluşumu sağlar ve sürekli olarak ergimiş metal oluşturur, bu işlem saniyede yirmi beş bin kere gerçekleşir. İş parçası ve elektrot daima

birbirinden ayrı temassızdır. Kullanılan tel aşağıdan tekrardan sarılır ve bu tel bir daha ölçüsel kararsızlığından dolayı kullanılmaz. Dielektrik sıvı hem ortamdan ergimiş metali uzaklaştırır hem de soğutma işlemini gerçekleştirir (Goswami ve Kumar, 2014).

Tel ile iş parçası arasındaki kıvılcım boşluğu 0,025-0,05 mm arasında değişmektedir. Bu yöntem uzay, uzay-havacılık, otomotiv ve tıp alanında kullanılmaktadır (Kandpal vd., 2017).

WEDM çok dar toleransları sağlama kapasitesi, mükemmel yüzey kalitesi, diğer yöntemlerle işlemek için aşırı sert kalan çeliklerin işlenmesi, uzay havacılık sektöründe kullanılan alaşımlar ve iletken seramiklerin kesilmesi için kullanılan en popüler konvansiyonel olmayan talaşlı imalat yöntemidir (Conde vd., 2018). Şekil 2.12'de WEDM tezgâhının işleme prensibi verilmiştir.



Şekil 0.12. Tel erozyon tezgâhı çalışma prensibi (Yurtkuran, 2011)

WEDM'in Şekil 2.12'de verilen şematik gösteriminde, iki sarıcı bobininin klavuzlamasıyla hareket eden tel elektrot, iş parçasının bağlı bulunduğu tabla ve soğutucu dielektrik sıvı ile dolu tank vardır. Akım geçirilmesiyle deforme olan telin biriktirildiği atık tel deposuda Şekil 2.12'de gösterilmiştir.

2.2.1. WEDM'in Avantaj ve Dezavantajları

Tel erozyonla işlemenin bazı avantajlarından aşağıda bahsedilmiştir.

- Tel elektrot yardımı ile karmaşık şekilli parçaların işlenmesi yüksek hassaslıkta (doğrulukta) gerçekleşebilir. Kesme yüzeyinde açı değiştirilerek değişken kalınlığa sahip malzemeler üretmek de mümkündür. Bu kalınlık değişimi konvansiyonel tezgâhlarda özel takımlar (yüksek dayanımlı, özel imal edilen uçlar ve şekiller) gerektirirken, tel erozyon tezgâhı böyle özel bir takım gerektirmez.

- Bu işleme tekniği sayesinde değişken sertlikte veya karmaşık şekildeki parçaların mikron hassasiyetinde işlenmesi mümkündür. Bu hassas işleme hem yöntemin metodunun özel olmasının yanı sıra, temas olmadan kesimden ve herhangi bir takımın mekanik kuvvet kullanmadan talaş kaldırmasından dolayı meydana gelmeyen titreşimler nedeniyle de ölçüsel tamlık ve hassasiyet sağlanmaktadır. Titreşimin meydana getirdiği ölçü hataları oluşmadığı için hassasiyet sağlanmaktadır.

- Bilinen diğer işleme yöntemleriyle (klasik yöntemlerle) işlenmesi çok zor olan, keskin kenarlara sahip parçaların işlenmesi için tel erozyon yöntemi doğru tercihtir. Tel erozyon tezgâhına ait bu teknoloji, çok tercih edilen ve temassız talaş kaldırma yöntemlerinden biri olan geleneksel elektro erozyonla işleme kıvılcımı olgusu üzerine temellendirilmiştir (Doğan, 2010).

- Tel erozyonla işleme süreci ile yüksek sertlikte ve sıcaklığa dayanıklı (HSTR) malzemeleri işlemek ve ısıl işlemden kaynaklanan geometri değişimlerini engellemek mümkündür. Geleneksel talaş kaldırma yöntemleri önce işlemeyi yapar, sonra sertlik sağlamak için iş parçası, ısıl işleme tabi tutulur. Isıl işleme esnasında da parça geometrisinde çeşitli değişimler meydana gelir, ölçüsel bozukluklar oluşabilir. Sonradan ısıl işlem yapılmasının nedeni ise takımın iş parçasını kesebileceği sertlikte malzemenin olmasını sağlamaktır. Ancak tel erozyon böyle bir gerekliliğe ihtiyaç duymaz.

- Geleneksel yöntemler ile işlemeden sonra bazı bileşenler için gereken taşlama ile elde edilen düşük yüzey pürüzlülüğü bu yöntem için gerekmemektedir.

- Tel erozyonla işleme, yüksek hızlarda ayna ve iş parçasının dönme tehlikesi, keskin talaşların oluşması ve büyük freze çakılarının kullanımı söz konusu olmadığından iş güvenliği açısından da bir avantaj sağlamaktadır (Doğan, 2010).

- Başka metotlarla işlenmesi hayli zor olan malzemelerden, pahalı taşlama operasyonuna veya yüksek maliyetli elektro erozyon elektrotu imal etmeye ihtiyaç duymadan, tel erozyon teknolojisi sayesinde karmaşık kesimler gerçekleştirmek mümkün olmaktadır.

- Termoelektrik bir yöntem olan tel erozyon yönteminde iş parçasından talaş kaldırmak için kullanılan ve sürekli hareket eden tel elektrot; bakır, pirinç veya volfram malzemeden 0,05-0,3 mm çap aralığında yapılarak, bu çaplarla işlenen malzemede çok küçük köşe yarıçapları elde edilebilmektedir.

- Tel erozyonla iş parçasından talaş, elektro termal enerji ile kaldırıldığı için, talaş kaldırma oranı elektrik iletkenliğine ve iş parçasının ergime sıcaklığına bağlıdır. Yüksek elektrik iletkenliği ve düşük ergime sıcaklığına sahip malzemeler, tel erozyon ile daha etkili işlenebildigi gibi, mukavemeti veya sertliği; takım kırılmasına veya sürecin aksamasına etki etmez (Doğan, 2010).

- Nikel temelli alaşımlar, günümüzde üretilen havacılık sektörü bileşenlerinde yüksek çekme mukavemeti, yüksek yorulma direnci, ısı ve korozyona karşı direnci sebebiyle sıklıkla kullanılmaktadır. Bu özellikleri ile birlikte geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile kesim işlemleri zordur. WEDM, bu tip malzemeleri sertliğine rağmen işlemede kullanılan en iyi geleneksel olmayan yöntemlerdendir (Chen vd., 2017).

Tel erozyon tezgâhının avantajlarının yanında dezavantajlarda mevcuttur bunlar aşağıdaki şekilde sıralanabilir.

- Kesme hızı geleneksel konvansiyonel tezgâhlara göre düşüktür. Ancak teknolojinin hızlı ilerlemesi sayesinde zaman içinde bunun da aşılabilmesi mümkündür.

- Tezgâhın ilk yatırım maliyeti yüksek ve tezgâhı programlamak ve kullanmak için kalifiye eleman gerekir. Ancak günümüzde CNC torna ve frezelerde de aynı dezavantaj aslında bulunmaktadır.

- Yalıtkan malzemelerin işlenmesi mümkün değildir.

- Tel elektrotun iş parçasının üst ve altından boydan boya geçmesi gerektigi için kör delik, oyuk türü detaylar ve çok büyük parçaların işlenmesi mümkün değildir (İmamoğlu, 2007).

- İşlenmiş köşelerde, tel çapına ve servo motorun hassasiyetine göre radyüs oluşur. Eğer iş parçası kalıp ve benzeri üretim araçlarında kullanılacaksa bu çoğunlukla göz ardı edilebilir, ancak kesilen parçanın kendisi bir komponenet oluşturacaksa birden fazla kesim gerektirir ve istenmeyen bir yuvarlanma çok minimize ölçülerde de olsa oluşmaktadır.

- Tel erozyon çok sayıda parametre tarafından kontrol edilir. Deşarj enerjisi, deşarj akımı, aralık voltajı, puls ara süresi ve elektrot karakteristikleri tezgâh parametrelerinin bir fonksiyonudur. Tek bir faktör bile sonuca etki edebilmektedir. Bu parametrelerin ve diğer kontrol faktörlerinin yanlış ayarlanması, arzu edilmeyen yüzey hasarlarına ve düşük işleme hızlarına sebep olmaktadır (Evran, 2009).

2.2.2. WEDM uygulama alanları

WEDM yöntemi birçok alanda hem geleneksel yöntemler ile işlemeyle birlikte kullanılmakta hem de geleneksel tornalama, frezeleme gibi talaş kaldırma işlemlerinin yeteneklerinin dışında kalan noktalarda fayda sağlamaktadır. Alt bölümlerde bu alanlardan bahsedilecektir.

2.2.2.1. Kalıp ve kalıp parçaları

Tel erozyon yöntemi ile klasik üretim tezgâhlarında imalatı mümkün olmayan karmaşık profillerin kalıpları ve kalıp parçalarının üretilmesi mümkündür. Bu yöntemde zımba ve kalıp aynı anda kesilebilir ve zaman kaybı ortadan kaldırılarak işleme süreci

hızlanır ve hassasiyeti artar. Sac pres kalıplarının malzemleri tel erozyonla ısıl işlem sonrası, sertlik artmasına rağmen kolaylıkla kesilebilir. Isıl işlem sonrası kesim yapıldığı için, malzemede sonradan meydana gelebilecek atıklıklar ve ölçü bozuklukları engellenebilir. Ekstrüzyon kalıpların imalatında ise frezeleme ve taşlama tezgâhları kullanılmaktadır. Bu pahalı işlem, tel erozyon yönteminin kullanımı ile ortadan kalkmaktadır. Kalıp imalatında tel erozyon kullanımı önemli tasarruflar sağlar.

Bu çalışmada da genel anlamda kalıp imalatında kullanlan özel bir çeliğin (CPOH) deneysel incelemesi yapılmıştır. Kullanılan çeliğin özelliği sac metal kalıpçılığının bir alt kolu olan hassas kesim (fine blanking) kalıplarında yüksek aşınma direnci olmasından dolayı tercih edilmesidir. Hem yöntem hem de kullanılan çelik son yıllarda imalat endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır ve üzerine çok az çalışma yapılmıştır.

2.2.2.2. Prototip imalatı

Prototipler kitlesel imalat yöntemleri ile üretilmeleri maliyet ve zaman kaybı nedeniyle tercih edilmezler. Geleneksel talaşlı imalat veya pres kalıp yöntemleri ile prototip üretmek için takım, aparat, kalıp ve fikstür gerektirdiği için hem zaman harcanmasına hem de yüksek maliyetlere yol açar. Tüm bu gereklilikler olmadan WEDM ile aynı anda veya tek tek hızlı bir şekilde prototip imalatı gerçekleştirilebilir. Yapılan prototiplerde herhangi bir yenilenme gerektiğinde ise aparat ve fikstür olmadığından dolayı bir değişiklik gerekliliği olmadan sadece CAM değişimi ile beklenen yeni revizyondaki prototip üretilebilir.

2.2.2.3. Torna takımları

Torna takımları çelik bir gövde üzerinde lehimlenmiş karbürden oluşur. Genellikle pahalı elmas diskler kullanılarak taşlanır. Çelik gövde genellikle frezelenerek hazırlanır. Daha sonra, karbür bu çelik gövdeye lehimlenerek alet bileme tezgâhında işlem tamamlanır. Tel erozyonla işleme ile takımların imal edilmesi, form veya optik taşlamanın zorluğunu ve yüksek maliyetini ortadan kaldırır. Karmaşık kesme açısına sahip torna takımlarının tel erozyon tezgâhındaki CAM programlar yardımıyla işlenmesi mümkündür. Bu programlar işlemede kolaylık sağlar (Doğan, 2010).

2.2.2.4. Özel malzemeler

Günümüz de makina endüstrisindeki gelişmeler malzemelerden yüksek dayanım, sertlik ve etki direnci beklemektedir. Fakat bu tip malzemelrin ise geleneksel yöntemler ile işlenmesi zordur. Yeni nesil malzeme üretim alanında düksek dayanımlı fakat düşük ağırlıklı malzeme üretimi ön plana çıkmıştır. Bazen bu malzemelerin işlenebilirliği zor olmaktadır. WEDM yüksek ölçüsel doğruluk ve yüzey kalitesini elde etmede kalıp ve aparat yapımında mikro ölçekteki parça üretmede en iyi çözümü sunmaktadır (Goswami ve Kumar, 2014).

2.2.2.5. Broşlar ve şablonlar

Broşlama (tığ çekme), aslında iç kama yuvası açmak için geliştirilmiştir. Bununla birlikte düz, iç ve dış silindir veya yarı silindir ve düz olmayan yüzeylerin seri imalatında kullanılır. Birçok uygulama alanı olan broşların geleneksel yöntemlerle işlenmesi pahalıya mal olur ve yüksek oranda kabiliyet gerektirir. Broşların üretiminde kullanılan malzemelerin işlenmesindeki zorluk tel erozyonla işleme yöntemi ile kolaylaştırılabilir. Broşlama işlemleri tel erozyon yöntemi için mükemmel bir uygulama alanıdır (Doğan, 2010).

Sadece katı model tasarım bilgisi ile başka bir uzmanlık gerektirmeden şablonlar tel erozyon tezgâhı ile çabuk ve doğru olarak kesilmektedir. Şablonların tasarımındaki değişikliklere göre basit bir CNC programı yaparak tel erozyon tezgâhında bu parçaları işlemek oldukça kolay ve hızlıdır (Doğan, 2010).

2.2.3. Tel erozyon tezgâhında işleme parametreleri

Akım yoğunluğu, puls on süresi (Ton/Pon), puls off süresi (Toff/Poff), tel ilerleme hızı, tel gerginliği, tel elektrot çeşidi, işleme voltajı performans göstergelerini etkileyen makinanın ana parametreleridir (Goyal, 2017 vd.).

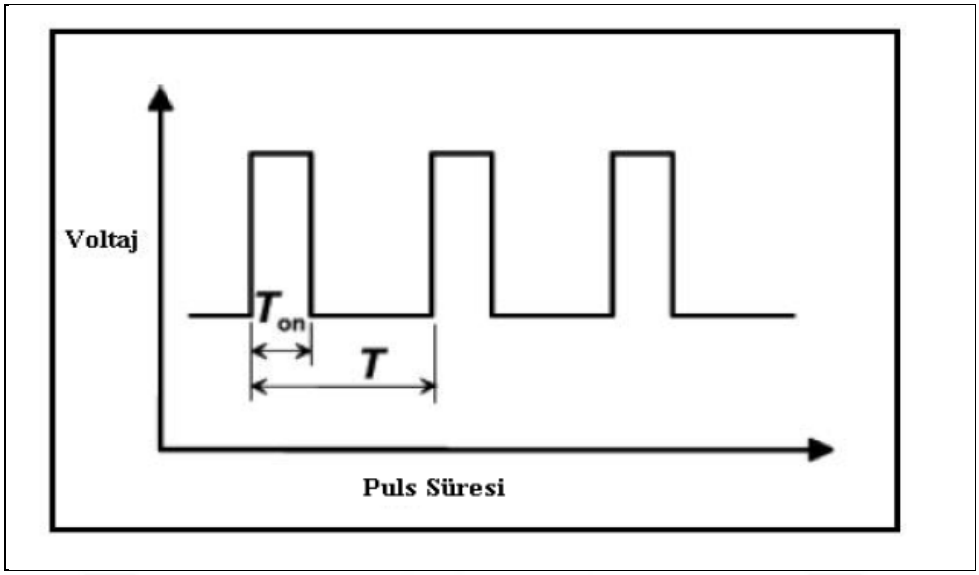
2.2.3.1. Akım yoğunluğu (A)

En yüksek akım değerini ayarlayan ve tele uygulanan akım miktarını kontrol eden parametredir. Daha yüksek değerler daha büyük akım demektir. Tel erozyon kıvılcım enerjisi; ana güç kaynağı maksimum akımı (IAL), ana güç kaynağı voltajı (V) ve puls süresi (Ton) vasıtasıyla belirlenmektedir (Doğan, 2010).

Yüksek akım kullanmak hızlı kesim yapmayı sağlar ancak tel kırılmasına ve ya ölçüsel olarak hssasiyet kaybına da sebep olabilir. Özellikle iyi yüzey kalitesi istenen iş parçalarında (hassas kesim kalıplarında kesici zımbalarda) beklenen pürüzsüz yüzeye etki edebilmektedir.

2.2.3.2. Puls on süresi (Ton)

Tel erozyon yönteminde talaş kaldırma işlemi puls süresinde gerçekleşmektedir. Bu safhada kıvılcım aralığı kurulmakta, talaş kaldırılmakta, akım oluşmakta ve işlem yapılmaktadır. Puls süresi her kıvılcımda tele uygulanan elektrik zamanının uzunluğunu göstermektedir. Bu yüzden daha yüksek bir seviyede puls süresini ayarlamak daha büyük enerji üretimine sebep olmaktadır. Puls süresi arttığı zaman daha hızlı bir kesim yapılır fakat yüzeyler daha yüksek bir pürüzlülüğe ve daha az bir ölçü hassasiyetine sahip olur. Son paso (son kesim) puls süresi bir önceki kesimin puls süresinden daha az olur ki ölçüsel doğruluğa daha çok yaklaşılsın. Aşırı büyük puls süresi teli daha dayanaksız yapar ve kırılmaya karşı direnci az olur (Goyal, 2017).



Şekil 0.13. Çevrim süresi gösterimi

2.2.3.3. <u>Puls off süresi (Toff)</u>

Bu parametre her kıvılcım arasındaki zamanın uzunluğunu kontrol eder. Şekil 2.13 teki grafikte de görüldüğü gibi T-Ton dan kalan süre bu zamanı açıklar. Daha yüksek seviyede bir puls ara süresi ayarlamak daha büyük olan kıvılcımlar arasındaki zaman demekttir ve daha düşük enerji üretimi ile sonuçlanır.

Bu süre esnasında parçacıklar atılır bu ara süre olmazsa tel iş parçasına değer kısa devre yapar ve tel kırılır. Artan puls ara süresi genellikle daha yavaş kesme, artan süreklilik, daha az tel kırılması anlamına gelmektedir.

Eğer puls ara süresi kısa olursa deşarj boşluğu yeteri kadar temizlenememekte sonraki deşarjlar arasında birikmiş parçalardan dolayı kısa devreler oluşmaktadır. Bu sebepten ve iyi soğutma olmamasından dolayı tel kırılmaları olmaktadır.

2.2.3.4. <u>Tel ilerleme hızı (Ws)</u>

İş parçası tel erozyon tezgâhının tablasına bağlandıktan sonra gerekli kesme boşlukları verilir. Diğer parametrelerin yanı sıra telinde makina tarafından kontrol edilen bir hızı vardır. Tel hızı fazla olursa kötü yüzey pürüzlülüğü, yavaş olursa da uzun kesme

sürelerine neden olur. Ayrıca çok hızlı ilerleyen bir telde kopmalarda meydana gelerek süre kayıplarına sebep olur.

2.2.3.5. Tel gerginliği (Wb)

Tel makara, üst ve alt bloktan oluşan biri çözücü diğeri ise toplayıcı olan servo motor ile çalışan iki kafa arasında sarılmak sureti ile hareket eder. Çözücü kafa üst kısımda bulunur, toplayıcı kafa ise alt kısımda bulunur. Bu şekilde tel doğrusal bir şekilde hareket ettirilir. Tutucu bloklar telin ayrıca gerginliğinide sağlamaktadır.

Tel gerginliği fazla olursa üzerindeki akımın etkisi ile birlikte kırılır, verimsizliklere ve kesim yapılamamasına sebep olur. Tel çok gevşek olursa da ölçüsel olarak hassasiyet kaybedilir. Yaylanan tel düzensiz kesimler ve konum ölçülerinde hatalara sebep olur. Bu yüzden doğru parça kalınlığına göre doğru gerginlik değeri belirlenerek çalışılması önemlidir.

2.2.3.6. İşleme voltajı

Ana güç kaynagı voltajı (V) tele güç ekleyen bir faktördür. Ana güç kaynağı maksimum akımı (IAL) parametresi ile birlikte deşarj puls enerjisini ayarlar. Tel için gerçek gücü, ince ayarlamanın bir yolu olarak puls süresi ve kaba bir ayarlama olarak da voltajı düşünebiliriz. Daha büyük değer daha yüksek voltaj demektir. Voltaj iş parçası kalınlığının bir fonksiyonudur. Kalın iş parçaları için daha büyük bir voltaj, ince parçalar için daha düşük bir voltaj gerekmektedir. Gelişen makina teknolojisi ile birlikte tel erozyon makinaları bu değeri kendisi diğer girilen parametreler ile eniyi çalışacak şekilde ayarlayabilmektedir.

2.2.4. Tel karakteristikleri ve seçimi - dielektrik sıvı

Tel elektrot bu metotda önemli bir yer tutmaktadır. Tel elektodun iş parçası kalınlığına ve istenen yüzey kalitesine göre çok çeşitleri bulunmaktadır.

Tel erozyonda elektrodun kullanılması süreç esnasında elektrik akımlarını iletmek, iş parçasından talaş kaldırılmasını sağlamaktır. Bunu yapan tel elektrodun malzemesinin iyi iletkenliğe, düşük aşınmaya ve ucuz imal edilebilirlik özelliklerine sahip olması gerekir. Elektrot malzemeleri istenen performans beklentisine göre değişkenlik göstermektedir. Bazı elektrotlar iyi talaş kaldırma özelliğine sahipken yüksek aşınma gösterirler, kimi elektrotlar ise düşük talaş kaldırma özelliğine sahip olurken yüksek aşınma direnci gösterirler.

Genellikle beş çeşit elektrot malzemesi kullanılmaktadır. Bunlar, bakır, pirinç, çinko, tungsten ve grafittir. Bu sayılan malzemeler grafit yapılı ve metalik yapılı olmak üzere iki katagoriye ayrılmaktadır. Metalik yapılı olan elektrotlar ise yaygın kullanılan metaller, tungsten ve tungsten kompozitleri olarak kendi içinde üçe ayrılmaktadır. Grafitler ise kendi içinde altı alt gruba ayrılmaktadır (Özkul, 2012).

Yaygın kullanılan metaller, bu elektrot malzemesinin temelleri ikinci dünya savaşı yıllarındaki çalışmalar zamanında atılmıştır. Bakır en iyi bilinenleridir, bunun yanı sıra pirinç ve çinko grubun diğer elementleridir. Bu malzemelerin yüksek elektrik ve termal iletkenlikleri vardır. Bakır, pirinç ve çinko ayrıca kolay elde edilebilmektedir. Bakır bu grubun öncüsüdür ve 1100C°'de erimektedir. Endüstride de maliyet ve kalite kazanımları nedeniyle bu grup sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan bu deneysel çalışmada da bu gruba giren tel elektrot kullanılmıştır (Anonim, 2013).

Tel elektrot seçilirken iş parçası kalınlığı, istenen yüzey toleransı ve kesilecek şekil dikkate alınmalıdır. Bunun için standart tel üreticileri kendi deneysel çalışmaları sonrasında çeşitli önerilerde bulunmuşlardır.

Tel erozyon ile işlemede önemli noktalardan birisi de dielektrik sıvıdır. Tel erozyon tezgâhında kullanılan dielektrik sıvının başlıca fonksiyonları şunlardır;

- İş parçası ve elektrot arasında kıvılcım başlatılmasını sağlaması,
- İş parçası ve tel arasında yalıtıcı görevi yapması,
- Kısa devreyi önlemek için iş parçası ve tel arasında küçük parçacıkların uzaklaştırılmasıdır.

- Hem iş parçası hem de tel için soğutma etkisi yapması olarak belirtilebilir. WEDM tekniğinde, dielektrik akışkan olarak hidrokarbon yağlar yerine deiyonize (iyonik tuzlardan arındırılmıs) su kullanır ve bu suyu kıvılcım bölgesinde kullanır. Deiyonize olmuş su geleneksel EDM için uygun değildir, çünkü elektrotun hızlı aşınmasına sebep olur. Ancak deiyonize suyun düşük viskozitesi ve hızlı soğuma özelliği bu suyu tel erozyonla işleme tekniği için ideal bir tercih yapar (Doğan, 2010).

2.3. Hassas Kesim Prosesi ve Kalıplaması

Hassas kesim (fine blanking) süreci pres tekniği prensibi ile çalışır ve özellikli pres, hassas kalıp ve kalıp çelikleri kullanır. Bu yöntem sayesinde parça tamamen formlanır ve montaja hazır hale gelir. Bunun haricinde malzeme kalınlığının tamamı temiz bir yüzey olarak kesilir ve hiç kopma olmaz. Kesme yüzeyi sayesinde iyi kalite ve yüksek doğruluktaki ölçülerde parça elde edilir (Anonim, 2018).

Hassas kesim ile parça üretmek için; hassas kalıp mühresi ve kalıp zımbası, malzeme kalınlığının yaklaşık 0,5 oranında verilmiş dar kesme boşluğu ve bunların yanı sıra kesme esnasında parçayı sıkıca tutmak için 3 katmanlı pres kuvveti gerekmektedir. Bu tutma kuvvetleri;

- Kesme baskısı (shearing pressure)
- V ring baskısı (V ring pressure)
- Karşı kuvvet baskısı (counter pressur)'dır.

İyi kalite de parça elde etmek için bunlar tüm hareket (strok) boyunca parçayı tutmalıdır. Hassas kesimde, hızlı hareket fakat yavaş kesim önerilir (kesim hızı aralığı 4-15 mm/s). Şu anda 40 ton ile 1400 ton arası pres kuvvetleri hassas kesimlerde mevcuttur. Pres çevrimi Şekil 2.14'te gösterilmiştir. Bu gösterimde hassas kesim presinde meydana gelen çeşitli adımlar gösterilmiştir ve o adımlar aşağıdaki gibidir (Anonim, 2008);

1) Kalıbın içerisine malzeme beslenir.

2) Alt tablanın ve kalıp setinin yukarı kalkması ve sacın kalıp yüzeyi ile temas etmesi sağlanır.

3) V ringin malzemeye basması ve malzemenin V ring (veya stinger) ile kalıp seti arasında sıkıştırılması sağlanır. (Parça V ring vasıtasıyla yukardan tutulur ve alt tabla ile arasında kalarak sıkıştırılır.)

4) Alt tabla ve üst tabla arasında sıkıca tutalan parça tamamı kesim, hiç kopma olmayacak şekilde kesilir.

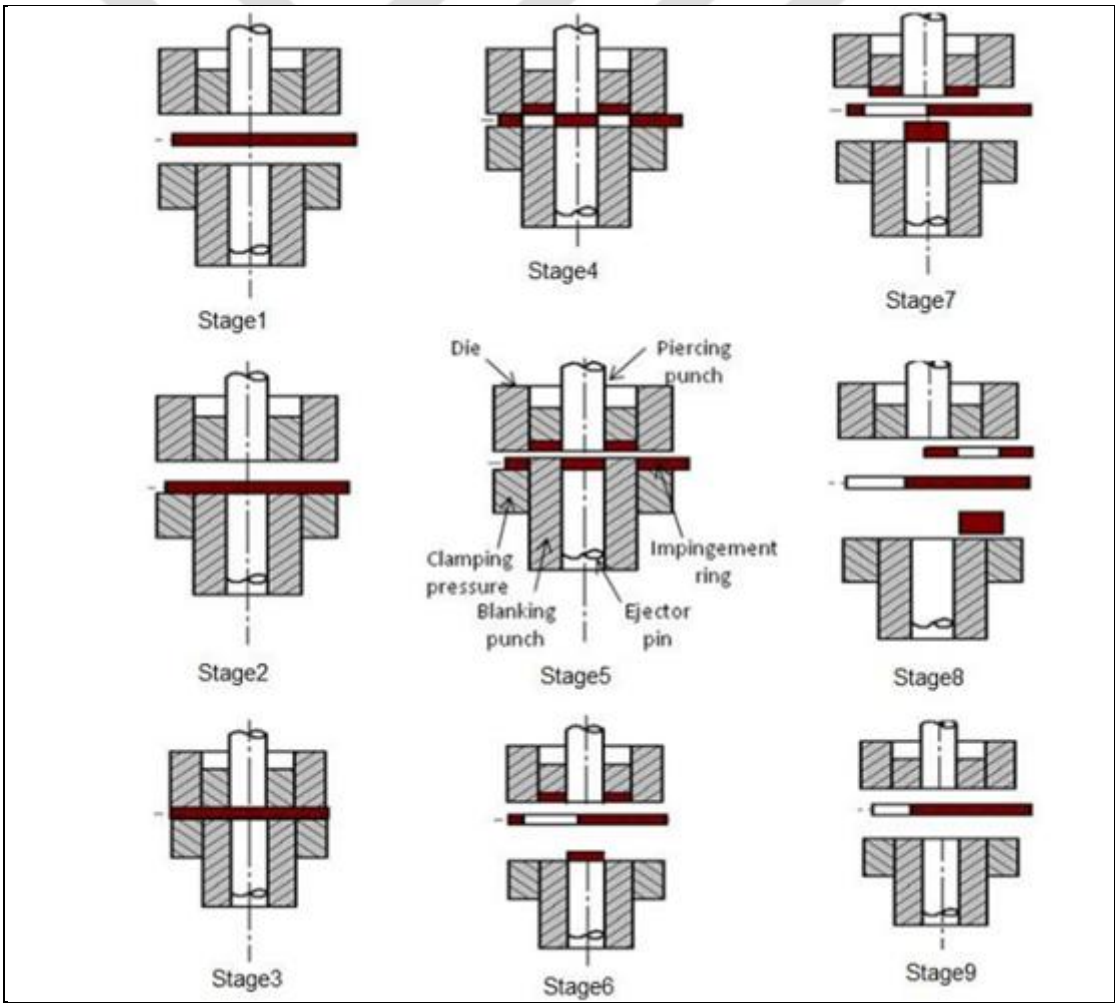
5) Kalıp açılır ve koç geri kalkar.

6) Parça alt kalıp yüzeyinde kalıp metal hurdalar sac üzerinde kalır ve V ring yukarı çıkar.

7) Alt plakada karşı baskıdan kurtulur ve yerine döner.

8) Parça kalıp alt plakasından hava vb (taşıyıcı kol, itici kaşık) ile tahliye edilir.

9) Çevrim tamamlanır.



Şekil 0.14. Hassas kesim çevrim adımları (Anonim, 2018)

2.3.1. Hassas kesim tekniğinde kalıplama

Eğer mümkünse hassas kesim kalıbında kalıp bileşimi operasyonu tek seferde bitirecek şekilde olması tercih edilir. Ancak konvansiyonel presler ile yapılan progresif kalıp ile işlemede olduğu gibi, hassas kesim yöntemi ile de, progresif kalıplar ile parça imal edilebilir.

2.3.2. Tipik karakteristikleri ve uygulama alanları

Hassas kesim ile parça üretmek, diğer konvensiyonel preslere göre birçok avantaj sağlar, örneğin bitmiş yüzeydeki ürün verimi, düzgün kesim kenarları, yüksek ölçü hassassiyeti, daha iyi düzlemsellik ve görünüm gibi avantajlar sağlar.

Hassas kesim kalıpları ile üretilen dişli, dişli kutusu, otomotiv sektöründe kapı menteşeleri, sürekli çalışan ve yüksek dayanım gerektiren komponetlerde kullanılması sıklıkla görülmektedir. Özellikle otomotiv sektöründe, medikal alanlarda, uzay havacılık ve savunma sanayisinde çeşitli komponetlerin imalatı için hassas kesim yöntemi kullanılır.

Hassas kesimde ortaya çıkan parçada ortalama beklenen yüzey kalitesi 0,45 μm dir. Bu değer parça boyutları ile ilgilidir. Örneğin çok küçük parçalar 2,5 mm lik saat parçaları veya 760 mm lik makina parçaları bu ı yöntem ile üretilebilir. Kalınlık ise 0,13 mm den 13 mm ye kadar çıkabilmektedir. Konvansiyonel preslerde ortalama 5-6 mm kalınlıktan sonra kesme ve form verme işlemi yapmakta zorlanılırken, işlem gerçekleştirilse bile iyi kalite parça elde edilememektedir. Ancak hassas kesimde hem işlenebilirlik sağlanabilmekte hem de iyi kalitede parça elde edilebilmektedir.

Hassas kesim metodu bir noktadan sonra ve belli ölçülerde bu yönteme göre daha maliyetli olan toz metal ve talaşlı imalat yöntemlerine alternatif olmaktadır. Ayrıca talaşlı imalat ile erişilmesi büyük maliyetler gerektiren yüksek adetlerde imalatı hassas kesim sağlayabilmektedir. Hassas kesim presleri ile milyon adetlerde ve çok hızlı üretim sağlanabilir. Bu yöntem özellikle otomotiv sektörünün günümüzde tercih ettiği ve önem verdiği bir metotdur. Ayrıca kozmetik kazanımlarından dolayı da son yıllarda beyaz eşya

sektörüde bu metotdan faydalanarak buzdolabı menteşelerini, görünür sac metal parçaları üretme yoluna gitmektedir.

2.3.3. Hassas kesim parçalar ve üretim kalıpları için uygun malzeme

Hassas kesim parçalar genellikle iyi kesme ve kırılma dayanımı elde etmek için sert malzemelerden yapılır. Bunun aksine hassas kesim süreci ile üretilecek parçalar soğuk şekillendirmeye uygun malzemlerden seçilmelidir. En yaygın kullanılan sac malzemeler 16CrMn5, 42Mo4, 30MnB5, 50CrV4 , 51CrV4 gibi çelik malzemelerdir.

Hassas kesim parçaların sac metalleri %90 çelik malzemelerden üretilir. Sertlik ve soğuk şekillendirmeye uygun olmanın yanı sıra başka malzeme özelliklerine de sahip olmalıdır. İyi bir cemente yapı soft ferritik özellikteki çelik, tavlama yapılmaksızın (spheroidize annealed) çapaksız kesmeye yardım eder. 260 ile 520 Mpa arasındaki çekme mukavemeti ve 0,08 - 0,35 yüzdesinde C oranına sahip çelik yukarıda bahsedilen özelliklerin yanı sıra iyi bir hassas kesim sac parçası malzemesi özelliği gösterir. Eğer pirinç kullanılacaksa kurşun içermemelidir, yoksa kesme yüzeyinde kopmalar olur ve bu hassas kesimde istenmeyen bir durumdur.

Bu sacları şekillendirmede kullanılacak kalıpların imalatında kulllanılan soğuk iş takım çelikleri ise Anco, CPOH, WP7V, CP4M, CPR ve Vanadis gibi özellikli ve patentli soğuk iş takım çelikleridir.

Hem şekillendirilip ürün olarak kullanılacak sac metal hem de bu sac metali üretmek için kullanılan hasas kesim kalıbının malzemeleri çok özelliklidir. İyi bir hassas kesim parça elde etmek için iyi işlenmiş kalıplara ihtiyaç vardır. Kalıbın iyi işlenebilmesi ise imalatı esnasında kullanılan tezgâhların doğru parametreler altında çalıştırılması ile yakından ilintilidir. Kalıp imalatında sıklıkla kaba işleme de torna tezgâhları ve freze tezgâhları kullanılır. Ancak kalıp bloğunda özellikle sürekli çalışan kesme, bükme, form verme işlemlerini yapan ve parçada asıl ölçüyü meydana getiren hassas zımba ve mühreler tel erozyonda kesilir. Bu tez çalışması da endüstrinin günümüzde sıklıkla kullandığı hasas kesilmiş parçaların kalıp imalatlarında kullanılan CPOH malzemenin tel erozyon tezgâhında kesilmesinde ki doğru parametrelerin belirlenmesi üzerinedir.

3. DENEY TASARIMI VE YANIT YÜZEY YÖNTEMİ

Bu bölümde çalışmada analiz yaparken kullanılan istatistiksel bir yöntem olan deney tasarımı ve alt başlıklarından bahsedilecektir.

3.1. Deney Tasarımı

Deney bazı olaylar üzerine bir veya daha fazla sayıda faktörün etkisini araştırmak veya bu olaylara ilişkin bir süreç hakkında çalışmalar yapmak olarak tanımlanabilir. Deneyin amacı ya sistem hakkında bilgi türetmek veya sistem üzerindeki yeni koşulların etkisini ortaya çıkarmaktır (Erbaş ve Olmuş, 2006).

Deney tasarımı, bir süreçte yer alan ve bir hedef doğrultusunda ilgilenilen bağımlı değişkene etki eden bağımsız değişkenlerin sistematik olarak değiştirilerek bağımlı değişkene etki eden bağımsız değişkenlerin değerlerinin bulunmasında ve yorumlanmasında kullanılan bir istatistiki yöntemdir. Deney tasarımındaki asıl amaç az çaba ve maliyetle yüksek anlamlılıkta model türetmektir (Rodrigues, 2009).

Objektif, güçlü ve iyi düzenlenmiş bir deney kurabilmek için deneyin planlaması aşamasında bilimsel bir yaklaşım gerekir. Bu bilimsel yaklaşım istatistiksel düzen ile sağlanır, veriden anlamlı sonuçlar elde etmek için deneyin düzenlenmesinde mutlaka istatistiksel yaklaşım gerekir (Erbaş ve Olmuş, 2006).

İstatistiksel yaklaşım ile yürütülmeyen deneyler Edison'un ampulü bulurken yaptığı gibi rastgele deneyler yapmak ve uzun uğraşlar vermek gerektirir. Edison bu zor, maliyetli zaman alıcı yolu seçmiş ve belkide azminin yanı sıra birazda şans eseri başarıya ulaşmıştır (Gürsakal, 2005).

İstatistiki deney tasarımı metodu verilen parametreler ile en iyilenmek istenen performans karakterinin az bir deney ile titiz bir şekilde araştırılmasını sağlar (Demirtaş vd., 2015).

Erbaş ve Olmuş (2006)'a göre istatistiksel deney düzeneklerini kullanmanın avantajları şu şekilde sıralanabilir;

- İstatistiksel deney düzenleri ekonomiktir.
- Açıklanan yanıt değişkeni üzerinde bir veya daha fazla faktörün etkisini ölçmek mümkün olur.
- Araştırmadaki deney hatalarını tahmin etmek mümkün olur.
- İstatistiksel yaklaşımların göz önüne alınmadığı deneyler düzenlenir ise, istenen deney amaçlarının bir veya daha fazlasının gerçekleşmemesi durumu ortaya çıkar.

Erbaş ve Olmuş (2006)'a göre bir deneyin aşamaları aşağıdaki gibi sıralanabilir;

- Deneyin amaçlarının tanımlanması
- Yanıt değişkenindeki değişimin bütün kaynaklarının tanımlanması
- Deneylere deney birimlerinin atanması için uygun kuralın seçilmesi
- Kullanılacak ölçümler, deney süreci ve karşılaşılabilecek zorlukların belirlenmesi
- Bir pilot deneyin yapılması
- Modelin belirlenmesi
- Analize karar verilmesi

Deney tasarımı, imalat süreçlerinin geliştirilmesi, süreçlerin iyileştirilmesi, süreç çıktılarının güvenilirliğinin artırılması, daha düşük maliyetli ürün elde edilmesi ve daha kısa ürün tasarım ve geliştirme sürelerinin elde edilmesi, ürün ve süreç kalitesinin iyileştirilmesi gibi bir çok alanda kullanılmaktadır (Akay, 2013).

Mühendislik araştırmalarında, malzeme kütüphanelerinin oluşturulmasında, döküm sektöründe deney tasarımı sıklıkla kullanılmaktadır. Deney tasarımı satış ve pazarlama sektörlerinde pazar araştırması yaparken, hizmet ve servis sektörleri gibi imalat içermeyen kollarda da kullanılmaktadır.

3.1.1. Tam faktöriyel tasarım

Tam faktöriyel tasarım, birden çok parametrenin her seviyesi için eşit sayıda deney gerçekleştirilerek bu seviyelerin birbirleri ile çarpımları ile birlikte faktörlerin etkileşimleri dâhil olası bütün düzeylerinin performans karakteristiği üzerindeki etkilerinin araştırıldığı bir deney stratejisidir (Akay, 2013).

Bu deney stratejisi, tüm deney stratejilerini temsil etmekte ve ek olarak bir faktörün aynı düzeyde sabitlenmesi durumunda diğer iki faktörün düzeylerindeki değişmenin ürün performansına etkisi de elde edilebilmektedir.

Performans karakteristiğine etki eden faktör sayısının sınırlı (1-5) olduğu durumlarda kullanılan bir deney stratejisidir. Ürün performansına etki eden faktör sayısının çok olması durumunda gözlemlemeye dayanan ve önemli faktörlerin belirlenmesi amacını güden deney stratejisi ve ana faktörlerin yanı sıra sadece bazı faktörler arasındaki etkileşimleri dikkate alan kesirli faktörüyel tasarım da kullanılmaktadır.

Tam faktöriyel deney tasarımında, faktörlerin tek başına ve birlikte ürün performansına olan etkilerini belirlemek için gerekli deney sayısı;

a: faktörün düzey sayısı (1.)

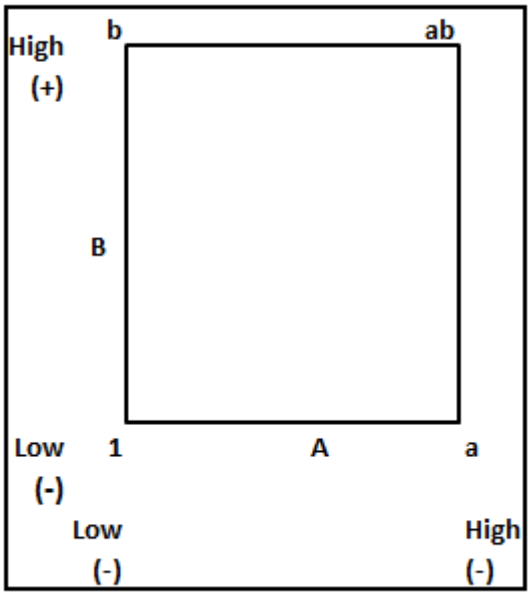
k: ilgilenilen faktör sayısı (2.)

olmak üzere;

$$a^k \text{ , } a=2,3,4 \quad (3.)$$

şeklinde belirlenir.

Tam faktöriyel tasarım stratejisinin en basit hali 2^2 (Şekil 3.3), yani 2 düzeyli 2 faktörden oluşmaktadır.



Şekil 0.1. 2^2 tasarım (Hasgül, 2010)

Şekil 3.1 de A ve B faktörlerinden oluşan 2^2 bir tasarım görülmektedir. Bu tasarımın a noktası A faktörünün yüksek B faktörünün düşük düzeyde olduğu noktayı, b noktası B faktörünün yüksek A faktörünün düşük düzeyde olduğu noktayı, 1 noktası her iki faktörün de düşük düzeyde olduğu noktayı ve ab noktasıda her iki faktöründe yüksek düzeyinde olduğu noktayı göstermektedir.

Tam faktöriyel tasarımda faktörlerin ana etkilerinin ve birbirleri ile olan etkileşimlerinin araştırılması için kontras yaklaşımı ile varyans analizi tablosu oluşturulabilir. Bundan başka klasik çok faktörlü varyans analizi yapılarak gerçekleştirilecek performans göstergesinde etkili olan parametreler ve bunların etkileşimi belirlenebilir (Akay, 2013).

Çok faktörlü varyans analizi a düzeyli A faktörü, b düzeyli B faktörü ve c düzeyli C faktörü olmak üzere üç düzey ve n tekrardan oluşan genel faktöriyel tasarıma ait formülleri aşağıdaki denklemlerde açıklayarak ANOVA tablosu Çizelge 3.1'de gösterilmiştir (Montgomery, 2007).

Çizelge 0.1. ANOVA tablosu

Değişkenlik Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Dereceleri	Kareler Ortalaması	F
B	SS_B	$b-1$	MS_B	$F_B = \frac{MS_B}{MS_E}$
C	SS_C	$c-1$	MS_C	$F_C = \frac{MS_C}{MS_E}$
AB	SS_{AB}	$(a-1)(b-1)$	MS_{AB}	$F_{AB} = \frac{MS_{AB}}{MS_E}$
AC	SS_{AC}	$(a-1)(c-1)$	MS_{AC}	$F_{AC} = \frac{MS_{AC}}{MS_E}$
BC	SS_{BC}	$(b-1)(c-1)$	MS_{BC}	$F_{BC} = \frac{MS_{BC}}{MS_E}$
ABC	SS_{ABC}	$(a-1)(b-1)(c-1)$	MS_{ABC}	$F_{ABC} = \frac{MS_{ABC}}{MS_E}$
HATA	SS_E	$abc(n-1)$	MS_E	
TOPLAM	SS_T	$abcn-1$		

Modele ait regresyon denklemi denklem (3.4)'te belirtildiği gibi olacaktır.

$$y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{jk} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$
$$i=1,2,3,...,a$$
$$j=1,2,3,...,b$$
$$k=1,2,3,...,c$$
$$l=1,2,3,...,n \qquad (3.4.)$$

Toplam kareler toplamı denklemi (3.5)'te verildiği gibi olacaktır.

$$SS_t = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c}\sum_{l=1}^{n} y_{ijkl}^2 - y_{...}^2 / abcn \qquad (3.5.)$$

Faktörlerin ana etkileri ve etkileşim etkileri için kareler toplamı faktörlerin için gerçekleştirilen toplamlar kullanılarak hesaplanır ve aşağıda verilen denklemler (3.6-3.12)'de gösterildiği gibidir.

$$SS_A = \frac{1}{bcn}\sum_{i=1}^{a} y_{i...}^2 - y_{....}^2 / abcn \quad (3.6.)$$

$$SS_B = \frac{1}{acn}\sum_{i=1}^{b} y_{.j..}^2 - y_{....}^2 / abcn \quad (3.7.)$$

$$SS_C = \frac{1}{abn}\sum_{i=1}^{c} y_{..k.}^2 - y_{....}^2 / abcn \quad (3.8.)$$

$$SS_{AB} = \frac{1}{cn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b} y_{ij..}^2 - y_{....}^2 / abcn - SS_A - SS_B \quad (3.9)$$

$$SS_{AC} = \frac{1}{bn}\sum_{i=1}^{a}\sum_{k=1}^{c} y_{i.k.}^2 - y_{....}^2 / abcn - SS_A - SS_C \quad (3.10)$$

$$SS_{BC} = \frac{1}{an}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c} y_{.jk.}^2 - y_{....}^2 / abcn - SS_B - SS_C \quad (3.11)$$

$$SS_{ABC} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{b}\sum_{k=1}^{c} y_{ijk}^2 - y_{....}^2 / abcn - SS_A - SS_B - SS_C - SS_{AB} - SS_{AC} - SS_{BC} \quad (3.12)$$

Toplam hatalar karesi SS_{hata} terimi toplam kareler toplamından SS_T diğer terimlerin kareler toplamı çıkarılarak denklem (3.12)'te görüldüğü şekilde elde edilecektir.

$$SS_H = SS_T - (SS_A + SS_B + SS_C + SS_{AB} + SS_{AC} + SS_{BC} + SS_{ABC}) \quad (3.13.)$$

Çizelge 3.1 de verilen ANOVA tablosuna bakılarak F değeri F_{tablo} değerinden büyük olan faktörler ve etkileşimlerin anlamlı olduğu kabul edilir. Etkileri anlamsız olarak belirlenen faktörler ve varsa etkileşimlerin regresyon analizinde katsayıları sıfır olarak alınır. Oluşturulan bu denklemde faktör değerleri yerine konularak bağımlı değişkenin alacağı değer görülür. Kurulan modelin anlam seviyesi ise modelin R^2 değeri denklem (3.13)'dte verildiği gibi hesaplanmaktadır. Bulunan R^2 değeri 1'e yakınsa modelin verileri açıklamakta yeterli olduğu, 0'a yakınsa yeterli olmadığı varsayılmaktadır.

$$R^2 = 1 - (SS_H / SS_T) \quad (3.14.)$$

Oluşturulan regresyon analizi için faktör katsayıları hesaplama denklemleri (3.15 – 3.21)'de verilen eşitlikler kullanılarak bulunmaktadır.

$$\alpha_i = y_i... - y.... \qquad i = (1,2,...,a) \tag{3.15.}$$

$$\beta j = y_{.j}.. - y.... \qquad j = (1,2,...,b) \tag{3.16.}$$

$$\gamma_k = y_{.k.} - y.... \qquad k = (1,2,...,c) \tag{3.17.}$$

$$(\alpha\beta)_{ij} = y_{ij}.. - y.... - \alpha_i - \beta_j \qquad i = (1,2,...\alpha)\ ,\ j = (1,2,...,b) \tag{3.18.}$$

$$(\alpha\gamma)_{kj} = y_{i.k.} - y.... - \alpha_i - \gamma_k \qquad i = (1,2,...\alpha)\ ,\ k = (1,2,...,c) \tag{3.19.}$$

$$(\beta\gamma)_{jk} = y_{.jk.} - y.... - \beta_j - \gamma_k \qquad j = (1,2,...b)\ ,\ k = (1,2,...,c) \tag{3.20.}$$

$$(\alpha\beta\gamma)i_{jk} = y_{ijk.} - y.... - \alpha_i\ -\beta_j - \gamma_k \qquad i = (1,2,...\alpha)\ j = (1,2,...b)\ ,\ i = (1,2,...\alpha)\ k = (1,2,...,c) \tag{3.21.}$$

3.1.2. Kesirli faktöriyel tasarım

Gerek zaman ve gerekse malzeme, işgücünden kaynaklanan yüksek maliyet nedeniyle tam faktöriyel tasarım yapmak ekonomik ve etkin olmayabilir. Bu durumda faktörlerin ürün performansına olan etkilerini belirlemek amacıyla daha az deneyin yapıldığı deney stratejileri kullanılır. Bu tür deneylere kesirli faktörüyel denir ve gerekli deney sayısı,

a: faktör düzey sayısı (3.22.)

k:ilgilenilen faktör sayısı; olmak üzere (3.23.)

a^{k-p} , = a=2,3,4 (3.24.)

şeklinde belirlenir.

p=1 için ½ kesirli faktörüyel deney

p=2 için ¼ kesirli faktörüyel deney

p=3 için 1/8 kesirli faktörüyel deney
olarak isimlendirilir.

Örnek olarak 2 düzeyli 8 faktörden oluşan bir deney $2^8 = 256$ deneyden oluşan tam faktöriyel tasarım, p=3 için $2^5=32$ ile 1/8 kesirli faktöriyel tasarım elde edilmiş olur.

Bu yöntem deneylerin yapılması açısından maliyet ve zaman kazancı sağlamasının yanı sıra ayrıca performans karakteristiklerine dair ölçüm almanın zor, uzun, tahribatlı ve maliyetli olması durumları içinde tercih edilebilir.

$2^6 = 64$ deneyden oluşan tam faktöriyel bir tasarımda 63 tane serbetlik derecesi vardır. Bu serbestlik derecelerinden sadece 6 tanesi anafaktörlerin etkilerinin tahmini için kullanılmaktadır. 15 serbestlik dereceside faktörlerin ikili etkileşimlerinin etkilerinin tahmin edilmesi için kullanılmaktadır. Geriye kalan 42 serbestlik dereceside faktörlerin üçlü veya daha yüksek mertebeden etkileşimlerin etkilerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Eğer araştırmacı için faktörlerin ana etkileri ve ikili etkileri önemli ise 2^6 tam faktöriyel tasarımın istenilen seviyesi kesirli deney tasarımına çevrilebilir (Myers vd., 2009).

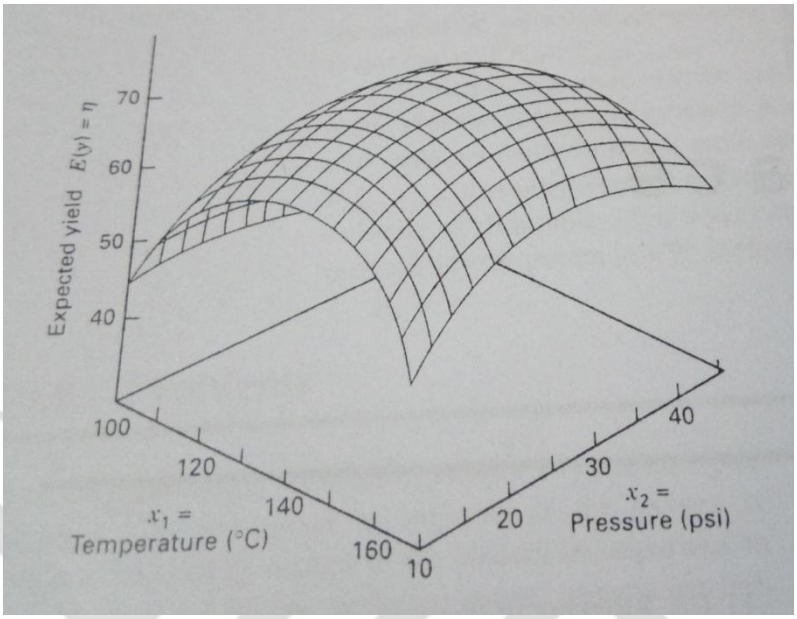
3.2. Yanıt Yüzey Yöntemi

Montgomery'ye göre Yanıt Yüzey Yöntemi (Response Surface Methodology-RSM) birçok değişken tarafından etkilenen en iyilenmek istenen performans karakteristiğinin modellemesinde ve analiz edilmesinde kullanılan matematiksel ve istatiksel tekniklerin toplamıdır. Örneğin bir kimya öğretmeninin amacının ısı ve basınç seviyesinin süreçte en iyilemek olduğunu varsayalım. Isı ve basınç seviyesinin süreçteki değerlerinin modellemesi aşağıdaki gibi gösterilebilir;

$$y = (x_1 , x_2) + \epsilon \qquad (3.25.)$$

ϵ gözlenen prosesteki hata oranıdır. Eğer gözlemci modeli $E(y) = f (x_1 , x_2) = \mu$ şeklinde ifade ederse, μ burada yanıt yüzeyi olarak adlandırılır. RSM genellikle grafiksel

olarak Şekil 3.2'de gösterildiği gibi bu örnek üzerinden ifade edilmektedir (Montgomery, 2009).



Şekil 0.2. RSM ısı basınç örneği (Montgomery, 2009)

Birçok RSM probleminde performans karakteristiği ile bağımsız değişkenler arasımdaki ilişki bilinmez. Bu durumda ilk yapılması gereken Bağımsız değişkenler ile performans karakteristiği arasındaki yakınsamayı tespit etmektir. Genellikle bağımsız değişkenlerin düşük ve yüksek seviyelerin polinominal değişimlerini bağımlı değişken üzerinde test etmek gerekmektedir.

Matematiksel model tahmin edildikten sonra bu denklemin ilişkiyi ne derece açıkladığının ve bu denklemi kullanarak yapılacak tahminlerin ne derece temsil ettiğinin araştırılması gerekmektedir. Yapılan varsayımlardan biri olan, seçilen modelin matematiksel denkleminin uygun olduğu, dolayısıyla gerçek ortalama yanıtı temsil edebildiği de test edilmelidir. Bu amaçla, değişim katsayısının (C.V) hesaplanması, regresyon analizine hipotez testlerinin uygulanması, hipotez testlerinin regresyon katsayılarına bireysel olarak uygulanması, regresyon katsayısının (R^2) ve düzeltilmiş regresyon katsayısının hesaplanması (R_{adj}^2), tahminlenmiş hata kareler toplamının (PRESS) hesaplanması, yeterli tahminleme (adequite precision) değerinin hesaplanması ve model uygunsuzluğunun test edilmesi (lack of fit testi) yöntemleri uygulanmaktadır (Subaşı, 2010).

Sistemin performans karakteri, bağımsız değişkenin bir doğrusal fonksiyonu olarak izah edilebiliyorsa, birinci dereceden polinomial denklem, model olarak kullanılabilir. Eğer sistemin yanıt yüzeyinde bir eğrilik varsa, ikinci dereceden polinomial denklemler kullanılmalıdır. Birinci dereceden polinomial modeller gerçek yanıt yüzeyindeki eğriliği belirlemede yetersiz kalmaktadır.

İkinci dereceden modellerin RSM'de yaygın olarak kullanılma nedenlerini (Aygün, 2012) aşağıdaki gibi açıklanmıştır,

- Esnekliği nedeni ile çok çeşitli fonksiyonel formlar alabildiğinden gerçek yanıt fonksiyonunun tahmin edilmesinde kolaylıklar sağlar.
- Katsayı değerlerinin uzun hesaplama yöntemleri kullanılmadan en küçük kareler yöntemi ile hesaplanmasına olanak sağlar.
- RSM'nin literatürde başarıyla uygulanmış birçok örneği mevcuttur.
- Merkez nokta kolayca hesaplanabilir.

3.2.1. Merkezi kompozit tasarım

Merkezi Kompozit Tasarım (Central Composite Design - CCD) deney stratejisi Box ve Wilson tarafından 1951 yılında 3^k faktöriyel tasarımlara alternatif olarak bulunmuştur. CCD, RSM'nin en sık kullanılan uygulamalarından biridir. CCD deney stratejisi yaygın bir şekilde -1 ve +1 şeklinde kodlanan 2^k faktöriyel bölümden, n_c sayıda ve düzeyi 0 olarak kodlanan merkez noktadan ve merkez noktadan $+\alpha$ kadar uzaklıkta 2k sayıda eksen (yıldız) noktadan oluşur. Yapılması planlanan toplam deney sayısı bu durumda $N = 2^k + 2k + n_c$ şeklinde hesaplanır.

Deneme düzeni içinde eksen noktaları, Çizelge 3.2'de gösterildiği gibi yer almaktadır.

Çizelge 0.2. Merkezi Kompozit Tasarım eksen noktaları

X_1	X_2	.	.	.	X_k
$-\alpha$	0	.	.	.	0
$+\alpha$	0	.	.	.	0
0	$-\alpha$	.	.	.	0
0	$+\alpha$	.	.	.	0
.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.
0	0	.	.	.	$-\alpha$
0	0	.	.	.	$+\alpha$

Bir merkez noktaya sahip 2 değişkenli ve α değeri $\sqrt{2}$ olan bir CCD deney matrisi örneği Çizelge 3.3'te yer almaktadır (Khuri ve Cornell,1996).

Çizelge 0.3. İki faktörlü CCD deney düzeni

$$D=\begin{bmatrix} X_1 & X_2 \\ -1 & -1 \\ 1 & -1 \\ -1 & 1 \\ 1 & 1 \\ \sqrt{2} & 0 \\ -\sqrt{2} & 0 \\ 0 & \sqrt{2} \\ 0 & -\sqrt{2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

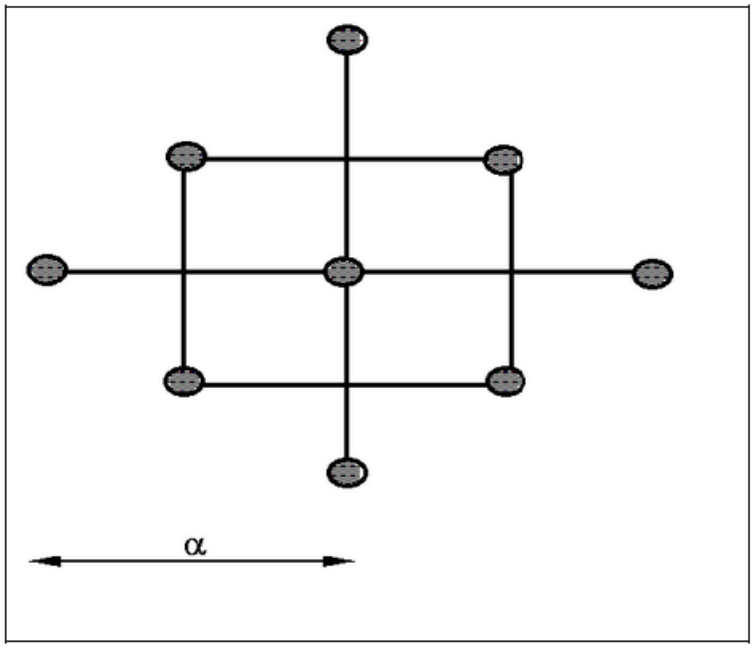
Çizelge 3.3'te görülen deneme düzenine -1 ve 1 düzeylerinden oluşan satırlar 2^2 faktöriyel bölümüdür. $\sqrt{2}$ ve $-\sqrt{2}$ düzeylerinin yer aldığı 4 satır eksen noktaları, her iki sütunda 0'ın yer aldığı satır da merkez noktayı tarif etmektedir. Matristen de görüldüğü gibi toplam deney sayısı $N= 2^2+2*2+1$ olmak üzere 9 adettir.

CCD deney stratejisi kullanılarak oluşturulacak ikinci dereceden modeldeki faktörlerin ana etkileri ve birinci mertebeden etkileşim etkileri 2^k denemesinden elde edilir. Merkez noktalar kullanılarak ise modelin eğriselliği test edilir. 2k sayıda eksen noktalar kullanılarak da modelin karesel terimleri tahmin edilir.

Şekil 3.3'te 2^2 CCD deneme düzenlerinin bileşenlerinin çözüm uzaylarındaki yerleşimi görülmektedir.

Şekil 3.3'de yer alan dörtgenin dört köşesinde yer alan noktalar 2^2 deney düzenine ait noktalardır. Karenin merkezinde yer alan nokta ise deney düzeninin merkez noktasıdır. Merkez noktaya dair deney yapmanın mümkün olması halinde birden fazla tekrar ile merkez noktadaki deney sayısı artırılabilir. Karenin dışında yer alan ve merkez noktadan her biri α kadar uzaklıkta olan dört nokta ise modele ait eksen noktalarını belirtmektedir. Bu deney gösterimi CCD deney düzeninin en sade halidir.

Bu çalışmada da deney planlaması olarak CCD kullanılmıştır. 4 adet merkez nokta, 8 adet alt ve üst olmak üzere faktörlerin uç noktları ve 16 adette 2^4 tam faktöriyelden gelen sayıda da toplam 28 adet deney yapılmıştır.



Şekil 0.3. 2^2 CCD deneme düzeni (Akay,2013)

3.2.2. Box-Behnken tasarım

Box ve Behnken (BBT) tarafından 1960 larda geliştirilen tasarım (BBT), üç seviyeli tasarım ailesi olarak yanıt yüzey yönteminin ikinci bir alt çeşididir. Bu yapıda deney tasarımı oldukça ilginç ve yaratıcıdır. Bu deney tasarımı yöntemi dengelenmiş tamamlanmamış blok tasarımından oluşmaktadır. Dengelenmiş tamamlanmaış blok tasarımına ait üç deney ve üç blok aşağıda şekil 3.4'te verilmiştir (Myers vd., 2009).

	Treatment		
	1	2	3
Block 1	X	X	
Block 2	X		X
Block 3		X	X

Şekil 0.4. BBT sembolik gösterimi (Myers vd., 2009).

Deney bir ve deney iki yanıt yüzey uzayında sembolik olarak biribiri ile ilişkilidir, deney değişkenlerinden X_1 ve X_2 değişkenleri 2^2 faktöriyel tasarım ile bağdaştırılırken (±1 ölçekte olmak üzere) X_3 merkez nokta olarak sabitlenir ($X_3 = 0$). Aynı uygulamalar blok 2 ve blok 3 için de uygulanır, yani herseferinde X_1 ve X_2 değişkenleri 2^2 faktöriyel tasarım ile bağdaştırılırken X_3 merkez nokta olarak sabitlenir. Sonuç olarak üç değişken için Box –Behnken bir tasarım örneği aşağıdaki gibi Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 0.4. Üç değişkenli BBT örneği

D=

X_1	X_2	X_3
-1	-1	0
-1	1	0
1	-1	0
1	1	0
-1	0	-1
-1	0	1
1	0	-1
1	0	1
0	-1	-1
0	-1	1
0	1	-1
0	1	1

4. LİTERATÜR TARAMASI

Elekto erozyon ile kesme üzerine birçok çalışma yapılmıştır, özellikle son yıllarda EDM yönteminin bir alt kolu olan tel erozyon ile talaş kaldırma metodu üzerine daha fazla yoğunlaşılmıştır.

Çalışmalarda tel erozyon yönteminin parametrelerinin eniyilenmesi üzerine yoğunlaşılmasının tetikleyici unsurlarından en önemlisi, gelişen endüstrinin taleplerini karşılamak için ortaya çıkan yeni nesil çok özellikli malzemelerin olmasıdır. Özellikle uzay havacılık sanayisi, savunma sanayi, tıp, otomotiv ve metroloji sanayi kollarının talep ettiği özel soğuk takım iş çelikleri (vanadis, anco, CPOH), super alaşımlar, nicel ve krom temelli alaşımların (Inconel 718, RENE 77) klasik işleme yöntemleri ile işlenmesi verimli ve kaliteli olmamaktadır. Bu yüzden bu tip malzemelert tel erozyon yöntemi ile işlenmektedir. Tel erozyon tezgâhının kesilen malzemeye göre parametrelerinin eniyilenmesi Taguchi ve deney tasarımı gibi yöntemlerle önceki çalışmalarda incelenmiştir. Çalışmanın bu bölümünde daha önceki çalışmalardan bahsedilecektir.

Goyal (2017), Inconel 625 malzemesinden WEDM ile talaş kaldırma işleminde süreç parametrelerinin talaş kaldırma oranı (Material Removal Rate - MRR) ve yüzey pürüzlülüğüne (Ra) (Surface Roughness - SR) etkisini normal Zn kaplı tel elektrot ve dondurucu (cryogenic) çinko kaplı tel kullanıldığı ile sürecin araştırılmasına yoğunlaşmıştır. Deneyler farklı süreç parametreleri düşünülerek yapılmıştır; elektrot çeşidi, akım şiddeti (curent intensity), puls on zamanı, puls off zamanı, tel besleme hızı ve tel gerginliği gibi. Malzeme kalınlığı, tel çapı, dielektrik sıvı akış püskürtme hızı, servo voltajı ve kesilen iş parçası formu sabit tutulan değişkenlerdir. Taguchi L18 dizi deneyler kullanılmıştır. ANOVA talaş kaldırma oranı ve yüzey pürüzlülüğü perfomans göstergelerini optimize eden faktör ve seviyelerinin belirlenmesinde kullanışmıştır. Analizin sonunda puls on zamanı, elektrot çeşidi ve akım şiddetinin (current intensity) performans göstergeleri üzerinde önemli etkisi olduğu tespit edilmiştir. Elektrot tipi ve puls on süresinin MRR üzerinde etkisi olduğu %95 güven seviyesinde tespit edilmiştir, diğerlerinin önemli bir etkisinin olmadığı görülmüştür. Akım ve puls on süresinin yüzey

pürüzlülüğü üzerindeki etkisi %95 güven seviyesinde tespit edilmiştir, diğerlerinin önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Liner regresyon denklemi ile MRR ve SR yi tahmin etmede, önemli iyi temsil yeteneği olan eşitlikler kurulmuştur. Malzemenin mikro yapısının incelenmesinde elektron tarama mikroskobu (Scanning Analyses Microscopy - SEM) kullanılmıştır. Deneyler 4 eksenli CNC Electronica Spring cut 734 makinasında yapılmıştır. Gelecekte bu çalışmanın tel besleme hızı, ölçüsel doğruluk gibi faktörler de ele alınarak başka tip malzeme ve başka tip geleneksel olmayan talaş kaldırma yöntemleri ile incelenebileceği belirtilmiştir.

Nayak ve Mahapatra (2016), cryo-treated Inconel 718 malzemeden konik kesim ile deneysel araştırma ve WEDM parametrelerinin iyileştirilmesini üzerine bir çalışma yapmışlardır. İş parçası kalınlığı, konik açısı, puls süresi, erozyon akımı, tel hızı ve tel gerilimi olmak üzere altı adet değişken parametre seçilmiştir, performans göstegeleri ise açı hatası, yüzey pürüzlülüğü ve kesme hızıdır. Yüzey pürüzlülüğü SURFCOM 130 A tarafından ölçülmüştür, deneyler ise AC Progress V2 yüksek hassasiyetli CNC WEDM Agie-Charmilles Technologies şirketinin geliştirdiği makinada yapılmıştır. Seçilen parametreler hakkında bilgi toplamak ve daha az deney yapılması için Taguchi L27 dizisi kullanılmıştır. Bütünleşik olarak üç performans karakteristiğini de en iyileyen parametreler; parça kalınlığının üçüncü seviyesi, koniklik açısının ilk seviyesi, puls süresinin üçüncü seviyesidir, erozyon akımının ilk seviyesi, tel hızının üçüncü seviyesi, tel gerginliğinin üçüncü seviyesi dir. Geleneksel Taguchi metodu çok amaçlı en iyilemede başarısız olduğu için, maximum sapma teorisi (maximum deviation theory) eşit önem derecesine sahip olan performans karakteristiklerinin en iyilenmesi için kullanılmıştır. Karmaşık ve doğrusal olmayan süreç içeriğinden dolayı, performans karakteristikleri ve parametreler arasında iyi fonksiyonel ilişki ve sonuçsal kesinlik elde etmek zor olduğundan, Yapay Sinir Ağları (ANN) yöntemi bu olumsuzluğu bertaraf etmek için kullanılmıştır. Sonuç olarak Bat Algoritması olarak bilinen yeni meta sezgisel yöntem ile süreç modelini optimize etmek için en iyi parametre seti bulunmuştur. Önerilen algoritmanın WEDM'de konik kesim sürecinde performans karakteristiklerini eş zamanlı en iyileyebildiği görülmüştür. Bu çalışmada geliştirilen model ile kesim yapılmadan önce sonuçların iyi bir şekilde tahmin edilebilir olduğu görülmüştür.

Chen vd. (2017) Inconel 718 malzemesini deneylerinde tel erozyon'da kesim yaparken kullanmışlardır. Inconel 718'in çalışmada seçilme sebebi; yüksek ısı gerektiren ortamlarda, ses hızını aşan füze silah sistemlerinde ve yüksek performans gerektiren uzay havacılıkta geniş kullanım alanı olmasıdır, buna karşın geleneksel yöntemler ile işlenmesi de zor olan bir malzemedir. Bu çalışma WEDM'de Inconel 718 malzemesinin L9 ortogonal dizisi ile iyileştirilmesini içermektedir. Seçilen makina parametreleri puls on süresi, tel voltajı, dinlenme zamanı ve servo voltajıdır, bu faktörler üç düzeyli olarak seçilmişlerdir. Eniyilenmek istenen performans karakteristikleri ise, malzemeden talaş kaldırma oranını en büyüklemek iken aynı zamanda düşük yüzey pürüzlülüğü değerini de yakalamaktır. Taguchi metodunun seçilen kalite karakteristiğinin, talaşlı imalatta eniyi süreç parametrelerini bulmak için geniş bir kullanım alanı vardır. Ne yazık ki Taguchi metodu çok amaçlılılığı optimize etmeyi desteklememektedir. Bu aksaklığı elimine etmek için gri ilişkisel analiz (Gray Relation) metodu çok amaçlı optimizasyon için Taguchi metoduyla birlikte kullanılmıştır. İkil amaç yüzey pürüzlülüğü ve talaş kaldırma oranı için, optimum parametre kombinasyonunu türetmek için gray relation yöntemi kullanılmıştı, sonuç olarak yüzey pürüzlülüğü 2,75 μm olarak bulunmuştur. L9 ortogonal dizisi içinde yüzey pürüzlülüğü 2,8 μm bulunmuştur, iyileşme oranı %1,8 dir, L9 dizisinde talaş kaldırma oranı 0,00123 g/s olarak bulunmuşken, gri ilişkisel analiz ile 0,00190 g/s bulunarak %54,5 iyileşme görülmüştür.

Goswami ve Kumar (2014), bu çalışmada Nimonic 80A ham malzemesini WEDM ile kesimde kullanarak perfomans karakterleri olarak seçilen yüzey pürüzlülüğü, talaş kaldırma oranı ve tel aşınma oranını araştırmışlardır. Taguchi L27 dizinini deney planlaması metodu olarak kullanılmıştır. Seçilen faktörler puls on zamanı, puls off zamanı, maksimum akım, tel besleme hızı, tel gerğinliği ve kıvılcım ayar voltajıdır, tüm faktörler üç düzeylidir. Deneyler Electra- Elplus 40A DLX tezgâhında yapılmıştır. Tel erozyon ile kesimden sonra yapılan sürecin yüzey üzerine etkisi ve malzeme mikro yapısı SAM (Scanning Analyses Microscope) kullanılarak incelenmiştir. MRR (Material Removal Rate) performans göstergesine en fazla etkisi olanın %46,09 ile puls on zamanı olduğu, ayrıca sırasıyla puls off, maximum akım, kıvılcım boşluğu ve ayar voltajının da %32,97 – %1,45 – %6,68'lik etkisi olduğu tespit edilmiştir. Maksimum akım ve puls off zamanı ise tel aşınma oranı (Wire Removal Rate - WRR)'na en çok etki eden parametrelerdir. Puls on ve puls off etkileşiminin WRR'ye etkisi %32,13'tür. Ayrıca bu çalışma göstermiştir ki puls

sürecinin uzatılması WWR yi artırmış, tel hızını artırmak ise WWR'yi azaltmıştır. Yüksek puls on seviyesi kullanımı parça üzerinde kalın bir cüruf tabakası oluşturmuştur. Düşük puls on zamanı ve yüksek puls off zamanı durumunda ise telin malzeme üzerinden az talaş kaldırdığı görülmüştür. Ergimiş baloncuğun içindeki yüksek erozyon enerjisinden dolayı malzeme yüzeyinde derin çatlak ve kreterler olduğu gözlenmiştir. Puls on zamanı ve maksimum akım artırıldığında cüruf tabakasının (recast layer) arttığı gözlenmiştir.

Kandpal vd. (2017) çalışmalarında AA6061 tipi malzemenin EDM talaşlı imalat yönteminde çok amaçlı optimizasyon çalışmışlardır. Bu çalışmada kullanılan malzeme karıştırmalı döküm (stir casting) yöntemi ile üretilmiştir ve malzeme özellikleri SEM (scanning electon microscope) ve EDX (energy dispersive X-ray) yöntemi ile araştırılmıştır. Talaşlı imalat karakteristiği olarak talaş kaldırma oranı (MRR), takım aşınma oranı/tel aşınma oranı (TWR), SR, kesilen delik boyunca yüzey topografyasının aşırı kesimi (overcut - OC) incelenmiştir. Seçilen parametreler puls on süresi, puls off süresi, iş zamanı/ görev döngüsü (Duty Factor), kıvılcım aralığı ve polaritedir, faktörler üç seviyeli olarak seçilmiştir. Deneyler için Taguchi L27 ortogonal dizisi kullanılmıştır. Ecoline 200 electrical EDM makinasında deneyler yapılmıştır. Önce tek amaçlı eniyileme sonra çok amaçlı bir eniyileme yapılmıştır. Tüm seçilen parametrelerin MRR üzerine önemli etkisi olduğu görülmüştür. Yüksek MRR için yüksek akım, yüksek puls on zamanı gerektiği gözlenmiştir. Akım ve puls on zamanı arttıkça TWR'ninde arttığı gözlenmiştir. Görev döngüsü (duty factor) faktörünün TWR üzerine önemli bir etkisi olmadığı gözlenmiştir, diğer faktörlerin daha iyi bir kombinasyonunun elektrot aşınmasını daha az olacak şekilde sağlayabileceği anlaşılmıştır. Akım ve puls on zamanının yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen faktörler olduğu tespit edilmiştir. İşlenen alana aşırı enerji aktığı için bu parametre setinin değerinin aşırı artmasının yüzey pürüzlülüğünde çok ciddi bir kötüleşmeye sebep olacağı anlaşılmıştır. Eniyi yüzey pürüzlülüğü değeri elde etmek için belirtilen parametrelerin eniyi bileşimini bulmak gerektiği anlaşılmıştır. TWR de olduğu gibi OC içinde en önemli parametre tiplerinin akım ve puls on zamanı olduğu tespit edilmiştir. Akım artınca OC'de ciddi bir şekilde artmıştır, oysa yüksek puls on zamanı artışı OC'de ortalama bir azalma sağlamıştır. Görev döngüsünün OC üzerine etkili olmadığı anlaşılmıştır. Diğer parametreler sabit tutulduğunda maksimum akım, puls on zamanı ve görev döngüsünün en iyi kombinasyonları en az OC'yi garanti etmektedir. Yararlılık konsepti çok amaçlı eniyilemeye olanak sağlamıştır. Bu analizin sonucunda ise

puls on zamanı için faktörün birinci seviyesi, maksimum akım için faktörün birinci seviyesi ve görev döngüsü için ise faktörün üçüncü seviyesi çok amaçlı eniyilemeyi sağlamıştır.

Arriandiaga vd. (2018), çalışmalarında WEDM ile kesilen iş parçasının yüksek ölçü doğruluğunda çıkması için bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu çalışmada tel ilerleme yolunun alternatifleri sunularak, kesim sonucunda ortaya çıkacak olan iş parçası ölçü doğruluğu tespit edilmeye çalışılmıştır. Yapay sinir ağları yöntemi ile işlenecek parçanın ölçüsel hatasının tespiti hazırlığı yapılmıştır. Tavlama Benzetimi ile telin alternatif ilerleme yolları belirlenerek Yapay Sinir Ağları ve Tavlama Benzetimi kombine edilmiştir, bu birleştirmedeki hedef minimum ölçü hatası elde edecek tel ilerleme yolunun bulunmasıdır. Modelin pratik doğrulaması sanayi koşullarında yapılmıştır. Değişken parametreler malzeme yüksekliği, çevrim tamamlanma süresi, akım yoğunluğu, açık devre voltajı, dielektik sıvı basıncı, tel gerilimi, tel ile iş parçası arası boşluk ve radyüs değeridir. ONA AX3 WEDM tezgâhında deneyler yapılmıştır ve 0,25 mm çapında pirinç tel kullanılmıştır. Zeiss 850 (Numerical Control/NC) (Coordinate Measuring Machine - CMM) cihazında ölçümler yapılmıştır. Birinci vaka 10 mm radyüs 80 mm kalınlığında malzeme durumudur, bu deneyde en az hata, en az radyüs kavisi/eğriliği hatası ve tel deformasyonu görülmüştür, kesme hattında da az sapma olmuştur. İkinci vaka 4 mm radyüs, 50 mm kalınlıklı malzeme durumudur, yüksek eğrilik ve fazla tel deformasyonu olmuştur. Aynı zamanda yükseklik diğer deneylere göre daha düşüktür. Üçüncü vakada 3mm radyüs 100 mm malzeme durumudur, tele bağlı stresten kaynaklı iş parçasında en fazla bozulma görülmüştür. Sonuç olarak yapılan vaka çalışmaları ve önerilen modeller ile ölçü sapması kesim yapılmadan düzeltildiği için %80 azaltılmıştır.

Choudhary vd. (2017), uzay havacılıkta kullanılan Hastelloy C-4 ün işlenmesinde kriptojenik işlem görmüş tel elektrot ve kriptojenik işlem görmemiş bakır elektrodun yüzey pürüzlülüğü ve işleme performansı üzerine etkisini araştırmışlardır. Değişken girdi parametreler elektod tipi, akım seviyesi, puls on zamanı ve puls of zamanıdır, değişken parametrelerden elektrot tipi iki düzeyli, diğerleri ise üç düzeylidir. Performans karakteristiği ise yüzey pürüzlülük değeridir. Deneyler Taguchi L18 dizisine göre yapılmıştır. Deneylerin sonuçlarının analiz edilmesiyle, akım seviyesinin yüzey pürüzlülüğü için en etkili parametre olduğu, ardından puls on zamanı, elektrot tipi ve puls

off zamanının olduğu görülmüştür. En az yüzey pürüzlülüğü; akım seviyesinin, puls on süresi ve puls off süresinin düşük seviyelei olan birinci düzeylerinde görülmüştür. Karşılaştırılan diğer çalışmalarda da puls on zamanı, elektrot tipi (bakır, pirinç olması gibi) ve akım seviyesinin yüzey pürüzlülüğü üzerine önemli etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Ancak bu çalışma ayrıca ispat etmiştir ki, kriptojenik işlem görmüş tel, işlem görmemiş tel elektrota göre yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmiştir.

Jafari vd. (2017), metal tabanlı mikro kanal ısı aktarıcılarının üretiminde kullanılan μ-WEDM yönteminin yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisini incelemiştir. Deneyler istenen yüzey kalitesini elde etmede uygun parametre setini bulmak için yapılmıştır. Düşük maliyeti ve yüksek iletkenliği sebebiyle oksijensiz bakır, soğutma sistemleri malzemelerinde en yaygın kullanılan malzeme olduğundan deneylerde kullanılmıştır. Faktörle; Ton süresi, Toff süresi, voltaj, kıvılcım çakma süresi (SF - spark time), deşarj akımı ve tel hızıdır. Tüm faktörler beş seviyeli seçilmiştir. Sabit değişkenler tel gerginliği, dielektrik sıvı basıncı, tel malzemesi tipi ve tel çapı olarak belirlenmiştir. Performans kriterleri Ra, Rz ve Rv yüzey pürüzlülük değerlerinin farklı ölçü birimleridir. Deneyler Taguchi L25 dizinine göre yapılmıştır, varyans analizi ile yüzey pürüzlülüğü üzerine kritik etkisi olan parametreler belirlenmiştir. Deneylerde Sodick AP250L tel erozyon tezgâhı ve pirinç tel kullanılmıştır. ANOVA ve diğer analiz sonuçları, yüzey pürüzlülüğü üzerine en baskın değişken parametrenin akım olduğunu göstermiştir. Puls on zamanının ise yüzey pürüzlülüğü üzerine ikinci önemli parametre olduğu görülmüştür. Puls of zamanının ve voltaj ilgili performans karakteristikleri üzerine en az etkisi olan parametreler olarak görülmüştür. Yapay sinir ağları modelleri kullanılarak süreç parametrelerinin varyasyonlarını belirlenmiştir. %99,5 güven seviyesinde, tahminler yüksek güvenilirlikte bulunmuştur. Sonuçlar μ-WEDM parametrelerini istenen yüzey pürüzlülüğü seviyesinde belirlemeyi sağlamıştır, bu da mikrokanallar için iyi kontrol edilebilen akış ve ısı transfer karakteristiğini sağlamıştır.

Jangra vd. (2017), Nimonic-90 kalite malzemenin WEDM'de işlenmesinde deney tasarımı ile eniyi makina parametreleri araştırılmıştır. Nimonic-90 Nikel temelli bir alaşım olup, yüksek sıcaklıklarda 950 dereceye kadar dayanabilen yüksek kopma direnci ve yüksek sürtünme direnci olan bir malzemedir ve uzay havacılık endüstrisinde sıklıkla kullan bir malzeme olduğu için deneylerde kullanılmıştır. Girdi parametreler pik akım

(Lp), puls on zamanı (Ton), puls off zamanı (Toff), servo voltajı (SV) dır ve bu faktörlerin her biri ikişer seviyelidir. Bu parametreler Yanıt Yüzey Metodolojisi (RSM/Response Surface Methodology) kullanılarak üç tane amaç karakteristiği olan kesme hızı, yüzey pürüzlülüğü, radyal aşırı kesim performans göstergeleri araştırılmış ve modellenmiştir. Mevcut deneylerde karesel bir model tüm performans göstergeleri için önerilmiştir. Varyans analizi (ANOVA) göstermiştir ki pik akım, puls on süresi, puls off zamanı ve servo voltajı yüzey pürüzlülüğü parametreleri, kesme hızı ve radyal aşırı kesim performans karakteristiklerini etkileyen önemli parametrelerdir. Yine çalışmanın analiz sonuçlarına göe görülmüştür ki; pik akım, puls on zamanı ve servo voltajı parametreleri radyal aşırı kesim performans karakteristiğini etkileyen önemli parametrelerdir. Önem dereceleri tespit edilen parametreler ile istenen çok amaçlı eniyileme yapılmıştır. Çok amaçlı optimizasyonu sağlayan kombinasyon pik akım için 102 A, puls on zamanı için 110 µs, puls of zamanı için 45 µs ve servo voltajı için 30 V olarak bulunmuştur. SEM kullanılarak mikro sertlik profili ve erozyon enerjisinin (DE) yüzey topoğrafyasına etkisi incelenmiştir. İşlenen yüzey topografyası DE seviyesinin farklı seviyeleri ile ilgilidir, yüksek erozyon enerjisi uygulandığında derin kreter yüksekliği ve yüksek kalınlıkta cüruf tabakası ile doğrudan ilişkili olduğu görülmüştür. Oysaki düşük erozyon enerjisi ile hassas bir yüzey ve minimum cüruf tabakası elde edildiği görülmüştür.

Akkurt vd.'nin (2014) çalışmalarında, Adaptif Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) modellemesi kullanılarak Dievar sıcak takım iş çeliğinin WEDM ile işlenmesinden sonra yüzey pürüzlülüğünün deneysel bir çalışma temelinde tahminlemesini yapmışlardır. Tabla besleme hızı (fr), akım (C) ve puls on zamanı (Pon) deneysel çalışmada ve modellemede bağımsız değişkenler olarak seçilmişlerdir ve faktörler üçer düzeylidir. Sabit değişkenler voltaj, soğutucu sıvı basıncı, tel besleme hızı, tel gerginliği ve tel elektrot çapıdır. Performans karakteristiği yüzey pürüzlülüğüdür. Deneylerde Makino U32 WEDM tipi makina kullanılmıştır Analiz sonuçlarında elde edilen bulgular sıralanmıştır. Plot grafikleri ile performans karakteristiği üzerine parametrelerin etki dereceleri analiz edilmiştir. Yaklaşık olarak 5 mm/min tabla besleme hızında ve akımın bileşkesinde en fazla yüzey pürüzlülüğü değeri çıktığı göülmüştür. Akım değerinin 34 A civarında olduğunda en fazla yüzey pürüzlülüğü çıktığı görülmüştür. Akım ve tabla ilerleme hızı, puls on süresine nazaran yüzey pürüzlülüğünü negatif yönde etkileyen parametreler olduğu görülmüştür. Yapılan deneyler ANFIS metodunda Bell ve Gaussian

üyelikleri ilede tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bell şekilli üyelik diğerinden daha fazla hata ile tahminleme yapmıştır. Gaussian %5,23 hata ile tahminleme yaparken, Bell ise %13,18 hata ile tahminleme yapmıştır.

Akbari vd. (2014) çalışmalarında talaşlı imatta WEDM parametrelerinin Ti50Ni40Cu10 kalite malzeme de MRR ve SR, Taguchi metodu kullanılarak en iyilenmesini araştırmışlardır. L18 otogonal dizisi kullanılarak WEDM'de bir dizi deney yapılmıştır. Bütünleşik bir teknik ANOVA ve L18 ortogonal dizisi kullanılarak pik akım, puls on zamanı, puls off zamanı, servo voltajı ve tel beslemesi parametrelerinin MRR and SR üzerine etkisi incelenmiştir. Pik akım iki düzeyli, diğer faktörler ise üçer düzeyli seçilmiştir. Tel elektrot tipi ve çapı, dilektrik sıvı basıncı sabit tutulmuştur. Analiz sonucunda pik akım, puls on zamanı ve bunlar arasındaki pik akım x puls on zamanının bütünleşik etkisinin en önemli parametreler olduğu tespit edilmiştir. Puls of, servo voltajı ve tel besleme hızı MRR üzerine önemli bir etkisi olmadığı görülmüştür. Pik akım, puls on zamanının, servo voltajı ve pik akım x puls on zamanı SR performans karakteristiği üzerine önemli süreç parametreleri olduğu, diğerlerinin çok önemli süreç parametreleri olmadığı analizler sonucunda belirlenmiştir. Pik akım parametresinin % 45-48 arası oranda MRR ye en fazla etki eden parametre, puls on zamanı ve servo voltajının SR üzerine %21-35 ve %21,84 oranında etki ettikleri görülmüştür. MRR perfomans karakterine IP x Ton parametrelerinin bütünleşik etkisi %9,64 olarak, SR perfomans karakterine IP x Ton parametrelerinin bütünleşik etkisi %4,37 olarak tespit edilmiştir. Kurulan model ile MRR için hata oranı %3,22 ve SR için %5,73 olarak oluşturulmuştur.

Karunamoorthy ve Ramakrishnan (2006) WEDM operasyonu için Taguchi robust tasarımı kullanarak çok amaçlı optimizasyon üzerine çalışma yapmışlardır. Deneyler L16 Taguchi metodu kullanılarak yapılmıştır. Her bir deney puls on zamanı, tel gerginliği, bekleme süresi, tel besleme hızı ve ısıtma akımı yoğunluğu gibi farklı süreç parametreleri altında yapılmıştır. Seçilen bu faktörler 4 düzeylidir. Performans karakteristikleri, talaş kaldırma oranı, yüzey pürüzlülüğü ve tel aşınma oranı olarak seçilmiştir. Sabit parametreler tel çapı, tel tipi ve numune boyutları olarak belirlenmiştir. Deneylerde Robofil 290P CNCWEDM Charmilles makinası ve 0,25 mm çapında çinko kaplı pirinç tel kullanılmıştır. Deneyler dört tekrarlı olarak yapılmıştır. Bu performans karakteristikleri için çok amaçlı optimizasyon yapılmıştır. Çok amaçlı sinyal gürültü oranı (MRSN) gerçek

değerden sapmayı ölçmek için kullanılmıştır. MRSN oranı hesaplaması için C+++ da program yapılmıştır. Varyans analizi prametrelerin performans karakteristikleri üzerindeki önem derecelerini tespit etmek için kullanılmıştır. ANOVA da F testinde puls on süresinin en fazla etkili olan karakteristik olduğu %46,40 ile tespit edilmiştir. Akım ve bekleme süresi ise çok amaçlı optimizasyonda önemli faktörler olarak bulunmuştur. Diğer parametrelerin katkısı %10 dan daha az olduğu için istatistiksel olarak gözardı edilmiştir. Sonuçta deneysel doğrulama ile önerilen modelin etkinliği test edilerek iyi sonuçlar elde edilmiştir.

Ikram vd. (2013) çalışmalarında, 8 kontrol faktörünün D2 kalıp çeliği üzerinden talaş kaldırma oranı, yüzey pürüzlülük oranı ve kesik (kerf) performans göstergeleri üzerinden eniyilenmesi konusunda çalışmıştır. Deneyler farklı koşullar altında tel besleme hızı, dielektrik sıvı basıncı, puls on zamanı, puls off zamanı, açık devre voltajı, tel gerginliği, servo voltajı ve farklı malzeme kalınlıkları için yapılmıştır. Bu sekiz faktörün tamamı üç düzeyli olarak seçilmiştir. Sabit tutulan parametreler kesim için kullanılan pirinç tel, diiyonize sıvı ve telin çapıdır. Taguchi L18 ortagonal dizisi kullanılmıştır. ANOVA ve sinyal/gürültü oranı (S/N) istatiksel analiz, önemli kontrol faktörlerini belirlemek ve eniyi parametre seviyesinin tespiti için kullanılmıştır. Ek olarak doğrusal regresyon, toplanır model (addictive model) SR, kesik ve MRR performans göstergeleri için geliştirilmiştir. SR'ye etki eden en önemli faktör %52,147 ve kesik performans karakterine en fazla etki eden faktör %49,622 ile puls on süresi olarak elde edilmiştir. MRR performans göstergesine etki eden en önemli faktörler %30,44 ile voltaj ve %47,059 ile puls on süresi bulunmuştur. Kurulan doğrusal regresyon modeli için doğrulama deneyleri yapılmıştır. Modelin sapma oranı yüzey pürüzlülüğü için %1,57 ve kesik performans karakteri için %1,26 ve MRR için ortalama hata %2,24 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak doğrulama deneyleri ile tahmin değerlerinin iyi seviyede olduğu tespit edilmiştir. Puls on zamanı, SR'yi, kerf değerini ve MRR'yi en çok etkileyen faktör olarak bulunmuştur.

Chen vd. (2004) bu çalışmada iyi yüzey pürüzlülüğü elde etmek için ilk ateşlemede kullanılan, geleneksel çevrimdeki düşük güç modunu işleme süreci için modifiye edilmiştir. Taguchi L8 kalite tasarımı, ANOVA testi, F testi analizler için kullanılmıştır. Değişken parametreler; puls üretme çevrimi, dielektrik sıvı iletkenliği, direnç çevrimi,

kapasitans çevrimi, voltaj, tabla ilerleme hızı ve puls of zamanı olarak belirlenmiştir. Puls üretme çevrimi ac ve dc olarak iki seviyelidir, diğer parametreler ise düşük, orta ve yüksek olmak üzere üç seviyelidir. Makina voltajı, akım limit direnci, puls üretme çevrimi ve kapasitans yüzey pürüzlülüğünü etkileyen önemli parametreler olarak bulunmuştur. Buna ek olarak düşük dielektrik iletkenliği, erozyon kıvılcımının etkisinin iş parçasına yansıması için önemli olduğu görülmüştür. Faktör seviyeleri Ra değeri 0,22 olacak şekilde eniyilenmiştir. Puls üretme sistemi dc puls üretme sisteminin (iş parçası katodik, tel ise anodik yapıda) ac den daha iyi sonuç verdiği görülmüştür. Ayrıca çalışma açık bir şekilde göstermiştir ki çevrimde kapasitans kullanılmaması halinde daha iyi bir yüzey pürüzlülüğü elde edilebilnmektedir.

Corny vd. (2017) bu çalışmada pirinç tel kullanılarak kalıp çeliği olan X30WCrV9-3 (1.2581)'ün WEDM ile kesiminde geometrik doğruluğu tahmin edilmeye çalışılmıştır. Seçilen parametrelere bağlı olarak grafikler ile faktör etkileri araştırılmıştır. Sonuç olarak kullanılan tel elektrodun tipinin geometrik doğruluk üzerine etki ettiği tespit edilmiştir.

5. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde hassas kesim kalıp malzemelerinden olan CPOH çeliğinin WEDM yöntemi ile kesimi için belirlenen performans karakteristiklerinin eniyilenmesinden bahsedilecektir. Analizler Yanıt Yüzey Yöntemindeki tasarımlardan biri olan Merkezi Kompozit Tasarım ile gerçekleştirilmiştir.

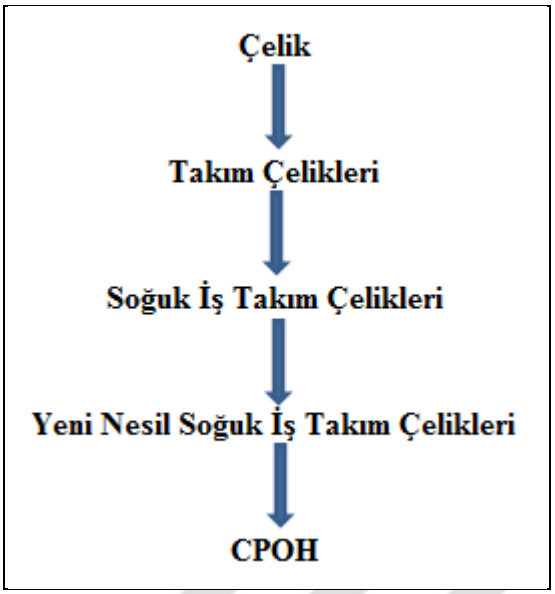
5.1. Materyal

Hassas kesim kalıplarının, sürekli çalışan kesme, bükme ve form verme bileşenlerinin malzemesi olan CPOH çeliğinin, en önemli işleme makinası olan tel erozyon ile kesimi üzerine çalışılmıştır. Kesim süreci için yüzey pürüzlülüğü ve kesme süresi performans karakteristiği olarak belirlenmiştir.

CPOH çeliği soğuk iş takım çeliği olup günümüzde gelişen endüstrinin beklentilerini karşılamak için bir çok alanda kullanılmaktadır. Özellikle hassas kesim kalıplarında, dişlilerde ve yüksek aşınma direnci gerektiren ortamlarda sıklıkla tercih edilmektedir.

Deneylerde kullanılacak çelik, deneyler yapılmadan önce bir takım aşamalardan geçirilerek hazırlıklar yapılmıştır.

Bu tez çalışması kapsamında araştırılan ve deneylerde kullanılan malzeme CPOH çeliğidir. CPOH soğuk takım iş çeliğine ilişkin gruplandırma sınıfı Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 0.1. CPOH malzeme sınıflandırılması

Bu çelik hassas kesim kalıplarında sıklıkla kullanılan bir malzeme olup ayrıca patenti Sağlam Metal firması tarafından alınan diğer yabancı patentli hassas kesim kalıp çeliklerinin yerli alternatifidir. Firmanın beyan ettiği kimyasal bileşim Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 0.1. Deneylerde kullanılan CPOH malzemeye ait kimyasal bileşim

	% C	% Cr	% Mo	% V	% P	% S	%Fe
Aralık	%0,95 - %1,1	%7,8 - %8,1	%2,4 - %2,6	%0,25 - %0,35			Kalan
Gerçekleşen	0,99%	7,96%	254,00%	29,00%	2,10%	1,10%	Kalan

Deneyler için alınan malzeme 20x420x3450 ölçülerinde olup, ilgili malzem Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 0.2. CPOH çeliği

Malzeme ham olarak sipariş verildiğinde yumuşak tavlı ve 250 HB sertlikte temin edilmektedir.

CPOH yüksek molibden içerikli soğuk iş takım çeliğidir. Tokluğu 1.2379 çeliğinden daha iyidir. 520 - 560 C arasındaki sıcaklıklarda menevişleme ile maksimum sertlik değeri yaklaşık olarak 63 HRC'dir.

CPOH çeliği civata ovalama makaraları ve taraklarında, kesme takımlarında, soğuk hadde makaralarında, soğuk zımbalarda, derin çekme kalıplarında, yüksek aşındırıcı özelliğe sahip plastiklerin kalıplarında, 10 mm'ye kadar olan sacların hassas kesme kalıplarında, derin çekme kalıplarında, yonga bıçaklarında, kırılmaya maruz kalan kesitlerde, makas bıçaklarında, çapak alma kalıplarında, ağaç işleme takımlarında kullanılır (Anonim, 2018).

Deneylerde malzemeyi kullanmadan önce ön hazırlık süreci yapılmış olup önce ısıl işlem sonrasında ise taşlama ile yüzey düzgünleştirilmiştir. Malzemeye işleme öncesi ısıl işlem yapılmasının sebebi işlendikten sonra yapıldığı takdirde ölçüsel bozulmalar meydana gelmektedir. Isıl işlem yapılmış bir malzemeyi yüksek ölçü doğruluğunda işlemek için ise geleneksel talaş kaldırma yöntemleri yeterli olmayıp tel erozyon ile kesim yapılabilmektedir. Çeliğe uygulanabilecek ısıl işlem koşullarına ait Çizelge 5.2'de verilmiştir.

Çizelge 0.2. CPOH Isıl İşlem Koşulları

Sıcaklık	**Süre**	**Soğutma**	**Tip**
Yumuşak Tavlama	820-860 °C	2-5 Saat	fırında
Gerilim Giderme	600-650 °C	2 Saat	fırında
Sertleştirme	1040-1100 °C	Grup 3	yağ, gaz, Hava ya da sıcak banyo 500-550 °C

20x420x3450 mm boyutlarındaki 15,5 kg lık çelik vakumlu fırında ısıl işlem görmüştür. Isıl işlem neticesinde 61-62 HRC'ye kadar sertleştirilmiştir.

Malzemeye ısıl işlemden sonra meydana gelen gerilmeleri almak, yüzey düzgünsüzlüklerini gidermek için taşlama yapılmıştır. Taşlama için Equiptop ESG-1632ASD (Şekil 5.3.) taşlama cihazı kullanılmıştır. Taşlama esnasında soğutucu sıvı olarak bor yağı kullanılmıştır.



Şekil 0.3. Taşlama tezgâhı

5.2. Yöntem

Deneyler, AgieCharmilles Cut 300 (Şekil 5.4.) tezgâhında yapılmıştır. Cut 300 tezgâhı yeni nesil bir tel erozyon tezgâhı olup servo motor, jeneratör ve voltaj ayarlama teknolojileri makinanın bulunduğu koşullara uygun kendini korumaya almasını sağlayan özellikler olarak eklenip, iyileştirilmiştir.

Cut 300 tezgâhı endüstrinin ihtiyaç duyduğu; beklenen hızlı kesim ve iyi ölçü kalitesinde parça almak için geliştirilmiştir. Diğer model makinalarda, hem hızlı kesim hem de iyi ölçü doğruluğunda parça elde etmek için bazı parametrelerinin düşük değerleri kullanılarak zaman ve maliyet konusundan feragat edilmesi gerekmekteydi. Bu tezgâh yapılan araştırma geliştirme faaliyetleriyle üstün özellikler kazanmış ve birbiriyle çelişen hedefleri aynı anda en iyilemeyi sağlamaya yardımcı olacak şekilde jeneratörler, alternatörler ve servo motorlar geliştirilmiştir.

Makinanın soğutma sistemi de parçaya kaldırılan talaşın tekrar yapışmasını engelleyecek arada iyi bir yalıtkanlık ve soğutma olacak şekilde tasarlanmıştır. Parça, içi sürekli soğuk dielektirk su ile devir daim olan bir havuz içerisinde kesilmektedir. Bunun haricinde parçanın kesim bölgesine üstten ve alttan basınçlı dielektrik su püskürtülerek de takviye edici ve püskürtme basıncıyla talaşı daha hızlı uzaklaştıran ek enjektörler de vardır. Parça sürekli soğutucu dielektrik su ile temas halinde olduğu için, yüzey pürüzlülüğünü en çok etkileyen talaş yapışmasını ve yüksek enerjinin ısı dolayısıyla deformasyonunu azaltıp dengelemektedir.

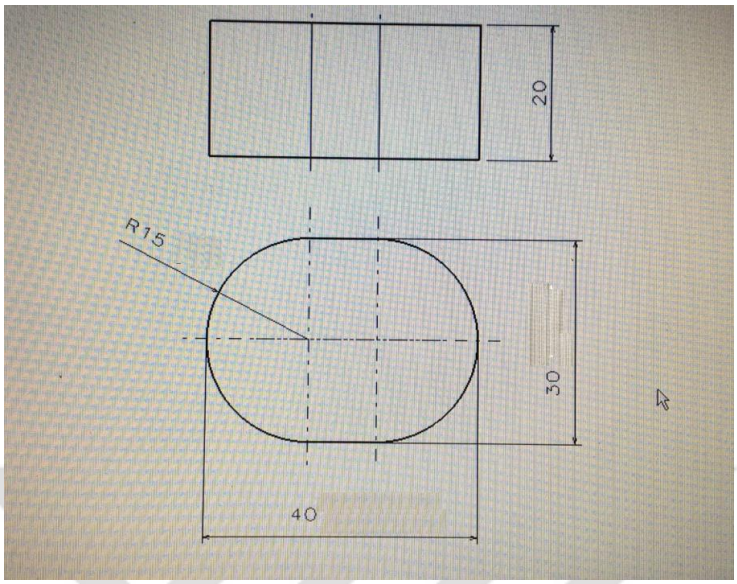
Deneysel çalışmada Cut 300 tezgâhının kullanılmasının nedeni daha önce bu makina ile bir çalışma yapılmayıp, üstün özellikli bir tezgâhın yeni nesil bir soğuk iş takım çeliğinin kesilmesi üzerinde inceleme yapıp parametreleri eniyileyerek, tel erozyon ile kesim yapan firmalara bir alt yapı çalışması oluşturmaktır.



Şekil 0.4. Cut 300 tel erozyon tezgâhı

Tel erozyon tezhagında kesim şekli olarak hem radyus içeriği olan hem de düz kesim içeren Şekil 5.4'te verilen form kullanılmıştır. Numune kesim parçalarının ölçüleri

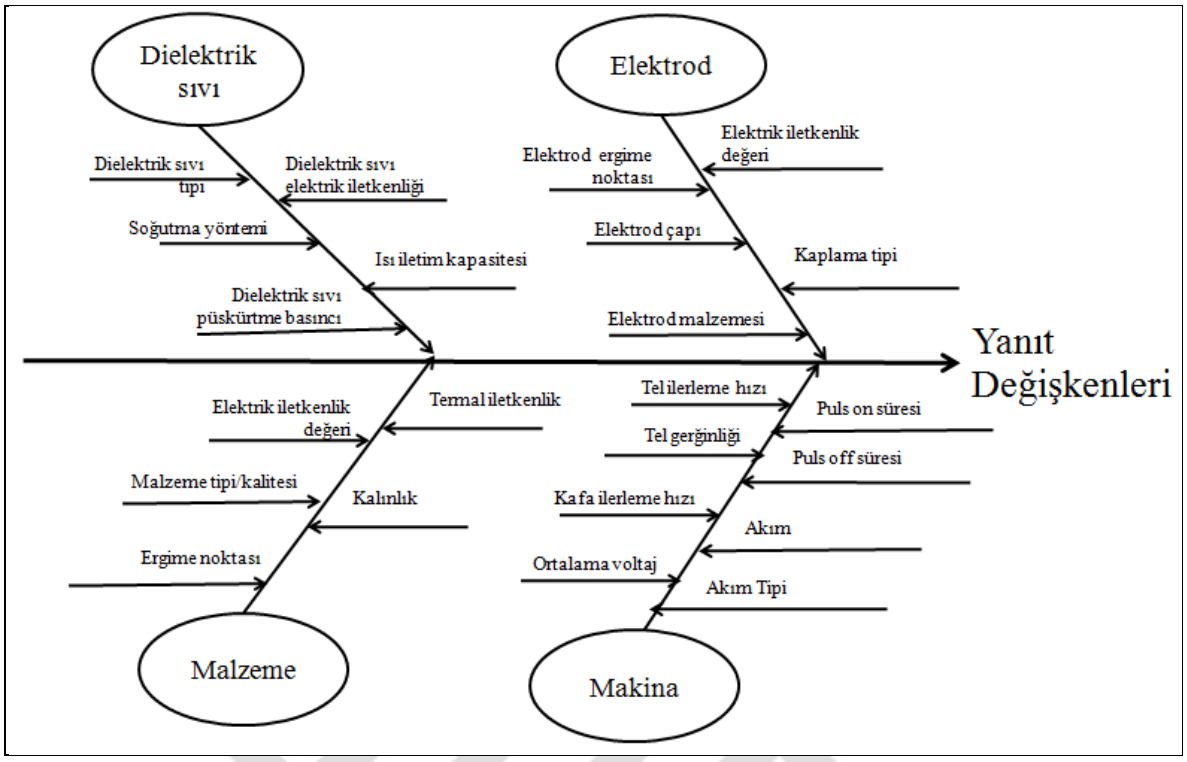
30*40*20 olup R10 formu içermektedir. Deneyler de nötr diiyonize su soğutucu olarak ve bakır kaplı 0,25 mm çaplı tel elektrot kullanılmıştır.



Şekil 0.5. Deneylerde kesimde kullanılan numune formu

5.2.1. Süreç parametrelerinin seçimi

Deney tasarımında kullanılan faktörlerin belirlenmesi için öncelikle beyin fırtınası yapılmıştır. Deneyin gerçekleştirildiği firmanın birikimleri ve literatürden elde edilen bilgiler ışığında doğru parametreler seçilmeye çalışılmıştır. Beyin fırtınası sonucunda ortaya çıkan balık kılçığı diyağramı Şekil 5.6 da verilmiştir.



Şekil 0.6. Süreç parametrelerine ait balık kılçığı diyağramı (Goswami, 2014)

Yapılan beyin fırtınası neticesinde tüm parametreleri kullanmak deney açısından hem maliyetli hem de uzun zaman gerektirdiği için içlerinden kontrol edilebilir en önemli dört faktör seçilmiştir. Bunlar akım, puls on zamanı, puls off zamanı ve tel hızıdır.

Akım: En yüksek akım değerini ayarlayan ve tel elektrota uygulanan akım miktarını kontrol eden parametredir. Daha yüksek değerler daha büyük akım demektir. Tel erozyon kıvılcım enerjisini sağlayan termal ve elektrik kuvveti ile iş parçasından talaş kaldırılmasını sağlayan enerjiyi sağlamaktadır. Cut 300 tezgâhında 20 mm kalınlıktaki malzeme için ayarlanabilecek akım değeri minimum 1 amper ile maximum 30 amper arasında değişmektedir. Birer amperlik artışlar ile yükseltilip alçaltılmaktadır.

Puls on süresi: Elektroda verilen akımın elektroda nüfuz etme süresidir. Bu sürede elektrik enerjisi ile ısınma olmakta iş parçasından istenen ergime sağlanarak talaş kaldırılmaktadır. Makinanın sağlanan teknoloji parametreleriyle 20 mm lik malzemede ayarlanabilecek en küçük puls on süresi 0,05 µs ve en büyük sağlanabilecek puls on süresi 1,05 µs dir. 0,05 µs'lik dilimler ile artış sağlanmaktadır.

Puls off süresi: Elektroda akım verilmeyip parçanın ve kaldırılan talaşın soğumasına izin verilen süredir. Bu süre sağlanmaz sürekli akım verilirse tel kırılmaları, kaldırılan talaşın geri iş parçasına yapışması ve telin iş parçasına yapışarak kısa devre oluşturması mümkündür. Makinanın sağlanan teknoloji parametreleriyle 20 mm lik malzemede ayarlanabilecek en küçük puls off süresi 3,6 µs ve en büyük sağlanabilecek puls off süresi 20 µs dir. 0,1 µs'lik dilimler ile artış sağlanmaktadır. Bu süre çok yüksek olduğu takdirde kesme süresi uzamakta maliyet kaybı meydana gelmektedir. Çok düşük tutulduğunda ise soğutma gerçekleşmeyebilir.

Tel ilerleme hızı (Ws): Tel elektrodun iş parçasını keserken verilmesi gereken hızdır. Makinanın sağlanan teknoloji parametreleriyle 20 mm lik malzemede ayarlanabilecek en küçük tel ilerleme hızı 1 birim ve en büyük sağlanabilecek tel ilerleme hızı 30 birimdir. 0,2'lik dilimler ile artış sağlanmaktadır.

Özet olarak deney tasarımında kullanılan faktörler ve düzeyleri Çizelge 5.3'te verilmiştir.

Çizelge 0.3. Deney tasarımında kullanılan faktörler ve düzeyleri

Faktörler	Düşük Düzey	Yüksek Düzey	Orta Nokta
A:Akım (A)	1	30	15,5
B:Puls On Süresi(µs)	0,05	1,05	0,55
C:Puls Off Süresi(µs)	3,6	20	11,8
D:Tel İlerleme Hızı(mm/dk)	1	30	15,5

5.2.2. Yanıt değişkenlerin ölçülmesi

Hassas kesim kalıplarında yüzey pürüzlülüğü ve kesilen parçanın ölçüleri önemli ve tolerans aralığı dar olduğu için bu iki yanıt deney planlamasında performans karakteristiği olarak seçilmişlerdir. Ayrıca tel erozyon işçilik maliyetlerinin geleneksel üretim yöntemleri olan tornalama ve taşlama işçilik maliyetlerine göre daha yüksek olması nedeniyle kesim süresi de bir performans karakteristiği olarak seçilmiştir.

Yüzey pürüzlülüğü performans karakteri Ra ve Rz olarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülük cihazı parçayı sıkan bir fikstür tarafından MarSurf M 300 (Şekil 5.7) cihazı ile ölçülmüştür.



Şekil 0.7. Yüzey pürüzlülük ölçme cihazı

Parçanın yüzey pürüzlülüğü ölçülmeden önce yan tutularak tel erozyon ile kesim yapılan yüzey üst tarafa getirilmiştir. Daha sonra bir aparat ile sıkılarak şekilde görülen konum aldırılmıştır. Bu şekilde yapılma sebebi parçanın titreşerek hatalı ölçmeyi ve ölçümler arasında fark olmasını engellemektir. Parçanın konumlandırıldığı aparat ve pozisyon Şekil 5.8'de verilmiştir. Ölçümler Standart ISO Lt:1,75 (0,250 x 5) modunda yapılmıştır.



Şekil 0.8. Parça konumlandırılması ve fikstürü

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bulgular ve tartışma bölümünde her bir yanıt için varyans analizleri, artık analizleri, regresyon modelleri ve çekicilik değerlerinden bahsedilecektir.

6.1. Merkezi Kompozit Tasarım İçin Hazırlanan Deney Planı

2^4 tam faktöriyel deney tasarımının üzerine eksen noktalar da eklenerek CCD için oluşturulan deney planı Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Bu deney planında 1-16 numaralı deneyler faktöriyel noktaları temsil etmektedir. 17-24 numaralı 8 deney ise CCD'de yer alan eksen noktalardır. 25-28 numaralı deneyler ise merkez noktada gerçekleştirilen tekrar deneyleridir. Eğer zaman ve maliyet açısından yapılması mümkünse merkez noktalara ait deney planları dörtten fazla da tekrar edilebilir.

Çizelge 0.1. CCD için deney planı

td	un	lock	Faktör 1 A:Akım	Faktör 2 B:Puls On	Faktör 3 C:Puls Off	Faktör 4 D:Ws	Response 1 Rz	Response 2 Ra	Response 3 Kesme Süresi
1	24	Block 1	8,25	0,3	7,7	8,25	28,395	4,775	130,080
2	14	Block 1	22,75	0,3	7,7	8,25	18,792	3,175	86,080
3	21	Block 1	8,25	0,8	7,7	8,25	15,358	2,602	70,350
4	18	Block 1	22,75	0,8	7,7	8,25	6,503	1,082	26,350
5	10	Block 1	8,25	0,3	15,9	8,25	27,380	4,606	125,430
6	12	Block 1	22,75	0,3	15,9	8,25	19,647	3,317	90,000
7	11	Block 1	8,25	0,8	15,9	8,25	14,191	2,408	65,000
8	1	Block 1	22,75	0,8	15,9	8,25	7,236	1,151	30,455
9	9	Block 1	8,25	0,3	7,7	22,75	30,656	5,152	140,440
10	20	Block 1	22,75	0,3	7,7	22,75	8,886	1,523	40,690
11	23	Block 1	8,25	0,8	7,7	22,75	17,518	2,962	80,245
12	25	Block 1	22,75	0,8	7,7	22,75	2,242	0,372	10,250
13	2	Block 1	8,25	0,3	15,9	22,75	29,469	4,954	135,000
14	3	Block 1	22,75	0,3	15,9	22,75	9,961	1,563	45,620
15	28	Block 1	8,25	0,8	15,9	22,75	16,444	2,783	75,325
16	26	Block 1	22,75	0,8	15,9	22,75	2,259	0,419	10,330
17	17	Block 1	1	0,55	11,8	15,5	34,637	5,815	166,152
18	7	Block 1	30	0,55	11,8	15,5	5,617	0,960	30,330
19	4	Block 1	15,5	0,05	11,8	15,5	35,031	5,881	148,840
20	5	Block 1	15,5	1,05	11,8	15,5	8,409	1,336	26,936
21	13	Block 1	15,5	0,55	3,6	15,5	10,501	1,793	48,095
22	22	Block 1	15,5	0,55	20	15,5	11,412	1,945	52,270
23	6	Block 1	15,5	0,55	11,8	1	15,220	2,496	75,185
24	8	Block 1	15,5	0,55	11,8	30	8,000	1,321	35,120
25	16	Block 1	15,5	0,55	11,8	15,5	10,926	1,864	50,040
26	19	Block 1	15,5	0,55	11,8	15,5	10,859	1,890	51,020
27	27	Block 1	15,5	0,55	11,8	15,5	10,888	1,848	52,180
28	15	Block 1	15,5	0,55	11,8	15,5	10,456	1,789	51,780

6.2. Rz Yüzey Pürüzlülüğü Yanıtı İçin Model Seçimi

Tel erozyon makinasında CPOH çeliğinin kesilmesiyle gerçekleştirilen deneylerin yüzey pürüzlülük (Rz ve Ra) ve kesme süreleri ölçüm sonuçları Design Expert 7.0.0 programı yardımıyla analiz edilmiştir. Rz yüzey pürüzlülüğü performans göstergesi için karesel (quadratic) model önerilmiştir. İlgili modele ilişkin sonuçlar Çizelge 6.2'de verilmiştir.

Çizelge 0.2. Rz yüzey pürüzlülüğü yanıt değişkeni için model seçimi

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Linear	5.00	20	0.25	221.98	0.0004	
2FI	2.73	14	0.19	173.26	0.0006	
Quadratic	0.024	10	2.405E-003	2.14	0.2888	Suggested
Cubic	5.038E-003	2	2.519E-003	2.24	0.2542	Aliased
Pure Error	3.376E-003	3	1.125E-003			

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	0.47	0.8733	0.8513	0.8105	7.48	
2FI	0.40	0.9307	0.8900	0.8919	4.27	
Quadratic	0.046	0.9993	0.9986	0.9963	0.14	Suggested
Cubic	0.041	0.9998	0.9988	0.9815	0.73	Aliased

Çizelge 6.2'den de görüldüğü gibi programın önerisi ile yüksek R^2, düşük standart sapma değerlerine sahip karesel (quadratic) model seçilmiştir.

6.3. Rz Yüzey Pürüzlülüğü Yanıtı İçin ANOVA ve Regresyon Analizi

Model seçimi gerçekleştirilen Rz yüzey pürüzlülüğü performans göstergesine ait varyans analizi tablosu Çizelge 6.3'te verilmiştir.

Modelin F tablo değeri 2072,61 ve p-value'nun < 0,05 olması, Ho hipotezini red ederek modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Model terimleri için p değerlerine bakıldığında C-Puls Off süresi hariç hepsinin $p < 0,05$ olduğu görülmektedir. Modelde çok sayıda anlamlı olmayan terimin yer alması halinde program tarafından modelin indirgenmesi önerilmektedir. Bu durumda Çizelge 6.3'te görüldüğü gibi A, B, D, AB, AC, AD, BD, A^2, B^2, D^2 faktörleri kritiktir. Burada A, B, D ana etkileri, AB, A ve B

faktörlerinin ikili etkileşim etkisi AC, A ve C faktörlerinin ikili etkileşimleri, AD, A ve D faktörlerinin ikili etkileşimleri BD, B ve D faktörlerinin ikili etkileşimleri, A^2, B^2, D^2 terimleri de bu faktörlerin karesel etkilerini göstermektedir.

Çizelge 0.3. Rz yüzey pürüzlülüğü yanıtı için varyans analizi tablosu

Analysis of variance table [Partial sum of squares - Type III]

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	39.43	10	3.94	2072.61	< 0.0001	significant
A-Akim	*18.97*	*1*	*18.97*	*9973.77*	*< 0.0001*	
B-Puls On	*13.96*	*1*	*13.96*	*7336.66*	*< 0.0001*	
D-Ws	*1.53*	*1*	*1.53*	*803.66*	*< 0.0001*	
AB	*0.071*	*1*	*0.071*	*37.20*	*< 0.0001*	
AC	*0.051*	*1*	*0.051*	*26.91*	*< 0.0001*	
AD	*2.12*	*1*	*2.12*	*1116.25*	*< 0.0001*	
BD	*0.018*	*1*	*0.018*	*9.63*	*0.0065*	
A^2	*1.10*	*1*	*1.10*	*579.40*	*< 0.0001*	
B^2	*1.98*	*1*	*1.98*	*1039.27*	*< 0.0001*	
D^2	*7.222E-003*	*1*	*7.222E-003*	*3.80*	*0.0681*	
Residual	0.032	17	1.902E-003			
Lack of Fit	*0.029*	*14*	*2.069E-003*	*1.84*	*0.3398*	*not significant*
Pure Error	*3.376E-003*	*3*	*1.125E-003*			
Cor Total	39.46	27				

Model için gerçekleştirilen uyum yetersizliği testi sonucunda uyum yetersizliği anlamsız çıkmaktadır. Modele ait R^2 değerleri Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 0.4. Rz yüzey pürüzlülüğü yanıtı için R^2 değerleri

Std. Dev.	0.044	R-Squared	0.9992
Mean	3.72	Adj R-Squared	0.9987
C.V. %	1.17	Pred R-Squared	0.9979
PRESS	0.083	Adeq Precision	164.324

Rz yüzey pürüzlülüğüne ait regresyon denklemi denklem (6.1)'de verilmiştir.

$$Rz = + 3,29 - 0,89 * Akım - 0,76 * Puls\ On * - 0,25 * Ws - 0,067 *$$

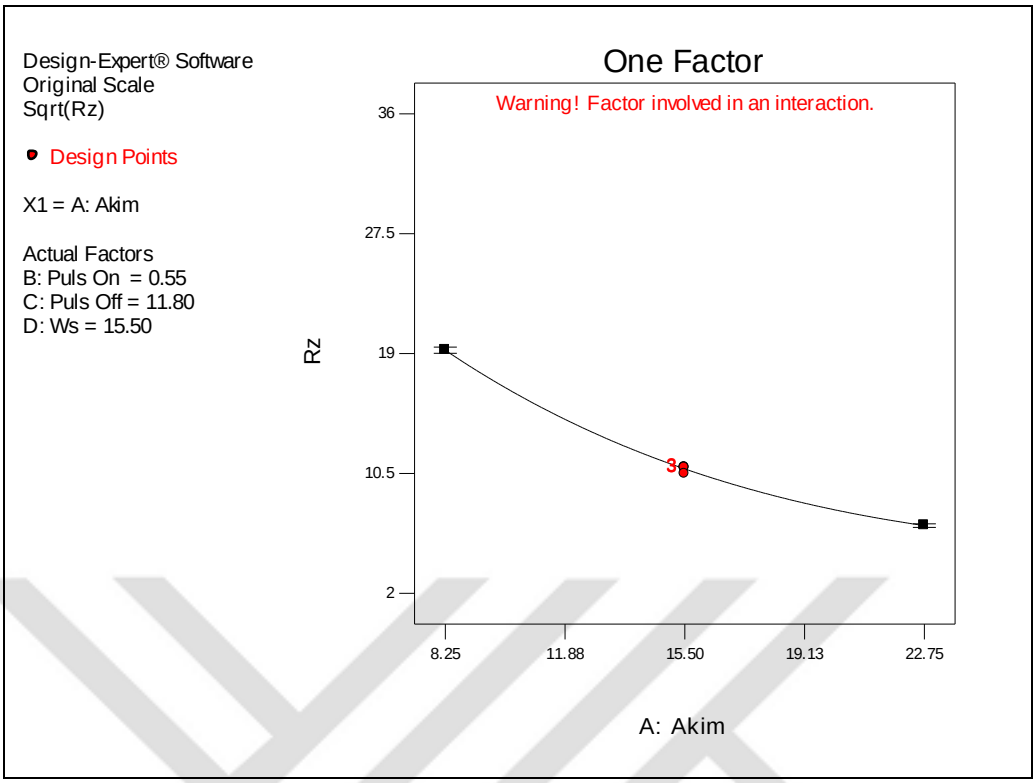
$$Akım * Puls\ On + 0,057 * Akım * Puls\ Off * - 0,36 * Akım * Ws + 0,034 * Puls \quad (6.1.)$$

$$On * Ws + 0,21 * Akım^2 + 0,28 * Puls\ On^2 * 0,017 * Ws^2$$

Denklem 6.1'de görüldüğü üzere, akım (A) faktörünün 0,89 katsayı ile en yüksek etkiye, sonrasında 0,76 katsayısı ile puls on (B) faktörünün ve en az etkiye 0,25'lik bir katsayı ile tel ilerleme hızının sahip olduğu tespit edilmiştir.

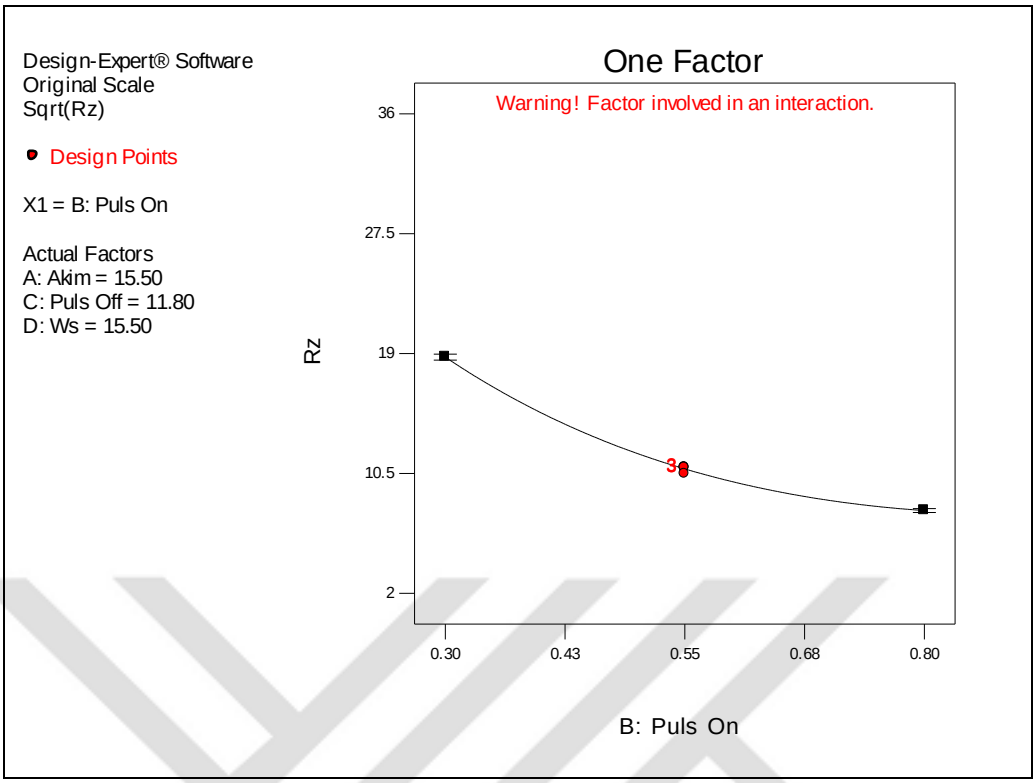
Modele dâhil edilen faktörlerin ana etkilerinin Rz yüzey pürüzlülüğü yanıt değişkenine olan etkileri, grafikler yardımıyla da incelenmiştir.

Akım (A) faktörünün ana etkisinin Rz yüzey pürüzlülüğü performans göstergesine etkisi Şekil 6.1'de verilmiştir. Şekil 6.1'de görüldüğü gibi akım arttıkça Rz yüzey pürüzlülük değeri azalmaktadır. Akım 22,75 amper olduğunda Rz en düşük değerini almaktadır, akım 8,25 amper olduğunda Rz en yüksek değerini almaktadır. Akım faktörünün yüksek düzeyinde eniyi sonucun alınması gösteriyor ki, parçanın aynı bölgesi sürekli akıma maruz kalmak yerine iyi bir soğutma ve yüksek akım ile tek kesim yapıldığında daha az krater oluşmakta ve yüzey pürüzlülük değeri iyi çıkmaktadır. Grafikte eğimin olması faktörün kritikliğini de göstermektedir. Grafikte akım faktörünün etkileşime sahip olduğu uyarısı da görülmektedir.



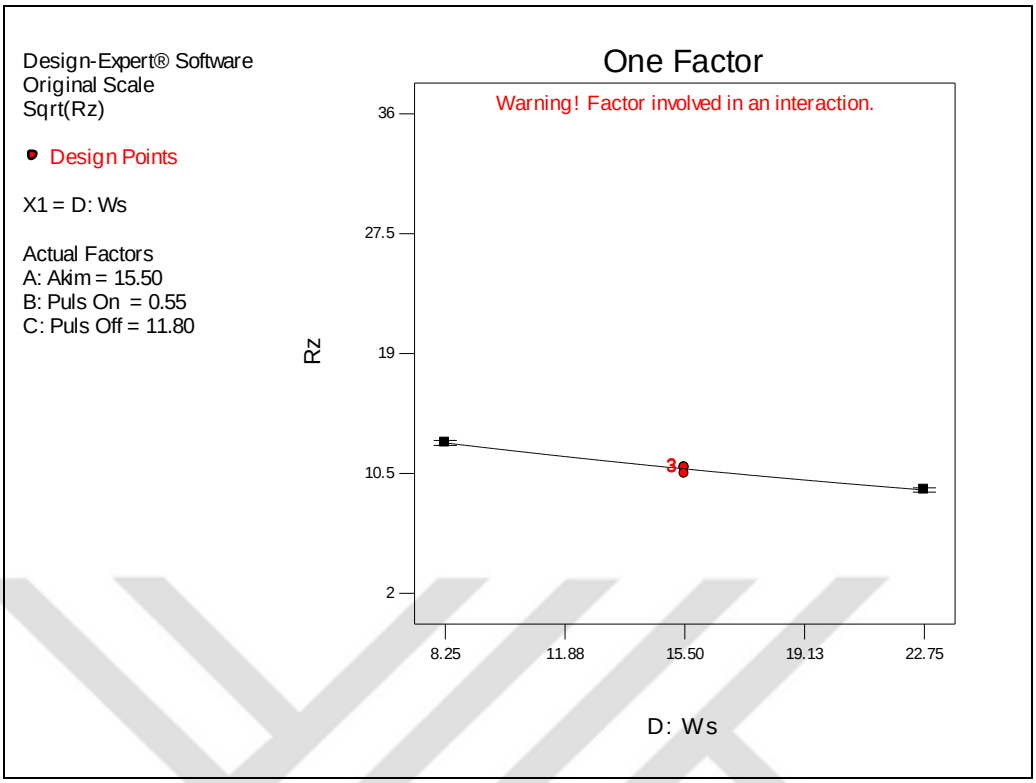
Şekil 0.1. A:Akım faktörünün Rz yanıtına etkisi

Puls on süresi (B) faktörünün ana etkisinin Rz yüzey pürüzlülüğü performans göstergesine etkisi Şekil 6.2'de verilmiştir. Şekil 6.2'de görüldüğü gibi puls on süresi arttıkça Rz yüzey pürüzlülüğü en düşük değerini almakta, puls on süresi azaldıkça Rz yüzey pürüzlülüğü performans göstergesi değeri de azalmaktadır. Grafikte eğimin olması faktörün kritikliğini de göstermektedir. Puls on süresi parça kesimi için akım verilen süre olduğu için aynı bölgede daha yüksek enerji ancak daha az tekrar ile uygulama süresi yüzey pürüzlülüğüne olumlu yönde etkilemektedir. Ancak buradaki sebeplerden biri de kesim yapılan iş parçasının havuzlu bir sistemde işlenmesidir. Böylece hem yüksek dozda uygulama hem de hızlı talaş soğutma ve uzaklaştırmayla yüzey pürüzlülüğü için iyi sonuç alınmaktadır Grafikte puls on süresi faktörünün etkileşime sahip olduğu uyarısı da görülmektedir.



Şekil 0.2. B: Puls On süresi faktörünün Rz yanıtına etkisi

Tel ilerleme hızı (D) faktörünün ana etkisinin Rz yüzey pürüzlülüğü performans göstergesine etkisi Şekil 6.3'te verilmiştir. Şekil 6.3'te görüldüğü gibi tel ilerleme hızı arttıkça Rz yüzey pürüzlülüğü en düşük değerini almakta, tel ilerleme hızı azaldıkça Rz yüzey pürüzlülüğü performans göstergesi değeri de azalmaktadır. Grafikte eğimin diğer faktörlerin grafiklerine göre az olması tel ilerleme hızı faktörünün kritikliğinin diğer faktörler olan akım ve puls on süresi faktörüne göre daha az olduğunu göstermektedir. Grafikte tel ilerlenme hızı faktörünün etkileşime sahip olduğu uyarısı da görülmektedir.



Şekil 0.3. D: Tel ilerleme hızı faktörünün Rz yanıtına etkisi

6.4. Ra Yüzey Pürüzlülüğü Yanıtı İçin Model Seçimi

Ra yüzey pürüzlülüğü performans karakteri için ölçüm sonuçları programa girildiğinde karesel model önerilmiştir. Bu seçim Çizelge 6.5'te verilmiştir.

Çizelge 0.5. Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için model seçimi

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Linear	0.80	20	0.040	160.85	0.0007	
2FI	0.43	14	0.031	122.63	0.0011	
Quadratic	6.054E-003	10	6.054E-004	2.42	0.2522	Suggested
Cubic	3.488E-005	2	1.744E-005	0.070	0.9340	Aliased
Pure Error	7.489E-004	3	2.496E-004			

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	0.19	0.8788	0.8577	0.8178	1.21	
2FI	0.16	0.9353	0.8972	0.8971	0.68	
Quadratic	0.023	0.9990	0.9979	0.9945	0.036	Suggested
Cubic	0.013	0.9999	0.9994	0.9990	6.354E-003	Aliased

Bu sonuçlar dikkate alınarak Ra yüzey pürüzlülüğü için de karesel modelin seçilmesi uygun görülmüştür. Karesel modelin R^2 değerleri yüksek, standart sapma değeri düşüktür.

6.5. Ra Yüzey Pürüzlülüğü Yanıtı İçin ANOVA ve Regresyon Analizi

Model seçimi gerçekleştirilen Ra yüzey pürüzlülüğü performans göstergesine ait varyans analizi tablosu Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 0.6. Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için varyans analizi tablosu

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	6.62	9	0.74	1901.60	< 0.0001	significant
A-Akim	*3.22*	*1*	*3.22*	*8310.32*	*< 0.0001*	
B-Puls On	*2.36*	*1*	*2.36*	*6100.65*	*< 0.0001*	
D-Ws	*0.25*	*1*	*0.25*	*644.65*	*< 0.0001*	
AB	*0.012*	*1*	*0.012*	*31.87*	*< 0.0001*	
AC	*6.506E-003*	*1*	*6.506E-003*	*16.81*	*0.0007*	
AD	*0.35*	*1*	*0.35*	*901.74*	*< 0.0001*	
BD	*6.548E-003*	*1*	*6.548E-003*	*16.92*	*0.0007*	
A^2	*0.18*	*1*	*0.18*	*477.61*	*< 0.0001*	
B^2	*0.31*	*1*	*0.31*	*788.02*	*< 0.0001*	
Residual	6.968E-003	18	3.871E-004			
Lack of Fit	*6.219E-003*	*15*	*4.146E-004*	*1.66*	*0.3764*	*not significant*
Pure Error	*7.489E-004*	*3*	*2.496E-004*			
Cor Total	6.63	27				

Modelin F tablo değeri 1901,60 ve p-value'nun < 0,05 olması, Ho hipotezini red ederek modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Model terimleri için p değerlerine bakıldığında, p < 0,05 olan terimler anlamlı olarak kabul edilmekte ve modele dâhil edilmektedir. Bu doğrultuda A, B, D, AB, AC, AD, BD, A^2, B^2 faktörleri kritiktir. Burada A, B, D ana etkileri, AB, A ve B faktörlerinin ikili etkileşim etkisi AC, A ve C faktörlerinin ikili etkileşimleri, AD, A ve D faktörlerinin ikili etkileşimleri BD, B ve D faktörlerinin ikili etkileşimleri, A^2, B^2 terimleri de bu faktörlerin karesel etkilerini göstermektedir. Bu faktörler ve etkileşimlerin tamamının p < 0,05 olduğu görülmektedir. Modelin uyum eksikliği anlamsız çıkmış, modelde herhangi bir uyum eksikliği görülmemiştir. Modelin R^2 değerleri Çizelge 6.7'de verilmiştir.

Çizelge 0.7. Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için R^2 değerleri

Std. Dev.	0.020	R-Squared	0.9989
Mean	1.53	Adj R-Squared	0.9984
C.V. %	1.29	Pred R-Squared	0.9974
PRESS	0.018	Adeq Precision	155.830

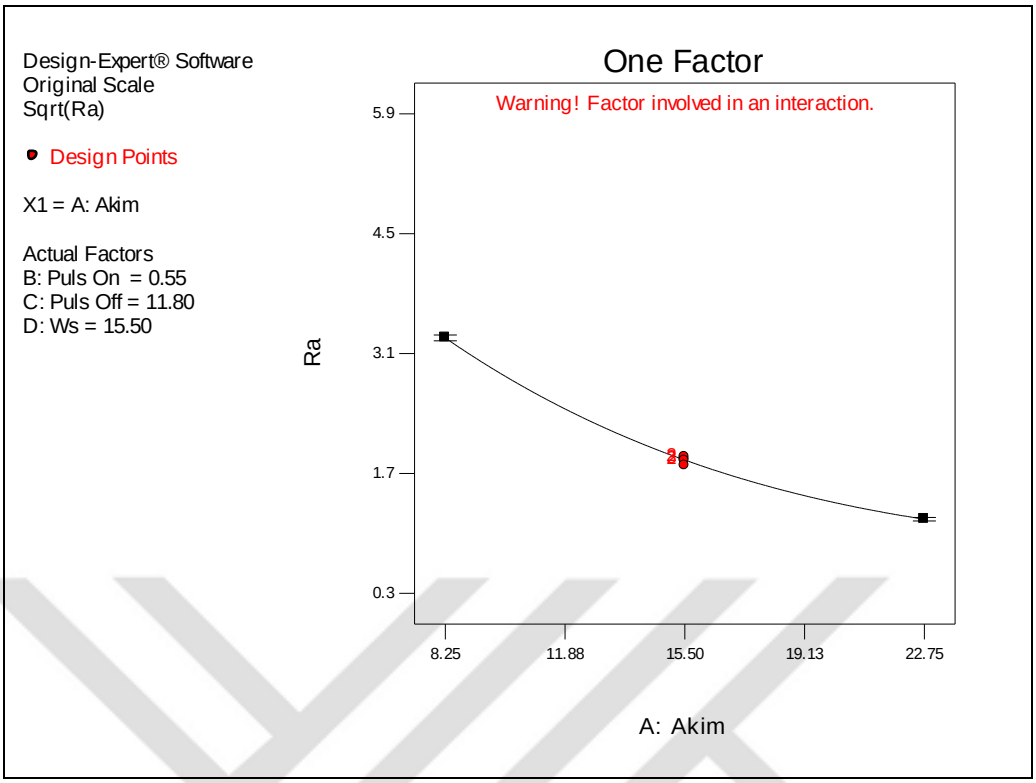
Modelin R^2 değerleri oldukça yüksektir. Ra yüzey pürüzlülüğü performans göstergesinin tahminlemesi için uygun değerlerdedir. Regresyon analizi sonucu Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için oluşturulan denklem eşitliği (6.2)'de verilmiştir.

$$Ra = 1{,}36 - 0{,}37 * A - 0{,}31 * B - 0{,}1 * D - 0{,}028 * A * B + 0{,}02 * A * C$$
$$* - 0{,}15 * A * D + 0{,}02 * B * D + 0{,}083 * A^2 * + 0{,}11 * B^2 \qquad (6.2.)$$

Denklem 6.2'de görüldüğü üzere, akım (A) faktörünün 0,37 katsayı ile en yüksek etkiye, sonrasında 0,31 katsayısı ile puls on (B) faktörünün ve en az etkiye 0,1'lik bir katsayı ile tel ilerleme hızının sahip olduğu tespit edilmiştir.

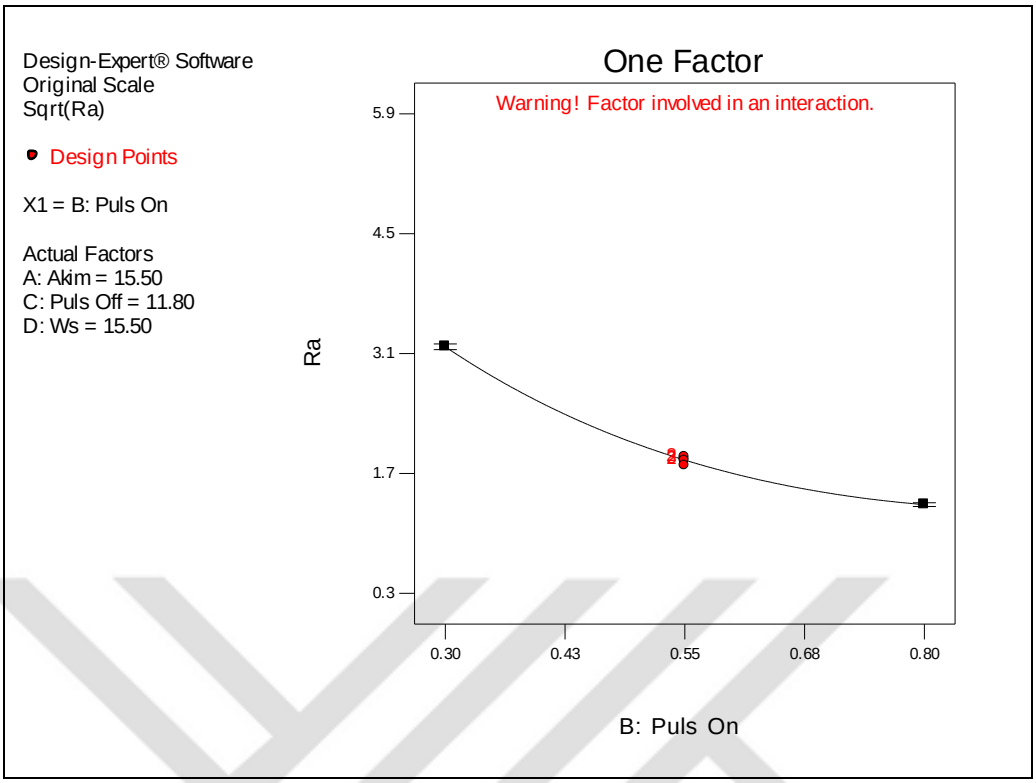
Modele dâhil faktörlerin ana etkilerinin, etkileşim etkilerinin ve karesel etkilerinin yanıt değişkenine etkileri grafikler yardımıyla da incelenmiştir.

Akım (A) faktörünün etkisinin Ra yanıt değikenine olan etkisi Şekil 6.4'te verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi Ra yüzey pürüzlülüğü akım değerinin 8,25'ten 22,75'e doğru artmasıyla azalmaktadır. Akım değeri arttıkça Ra yüzey pürüzlülüğü azalmakta, akım değeri azaldıkça yüzey pürüzlülüğü Ra değeri artmaktadır. Grafikte oluşan eğrinin yüksek olması faktörün kritikliğinin göstergesidir. Grafikte program tarafından A faktörünün diğer faktörler ile etkileşime sahip olduğunun uyarısı yapılmıştır. A faktörünün karesellik etkisine sahip olmasından dolayı grafik eğri şeklinde oluşmuştur.



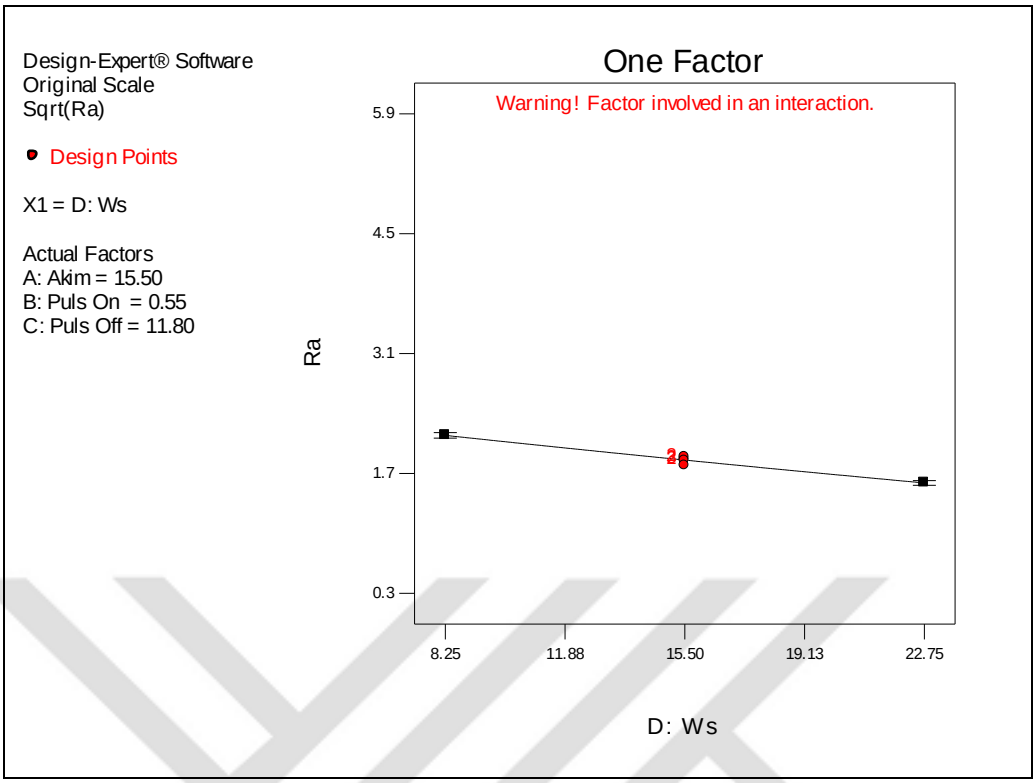
Şekil 0.4. A: Akım faktörünün Ra yanıtına etkisi

Puls on süresi (B) faktörünün Ra yanıt değikenine olan etkisi Şekil 6.5'te verilmiştir. Puls on süresi arttıkça Ra yüzey pürüzlülüğü azalmakta, puls on süresi azaldıkça yüzey pürüzlülüğü Ra değeri artmaktadır. Grafikte oluşan eğrinin yüksek olması faktörün kritikliğinin göstergesidir. Grafikte program tarafından B faktörünün diğer faktörler ile etkileşime sahip olduğunun uyarısı yapılmıştır. B faktörünün karesellik etkisine sahip olmasından dolayı grafik eğri şeklinde oluşmuştur.



Şekil 0.5. Puls On süresinin Ra yanıtına etkisi

Tel ilerleme hızının (D) faktörünün etkisinin Ra yanıt değikenine olan etkisi Şekil 6.6'da verilmiştir. Tel ilerleme hızı arttıkça Ra yüzey pürüzlülüğü azalmakta, tel ilerleme hızı azaldıkça yüzey pürüzlülüğü Ra değeri artmaktadır. Grafikte oluşan eğrinin nisbeten diğer faktörlere göre düşük olması performans karakterine etkisinin diğerlerine göre daha az olduğunu göstermektedir. Grafikte program tarafından D faktörünün diğer faktörler ile etkileşime sahip olduğunun uyarısı yapılmıştır.



Şekil 0.6. D: Tel ilerleme hızı faktörünün Ra yanıtına etkisi

6.6. Kesme Süresi Yanıtı İçin Model Seçimi

Kesme süresi performans göstergesi için karesel model önerilmiştir sonuçlar Çizelge 6.8'de verilmiştir.

Çizelge 0.8. Kesme süresi yanıtı için model seçimi

Lack of Fit Tests

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Linear	19.59	20	0.98	225.52	0.0004	
2FI	9.76	14	0.70	160.43	0.0007	
Quadratic	0.44	10	0.044	10.16	0.0409	Suggested
Cubic	0.023	2	0.012	2.69	0.2139	Aliased
Pure Error	0.013	3	4.343E-003			

Model Summary Statistics

Source	Std. Dev.	R-Squared	Adjusted R-Squared	Predicted R-Squared	PRESS	
Linear	0.92	0.8937	0.8753	0.8396	29.60	
2FI	0.76	0.9471	0.9159	0.9126	16.13	
Quadratic	0.19	0.9975	0.9949	0.9861	2.57	Suggested
Cubic	0.085	0.9998	0.9989	0.9816	3.39	Aliased

Karesel modelin R^2 değerleri yüksek, standart sapma değeri düşüktür.

6.7. Kesme Süresi İçin ANOVA ve Regresyon Analizi

Model seçimi gerçekleştirilen kesme süresi yanıt değişkenine ait varyans analizi tablosu Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 0.9. Kesme süresi yanıtı için varyans analizi tablosu

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F Value	p-value Prob > F	
Model	183.98	9	20.44	700.26	< 0.0001	significant
A-Akim	*88.02*	*1*	*88.02*	*3015.19*	*< 0.0001*	
B-Puls On	*69.49*	*1*	*69.49*	*2380.48*	*< 0.0001*	
D-Ws	*7.38*	*1*	*7.38*	*252.68*	*< 0.0001*	
AB	*0.51*	*1*	*0.51*	*17.30*	*0.0006*	
AC	*0.26*	*1*	*0.26*	*8.77*	*0.0084*	
AD	*8.88*	*1*	*8.88*	*304.21*	*< 0.0001*	
BD	*0.18*	*1*	*0.18*	*6.32*	*0.0217*	
A^2	*6.85*	*1*	*6.85*	*234.75*	*< 0.0001*	
B^2	*3.87*	*1*	*3.87*	*132.62*	*< 0.0001*	
Residual	0.53	18	0.029			
Lack of Fit	*0.51*	*15*	*0.034*	*7.86*	*0.0575*	*not significant*
Pure Error	*0.013*	*3*	*4.343E-003*			
Cor Total	184.50	27				

Modelin F tablo değeri 700,26 ve p-value'nun < 0,05 olması, Ho hipotezini red ederek modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Model terimleri için p değerlerine bakıldığında, p < 0,05 olan terimler anlamlı olarak kabul edilmekte ve modele dâhil edilmektedir. Bu doğrultuda A: Akım, B: Puls on süresi, D: Tel ilerleme hızı, AB, AC, AD, ve BD etkileşim etkileri, A^2 ve B^2 karesel etkileri modele dâhil edilmiştir. Bu terimlerin hepsinin p < 0,05 olduğu görülmektedir. Model uyum eksikliği anlamsız çıkmış, modelde herhangi bir uyum eksikliği görülmemiştir. Modelin R^2 değerleri Çizelge 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 0.10. Kesme süresi yanıtı için R^2 değerleri

Std. Dev.	0.17	R-Squared	0.9972
Mean	7.94	Adj R-Squared	0.9957
C.V. %	2.15	Pred R-Squared	0.9926
PRESS	1.37	Adeq Precision	98.748

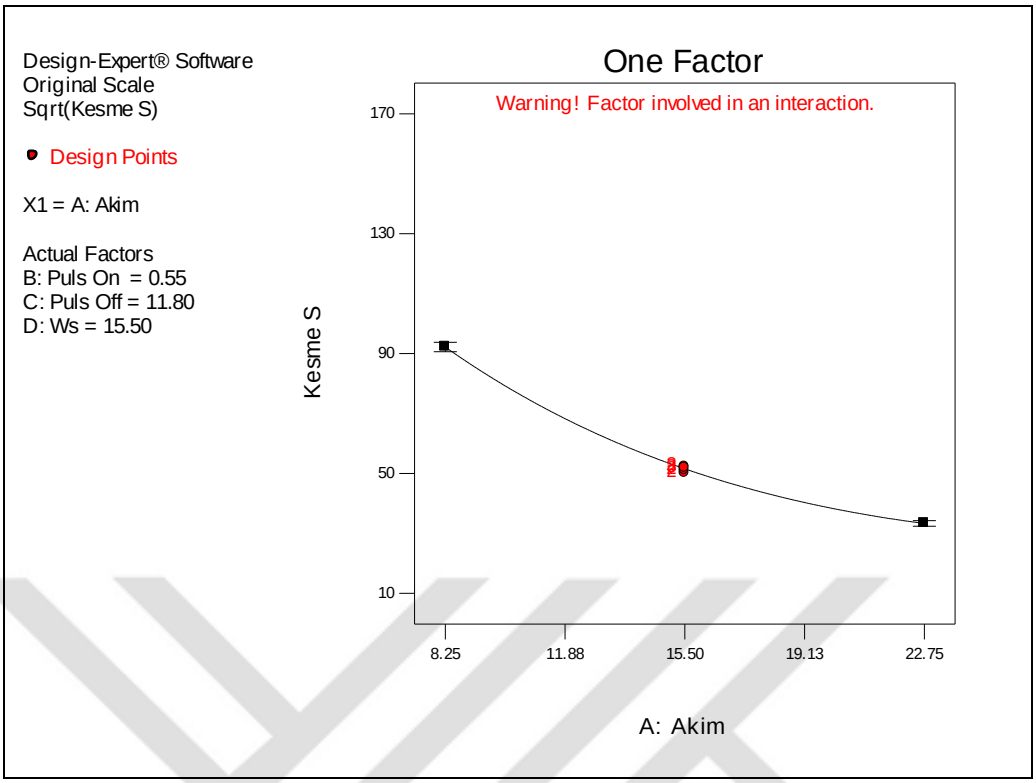
Modelin R^2 değerleri oldukça yüksektir. Kesme süresi performans göstergesini tahminlemek için uygun seviyededir. Regresyon analizi sonucu kesme süresi perfformans göstergesini tahminlemek için oluşturulan denklem eşitlik (6.3)'te verilmiştir.

$$\text{Kesme Süresi} = 7{,}18 - 1{,}92 * A - 1{,}70 * B - 0{,}55 * D - 0{,}18 * A * B + 0{,}13 * A * C - 0{,}74 * A * D + 0{,}11 * B * D + 0{,}51 * A^2 + 0{,}38 * B^2 \quad (6.3)$$

Denklem 6.3'te görüldüğü üzere, akım (A) faktörünün 1,92 katsayı ile en yüksek etkiye, sonrasında 1,70 katsayısı ile puls on (B) faktörünün ve en az etkiye 0,55'lik bir katsayı ile tel ilerleme hızının sahip olduğu tespit edilmiştir.

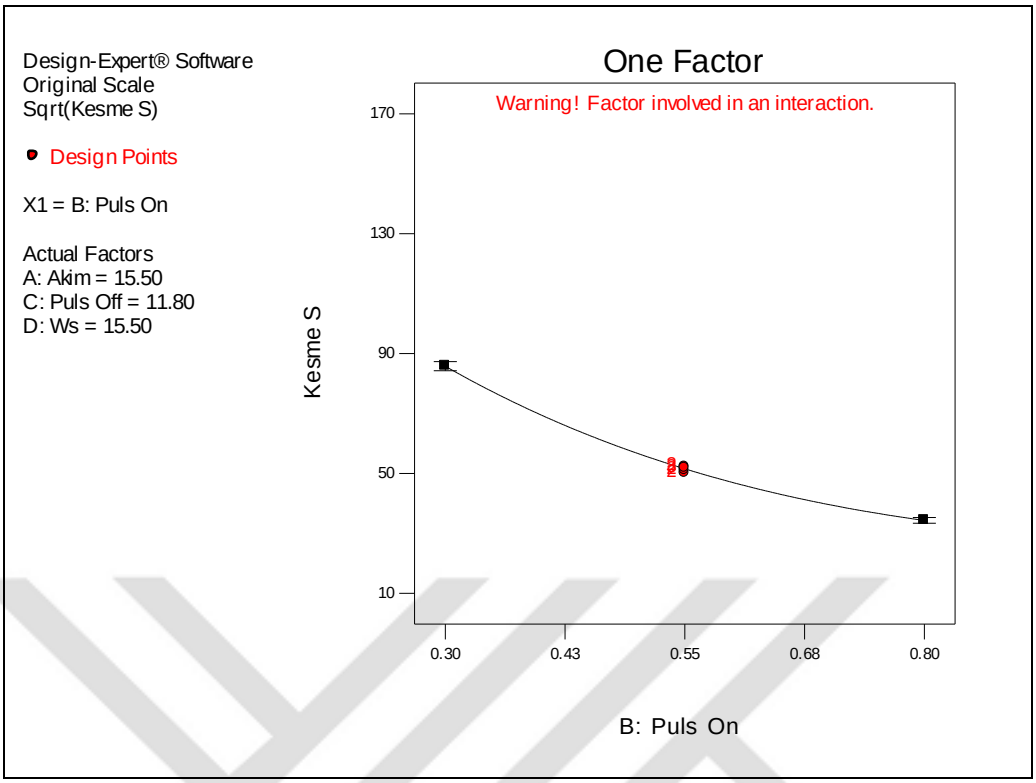
Modele dâhil edilen faktörlerin ana etkilerinin kesme süresi olan yanıt değişkenine etkileri grafikler yardımıyla da incelenmiştir.

Akım faktörünün kesme süresine etkisi Şekil 6.7'de verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi kesme süresi akımın 8,25'ten 22,75'e doğru gitmesiyle azalmaktadır. En düşük kesme süresi akımın 22,75 amper olduğu düzeyde görülmektedir. Grafikte oluşan eğrinin eğiminin yüksek olması faktörün oldukça kritik olduğunu göstermektedir. Grafikte A faktörünün diğer faktörlerle etkileşime sahip olduğu uyarısıda verilmektedir. A faktörünün karesellik etkisine sahip olmasından dolayı grafik eğri şeklinde oluşmuştur.



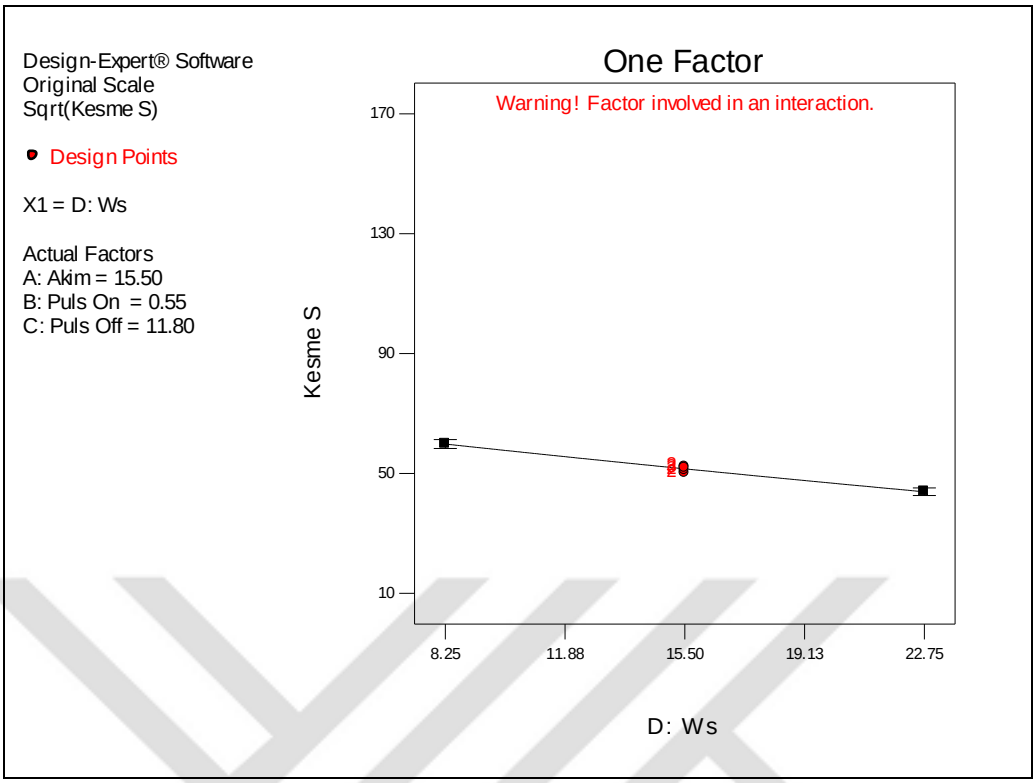
Şekil 0.7. A:Akım faktörünün kesme süresi yanıt değişkenine etkisi

Puls on süresi faktörünün ana etkisinin yanıt değikeni kesme süresine etkisi Şekil 6.8'de verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi kesme süresi puls on süresi 0,30'dan 0,8'e doğru gitmesiyle azalmaktadır. En düşük kesme süresi akımın 0,8 olduğu düzeyde görülmektedir. Grafikte oluşan eğrinin eğiminin yüksek olması faktörün oldukça kritik olduğunu göstermektedir. Grafikte B faktörünün diğer faktörlerle etkileşime sahip olduğu uyarısıda bulunmaktadır. B faktörünün karesellik etkisine sahip olmasından dolayı grafik eğri şeklinde oluşmuştur.



Şekil 0.8. B:Puls on süresi faktörünün kesme süresi yanıt değişkenine etkisi

Tel ilerleme hızı faktörünün ana etkisinin yanıt değişkeni kesme süresine etkisi Şekil 6.9'da verilmiştir. Grafikte görüldüğü gibi kesme süresi tel ilerleme hızının 8,25'ten 22,75'e doğru gitmesiyle azalmaktadır. En düşük kesme süresi tel ilerleme hızının 22,75 olduğu düzeyde görülmektedir. Grafikte oluşan eğrinin eğiminin diğer faktörlere göre daha az olması bu faktörün daha az etkili olduğunu göstermektedir. Grafikte D faktörünün diğer faktörlerle etkileşime sahip olduğu uyarısıda vermektedir. D faktörünün karesellik etkisine sahip olmasından dolayı grafik eğri şeklinde oluşmuştur.



Şekil 0.9. D:Tel ilerleme hızı faktörünün kesme süresi yanıt değişkenine etkisi

6.8. Rz, Ra Değerleri ve Kesme Süresi Yanıtlarının Eşzamanlı Eniyilenmesi

Çalışmada kullanılan üç yanıtında en iyilenmesi için Design Expert programı ile yapılan analizlerde çekicilik fonksiyonları kullanılmıştır. Elde edilen yerel en iyi sonuçlar Çizelge 6.11'de verilmiştir. Bu çizelgede 30 adet farklı başlangıç çözümden elde edilen sonuçlardan ilk 10 tanesi verilmiştir. Bu çözümler arasından programın da önermiş olduğu birinci çözüm seçilmiştir. Burada eniyileme yapılırken çekicilik değeri 1 ve 1'e yakın olan çözüm seçilir. Çizelge 6.11'de çözümler arasında hem çekicilik değeri hem de Rz, Ra ve kesme süresi en düşük olan (1) numaralı çözümün seçilmesinin uygun olduğu görülmüştür.

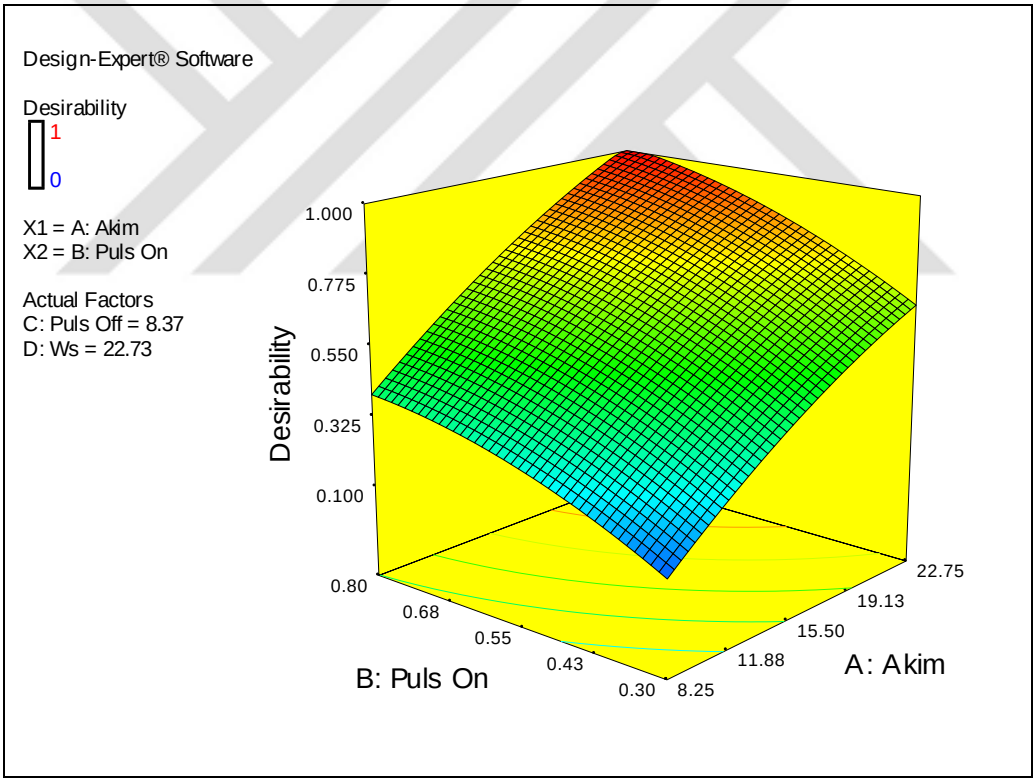
Önerilen çözüme göre makina ayarları akım değeri 22,69 , puls on süresi 0,8, puls off süresi 8,01 ve tel ilerleme hızı 22,60 olacak şekilde ayarlandığında Rz yüzey pürüzlülük değeri en küçük 2,12681 µ, Ra yüzey pürüzlülük değeri 0,366428 µ ve kesme süresi ise 9,04651 dk olacak şekilde çözüm önerilmiştir.

Çizelge 0.11. Tüm yanıtların birlikte yerel en iyi çözüm sonuçları

Solutions

Number	Akim	Puls On	Puls Off	Ws	Rz	Ra	Kesme S	Desirability	
1	22.69	0.80	8.01	22.60	2.12681	0.366428	9.04651	1.000	Selected
2	22.73	0.80	9.27	22.57	2.16499	0.371773	9.2197	1.000	
3	22.61	0.79	7.84	22.66	2.15498	0.371613	9.23097	1.000	
4	22.75	0.80	10.01	22.74	2.15915	0.370124	9.23621	1.000	
5	22.74	0.79	8.50	22.60	2.14574	0.369502	9.22019	1.000	
6	22.74	0.80	9.68	22.73	2.15084	0.369004	9.1915	1.000	
7	22.74	0.80	7.73	22.68	2.0837	0.359353	8.87752	1.000	
8	22.66	0.80	9.87	22.75	2.17869	0.373464	9.27448	1.000	
9	22.75	0.80	10.90	22.75	2.18471	0.373514	9.3181	1.000	
10	22.75	0.80	11.24	22.75	2.19892	0.375622	9.38364	0.999	

En kritik etkiye sahip olan faktörlerin akım ve puls on süresi olduğu önceden tespit edilmiştir. Bu faktörlerin çekicilik değeri için yüzey grafiği ise Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 0.10. Çekicilik değeri için yüzey grafiği (Akım ve Puls On süresi)

Akım faktörü 8,25'ten 22,752'ye doğru gittiğinde ve puls on süresi de 0,3'ten 0,8'e doğru gittiği noktalarda en yüksek çekicilik değerinin yakalandığı görülmektedir.

Rz ve Ra yüzey pürüzlülüğü ile kesme süresi performans göstergeleri için tahmin edilen değerler ve tahmin aralıkları Çizelge 6.12'de verilmiştir.

Çizelge 0.12. Yanıtlar için oluşturulan tahmin aralıkları

Response	Prediction	SE Mean	95% CI low	95% CI high	SE Pred	95% PI low	95% PI high
Rz	2.12681		1.96	2.30		1.82	2.46
Ra	0.366428		0.34	0.40		0.31	0.43
Kesme S	9.04651		7.75	10.45		6.68	11.77

Tahmin edilen parametre değerleri ile ilgili deney gerçekleştirildiğinde Rz, Ra ve kesme süresi değerlerinin bu tahmin aralıkları içerisinde çıkması beklenmektedir. Programın önerdiği (1) numaralı çözüme ait tekrar deneyi yapıldığında Rz yüzey pürüzlülüğü 2,23 µ, Ra yüzey pürüzlülüğü 0,38 µ ve kesme süresi yanıtı 10,84 dk olarak bulunmuş ve çalışmada kullanılan modelin geçerli olduğu görülmüştür.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Gerçekleştirilen tez çalışması kapsamında CPOH yeni nesil soğuk iş takım çeliğinin tel erozyon yöntemi ile kesilmesi sürecinde Rz, Ra ve kesme süresi yanıtları için CCD deney stratejisi ile eniyileme çalışmaları yapılmıştır.

CPOH çeliği ve Cut 300 model tel erozyon tezgahı bilindiği kadarıyla ilk kez bu çalışmada ele alınmıştır. Ayrıca, bu çalışmada CPOH çeliği seçiminin nedeni geleneksel kalıp malzemesi olmayıp endüstrinin artan gereksinimlerini karşılamak için hassas kesim sac metal kalıplarında sıklıkla kullanılıyor oluşudur. Cut 300 model makine önceki tel erozyon makinalarının eksikleri görülerek geliştirilmiş yeni nesil bir makinadır. İç donanımında servo motorlar, jeneratörler ve kondansatörler geliştirilmiştir. Soğutma sistemi hem havuzlu hem de ek enjektörler ile üstten ve alttan püskürtme ile soğutma sağlayarak daha rijit ve iyi bir çalışma ortamı sağlamaktadır.

Hem malzeme, hem de makina sahip oldukları özelliklerinden dolayı oldukça yüksek maliyetlidirler. Bu yüzden malzeme kesilirken oluşabilecek tüm verimsizlikler bertaraf edilmeli ve iyi yüzey kalitelerinde parçalar elde edilmelidir. Makinanın ilk yatırım ve bakım onarım maliyetlerinin yüksek olmasından dolayı ise makina saat ücretleri yüksektir. Bu yüzden, tel erozyon makinası en verimli şekilde çalıştırılarak maliyetler aşağı çekilmelidir. Malzemenin ve makinanın belirtilen özellikleri yeni ve üzerine çalışma olmadığı için araştırılma konusu olarak seçilmiştir. Rz ve Ra yüzey pürüzlülük değerleri ile kesme süresi performans göstergeleri için seçilen parametreler CCD yöntemi ile en iyilenmiştir.

Tel erozyonla kesim süreci deney tasarımı stratejileri doğrultusunda belirlenen deney planları ile gerçekleştirilmiştir. Deney tasarımı deneylerin sistematik bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlayarak çalışmayı kolaylaştırmıştır. Bunun yanı sıra çok yüksek maliyetli olan bu işleme tekniğinde, az miktarda deney ile süreç hakkında çok bilgi edinilebildiği bu çalışma ile görülmüştür.

Deneysel çalışmanın sonucunda CCD deney stratejisinin tel erozyon ile kesme sürecinin Ra, Rz ve kesme süresi analizi için uygun bir teknik olduğu söylenebilir. Analiz sonuçları göstermiştir ki akım, puls on süresi ve tel ilerleme hızı parametreleri kesme süresi, Rz yüzey pürüzlülüğü ve Ra yüzey pürüzlülüğü için kritik parametrelerdir.

Sonuçlar, CCD ile elde edilen tasarımın az deneyle tel erozyon gibi yüksek maliyetli bir işleme sürecinin yüzey pürüzlülüğü ve kesme süresi performans göstergelerinin eniyilenmesi için kullanılabileceğini gösterilmiştir.

Kurulan model üzerinden önerilen parametre değerleri ile doğrulama deneyleri yapıldığında Rz yüzey pürüzlülüğü 2,23 μ, Ra yüzey pürüzlülüğü 0,38 μ ve kesme süresi yanıtı 10,84 dk olarak bulunmuş ve çalışmada kullanılan modelin geçerli olduğu görülmüştür.

Bu çalışmanın üzerine başka faktörler, bu faktörlerin farklı seviyeleri, farklı kalınlıkta ve kalitede çelikler de kullanılarak yeni deneyler ile analizler gerçekleştirilebilir. Bu çalışmada ele alınan yanıt değişkenleri dışında şekil ve boyut ölçüleri de birer performans göstergesi olarak seçilerek benzer analizler yapılabilir. Ek olarak farklı deney tasarımı stratejileri de kullanılarak deneyler yapılabilir ve elde edilen sonuçlar analiz edilerek yüzey pürüzlülüğü ve kesme süresi gibi performans karakteristikleri üzerine etkileri incelenebilir. İleriki çalışmalarda deneylerde kesilen malzemelerin mikro yapısının elektron tarama mikroskobu ile incelenmesi de yapılabilir.

KAYNAKLAR DİZİNİ

Akay, U., 2013, Tekstil endüstrisindeki atıksulardan renk ve KOİ gideriminin yanıt yüzey yöntemi ile eniyilenmesi, yüksek lisans tezi.

Akbari, J., Narendranath, S., Manjaiah, M., (2014), Optimization of wire electro discharge machining parameters to achieve better MRR and surface finish, Procedia Materials Science, 5, 2635-2644.

Akkurt, A., Aldas, K., Özkul, İ., (2014), Modelling surface roughness in WEDM process using ANFIS method, Journal of the Balkan Tribological Association, Vol. 20, No 4, 548–558.

Anonim, 2013, Chapter 2: One Spark At A Time, http://edmtechman.com/about.cfm?pg02&chap=2#a1, erişim tarihi: 09.03.2018.

Anonim, 2018, Fine Blanked Parts, http://nptel.ac.in/courses/107103012/module4/lec3.pdf, erişim tarihi: 23.03.2018.

Anonim, 2018, Ürünlerimiz / Çelik / Takım Çelikleri / Soğuk İş Takım Çelikleri / CPOH Malzeme, http://www.saglammetal.com/tr/urun-detay/takim-celikleri/soguk-is-takim-celikleri/cpoh-malzeme, erişim tarihi 18.12.2017.

Arriandiaga, A., Conde, A., Portillo, E., Plaza, S., Sanchez, J.A., vd., 2018, High-accuracy wire electrical discharge machining using artificial neural networks and optimization techniques, Robotics and Computer–Integrated Manufacturing, 24-38.

Aygün, A., 2012, Tekstil endüstrisi reaktif ve dispers boya banyo atıksularının elektrokoagülasyon prosesi ile arıtımı: Yanıt yüzey yöntemi ile optimizasyon, doktora tezi.

Baylan, O., 2015, Tel erozyon nedir?, http://www.metaluzmani.com/tel-erozyon-nedir/, erişim tarihi:14.03.2018.

Chen, C. C., Chiang, H., Lin, C.G., Yang, C. B., 2017, Single and multiobjective optimization of Inconel 718 nickel-based superalloy in the wire electrical discharge machining, Int J Adv Manuf Technol, 93, 3075–3084.

Chen, Y., Huang, J., Liao, Y., (2004), A study to achieve a fine surface finish in Wire-EDM, Journal of Materials Processing Technology, 149, 165–171.

Choudhary, R., Garg, H., Prasad, M., Kumar, D., (2017), Effect of Cryogenic Treatment of Tool Electrode on the Machining Performance and Surface Finish during Electrical Discharge Machining of Hastelloy C-4, Materials Today: Proceedings 4, 1158 – 1166.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Corny, I., Pitel, J., Straka, L., (2017), Prediction of the geometrical accuracy of the machined surface of the tool steel EN X30WCrV9-3 after electrical discharge machining with CuZn37 wire electrode, MDPI.

Coşkun, İ., Işık, M. F., 2008, Elektro erozyon yöntemi ile tornalama, Politeknik Dergisi, Cilt:11, Sayı 4, s.285-291, http://dergipark.gov.tr/download/article-file/384715, erişim tarihi:14.03.2018.

Demirtaş, E.A., Ayva, O., Buruk, Y., 2015, A Case Study in mixture design: multi response optimization of glaze formulation, Quality Engineering, 27, 2, 186-195, doi: 10.1080/08982112.2014.942038.

Doğan, M., 2010, Inconel 718 malzemesinin tel erozyon tezgahında işlenmesinde kesme parametrelerinin kesme performansına etkisinin deneysel analizi ve optimum parametrelerinin tayini, yüksek lisans tezi.

Elyasi, M., (2013), An investigation on the parametric analysis of V-ring indenter mechanism in fine-blanking process, International Journal of Mechanics and Applications, 3(4), 76-80.

Erbaş, S. O., 2006, Deney Düzenleri ve İstatistik Analizleri, Gazi Kitapevi, s.1-7.

Evran, E., 2009, Tel erozyon tezgahında 1.2379 CPPU kesme kalıp çeliğinin işlenmesinde kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve elektro deşarj aralığına etkisinin incelenmesi, yüksek lisans tezi.

Goswami, A., Kumar, J., 2014, Investigation of surface integrity, material removal rate and wire wear ratio for WEDM of Nimonic 80A alloy using GRA and Taguchi method, Engineering Science and Technology, an International Journal, 173-184.

Goyal, A., 2017, Investigation of material removal rate and surface roughness during wire electrical discharge machining (WEDM) of Inconel 625 super alloy by cryogenic treated tool electrode, Journal of King Saud University, 29, 528-535.

Gürsakal, N., 2005, Altı Sigma Müşteri Odaklı Yönetim, Nobel Yayın Dağıtım, s.190-203.

Ikram, A., Khan, A.R., Mufti, N. A., Saleem, M.Q., 2013, Parametric optimization for surface roughness, kerf and MRR in wire electrical discharge machining (WEDM) using Taguchi design of experiment, Journal of Mechanical Science and Technology 27 (7), 2133-2141.

İmamoğlu, O., 2007, Tel erozyon tezgahında 2379 çeliğinin işlenmesinde kesme parametrelerinin şekil ve boyut toleranslarına etkisi, yüksek lisans tezi.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Jangra, K., Kumar V., Kumar V., Sharma, N., (2017), Modeling and analysis of surface roughness of microchannels produced by μ-WEDM using an ANN and Taguchi method, Int J Interact Des Manuf, 1, 917–929.

Jarafi, R., Kahya, M., Oliaei, S., Özyurt, T., Ünver, H., (2017), Modeling and analysis of surface roughness of microchannels produced by μ-WEDM using an ANN and Taguchi method, Journal of Mechanical Science and Technology, 31(11), 5447-5457.

Kandpal, B., Kumar, J., Singh, H., 2017, Optimization and characterization of EDM of AA 6061/10%Al2O3 AMMC using Taguchi's approach and utility concept, Production & Manufacturing Research An Open Access Journal, Vol 5 No1, 351-370.

Khuri, A. I., Cornell, J. A., 1996, Response surface designs and analyses, Marcel Dekker Inc, s. 509.

Mahapatra, S., Nayak, B., (2016), Optimization of WEDM process parameters using deep cryo-treated Inconel 718 as work material, Engineering Science and Technology, an International Journal 19, 161–170.

Montgomery, D. C., 2009, Design and Analysis of Experiments, John Wiley & Sons, s. 208.

Myers, R. H., Montgomery, D.C., Anderson-Cook, C. M., 2009, Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments, John Wiley and Sons, s. 680.

Özkul, İ., 2012, Takım çeliği malzemelerinin geleneksel ve modern işleme yöntemleri ile işlenebilirliklerinin araştırılması, yüksek lisans tezi.

Ramakrishnan, R., Karunamoorthy, L., (2006), Multi response optimization of wire EDM operations using robust design of experiments, Int J Adv Manuf Technol, 29, 105–112.

Rodrigues, D. S. C., Madeira, M.L., Boaventura, R.A.R., 2009, Optimization of the azo dye Procion Red H-EXL degradation by Fenton's reagent using experimental design, Journal of Hazardous Materials, 164, 987-994.

Subaşı, A., 2010, Yanıt yüzey yöntemi yardımı ile ısı değiştirici optimizasyonu, yüksek lisans tezi.

Yurtkuran, E., 2011, T/M ile üretilmiş Alüminyum esaslı malzemelerin alaşım elementleri ve takviye elemanı içermelerine bağlı tel erozyonda işlenebilirliklerinin araştırılması, yüksek lisans tezi.

EK

Olması Gereken	Mevcut Durum	Sayfa
Şekil 2.1. EDM çevrimindeki birinci aşama	Şekil 0.1. EDM çevrimindeki birinci aşama	4
Şekil 2.2. EDM çevrimindeki ikinci aşama	Şekil 0.2. EDM çevrimindeki ikinci aşama	5
Şekil 2.3. EDM çevrimindeki üçüncü aşama	Şekil 0.3. EDM çevrimindeki üçüncü aşama	5
Şekil 2.4. EDM çevrimindeki dördüncü aşama	Şekil 0.4. EDM çevrimindeki dördüncü aşama	6
Şekil 2.5. EDM çevrimindeki beşinci aşama	Şekil 0.5. EDM çevrimindeki beşinci aşama	6
Şekil 2.6. EDM çevrimindeki altıncı aşama	Şekil 0.6. EDM çevrimindeki altıncı aşama	7
Şekil 2.7. EDM çevrimindeki yedinci aşama	Şekil 0.7. EDM çevrimindeki yedinci aşama	8
Şekil 2.8. EDM çevrimindeki sekizinci aşama	Şekil 0.8. EDM çevrimindeki sekizinci aşama	8
Şekil 2.9. EDM çevrimindeki dokuzuncu aşama	Şekil 0.9. EDM çevrimindeki dokuzuncu aşama	9
Şekil 2.10. Dalma erozyon tezgâhı şematik görünüm	Şekil 0.10. Dalma erozyon tezgâhı şematik görünüm	10
Şekil 2.11. Tel erozyonun şematik gösterimi	Şekil 0.11. Tel erozyonun şematik gösterimi	12
Şekil 2.12. Tel erozyon tezgâhı çalışma prensibi	Şekil 0.12. Tel erozyon tezgâhı çalışma prensibi	15
Şekil 2.13. Çevrim süresi gösterimi	Şekil 0.13. Çevrim süresi gösterimi	22
Şekil 2.14. Hassas kesim çevrim adımları	Şekil 0.14. Hassas kesim çevrim adımları	26
Şekil 3.1. 2^2 tasarım	Şekil 0.1. 2^2 tasarım	32
Şekil 3.2. RSM ısı basınç örneği	Şekil 0.2. RSM ısı basınç örneği	37
Şekil 3.3. 22 CCD deneme düzeni	Şekil 0.3. 22 CCD deneme düzeni	40
Şekil 3.4. BBT sembolik gösterimi	Şekil 0.4. BBT sembolik gösterimi	41
Şekil 5.1. CPOH malzeme sınıflandırılması	Şekil 0.1. CPOH malzeme sınıflandırılması	53
Şekil 5.2. CPOH çeliği	Şekil 0.2. CPOH çeliği	54
Şekil 5.3. Taşlama tezgâhı	Şekil 0.3. Taşlama tezgâhı	56
Şekil 5.4. Cut 300 tel erozyon tezgâhı	Şekil 0.4. Cut 300 tel erozyon tezgâhı	57
Şekil 5.5. Deneylerde kesimde kullanılan numune formu	Şekil 0.5. Deneylerde kesimde kullanılan numune formu	58
Şekil 5.6. Süreç parametrelerine ait balık kılçığı diyağramı	Şekil 0.6. Süreç parametrelerine ait balık kılçığı diyağramı	59
Şekil 5.7. Yüzey pürüzlülük ölçme cihazı	Şekil 0.7. Yüzey pürüzlülük ölçme cihazı	61
Şekil 5.8. Parça konumlandırılması ve fikstürü	Şekil 0.8. Parça konumlandırılması ve fikstürü	62
Şekil 6.1. Akım faktörünün Rz yanıtına etkisi	Şekil 0.1. Akım faktörünün Rz yanıtına etkisi	68
Şekil 6.2. Puls On süresinin Rz yanıtına etkisi	Şekil 0.2. Puls On süresinin Rz yanıtına etkisi	69
Şekil 6.3. Tel ilerleme hızının Rz yanıtına etkisi	Şekil 0.3. Tel ilerleme hızının Rz yanıtına etkisi	70
Şekil 6.4. Akım Faktörünün Ra yanıtına etkisi	Şekil 0.4. Akım Faktörünün Ra yanıtına etkisi	74
Şekil 6.5. Puls On süresinin Ra yanıtına etkisi	Şekil 0.5. Puls On süresinin Ra yanıtına etkisi	75
Şekil 6.6. Tel ilerleme hızının Ra yanıtına etkisi	Şekil 0.6. Tel ilerleme hızının Ra yanıtına etkisi	76
Şekil 6.7. Akım faktörünün kesme süresi yanıt değişkenine etkisi	Şekil 0.7. Akım faktörünün kesme süresi yanıt değişkenine etkisi	79
Şekil 6.8. Puls on süresinin kesme süresi yanıt değişkenine etkisi	Şekil 0.8. Puls on süresinin kesme süresi yanıt değişkenine etkisi	81
Şekil 6.9. Tel ilerleme hızının kesme süresi yanıt değişkenine etkisi	Şekil 0.9. Tel ilerleme hızının kesme süresi yanıt değişkenine etkisi	82
Şekil 6.10. Çekicilik değeri için yüzey grafiği	Şekil 0.10. Çekicilik değeri için yüzey grafiği	83
Çizelge3.1. ANOVA tablosu	Çizelge 0.1. ANOVA tablosu	33
Çizelge3.2. Merkezi Kompozit Tasarım eksen noktaları	Çizelge 0.2. Merkezi Kompozit Tasarım eksen noktaları	39
Çizelge3.3. İki faktörlü CCD deney düzeni	Çizelge 0.3. İki faktörlü CCD deney düzeni	39
Çizelge3.4. Üç değişkenli BBT örneği	Çizelge 0.4. Üç değişkenli BBT örneği	41
Çizelge5.1. Deneylerde kullanılan CPOH malzemeye ait kimyasal bileşim	Çizelge 0.1. Deneylerde kullanılan CPOH malzemeye ait kimyasal bileşim	53
Çizelge5.2. CPOH ısıl işlem koşulları	Çizelge 0.2. CPOH ısıl işlem koşulları	55

Çizelge5.3. Deney tasarımında kullanılan faktörler ve düzeyleri	Çizelge 0.3. Deney tasarımında kullanılan faktörler ve düzeyleri	60
Çizelge6.1. CCD için deney planı	Çizelge 0.1. CCD için deney planı	64
Çizelge6.2. Rz yüzey pürüzlülüğü yanıt değişkeni için model seçimi	Çizelge 0.2. Rz yüzey pürüzlülüğü yanıt değişkeni için model seçimi	65
Çizelge6.3. Rz yüzey pürüzlülüğü yanıtı için varyans analizi tablosu	Çizelge 0.3. Rz yüzey pürüzlülüğü yanıtı için varyans analizi tablosu	66
Çizelge6.4. Rz yüzey pürüzlülüğü yanıtı için R2 değerleri	Çizelge 0.4. Rz yüzey pürüzlülüğü yanıtı için R2 değerleri	66
Çizelge6.5. Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için model seçimi	Çizelge 0.5. Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için model seçimi	71
Çizelge6.6. Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için varyans analizi tablosu	Çizelge 0.6. Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için varyans analizi tablosu	72
Çizelge6.7. Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için R2 değerleri	Çizelge 0.7. Ra yüzey pürüzlülüğü yanıtı için R2 değerleri	72
Çizelge6.8. Kesme süresi yanıtı için model seçimi	Çizelge 0.8. Kesme süresi yanıtı için model seçimi	77
Çizelge6.9. Kesme süresi yanıtı için varyans analizi tablosu	Çizelge 0.9. Kesme süresi yanıtı için varyans analizi tablosu	78
Çizelge6.10. Kesme süresi yanıtı için R2 değerleri	Çizelge 0.10. Kesme süresi yanıtı için R2 değerleri	79
Çizelge6.11. Tüm yanıtların birlikte yerel en iyi çözüm sonuçları	Çizelge 0.11. Tüm yanıtların birlikte yerel en iyi çözüm sonuçları	83
Çizelge6.12. Yanıtlar için oluşturulan tahmin aralıkları	Çizelge 0.12. Yanıtlar için oluşturulan tahmin aralıkları	84

