



Experimental investigation on feasibility of using spherical-tip tool electrodes in EDM for rough machining-machining of rectangular pockets

Engin Avlar¹, Murat Dilmeç², Hüseyin Selçuk Halkacı³

¹Graduate School of Natural Sciences of Mechanical Engineering, Konya Technical University, Konya, 42100, Turkey

²Department of Mechanical Engineering, Necmettin Erbakan University, Konya, 42100, Turkey

³Department of Mechanical Engineering, Konya Technical University, Konya, 42100, Turkey

Highlights:

- Machining the rectangular pockets with EDM
- Usability of general purpose spherical electrode tools for machining of rectangular pockets
- Tool wear and deviation of manufactured cavities from expected surfaces

Keywords:

- EDM
- tool wear
- 3D optical measurement
- tool path
- sphere center coordinates

Article Info:

Research Article
Received: 19.11.2017
Accepted: 01.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460510

Correspondence:

Author: Murat Dilmeç
e-mail:
muratdilmeç@erbakan.edu.tr
phone: +90 332 223 2024

Graphical/Tabular Abstract

The accuracy of the algorithm which can find the electrode radius and the tool compensation deviations has been verified with comparing simulation and experimental results.

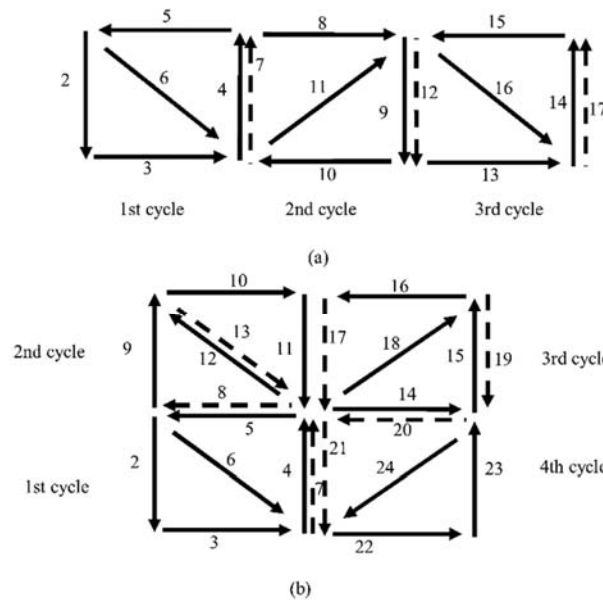


Figure A. Generalization recommendations for tool path

Purpose: In this study, feasibility of widely used spherical tip tool electrode for machining rectangular pockets instead of a model to form cavity on the work piece for rough machining in Electric Discharge Machining (EDM) was investigated.

Theory and Methods:

In CNC EDM machine, two alternative tool paths which gives the changes of the tool electrode geometry were examined using rough machining parameters provides minimum tool wear and maximum material removal rate. Electrode tools have been measured with optoTOP-HE 3B optical measurement system before and after manufacturing with EDM. Center coordinates of spherical electrodes, tool wear and deviation of machined cavities from expected surfaces have been determined from 3D data using Rapidform 2004 PPS software.

Results:

A basic algorithm of a CNC EDM CAM program is proposed for machining rectangular pockets. EDM experiments has been conducted with tool electrode accuracy 0.01 mm and work pieces accuracy 0.17 mm for electrode machined with same parameters.

Conclusion:

A tool electrode path has been proposed for machining rectangular pockets and it is seen that this path is applicable.



EEİ ile kaba işlemede küresel uçlu elektrotların kullanılabilirliğinin deneysel olarak araştırılması; dikdörtgen ceplerin boşaltılması

Engin Avlar¹, Murat Dilmeç^{2*}, Hüseyin Selçuk Halkacı³

¹Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Selçuklu, Konya, 42075, Türkiye

²Necmettin Erbakan Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Meram, Konya, 42090, Türkiye

³Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Selçuklu, Konya, 42075, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Elektro erozyonla işlemede (EEİ) ile dikdörtgen ceplerin boşaltılması
- Dikdörtgen ceplerin boşaltılmasında genel amaçlı küresel uçlu takım elektrotların kullanılabilirliği
- Elektrotlarda oluşan aşınmalar ve üretilen boşlukların ideal boşluklardan sapmaların belirlenmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 19.11.2017

Kabul: 01.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460510

Anahtar Kelimeler:

Dalma elektro erozyonla işleme, takım aşınması, 3B optik ölçme, takım yolu, küre merkez koordinatları

ÖZET

Bu çalışmada, dalma elektro erozyonla işlemede (EEİ), iş parçasında boşluğu oluşturacak model kullanmak yerine, kaba işlemede dikdörtgen ceplerin boşaltılmasında genel amaçlı küresel uçlu takım elektrotların kullanılabilirliği araştırılmıştır. CNC EEİ tezgâhında en düşük aşınma ve birim zamanda en çok talaş kaldırmayı sağlayacak kaba işleme parametreleri kullanılarak elektrot geometrisini en az değiştirecek iki alternatif takım yolu denenmiştir. Takım elektrotlar EEİ tezgâhında işleme yapmadan önce ve işleme yaptıktan sonra optoTOP-HE 3B optik ölçme sistemi ile ölçülmüştür. Rapidform 2004 PPS yazılımı kullanılarak 3B verilerden elektrotlara ait küre merkez koordinatları, elektrotlarda oluşan aşınmalar ve üretilen boşlukların ideal boşluklardan sapmaları bulunmuştur. Ayrıca, dikdörtgen ceplerin boşaltılması için kullanılacak bir CNC EEİ CAM programı için, temel bir algoritma önerilmiştir. Takım elektrot yarıçapı ve takım kompanzasyonu değişimlerinin bulunabildiği bu algoritmanın doğruluğu, deneylerden elde edilen verilerin simülasyonu ile karşılaştırılarak kanıtlanmıştır. Aynı parametrelerle işlenen elektrotlarda, EEİ deneyleri; takım elektrotlar için 0,01 mm, iş parçaları için 0,17 mm hassasiyetle elde edilebilmiştir. Dikdörtgen ceplerin üretilmesi için bir takım yolu önerilmiş ve yapılan deneylerle uygulanabilir olduğu görülmüştür.

Experimental investigation on feasibility of using spherical-tip tool electrodes in EDM for rough machining-machining of rectangular pockets

H I G H L I G H T S

- Machining the rectangular pockets with EDM
- Usability of general purpose spherical electrode tools for machining of rectangular pockets
- Tool wear and deviation of manufactured cavities from expected surfaces

Article Info

Research Article

Received: 19.11.2017

Accepted: 01.05.2018

DOI:

10.17341/gazimmfd.460510

Keywords:

Electric Discharge Machining, tool wear, 3D optical measurement, tool path, sphere center coordinates

ABSTRACT

In this study, feasibility of widely used spherical tip tool electrode for machining rectangular pockets instead of a model to form cavity on the work piece for rough machining in Electric Discharge Machining (EDM) was investigated. In CNC EDM machine, two alternative tool paths which gives the changes of the tool electrode geometry were examined using rough machining parameters provides minimum tool wear and maximum material removal rate. Electrode tools have been measured with optoTOP-HE 3B optical measurement system before and after manufacturing with EDM. Center coordinates of spherical electrodes, tool wear and deviation of machined cavities from expected surfaces have been determined from 3D data using Rapidform 2004 PPS software. Moreover, a basic algorithm of a CNC EDM CAM program is proposed for machining rectangular pockets. The accuracy of the algorithm which can find the electrode radius and the tool compensation deviations has been verified with comparing simulation and experimental results.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektro erozyon ile işleme (EEİ) elektriksel olarak iletken bir iş parçasına yüksek frekanslı elektrik boşalmalarının kontrollü olarak uygulanması ve böylece iş parçasından küçük parçacıkların ergitilerek ve buharlaştırılarak koparılması esasına dayanan bir ileri imalat yöntemidir [1]. Elektro erozyon ile işleme yöntemi çoğunlukla kalıp imalatında kullanılan bir metal işleme yöntemidir. Yüksek mukavemetli, karmaşık geometri ve sert malzemelerin işlenebilmesi elektro erozyon ile işleme yöntemini modern imalat yöntemleri arasında seçkin bir noktaya getirmiştir [2]. Diğer yöntemlerle üretilmesi mümkün olmayan veya maliyeti artıran derin deliklerin, kanalların, oyukların küçük toleranslar dâhilinde işlenmesi elektrik arkının kontrolüyle kolayca gerçekleştirilebilir. Kesme kuvvetleri oluşmadığı için kırılma ve ince parçalar bu yöntemle kolaylıkla işlenebilirler [3].

Gerilim vurumlarının uygulanması sonucu takım elektrotu ile iş parçası elektrotu arasında elektrik boşalmaları oluşur. Dielektrik sıvı içerisinde batırılmış durumda olan elektrotlar 0,01-0,5 mm'lik işleme aralığı ile birbirinden ayrılmıştır. Boşalım gerilimi işleme aralığının büyüklüğüne ve dielektrik sıvının yalıtıcılık direncine bağlıdır. Gerilim vurumunun uygulanmasından sonra elektrot ve iş parçası arasındaki en yakın iki nokta arasında bir kanal iyonlaşır. Oluşan elektrik boşalmaları temas ettiği elektrot ve iş parçası yüzeylerinin ergimesine ve buharlaşmasına sebep olur. Sonuçta, iş parçasında küçük kraterler oluşacak şekilde malzemeler yüzeyden kopar ve dielektrik sıvı tarafından ortamdaki uzaklaştırılır [1, 4].

Genellikle EEİ de işlenmek istenen boşluk dışı, bu boşluğu oluşturacak elektrot şekli de erkek olarak tanımlanmaktadır. Günümüzde araştırmacılar iş parçasında oluşturulacak boşluğun 3 boyutlu (3B) erkeğini üretmek yerine, genel amaçlı silindirik, yarı küresel uçlu ve tüp şeklinde elektrotların EEİ de kullanılabilirliğini araştırmaktadır. Literatürde "CNC Milling EDM" veya "Contour EDM Machining" olarak bilinen CNC EEİ frezelemede standart elektrotlar kullanılarak, CNC frezelemeye benzer işleme yöntemi üzerinde çalışılmaktadır [5-9]. Bu çalışmalarda en önemli problem takım elektrot aşınmaları ve bunların kompanzasyonudur. Dalma elektro erozyonda takım elektrot ta aşındığı için, 3B boşlukların üretilmesinde kaba, orta ve hassas işleme olmak üzere genellikle üç bazen de dört farklı takım ve işleme parametre değerleri kullanılır. Cep boşaltma (pocket machining) olarak da anılan kaba işlemede amaç; orta ve hızlı işleme için az miktarda işlenecek malzeme bırakarak hızlı talaş kaldırmadır ve yüzey pürüzlülüğü ile takım aşınması ikinci planda kalır [10]. Kaba işlemeyi bazı araştırmacılar işleme parametreleri ile tanımlarken [11-14], Valentin ve Junkar [15] bu parametrelerin elektrotların temas yüzeylerine ve bu yüzeylerin izdüşüm alanına göre değişmesi gerektiğini belirtmektedir. 3B takım elektrotlar yerine standart elektrotların kullanılması ile ilgilenen araştırmacılar [16, 17] ise kaba işlemeyi, takım yolu

oluşturma ve takım kompanzasyonu açısından, hedef iş parçasından boyutsal sapmaların ne kadar olabileceği üzerinde durmuşlardır.

Kaba işlemede elektrottaki aşınmalar mutlaka göz önünde tutulması gerekir. Aşınmaların hangi düzeyde olduğu ve küresel elektrotun ne zaman yenilenmesi gerektiği bilinmelidir. Elektrottaki aşınmalar sonunda hem küre yarıçapı hem de küresellik hatası değişir. Değişen bu bilgilerin takım yolu koordinatlarında oluşturacağı offset verilerinin bulunması gerekir. Bu nedenle seçilen işleme parametrelerine göre çok küçük olabilen küresel elektrottaki aşınmaların hassas olarak ölçümleri gerekir. Ancak küresel elektrottaki aşınmaların ölçülmesi için koordinat ölçüm cihazında çok sayıda veri alınması pratik bir yöntem değildir [18, 19]. Bu nedenle küreselliği bulmak için bir ölçme metodu geliştirilmiştir.

Bu çalışmada dalma erozyonda kullanılan 3B takım elektrot yerine standart küresel uçlu elektrotların kaba işlemede kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmıştır. CNC EEİ tezgâhında kaba işleme parametreleri ile en düşük takım aşınmalarını oluşturacak ve en hızlı talaş kaldırma yapacak iki farklı işleme parametresi ile iki alternatif takım yolu üzerinde durulmuştur.

2. DENEYSEL YÖNTEM (EXPERIMENTAL METHOD)

EEİ de kullanılan küresel uçları temsil etmek üzere iki farklı çaptaki yarı küre elektrotlar, belirlenen parametrelerle işlendikten sonra, gerekli ölçümler yardımıyla elektrotlardaki aşınmalar elde edilir. Bu proseslerin tümü aşağıdaki gibi detaylandırılabilir.

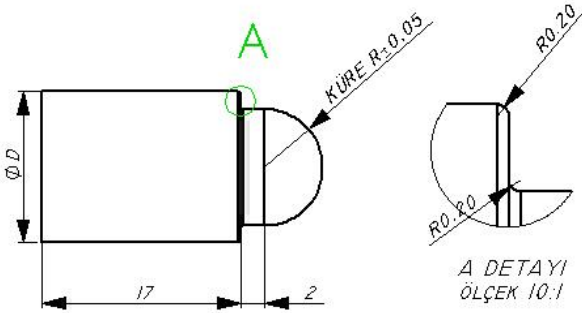
- EEİ de numunelerin işlenmesi
- İşlenen numunelerin aşınmalarının ölçülmesi

2.1. EEİ ve Numunelerin İşlenmesi (EDM and Machining of Specimens)

İşlenecek malzeme sertliğinin, tokluğunun ve mukavemetinin EEİ de işleme performansına etkisi yoktur. Buna karşın işlenecek malzemenin erime sıcaklığı ve ısı iletkenliği etkilidir [20]. EEİ genellikle (+) kutba bağlanmış takım elektrot ile (-) kutba bağlanmış iş parçası elektrotu [21] arasında oluşturulan kıvılcım atlaması yardımıyla iş parçası yüzeyinden talaş kaldırılması yöntemidir. EEİ de iş parçası ve elektrot arası dielektrik sıvıyla doldurulur. Gerilim uygulanan elektrotlar birbirlerine 0,01–0,5 mm kalacak kadar yaklaştırılırlar. Bu mesafede elektrotlar arasında elektrik alanı oluşur. Ortamda bulunan elektrik ileten parçacıklar elektrik alanının en güçlü olduğu bölgeye doğru çekilerek elektrotlar arasında bir köprü oluştururlar. Bu köprü bir müddet sonra bir ark kanalına dönüşür ve akım akmaya, dolayısıyla bu kanalda yüksek sıcaklık oluşmaya başlar ve dielektrik sıvı buharlaşır. Dielektrik sıvı ile buhar arasında bir basınç oluşur dolayısıyla kanal genişleme imkânı bulamaz. Böylece sıcaklık sürekli artar ve elektrot ile

iş parçası arasındaki en yakın yüzeyler erimeye başlar. Bu arada sıcaklık 10000 °C üzerine çıkar ve eriyen metal buharlaşır. Gerilim kesildiği zaman ark kanalı ortadan kalkar ve bölgeye dielektrik sıvı hücum ederek çıkan talaşları ortamdan uzaklaştırır, ayrıca oluşan yüksek sıcaklık sebebiyle, takım elektrotu ile iş parçası elektrotunun soğutulması görevini de yapar. Mikrosaniye mertebesinde oluşan bu işlemler devam ederek iş parçası üzerinde takım elektrotu şeklinin negatifi oluşur.

Deneylerde elektrot olarak Şekil 1’de teknik resmi verilen grafit elektrotlar kullanılmış ve elektrot çapları genel amaçlı EEİ elektrotlarında rastlanabilecek değerler göz önüne alınarak $\phi 10$, $\phi 15$ mm olarak seçilmiştir. CNC tezgâhta belirtilen toleranslarda tornalanmıştır. İş parçası olarak da 0,16 C, 0,194 Si, 0,674 Mn bileşimindeki C1345 dövme çeliği kullanılmış, yüzeyi $Ra = 0,72 \mu\text{m}$ yüzey pürüzlülüğü değerlerinde taşlanmıştır. Yüzey pürüzlülüğü TIME TR200 cihazı ile ölçülmüştür. Deneyler için EEİ Fluid 108 MP-S dielektrik sıvısı kullanılmıştır.



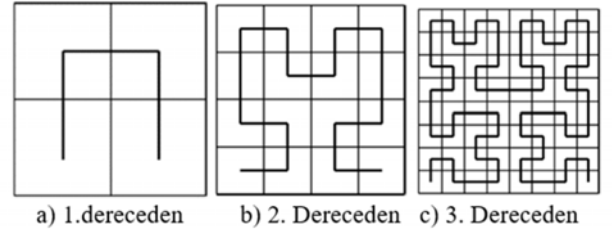
Şekil 1. Takım elektrot ($R = 5, 7,5, \phi D = 13$ ve 18 mm)
(Tool electrode ($R = 5, 7.5, \phi D = 13$ ve 18 mm))

EEİ tezgâhı; Sodick marka ve Moldmaker-3 model bir CNC EEİ tezgâhıdır. İşleme parametreleri ise tezgâh üreticisi firmanın önerdiği minimum aşınma ile maksimum talaş kaldırmanın elde edilebileceği parametreler Tablo 1’deki gibi seçilmiştir. Buradaki C590 parametresi elektrot aşınma oranı 0,1 olan $510 \text{ mm}^3/\text{dk}$ ile maksimum talaş kaldırmayı sağlarken, C480 parametresi ise elektrot aşınma oranının pratik olarak sıfır alınabileceği $280 \text{ mm}^3/\text{dk}$ talaş kaldırma oranı veren değerdir.

2.2. Takım Yolunun Belirlenmesi (Determination of Tool Path)

CNC kaba frezelemede Şekil 2’de görülen ve her adımda takım çapı kadar ilerleme yapan Hilbert boşluk doldurma eğrileri kullanılmaktadır [22,23]. Bu eğriler kısa takım yolları, dengelenmiş yüzey pürüzlülükleri ve dinamik stabilite gibi istekleri karşılamak için uygundur. Ancak

EEİ’deki ilerleme hızlarının dinamik stabilite problemi oluşturmayacak kadar küçük olması, işlenen bir takım yolundan geri gelirken 10~12 kat daha hızlı hareket edilebilmesi gibi özellikler nedeniyle Hilbert eğrilerinin avantajlı olmadığı düşünülmüştür. Çünkü Hilbert eğrileri takımındaki aşınma ile ilgilenmemektedir. Örneğin 2.dereceden Hilbert eğrisi kullanan bir takım yolunda küresel ucun sırasıyla sağ, yukarı, sol, iki yukarı gibi hareketlerle devamı etmesi durumunda takım simetrikliği çok çabuk bozulacaktır. Bu nedenle dikdörtgen takım yolunun belirlenmesi için küresel uçlarda mümkün olduğu kadar simetrik aşınmaları oluşturacak yeni takım yolu önerileri gerekmiştir.



Şekil 2. CNC kaba frezelemede kullanılan Hilbert Boşluk doldurma eğrileri
(Hilbert gap-filling curves used for CNC rough machining)

Dikdörtgen cep boşaltmaları için takım yollarının geliştirilmesinde ilk olarak Şekil 3’teki alternatifler düşünülmüştür. Ancak, Şekil 3.a’deki öneride sağa ve sola hareketler simetrikliği sağlarken yukarı hareket olmadığı için asimetriklik oluşur. Kaldı ki yatay hareketler de çok uzun tutulamaz çünkü bu durumda da simetriklik bozulur.

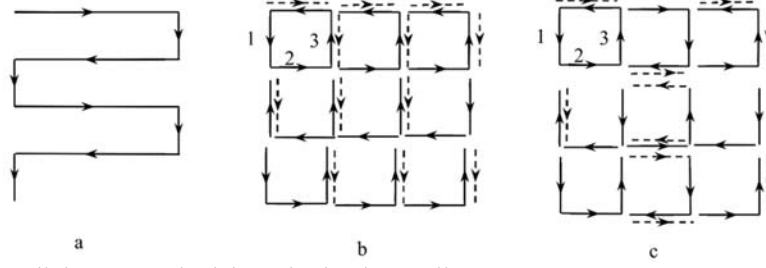
Şekil 3.b’de yukarı ve aşağı hareketler dengelenirken yatay ilerlemeler için aynı sakınca devam eder. Şekil 3.c’deki çözümden yatay ve düşey ilerlemeler dengelenir. Ancak bu çözümlerin hepsinde, yukarıda belirtilen avantajların sağlanabilmesi için adımlar takım elektrot çapı kadar olmak zorundadır. Bu durumda dalgalanmalar da elektrot yarıçapı kadar olur. Bu nedenle dalgalanmaların en fazla 1,5 mm olması gerektiği düşünülürse bu takım yolları ile en fazla 3 mm çapındaki elektrotlar kullanılabilir. Daha büyük çaplı elektrotlar için mutlaka çapraz ilerlemelere gerek duyulur.

Çapraz ilerlemeli yeni takım yolu önerisi iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Önce xyz eksenlerinde küre yarıçapı kadar ilerlemeler yapılarak, aşınmalar saptanmış ve birinci alternatif çözüm önerilmiştir. Daha sonra birinci alternatifteki adımlar arasındaki aşınmaların çok küçük olması, ancak takım yollarını geliştirmede problemler oluşturması nedeniyle daha iyi geliştirilmelerinin yapılabileceği ikinci bir alternatif takım yolu önerilmiştir.

Tablo 1. Deneylerde kullanılan EEİ işleme parametreleri (Machining parameters used in EDM experiments)

Parametre	T_s	T_p	IP	SV	PL	V	HP	PP	C	S	V	A
C 480	14	14	29	5	+	2	0	0	0	2	70	34
C 590	16	16	31	5	+	2	0	0	0	2	75	42

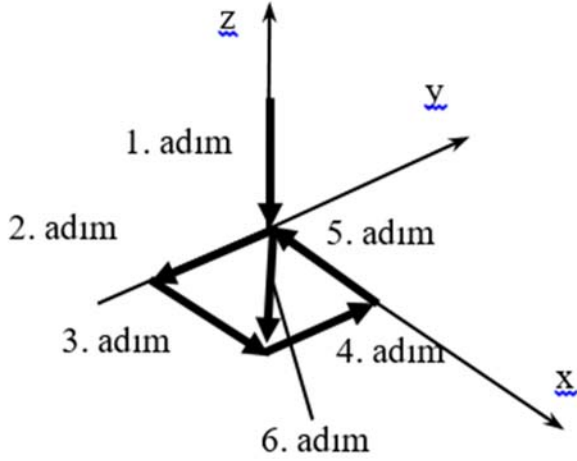
t_s ; Vurum süresi, t_p Bekleme süresi, I_p ; Tepe akımı, SV ; Servo voltaj, PL ; Polarite, V ; Yüksüz voltaj, HP ; Pikaden vurumu, PP ; Vurum kontrolü, C ; Kapasitör, S ; servo hızı, V ; gerilim, A ; Akım şiddeti



Şekil 3. Dikdörtgen cepler için en basit takım yolları (Simplest tool paths for rectangular pockets)

2.2.1. Birinci alternatif takım yolu önerisi (1st alternative suggestion for tool path)

Çalışmanın başlangıcında henüz aşınmaların ne düzeyde olacağı bilinmediği için çözüm olarak Şekil 4'te gösterilen takım yolu düşünülmüştür. Kullanılan CNC EEİ tezgâhında xyz eksen takımı şekildeki gibidir. 1.-5. adımlar elektrot küre yarıçapı kadar ve 6.adım ise x, -y yönlerinde köşegen olmak üzere tanımlanmıştır ve Şekil 5'teki boşluklar üretilmiştir. Takım yollarının geliştirilmesi bölümünde detaylıca anlatılacağı gibi bu alternatif, takım yolu geliştirme için, uygun değildir. Bu nedenle ikinci bir alternatif üzerinde durulmuştur.



Şekil 4. Birinci alternatif takım yolu adımları
(1st alternative tool path steps)

2.2.2. İkinci alternatif takım yolu önerisi (2nd alternative suggestion for tool path)

İkinci alternatif takım yolu Şekil 6'daki gibi düşünülmüştür. Birinci adım daha önce olduğu gibi $-z$ yönünde yarıçap kadar ilerlemedir. Burada 2-8 arasındaki adımlar x veya y eksenleri yönünde elektrot çapı kadar ilerlemeleri gösterir. 3., 5., 7. ve 9. adımlar sırasıyla 2., 4., 6. ve 8. adımların geri dönüşleridir. Bu adımlarda elektrot 10-12 kat daha hızlı hareket etmektedir. α değiştirilerek yatay veya düşey adımlar takım elektrot çapından bağımsız olarak seçilebilir. α ve L büyüklükleri ileride açıklanacaktır. Bu 20 adım bundan sonra bir "çevrim" olarak adlandırılacaktır. Şekilde sağda 4 çevrimde işlenmiş bir iş parçası boşluğu görülmektedir.

2.3. Parçaların 3B Verilerin Elde Edilmesi (Determination of 3D Data of Parts)

Elektrotların ölçülmesinde Breuckmann optoTOP-HE 3B optik tarama cihazı kullanılmıştır. Sistem bir kamera ve parça üzerine lazer ışını yansıtan projektörden oluşur. Projektörün elektrotlar üzerine siyah beyaz ızgara desenleri şeklinde ışın demetleri düşürmesi sonucu oluşan yüzey görüntüleri optoCAD ve RapidForm2004 PP2 yazılımları kullanılarak bilgisayar ortamında elde edilmiştir. OptoCAD yazılımında elektrotların farklı pozisyonlardan taranması sonucu elde edilen görüntüler birleştirilmiştir; RapidForm2004 PP2 yazılımında da EEİ tezgâhında işlenmiş ve işlenmemiş elektrotların değerlendirilmesi yapılmıştır.

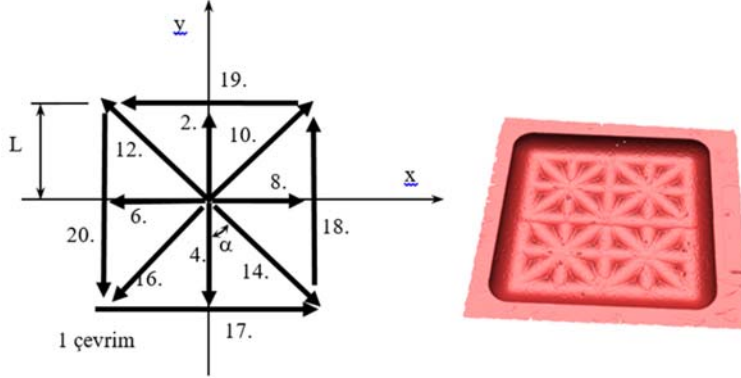
Bu çalışmada, EEİ tezgâhında işlenmiş ve işlenmemiş elektrotlar 3B optik tarama cihazı ile ölçülmüştür. Parçaya ait pozlar optoCAD programında birleştirilirken operatör ölçümü yapılan örneğe ait en az üç belirgin noktayı kendisine referans olarak almakta ve birleştirme işlemini bu noktalar üzerinden yapmaktadır. Pozları birleştirirken meydana gelen bu olumsuzluğu gidermek için tarama sırasında indeks mark adı verilen ve belli bir çapa sahip olan daire şeklindeki referans etiketleri kullanılmaktadır. Bu etiketler taranacak elektrotların etrafına belli aralıklarla yapıştırılır. Sistem tarama sırasında indeks markları da tarar ve onları sabit kabul eder. Bu şekilde tarama yapılırken parçanın sabit kalmasına dikkat edilir ve optoTOP-HE cihazı elektrotların etrafında döndürülür. Elektrotlar hareket etmediğinden ve belli referans noktaları olduğundan daha düzgün görüntüler ortaya çıkar. Elektrotların taranmasından sonra elde edilen noktaların oluşturduğu nokta bulutu ve 3B görüntüsü Şekil 7'deki gibidir.

2.4. Elektrotların Çakıştırılması ve Aşınmaların Ölçülmesi (Superposition of Electrodes and Measurement of Wears)

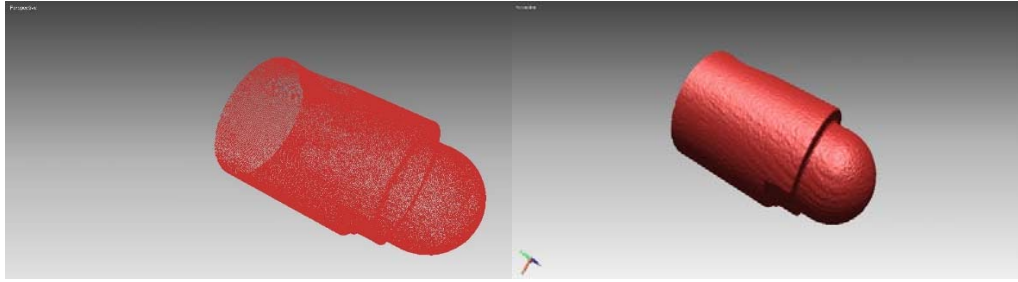
Ölçülen elektrotlara ait nokta bulutu öncelikle RapidForm2004 PP2 yazılımı kullanılarak üçgen yüzeylerden oluşan poligon modele dönüştürülür. Bu hali ile elektrot yüzeyleri RapidForm yazılımı tarafından bir kabuk (Shell) olarak tanınır. Kabuğun alt yüzeyi açıktır. Çünkü bu kısım ölçme sırasında tabla üzerinde bulunmaktadır ve yüzeydeki noktaların koordinatları alınmamıştır. Ölçülen elektrotlara iki türlü karşılaştırma yapılmıştır. Bunlardan birincisinde ölçmelerin tekrarlanabilirliğini belirlemek için EEİ tezgâhında işleme yapılmamış olan elektrotlar ikişer defa ölçülerek değerlendirmeler yapılmıştır. İkinci tür



Şekil 5. Birinci alternatif takım yolu adımlarında üretilen boşluklar (Manufactured gaps for 1st alternative tool path)



Şekil 6. İkinci alternatif takım yolu adımları ve 4 çevrimle üretilen örnek bir boşluk (2nd alternative tool path steps and sample manufactured gap with 4 cycle)



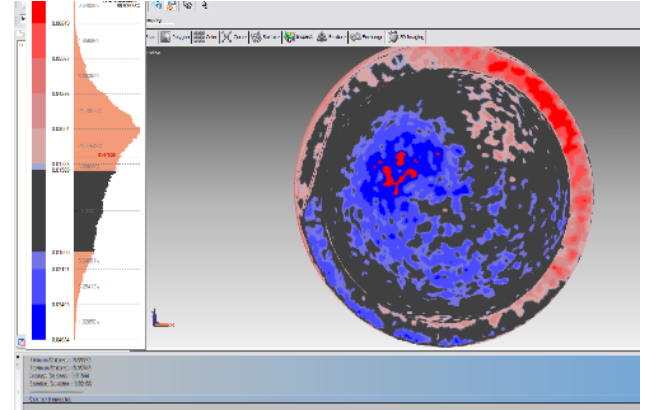
Şekil 7. Elektrot nokta bulutu ve 3B görüntüsü (Point cloud of electrode and 3D view)

karşılaştırmada ise EEİ tezgâhında işleme yapılmış olan elektrotlar ölçülmüş ve elde edilen ölçmeler kullanılarak aşınmalar saptanmıştır. Bu karşılaştırmaların yapılması için kabuklara uygulanacak işlemlerde, yazılıma ait komutların yazarlar tarafından bulunan Türkçe karşılıkları tırnak içerisinde verilmiştir ve bu komutlar aşağıda detaylıca anlatılacaktır. Ölçmelerin tekrarlanabilirliğinin araştırılması sırasında aynı elektrota ait farklı ölçmelerin karşılaştırılması durumunda bu komut kullanılmalıdır. Bir parça iki kez ölçüldüğünde her zaman aynı nokta koordinatları elde edilemeyebilir. Tam çakıştırma sırasında bir kabuktaki noktaların, diğer kabuk yüzeyine en yakın olacak şekilde birçok alternatif değerlendirilerek, noktalar arasındaki mesafeler önceden belirlenen parametreleri (Set register options) sağlayacak tarzda çakıştırılır. Bu çalışmada en büyük ortalama sapma (Max. average deviation) 0,01 mm olarak seçilmiştir. Ayrıca en büyük kenar ve giriş uzunlukları da belirlenebilmektedir. Bu değerlerin büyük seçilmesi çakıştırmayı daha kaba yaparken, gereğinden küçük tutulması da süreyi uzatır.

Şekil 8'deki kabuklara tam çakıştırma uygulandığı zaman işaretli sapmalar $-107 \sim +46 \mu\text{m}$ arasında olmaktadır. Mutlak

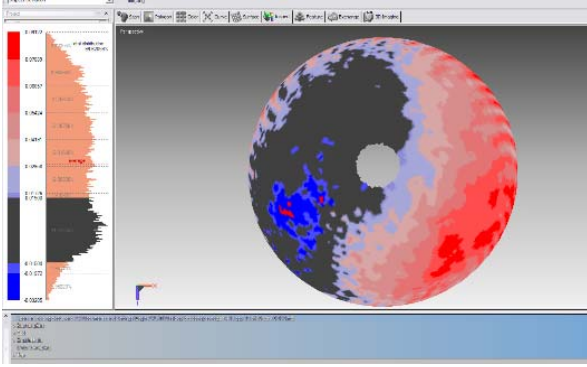
sapmalar $0-81 \mu\text{m}$, ortalama sapma $29 \mu\text{m}$, standart sapma $22 \mu\text{m}$ olarak bulunmuştur. Şekil 9'da, siyah noktaların homojen dağılmasından, kabukların birbiri ile tam örtüştüğü anlaşılmaktadır.

2.4.1. Dönüştürme (Transformation)

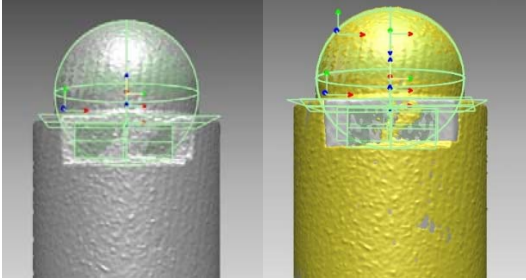


Şekil 8. Elektrotlara hızlı çakıştırma uygulanması (Quick register application for electrodes)

Birbirleri ile karşılaştırılmak istenen iki elektrota uygulanacak ilk adımda “Dönüştürme” komutu kullanılarak ve elektrotların imalatı aşamasında bırakılan düzlem yüzey referans alınarak işlenmemiş elektrot üzerindeki düzlem yüzey x eksenine, elektrot ise y eksenine paralel olacak şekilde eksen takımına yerleştirilir. Aynı işlemler işlenmiş elektrot üzerinde de uygulanarak işlenmiş ve işlenmemiş elektrotlar eşmerkezli olarak eksen takımına yerleştirilir (Şekil 10). Böylece iki kabuğa daha sonra uygulanacak olan “Kısmi çakıştırma” komutlarının daha doğru çalışması elde edilir.



Şekil 9. Elektrotlara tam çakıştırma uygulanması (Whole register application for electrodes)



Şekil 10. Eksen takımına yerleştirilen a) işleme yapılmamış b) çakıştırılmış elektrot (a) raw, b) superposed electrodes placed on axis

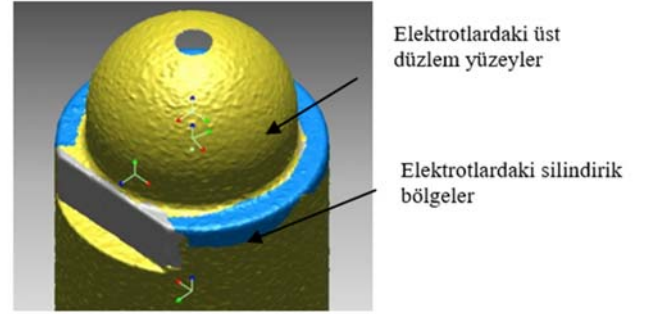
2.4.2. Kısmi çakıştırma (Partial superposition)

Aşınmanın saptanması için EEİ tezgâhında aşınmış ve aşınmamış elektrotlar eksen takımına yerleştirildikten sonra elektrotların daha hassas çakıştırılması gerekir. Bu durumda tam çakıştırma uygulamak hatalı sonuçlar verir. Çünkü aşınmamış ve aşınmış elektrotlar yazılım tarafından birbirlerine yaklaştırılmaya çalışılır. Bu nedenle sadece aşınmamış bölgelerin çakıştırılması için kısmi çakıştırma gereklidir. Değişikliğe uğramayan bölgeler kullanıcı tarafından Şekil 11’deki gibi seçilmelidir. Bu bölgeler şekilden de görülebileceği gibi elektrotların silindirik bölgeleri ve üst düzlem yüzeyleridir.

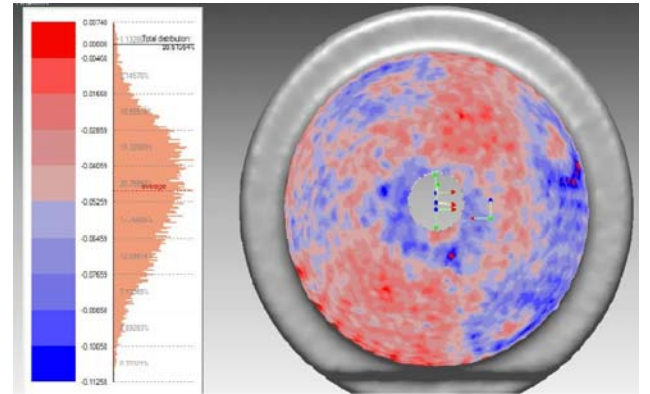
2.4.3. Tüm sapma (Whole deviation)

Aşınmamış ve aşınmış elektrotlar çakıştırıldıktan sonra iki örnek arasındaki sapma değerleri bu komut ile belirlenir.

Komut kullanılırken aşınmamış elektrot referans olarak alınır ve aşınmış elektrot üzerindeki sapmalar negatif değerlerle gösterilir. Ayrıca çakıştırma sonucunda; en büyük, en küçük ve ortalama aşınma ile aşınmaların standart sapması da bulunur. Komut kullanıldığı zaman, incelenen kabuklar arasındaki farkları mutlak değerlendirme, işaretli değerlendirme, yer değiştirme vektörü ve renkli nokta olmak üzere dört farklı şekilde gösterir. Bu çalışmada, aşınmanın saptanması için işaretli değerlendirme, ölçmelerdeki tekrarlanabilirliğin bulunması için de mutlak değerlendirme kullanılmıştır. İşaretli değerlendirmede karşılaştırılan aşınmamış ve aşınmış kabuk arasındaki sapmalar negatif ve pozitif değerler arasında renk haritası şeklinde gösterilir. Negatif değerler aşınma olduğunu gösterirken pozitif değerler ölçme ve çakıştırma hatası olarak ortaya çıkar. Şekil 12’de aşınmış ve aşınmamış kabuğa işaretli değerlendirme uygulanması sonucu ortaya çıkan sapma değerleri görülmektedir. Fare renk haritası üzerinde hareket ettirilirse istenen bir noktadaki sapma değeri bulunabilir.



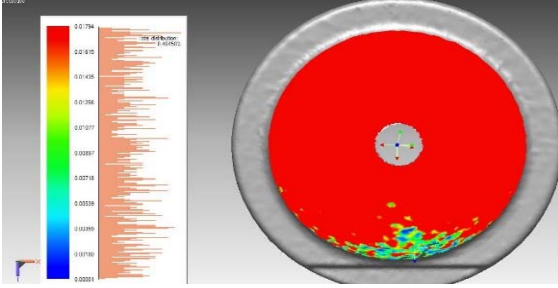
Şekil 11. Değişikliğe uğramayan bölgelerin seçimi (Selection of non-changing region)



Şekil 12. İşaretli değerlendirmede sapmaların negatif ve pozitif değerler arasında gösterilmesi (Illustration of deflection in marked assessment within negative and positive values)

Ayrıca renk haritasında gösterilen dağılım üzerinde DISCRETE seçeneği işaretlenerek sapma değerleri arasında, nokta dağılımının yüzde cinsinden değeri de görülebilir. Mutlak değerlendirmede sapmalar mutlak değerleri ile hesaplanır ve Şekil 13’te görüldüğü gibi negatif sapmaları da pozitif olarak gösterir. Bu komut tersine mühendislikte kalite kontrol amaçlı olarak ta kullanılabilir. Bu durumda herhangi

bir CAD yazılımında tasarlanan 3B model ile aynı modelin imal edilip taranması sonucunda elde edilen kabuk model arasında olabilecek sapmaları yani imalat hatalarını belirlemeye yardımcı olur.



Şekil 13. Mutlak değerlendirmede sapmaların işaretine bakılmaksızın değerlendirildiği durum
(Situation of deflections regardless of mark of their in absolute assessment)

2.4.4. Hacim Bulma (Finding volume)

Takım elektrotların yarı kürelerinin ve üretilen iş parçalarının veya ideal malzemenin hacimlerini bulurken bu komut kullanılır. Hacmi bulunmak istenen elektrot yarı küresi veya iş parçasının normal öncelikle ters yöne çevrilir. Daha sonra elektrot yarıküresinin veya iş parçasının yüzeyindeki boşluklar ve açık görünen kısımlar “Delik Doldur” komutu kullanılarak doldurulur. Böylece bu işlemde önce “açık kabuk” olarak tanımlanan bölge işlemde sonra kapalı hale gelir ve “Hacim Yap” komutu ile kapalı kabuğa ait hacim oluşturulmuş olur. Bilgi bölümünde yer alan kabuk (shell) komutu ile ölçülmek istenen hacim bulunmuş olur.

3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bir elektrottaki aşınmanın bulunması sırasında oluşacak hata kaynakları şöyle sıralanabilir.

- 3B verilerin elde edilmesi sırasında optoTOP-HE cihazının doğruluk ve hassasiyetinden kaynaklanan hatalar
- Rapidform 2004 PPS yazılımında oluşan çakıştırma hataları
- CNC tezgâhta üretim sırasında oluşan hatalar; boyut ve şekil toleransları

Bu bölümde önce yapılan ölçmelerdeki hata kaynaklarının değerleri bulunacak sonra EEİ de işleme sonunda elektrotlarda oluşan aşınmalar bulunacaktır

3.1. Ölçme Sisteminin Doğruluğu (Accuracy of Measurement System)

Elektrotlardaki aşınmaların saptanmasında, bu çalışmada kullanılan ölçme yönteminin, uygun olup olmadığına karar vermek için, ölçme yönteminin doğruluğu ve hassasiyeti ile sakıncalı tarafları araştırılarak aşağıda açıklanmıştır. Ölçme işlemi sırasında, 3B optik tarama cihazının kamerasında, 60

numaralı lens kullanılmıştır. Bu lens kullanım kataloğuna göre $\pm 15 \mu\text{m}$ doğrulukla ve 0,05 mm çözünürlükle ölçüm yapabilmektedir. Yani nokta koordinatları $\pm 15 \mu\text{m}$ doğrulukla ölçülebilmekte ve yan yana noktalar birbirine $\sim 0,05$ mm yakın olmaktadır. Ancak farklı pozlarda farklı noktalar ölçülebildiği için noktaların arasındaki mesafe daha da düşebilmektedir. Daha doğru ölçmeler yapmak için referans etiketleri de kullanılmıştır.

Lensin ölçüm doğruluğu için kullanılacak master 3B olarak taranır ve şekilde görülen $56 \pm 0,00$ mm lik ölçü, yazılımın ölçüm komutları ile kontrol edilir. Ölçümler yapılırken 175 numaralı lens ile söz konusu boyut $55,979$ mm olarak saptanmıştır. Kamerada kullanılan lenslerin değiştirilmesi ve/veya uzun süreli kullanımlar sırasında sık sık bu kalibrasyon yapılmaktadır.

3.2. Ölçme Sisteminin Hassasiyeti (Repeatability of Measurement System)

Elektrotların işleme toleransları ve yüzey pürüzlülüğü toleransları gibi özelliklerinin ölçmeleri nasıl etkilendiğini bulmak için aynı elektrotlar birkaç kez ölçülerek ölçmelerin hassasiyeti araştırılmıştır. İdeal olarak aynı parçaya ait ölçmelerde elde edilen 3B verilerin birbirleriyle çakışması gerekir. Ancak Şekil 14’te görüldüğü gibi ölçme sisteminin doğası gereği her ölçmede, yüzeydeki farklı noktalar ölçülerek farklı koordinat değerleri elde edilebilmektedir. Burada aynı elektrota ait 1. ve 2. ölçme sonucu elde edilen görüntüler karşılaştırılırsa bazı yerlerde pozitif veya negatif sapmalar ortaya çıkabilir. Şekil iki boyutlu çizilmesine karşın üçüncü boyutta da benzer ilişkiler vardır. Doğal olarak farklı ölçmelerde birbirleri ile çakışan noktalar da olabilir. Dolayısıyla farklı ölçmeler birleştirilerek (merging) gerçek yüzeye daha yakın değerlerin elde edilmesi beklenir. Birleştirilecek ölçme sayısı ne kadar fazla olursa gerçek yüzeye o kadar yakın veriler elde edilebilir. Tekrarlanabilirliği bulmak için EEİ tezgâhında işleme yapmamış olan aynı elektrotlar iki defa taranarak ölçülmüştür. Ölçmeler, her bir tarama işleminde elektrot üzerinden yaklaşık 130.000~180.000 adet nokta alınarak yapıldı. Çakıştırma için aynı parçaya ait iki ayrı veriye tam çakıştırma uygulandı. Sonra verilere ait referans küreler oluşturularak küre merkez koordinatları ve yarıçapları arasındaki farklar bulundu. Tablo 2’de işlenmemiş elektrotlara ait iki farklı ölçümün çakıştırılması sonucunda elde edilen küre merkez koordinatları ve ortalama küre yarıçapları arasındaki değişimler görülmektedir.

Küre merkezi koordinatları $\varnothing 10$ elektrotlar için $\sim 12 \mu\text{m}$, yarıçaplar ise $\sim 7 \mu\text{m}$ hassasiyetle elde edilebilmektedir. $\varnothing 15$ Elektrotlar için bu değerler sırasıyla $\sim 7 \mu\text{m}$, $\sim 9 \mu\text{m}$ olarak bulunmuştur.

3.3. CNC Tezgâhta İşleme Hataları (Machining Error in CNC Machine)

Şekil 1’de teknik resmi verilen elektrotlar CNC torna tezgâhında üretilmiştir. Üretim metodu ne olursa olsun ideal

bir küre imal etmek mümkün değildir. Bu nedenle CNC torna tezgâhında üretilen takım elektrotların hangi toleranslarda üretildikleri bulunmalıdır. Bu nedenle elektrotların işleme toleranslarını bulabilmek için üretilmiş olan iki farklı \varnothing 10 mm ve \varnothing 15 mm elektrotlar EEİ tezgâhında işleme yapmadan önce taranarak ikişer kez ölçülmüş ve çakıştırma işlemi uygulanmıştır. Tablo 3'te görüldüğü gibi \varnothing 10 elektrot için küre merkezlerinde sapmalar genellikle 3-10 μ m arasında ortalama 3 μ m, yarıçaplardaki sapmalar ise 16 μ m olurken \varnothing 15 elektrot için bu değerler sırasıyla 1-5 μ m arasında ortalama 1 μ m yarıçaplardaki sapmalar ise yine 20 μ m olmaktadır.

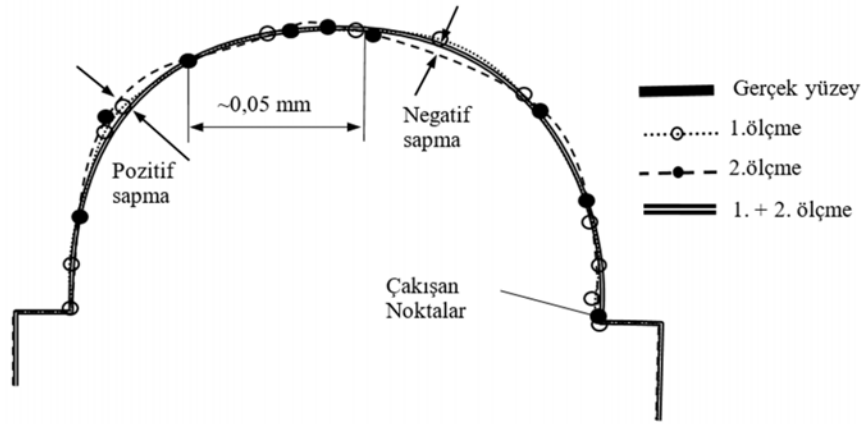
Sonuç olarak küre merkezinin x , y ve z eksenlerindeki 10 μ m ye kadar olan sapmaları yok kabul edilmelidir. Bu çalışmada küre yarıçapları $5,03 \pm 0,008$ mm ve $7,54 \pm 0,010$ mm olarak değerlendirilecektir.

3.4. EEİ Deneylerinin Tekrarlanabilirliği (Repeatability of EDM Experiments)

Deneylerin tekrarlanabilir olduğundan söz edebilmek için aynı parametrelerle yapılan deneylerde hem takım, hem de iş parçası elektrotların benzer aşınma karakteristikleri göstermesi gerekir.

3.4.1. Elektrotlar için tekrarlanabilirlik (Repeatability for electrodes)

Elektrotlar için tekrarlanabilirliği bulmak için C 480 ve C 590 parametreleri ile 1. Alternatif takım yolu önerisi için 6. adımlarla işleme yapmış olan ikişer adet \varnothing 10 ve \varnothing 15 elektrotlar birbirleri ile karşılaştırılarak Tablo 4'te verilmiştir. Böylece deneylerin tekrarlanabilirliği C 590 işleme parametresi için küre merkez koordinatlarında (9,7,3,2,6,8'in ortalaması olarak) ~ 6 μ m, yarıçaplarda ise



Şekil 14. 3B ölçmeler arasındaki farklar (Difference between 3D measurements)

Tablo 2. Elektrotlar için ölçme hassasiyeti (Measurement accuracy for electrodes)

		Küre merkezi koordinatları			Ortalama yarıçap
		x	y	z	R
\varnothing 10 mm	1. ölçüm	-0,00411	1,97846	-0,00179	5,02199
	2. ölçüm	-0,00349	1,96585	-0,00089	5,02960
	Fark	0,00062	-0,01261	0,00090	0,00761
\varnothing 15 mm	1. ölçüm	-0,01444	1,98143	-0,0115	7,5344
	2. ölçüm	-0,00997	1,97517	-0,00419	7,54392
	Fark	0,00447	0,00626	0,00731	0,00952

Tablo 3. CNC tezgâhta işleme hatası (Machining error in CNC machine)

		Küre merkezi koordinatları			Ortalama yarıçap
		x	y	z	R
\varnothing 10 mm	1. elektrot	0,00741	1,97811	-0,01005	5,02222
	2. elektrot	0,00343	1,96787	-0,00683	5,03824
	Fark	-0,00398	-0,01024	0,00322	0,01602
\varnothing 15 mm	1. elektrot	-0,00145	1,94189	-0,02154	7,53408
	2. elektrot	-0,00289	1,93869	-0,01582	7,55504
	Fark	-0,00144	-0,0032	0,00572	0,02096

$(40+16)/2 \approx 28 \mu\text{m}$ olduğu bulunmuştur. Aynı değerler C 480 için de sırasıyla $\sim 7 \mu\text{m}$, $\sim 8 \mu\text{m}$ dir.

Çakıştırmanın tekrarlanabilir olduğunu bulmak için, Tablo 4'te 1.satırdaki değerler aynı kullanıcılar tarafından iki kez yapılmış ve koordinatlardaki hata ortalama $7 \mu\text{m}$, standart sapmalar da $0,8 \mu\text{m}$ olarak bulunmuştur. Dolayısıyla çakıştırma işlemi oldukça hassastır. Sonuç olarak EEİ deneylerinin elektrotlar açısından $\sim 0,01 \text{ mm}$ hassasiyetle tekrarlanabileceği bulunmuştur.

3.4.2. İş parçaları için tekrarlanabilirlik (Repeatability of work pieces)

İki farklı deneyde, C 480 parametresi ve çap 10 mm elektrotlar ile ikinci alternatif takım yolunun 1.çevriminde işlenen iş parçalarına tam çakıştırma uygulanarak elde edilen mutlak sapmalar Şekil 15'de verilmiştir. Burada beyaz kısımlar $15 \mu\text{m}$ lik ölçme toleransı içerisinde kalan kısımlardır ve toplam dağılımın % 49'unu oluşturmaktadır. Ortalama fark $0,021 \text{ mm}$ dir. Aşınma dağılımı 0 ile $0,05$ arasında yoğunlaşmıştır ve % 92 si bu bölgede kalır. Değerlendirme yaparken bu bölgenin dikkate alınması daha doğru olacaktır. Diğer alternatif takım yolları ile işlenmiş iş parçaları için yapılan benzer değerlendirmelerde aşınma dağılımlarının %90'lık kısmının $0,04-0,06 \text{ mm}$ arasında kaldığı görülmüştür.

3.5. Elektrotlardaki Aşınmaların Saptanması (Determination of electrode wears)

Önerilen iki alternatif takım yolunun tüm adımları için takım elektrot aşınmaları incelenmiş ve beklenen dağılımlar gözlenmiştir. Ancak sonuçta sadece ikinci alternatif takım

yolları önerildiği için burada ikinci alternatifte işlenen aşınma adımları için takım elektrotlardaki aşınmalar ve geometrik bozulmalar incelenmiştir.

İkinci alternatif takım yolunu kullanarak iş parçası elektrottan, takım elektrot hacminin 38 katı kadar malzeme kaldırılması durumunda bile, takım elektrottaki aşınmalar Şekil 16'da görüldüğü gibi homojen ve küre merkezine göre simetrik dağılımlar göstermektedir [24, 25]. Bu ve diğer deneylerdeki aşınma değerleri ile küre merkez koordinatlarından, yarıçapından sapmalar ile küresellik hataları Tablo 5'te özetlenmiştir. Sonuç olarak takım elektrotlardaki küre form korunmaktadır.

Küresellik hatasının en fazla $0,06$ olması ve endüstriyel uygulamalardaki kaba işlemlerdeki dalgalanmaların küçük parçalarda $0,75 \text{ mm}$, büyük parçalarda $1,5 \text{ mm}$ 'ye kadar izin verilebileceği ve hatta katman katman kaba işlemede (layer-by-layer roughing machining) paso derinliklerinin 2 mm 'ye [16] kadar çıkabileceği dikkate alındığında, çok büyük hacimli talaş kaldırmalarda bile küre formun yeterli hassasiyetlerde korunduğu rahatlıkla söylenebilir. Bilimsel açıdan özellikle aşınmaların kompanzasyonun yapılmasıyla da takım değiştirmeden çok daha fazla talaş kaldırma yapılacağı söylenebilir.

3.6. İş Parçasında Oluşan Boşluklar (Developed Gaps in Work piece)

Takım elektrotlardaki aşınmaların ölçülmesi hedef iş parçası hakkında tam olarak bir fikir vermez. Çünkü takım elektrot ve iş parçası elektrotu arasında işleme boşluğu kadar bir fark vardır. Bu nedenle ideal olarak üretilmesi gereken boşlukla

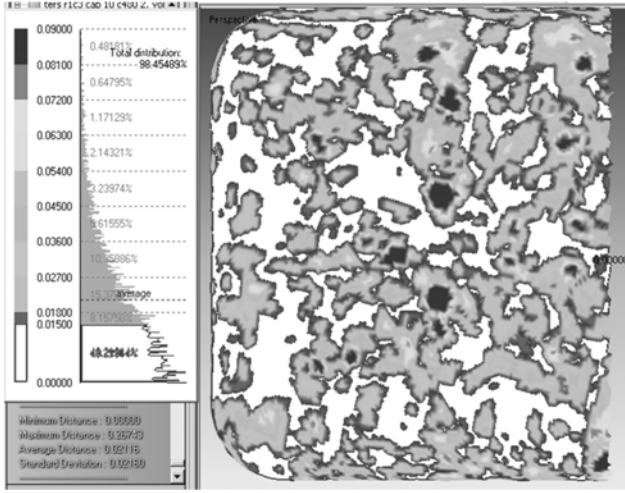
Tablo 4. EEİ deneylerinin takım elektrotlar açısından tekrarlanabilirliği
(Repeatability of EDM experiments with regards to tool electrodes)

EEİ parametreleri	Çap [mm]	Δx [μm]	Δy [μm]	Δz [μm]	ΔR [μm]	Ortalama aşınma farkı [μm]
C480	10	13	8	5	6	18
	15	3	8	8	9	4
C590	10	9	7	3	40	36
	15	2	6	8	16	17

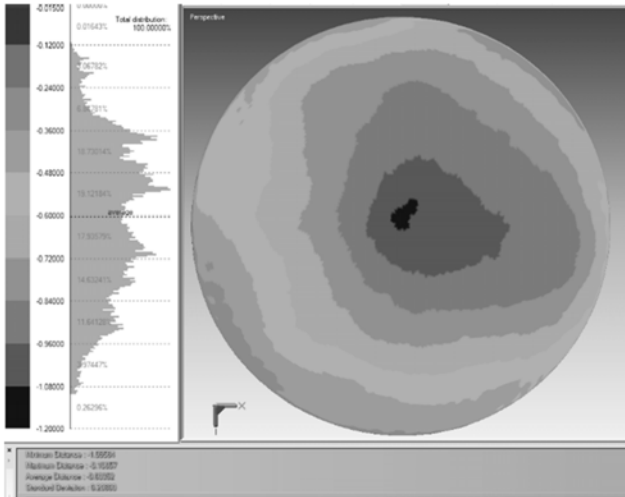
Tablo 5. Takım elektrotlardaki aşınmalar ve geometrik bozulmalar (Wear in tool electrode and geometrical defects)

İşleme parametresi	Çap [mm]	Çevrim	Aşınmalar [mm]			Küre merkezinden sapmalar [mm]			ΔR [mm]	Küresellik hatası [mm]
			Ortalama	Anlamlı En büyük	Anlamlı En küçük	Δx	Δy	Δz		
C480	10	1	-0,111	-0,049	-0,178	-0,008	0,086	0,013	0,070	0,02
C480	10	2	-0,177	-0,050	-0,030	-0,036	-0,182	0,026	0,09	0,03
C480	15	4	-0,603	-0,106	-1,095	-0,156	0,532	0,116	0,347	0,06
C590	15	4	-0,301	-0,013	-0,707	-0,085	-0,297	0,082	0,157	0,05

gerçekte üretilen boşlukların karşılaştırılarak farkların kıyaslanması gerekir. Kaba işleme için bu farkların ortalama olarak 0,75~1,5 mm olması gerekir.

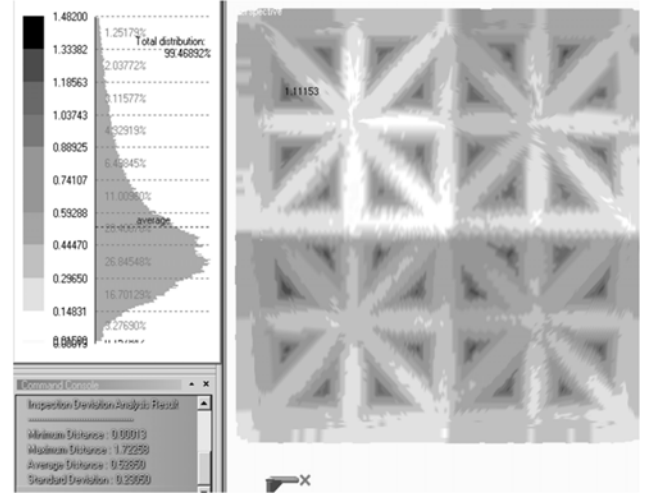


Şekil 15. İş parçaları açısından deneylerin tekrarlanabilirliği (Repeatability of EDM experiments with regards to work pieces)



Şekil 16. İkinci alternatif takım yolunda C 480 parametresi ile 4. çevrim ile işlemede ϕ 15 elektrottaki aşınma (Wear in tool electrode for C 480 parameter and 4th cycle machining in 2nd alternative toll path)

Bu farkların bulunması için katı modeldeki ideal boşluklar ile ölçümlerden elde edilen boşluklar karşılaştırılarak, tüm sapma uygulanır ve farklar saptanır. Önerilen ikinci alternatif takım yolunun 4. çevrimi için sapmalar Şekil 17’de görüldüğü gibi oldukça anlamlı dağılımlar göstermektedir. Bu iş parçasına ait görüntü Şekil 6’da verilmişti. 1.çevrim sol üst köşededir. Onun sağında ikinci, altında ise üçüncü çevrim bulunmaktadır. İdeal boşluktan sapmalar beklendiği gibi çevrimler arttıkça artmaktadır. Diğer deneylere ait sapmalar Tablo 6’da verilmiştir. En büyük sapmalar kaba işleme için kabul edilebilir en büyük dalgalanma değeri olan 1,5 mm sınırını aşmadığı için kullanılan elektrotlarla kompozisyon yapılmaksızın daha ilave çevrimler işlenebilir.



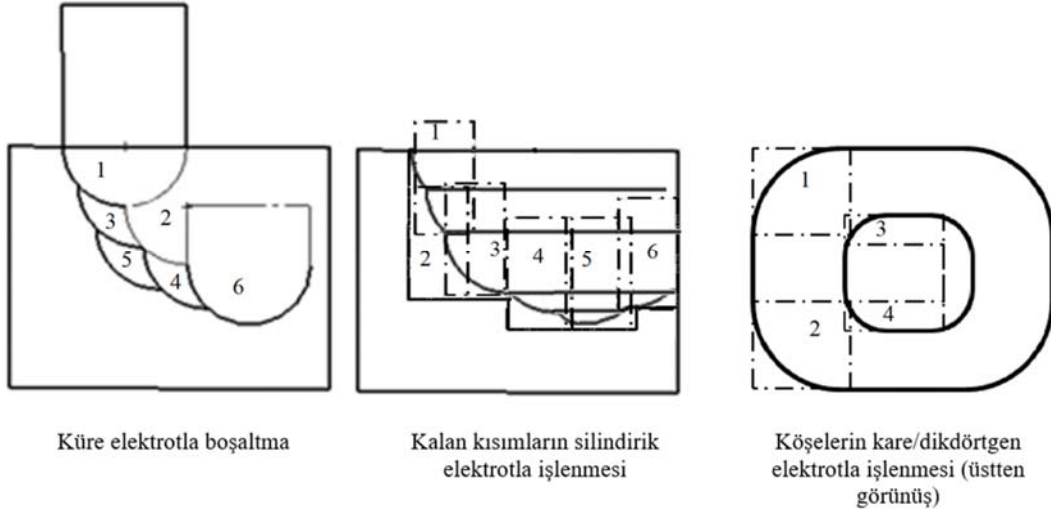
Şekil 17. İş parçasında oluşan ideal boşluktan sapmalar (Deviations on work piece from ideal gap consisted)

Tablo 6. İş parçalarının ideal boşluktan sapmaları (Deviations of work pieces from ideal gap)

İşleme parametresi	Çap [mm]	Çevrim	Aşınmalar [mm]		
			Ortalama	Anlamlı En büyük	Anlamlı En küçük
C480	10	1	0,196	0,272	0,015
C480	10	2	0,175	0,313	0,015
C480	15	4	0,529	1,185	0,07
C590	15	4	0,425	1,056	0,02

3.7. Takım Yolunun Genelleştirilmesi (Generalization of Tool Path)

CNC EEİ kaba frezelemede (cep boşaltmada) boşaltılacak kısımlar z eksenine dik katmanlar halindeki boşlukların işlenmesi ile gerçekleştirilir. Literatürde bu konudaki çalışmaların tümünde takım elektrot kendi eksenine etrafında döndürülmekte, dolayısıyla da z eksenine göre simetrik takım aşınmaları oluşmaktadır. Ancak bu çalışmada “Takım elektrotun döndürülmesine gerçekten gerek var mı?” sorusuna yanıt aramak üzere döndürme yapılmadan takım yolunun genelleştirilmesi üzerinde durulmuştur. Bu durumda asimetrik aşınmalar kaçınılmaz olmaktadır, dolayısıyla takım yolları mümkün olduğu kadar simetrik aşınmalar oluşturacak şekilde seçilmelidir. Bu nedenle üç boyutlu boşluklar yerine bu boşlukların daha küçük geometrik şekillere ayrılabilmesi düşünülmüştür. Önce katman yükseklikleri küresel elektrot yarıçapı kadar olan kare, dikdörtgen ve daire boşluklar üretilebilir. Sonra kenarlarda oluşan çeyrek daire kesitli kalıntılar Şekil 18’de görüldüğü gibi silindirik elektrotlarla düzeltilebilir. Son olarak da iç köşelerde kalan fazla kısımlar kare kesitli elektrotlarla işlenebilir. Bu çalışmada özellikle dikdörtgen ceplerin oluşturulması için takım yollarının genelleştirilmesi



Şekil 18. Derin cep boşaltmada kenarların farklı elektrotla boşaltılması
(Machining of edges with different electrodes in machining of deep pockets)

üzerinde durulmuş ve sonraki çalışmalara ışık tutması açısından da rasgele cepler için öneriler sunulmuştur.

3.7.1. Takım elektrot çapları için genelleştirme (Generalization for tool electrode diameters)

EEİ ile işlemede takım elektrotla iş parçası elektrot arasında “işleme boşluğu” olarak adlandırılabilen bir boşluk oluşur. Dolayısıyla boşlukla bu boşluğu oluşturacak elektrot geometrileri aynı olmaz. İşleme parametrelerine göre sabit olarak alınabilecek [21] işleme boşluğunu ölçmek için z yönünde yarıçap kadar işleme (1. alternatif takım yolu için üretilen 1. adım) yapılarak takım elektrot ve iş parçası elektrot yarı kürelerine uydurulan ideal küre yarıçapları arasındaki fark çalışma boşluğu olarak bulunmuştur. Bu boşluk C480 işleme parametreleri için $51 \mu\text{m}$, C590 işleme parametreleri için ise $85 \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür. Ayrıca her iki parametre ile işlenen 1. alternatif takım yolunun 6. adımıyla üretilen iş parçaları karşılaştırılarak ortalama farklar $40 \mu\text{m}$ bulunarak da bulunan değerler doğrulanmıştır.

Sonuç olarak kullanılacak takım elektrot yarıçapı R için; çalışma boşluğu (gap) g ve üretilecek olan boşluk yarıçapı r olmak üzere Eş. 1 kullanılabilir.

$$R = r - g \quad (1)$$

3.7.2. Dikdörtgen cepler için genelleştirme (Generalization for rectangular pockets)

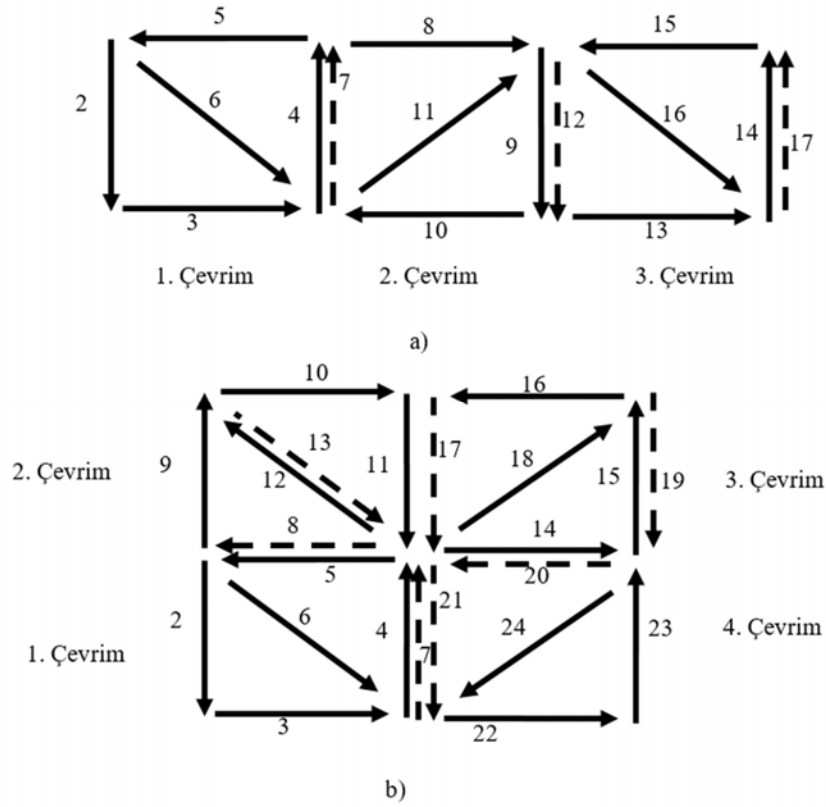
1. Alternatif takım yolunda altı adımın tamamı bir “çevrim” olarak adlandırılırsa, bir çevrim tamamlandığında aşınmalar oldukça düşük düzeylerde kalmaktadır. Takım yolunun genelleştirilmesi sırasında Şekil 19(a)’da görüldüğü gibi yan yana çevrimler işlenecek olursa 3. çevrim sonunda bir periyot tamamlanmış olur. Kesik çizgiler, elektrotun daha önce işlenen yerlerden geçtiği adımları göstermekte olup bu adımlarda işleme devam etmektedir ancak elektrot

aşınmaları ihmal edilebilecek kadar az olacaktır. Ancak sol-yukarı ve sol-aşağı çapraz yapılamayacağı için küreden sapmalar gittikçe artar. Bunu önlemek için çevrimler Şekil 19(b)’de görüldüğü gibi daha homojen bir takım aşınması oluşturacak tarzda düzenlenebilir. Fakat bu durumda takım yolunun genelleştirilmesi oldukça karmaşık bir hal alacaktır. Bunun yerine daha kolayca genelleştirilebilecek ve bir çevrimde 4,5 kat daha fazla işleme yapacak 2. alternatif takım yolu önerilmiştir.

2. alternatifteki takım yolu Şekil 6’daki gibi tanımlanmıştır ve bir çevrim olarak adlandırılmıştır. Geometrik bağıntılardan yararlanılarak, küre yarıçapına, adımlardaki ilerlemelere ve çapraz adımların açılarına bağlı olarak Eş. 2 gibi değişmektedir.

$$h = r - \sqrt{r^2 - \left(\frac{L \sin 45 \sin \alpha / 2}{\sin(180 - 45 - \alpha / 2)} \right)^2} \quad (2)$$

Burada h ; dalgalanma, r ; iş parçasında oluşan boşluk yarıçapı, L ; adımlardaki ilerleme ve α çapraz adım açısıdır. Takım elektrotlardaki aşınmaların homojen olup olmadığının saptanması, takım elektrot yarıçapının kabul edilebilir sınırları ne zaman aşacağı ve elektrot kompanzasyonuna ne zaman gerek duyulacağı belirlenmesi amacıyla Tablo 7’de görülen deneyler yapılmıştır. Elektrot aşınma hacmi (EAH) ve malzeme aşınma hacmi (MAH) 2.4.6. Başlığında açıklandığı gibi bulunur. Elektrot aşınma oranı (EAO), takım aşınma hacminin malzeme aşınma hacmine oranıdır. Aşınmadan önceki ve sonraki takım elektrot yarıçapları arasındaki fark ΔR iken, Δy de merkez koordinatları arasındaki düşey uzaklıktır. Bu deneylerde takım hacminin 12~38 katı kadar talaş kaldırılmasına rağmen küresellik hatalarının ve ΔR nin çok küçük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla aşınmalar oldukça homojendir ve küre formu korunmaktadır. Δx ve Δz değerleri Tablo 5’te görüldüğü gibi 0,01 mm mertebesinde



Şekil 19. Takım yolu için genelleştirme önerileri (Suggestions for generalization of tool path)

Tablo 7. İkinci alternatif takım yolu için deney sonuçları in (Experimental results for 2nd alternative toll path)

İşleme parametresi	Çap [mm]	Çevrim	Elektrot Aşınma Hacmi EAH [mm ³]	Malzeme Aşınma Hacmi MAH [mm ³]	Elektrot aşınma oranı EAO	Deney süresi [saat]	Aşınmış Takım yarıçapı [mm]	Küresellik hatası [mm]	ΔR [mm]	Δy [mm]
C480	10	1	17,89	3801	0,0047	1,18	4,95	0,02	0,07	0,09
C480	10	2	28,35	5856	0,0048	2,17	4,94	0,03	0,09	0,18
C480	15	4	113,66	35587	0,0032	8,02	7,19	0,06	0,35	0,53
C590	15	4	123,27	38307	0,0032	7,28	7,41	0,05	0,16	0,29

kalmaktadır. Bu nedenle sadece y yönünde takım elektrot kompanzasyonlarının yapılmasının uygun olacağı sonucuna varılmıştır. Burada kullanılan Δy değeri, ileride kullanılacak kompanzasyonlarla (ΔY) karıştırılmamalıdır. Deneyler yapılırken ΔY kompanzasyonları verilmeden boşluklar üretilmiştir. Bu durumda kompanzasyonların etkilerini bulabilmek için her bir çevrime ait işlenmiş yüzeylerin $3B$ verileri y yönünde $\square Y$ kadar yakınlaştırılarak kompanzasyon simüle edilmiştir. Sonuçlar Tablo 8’de verildiği gibidir. İleride geliştirilebilecek bir bilgisayar destekli EEİ imalat yazılımının algoritması Şekil 20’de verildiği gibi olabilir. Bu algoritmada g ; işleme boşluğu ve EAO; elektrot aşınma oranı EEİ işleme parametrelerine göre veya küçük deneylerle belirlenir. İzin verilen elektrot aşınması $\Delta R = 0,3\sim 0,5$ mm,

dalgalanma da $h=1\sim 1,2$ mm değerleri arasında seçilebilir. İşlenecek parça $A_i, B_i (i=1..n)$ boyutlarında dikdörtgenlere ayrılır. Bu dikdörtgenler 2 numaralı bağıntıyı sağlayacak tarzda seçilmelidir. Böylece ilk çevrim işlenir. Bu çevrime ait malzeme aşınma hacmi (MAH); takım aşınması olmadan üretilen ideal boşluk hacmi olarak hesaplanır. EAO ile çarpılarak EAH; elektrot aşınma hacmi bulunur. Şekil 21’de görüldüğü gibi kürelerdeki aşınmaların eş merkezli olduğu kabul edilmiştir. Şekildeki noktalı çizgiler kompanzasyondan önceki elektrotu gösterir. Elektrotta yapılacak kompanzasyon olarak bulunur. Yeni takım yollarına y yönündeki ΔY kompanzasyonu kadar ofset uygulanır. İzin verilen elektrot aşınması değeri aşılmamışsa yeni bir çevrime geçilir.

Tablo 8. Elektrotlarda yapılması gereken kompanzasyonlar (Required compensations in electrodes)

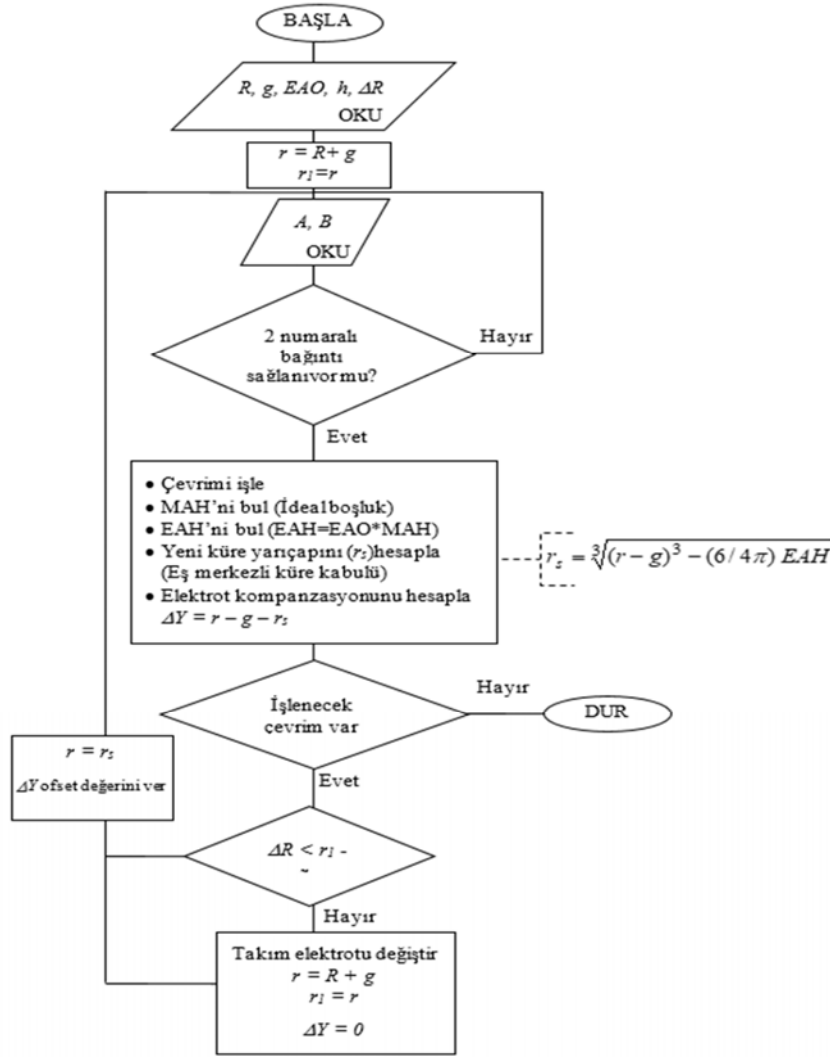
	Dalgalanma (undercut)	1. çevrimlerde bulunan değerler	Kompanzas- yonsuz	Algoritmanın önerdiği	Yazarların önerdiği
	ΔY	0	0	0,15*	0,10
C 480 çap 2.çevrim	10 En büyük	0,97509	0,97423	0,82423	0,87423
	Ortalama	0,28058	0,29913	0,14935	0,19931
	En küçük	0,04180	-0,00641	-0,15639	-0,10640
	ΔY	0	0	0,08	0,10
C 480 çap 2.çevrim	15 En büyük	1,584	1,67851	1,59851	1,5785
	Ortalama	0,413	0,49990	0,4199	0,3999
	En küçük	-0,056	0,0535	-0,0265	-0,0465
	ΔY		0	0,08	0,05
C 480 çap 3.çevrim	15 En büyük		1,70048	1,54048	1,55048
	Ortalama		0,55282	0,39282	0,40282
	En küçük		0,00312	-0,15688	-0,14688
	ΔY		0	0,08	0,05
C 480 çap 4.çevrim	15 En büyük		1,70397	1,48259	1,52259
	Ortalama		0,60168	0,36212	0,40211
	En küçük		0,08640	-0,15359	-0,11360
	ΔY	0	0	0,04	0,05
C 590 çap 2.çevrim	15 En büyük	1,45354	1,55175	1,51175	1,50175
	Ortalama	0,44449	0,51114	0,47119	0,46118
	En küçük	0,06539	0,08114	0,04114	0,03114
	ΔY		0	0,04	0,05
C 590 çap 3.çevrim	15 En büyük		1,38546	1,30547	1,28547
	Ortalama		0,35340	0,27393	0,25405
	En küçük		-0,04565	-0,12564	-0,14564
	ΔY		0	0,05	0,05
C 590 çap 4.çevrim	15 En büyük		1,39293	1,26295	1,24295
	Ortalama		0,38957	0,25978	0,23984
	En küçük		-0,00885	-0,13884	-0,15883

*Birimler mm'dir

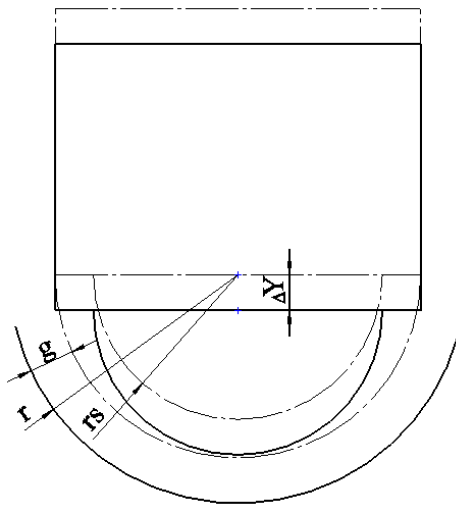
$$\Delta Y = r - g - rs \quad (3)$$

Deneylemlerden elde edilen veriler bu algoritmaya uygun olarak hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 8'de verilmiştir. Ancak

önerilen ve deneylemlerde bulunan değerler 0,01~0,05 mm hata ile uyumaktadır. Dolayısıyla, dikdörtgen ceplerin küresel elektrotlarla elektrot döndürülmeden de işlenebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 20. Bilgisayar destekli EDM imalat yazılımının algoritması (Algorithm of computer aided EDM production program)



Şekil 21. Eş merkezli oluşan elektrot aşınması (Concentric electrode wear)

4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Günümüzde araştırmacılar, dalma tip elektro erozyonla iş parçalarının işlenmesi için parçanın negatifi olan takım elektrot yerine, 3B takım elektrotlar yapmadan, genel amaçlı silindirik ve yarı küresel uçlu elektrotların EEİ de kullanılabilirliği araştırılmaktadır. Küresel elektrotların kullanılabilmesi için takım elektrotta oluşan aşınmalar simetrik ve kabul edilebilir düzeyde olmalıdır. Bu çalışmada EEİ ile dikdörtgen cep boşaltmada (kaba işlemede) küresel uçlu elektrotların kullanılabilirliği araştırılırken, elektrotların diğer çalışmalarda olduğu gibi döndürülmesine gerçekten gerek var mı? sorusuna cevap aranmıştır. Geliştirilen iki alternatif takım yolu ile iki farklı çapta, iki farklı işleme parametresi kullanılarak, elektrotlar döndürülmeden CNC EEİ tezgâhında çeşitli deneyler yapılmıştır. Takım elektrotlar ve iş parçaları 3B optik tarama cihazı ile ölçülüp, elde edilen veriler poligon modele dönüştürülmüş ve RapidForm yazılımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Aşağıda sunulan bulgulara dayanarak,

küresel uçlu elektrotların döndürülmeden de kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır. $\pm 15 \mu\text{m}$ doğrulukla ölçüm yapabilen ölçme yöntemi kullanılarak, takım elektrot yarıçapları $\sim 7 \mu\text{m}$, küre merkez koordinatları ise $\sim 12 \mu\text{m}$ hassasiyetle ölçülebilmektedir. Takım elektrotların küresel kısımları CNC torna tezgâhında $5,03 \pm 0,008 \text{ mm}$ ve $7,54 \pm 0,010 \text{ mm}$ şekil toleranslarında üretilmiştir. Aynı parametrelerle işlenen elektrotlar için tekrarlı deneyler sonunda EEİ deneylerinin; takım elektrotlar açısından $0,01 \text{ mm}$, iş parçaları açısından da $0,17 \text{ mm}$ hassasiyetle tekrarlanabilir olduğu sonucuna ulaşıldı.

Takım elektrotlarla, iş parçası üzerinde, kendi hacminin 38 katı kadar bir boşluk üretilmesi halinde bile, küresellik hatası en fazla $0,06 \text{ mm}$ olmaktadır. Dikdörtgen ceplerin üretilmesi için bir takım yolu önerilmiş ve yapılan deneylerle uygulanabilir olduğu görülmüştür. Ayrıca dikdörtgen ceplerin boşaltılması için kullanılacak bir CNC EEİ CAM programı için, temel bir algoritma önerilmiştir. Takım elektrot yarıçapı ve takım kompanzasyonu değişimlerinin bulunabildiği bu algoritmanın doğruluğu, deneylerden elde edilen verilerin simülasyonu ile karşılaştırılarak kanıtlanmıştır. Bundan sonraki çalışmalara ışık tutması için, kaba işlemede rasgele eğrilerden oluşan cep boşaltmada, küre yarıçapının ve takım elektrot kompanzasyonunun doğru denklemleri ile temsil edilebileceği konusunda öneriler yapılmıştır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- Gülcan O., Uslan İ., Usta Y., Çoğun C., Effect of use of Cu-Cr P/M electrodes on machining performance of electric discharge machining, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (3), 381-394, 2015.
- Marafona J., Chousal J.A.G., A finite element model of EDM based on the Joule effect, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46, 595-602, 2006.
- Ekmekci B., Tekkaya A.E., Erden A., A semi-empirical approach for residual stresses in electric discharge machining (EDM), International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46, 858-868, 2006.
- Kalpakistan S., Manufacturing Engineering and Technology, Mass, Addison-Wesley, 1995.
- Mizugaki Y., Contouring electrical discharge machining with on measuring and dressing of a cylindrical graphite electrode, Journal of Precision Engineering, 20, 1514-1517, 1996.
- Bleys P., Kruth J.P., Lauwers B., Sensing and compensation of tool wear in milling EDM, Journal of Materials Processing Technology, 149, 139-146, 2004.
- Bayramoğlu M., Duffill A.W., CNC EDM of linear and circular contours using plate tools, Journal of Materials Processing Technology, 148, 196-203, 2004.
- Chang Y.F., Hong R.C., Parametric curve machining of a CNC milling EDM, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 45 (7-8), 941-948, 2005.
- Erdem O., Çoğun C., Urtekin L., Özerkan H.B., Uslan İ., The effect of powder mixed and heated dielectric on drilling performance of electric discharge machining (EDM), Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (3), 531-544, 2016.
- Park S. C., Chung Y.C., Tool-path generation from measured data, Computer-Aided Design, 35, 467-475, 2003.
- Göv K., Investigation of the effects of the dissolved oxygen in the coolant on the hole geometries drilled by electro erosion, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 31 (2), 231-239, 2016.
- Chen Y., Mahdavian S.M., Parametric study into erosion wear in a computer numerical controlled electro discharge machining process, Wear, 236, 350-354, 1999.
- Rebeloa J.C., Dias A.M., Mesquitab R., Vassaloc P., Santosc M., An experimental study on electro-discharge machining and polishing of high strength copper \pm beryllium alloys, Journal of Materials Processing Technology, 103, 389-397, 2000.
- Zhao W.S., Meng Q.G., Wang Z.L., The application of research on powder mixed EDM in pough machining, Journal of Materials Processing Technology, 129, 30-33, 2002.
- Valentin J., Junkar M., On-line selection of rough machining parameters, Journal of Materials Processing Technology, 149, 256-262, 2004.
- Ding S., Jiang R., Tool path generation for 4-axis contour EDM rough machining, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44, 1493-1502, 2004.
- Kaneko T., Tsuchiya M., Fukushima T., Improvement of 3D NC Contouring EDM Using Cylindrical Electrodes, 9th International Symposium for Electromachining (ISEM IX), Nagoya, Japan, 49-52, 1989.
- Mavi Ö., Halkacı H.S., Küresel parçalar için form ölçme metodları, TMMOB Makina Mühendisleri Odası V. Ulusal Ölçüm bilim Kongresi, 09-10 Ekim 2003a, Eskişehir-Türkiye.
- Mavi Ö., Halkacı H.S., Küresel parçalarda hata analizi, TMMOB Makina Mühendisleri Odası V. Ulusal Ölçüm Bilim Kongresi, 09-10 Ekim 2003b, Eskişehir-Türkiye.
- Lee J., et.al. Modern Manufacturing, Mechanical Engineering Handbook, CRC pres. LLC, 1999.
- Kahles J., Electrical discharge machining (EDM). Metals and book, 8th edition, vol. 3 (Machining), page 227-233 American society for metals (ASM), 1967.
- Marshall S., Griffiths J.G., A new cutter-path topology for milling machines, Computer-Aided Design, 10 (3), 196-174, 1994.
- Dragomatz D., Numerical control tool path generation using space-filling curves and pixel modes, Master Thesis, University of Waterloo, Canada, 1995.
- Mehl A., Gloger W., Kunzelmann K.H. and Hickel R., A new optical 3D device for the detection of wear, Journal of Dent Res., 76, 1799-1807, 1997.
- Yap A., Chew C. and Teoh S., Environmental damage and occlusal contact area wear of composite restoratives, Journal of Oral Rehabilitation, 29, 87-97, 2002.