

# ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE İŞLEME MEKANİZMASININ ISIL MODELLENMESİ

**Yasin SARIKAVAK ve Can ÇOĞUN\***

Ankara Demiryolu Fabrikası, T.C. Devlet Demiryolları, 06105, Behiçbey, Ankara

\*Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06570, Maltepe, Ankara  
[sarikavak@gmail.com](mailto:sarikavak@gmail.com), [cogun@gazi.edu.tr](mailto:cogun@gazi.edu.tr)

(Geliş/Received: 14.07.2009 ; Kabul/Accepted: 09.10.2009)

## ÖZET

Bu çalışmada, elektro erozyon ile işlemede işparçası malzemesinin aşınmasının sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmesi yapılmıştır. Isıl-elektriksel model, tek bir boşalım için geliştirilmiştir. Geliştirilen model dielektrik sıvı içerisinde elektriksel boşalım sonucu oluşan enerjii, plazma kanalı genişliğini ve ortamda meydana gelen ısı transferlerini içermektedir. Literatürde yer alan deneysel çalışma parametreleri kullanılarak, plazma kanalında oluşan enerjinin işparçası malzemesinde oluşturduğu sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Ergime sıcaklığının üstüne çıkan işparçası malzemesinin ergime kraterinden kaldırıldığı kabul edilmiştir. Çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan ANSYS Workbench v.11 programı kullanılmıştır. Elektro erozyon ile işleme tekniği zamana bağlı ısı analiz yöntemi kullanılarak simüle edilmiştir. Farklı işleme parametrelerinde elde edilen teorik sonuçların deneysel sonuçlarla büyük ölçüde örtüştüğü görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Elektro erozyon ile işleme (EEİ), ısı model, sonlu elemanlar analizi, işparçası işleme hızı (İİH)

## THERMAL MODELLING OF MACHINING MECHANISM IN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING

### ABSTRACT

In this study, theoretical model of workpiece material removal in electrical discharge machining (EDM) was developed. Thermo-electrical model was developed for a single discharge. Developed model includes several aspects like, generated energy formed by the electrical discharge in liquid media, plasma channel radius variation and heat transfer from the channel. By using different experimental study parameters used in literature, effect of generated energy in plasma channel on workpiece was investigated. The developed model evaluates the temperature distribution in the workpiece material using finite element solver ANSYS Workbench (v.11) software. It's assumed that the workpiece material reaches the melting point of workpiece material was removed from the surface. Electrical discharge process was simulated by using transient thermal analysis. Finally, the developed model has been validated by comparing the theoretical material removal results with the experimental ones.

**Keywords:** Electrical discharge machining (EDM), thermal model, finite element analysis (FEA), material removal rate (MRR)

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) üretimde karmaşık şekilli kalıp, takım ve parça imalatında kullanılan bir alışılmamış imalat yöntemidir. EEİ, dielektrik sıvı içerisinde elektrot ile iş parçası arasında oluşan elektriksel boşalımın iş parçası yüzeyinden çok küçük

bir hacmi aşındırması esasına dayanır [1]. EEİ'de işleme mekanizması çoğunlukla ısı modellemlerle modellenmiş olup çoğu çalışma tek bir kıvılcımın incelenmesi üzerine odaklanmıştır. Burada işlemenin ısı modellemesi üzerine yapılan çalışmalardan bazıları sunulmuştur. DiBitonto vd.'nin [2] çalışmasında işparçasındaki işleme tek bir boşalım

için modellenmiş olup, geliştirilen noktasal ısı kaynağı modeli, daha önceden yapılan çalışmalarda yer alan iletim modellerinden farklı olarak, plazma ve işparçası arayüzünde sınır koşulu olarak sıcaklık yerine gücü kabul etmektedir. Çalışmada 2.34-68A akım, 5.6-560µs vuruş süresi, 1-10µs vuruş bekleme süresi aralıklarında deneyler yapılmıştır. Oluşturulan modele göre geniş bir akım aralığında uygulanan gücün sabit bir miktarı işparçasına ulaşmaktadır. Noktasal ısı kaynağı modeli kullanılarak elde edilen teorik sonuçlar deneysel sonuçlar ile uyumlu çıkmıştır. Patel vd. [3] yaptıkları çalışmada, EEİ yönteminde anot malzemesinde meydana gelen erozyonu modellemiştir. Bu çalışmada da noktasal ısı kaynağı modeli kullanılmıştır. Plazma ve anot ara yüzeyinde sınır koşulu olarak sıcaklık yerine yine plazma gücü kullanılmıştır. Uygulanan güç sonucu anot malzemesinin yüzeyinde Gauss ısı akısı dağılımı olduğu kabul edilmiştir. Eubank vd. [4] çalışmalarında EEİ'de değişken kütle ve silindirik plazmayı modellemiştir. Modelin sayısal çözümü plazma yarıçapını, sıcaklığını, basınç ve kütlesini, vuruş süresinin sabit akım, elektrotlar arası mesafe ve plazmada kalan gücün miktarına bağlı bir fonksiyon olarak ortaya koymaktadır. Plazmadaki sıcaklık diğer deneysel parametrelere ve oluşan kırılmaya (iyonizasyona) bağlı olarak 0-10kbar basınçta 2000°K - 60000°K değerleri arasında olabilmektedir. Marafona ve Chousal'ın [5] ABAQUS/Standard adlı sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan programı kullanarak oluşturdukları modelde plazma yarıçapı, vuruş süresi ve akıma bağlı bir fonksiyonla ifade edilmiştir. DiBitonto ve arkadaşlarının [2-4] çalışmalarında yer alan deneysel sonuçlar, oluşturulan modelden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Oluşturulan modelde iletim ile ısı transferi ve plazma kanalında oluşan ısı kaynağı dikkate alınmış, ancak sıvı ortamda konveksiyon (taşınım) ile ısı transferi ihmal edilmiştir. Kansal vd. [6] ANSYS Multiphysics yazılımı kullanarak toz karışımı dielektrik sıvı için EEİ'nin iki boyutlu eksenel simetrik modelini oluşturmuştur. Geliştirilen model öncelikle işparçası üzerindeki sıcaklık dağılımını hesaplamaktadır. Sonrasında sıcaklık dağılımına bağlı olarak işparçası işleme hızı hesaplanmış ve bu değerler deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Dielektrik sıvıya toz katılmış EEİ işleminde kıvılcım yarıçapı normal EEİ yönteminde bulunan değerden %30 - %50 fazla hesaplanmıştır. Elde edilen teorik sonuçlar deneysel sonuçlar ile uyumlu çıkmıştır. Shuvra Das vd. [7] tek bir kıvılcım süresince uygulanan güç parametresini kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapmıştır. Çalışmada DEFORM yazılımı kullanılarak zamana bağlı ısı analiz yapılmış ve sıcaklık dağılımı, kaldırılan işparçası malzeme miktarı ve gerilme dağılımı gibi değerlere ulaşılmıştır. Sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmış ve yakın sonuçlar elde edilmiştir. Yadav vd. [8] EEİ'de işparçası yüzeyinde oluşan ısı gerilmeleri incelemiştir. Çalışmada

sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı işleme koşullarında çelik işparçası için sıcaklık ve ısı gerilme dağılımları hesaplanmıştır. Bu çalışmalarda boşalım kanalında, sadece akım ve gerilim değerlerinin çarpımı sonucu elde edilen güç değerleri kullanılarak analiz yapılmıştır. Analiz sonuçlarının doğrulamasında sınırlı sayıda deneysel veri ve çok dar çalışma aralıkları seçilmiştir. Bu çalışmalar sıcaklık dağılımından sonra oluşan ısı gerilmeler üzerine odaklanmıştır. Van Dijk ve Snoeys [9] çalışmalarında kaldırılan işparçası malzeme miktarını ve sıcaklık dağılımını incelemiştir. Elektrot yüzeyinde zamana bağlı olarak değişen ısı kaynağı ve ısı iletimi içeren bir model oluşturulmuştur. Türetilen ısı iletim modelinin gerçeğe yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Salah vd.'nin [10] çalışmalarında EEİ'de meydana gelen fiziksel olayların matematiksel modellenmesi yapılmıştır. Burada işparçasına plazmadan iletilen ısı girdisi, işparçasında meydana gelen iletim ile ısı transferi ve sınır koşulları modellenmiştir. Daha sonra eşitliklerin çözümü için kullanılan sayısal metotlar verilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçlar birbiri ile uyumlu çıkmıştır. Kumar [11] EEİ'de işparçası yüzeyinde meydana gelen deformasyona ve mikro çatlaklara neden olan ısı gerilmeleri incelemiştir. Isı transferinin sadece iletim yolu ile olduğu varsayılmıştır. Taşınım ve ışınım ile ısı transferleri ihmal edilmiş ve analiz tek bir kıvılcım için yapılmıştır. Vuruş süresince plazma yarıçapı sabit kabul edilmiştir. Çalışmada, plazma kanalında oluşan toplam enerjinin %17-%20'sinin işparçasına ulaştığı varsayılmıştır. Çalışma sonucunda 4 farklı işleme parametresi altında plazma yarıçapı, krater yarıçapı, işparçası yüzeyinde meydana gelen sıcaklık dağılımı ve eksenel gerilmeler incelenmiştir. Singh ve Ghosh [12]'un çalışmasında kısa süreli vuruşlarda (<100µs) işleme mekanizmasında oluşan elektrostatik kuvvetlerin işlemede oldukça önemli bir faktör olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada metal yüzeyine etkileyen elektrostatik kuvvetler ve bu kuvvetlere bağlı olarak oluşan gerilim dağılımı incelenmiştir. Allen ve Chen [13] EEİ'de, her bir kıvılcım için işparçasında meydana gelen işlemeyi sonlu elemanlar yöntemi kullanarak iki boyutlu olarak modellemiştir. Molibden işparçası üzerinde meydana gelen sıcaklık dağılımı incelenmiş ve molibdenin ergime noktası olan 2896°K'in üzerindeki bölgelerin ergidiği ve yüzeyden kaldırıldığı kabul edilmiştir. Yapılan analizde soğuma işlemi sonrasında meydana gelen ısı gerilmeler incelenmiştir. Isıl sayısal modelden elde edilen sonuçların deneysel sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür.

Literatürde yer alan kaynaklarda plazma kanalında oluşan enerjinin temsili için sabit bir sıcaklık değerinin etkimesi kabul edilebilir bir yöntem olarak ifade edilmiştir. Ancak plazma sıcaklığı hakkında kesin bir ifade literatürdeki çalışmalarda yer almamaktadır. Bu çalışmada üç farklı araştırmacının yaptığı 30 adet deneysel veri kullanılarak, plazma

kanalında hem 4 farklı sıcaklık girdisi hem de ısı gücü tanımlanarak analizler yapılmıştır. Plazma kanalında tanımlanan farklı değerlerin deneysel sonuçlarla farklı irdelenebilmiştir. İşleme parametreleri olan vuruş süresi, vuruş bekleme süresi, boşalım akımı ve gerilim değerlerinin işleme performansına etkileri geniş çalışma aralıklarında incelenebilmiştir. Modelin deneysel sonuçlarla paralellik gösterdiği gözlenmiştir. Bu nedenle bu çalışmada oluşturulan model değişik malzemeler için, farklı işleme koşullarında, önceden işleme performansı çıktılarının (İİH,  $R_m$  gibi) hesaplanmasında kullanılabilir niteliktedir.

## 2. EE'DE KIVILCIM OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ (MODELLING OF SPARK FORMATION IN EDM)

### 2.1. Teori (Theory)

İşleme sırasında elektrotlar arasındaki 10-40µm aralığa uygulanan yüksek gerilim dielektrik sıvıda bozulmaya (kırılma, iyonizasyon) neden olmaktadır. Uygulanan gerilimin düşmesi ve akımın belirli değere yükselmesiyle dielektrik sıvı içerisinde plazma kanalı oluşur. Vuruş süresince plazma kanalı gaz kabarcıklarıyla çevrelenir. Ortamdaki yoğun dielektrik sıvı plazmanın büyümesini sınırlamaktadır. Enerji çok küçük bir hacme yoğunlaşarak uygulanmaktadır. Vuruş süresi boyunca plazmada oluşan yüksek enerji ve basınç, ısı iletim yoluyla elektrotlarda ergimeye ve buharlaşmaya sebep olmaktadır. Gerilimin uygulanmasını takiben, hızla hareket eden elektronların emilimiyle ilk olarak anot malzemesi erir. Ancak, birkaç mikro saniye sonra tekrar katılma başlar. Takımdan kopan elektronlar, işparçasından kopan iyonlara göre çok daha küçük kütleli olduklarından elektrik alanı içerisinde çok daha yüksek hız kazanır (çok daha yüksek momentum) ve karşı yüzeyde daha etkili olur. Bunun sonucunda işparçasında meydana gelen malzeme kaybı (işleme) daha büyük olur.

### 2.2. Matematiksel Modelleme (Mathematical Modelling)

#### 2.2.1. Kabuller (Assumptions)

Bu çalışmada oluşturulan modeli basitleştirmek ve çözülebilir hale getirebilmek amacıyla bazı kabuller yapılmıştır. Bunlar; i) Model tek bir kıvılcım için geliştirilmiştir, ii) İşparçası malzemesi homojen ve izotropiktir, iii) İşparçasındaki ısı transferi iletim yoluyla olmaktadır, iv) Kıvılcım elektrot yüzeyinde düzenli dairesel bir ısı kaynağı oluşturur, v) Plazma kanalı düzgün silindirik bir şekle sahiptir, vi) EE işleme işparçası eksenlerinde simetrik, vii) İşleme vb. ısı kayıpları ihmal edilmiştir, viii) Isı kaynağındaki ısı dağılımı Gauss tipindedir.

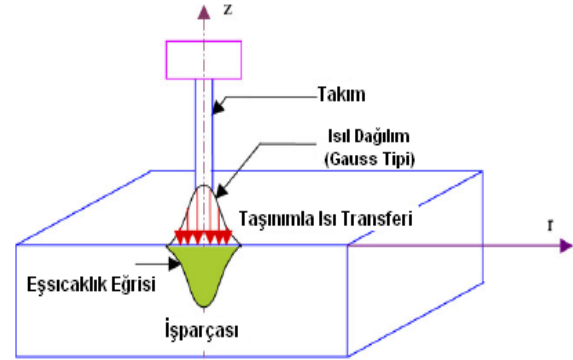
#### 2.2.2. Isıl model (Thermal model)

İşparçası ve takım elektrot arayüzünde plazma kanalı oluşmaktadır. Plazma kanalında elektriksel akıma bağlı olarak oluşan yüksek sıcaklık işparçasından vuruş süresi boyunca talaş kalkmasını (işleme) sağlamaktadır. Vuruş süresi, plazma gücü ve plazma kanalı genişliği kıvılcımın oluşturduğu krater büyüklüğünde birincil etkiye sahiptir [14]. Literatürde yer alan ilk çalışmalarda ısı kaynağı noktasal bir modelle ifade edilmiştir [2, 3, 4, 15]. İşparçası yüzeyinde noktasal ısı kaynağı yerine, akım ve vuruş süresine bağlı olarak genişliği değişen plazma kanalı boyunca bir ısı kaynağının etkimesi daha gerçekçi sonuçlar vermiştir. Bu çalışmada kullanılan modelde de işparçasına etkiyen ısı kaynağı genişleyen plazma kanalı boyunca tanımlanmıştır.

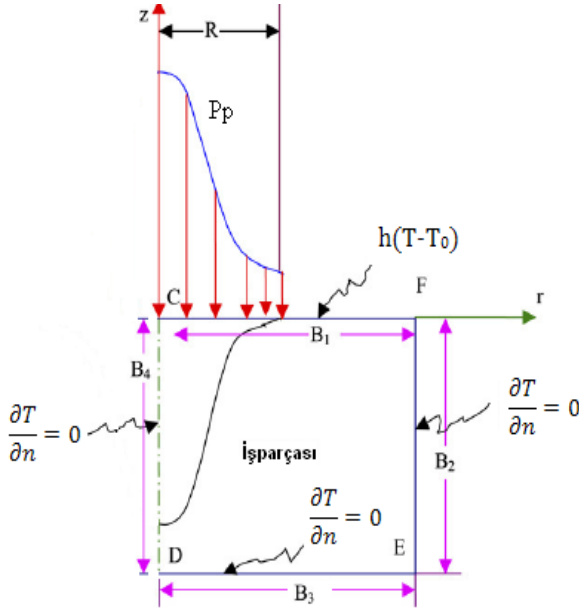
Eksenel simetrik katı yüzeydeki iletim ile ısı transferi denklemi şöyledir:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \kappa r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (1)$$

Burada  $\rho$  yoğunluk,  $C_p$  özgül ısı,  $K$  işparçasının ısı iletilenlik katsayısı,  $T$  sıcaklık,  $t$  zaman,  $r$  ve  $z$  koordinat eksenleridir (Şekil 1).



Şekil 1. İşparçasında ısı dağılımının şematik gösterimi [6, 8] (Schematic sketch of thermal distribution in workpiece)



**Şekil 2.** EEİ'de tek kıvılcım için ısı transfer modeli [6, 8] (Heat transfer model for one spark in EDM)

Model z ekseninde simetrik. Plazma kanalının dışında kalan yüzeylerde ortamdaki dielektrik sıvı nedeniyle taşınım ile ısı transferi meydana gelir (Şekil 2). Şekilden de görüldüğü üzere sınır koşulları:

$R'$  ye kadar;

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = P_p \quad \text{veya} \quad \kappa \frac{\partial T}{\partial z} = T_p \quad (2)$$

$R'$  nin dışında kalan bölümde;

$$\kappa \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_0) \quad (3)$$

$B_2$ ,  $B_3$  ve  $B_4$  sınırları için ise;

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (4)$$

Burada,  $h$  işparçası ve dielektrik sıvı arasındaki ısı transfer katsayısını,  $T_0$  oda sıcaklığına eşit olan ilk sıcaklık değerini,  $T$  sıcaklık değerini,  $n$  sınır koşulunun belirtildiği yüzeyin normalini,  $P_p$  plazma gücünü,  $T_p$  ise plazma sıcaklığını belirtmektedir [6, 16].

### 2.2.3. Enerji oluşumu ve plazma sıcaklığı (Energy formation and plasma temperature)

EEİ'de ortam sıcaklığında bulunan elektrotlar, birkaç mikrosaniyede oluşan plazmanın etkisiyle bölgesel olarak ergime ve buharlaşma sıcaklıklarına erişir. Her bir vurumdaki (kıvılcımdaki) plazma gücü ( $P_p$ ), uygulanan boşalım akımı ( $I_d$ ) ve gerilim değerinin ( $V$ ) çarpımı ile elde edilir [7, 9, 17, 18]. Plazmada oluşan enerjinin bir kısmı dielektrik sıvı içerisinde kaybolmakta, bir kısmı anot bir kısmı da katot

tarafından iletilmektedir. Enerjinin dağılımının hesaplandığı çalışmalar bulunmaktadır [2, 3].

Boşalım gücü ve vurum süresi değerlerinin yüksek olması işleme performansını artırmakta ve aktif olmayan kıvılcım sayısını azaltmaktadır[19]. İşleme mekanizmasında, dielektrik sıvı içerisinde bulunan, işparçası ve takım elektrot arasında oluşan plazma kanalında elektrik enerjisi ısı enerjisiye (ısı kaynağı) dönüşmektedir. Bu ısı kaynağı sonucu, işparçası yüzeyine vurum süresi boyunca sabit bir sıcaklık değerinin uygulanması, krater şekillerinin hesaplanmasında kabul edilen bir yaklaşımdır [20]. Literatürde yer alan çalışmalarda, işleme esnasında plazma kanalının merkezinde oluşan maksimum sıcaklık değerinin, malzemenin kaynama sıcaklığının üzerinde bir değere eriştiği görülmektedir [7, 9, 11, 20]. Çelik ve benzeri malzemelerde bu değer  $3000^\circ\text{C}$ 'nin üzerindedir. Plazmada oluşan  $3\text{J}/\text{mm}^3$  enerji yoğunluğunda sıcaklık değeri  $40000^\circ\text{K}$ 'i aşmaktadır [2]. Kansal vd.'nin çalışmalarında [6], plazma kanalının merkezinde oluşan sıcaklık değerinin, diğer işleme parametrelerine ve plazmada oluşan toplam gücün işparçasına erişim oranlarına bağlı olarak  $3000^\circ\text{K}$ – $6000^\circ\text{K}$  arasında değiştiği görülmektedir. Diğer bir çalışmada ise, plazma sıcaklığının  $8000$  ila  $12000^\circ\text{C}$  arasında veya  $20000^\circ\text{C}$ 'den daha yüksek bir sıcaklığa eriştiği belirtilmiştir [21, 22].

Bu çalışmada oluşturulan modelde plazma sıcaklığı  $3000^\circ\text{C}$ ,  $5000^\circ\text{C}$ ,  $8000^\circ\text{C}$  ve  $10000^\circ\text{C}$  olarak kullanılmıştır. Bunların yanı sıra akım ve gerilim değerlerinin çarpımından elde edilen plazma gücü değeri geliştirilen modele girilerek işparçasında meydana gelen sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılımı değerleri kullanarak, işparçasından her bir vurumda kaldırılan malzeme miktarı hesaplanmış ve bu değerler deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

### 2.2.4. Boşalım kanalı (plazma) yarıçapı (Plasma radius)

Araştırmacılar plazma yarıçapının hesaplanması amacıyla deneysel verilere dayanarak çeşitli bağıntılar üretmişlerdir. Ikai ve Hashiguchi [23] EEİ'de oluşan plazma yarıçapının, değişen akım yoğunluğu ( $I_d$ ) ve vurum süresi ( $t_d$ ) ile orantılı olduğunu ifade etmiş ve

$$R = 2,04 \times 10^{-3} I_d^{0,43} t_d^{0,44} \quad (5)$$

eşitliğini kullanmıştır. Bu çalışmada da, geliştirilen modelde kullanılan plazma yarıçapı yukarıdaki eşitlikten hesaplanmıştır.

### 3. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

Literatürdeki üç farklı deneysel çalışmada farklı işleme parametreleri için elde edilmiş sonuçlar, bu çalışmada geliştirilen modelden elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Özgedik ve Çoğun [1] deneysel çalışmalarında işparçası malzemesi olarak SAE 1040 çeliği, takım elektrot olarak silindirik elektrolitik bakır kullanılmıştır. Bu çalışmada kullanılan deneysel parametreler Çizelge 1’de, kullanılan çelik işparçasının fiziksel özellikleri Çizelge 2’de verilmiştir. [2] numaralı referansta, işparçası olarak çelik ve dielektrik sıvı olarak gazyağı kullanılmıştır.

**Çizelge 1.** Deney parametreleri [1] (Experimental parameters)

Deney Parametreleri	Değerler
Boşalım Akımı ( $I_d$ ) [ A ]	3, 6, 12, 25
Vurum Süresi ( $t_d$ ) [ $\mu$ s ]	12, 25, 50, 100
Kutuplama	Elektrot (+), İşparçası (-)
Bekleme Süresi ( $\delta$ ) [ $\mu$ s ]	50
Dielektrik Sıvı	Gazyağı
İşparçası Malzemesi	Çelik (SAE 1040)
Elektrot Malzemesi	Elektrolitik Bakır
İşleme Derinliği [ mm ]	6,5

**Çizelge 2.** Çelik malzeme için fiziksel özellikler (Physical properties for steel material)

Parametreler	Değer
Ergime Sıcaklığı ( $T_m$ ) [°C]	1535
Isıl İletkenlik ( $\kappa$ ) [W/mK]	56,1
Özgül Isı ( $C_p$ ) [J/kgK]	575
Yoğunluk ( $\rho$ ) [kg/m <sup>3</sup> ]	7545

[6] numaralı referansta işparçası olarak AISI D2 kalıp çeliği (Çizelge 3), dielektrik sıvı olarak gazyağı kullanılmıştır.

**Çizelge 3.** AISI D2 kalıp çeliğinin ısıl özellikleri (Thermal properties of AISI D2 mold steel)

Parametreler		Değer	
Ergime Sıcaklığı ( $T_m$ ) [°C]		1710	
Yoğunluk ( $\rho$ ) [kg / m <sup>3</sup> ]		7700	
Isıl Özellikler			
Sıcaklık (K)	Isıl İletkenlik ( $\kappa$ ) (W/m°C)	Isıl Genleşme Katsayısı (°C)	Özgül Isı ( $C_p$ ) (J/kgK)
298	29,0	$5,71 \times 10^{-6}$	412,21
673	29,5	$6,90 \times 10^{-6}$	418,36
1100	30,7	$10,20 \times 10^{-6}$	421,83
1990	32,3	$12,00 \times 10^{-6}$	431,00

Bu çalışmada çelik malzeme ve dielektrik gazyağı arasında taşınım ile meydana gelen ısı transfer katsayısı  $10000 \text{ W/(m}^2\text{K)}$  olarak alınmıştır [8]. Plazma kanalı buharlaşmış sıvıdan oluşmaktadır. Isıl iletkenliği  $\kappa=0,06 \text{ W/(mmK)}$ , yoğunluğu  $\rho =1,5 \times 10^{-36} \text{ kg/mm}^3$  ve özgül ısısı  $C_p=15000 \text{ J/(kgK)}$ ’dir [5].

### 4. BİLGİSAYAR ORTAMINDA MODELLEME VE ANALİZ (MODELLING AND ANALYSIS WITH COMPUTER)

#### 4.1. Modelleme (Modelling)

ANSYS fiziksel problemlerin çözümünde kullanılan, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan bir paket programdır. Programın “Design Modeler (Geometry)” modülünde modelin öncelikle 2-B şekli çizilir. Ölçülendirme ve ölçü sınırlamalarını takiben model 3-B hale getirilir. Bu çalışmada 3-B modelleme kullanımındaki temel sebepler şunlardır:

- Kompozit, elektrik iletken işparçalarının kullanımının gündeme gelmiş olması (3-B yapısal değişime sahip malzemeler).
- Oldukça küçük boyutlu ve silindirik olmayan işparçalarının elektro erozyon ile işleniyor olması.

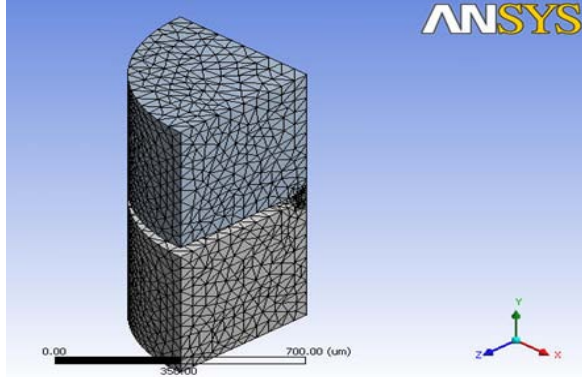
Her ne kadar bu çalışmada homojen çelik ve silindirik derin işparçaları kullanımı 2-B modellemeyi de mümkün kılmakla beraber, yukarıda bahsedilen malzemelerin çözümlerinin doğru yapılabilmesi ve ilerde bu konuda çalışacak araştırmacılara yol göstermek amacıyla 3-B modelleme kullanılmıştır. Oluşturulan model üç parçadan oluşmaktadır: İşparçası, takım ve plazma kanalı. Model ANSYS’in “Design Modeler” modülünde çizilebileceği gibi diğer, tasarım programları ile çizilip ANSYS’e aktarılabilir.

#### 4.2. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi ve Modeli Elemanlara Bölme (Entering Material Properties and FEA Model with the Mesh Detail)

Model oluşturulduktan sonra simulasyon modülüne geçilir. Simulasyon sekmesine tıklandıktan sonra açılan ekranda ne tip bir analiz yapılacağı belirlenir. Bu çalışmada yapılan, zamana bağlı ısıl (transient thermal) analizdir. Simülasyon modülüne aktarılan malzemeler tek tek seçilip (işparçası, elektrot ve plazma kanalı), ısıl malzeme özellikleri girilir. Programın malzeme kütüphanesinden çeşitli malzemeler doğrudan seçilip tanımlanabilir. Ancak, yazılımın malzeme kütüphanesi çok zengin değildir. Bu nedenle, önceki bölümlerde belirtilen malzeme özellikleri programa girilmiştir. Değerler sıcaklığa bağlı tablolar halinde de programa girilebilmektedir.

Çalışmada sonlu elemanlar hesabı için malzemeler tetrahedron (dört üçgen yüzlü geometrik şekil) şekilli elemanlara bölünmüştür (Şekil 3). Elemanlar üçgen şeklinde parçalara bölündüğünde, bölünen eleman sayısı artmakta, diğer seçenekler olan dörtgen veya

altıgen elemanlara bölünmesine göre daha hassas sonuçlar vermektedir. Bu nedenle “tetrahedron” eleman tercih edilmiştir. Her bir ağ boyutu olarak 0.05mm girilmiştir. Plazma kanalının bulunduğu dokunma noktalarında daha hassas çözüm elde edebilmek amacıyla her bir eleman boyutu 0.009mm olarak programa girilmiştir. 3-B model 16960 düğüm noktası (node) ve 9870 elemandan oluşmaktadır.



Şekil 3. Dört yüzlü (tetrahedron) ağlara bölünmüş 3-B model (Three dimensional view of the tetrahedron meshed model)

#### 4.3 Sınır Koşullarının Girilmesi ve Analiz (Analysis and Entering Boundary Conditions)

Elemanlara bölme işleminden sonra analiz için gerekli olan sınır koşulları girilmiştir. Modelleme ve analiz, zamana bağlı ısıl analiz (transient thermal) yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Boşalım süresinin başlangıç anından vurum bekleme süresinin başlangıcına kadar sabit bir sıcaklık değeri veya sabit bir plazma gücü değeri ( $P=IV$ , Watt) plazma kanalı boyunca tanımlanmıştır. Ancak bu süre zarfında plazma kanalının dış yüzeyi ve dielektrik sıvı ile temas eden işparçası yüzeylerinde taşınım ile ısı transferi tanımlanmıştır. İşparçasına erişen enerji ise, işparçasında iletim yolu ile yayılmasını bu süre

boyunca sürdürmektedir. Bunun sonucu olarak işleme süresi sonunda sıcaklık dağılımı gauss tipinde oluşmuştur.

Program tanımlanan eleman biçimi, başlangıç koşulları, sınır şartları gibi girdilere göre matematiksel modeli oluşturmakta ve çözümü yapmaktadır. Çözüm sonucunda işparçası malzemesinde vurum süresi sonunda oluşan sıcaklık dağılımı değerleri elde edilmektedir.

## 5.SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMESİ (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu bölümde deneylerde elde edilen işparçası işleme hızı (İİH), işparçasında ergiyen krater yarıçapı ( $R_m$ ), işparçası yüzeyinde sıcaklık dağılımı gibi performans çıktıları sonlu elemanlar modelinden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

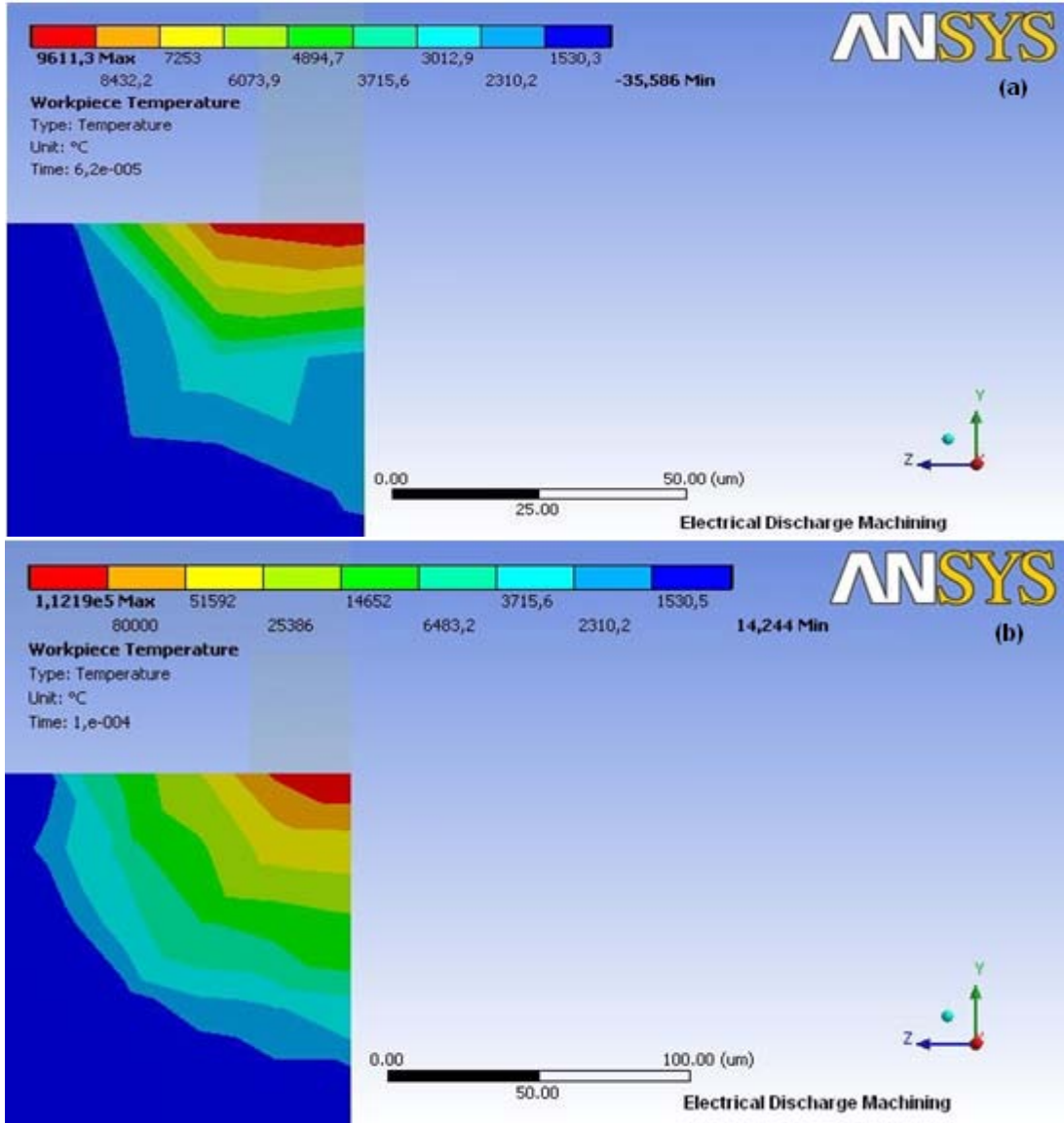
### 5.1. [1] Numaralı Referans Verilerine Göre Analiz Sonuçları (Analysis Results for Reference [1] Data)

Çizelge 4’de [1] nolu referanstaki deneylerden elde edilen verilerle bu çalışmada geliştirilen sonlu elemanlar modeline [1] nolu referansta kullanılan işleme parametrelerinin girilmesi ile hesaplanan çıktılar sunulmuştur. Model çözümünde vurum süresi boyunca plazma kanalı sıcaklığı 3000°C, 5000°C, 8000°C ve 10000°C olarak alınmıştır. Plazma gücü ( $P_p$ ) girilerek hesaplanan İİH değerleri de çizelgede sunulmuştur.

Çeşitli işleme parametrelerinde sonlu elemanlar yöntemi uygulanarak hesaplanan işparçası sıcaklık dağılımları Şekil 4’de görülmektedir. Şekilde açık yeşil renge kadar olan bölüm kaynama noktasına erişmiş bölgeyi, açık mavi renge kadar olan bölüm ise ergiyik halde işparçası malzemesini göstermektedir.

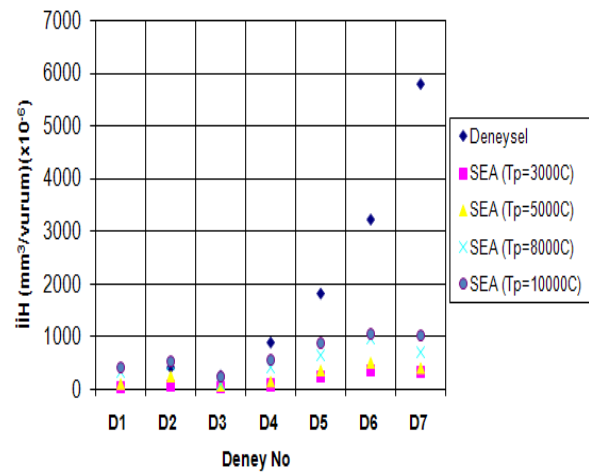
Çizelge 4. Deneysel [1] ve teorik çalışmalar sonucu elde edilen değerler (Experimental [1] and theoretical results)

Deneysel No	$I_d$ (A)	$t_d$ (µs)	$t_{isleme}$ (dak)	$R_p$ [Model] (µm)	$P_p$ [Model] (Watt)	İİH [Deneysel] [1]		İİH [Model] (mm <sup>3</sup> / vurum) (x10 <sup>-6</sup> )				
						(mm <sup>3</sup> / dak)	(mm <sup>3</sup> / vurum) (x10 <sup>-6</sup> )	( $T_p = 3000^\circ C$ )	( $T_p = 5000^\circ C$ )	( $T_p = 8000^\circ C$ )	( $T_p = 10000^\circ C$ )	( $P_p$ (Watt))
1	3	50	457	18,295	180	0,583	58,3	46,5	99,8	338	410	657
2	6	50	465	24,648	330	4,064	406,4	84,9	247	489	535	777
3	12	12	450	17,722	540	4,1	254,2	47,2	62,1	106	251	486
4	12	25	142	24,477	540	11,746	880,9	86	145	426	563	1280
5	12	50	106	33,206	540	18,118	1811,8	255	361	644	890	1770
6	12	100	82	45,048	540	21,477	3221,5	355	511	964	1050	3910
7	25	50	37	45,529	1075	57,989	5798,9	319	409	708	1020	4220

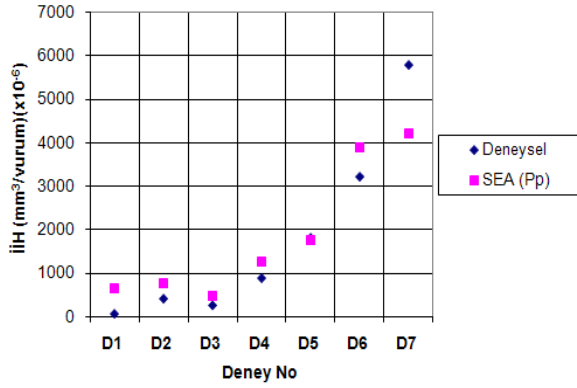


**Şekil 4.** (a) Deney 3, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı, ( $I_d=12A$ ,  $t_d=12\mu s$ ,  $\delta=50\mu s$ ,  $T_p=10000^\circ C$ ), (b) Deney5, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı, ( $I_d=12A$ ,  $t_d=50\mu s$ ,  $\delta=50\mu s$ ,  $P_p=540Watt$ ) (Temperature distribution for a)D3, b)D5)

$T_p=10000^\circ C$  için, ergiyen malzeme hacmi  $251 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{vurum}$  olarak hesaplanmış, deneylerden ise  $254,2 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{vurum}$  olarak bulunmuştur. Şekil 4b'de sonlu elemanlar analizi (SEA) sonucu 540W plazma gücü için maksimum sıcaklık değerinin  $110000^\circ C$ 'ye ulaştığı görülmektedir. Her iki analizde de plazma merkezinden uzaklaştıkça sıcaklık değerleri azalmaktadır. Modelde varsayılan Gauss tipi sıcaklık dağılımının doğruluğu, analiz sonucundan da bellidir. Kırmızı renkten açık yeşil renge kadar olan bölümde işparçası malzemesi kaynama noktasının üzerindedir.  $P_p=540W$  güç girişi (Şekil 4b) için ergiyen işparçası hacmi  $1770 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{vurum}$  olarak hesaplanmıştır. Deneysel verilerde bu değer  $1811,8 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{vurum}$ 'dur.



**Şekil 5.** İİH'nın deneysel [1] ve teorik (plazma sıcaklığına bağlı) değişimi (Experimental [1] and theoretical (under plasma temp.) variation of MRR)



**Şekil 6.** İİH'nin deneysel [1] ve teorik (plazma gücüne bağlı) değişimi (Experimental [1] and theoretical (under plasma power) variation of MRR)

Şekil 5 ve Şekil 6'da [1] nolu referansta sunulan deneysel veriler hesaplanan teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Plazma gücüne bağlı olarak işparçası yüzeyinde ulaşılan maksimum sıcaklık değerinin 6000°C'nin üzerinde değerlere eriştiği sonlu elemanlar analizlerinde görülmüştür. Plazma kanalına  $P_p$  girilen analizlerde (Şekil 6) elde edilen İİH sonuçları deneysel verilerle büyük paralellik göstermiştir. Plazma sıcaklıklarının 3000°C, 5000°C, 8000°C ve 10000°C olarak girildiği analizlerde (Şekil 5), 12A akım ve altındaki akım değerlerinde elde edilen İİH sonuçları deneysel verilerle örtüşmektedir. Plazma sıcaklığının 3000°C-10000°C alındığı analizlerde, deney D6 ve D7'de yer alan işleme parametre değerlerinde elde edilen SEA sonuçları, deneysel verilerden daha düşüktür. Deney D6'da boşalım akımı 12A, vurum süresi 100µs, D7'de ise boşalım akımı 25A, vurum süresi 50µs alınmıştır. Bu yüksek işleme parametrelerinde analiz sonuçları deneysel sonuçların altında kalmıştır. Bu farkta,

vurum süresi boyunca sabit bir sıcaklık değerinin etkilediği varsayımının çok doğru olmadığını, etkili olduğu düşünülmektedir.

## 5.2. [2] Numaralı Referans Verilerine Göre Analiz Sonuçları (Analysis Results for Reference [2] Data)

Çizelge 5'de, DiBitonto vd.'nin yaptığı çalışmadan [2] alınan on üç adet deneysel veri ve bu veriler kullanılarak bu çalışmada geliştirilen modelden elde edilen teorik sonuçlar yer almaktadır. Çalışmada boşalım akımı 2.34-68A ve vurum süresi 5.6-560µs arasında değişmektedir. Deneysel sonucu ve analiz sonucu elde edilen ergiyen işparçası krater yarıçapı ( $R_m$ ) Çizelge 5'de sunulmuştur.

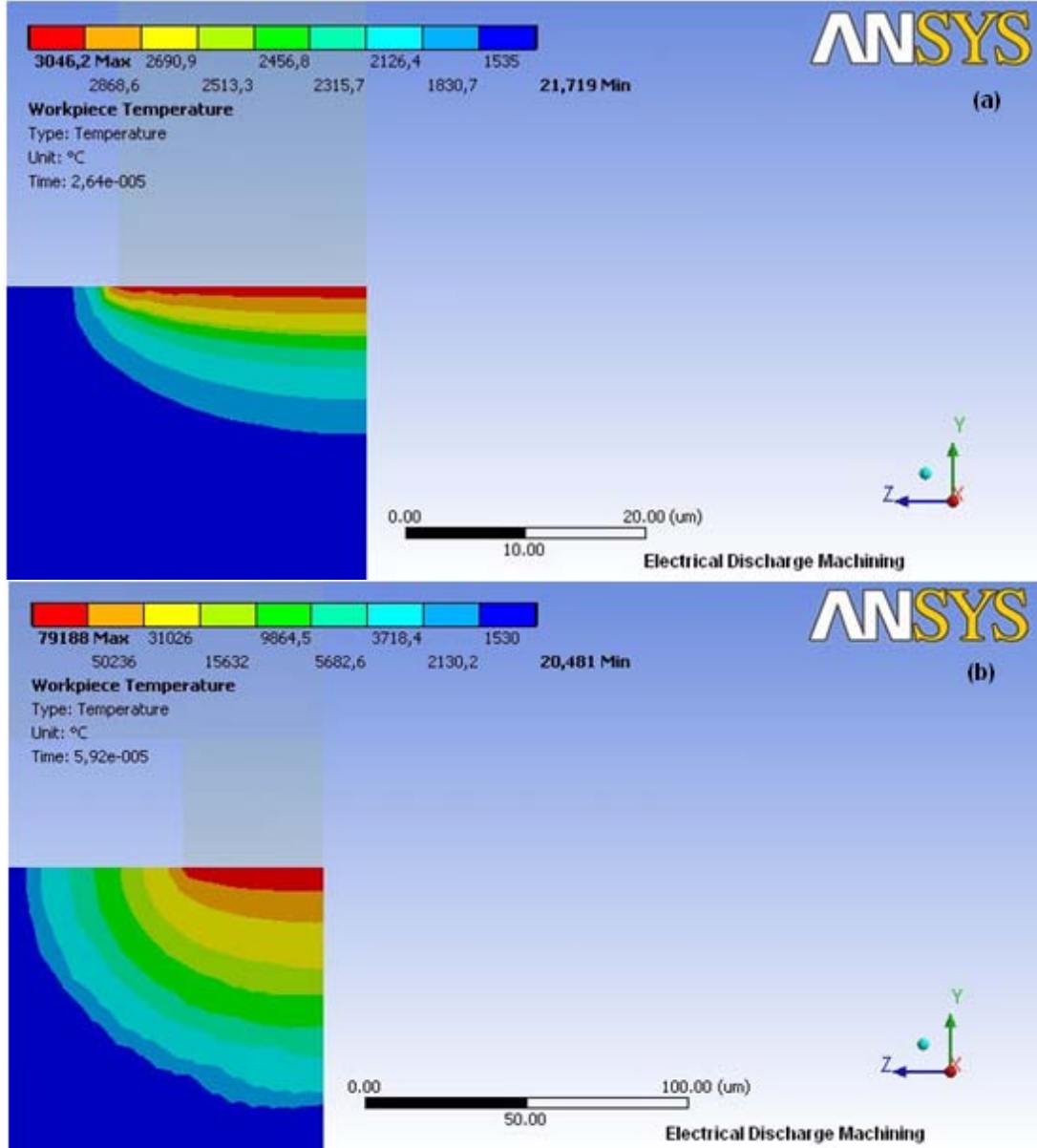
Şekil 7'de işparçası yüzeyindeki sıcaklık dağılımları gözükmemektedir.  $R_m$  Şekil 7a'dan 25µm, deneysel çalışmadan ise 24µm olarak bulunmuştur. Şekil 7b'den görüldüğü üzere belirtilen işleme parametreleri için plazma merkezinde oluşan sıcaklık değeri 79000°C'ye erişmiştir.  $R_m$  91µm olarak hesaplanmış, deneysel çalışmadan ise bu değer 38µm olarak bulunmuştur.

Şekil 8 ve Şekil 10'da plazma kanalı 3000°C-10000°C arasında değişen sıcaklıklarda tanımlanmıştır. Şekil 9 ve Şekil 11'de ise plazma kanalı sıcaklığının bulunması için plazma gücü tanımlanmıştır.

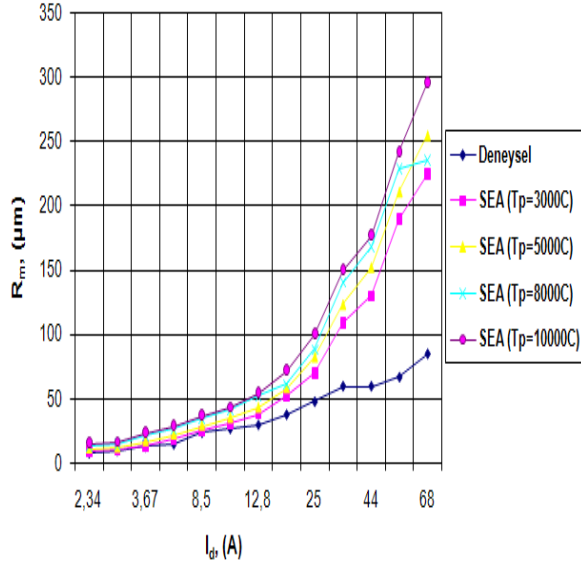
**Çizelge 5.** Deneysel [2] ve teorik çalışmalar sonucu elde edilen değerler (Experimental [2] and theoretical results)

Deney No	$I_a$ (A)	V (V)	$\delta$ (µs)	$t_a$ (µs)	$R_m$ [Deneysel] (µm)	$R_p$ [Model] (µm)	$R_m$ [Model] (µm)				
							$T_p=3000^\circ\text{C}$	$T_p=5000^\circ\text{C}$	$T_p=8000^\circ\text{C}$	$T_p=10000^\circ\text{C}$	$(P_p$ (Watt))
1	2,34	25	1	5,6	8	6,27	9	11	13	15	23
2	2,85	25	1,3	7,5	10	7,77	10	12	14,4	16	26
3	3,67	25	2,4	13	13	11,02	13	17	21	23	34
4	5,3	25	2,4	18	15	14,90	18	22	26	29	41
5	8,5	25	2,4	24	24	20,72	25	29	34	37	53
6	10	25	2,4	32	27	25,22	30	35	41	43	61
7	12,8	25	3,2	42	30	31,61	38	43	52	54	72
8	20	25	3,2	56	38	43,47	52	58	61	72	91
9	25	25	4,2	100	48	61,76	70	82	88	100	124
10	36	25	4,2	180	60	93,57	109	123	140	150	176
11	44	25	5,6	240	60	115,77	130	152	168	177	205
12	58	25	7,5	420	67	166,77	190	211	228	242	281
13	68	25	10	560	85	202,68	225	255	235	296	333

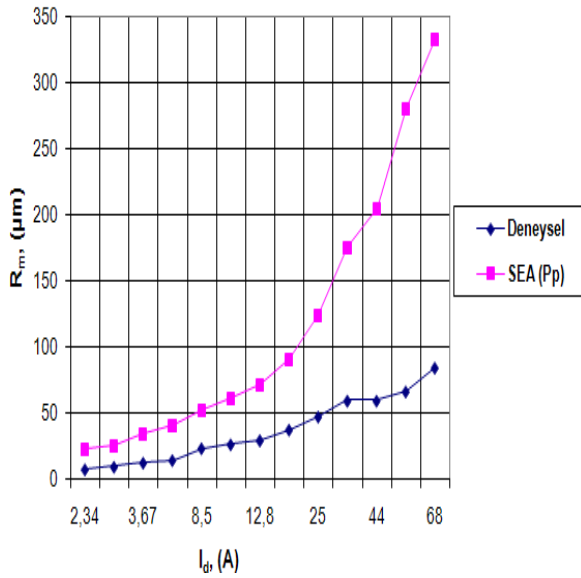




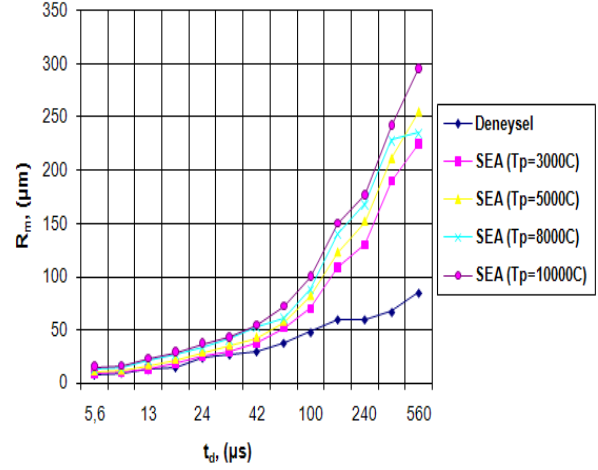
Şekil 7. (a) Deney 5, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı, ( $I_d=8,5A$ ,  $t_d=24\mu s$ ,  $\delta=2,4\mu s$ ,  $T_p=3000^\circ C$ ) (b) Deney 8, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı, ( $I_d=20A$ ,  $t_d=56\mu s$ ,  $\delta=3,2\mu s$ ,  $P_p=500Watt$ ) (Temperature distribution for a)D5, b)D8)



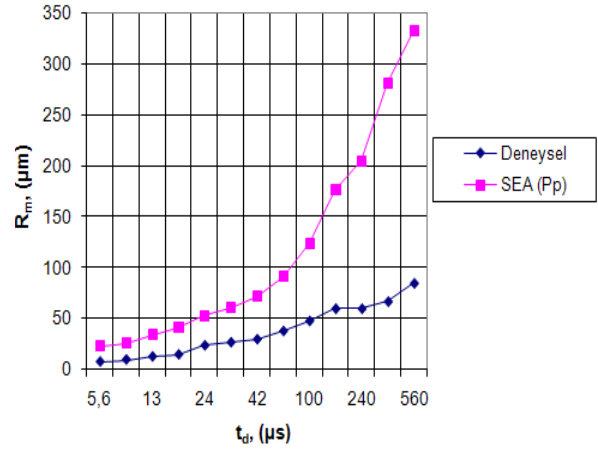
**Şekil 8.** Ergiyen işparçası krater yarıçapının ( $R_m$ ) uygulanan akıma ( $I_d$ ) göre deneysel [2] ve teorik (plazma sıcaklığına bağlı) değişimi (Experimental and theoretical variation of  $I_d$  and  $R_m$  (under plasma temp.))



**Şekil 9.** Ergiyen işparçası krater yarıçapının ( $R_m$ ) uygulanan akıma ( $I_d$ ) göre deneysel [2] ve teorik (plazma gücüne bağlı) değişimi (Experimental and theoretical variation of  $I_d$  and  $R_m$  (under plasma power))



**Şekil 10.** Ergiyen işparçası krater yarıçapının ( $R_m$ ) vurum süresine ( $t_d$ ) göre deneysel [2] ve teorik (plazma sıcaklığına bağlı) değişimi (Experimental and theoretical variation of  $t_d$  and  $R_m$  (under plasma temp.))



**Şekil 11.** Ergiyen işparçası krater yarıçapının ( $R_m$ ) vurum süresine ( $t_d$ ) göre deneysel [2] ve teorik (plazma gücüne bağlı) değişimi (Experimental and theoretical variation of  $t_d$  and  $R_m$  (under plasma power))

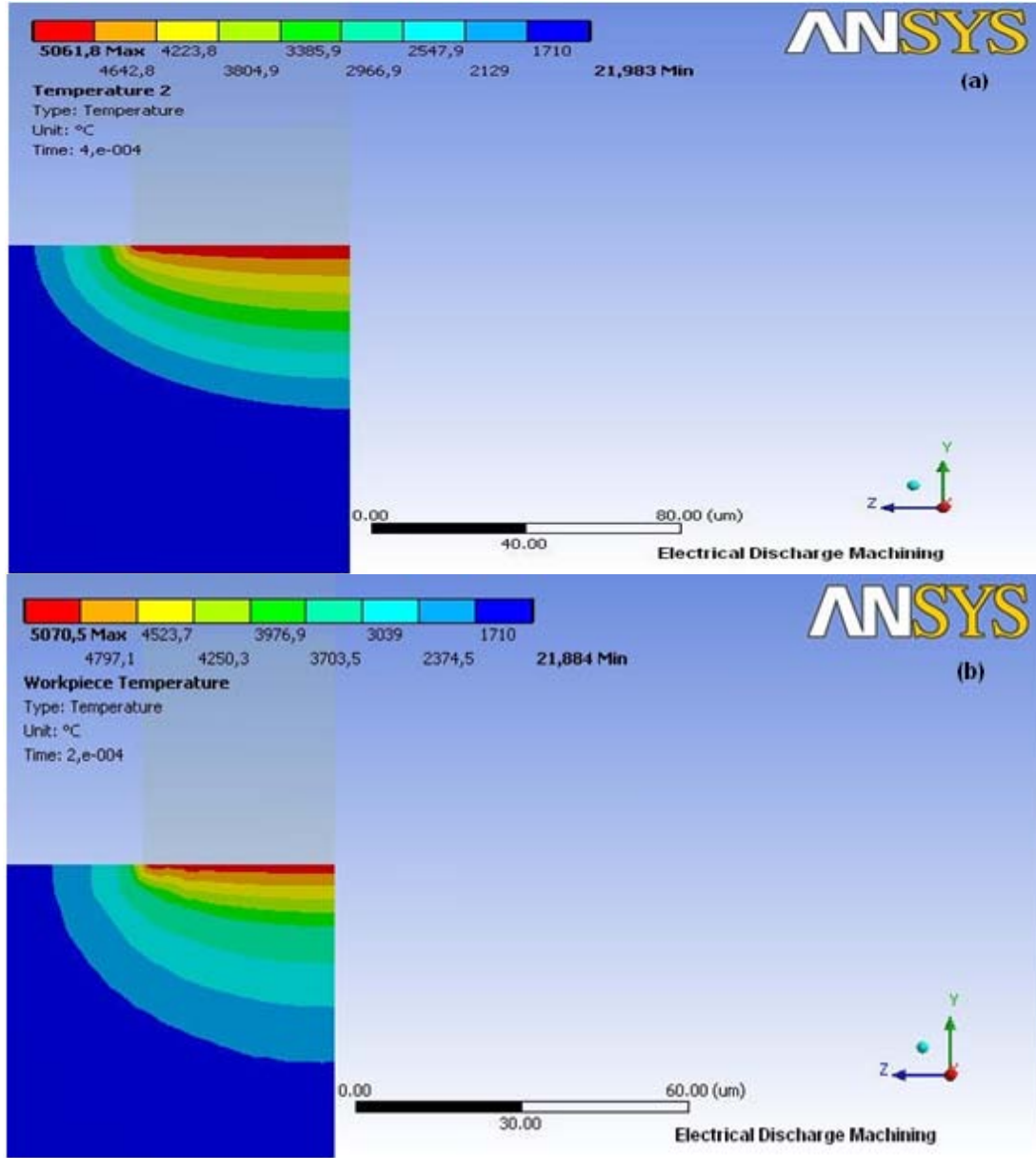
Şekil 8-Şekil 11'de görüldüğü gibi 20A  $I_d$  ve 100µs  $t_d$  değerlerinden daha düşük işleme parametre değerlerinde deneysel ve teorik sonuçlar örtüşmektedir.  $I_d$  ve  $t_d$ 'nin artması ile teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki fark büyümektedir. Şekillerden görüldüğü üzere düşük işleme parametre değerlerinde işparçasından daha az malzeme kaldırılmaktadır. SEA sonuçlarında ergime sıcaklığına erişmiş malzemenin tamamının ortamdaki uzaklaştığı kabul edilmiştir. Ancak, gerçek işlemede ergiyen ve buharlaşan malzemenin bir kısmı tekrar katlaşmakta ve ortamdaki uzaklaşmamaktadır. Bu durum yüksek enerjili vurumlarda ( $I_d$  ve  $t_d$  değerlerinin yüksek olduğu durumlarda) daha belirgindir [10]. Bu nedenle teorik sonuçlar, yüksek işleme parametre değerlerinde deneysel verilerden yüksek çıkmıştır.

**Çizelge 6.** Deneysel [6] ve teorik çalışmalar sonucu elde edilen değerler (Experimental [6] and theoretical results)

D deney No	I <sub>d</sub> (A)	V (V)	δ (μs)	t <sub>d</sub> (μs)	R <sub>m</sub> [Deneysel] (μm)	R <sub>p</sub> [Model] (μm)	R <sub>m</sub> [Model] (μm)				
							T <sub>p</sub> = 3000°C	T <sub>p</sub> = 5000°C	T <sub>p</sub> = 8000°C	T <sub>p</sub> = 10000°C	(P <sub>p</sub> (Watt))
1	3,2	30	100	100	25	25,51	33	41	51	57	76
2	6,5	30	100	100	57	34,60	41	53	62	66	95
3	12	30	100	100	85	45,04	53	61	71	80	115
4	6,5	30	100	100	58	34,60	41	53	62	66	95
5	6,5	30	100	200	70	46,95	56	68	87	90	112
6	6,5	30	100	300	75	56,11	67	80	90	108	124
7	6,5	30	50	100	70	34,60	40	49	60	65	90
8	6,5	30	100	100	58	34,60	41	53	62	66	95
9	6,5	30	200	100	58	34,60	36	53	62	70	100
10	6,5	30	300	100	50	34,60	41	53	61	72	111

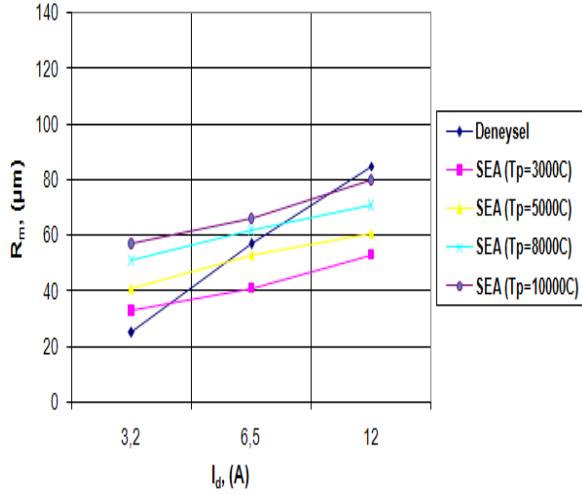
### 5.3. [6] Numaralı Referans Verilerine Göre Analiz Sonuçları (Analysis Results for Reference [6] Data)

[6] nolu referansta verilen deneysel koşullar kullanılarak bu çalışmada geliştirilen modelden elde edilen sonuçlar Çizelge 6'da sunulmuştur. [6] nolu referansta ilk üç deneyde I<sub>d</sub>, sonraki üç deneyde t<sub>d</sub>, son dört deneyde ise δ değişken tutulmuştur.

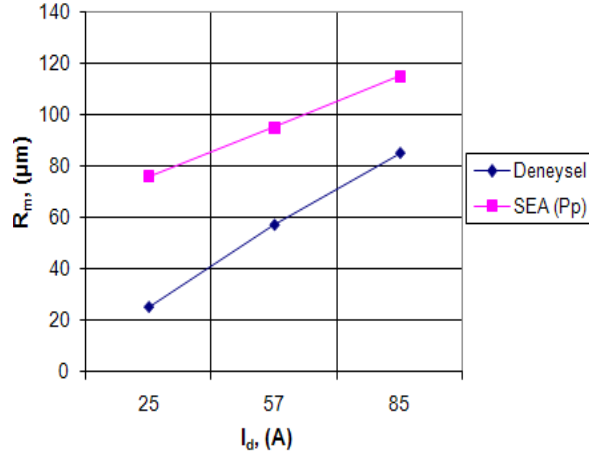


**Şekil 12.** (a) Deney 4, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı, ( $I_d=6,5A$ ,  $t_d=100\mu s$ ,  $\delta=100\mu s$ ,  $T_p=5000^\circ C$ ), (b) Deney 6, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı, ( $I_d=6,5A$ ,  $T_d=300\mu s$ ,  $\delta=100\mu s$ ,  $T_p=5000^\circ C$ ) (Temperature distribution for a)D4, b)D6)

Şekil 12a'dan  $R_m$  53 $\mu m$  olarak bulunmuştur. Bu değer deneysel çalışmada 58 $\mu m$ 'dir. Şekil 12b'de ise modelden bulunan  $R_m$  80 $\mu m$ 'dir. Bu değer deneysel çalışmalarda 75 $\mu m$ 'dir. Aynı işlem parametrelerinde SEA sonucu  $t_d$  100 $\mu s$  iken 53 $\mu m$ ,  $t_d$  300 $\mu s$  iken 80 $\mu m$  yarıçapında malzeme ergime sıcaklığına ulaşmıştır.

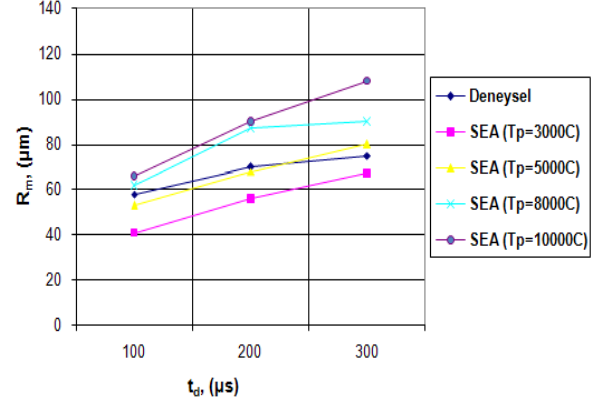


**Şekil 13.** Ergiyen işparçası krater yarıçapının ( $R_m$ ), boşalım akımına ( $I_d$ ) göre deneysel [6] ve teorik (plazma sıcaklığına bağlı) değişimi (Experimental and theoretical variation of  $I_d$  and  $R_m$  (under plasma temp))

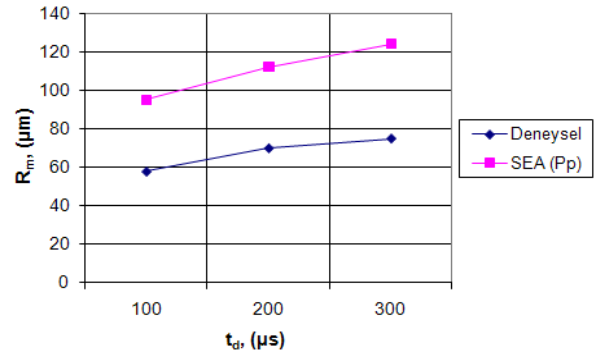


**Şekil 14.** Ergiyen işparçası krater yarıçapının ( $R_m$ ), boşalım akımına ( $I_d$ ) göre deneysel [6] ve teorik (plazma gücüne bağlı) değişimi (Experimental and theoretical variation of  $I_d$  and  $R_m$  (under plasma power))

Şekil 13'de  $I_d$ 'nin değişken alındığı ilk üç deneyde,  $T_p=3000^\circ C$  alındığında elde edilen teorik  $R_m$  değerleri,  $I_d$ 'nin düşük olduğu değerlerde deneysel verilere yakındır.  $I_d$  değeri arttıkça teorik veriler deneysel verilerden düşük çıkmaktadır.  $T_p=5000^\circ C$  alındığı analizlerde ise,  $I_d$ 'nin 6A ve civarında olduğu deneylerde, deneysel ve teorik  $R_m$  sonuçları oldukça yakındır.  $T_p=10000^\circ C$  alındığında ise, düşük  $I_d$  değerlerinde teorik  $R_m$  sonuçları, deneysel verilerden biraz uzaklaşmakta, ancak 10A ve üzerindeki değerlerde deneysel verilerle örtüşmektedir. Doğrudan  $P_p$  tanımlandığında ise (Şekil 14)  $R_m$  değerleri deneysel verilerden biraz yüksek çıkmıştır. Deneysel ve teorik çalışmalarda  $I_d$ 'nin artırılmasıyla ergiyen malzeme miktarının da arttığı gözlenmiştir.

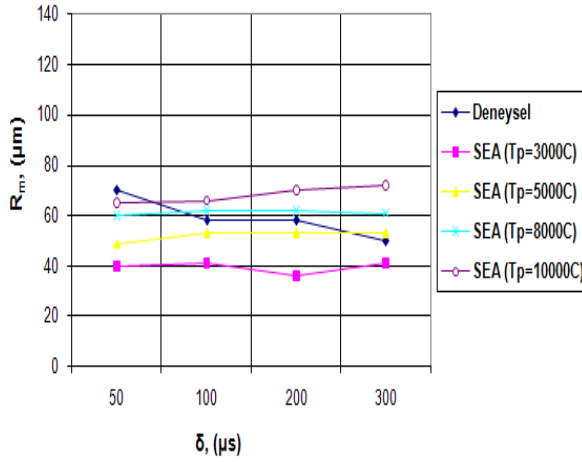


**Şekil 15.** Ergiyen işparçası krater yarıçapının ( $R_m$ ), vurum süresine ( $t_d$ ) göre deneysel [6] ve teorik (plazma sıcaklığına bağlı) değişimi (Experimental and theoretical variation of  $t_d$  and  $R_m$  (under plasma temp.))

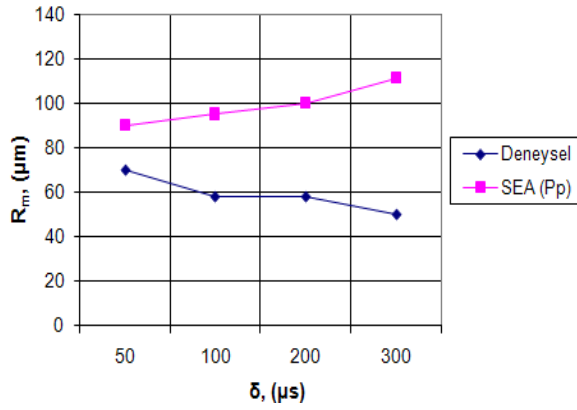


**Şekil 16.** Ergiyen işparçası krater yarıçapının ( $R_m$ ), vurum süresine ( $t_d$ ) göre deneysel [6] ve teorik (plazma gücüne bağlı) değişimi (Experimental and theoretical variation of  $t_d$  and  $R_m$  (under plasma power))

Şekil 15'de  $t_d$ 'nin değişken alındığı deneysel ve teorik (plazma sıcaklığına bağlı)  $R_m$  sonuçları sunulmuştur.  $T_p=5000^\circ C$  alındığı analizlerde teorik  $R_m$  değerleri deneysel değerlerle çok yakındır.  $T_p=10000^\circ C$  ve  $P_p$  (Şekil 16) olarak tanımlandığı analizlerde ise teorik  $R_m$  verileri, deneysel verilerden yüksektir. Deneysel ve teorik sonuçlardan  $t_d$ 'nin artmasıyla  $R_m$ 'in de arttığı görülmüştür.



**Şekil 17.** Ergiyen işparçası krater yarıçapının ( $R_m$ ), bekleme süresine ( $\delta$ ) göre deneysel [6] ve teorik (plazma sıcaklığına bağlı) değişimi (Experimental and theoretical variation of  $\delta$  and  $R_m$  (under plasma temp))



**Şekil 18.** Ergiyen işparçası krater yarıçapının ( $R_m$ ), bekleme süresine ( $\delta$ ) göre deneysel [6] ve teorik (plazma gücüne bağlı) değişimi (Experimental and theoretical variation of  $\delta$  and  $R_m$  (under plasma power))

Şekil 17'de  $\delta$ 'nın değişken alındığı deneysel ve teorik  $R_m$  sonuçları gözükmektedir.  $T_p$ 'nin  $5000^\circ\text{C}$  ve  $10000^\circ\text{C}$  tanımlandığı durumlarda elde edilen teorik  $R_m$  sonuçları deneysel sonuçlara oldukça yakındır. Şekil 18'de ise plazma gücüne bağlı olarak bekleme süresinin ( $\delta$ ),  $R_m$  ile değişimi gözükmektedir.

Uzun  $t_d$  ve yüksek işleme parametre değerlerinde elde edilen teorik  $R_m$  sonuçları, deneysel verilerden daha yüksek çıkmıştır. Bu koşullarda, plazma kanalında oluşan yüksek enerji sonucu işparçasında kaynama (füzyon) meydana gelmektedir. Kaynama sonucu ergiyen işparçası malzemesinin bir kısmı tekrar katılaşmakta ve ortamdan uzaklaşmamaktadır. Oluşturulan modelde ergime sıcaklığına ulaşan malzemenin tamamının ortamdan uzaklaştığı varsayılmıştır. Literatürdeki araştırmalarda kısa  $t_d$  değerlerinde elektriksel kuvvetlerin malzeme kaldırmada önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir. Elektriksel kuvvetlerin ve kaynamanın modelde hesaba katılmaması nedeniyle bazı teorik

sonuçların, bu işleme koşullarında deneysel sonuçlardan uzaklaştığı düşünülmektedir.

## 6. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada geliştirilen sonlu elemanlar (SE) modelinde, EEİ'de tek bir boşalım için plazma kanalının ve işparçasının zamana bağlı ısı modeli oluşturulmuştur. Modelde boşalım akımına ve vuruş süresine bağlı olarak plazma yarıçapı ( $R_p$ ) hesaplanmıştır. Daha sonra plazma yarıçapının ve işparçasının 2-B modeli ve takiben 3-B modeli oluşturulmuştur. Literatürde çeşitli işleme parametrelerinde yapılmış deneylerden elde edilen işparçası işleme hızı (İİH) ve ergiyen işparçası malzemesi yarıçapı ( $R_m$ ) sonuçları, bu çalışmada geliştirilen SE modeli ile elde edilenlerle karşılaştırılmıştır.

Çalışmada, deneysel ve teorik sonuçlardan  $R_p$  büyüdükçe işleme performansı değerlerinin (İİH ve  $R_m$ ) arttığı görülmüştür.  $R_p$  değeri boşalım akımı ve vuruş süresiyle doğru orantılı olduğundan bu işleme parametrelerinin artmasının, İİH ve  $R_m$ 'yi arttırdığı deneysel ve teorik olarak teyit edilmiştir.

[1] numaralı referanstaki deneysel sonuçlara en yakın teorik sonuçlar, plazma ısı kaynağının plazma gücü ( $P_p$ ) olarak tanımlandığı modelden elde edilmiştir. Oluşturulan diğer modellerde ( $T_p=3000^\circ\text{C}$ ,  $T_p=5000^\circ\text{C}$ ,  $T_p=8000^\circ\text{C}$ ,  $T_p=10000^\circ\text{C}$ ) ise özellikle yüksek işleme parametre değerlerinde elde edilen teorik sıcaklıklar deneysel değerlerden düşük çıkmıştır. DiBitonto vd.'nin [2] deneysel çalışmalarında, düşük işleme parametre değerleri ( $I_d < 20\text{A}$ ,  $t_d < 50\mu\text{s}$ ) için elde edilen değerler teorik sıcaklık değerleri ile büyük ölçüde paralellik göstermektedir. En yakın sonuçlar  $3000^\circ\text{C}$  olarak tanımlandığı analizlerde elde edilmiştir. Kansal vd.'nin [6] yaptığı deneysel çalışma verilerinde ise,  $T_p$ 'nin  $5000^\circ\text{C}$  tanımlandığı analizler,  $R_m$  deneysel verilerine en yakın sonuçları vermiştir.

Bu çalışma sonucunda, farklı araştırmacılar tarafından farklı işleme koşullarında yapılmış deneysel çalışmaların bu çalışmada geliştirilen sonlu elemanlar modeli ile yakın sonuçlar verdiği görülmüştür. Geliştirilen model, EEİ'de, işleme performansına birincil derecede etkili olan işleme parametrelerini (boşalım akımı, boşalım gerilimi, vuruş süresi, vuruş bekleme süresi, iletim ile ısı transferi, taşınım ile ısı transferi katsayıları) içerdiğinden, birçok karşılaştırma çalışmasında ve önceden işleme performans çıktılarının (İİH,  $R_m$ , gibi) hesaplanmasında kullanılabilir niteliktedir.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Özgedik, A., Çoğun, C., "An experimental investigation on tool wear in electric discharge

- machining", **Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Cilt 27, 488-500 (2006).
2. DiBitonto, D. D., Eubank, P. T., Patel, M. R., Barrufet M. A., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model", **J. Appl. Phys.**, Cilt 66 (9), 4095-4103 (1989).
  3. Patel, M. R., Barrufet, M. A., Eubank, P. T., DiBitonto D. D., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. II. The anode erosion model", **J. Appl. Phys.**, Cilt 66 (9), 4104-4111 (1989).
  4. Eubank, P. T., Patel, M. R., Barrufet, M. A., Bozkurt, B., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. III. The variable mass, cylindrical plasma model", **J. Appl. Phys.**, Cilt 73 (11), 7900-7909 (1993).
  5. Marafona, J., Chousal, J. A. G., "A finite element model of EDM based on the Joule effect", **Int. Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cilt 46, 595-602 (2006).
  6. Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P., "Numerical simulation of powder mixed electric discharge machining (PMEDM) using finite element method", **Mathematical and Computer Modelling**, Cilt 10, 1-21 (2007).
  7. Das, S., Klotz, M., Klocke, F., "EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 142, 434-451 (2003).
  8. Yadav, V., Jain, V. K., Dixit, P. M., "Thermal stresses due to electrical discharge machining", **Int. Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cilt 42, 877-888 (2002).
  9. Snoeys, R., Van Dijck, F., "Investigations of EDM operations by means of thermo mathematical model", **Annals of CIRP**, Cilt 20(1), 35 (1971).
  10. Salah, N. B., Ghanem, F., Atig, K. B., "Numerical study of thermal aspects of electric discharge machining process", **Int. Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cilt 46, 908-911(2006).
  11. Kumar, P. D., "Study of thermal stresses induced surface damage under growing plasma channel in electro-discharge machining", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 202, 86-95 (2008).
  12. Singh, A., Ghosh, A., "A thermo-electric model of material removal during electric discharge machining", **Int. Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cilt 39, 669-682 (1999).
  13. Allen, P., Chen, X., "Process simulation of micro electro-discharge machining on molybdenum", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 186, 346-355 (2007).
  14. Kumar, P. D., Bhoi, R. K., "Analysis of spark eroded crater formed under growing plasma channel in electro discharge machining", **Machining Science and Technology**, Cilt 9, 239-261 (2005).
  15. Erden, A., Kaftanoğlu, B., "Heat transfer modelling of electric discharge machining", **Proc. 21 st. Int. Machine Tool and Des. Res. Conf.**, 351-359 (1981).
  16. Bhondwe, K. L., Yadava, V., Kathiresan, G., "Finite element prediction of material removal rate due to electro-chemical spark machining", **Int. Journal of Machine Tools and Manufacture**, Cilt 46, 1699-1706 (2006).
  17. Mahardika, M., Mitsui, K., "A new method for monitoring micro-electric discharge machining process", **Int. Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cilt 48, 446-458 (2008).
  18. Yeo, S.H., Tan, P.C., "Critical assessment and numerical comparison of electro thermal models in EDM", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 203, 241-251(2008).
  19. Çoğun, C., "Variation of discharge profile with discharge power in electric discharge machining (EDM)", **JSME International Journal**, Cilt 32(3), 480-483 (1989).
  20. Snoeys, R., Van Dijck, F., "Plasma channel diameter growth affects stock removal in EDM", **Annals of the CIRP**, Cilt 21(1), 39-40 (1972).
  21. Ho, K. H., Newman, S. T., "State art electrical discharge machining (EDM)", **Int. Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cilt 40, 1287-1300 (2003).
  22. Simao, J., Lee, H. G., Aspinwall, D. K., Dewes, R. C., Aspinwall, E. M., "Workpiece surface modification using electrical discharge machining", **Int. Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cilt 43, 121-128 (2003).
  23. Ikai, T., Hashigushi, K., "Heat input for crater formation in EDM", **Proceedings of International Symposium for Electro Machining - ISEM XI, EPFL, Lausanne, Switzerland**, 163-170 (1995).

