

**ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE İŞPARÇASI
AŞINMASININ TEORİK MODELLENMESİ**

YASİN SARIKAVAK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**OCAK 2009
ANKARA**

Yasin SARIKAVAK tarafından hazırlanan “ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE İŞPARÇASI AŞINMASININ TEORİK MODELLENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Haluk DARENDELİLER

Makine Mühendisliği, Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Doç. Dr. Mustafa YURDAKUL

Makine Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Tarih: 30/01/2009

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nail ÜNSAL

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Yasin SARIKAVAK

**ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE İŞPARÇASI
AŞINMASININ TEORİK MODELLENMESİ**

(Yüksek Lisans Tezi)

Yasin SARIKAVAK

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Ocak 2009

ÖZET

Bu çalışmada, elektro erozyon ile işlemede (EEİ) işparçası malzemesinin aşınmasının teorik modellemesi yapılmıştır. Isıl-elektriksel model, tek bir boşalım için geliştirilmiştir. Geliştirilen model dielektrik sıvı içerisinde elektriksel boşalım sonucu oluşan enerjiyi, 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 kaldırıldığı kabul edilmiştir. Çalışmada, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan ANSYS Workbench (v.11) programı kullanılmıştır. EEİ işlemi zamana bağlı ısı analiz yöntemi kullanılarak simüle edilmiştir. Farklı işleme parametrelerinde elde edilen teorik sonuçların deneysel sonuçlarla büyük ölçüde örtüştüğü görülmüştür.

Bilim Kodu : 914.1.093
Anahtar Kelimeler : Elektro erozyon ile işleme (EEİ), ısıl model, sonlu elemanlar yöntemi, işparçası işleme hızı (İİH)
Sayfa Adeti : 86
Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

**THEORETICAL MODELLING OF WORKPIECE MATERIAL
REMOVAL IN ELECTRICAL DISCHARGE MACHINING**

(M. Sc. Thesis)

Yasin SARIKAVAK

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

January 2009

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.

Science Code : 914.1.093

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

Page Number: 86

Adviser : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

TEŞEKKÜR

Tezimin konu seçiminden bitimine kadar her aşamasında yakın ilgi ve alakasını gördüğüm danışman hocam Prof. Dr. Can ÇOĞUN'a en samimi duygularıyla teşekkürü bir borç bilirim. Çalışmalarım esnasında deney verilerinin temininde bana yardımcı olan Araş. Gör. Ali ÖZGEDİK'e, tüm hayatım boyunca maddi ve manevi destekleriyle her zaman yanımda olan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Türkiye Cumhuriyeti Devleti'nin öğrenimimin her aşamasında bana karşılıksız olarak sağladığı imkanları şükranla anıyorum.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER.....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	4
3. EEİ'DE KIVILCIM OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ	13
3.1. Teori.....	13
3.2. Matematiksel Modelleme.....	14
3.2.1. Kabuller	14
3.2.2. Isıl model	15
3.2.3. Enerji oluşumu ve plazma sıcaklığı	17
3.2.4. Boşalım kanalı (plazma) yarıçapı	18
3.2.5. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme	19
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	21
5. BİLGİSAYAR ORTAMINDA MODELLEME ve ANALİZ	23
5.1. Modelleme ve Problemin Tanımlanması	23
5.2. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi ve Modeli Elemanlara Bölme	28

Sayfa

5.3. Sınır Koşullarının Girilmesi ve Analiz	31
6. SONUÇLAR ve DEĞERLENDİRMESİ	35
6.1. [1] Numaralı Referans Verilerine Göre Analiz Sonuçları	35
6.2. [3] Numaralı Referans Verilerine Göre Analiz Sonuçları.....	39
6.3. [7] Numaralı Referans Verilerine Göre Analiz Sonuçları	43
7. SONUÇLAR.....	50
KAYNAKLAR	52
EKLER	55
EK-1. [1] Numaralı Referans Verilerine Göre Analiz Sonuçları	56
EK-2. [3] Numaralı Referans Verilerine Göre Analiz Sonuçları	63
EK-3. [7] Numaralı Referans Verilerine Göre Analiz Sonuçları	76
ÖZGEÇMİŞ	86

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. AISI D2 kalıp çeliğinin ısıl özellikleri	6
Çizelge 3.1. Malzemeye göre değişen deneysel L, M ve N değerleri.....	19
Çizelge 4.1. Deney parametreleri	21
Çizelge 4.2. Çelik malzemeler için fiziksel özellikler	21
Çizelge 6.1. Deneysel ve teorik çalışmalar sonucu elde edilen değerler	35
Çizelge 6.2. Deneysel ve teorik çalışmalar sonucu elde edilen değerler	39
Çizelge 6.3. Deneysel ve teorik çalışmalar sonucu elde edilen değerler	43

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. İşparçasında meydana gelen erozyon (Noktasal ısı kaynağı modeli).....	4
Şekil 2.2. EEİ işleminin aksenal simetrik modeli	10
Şekil 2.3. Isıl etki sonucu oluşan sıcaklık dağılımı (güç=30W, vurum süresi=2µs).....	11
Şekil 3.1. Farklı vurum sürelerinde anot ve katot aşınma hızları (ölçüsüz). Maksimum anot aşınması 3µs, maksimum katot aşınması ise 30µs'de olmaktadır (10A akımda, anot bakır, çelik katot).....	14
Şekil 3.2. İşparçasında ısı dağılımının şematik gösterimi.....	16
Şekil 3.3. EEİ'de tek kıvılcım için ısı transfer modeli.....	16
Şekil 3.4. Dört yüzlü (tetrahedron) ağlara bölünmüş 3-B model.....	20
Şekil 5.1. Bilgi girişi ve sekmelerin akış diyagramı	24
Şekil 5.2. ANSYS Workbench açılış penceresi.....	25
Şekil 5.3. Geometrik model (design modeler) ekranının tanıtımı ve oluşturulan 2-B model	26
Şekil 5.4. Oluşturulan 3-B katı model	27
Şekil 5.5. Bilgi girişi ve sekmelerin akış diyagramı	28
Şekil 5.6. Modele malzeme özelliklerinin tanımlanması.....	29
Şekil 5.7. Tetrahedron geometrik şekilli elemanlara bölünmüş 3-B model	30
Şekil 5.8. Bilgi girişi ve sekmelerin akış diyagramı	31
Şekil 5.9. Plazma kanalına sıcaklık değerinin tanımlanması.....	32
Şekil 5.10. Taşınım ile ısı transferine maruz kalan yüzeyler	32
Şekil 5.11. Çözüm (solution) bölümü	33
Şekil 5.12. Verilen parametreler ve sınır koşullarına göre problemin çözümü	34

Şekil	Sayfa
Şekil 6.1. Deney 3, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı ($I_d=12A$, $t_d=12\mu s$, $\delta=50\mu s$, $T_p=10000\text{ }^\circ C$)	36
Şekil 6.2. Deney 5, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı ($I_d=12A$, $t_d=50\mu s$, $\delta=50\mu s$, $P_p=540W$)	36
Şekil 6.3. İİH'nin deneysel [1] ve plazma sıcaklığına göre teorik değişimi	37
Şekil 6.4. İİH'nin deneysel [1] ve plazma gücüne göre teorik değişimi	38
Şekil 6.5. Deney 5, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı ($I_d=8,5A$, $t_d=24\mu s$, $\delta=2,4\mu s$, $T_p=3000\text{ }^\circ C$).....	40
Şekil 6.6. Deney 8, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı ($I_d=20A$, $t_d=56\mu s$, $\delta=3,2\mu s$, $P_p=500W$)	40
Şekil 6.7. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), uygulanan akıma (I_d) göre deneysel [3] ve plazma sıcaklığına bağlı teorik değişimi	41
Şekil 6.8. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), uygulanan akıma (I_d) göre deneysel [3] ve plazma gücüne bağlı teorik değişimi	41
Şekil 6.9. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), vurum süresine (t_d) göre deneysel [3] ve plazma sıcaklığına bağlı teorik değişimi	42
Şekil 6.10. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), vurum süresine (t_d) göre deneysel [3] ve plazma gücüne bağlı teorik değişimi.....	42
Şekil 6.11. Deney 4, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı ($I_d=6,5A$, $t_d=100\mu s$, $\delta=100\mu s$, $T_p=5000\text{ }^\circ C$).....	44
Şekil 6.12. Deney 6, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı ($I_d=6,5A$, $t_d=300\mu s$, $\delta=100\mu s$, $T_p=5000\text{ }^\circ C$).....	44
Şekil 6.13. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), boşalım akımına (I_d) göre deneysel [7] ve plazma sıcaklığına bağlı teorik değişimi	45
Şekil 6.14. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), boşalım akımına (I_d) göre deneysel [7] ve plazma gücüne bağlı teorik değişimi.....	45
Şekil 6.15. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), vurum süresine (t_d) göre deneysel [7] ve plazma sıcaklığına bağlı teorik değişimi	46
Şekil 6.16. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), vurum süresine (t_d) göre deneysel [7] ve plazma gücüne bağlı teorik değişimi.....	47

Şekil	Sayfa
Şekil 6.17. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), bekleme süresine (δ) göre deneysel [7] ve plazma sıcaklığına bağlı teorik değişimi	48
Şekil 6.18. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), bekleme süresine (δ) göre deneysel [7] ve plazma gücüne bağlı teorik değişimi.....	48
Şekil 6.19. EEİ'de işparçasının analiz sonucu üç boyutlu görünümü.....	49

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Kraterin kesit görünüşü ve oluşan mikro çatlaklar	8
Resim 2.2. Kraterde oluşan mikro çatlaklar	9
Resim 2.3. Molibden işparçası üzerinde tek bir kraterin SEM fotoğrafı (güç=30W, vurum süresi=2 μ s)	11

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
C_p	Özgül ısı sığası (J/kgK)
h	Isı transfer katsayısı (W/m ² K)
h_a	Hava için ısı transfer katsayısı (W/m ² K)
I_d	Boşalım akımı (A)
κ_T	Isıl iletkenlik (W/mK)
P_p	Plazma gücü (W)
$Q(r)$	Isı akısı
R	Yarıçap (μm)
R_p	Plazma yarıçapı (μm)
t	Süre (s)
t_d	Vurum süresi (μs)
T	Sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$)
T_0	Ortam sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_m	Ergime sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
T_p	Plazma sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)
V	Boşalım gerilimi (V)
ρ	Yoğunluk (kg/m ³)
δ	Vurum bekleme (ara) süresi (μs)
α	Isıl yayılma

Kısaltmalar	Açıklama
EE	Elektro Erozyon
EEİ	Elektro Erozyon ile İşleme
EAH	Elektrot Aşınma Hızı
İİH	İşparçası İşleme Hızı
SEA	Sonlu Elemanlar Analizi
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu

1. GİRİŞ

Bilim ve teknolojiadaki gelişmeler, birçok alanda olduğu gibi malzeme işleme teknolojisinde de sıra dışı taleplerin ortaya çıkmasına neden olmuştur. Çok yüksek sertlikteki ve mukavemetteki malzemelerin işlenmesi, çok yakın ölçüsel hassasiyetin elde edilmesi ve oldukça zor ve karmaşık şekillerin üretilmesi gibi talepler alışılmamış imalat yöntemlerinin doğmasına neden olmuştur.

Frezeleme, tornalama, kesme, delik delme gibi günümüzün alışılmış talaş kaldırma yöntemleri sert takım malzemeleri ile gerçekleştirilmektedir. Günümüzde hızla yaygınlaşmış olan alışılmamış işleme yöntemlerinde farklı enerji kaynakları kullanılır. Elektro kimyasal reaksiyon, yüksek sıcaklıkta plazma, yüksek hızlı hava, su ve aşındırıcı jetle talaş kaldırma işlemleri gerçekleştirilmektedir. Alışılmış imal yöntemlerinden kaynaklanan hataların azaltılması, gevrek parça kırılmalarının en aza indirilmesi ve işparçası üzerindeki ısıl ve mekanik deformasyon etkilerin azaltılması alışılmamış işleme yöntemlerinin kullanılmasıyla sağlanmıştır. Geleneksel tekniklerle delinmeyen, delik boyu/delik genişliği oranı yüksek küçük boyutlu deliklerin delinebilmesi alışılmamış işleme yöntemleri ile başarılabilmektedir.

Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) üretim endüstrisinde karmaşık şekilli kalıp, takım ve parça imalatında yaygın olarak kullanılan bir alışılmamış imalat yöntemidir. EEİ, dielektrik sıvı içerisinde elektrot ile iş parçası arasında oluşan elektriksel boşalmanın iş parçası yüzeyinden çok küçük bir hacmi aşındırması esasına dayanır. Elektriksel kıvılcımın aşındırma etkisi ilk olarak 1768 yılında İngiliz bilim adamı Priestly tarafından keşfedilmiştir. Elektrik arkındaki aşındırıcı etkiyi azaltmak için yapılan çalışmalar sırasında Rus bilim adamları B.R. ve N.I. Lazarenko 1943 yılında elektriksel kıvılcımın aşındırıcı etkisini faydalı bir şekilde kullanmaya karar vermişlerdir. Lazarenko devresi olarak bilinen kıvılcım jeneratör devresi ile ilk EEİ tezgahını geliştirmişlerdir. Bu jeneratör devresinin gelişmiş şekli mevcut birçok erozyon tezgahında halen kullanılmaktadır [1].

Yöntemde elektrot ve işparçası arasındaki boşlukta dielektrik sıvısı bulunmaktadır. Dielektrik sıvısı normal koşullarda elektrik iletmeyen bir sıvıdır. EEİ tezgahında elektrot ile işparçası arasına gerilim uygulanır. Elektrot, işparçasına servo mekanizma tarafından yaklaştırılır. Elektrot ile işparçası arasında en yakın olan noktada dielektrik elektrik direnci kırılır ve dielektrik sıvı iyonlaşır. Buradan akım geçişi (enerji boşalımı) başlar. Dielektrik sıvının varlığı, boşalımı dar bir alana hapseder. Noktasal olarak yüksek bir akım geçişi (1-5 milyon A/cm²) ve iyon bombardımanı sebebiyle işparçası ve elektrot yüzeyi üzerinde yüksek sıcaklık oluşur. Bu sıcaklık bir kısım işparçası ve elektrot malzemesinin ergimesine ve buharlaşmasına sebep olur. Elektronik anahtarlama ile akım kesilerek boşalım kesilir. İyonlaşmış bölgeye hücum eden dielektrik sıvının, erimiş metale temasıyla metalin bir kısmı tanecikler halinde koparak dielektrik sıvının içine karışır. Böylece küçük bir miktar talaş kaldırılmış ve işparçası ile elektrot arasındaki en yakın iki nokta işlenmiş olur. Akımın verilip kesilmesiyle sürekli bir vuruş dizisi oluşturularak her defasında farklı bir noktada malzeme kopartılır ve elektrodun şekli karşıya (işparçasına) geçirilir. Bir süre sonra, mesafenin artması yüzünden boşalım oluşamaz. Bu durumda servo mekanizması elektrodu işparçasına yaklaştırır. Dielektrik sıvı boşalımının oluşması ve dar alana hapsedilmesi için gerekli ortamı oluşturduğu gibi, koparılan taneciklerin ortamdan uzaklaştırılması ve açığa çıkan yüksek ısının süpürülmesini de sağlar. Eğer elektrot ve işparçası birbirlerine değerse kısa devre olur ve elektro erozyon işlemi gerçekleşmez.

EEİ'nin çok parametreliliği bir işleme yöntemi olduğu düşünüldüğünde, işleme parametreleri ile işleme performansı arasındaki ilişkilerin iyi bilinmesi gerekir. EEİ ile işlemenin temel parametreleri aşağıda sunulmuştur:

1. Elektriksel parametreler,
2. Vuruş jeneratörü karakteristikleri,
3. Dielektrik sıvı parametreleri,
4. İşparçası malzemesi fiziksel özellikleri,
5. Elektrot malzemesi fiziksel özellikleri,
6. İşparçası ve elektrotun boyutsal ve geometrik özellikleri.

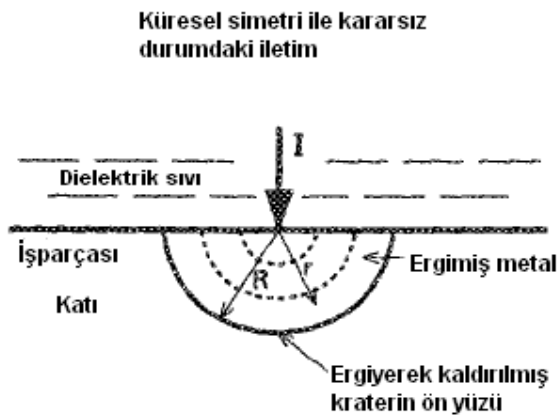
İşleme performansın değerlendirilmesinde kullanılan temel kriterler ise işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), bağıl aşınma ve yüzey pürüzlülüğüdür [2].

EEİ konusunda yayınlanmış deneysel ve teorik pek çok çalışma bulunmaktadır. 1960'lı yıllardan beri kullanılan bu yöntem ile ilgili yapılan araştırmalar sonucu pek çok nokta aydınlığa kavuşmuş ve farklı malzemeler için bu yöntemin etkin bir biçimde kullanımı sağlanmıştır.

Bu çalışmada EEİ yönteminin teorik modellenmesi ve oluşturulan model çerçevesinde çeşitli işleme parametreleri altında sürecin bilgisayar simülasyonu yapılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmasında, literatürde yapılan bazı deneysel çalışmalarda kullanılan parametreler kullanılmıştır. Simülasyon ve modelden elde edilen sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

DiBitonto vd. [3] yaptıkları çalışmada EEİ yönteminde işparçasında (katot) meydana gelen aşınmayı modellemişlerdir. İşparçası olarak çelik malzeme, takım elektrot olarak bakır ve dielektrik sıvı olarak gazyağı kullanılmıştır. 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, 5,6-560 μ s vuruş süresi, 1-10 μ s vuruş bekleme süresi aralıklarında değişen deneyler yapmışlardır. İşparçası malzemesinin ortalama yoğunluğu 7545kg/m³, ısı iletkenliği 56,1W/(mK), özgül ısı 575J/(kgK), ergime noktası 1808°K ve kaynama noktası 3159°K alınmıştır. Deneysel sonuçlar ve oluşturulan modelden elde edilen teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Oluşturulan modele göre geniş bir akım aralığında uygulanan gücün sabit bir miktarı işparçasına ulaşmaktadır. Model tek bir kıvılcım için geliştirilmiştir. İşparçasında iletim ile ısı transferi meydana gelmekte ve noktasal bir ısı kaynağından yayılmaktadır (Şekil 2.1). Model aynı zamanda işparçası malzemesi için işlenebilirlik ve optimum vuruş süresi gibi parametreleri işparçasının termofiziksel özellikleri cinsinden içermektedir. Çalışma sonucunda deneysel değerlere yakın teorik sonuçlara ulaşılmıştır. Ancak noktasal ısı kaynağı modeli, plazma kanalının sınır koşulları ile ilgili detaylı bilgi vermemektedir.



Şekil 2.1. İşparçasında meydana gelen erozyon (Noktasal ısı kaynağı modeli)

Patel vd. [4] yaptıkları çalışmada, EEİ yönteminde anot malzemesinde meydana gelen erozyonu modellemişlerdir. 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 malzemenin yüzeyinde Gauss dağılımlı ısı akısı olduğu kabul edilmiştir. Deneyle elde edilen sonuçlar teorik değerlerle karşılaştırılmış ve birbirleriyle uyumlu oldukları görülmüştür.

Eubank vd. [5] çalışmalarında EEİ’de değişken kütle ve silindirik plazmayı modellemiştir. Sıvı ortam içerisindeki kıvılcımın modellenmesi yapılmıştır. Model üç adet diferansiyel denklemden (akışkanlar dinamiği, enerji dengesi ve ışıma eşitliği) oluşmaktadır. Modelin sayısal çözümü plazma yarıçapını, sıcaklığını, basınç ve kütlelerini, vurum 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 [6] sıvı ortam içerisinde elektriksel boşalım sonucu ortaya çıkan kıvılcımın ısı-elektriksel modelini oluşturmuştur. Boşalım kanalındaki elektriksel iletim sonucu, Joule ısıtma etkisiyle açıklanan ısı yayılım meydana gelmektedir. Ortamın ve malzemenin ısı-fiziksel özelliklerine göre yayılan ısı miktarı değişmektedir. Makalede kullanılan modelde, plazma yarıçapı vurum süresi ve akıma bağlı bir fonksiyonla ifade edilmiştir. DiBitonto ve arkadaşlarının [3-5] çalışmalarında yer alan deneysel verileri ABAQUS/Standard adlı sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan programı kullanarak modellemişlerdir. Oluşturulan modelde iletim ile ısı transferi ve plazma kanalında oluşan ısı kaynağı dikkate alınmış, ancak sıvı ortamda konveksiyon (taşıma) ile ısı transferi ihmal edilmiştir. Deneysel verilere yakın teorik sonuçlar elde edilmiştir.

Kansal vd. [7] ANSYS Multiphysics (v5.4) kullanarak dielektrik sıvıya toz karışımı EEİ’nin iki boyutlu aksel simetrik modelini oluşturmuştur. Modelde, malzeme kaldırma mekanizması ve ısı dağılımı öngörmek için ısı kaynağının şekli ve boyutu (Gauss ısı dağılımı), sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri, işparçası, dielektrik sıvı ve

takım elektrot arasındaki enerji dağılımı, vurum ve bekleme süresi gibi bazı temel parametreler kullanılmıştır. Geliştirilen model öncelikle iş parçası 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 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada işparçası malzemesi olarak AISI D2 kalıp çeliği, dielektrik sıvı olarak ise gazyağı kullanılmıştır. Çizelge 2.1’de AISI D2 kalıp çeliğinin ısı özellikleri yer almaktadır. Değişik işleme koşullarında deneyler yapılmıştır. Çalışmadan elde edilen deneysel sonuçlar oluşturulan modelden elde edilen teorik sonuçlarla karşılaştırılmış ve birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir [7].

Çizelge 2.1. AISI D2 kalıp çeliğinin ısı özellikleri

Parametreler		Değer	
Ergime Sıcaklığı (T_m) [°C]		1710	
Yoğunluk (ρ) [kg / m ³]		7700	
Isıl Özellikler			
Sıcaklık (K)	Isıl İletkenlik (κ_T) (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

Çoğun vd. [8] EEİ’de metal tozu karışimli dielektrik sıvı kullanımında işparçası yüzey pürüzlülüğü, işparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, işparçası yüzey sertliği ve mikroyapısı gibi performans çıktılarının işleme parametreleri ile gösterdiği değişimi deneysel olarak incelemiştir. Çalışmada, metal tozu karışimli dielektrik sıvı kullanıldığında işleme hızının arttığı, işparçası yüzey pürüzlülüğünün ve mikro çatlakların azaldığı, işparçası yüzey tabaka kalınlıklarının azaldığı, aşınma ve

korozyon dayanımının arttığı, daha az gözenekli ve malzeme tozları ile alaşımlanmış bir yüzey elde edildiği sonucuna varılmıştır.

Shuvra Das vd. [9] tek bir kıvılcım süresince uygulanan güç parametresini kullanarak sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme yapmışlar. Çalışmada DEFORM (v7.1) ticari programını kullanarak zamana bağlı ısı analiz yapılmış ve sıcaklık dağılımı, kaldırılan işparçası malzeme miktarı, gerilme dağılımı gibi değerlere ulaşılmıştır. Sonuçlar deneysel verilerle karşılaştırılmış ve yakın sonuçlar elde edilmiştir.

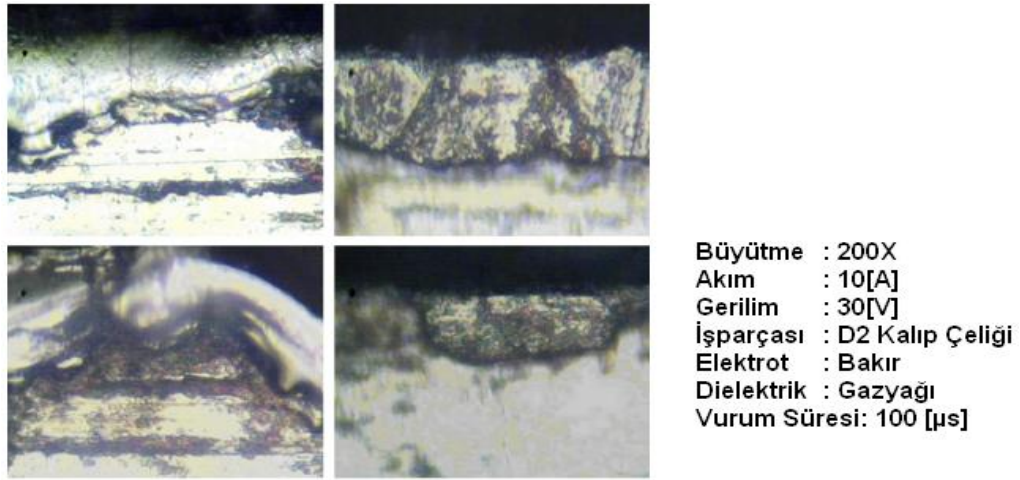
Yadav vd. [10] EEİ'de oluşan ısı gerilmeleri incelemişlerdir. İşleme sonucunda bölgesel olarak ısı gerilmeler oluşmaktadır. Bu gerilmeler mikro seviyede çatlaklara neden olmaktadır. Bu da malzemenin dayanımını ve yorulma ömrünü azaltmaktadır. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak farklı işleme koşullarında çelik işparçası için sıcaklık ve ısı gerilme dağılımları hesaplanmıştır.

Van Dijck ve Snoeys [11] çalışmalarında EEİ'de boşalımlara bağlı olarak kaldırılan 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.

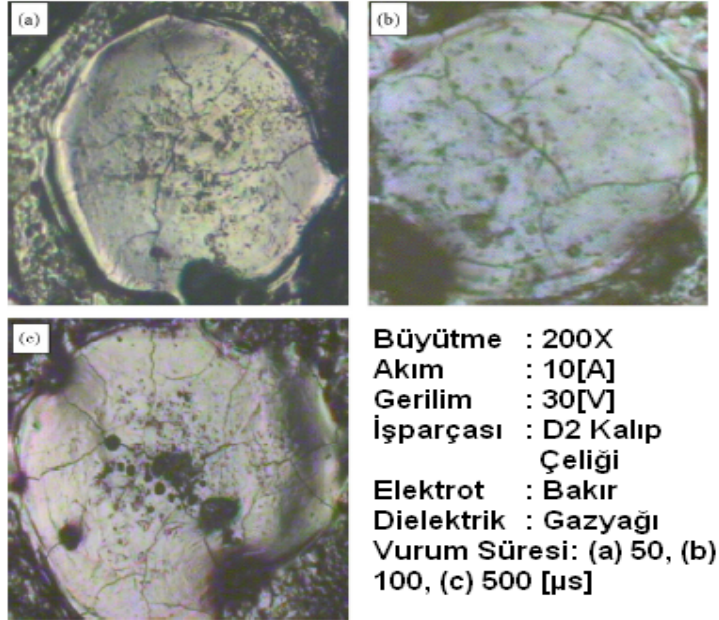
Salah vd. [12] çalışmalarının ilk bölümde EEİ'de meydana gelen fiziksel olayların matematiksel modellemesi yapılmıştır. Burada işparçasına plazmadan iletilen ısı girdisi, işparçasında meydana gelen iletim ile ısı transferi, sınır koşulları formülize edilmiştir. İkinci bölümde eşitliklerin çözümü için kullanılan nümerik metotlar verilmiştir. Sonraki bölümlerde ise elde edilen sonuçlar verilmiştir. Deneysel ve teorik sonuçlar birbiri ile uyumlu çıkmıştır.

Kumar [13] EEİ'de işparçası yüzeyinde meydana gelen deformasyona ve mikro çatlaklara neden olan ısı gerilmeleri incelemiştir (Resim 2.1 ve Resim 2.2). Oluşturulan model, aksel simetriktir. İşparçası homojen ve izotropik varsayılmıştır. Isı transferi iletim yolu ile olmakta olup ışıma ile ısı transferi ihmal edilmiş ve analiz tek bir kıvılcım için yapılmıştır. Vurum süresince plazma yarıçapı sabit kabul

edilmiştir. Modelde sürekli olmayan ısı iletim denklemi türetilmiştir. Gerilim fonksiyonlarının hesaplanmasında ısı iletim denklemi kullanılmıştır. Plazma kanalı yarıçapı, plazma gücü ve vurma süresi ile doğru orantılıdır. Çalışmada, plazma kanalında oluşan toplam enerjinin %17-%20'sinin işparçasına ulaştığı varsayılmıştır. Çalışma sonucunda, farklı işleme parametreleri altında plazma yarıçapı, krater yarıçapı, işparçası yüzeyinde meydana gelen sıcaklık dağılımı ve aksenal gerilmelere ulaşılmıştır.



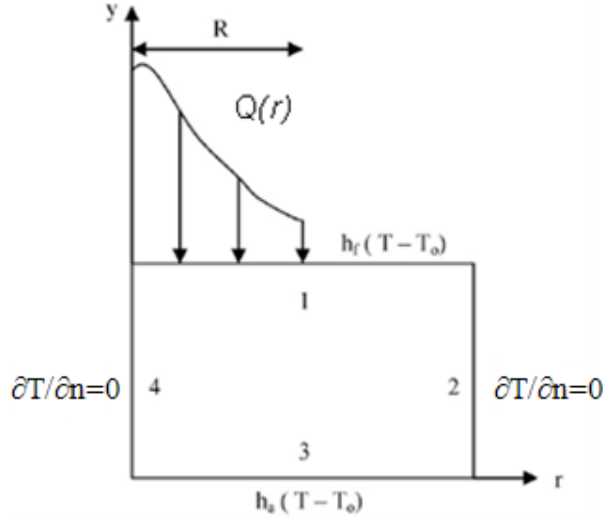
Resim 2.1. Kraterin kesit görünüşü ve oluşan mikro çatlaklar



Resim 2.2. Kraterde oluşan mikro çatlaklar

Singh ve Ghosh [14] EEİ'de ergime sonucu kaldırılan malzeme miktarını matematiksel modelleme ile hesaplamıştır. Çalışmalarında literatürde yer alan, kıvılcım oluşumu ve plazma ile ilgili kabulleri ve formülasyonları kullanmışlardır. Kısa süreli vurumlarda ($<100\mu$ s) işleme mekanizmasında oluşan elektrostatik kuvvetlerin işlemede oldukça önemli bir faktör olduğu sonucuna varılmıştır. Çalışmada metal yüzeyine etkiyen elektrostatik kuvvetler ve bu kuvvetlere bağlı olarak oluşan gerilim dağılımı incelenmiştir.

Allen ve Chen [15] EEİ'de, her bir kıvılcım için işparçasında meydana gelen işlemeyi simule etmişlerdir. Çalışmalarında, yüksek ergime sıcaklığı ve yüksek ısı iletkenlik özelliklerinden dolayı molibden kullanılmıştır. Tek kıvılcımı simule eden ısı-sayısal modelde işparçasından kaldırılan malzeme miktarı incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi kullanarak iki boyutlu zamana bağlı ısı analiz yapılmıştır. Eksenel simetrik işparçasında meydana gelen iletim ile ısı transferi için, malzeme yoğunluğunu " ρ ", özgül ısı sığasını " c ", sıcaklığı " T ", zaman " t " ve ısı iletkenliği " k " içeren bir diferansiyel denklem kullanılmıştır.



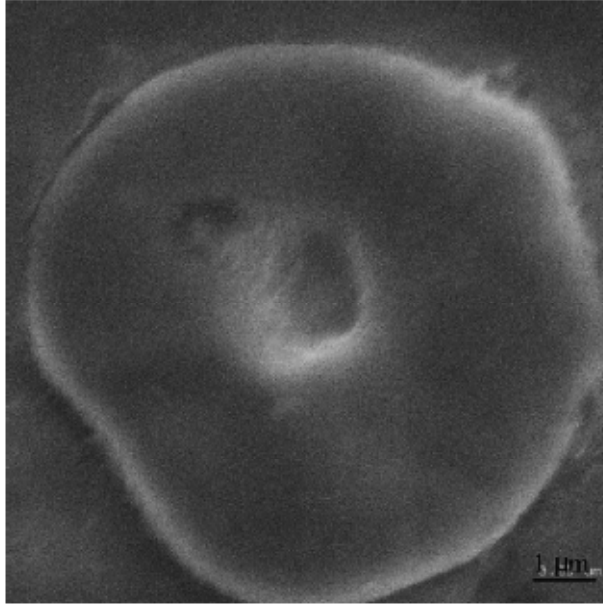
Şekil 2.2. EEİ işleminin eksenel simetrik modeli

Şekil 2.2'den de görüldüğü üzere işparçasının üst yüzeyinde vurum süresi boyunca Gauss dağılımı tipinde ısı oluşmaktadır. Üst yüzeyde dielektrik sıvıdan, alt yüzeyde ise ortam sıcaklığı vasıtasıyla taşınım ile ısı transferi meydana gelmektedir (1 ve 3 numaralı yüzeyler). 2 ve 4 numaralı yüzeyler izole edilmiştir, dolayısıyla herhangi bir ısı transferi oluşmamaktadır. Burada “n” 2 ve 4 numaralı yüzeylere dik yönü göstermektedir. $Q(r)$ işparçasına giren ısı akısıdır ve vurum süresi boyunca etkimektedir. Vurum bekleme süresi (pause time) boyunca değeri sıfırdır. Kullanılan sınır şartları;

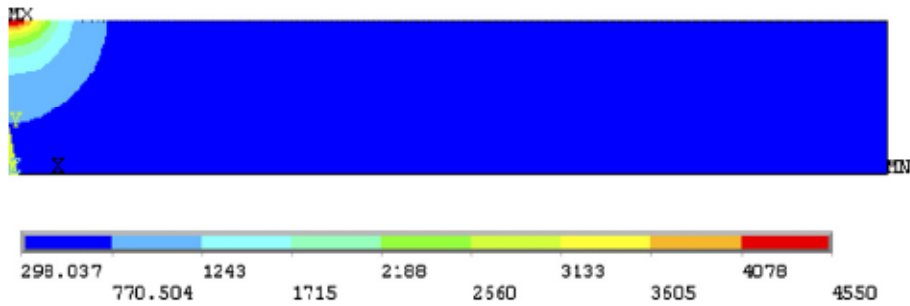
- Eğer sınır 1 üzerinde $r \leq R$ ise $Q(r)$
- Eğer sınır 1 üzerinde $r > R$ ise $h_f(T-T_0)$
- Sınır 3 üzerinde $h_a(T-T_0)$
- Sınır 2 ve 4 üzerinde $\partial T/\partial n=0$ 'dir.

Yapılan ısıl analizde işparçası üzerinde meydana gelen sıcaklık dağılımı incelenmiş ve molibdenin ergime noktası olan 2896°K sıcaklığın üzerindeki bölgelerin ergidiği kabul edilmiştir. Yapılan yapısal analizde ise soğuma işlemi başladıktan sonra meydana gelen ısıl gerilmeler incelenmiştir. Resim 2.3'de 30W güç ve $2\mu\text{s}$ vurum süresi altında işparçası yüzeyinin SEM fotoğrafı, Şekil 2.3'da ise aynı koşullarda

işparçasında oluşan sıcaklık dağılımı gözükmemektedir. Isıl sayısal modelden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlara yakınlık göstermiştir.



Resim 2.3. Molibden işparçası üzerinde tek bir kraterin SEM fotoğrafı (güç = 30W, vurum süresi = 2 μ s)



Şekil 2.3. Isıl etki sonucu oluşan sıcaklık dağılımı (güç = 30W, vurum süresi = 2 μ s)

Shankar vd. [16]'nin yaptığı çalışmada, EEİ'de meydana gelen ısı transferi ve kıvılcım profilleri incelenmiştir. Elektrotlarda meydana gelen ısı transferinin sadece iletim yoluyla olduğu kabul edilmiştir. Sıcaklık dağılımını incelemek için önceki çalışmalarda da [13] yer alan aksenal simetrik ısı transferi denklemi kullanılmıştır.

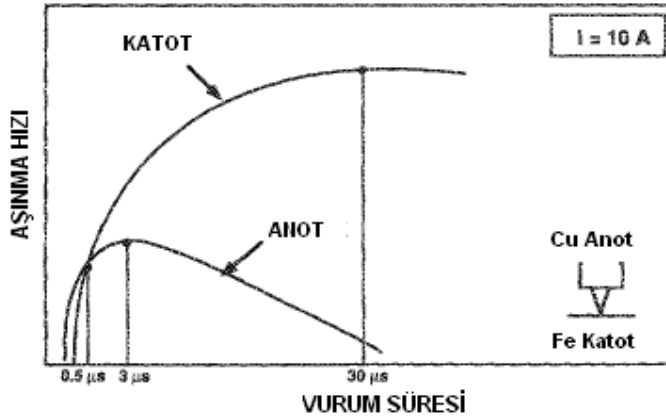
Sonlu elemanlar yönteminin kullanılmasında Galerkin metodu kullanılmıştır. Deneysel ve teorik sonuçların birbiri ile örtüştüğü görülmüştür.

Erden [17] EEİ'de elektrot malzemelerinin işleme performansı üzerine etkilerini incelemiştir. Bunun için izoleli tek bir kıvılcım fiziksel ve matematiksel modellenmiştir. Boşalımda üç faz (kırılma (iyonizasyon), boşalım ve aşınma) incelenmiştir. Dielektrik sıvı olarak su ve gazyağının, takım ve işparçası olarak farklı malzemelerin kullanıldığı deneyler yapılmıştır. Demir, bakır, alüminyum, pirinç gibi farklı malzemelerin dielektrik kırılması (iyonizasyon), boşalım ve aşınma gibi farklı fazlara etkileri incelenmiştir. Deneysel verilerden yararlanarak boşalım kanalı yarıçapını veren fonksiyon geliştirilmiştir. Boşalım kanalı yarıçapı; boşalım gücü, süre (boşalım) ve deneyler sonucu elde edilen katsayı ile doğru orantılıdır. Makalede ayrıca oluşan elektriksel kuvvetlerin önemi tartışılmış ve aşınma fazı için bazı basit matematiksel eşitlikler verilmiştir.

3. EEİ'DE KIVILCIM OLUŞUMUNUN MODELLENMESİ

3.1. Teori

EEİ yönteminin temel elemanları iki elektrot (takım ve işparçası) ve ortamda bulunan dielektrik sıvıdır. İşleme sırasında elektrotlar arasındaki yaklaşık 10-40µm mesafede uygulanan yüksek gerilim dielektrik sıvıda bozulmaya (kırılma, iyonizasyon) neden olmaktadır. Uygulanan gerilimin belirli seviyede düşmesi ve ayarlanan akımın belirli değere yükselmesiyle dielektrik sıvı içerisinde bir plazma kanalı oluşur. Vurum süresince plazma kanalı gaz kabarcıklarıyla çevrelenir. Ortamdaki yoğun dielektrik sıvı plazmanın büyümesini sınırlamaktadır. Enerji (UIt) (U boşalım gerilimi, I boşalım akımı, t boşalım süresi) çok küçük bir hacme yoğunlaşarak uygulanmaktadır. $3J/mm^3$ den fazla olan enerji yoğunluğu, bölgesel plazma sıcaklığının $40000^{\circ}K$ 'den daha yüksek olmasına neden olmaktadır. Vurum süresi boyunca plazmada oluşan yüksek enerji ve basınç, ısı iletim yoluyla elektrotlarda belirli oranda buharlaşmaya ve ergimeye sebep olmaktadır. Gerilimin uygulanmasını takiben, hızla hareket eden elektronların emilimiyle ilk olarak anot malzemesi hızlı bir şekilde erir. Ancak, birkaç mikro saniye sonra tekrar katılaşma başlar. Bunun anot yüzeyindeki bölgesel ısı akısındaki azalma sonucu, anot yüzeyindeki plazma yarıçapındaki genişlemeye bağlı olduğu ileri sürülmüştür [3]. Takımdan kopan elektronlar, iş parçasından kopan iyonlara göre çok daha küçük kütleli olduklarından elektrik alanı içerisinde çok daha büyük hız kazanır (çok daha büyük momentum) ve karşı yüzeyde daha etkili olur. Bunun sonucunda işparçasında meydana gelen malzeme kaybı daha büyük olur. Şekil 3.1'de vurum süresi boyunca anot ve katotta (takım ve işparçası) meydana gelen aşınma gözükmemektedir.



Şekil 3.1. Farklı vurum sürelerinde anot ve katot aşınma hızları (ölçüsüz).
Maksimum anot aşınması $3 \mu\text{s}$, maksimum katot aşınması ise $30 \mu\text{s}$ 'de olmaktadır (10 A akımda, anot bakır, çelik katot) [3]

3.2. Matematiksel Modelleme

3.2.1. Kabuller

EEİ, fiziksel ve kimyasal birtakım olayların bir araya gelmesiyle oluşan oldukça karmaşık bir işleme yöntemidir. Bu çalışmada da oluşturulan modeli basitleştirmek ve çözülebilir hale getirebilmek amacıyla bazı kabuller yapılmıştır.

1. Model tek bir kıvılcım için geliştirilmiştir.
2. İşparçası malzemesi homojen ve izotropiktir (tüm doğrultularda aynı özellikleri gösterir).
3. İşparçasındaki ısı transferi iletim yoluyla olmaktadır.
4. Kıvılcım elektrot yüzeyinde düzenli dairesel bir ısı kaynağı oluşturur ve her deneyde kendi içinde sabittir.
5. Plazma kanalı düzgün silindirik bir şekle sahiptir.
6. Boşalimler sabit akımın içinden aktığı buharlaşmış bir ortamda olmaktadır.
7. EE işlemi işparçası eksenlerinde simetriktir. Dolayısıyla, analizde zamandan tasarruf sağlayacağı ve genel sonucu olumsuz yönde etkilemeyeceği için dörtte bir (çeyrek) model kullanılmıştır.
8. Işıma vb. bağlı olarak oluşan ısı kayıpları ihmal edilmiştir.

9. İşleme esnasında oluşan elektriksel kuvvetler ihmal edilmiştir.

3.2.2. Isıl model

İşparçası ve takım elektrot arayüzünde plazma kanalı oluşmaktadır. Plazma kanalında elektriksel akıma bağlı olarak oluşan yüksek sıcaklık işparçasından vurum süresi boyunca talaş kalkmasını sağlamaktadır. Vurum süresi, plazma gücü ve plazma kanalı genişliği, tek bir kıvılcımın oluşturduğu krater büyüklüğünde birincil etkiye sahiptir [18].

Literatürde yer alan ilk çalışmalarda ısı kaynağı noktasal bir modelle ifade edilmiştir [3, 11, 19].

$$T(r, t) = \frac{P}{2\pi\kappa_T r} \operatorname{erf} \left[\frac{r}{2(\alpha t)^{1/2}} \right] \quad (3.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte P plazma gücünü, α ise ısı yayılmayı (thermal diffusivity) ifade etmektedir. İşparçası yüzeyinde noktasal ısı kaynağı yerine, akım ve vurum süresine bağlı olarak genişliği değişen plazma kanalı boyunca bir ısı kaynağının etkimesi daha gerçekçi sonuçlar vermiştir. Bu çalışmada kullanılan modelde de işparçasına etkileyen ısı kaynağı genişleyen plazma kanalı boyunca tanımlanmıştır. Takım ve işparçasında ısı transferi iletim yoluyla olmaktadır. Isı kaynağındaki ısı dağılımı (Şekil 3.2) Gauss tipinde varsayılmıştır.

Eksenel simetrik katı yüzeydeki iletim ile ısı transferi denklemi şöyledir:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(K r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (3.2)$$

Burada ρ yoğunluk, C_p özgül ısı, K işparçasının ısı iletkenlik katsayısı, T sıcaklık, t zaman ve r ve z koordinat eksenleridir (Şekil 3.2).

$$R\text{'nin dışında kalan bölümde; } K \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_0) \quad (3.4)$$

$$B_2, B_3 \text{ ve } B_4 \text{ sınırları için ise; } \frac{\partial T}{\partial n} = 0 \text{ olur.} \quad (3.5)$$

Burada, h işparçası ve dielektrik sıvı arasındaki ısı transfer katsayısı, T_0 oda sıcaklığına eşit olan ilk sıcaklık değeri, T sıcaklık değeri, P_p kıvılcıma bağlı meydana gelen plazma gücü, T_p ise plazma sıcaklığı ve “n” B_2, B_3, B_4 numaralı yüzeylere dik yönü göstermektedir. Bu yüzeyler izole edilmiş olup, ısı transferi oluşmamaktadır [7, 20].

3.2.3. Enerji oluşumu ve plazma sıcaklığı

EEİ’de ortam sıcaklığında bulunan elektrotlar, birkaç mikrosaniyede oluşan plazmanın etkisiyle bölgesel olarak ergime ve buharlaşma sıcaklıklarına erişir. Her bir vuruumdaki (kıvılcımdaki) plazma gücü (P_p), uygulanan akım şiddeti (I) ve gerilim değerinin (V) çarpımı sonucu elde edilir [9, 11, 21, 22].

$$P_p = I \times V \quad (3.6)$$

Plazmada oluşan enerjinin bir kısmı dielektrik sıvı içerisinde kaybolmakta, bir kısmı anot tarafından bir kısmı da katot tarafından iletilmektedir. Enerjinin dağılım oranlarının hesaplandığı pek çok çalışma yapılmıştır [3, 4, 16]. Boşalım gücü ve vuruş süresi gibi işleme parametrelerin yüksek olması işleme performansını artırmakta ve aktif olmayan kıvılcım miktarını azaltmaktadır [23].

İşleme mekanizmasında, dielektrik sıvı içerisine daldırılan işparçası ve takım elektrot arasında, öncelikle elektrik enerjisi ısı enerjisiye (ısı kaynağı) dönüşmektedir. Oluşan bu ısı kaynağı sonucu, işparçası yüzeyine vuruş süresi boyunca sabit bir sıcaklık değerinin uygulanması mantığı, krater şekillerinin hesaplanmasında kabul edilebilir bir yaklaşımdır [24]. Literatürde yer alan çalışmalarda, işleme esnasında plazma kanalının merkezinde oluşan maksimum sıcaklığın malzemenin kaynama sıcaklığının üzerinde bir sıcaklığa eriştiği ifade edilmektedir [9, 11, 13, 24, 25]. Çelik ve benzeri

malzemelerde bu değer 3000°C'nin üzerindedir. Plazmada oluşan 3J/mm³ enerji yoğunluğunda sıcaklık değeri 40000°K'i aşmaktadır [3]. Kansal vd. alışmalarında, plazma kanalının merkezinde oluşan sıcaklık değerinin diğer deney parametrelerine ve plazmada oluşan toplam gücün işparçasına erişim oranlarına bağlı olarak 3000 – 6000°K arasında değiştiğini belirtmiştir [7]. Bir başka çalışmada ise plazma sıcaklığının 8000 ila 12000°C arasında veya 20000°C' den daha yüksek bir sıcaklığa eriştiği ifade edilmektedir [26, 27].

Bu çalışmada oluşturulan modelde plazma sıcaklığı sırasıyla 3000°C, 5000°C, 8000°C ve 10000°C olarak hesaba katılmıştır. Bunların yanı sıra akım ve gerilim değerlerinin çarpımından elde edilen plazma gücü değeri (Watt) programa girilerek işparçasında meydana gelen sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Elde edilen sıcaklık dağılım değerleri kullanılarak, işparçasından her bir vuruşda kaldırılan malzeme miktarı hesaplanmış ve bu değerler deneysel verilerle karşılaştırıp yorumlanmıştır.

3.2.4. Boşalım kanalı (plazma) yarıçapı

Araştırmacılar plazma yarıçapının hesaplanması için deneysel verilere dayanarak çeşitli bağıntılar türetmişlerdir. Erden, çeşitli malzemeler için plazma yarıçapını, boşalım gücü ve boşalım süresi cinsinden ifade etmiştir.

$$R(t) = K P^m t^n \quad (3.7)$$

Burada R(t) zamana bağlı olarak değişen plazma yarıçapı, P boşalım gücü, t süre, K, m ve n ise deneysel sabitlerdir. Buna göre,

$$K = L / (1 \times M + 0,5 N); \quad m = M + 0,5 N; \quad n = N' \text{ dir.} \quad (3.8)$$

Burada “l” elektrotlar arasındaki mesafeyi; L, M ve N ise malzemeye göre değişen sabitleri ifade etmektedir (izelge 3.1) [17].

Çizelge 3.1. Malzemeye göre değişen deneysel L, M, N değerleri [17]

Elektrot	L	M	N
Pirinç	0,0187	0,524	0,291
Alüminyum	0,0474	0,559	0,334
Demir	0,0948	0,624	0,371

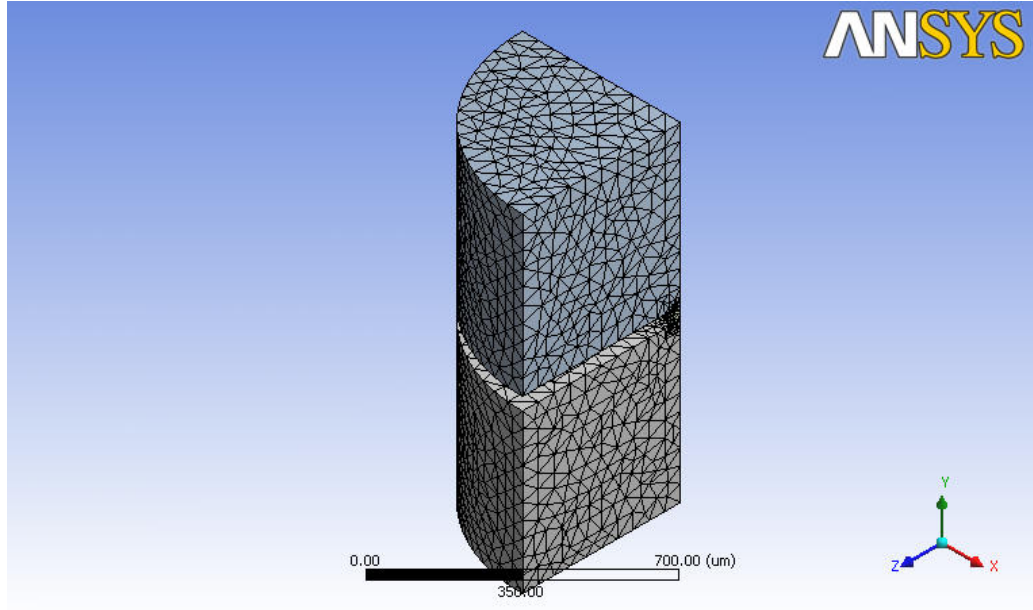
Ikai ve Hashiguchi, plazma yarıçapını değişen akım yoğunluğu ve vurum süresiyle ifade etmiştir [28]. Buna göre,

$$R = 2,04 \times 10^{-3} I^{0,43} t^{0,44} \quad (3.9)$$

Bu çalışmada, deney süresince uygulanan akım ve vurum süresi değerine bağlı olarak hesaplanan ve sabit olduğu kabul edilen bu plazma yarıçapı eşitliği kullanılmıştır.

3.2.5. Sonlu elemanlar yöntemi ile modelleme

Sonraki bölümlerde detaylı olarak modelleme ve simülasyon aşamalarının anlatıldığı ANSYS Workbench (v.11) ticari programı kullanılmıştır. EEİ yöntemi zamana bağlı ısı analiz ve sonlu elemanlar metodu kullanılarak simüle edilmiştir. Öncelikle 2-B model oluşturulmuş 0,5mm x 0,5mm boyutlarında işparçası ve takım çizilmiştir. Her bir deney için, Ikai ve Hashiguchi'nin [28] formülüne göre hesaplanan plazma yarıçapı bulunmuştur. 2-B çizim, simetri ekseninde 90° döndürülerek çeyrek katı model oluşturulmuştur (Şekil 3.4). Oluşturulan modelde işparçası ve takım, dört yüzlü (tetrahedron), altı köşeli (hex dominant), vb. geometrilerde elemanlara bölünebilir. Uygun olan ağ biçimini ve boyutunu program otomatik olarak (oluşturulan katı model veya 2-B model geometrisine göre değişen) seçebilmekte veya kullanıcının tercihinin bırakmaktadır. Eleman boyutları ne kadar küçük seçilirse elde edilecek sonuç o kadar gerçeğe yakın olur. Ancak eleman boyutunun küçülmesi analiz süresini çok uzatmaktadır. Bu nedenle fiziksel değişimin meydana geldiği bölgede eleman boyutunu küçültmek kısa analiz süresi açısından gereklidir.



Şekil 3.4. Dört yüzlü (tetrahedron) ağlara bölünmüş 3-B model

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Farklı işleme parametrelerinde üç farklı deneysel çalışmada elde edilen sonuçlar, bu çalışmada yapılan analiz sonucu elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır.

Özgedik ve Çoğun [1] deneysel çalışmalarında işparçası malzemesi olarak SAE 1040 çeliği, takım elektrot olarak ise silindirik elektrolitik bakır kullanmıştır. Deneysel çalışmalar, EDM M 25 A tipi EEİ tezgahında gerçekleştirilmiştir. Daha önce yapılan bu çalışmada kullanılan deneysel parametreler Çizelge 4.1’de, deneyde kullanılan çelik işparçasının fiziksel özellikleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Deney parametreleri [1]

Deney Parametreleri	Değerler
Boşalım Akımı (I_d) [A]	3, 6, 12, 25
Vurum Süresi (t_d) [μs]	12, 25, 50, 100
Kutuplama	Elektrot (+), İşparçası (-)
Bekleme Süresi (δ) [μs]	50
Dielektrik Sıvı	Gaz Yağı (Kerosene)
İşparçası Malzemesi	Çelik (SAE 1040)
Elektrot Malzemesi	Elektrolitik Bakır
İşleme Derinliği [mm]	6,5

Çizelge 4.2. Çelik malzemeler için fiziksel özellikler

Parametreler	Değer
Ergime Sıcaklığı (T_m) [°C]	1535
Isıl İletkenlik (κ_T) [W / mK]	56,1
Özgül Isı (C_p) [J / kgK]	575
Yoğunluk (ρ) [kg / m ³]	7545

İşleme esnasında dielektrik sıvı ve işparçası arasında temas eden yüzeylerde taşınım ile ısı transferi meydana gelir. Bu çalışmada çelik malzeme ve dielektrik sıvı olarak

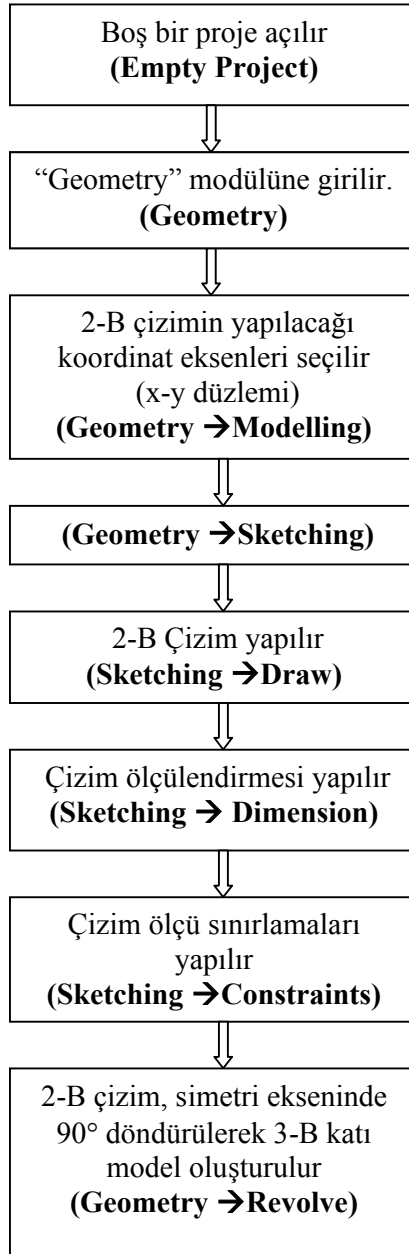
gazyağı arasında taşınım ile meydana gelen ısı transfer katsayısı $10000 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ olarak alınmıştır [10]. Plazma kanalı buharlaşmış sıvıdan oluşmaktadır. Isıl iletkenliği $\kappa_1=0,06 \text{ W}/(\text{mmK})$, yoğunluğu $\rho =1,5 \times 10^{-36} \text{ kg}/\text{mm}^3$ ve özgül ısısı $C_p=15000 \text{ J}/(\text{kgK})$ 'dir [6].

5. BİLGİSAYAR ORTAMINDA MODELLEME VE ANALİZ

ANSYS fiziksel problemlerin çözümünde kullanılan, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak analiz yapan bir paket programdır. Statik, dinamik, yapısal analizler (lineer ve lineer olmayan); akustik, elektromanyetik problemler; ısı transferi ve akışkanlar mekaniği problemlerinin çözümünde kullanılır. Analizler üç kademe gerçekleştirir. Bunlar; problemin tanımlanması (preprocessing), yüklerin ve sınır şartlarının atanması, çözümün gerçekleştirilmesi (solution) ve sonuçların değerlendirilmesidir (postprocessing).

5.1. Modelleme ve Problemin Tanımlanması

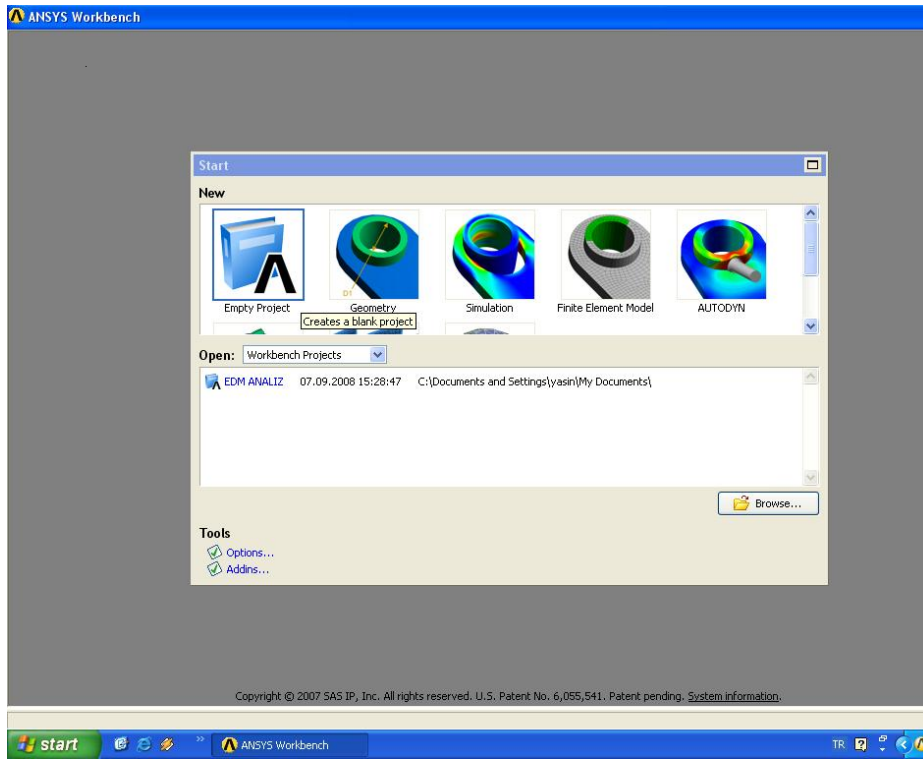
Çalışmada kullanılan yazılıma modelleme aşamasında bilgi girişlerini ve sekmeleri gösteren akış diyagramı Şekil 5.1' de çizilmiştir.



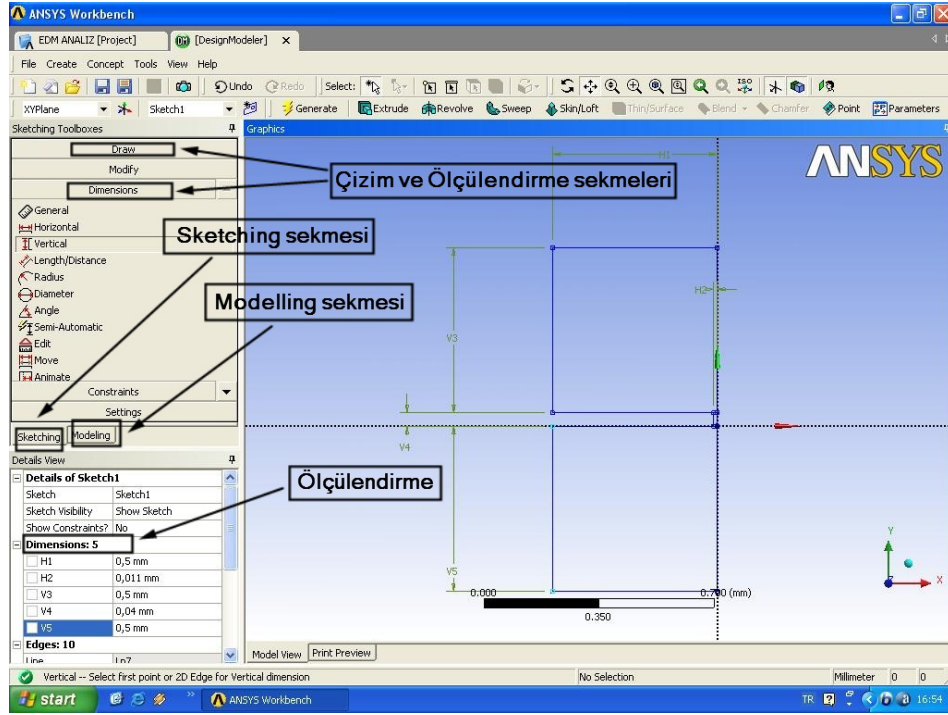
Şekil 5.1. Bilgi girişi ve sekmelerin akış diyagramı

Ansys Workbench programını çalıştırıldığında ilk olarak Şekil 5.2’de görülen pencere açılmaktadır. Burada, “Empty Project” sekmesi boş bir çalışma sahası (proje) açılmasını sağlar. Çalışmaya ait geometri, veri ve simülasyon dosyalarının hepsini açar ve proje ile birlikte yapılan tüm çalışmalarını kaydeder. “Geometri”

sekmesi geometrik modelin oluşturulduğu modüldür. “Simulation” sekmesi analizin yapıldığı ve sonuçların görüntülediği modül, “CFX Mesh” sekmesi ise yüksek kalitede (daha sıkı) elemanlara bölme işleminin yapıldığı modüldür. “Geometri” sekmesi açıldığında Şekil 5.3’de de görüldüğü gibi açılan pencerede (sol orta kısımda) “modelling” ve “sketching” sekmeleri vardır. “Modeling” sekmesi aktif iken ekranın sol bölümünde model ağacı (tree outline) bulunur. Bu modelin geçmişini, yani işlem tarihini gösterir. Yapılan her işlem burada bir ağacın dallarına benzer şekilde gösterilir. Adımların takibi ve modelde düzeltme yapabilmek için oldukça gerekli bir sekmedir. “Sketching” sekmesinde çizim, ölçülendirme ve ölçü sınırlamaları yapılır.

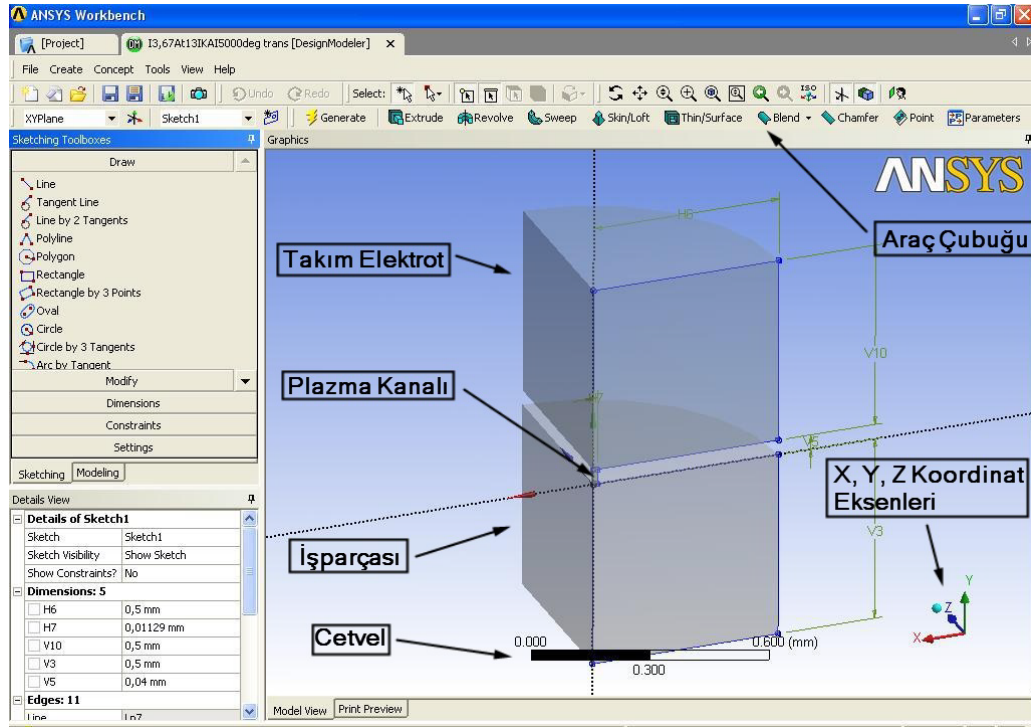


Şekil 5.2. ANSYS Workbench açılış penceresi



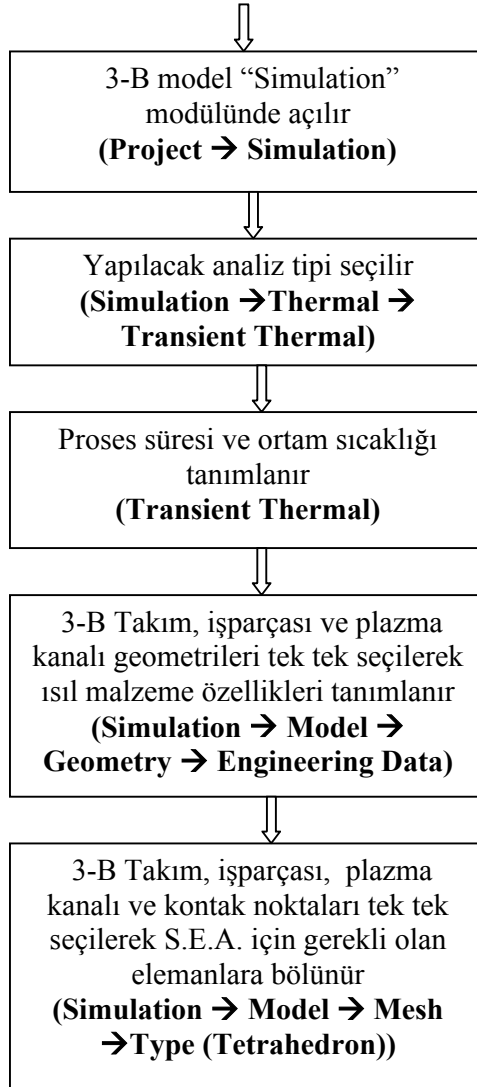
Şekil 5.3. Geometrik model (design modeler) ekranının tanıtımı ve oluşturulan 2-B model

Çizilen 2-B model, y ekseninde 90° döndürülerek, çeyrek katı model oluşturulur. Oluşturulan model üç parçadan oluşmaktadır: İşparçası, takım ve plazma kanalı (Şekil 5.4). Model Ansys'in "Design Modeler" modülünde çizilebileceği gibi diğer, tasarım programları ile çizilip Ansys'e aktarılabilir.



Şekil 5.4. Oluşturulan 3-B katı model

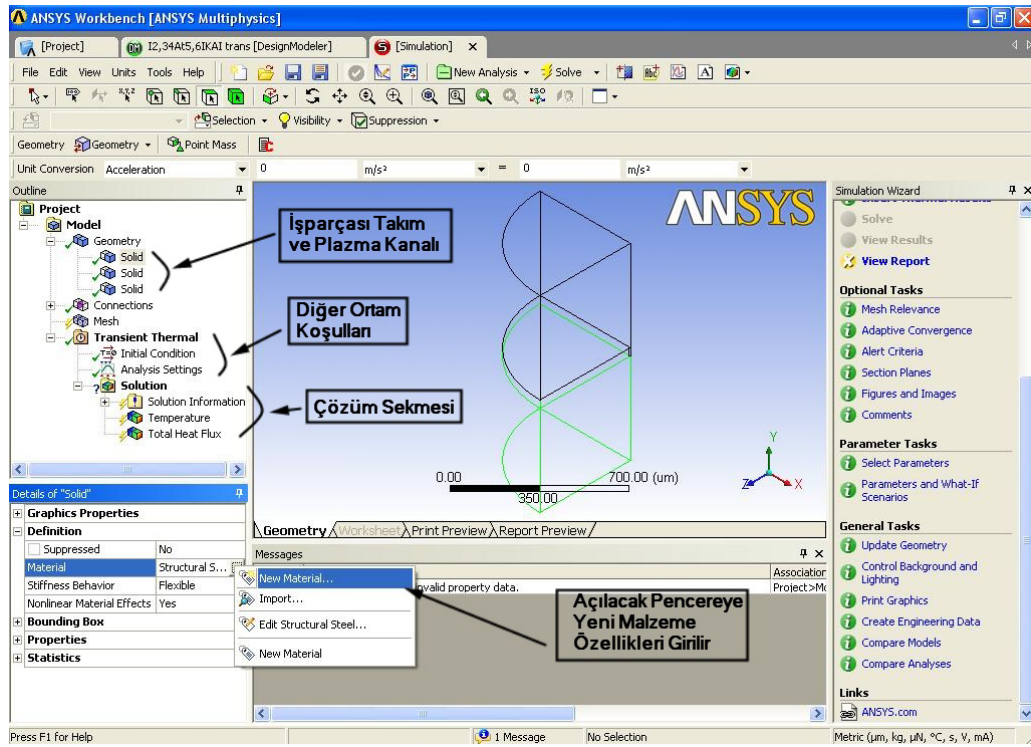
5.2. Malzeme Özelliklerinin Girilmesi ve Modeli Elemanlara Bölme



Şekil 5.5. Bilgi girişi ve sekmelerin akış diyagramı

Şekil 5.5’de yazılıma bilgi girişlerini ve sekmeleri gösteren akış diyagramı yer almaktadır. Model oluşturulduktan sonra simülasyon modülüne geçilir. Simülasyon sekmesine tıklandıktan sonra açılan ekranın sağ bölümünde ne tip bir analiz yapılacağı sorulmaktadır. Uygun olan işaretlenir. Bu çalışmada yapılan, zamana bağlı ısı (transient thermal) analizdir. Bu işaretlendikten sonra sağ alt bölüme toplam süre ve ortam sıcaklığı değerleri girilir. Takiben program otomatik olarak zamana

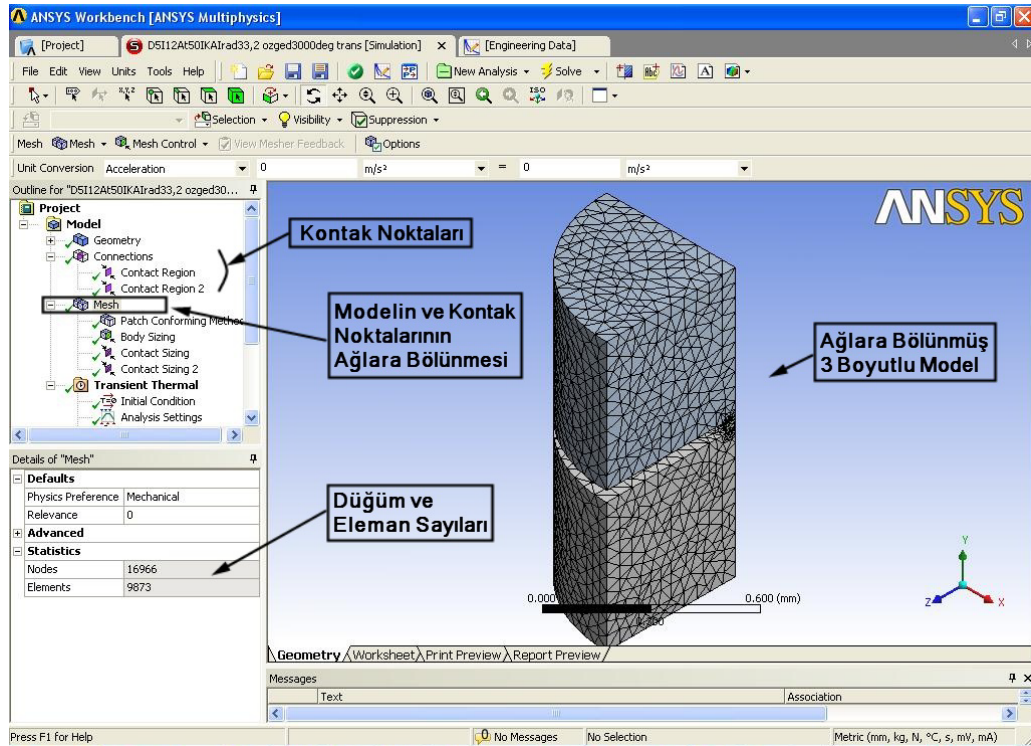
bağlı ısı analiz için, analiz ayarları, başlangıç koşulları ve çözüm sekmesinde gerekli olan analiz parametrelerini araştırmacının girmesi için ekranın sol bölümünde yer alan model ağacına ekler. Standart parametreler haricinde başka girdiler eklemek kullanıcının elindedir. Simülasyon modülüne aktarılan malzemeler tek tek seçilip (işparçası, elektrot ve plazma kanalı), “4. ve 2. Bölüm”de ayrıntıları verilen ısı malzeme özellikleri girilir (Şekil 5.6). 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.



Şekil 5.6. Modele malzeme özelliklerinin tanımlanması

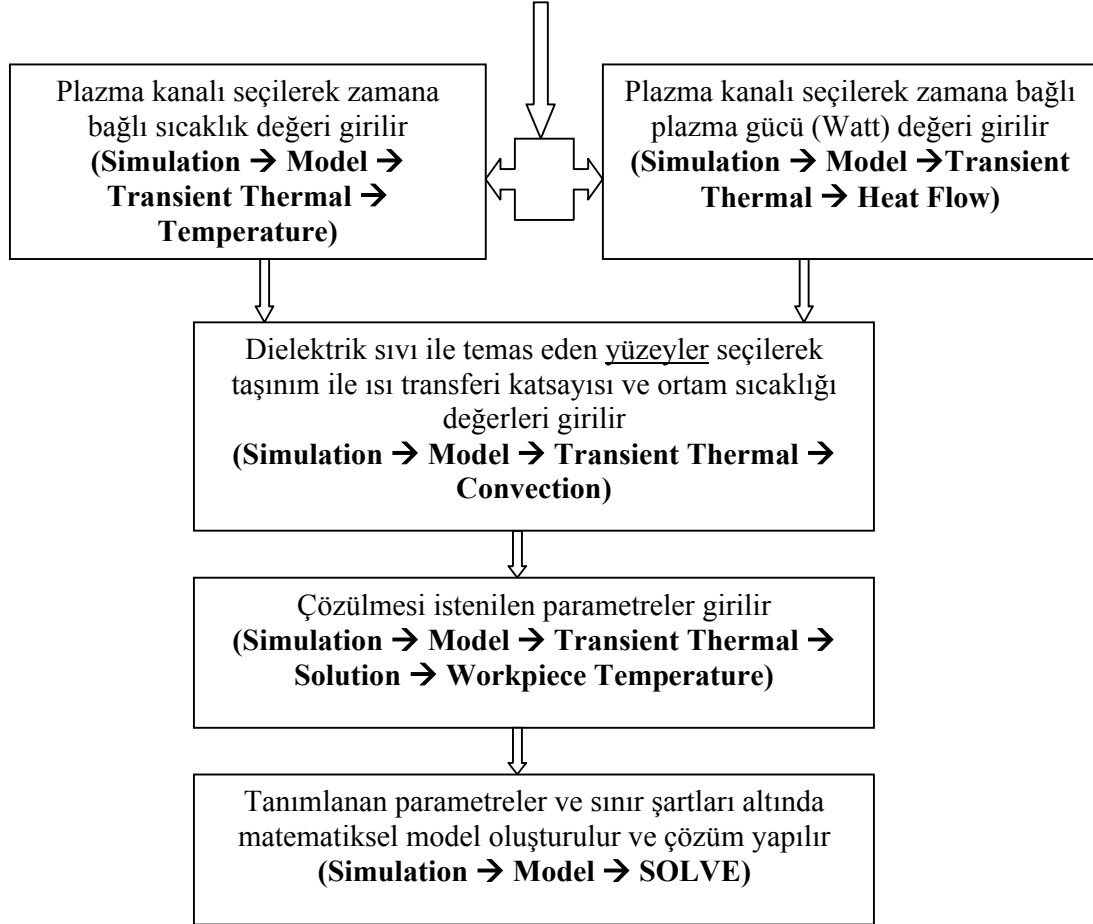
Malzeme özellikleri tanımlandıktan sonra modeli elemanlara bölme işlemine geçilir. Burada program elemanlara bölme işlemi otomatik kendisi ayarlayabilmekte ya da ağ ölçülerini ve çeşitlerini kullanıcının tercihine bırakmaktadır. Çalışmada tetrahedron (dört üçgen yüzlü geometrik şekil) kullanılmıştır. Elemanların üçgen

şeklinde parçalara bölündüğünde, bölünen eleman sayısını artırmakta, diğer seçenekler olan dörtgen veya altıgen elemanlara bölünmesine göre daha hassas sonuçlar vermektedir. Bu nedenle “tetrahedron” eleman tercih edilmiştir. Her bir ağ boyutu ise 0,05mm girilmiştir. Plazma kanalının bulunduğu kontak noktalarında daha hassas çözüm elde edebilmek amacıyla her bir eleman boyutu 0,009mm olarak programa girilmiştir (Şekil 5.7).



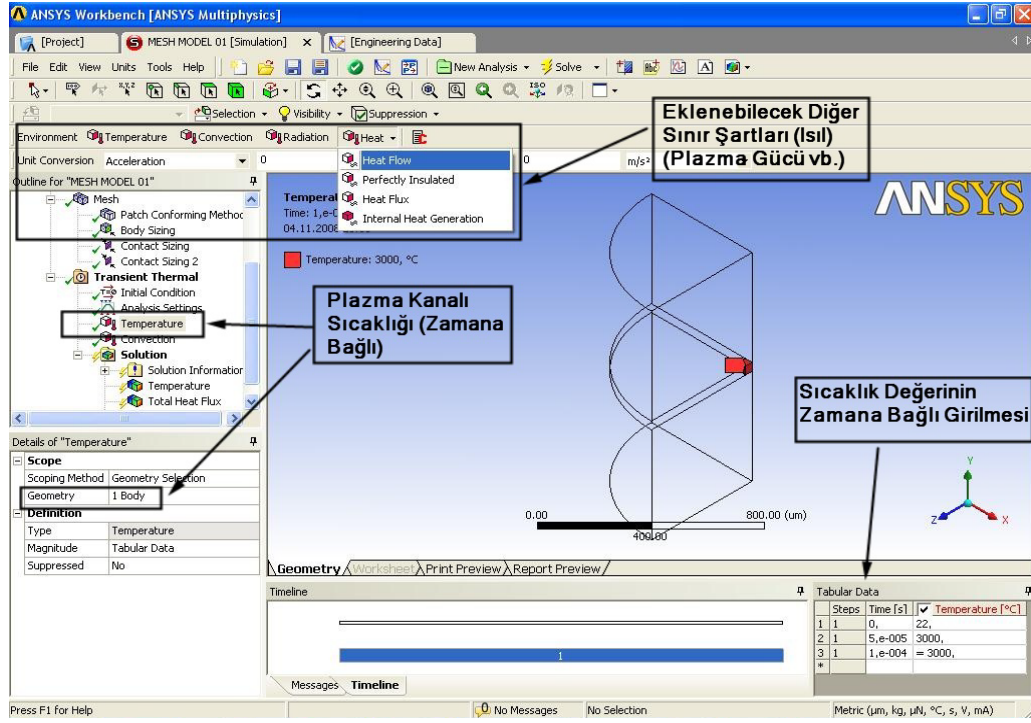
Şekil 5.7. Tetrahedron geometrik şekilli elemanlara bölünmüş 3-B model

5.3. Sınır Koşullarının Girilmesi ve Analiz

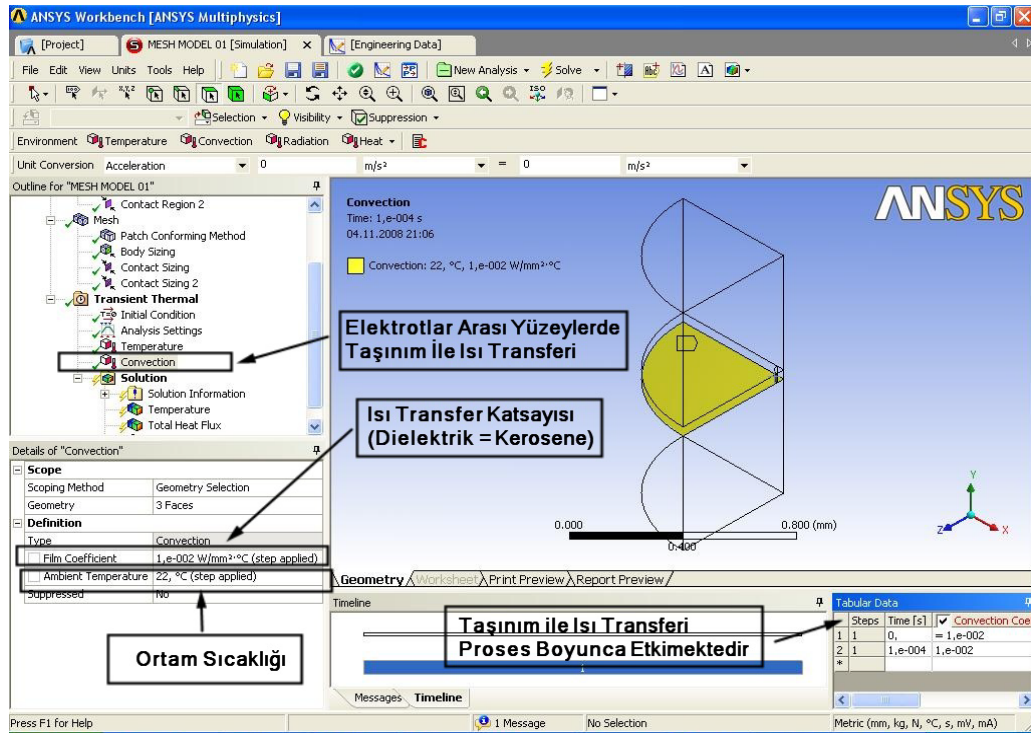


Şekil 5.8. Bilgi girişi ve sekmelerin akış diyagramı

Şekil 5.8’de yazılıma bilgi girişi ve sekmeleri gösteren akış diyagramı yer almaktadır. Elemanlara bölme işleminden sonra analiz için gerekli olan sınır koşulları girilmiştir. Bir önceki bölümde anlatıldığı üzere plazma kanalını simgeleyen elemana vurum süresi boyunca zamana bağlı olarak sıcaklık ($^{\circ}\text{C}$) veya plazma gücü (Watt) değerleri (Şekil 5.9) girilir. Modelin dielektrik sıvıyla temas eden yüzeyleri seçilerek taşınım ile meydana gelen ısı transfer katsayısı ve ortam sıcaklığı değerleri girilir (Şekil 5.10).

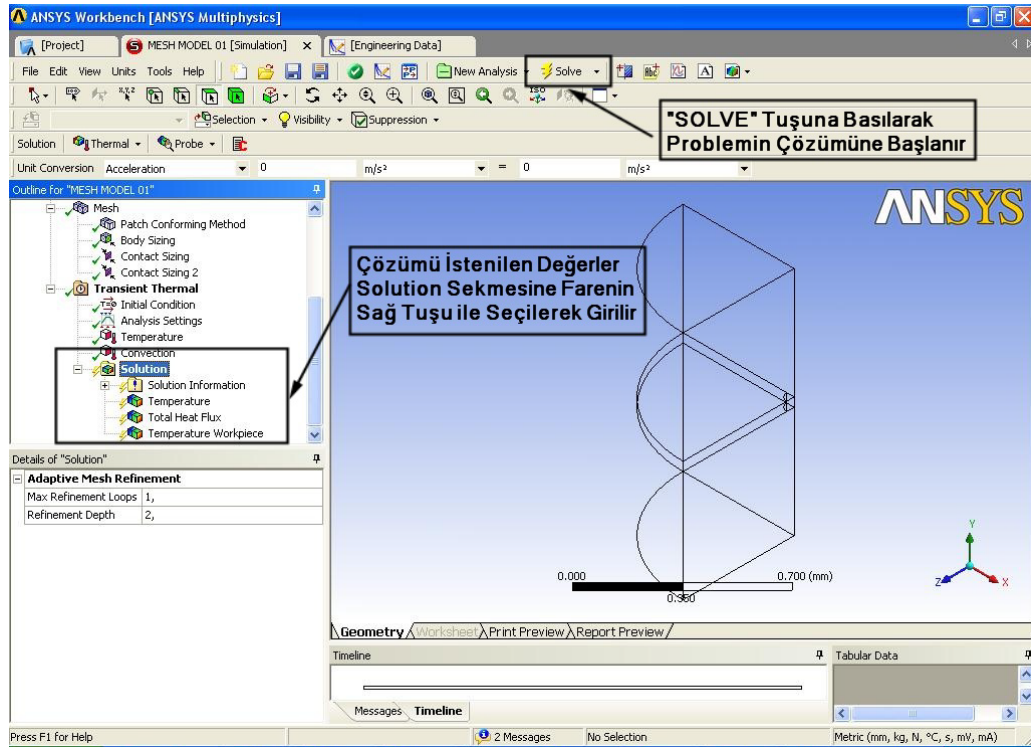


Şekil 5.9. Plazma kanalına sıcaklık değerinin tanımlanması



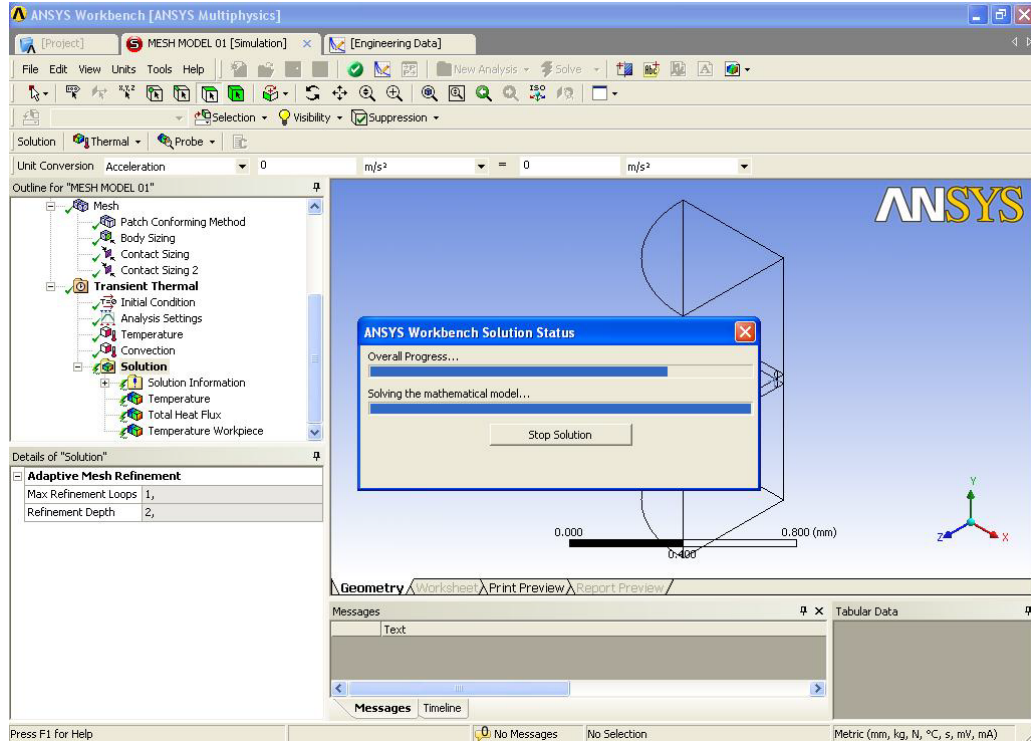
Şekil 5.10. Taşınım ile ısı transferine maruz kalan yüzeyler

Şekil 5.11’de “simulation” modülü altında “solution” bölümü yer almaktadır. Bu bölüme tanımlanan başlangıç koşulları ve sınır şartları altında yapılması istenilen çözümler girilmektedir. Burada işparçası malzemesinde meydana gelen sıcaklık dağılımı ve toplam ısı akısı gibi değerlerin çözümü istenilmiştir.



Şekil 5.11. Çözüm (solution) bölümü

Şekil 5.12’de ise program tanımlanan eleman biçimi, başlangıç koşulları, sınır şartları gibi girdilere göre matematiksel modeli oluşturmakta ve çözümü yapmaktadır.



Şekil 5.12. Verilen parametreler ve sınır koşullarına göre problemin çözümü [29, 30]

6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMESİ

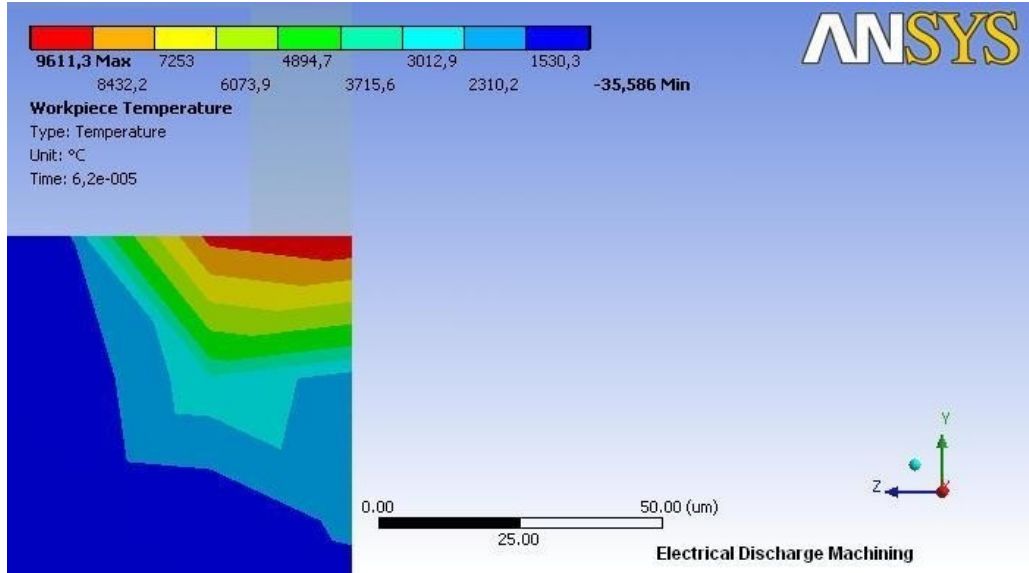
Bu bölümde deneylerde elde edilen işparçası işleme hızı (İİH), işparçasında ergiyen krater yarıçapı (R_m), işparçası yüzeyinde sıcaklık dağılımı gibi performans çıktıları ve parametreler teorik sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

6.1. [1] Numaralı Referans Verilerine Göre Analiz Sonuçları

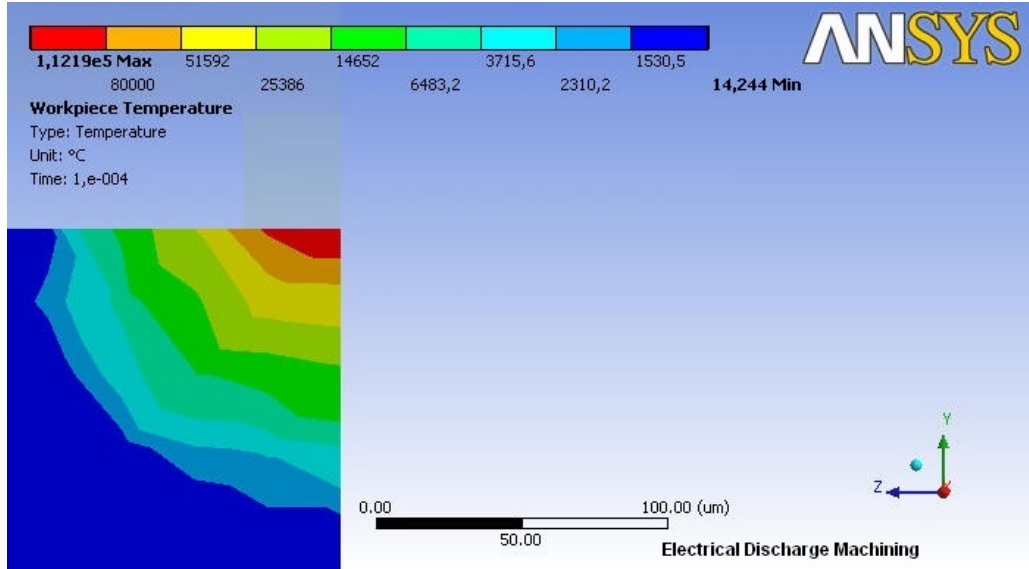
Çizelge 6.1. Deneysel ve teorik çalışmalar sonucu elde edilen değerler

D deney No	I_d (A)	t_d (μ s)	$t_{işleme}$ (dak)	Plazma Yarıçapı R_p (μ m)	P_p (Watt)	İİH Deneysel [1]		İİH Teorik ($mm^3 / vuru$ m) ($\times 10^{-6}$) [Model]				
						(mm^3 / dak)	($mm^3 / vuru$ m) ($\times 10^{-6}$)	($T_p = 3000^\circ C$)	($T_p = 5000^\circ C$)	($T_p = 8000^\circ C$)	($T_p = 10000^\circ C$)	(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

Çizelge 6.1’de teorik olarak modelden hesaplanan ve deneylerden elde edilen veriler yer almaktadır. Vurum süresi boyunca plazma kanalı sıcaklığı $3000^\circ C$, $5000^\circ C$, $8000^\circ C$ ve $10000^\circ C$ olarak alınmıştır. Plazma kanalına plazma gücü (Watt) değeri uygulanarak analizlere devam edilmiştir.



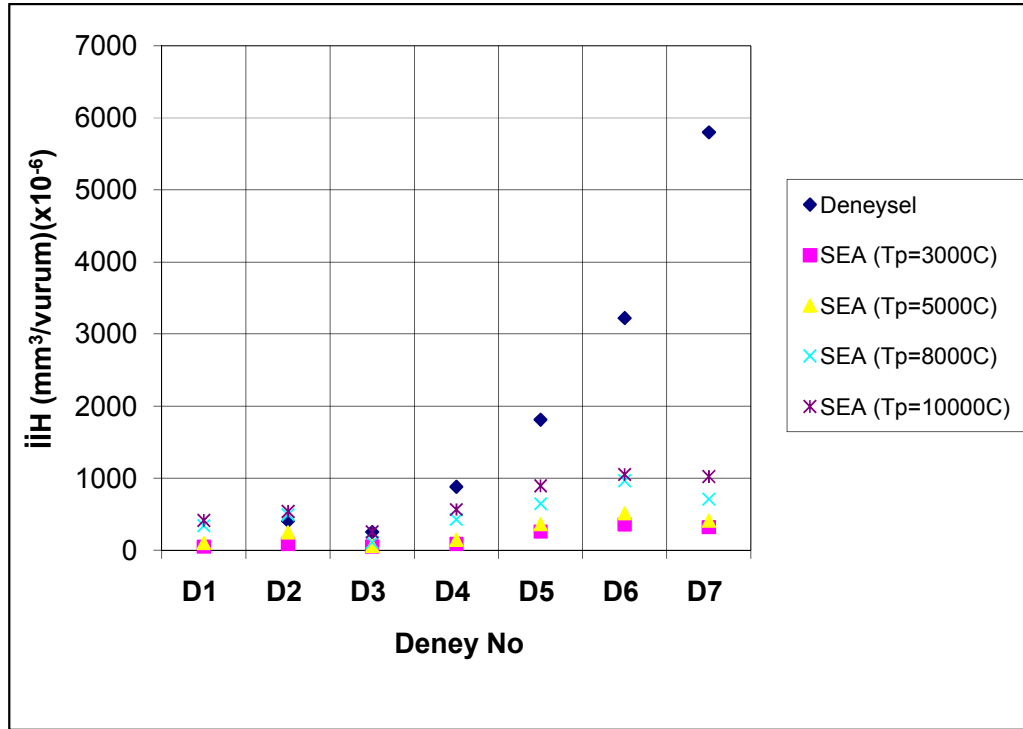
Şekil 6.1. Deney 3, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı, ($I_d=12A$, $t_d=12\mu s$, $\delta=50\mu s$, $T_p=10000^\circ C$)



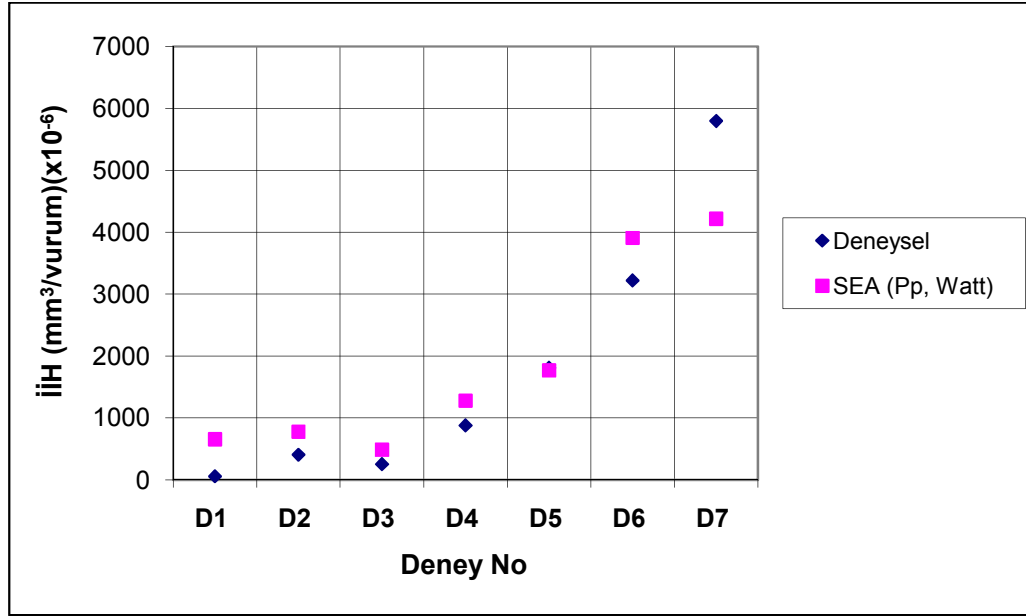
Şekil 6.2. Deney 5, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı, ($I_d=12A$, $t_d=50\mu s$, $\delta=50\mu s$, $P_p=540Watt$)

Çeşitli işleme parametrelerinde $10000^\circ C$ sıcaklık ve $540W$ güç değerleri için sonlu elemanlar yöntemi uygulanarak hesaplanan işparçası sıcaklık dağılımları Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de görülmektedir. Şekil 6.1’de açık yeşil renge kadar olan bölüm yüksek sıcaklık altında kaynama noktasına erişmiş bölgeyi göstermektedir. Açık maviye kadar olan bölüm ise ergiyik halde işparçası malzemesini göstermektedir. Deney 3

$T_p=10000^\circ\text{C}$ (Şekil 6.1) için, eriyen 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 6.2’de 540W plazma gücü uygulandığında maksimum sıcaklık değeri 110000°C ’ye ulaşmaktadır. Her iki analizde de plazma yarıçapı merkezinden uzaklaştıkça azalan sıcaklık değerleri gözükmemektedir. Teorik bölümde ifade edilen Gauss tipi sıcaklık dağılımı, analiz sonucunda da açıktır. Kırmızı renkten açık yeşile kadar olan bölümde işparçası malzemesi kaynama noktasının üzerindedir. Deney 5 $P_p=540\text{W}$ (Şekil 6.2) için eriyen işparçası hacmi $1770 \times 10^{-6} \text{mm}^3/\text{vurum}$ olarak hesaplanmıştır. Deneysel verilerde bu $1811,8 \times 10^{-6} \text{mm}^3/\text{vurum}$ olarak ölçülmüştür.



Şekil 6.3. İİH’nın deneysel [1] ve plazma sıcaklığına göre teorik değişimi



Şekil 6.4. İİH'nın deneysel [1] ve plazma gücüne göre teorik değişimi

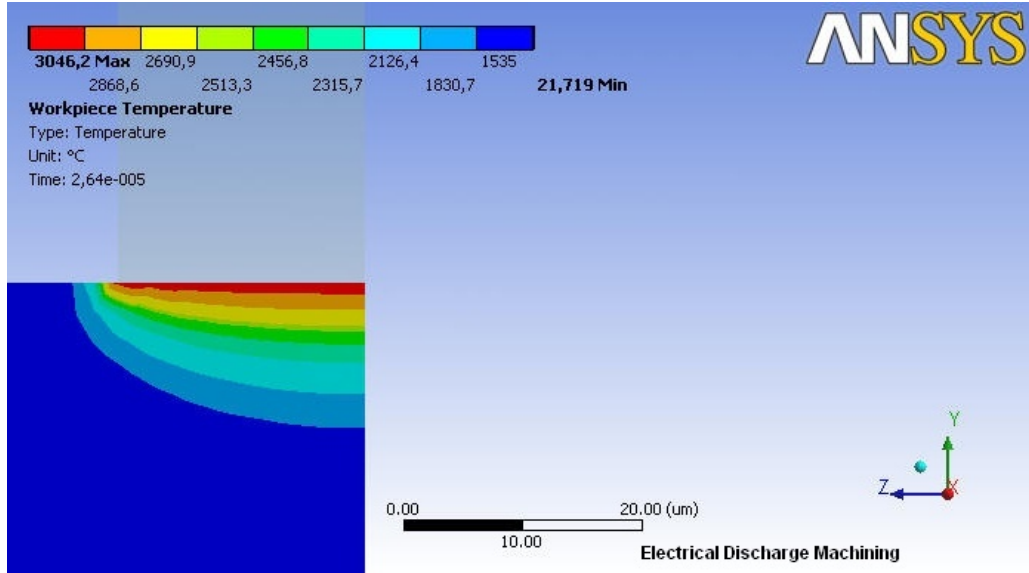
Şekil 6.3'de [1] nolu referans verilerine göre plazma sıcaklığına bağlı olarak hesaplanan teorik sonuçlar, elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Şekil 6.4'de ise İİH'nın plazma gücüne bağlı olarak hesaplanan teorik sonuçları deneysel [1] sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Plazma gücüne bağlı olarak işparçası yüzeyinde ulaşılan maksimum sıcaklık değerinin 60000°C'nin üzerinde değerlere eriştiği analizlerde görülmüştür. Plazma kanalına plazma gücü (P_p) girilen analizlerde (Şekil 6.4) elde edilen sonuçlar deneysel verilerle büyük paralellik göstermiştir. Plazma sıcaklıklarının 3000°C, 5000°C, 8000°C ve 10000°C olarak girildiği analizlerde ise 12A akım ve altında yer alan akım değerlerinde elde edilen sonuçlar deneysel verilerle örtüşmektedir. Plazma sıcaklığı girilen analizlerde, 12A'ın üzerindeki akım değerlerinde elde edilen sonuçlar, deneysel verilerin altında kalmaktadır (Şekil 6.3). Bunun sebebi olarak vurum süresi boyunca sabit bir sıcaklık değerinin etkimesi düşünülmektedir.

6.2. [3] Numaralı Referans Verilerine Göre Analiz Sonuçları

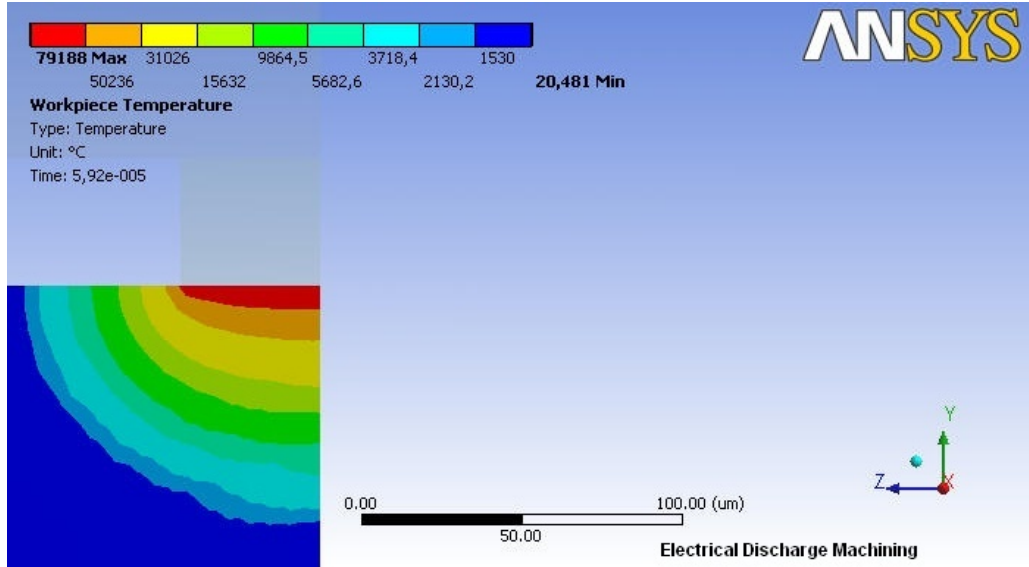
Çizelge 6.2. Deneysel ve teorik çalışmalar sonucu elde edilen değerler

Deneysel No	I _d (A) [3]	V (V) [3]	δ (μs) [3]	t _d (μs) [3]	Ergiyen İşparçası Krater Yarıçapı (Deneysel) R _m (μm) [3]	Plazma Yarıçapı R _p (μm) [Model]	Ergiyen İşparçası Krater Yarıçapı (Teorik) R _m (μm)				
							[Model]				
							T _p =3000°C	T _p =5000°C	T _p =8000°C	T _p =10000°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

Çizelge 6.2’de, DiBitonto vd.’nin yaptığı çalışmadan alınan on üç adet deneysel veri ve bu verilere bağlı oluşturulan modelden elde edilen teorik sonuçlar yer almaktadır.

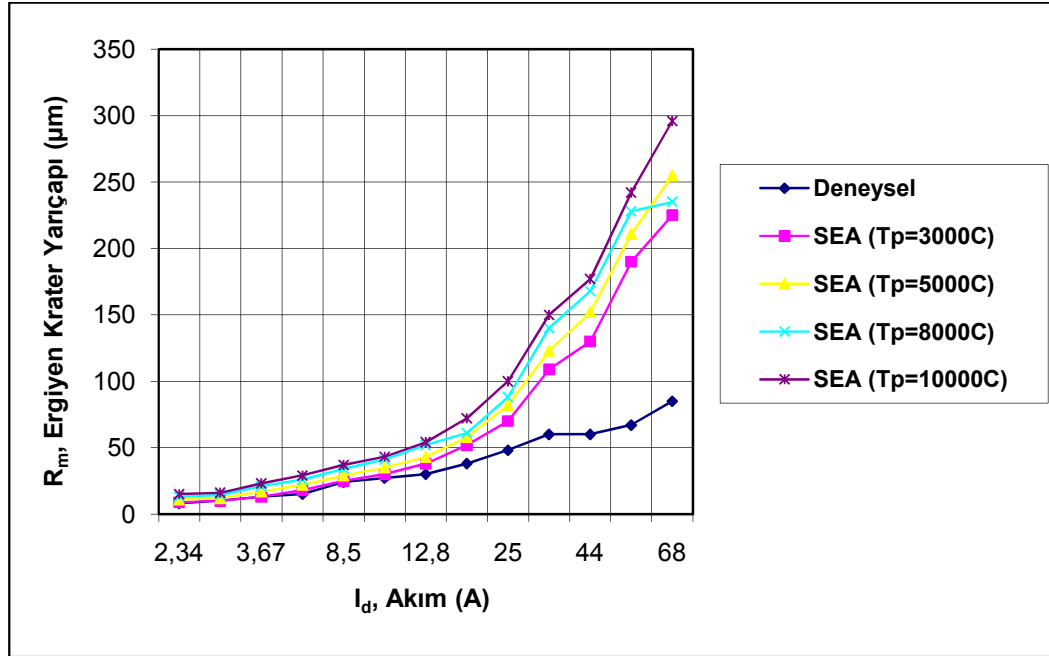


Şekil 6.5. Deney 5, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı, ($I_d=8,5A$, $t_d=24\mu s$, $\delta=2,4\mu s$, $T_p=3000^\circ C$)

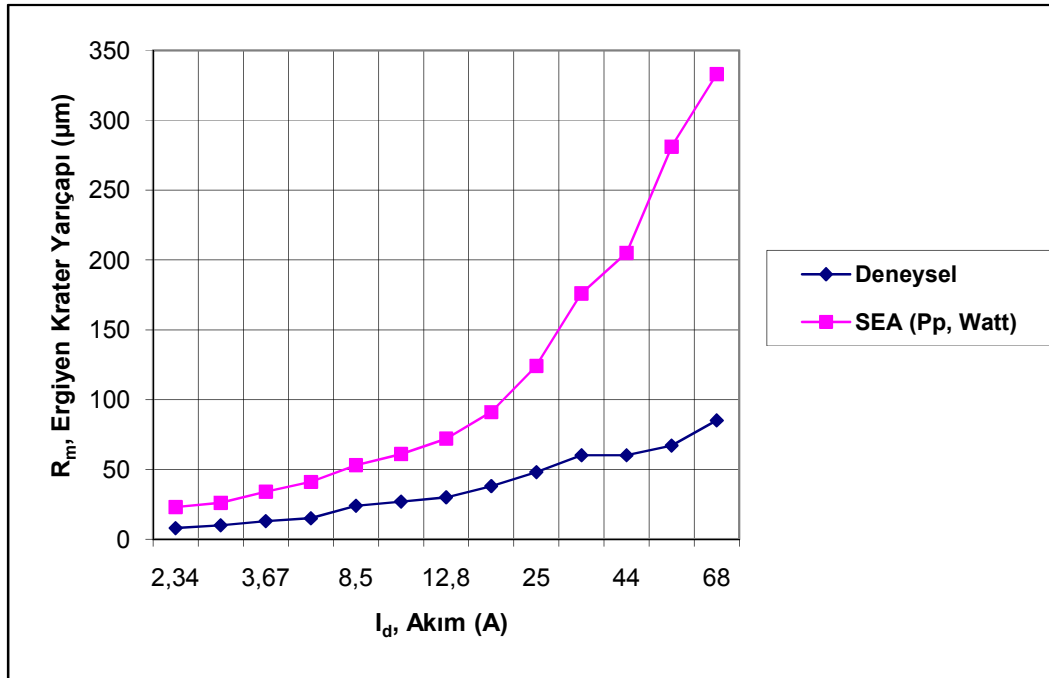


Şekil 6.6. Deney 8, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı, ($I_d=20A$, $t_d=56\mu s$, $\delta=3,2\mu s$, $P_p=500Watt$)

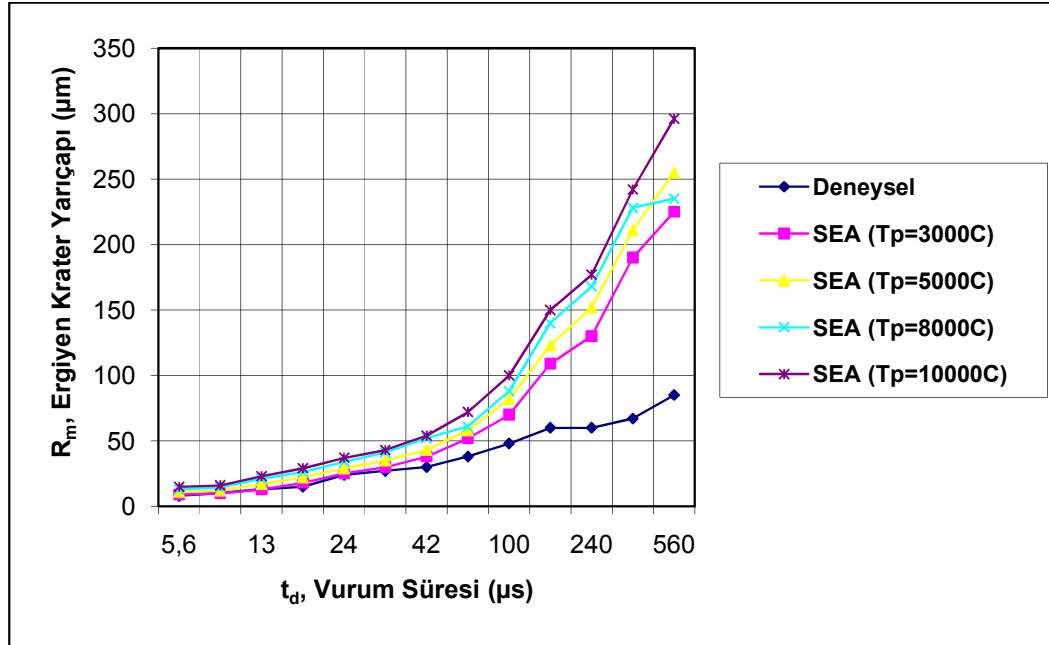
Şekil 6.5 ve Şekil 6.6'da işparçası yüzeyinde meydana gelen sıcaklık dağılımları gözükmektedir. Şekil 6.5'de ergiyen malzeme yarıçapı $25\mu m$ olarak hesaplanmış, deneysel çalışmada bu değer $24\mu m$ 'dir. Şekil 6.6'da plazma merkezinde oluşan sıcaklık değeri $79000^\circ C$ 'ye erişmiştir. Ergiyen malzeme yarıçapı $91\mu m$ olarak hesaplanmış, deneysel çalışmada ise bu değer $38\mu m$ 'dir.



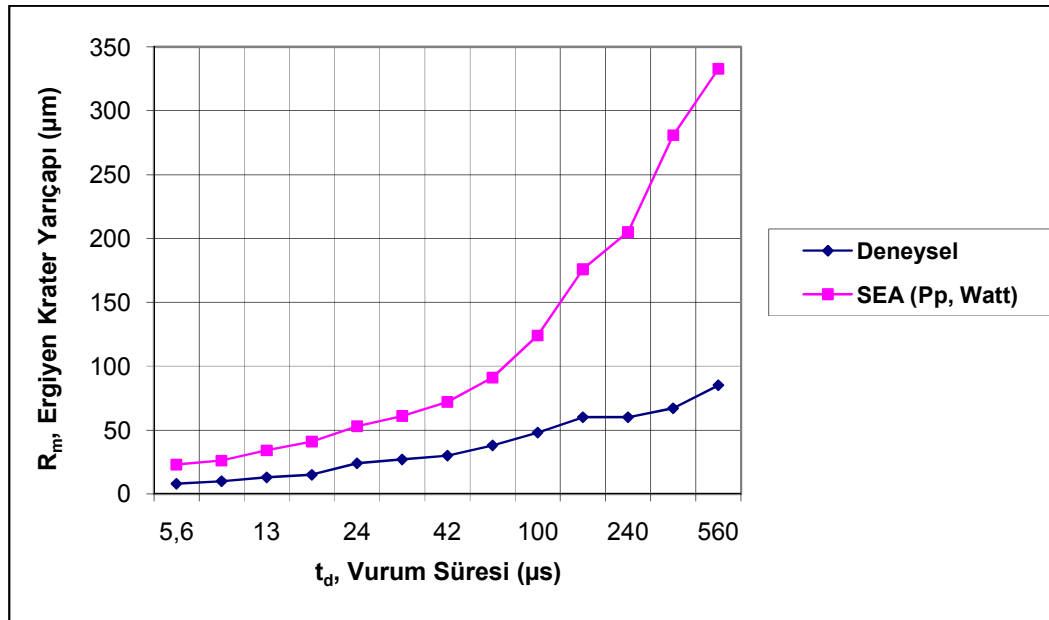
Şekil 6.7. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m) uygulanan akıma (I_d) göre deneysel [3] ve plazma sıcaklığına bağlı teorik değişimi



Şekil 6.8. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m) uygulanan akıma (I_d) göre deneysel [3] ve plazma gücüne bağlı teorik değişimi



Şekil 6.9. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), vurum süresine (t_d) göre deneysel [3] ve plazma sıcaklığına bağlı teorik değişimi



Şekil 6.10. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), vurum süresine (t_d) göre deneysel [3] ve plazma gücüne bağlı teorik değişimi

Şekil 6.7 ve Şekil 6.8'de görüldüğü gibi 25A boşalım akımı, değerinden daha düşük işleme parametrelerinde deneysel ve teorik sonuçlar örtüşmektedir. Aynı şekilde Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da 100µs vurum süresinden daha düşük işleme

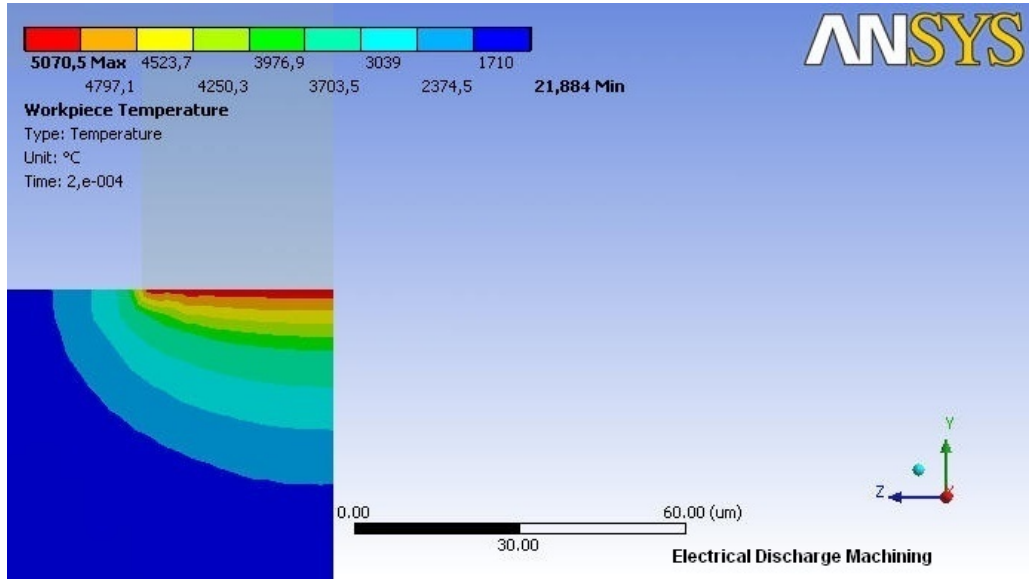
parametrelerinde deneysel ve teorik sonuçlar birbirine çok yakın çıkmıştır. Ancak akım ve vurum süresinin artması ile teorik ve deneysel sonuçlar arasındaki fark açılmaktadır. Düşük işleme parametrelerinde işparçasından daha az miktarlarda malzeme kaldırılmaktadır. İşleme parametreleri arttıkça bu miktar artmaktadır. Teorik durumda ergime sıcaklığına erişmiş malzemenin tamamının ortamdaki uzaklaştığı düşünülmüştür. Ancak gerçek durumda ergiyen ve buharlaşan malzemenin bir kısmı tekrar katılaşmakta ve ortamdaki uzaklaşmamaktadır. Bu nedenle teorik sonuçlar belirli bir değerden sonra deneysel verilerin üzerinde çıkmıştır.

6.3. [7] Numaralı Referans Verilerine Göre Analiz Sonuçları

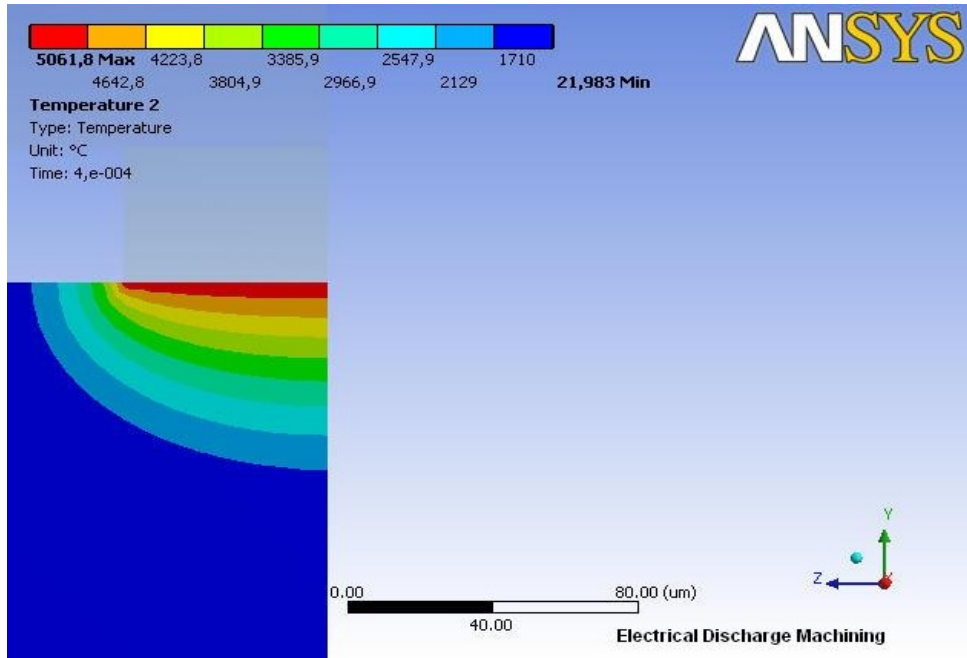
Çizelge 6.3. Deneysel [7] ve teorik çalışmalar sonucu elde edilen değerler

Deneysel No	I _d (A) [7]	V (V) [7]	δ (μs) [7]	t _d (μs) [7]	Ergiyen İşparçası Krater Yarıçapı (Deneysel) R _m (μm) [7]	Plazma Yarıçapı R _p (μm) [Model]	Ergiyen İşparçası Krater Yarıçapı (Teorik) R _m (μm) [Model]				
							T _p =3000°C	T _p =5000°C	T _p =8000°C	T _p =10000°C	(P _p (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

İlk üç deneyde akım değeri, sonraki üç deneyde vurum süresi, son dört deneyde ise vurum bekleme süreleri değişken tutulup, diğer sabit işleme parametreleri altında deneyler yapılmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar Çizelge 6.3'de görülmektedir.



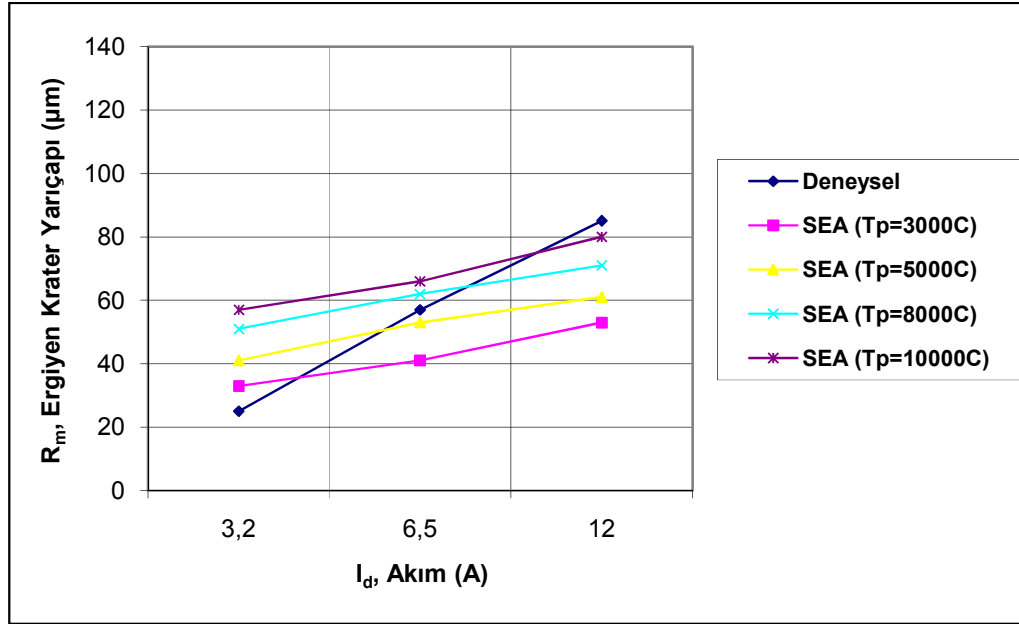
Şekil 6.11. Deney 4, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı, ($I_d=6,5A$, $t_d=100\mu s$, $\delta=100\mu s$, $T_p=5000^\circ C$)



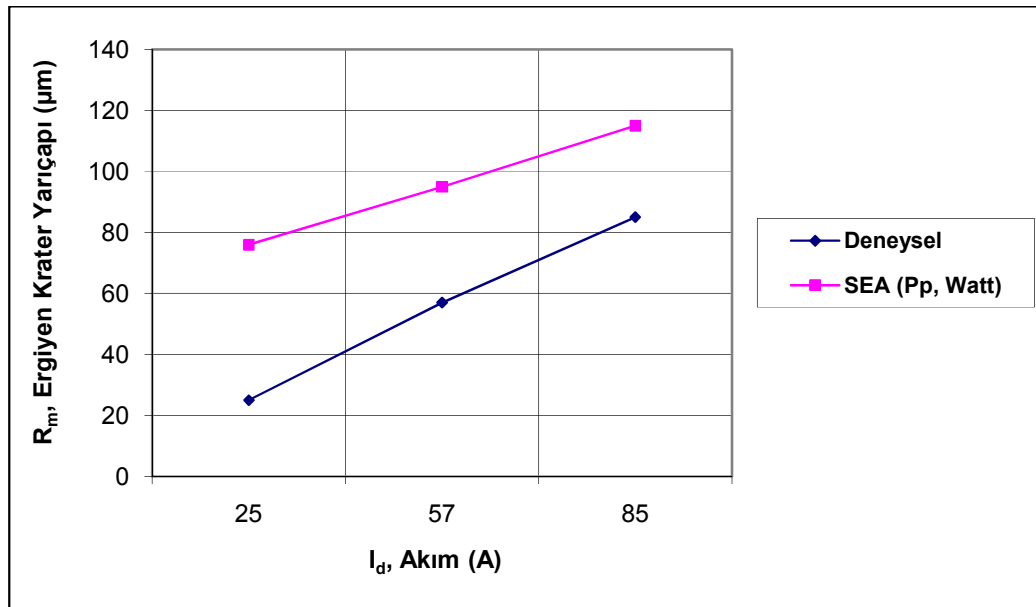
Şekil 6.12. Deney 6, çelik işparçası için sıcaklık dağılımı, ($I_d=6,5A$, $t_d=300\mu s$, $\delta=100\mu s$, $T_p=5000^\circ C$)

Şekil 6.11 için ergiyen malzeme yarıçapı $53\mu m$ hesaplanmıştır. Bu değer deneysel çalışmalarda $58\mu m$ 'dir. Şekil 6.12'de ise ergiyen malzeme yarıçapı $80\mu m$ olarak

hesaplanmıştır. Bu değer deneysel çalışmalarda $75\mu\text{m}$ 'dir. Aynı işlem parametrelerinde vurum süresi $100\mu\text{s}$ iken $53\mu\text{m}$ yarıçapında malzeme ergimiş, vurum süresi $300\mu\text{s}$ iken $80\mu\text{m}$ yarıçapında malzeme ergime sıcaklığına ulaşmıştır.

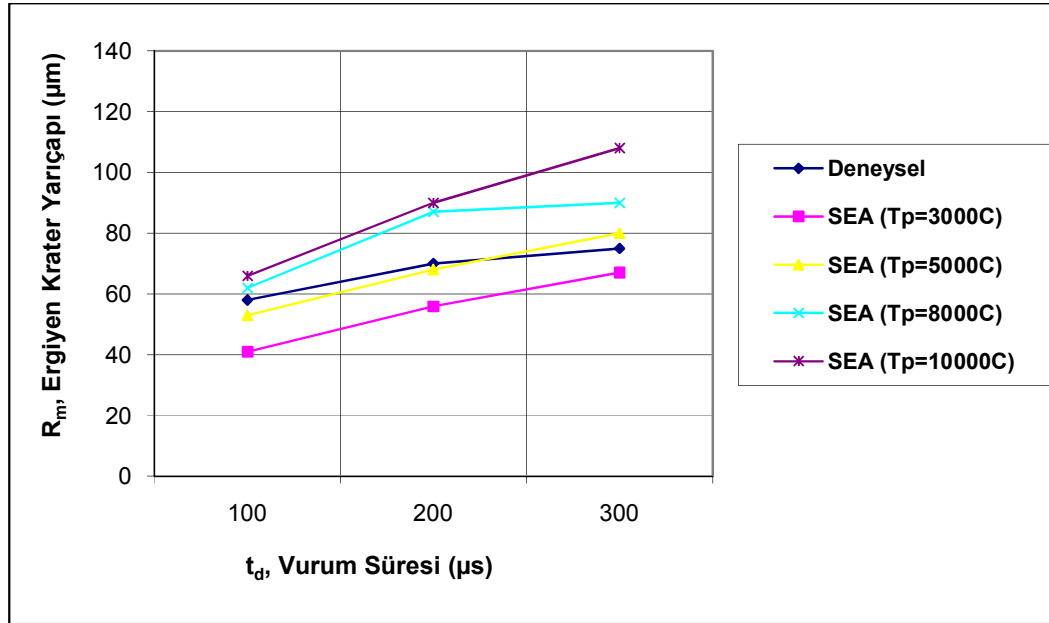


Şekil 6.13. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), boşalım akımına (I_d) göre deneysel [7] ve plazma sıcaklığına bağlı teorik değişimi

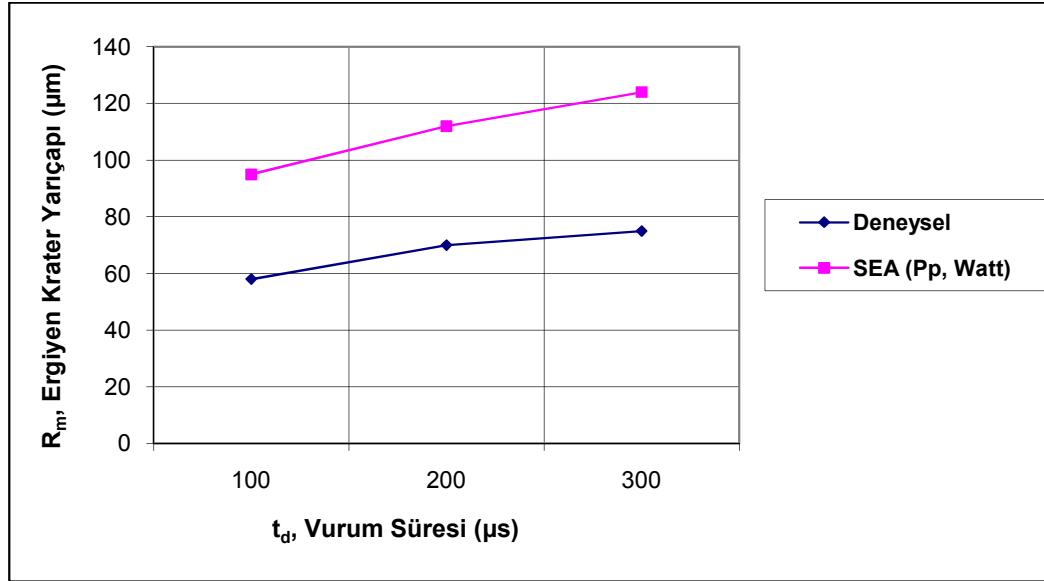


Şekil 6.14. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), boşalım akımına (I_d) göre deneysel [7] ve plazma gücüne bağlı teorik değişimi

Şekil 6.13’de boşalım akımının değişken alındığı ilk üç deneyde, plazma sıcaklığı 3000°C tanımlandığında elde edilen teorik değerler, akım değerinin düşük olduğu noktalarda deneysel verilere yakındır. Akım değeri arttıkça teorik veriler deneysel verilerin altında kalmaktadır. Plazma sıcaklığının 5000°C alındığı analizlerde ise, akım değerinin 6A ve civarında olduğu deneylerde, deneysel ve teorik sonuçlar oldukça yakın çıkmıştır. Plazma sıcaklığı 10000°C tanımlandığında ise, düşük akım değerlerinde teorik sonuçlar, deneysel verilerden biraz uzaklaşmakta, ancak 10A ve üzerindeki değerlerde, deneysel verilerle örtüşmektedir. Doğrudan plazma gücü tanımlanan analizlerde ise (Şekil 6.14) teorik değerler deneysel verilerin biraz üzerinde bulunmuştur. Deneysel ve teorik çalışmalarda akım parametresinin artırılmasıyla ergiyen malzeme miktarının da arttığı gözlenmiştir.

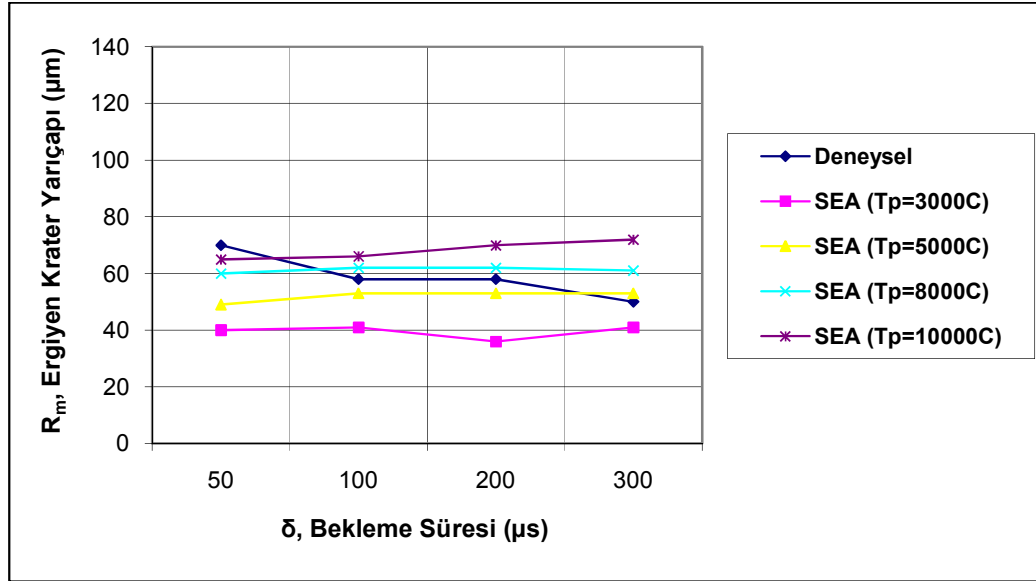


Şekil 6.15. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), vurum süresine (t_d) göre deneysel [7] ve plazma sıcaklığına bağlı teorik değişimi

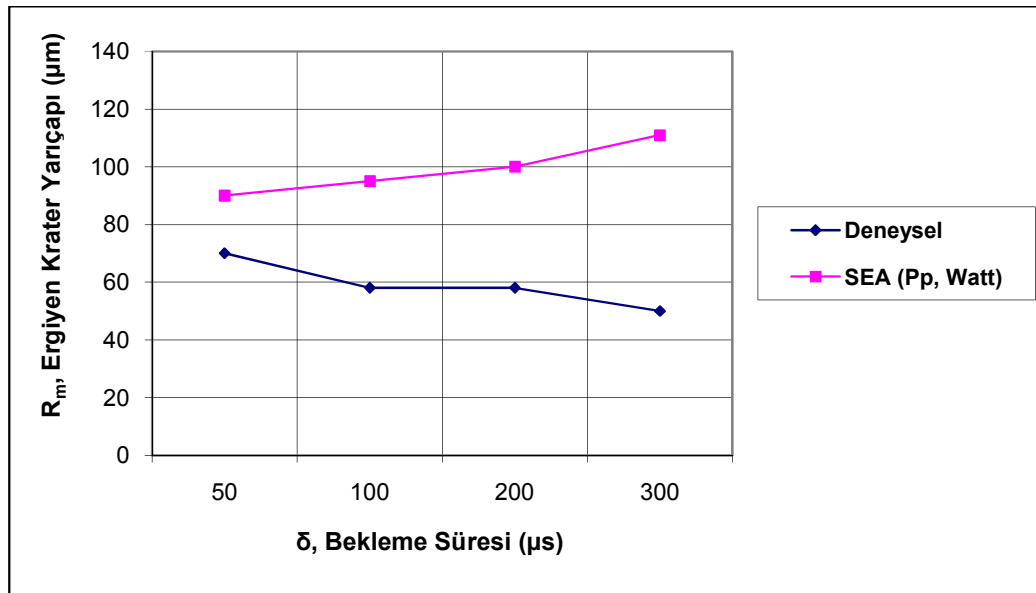


Şekil 6.16. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), vurum süresine (t_d) göre deneysel [7] ve plazma gücüne bağlı teorik değişimi

Şekil 6.15 ve Şekil 6.16'da vurum süresinin değişken alındığı deneysel ve teorik sonuçlar gözükmemektedir. Plazma sıcaklığının $5000^{\circ}C$ tanımlandığı analizlerde teorik değerler, deneysel değerler ile birbirine çok yakındır. Plazma sıcaklığının $10000^{\circ}C$ ve plazma gücü olarak tanımlandığı analizlerde ise teorik veriler, deneysel verilerin üzerinde çıkmıştır. Deneysel ve teorik sonuçlarda vurum süresinin artmasıyla ergiyen malzeme yarıçapının da arttığı görülmüştür.



Şekil 6.17. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), bekleme süresine (δ) göre deneysel [7] ve plazma sıcaklığına bağlı teorik değişimi

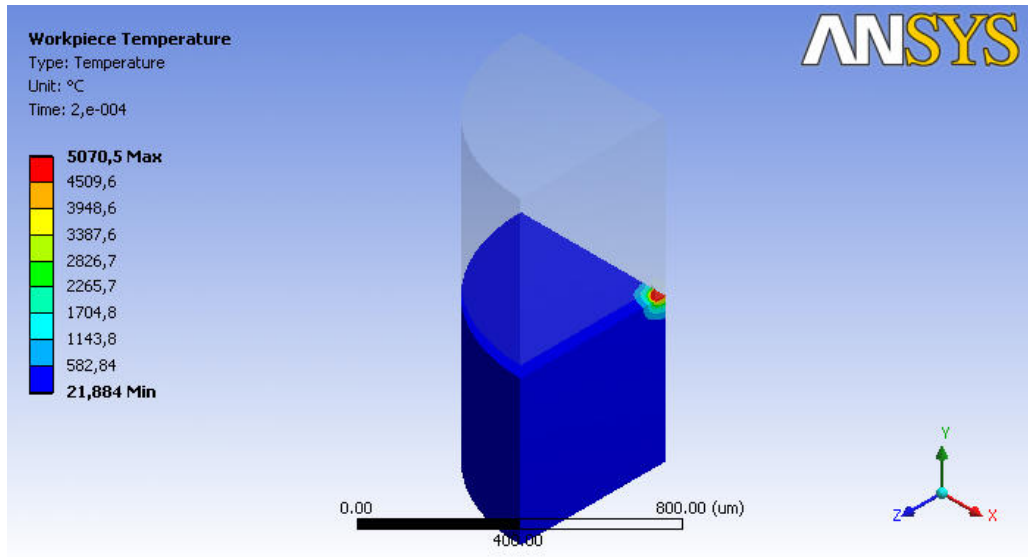


Şekil 6.18. Ergiyen işparçası krater yarıçapının (R_m), bekleme süresine (δ) göre deneysel [7] ve plazma gücüne bağlı teorik değişimi

Şekil 6.17 ve Şekil 6.18'de ise vuruş bekleme süresinin değişken alındığı deneysel ve teorik sonuçlar gözükmemektedir. Plazma sıcaklığının 5000°C ve 10000°C tanımlandığı durumlarda elde edilen teorik sonuçlar deneysel sonuçlara daha

yakındır. Plazmadaki ısı kaynağının plazma gücü olarak tanımlandığı analizler sonucu elde edilen teorik sonuçların, deneysel verilerle değişimi Şekil 6.18’de gözükmektedir.

Teorik model hazırlanırken fiziksel durumu basitleştirmek amacıyla bazı kabuller yapılmıştır. Bu kabullerden bazıları analiz sonuçlarını etkilemiştir. Örneğin literatürdeki araştırmalarda kısa vuruş sürelerinde elektriksel kuvvetlerin malzeme kaldırmada önemli bir etkiye sahip olduğu belirtilmiştir [31, 32]. Uzun vuruş süresi ve yüksek işleme parametrelerinde elde edilen teorik sonuçlar, deneysel verilerden daha yüksek çıkmıştır. Bu koşullarda, plazma kanalında oluşan yüksek enerji sonucu işparçasında kaynaşma (füzyon) meydana gelmektedir. Kaynaşma sonucu ergiyen işparçası malzemesinin bir kısmı tekrar katılaşmakta ve ortamdan uzaklaşmamaktadır. Oluşturulan modelde erime sıcaklığına ulaşan malzeme miktarının ortamdan tamamen uzaklaştığı varsayılmıştır. Elektriksel kuvvetlerin ve kaynaşmanın modelde hesaba katılmaması nedeniyle teorik sonuçların, bu işleme koşullarında deneysel sonuçlardan uzaklaştığı düşünülmektedir. Şekil 6.19’da işparçasında yapılan analiz sonucu oluşan sıcaklık dağılımı üç boyutlu gözükmektedir.



Şekil 6.19. EEİ’de, işparçasının analiz sonucu üç boyutlu görünümü

7. SONUÇLAR

Dalma elektro erozyon ile işlemede, daha önceden çeşitli işleme parametrelerinde yapılmış deneylerden elde edilen sonuçların, bu çalışmada geliştirilen teorik bir modelden elde edilenlerle karşılaştırılması yapılmıştır. Geliştirilen teorik modelde, EEİ’de tek bir boşalım için plazma kanalının ve işparçasının zamana bağlı ısıl modeli oluşturulmuştur. Modelde önce, boşalım akımına ve vuruş süresine bağlı olarak değişen plazma yarıçapı hesaplanmıştır. Daha sonra plazma yarıçapının ve işparçasının 2-B modeli, takibinde 3-B modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modele işparçası malzemesinin ve plazma kanalının ısıl özellikleri girilmiştir. İşparçası sonlu elemanlar yöntemiyle hesaplamada kullanılacak elemanlara bölünmüştür. Daha sonra plazma kanalının sıcaklık ve güç değerleri, taşınım ve iletim ile ısı transferi gibi sınır koşulları zamana bağlı olarak modelde tanımlanmıştır. Son olarak istenilen değerlerin hesaplaması yaptırılmıştır.

Teorik modelden elde edilen sonuçlar çeşitli işleme parametreleri için deneysel olarak bulunmuş işparçası işleme hızı ($\text{mm}^3/\text{vuruş}$) ve ergiyen işparçası malzemesi yarıçapı (μm) gibi işleme performansı değerleri ile karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmada, plazma yarıçapı (R_p) arttıkça işleme performansı değerlerinin de arttığı deneysel ve teorik sonuçlardan görülmüştür. Plazma yarıçapı ise boşalım akımı ve vuruş süresiyle doğru orantılı olduğundan boşalım akımı, vuruş süresi gibi işleme parametrelerinin artmasının, işleme hızı ve kaldırılan işparçası malzemesi miktarını da arttırdığı deneysel ve teorik olarak teyit edilmiştir.

[1] numaralı referans deneysel sonuçlarına en yakın teorik sonuçlar, plazma ısı kaynağının plazma gücü (P_p) olarak tanımlandığı modelden elde edilmiştir. Oluşturulan diğer modellerde (T_p değeri 3000°C , 5000°C , 8000°C ve 10000°C için) ise özellikle yüksek işleme parametrelerinde elde edilen teorik sonuçlar deneysel sonuçların altında kalmıştır. DiBitonto vd. [3] deneysel çalışmalarında, düşük işleme parametre değerleri için elde edilen değerler ($I_d < 20\text{A}$, $t_d < 50\mu\text{s}$) teorik değerlerle büyük ölçüde paralellik göstermektedir. En yakın sonuçlar plazma sıcaklığının

3000°C tanımlandığı analizlerde elde edilmiştir. Kansal vd.'nin [7] yaptığı deneysel çalışma verilerinde ise, plazma sıcaklığının 5000°C tanımlandığı analizler, deneysel verilere en yakın sonuçları vermiştir.

Yapılan çalışma sonucu, farklı işleme koşullarında farklı araştırmacılar tarafından yapılmış deneysel çalışmaların teorik modellerle aynı sonuçları verdiği görölmüştür. Oluşturulan zamana bağlı ısıl model, elektro erozyon ile işleme yönteminde meydana gelen fiziksel olayların, işleme performansına birincil dereceden etkili olanlarını (boşalım akımı (I_d), boşalım gerilimi (V), vurum süresi (t_d), vurum bekleme süresi (δ), iletim ile ısı transferi, taşınım ile ısı transferi) içermektedir. Dolayısıyla analizlerin çoğu gerçekçi sonuçlar vermiştir. Bundan sonra yapılacak çalışmalarda, ısıl etkinin bitmesi ve dielektrik sıvının malzemeye etkimesi sonucu oluşan gerilmeler, işparçası yapısında meydana gelen mikro çatlaklar araştırılabilir ve modele katılabilir.

KAYNAKLAR

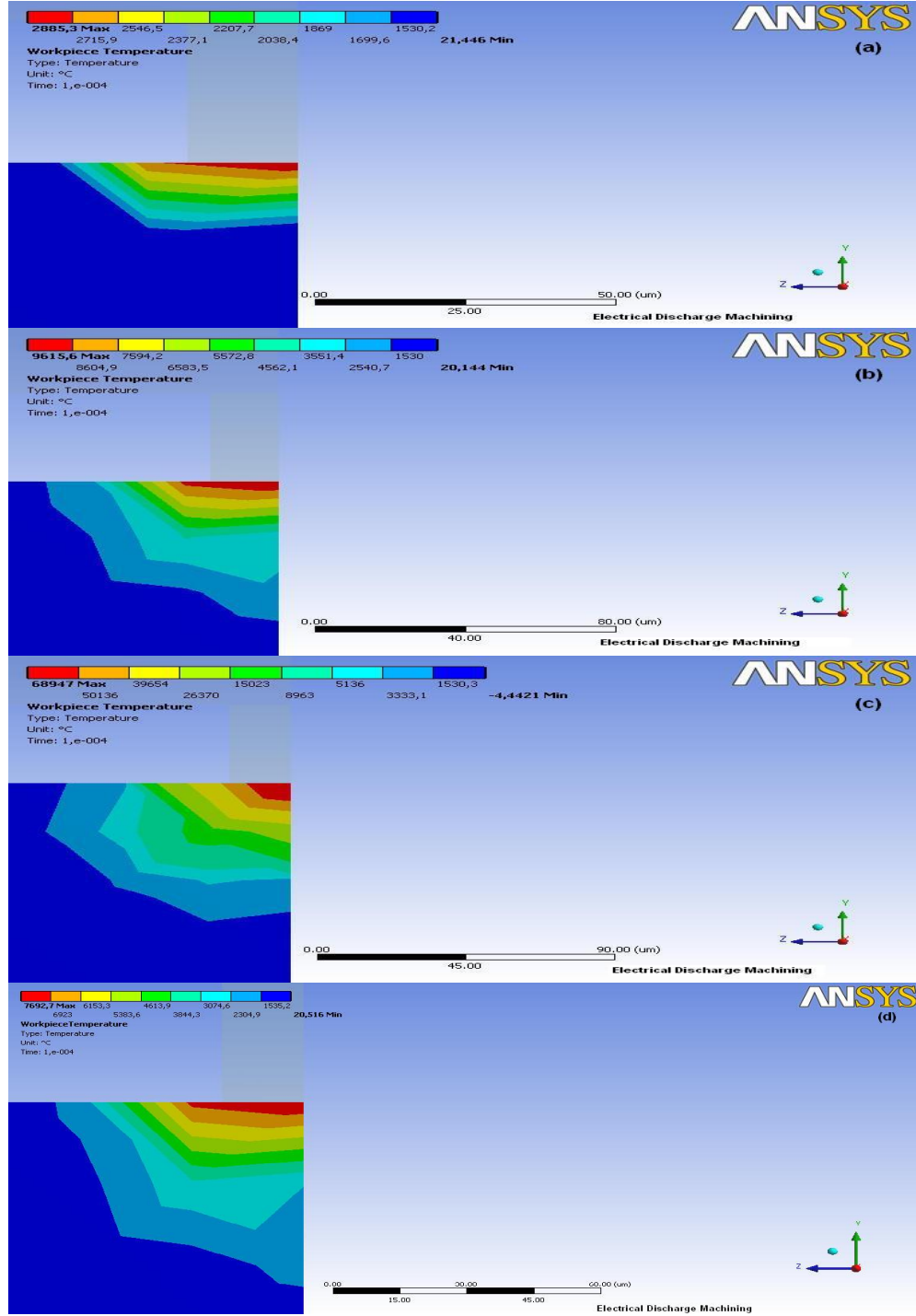
1. Özgedik, A., Çoğun, C., "An experimental investigation on tool wear in electric discharge machining", *Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27: 488-500 (2006).
2. Anıl, D., Çoğun, C., "Performance of copper coated streolitographic electrodes with internal cooling channels in electric discharge machining", *Rapid Prototyping Journal*, 14(4): 202-212 (2008).
3. 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.*, 66(9): 4095-4103 (1989).
4. 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.*, 66 (9): 4104-4111 (1989).
5. 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.*, 73 (11): 7900-7909 (1993).
6. Marafona, J., Chousal, J. A. G., "A finite element model of EDM based on the Joule effect", *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 595-602 (2006).
7. Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P., "Numerical simulation of powder mixed electric discharge machining (PMEDM) using finite element method", *Mathematical and Computer Modelling*, 10: 1-21 (2007).
8. Çoğun, C., Özerkan, B., Karacay, T., "An experimental investigation on effect of powder mixed dielectric on machining performance in electrical discharge machining", *Journal of Engineering Manufacture*, 220(7): 1035-1050 (2006).
9. Das, S., Klotz, M., Klocke, F., "EDM simulation: finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stresses", *Journal of Materials Processing Technology*, 142: 434-451 (2003).
10. Yadav, V., Jain, V. K., Dixit, P. M., "Thermal stresses due to electrical discharge machining", *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, 42: 877-888 (2002).
11. Snoeys, R., Van Dijck, F., "Investigations of EDM operations by means of thermo mathematical model", *Annals of CIRP*, 20(1): 35 (1971).

12. Salah, N. B., Ghanem, F., Atig, K. B., "Numerical study of thermal aspects of electric discharge machining process", *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, 46: 908-911 (2006).
13. Kumar, P. D., "Study of thermal stresses induced surface damage under growing plasma channel in electro-discharge machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 202: 86-95 (2008).
14. Singh, A., Ghosh, A., "A thermo-electric model of material removal during electric discharge machining", *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, 39: 669-682 (1999).
15. Allen, P., Chen, X., "Process simulation of micro electro-discharge machining on molybdenum", *Journal of Materials Processing Technology*, 186: 346-355 (2007).
16. Shankar, P., Jain, V. K., Sundararajan, T., "Analysis of spark profiles during EDM process", *Machining Science and Technology*, 1(2): 195-217 (1997).
17. Erden, A., "Effect of materials on the mechanism of electric discharge machining (EDM)", *Journal of Engineering Materials and Technology*, 105: 132-138 (1983).
18. Kumar, P. D., Bhoi, R. K., "Analysis of spark eroded crater formed under growing plasma channel in electro discharge machining", *Machining Science and Technology*, 9: 239-261 (2005).
19. Erden, A., Kaftanoğlu, B., "Heat transfer modelling of electric discharge machining", *Proc. 21 st. Int. Machine Tool and Des. Res. Conf.*, 351-359 (1981).
20. 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*, 46: 1699-1706 (2006).
21. Mahardika, M., Mitsui, K., "A new method for monitoring micro-electric discharge machining process", *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48: 446-458 (2008).
22. Yeo, S.H., Tan, P.C., "Critical assessment and numerical comparison of electro thermal models in EDM", *Journal of Materials Processing Technology*, 203: 241-251 (2008).
23. Çoğun, C., "Variation of discharge profile with discharge power in electric discharge machining (EDM)", *JSME International Journal*, 32 (3): 480-483 (1989).

24. Snoeys, R., Van Dijck, F., "Plasma channel diameter growth affects stock removal in EDM", *Annals of the CIRP*, 21 (1): 39-40 (1972).
25. Marty, C. C., "Investigation of surface temperature in electro-discharge machining", *Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry*, 76: 1-3 (1977).
26. Ho, K. H., Newman, S. T., "State art electrical discharge machining (EDM)", *Int. Journal of Machine Tools & Manufacture*, 40: 1287-1300 (2003).
27. 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*, 43: 121-128 (2003).
28. 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).
29. Lawrence, K. L., "ANSYS Workbench Tutorial R.10", *Schroff Development Corperation Publications*, PA, USA, 1-232 (2006).
30. ANSYS Release 11 Help Files, *Documentation for Ansys Workbench v.11*, PA, USA.
31. Toren, M., Zvirin Y., Winograd, Y., "Melting and evaporation phenomena during electrical erosion", *Journal of Heat Transfer*, 76: 576-581 (1975).
32. König, W., Zvirin, Y., "Material removal and energy distribution in electrical discharge machining", *Annals of CIRP*, 24 (1): 95-100 (1975).

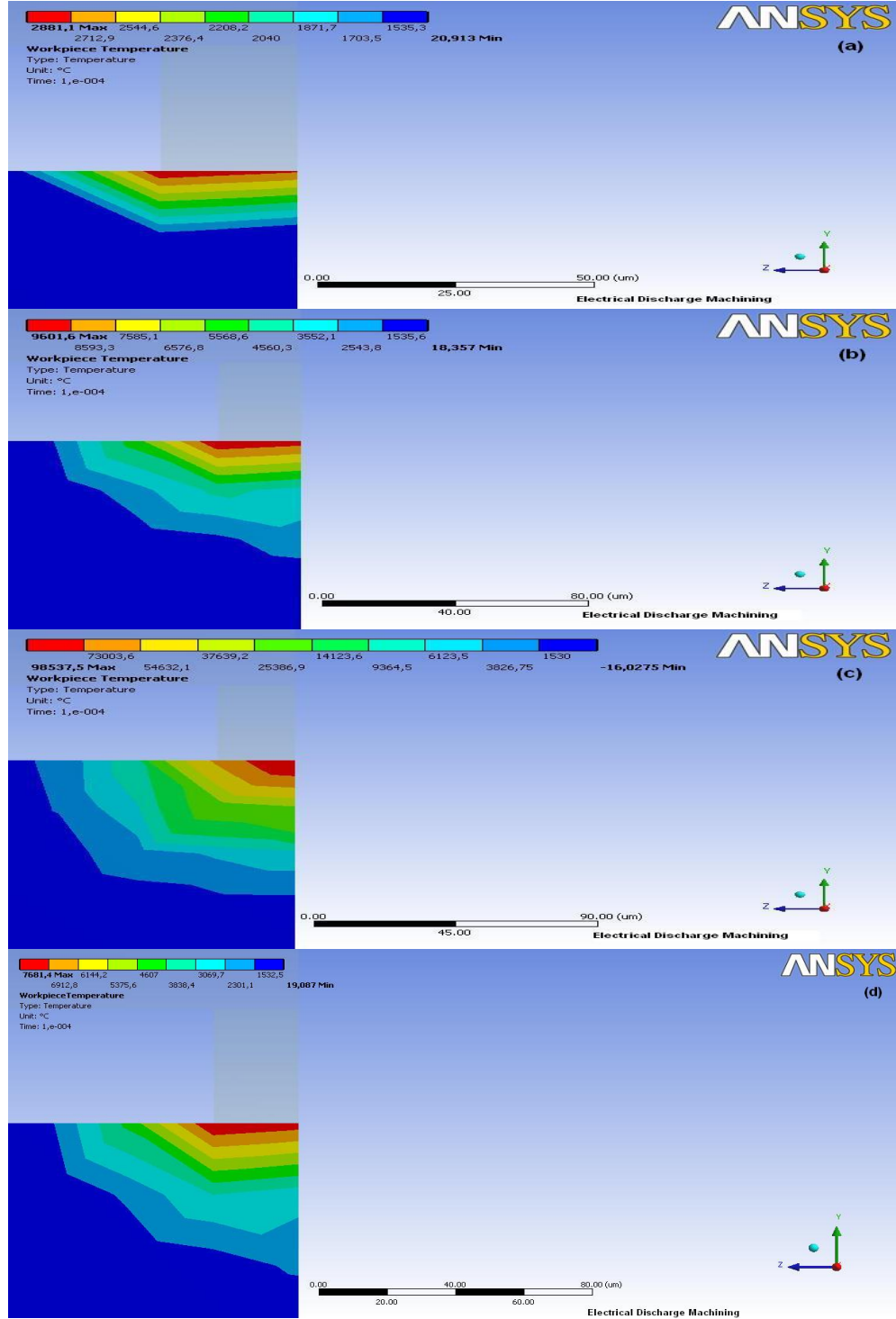
EKLER

EK-1. [1] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



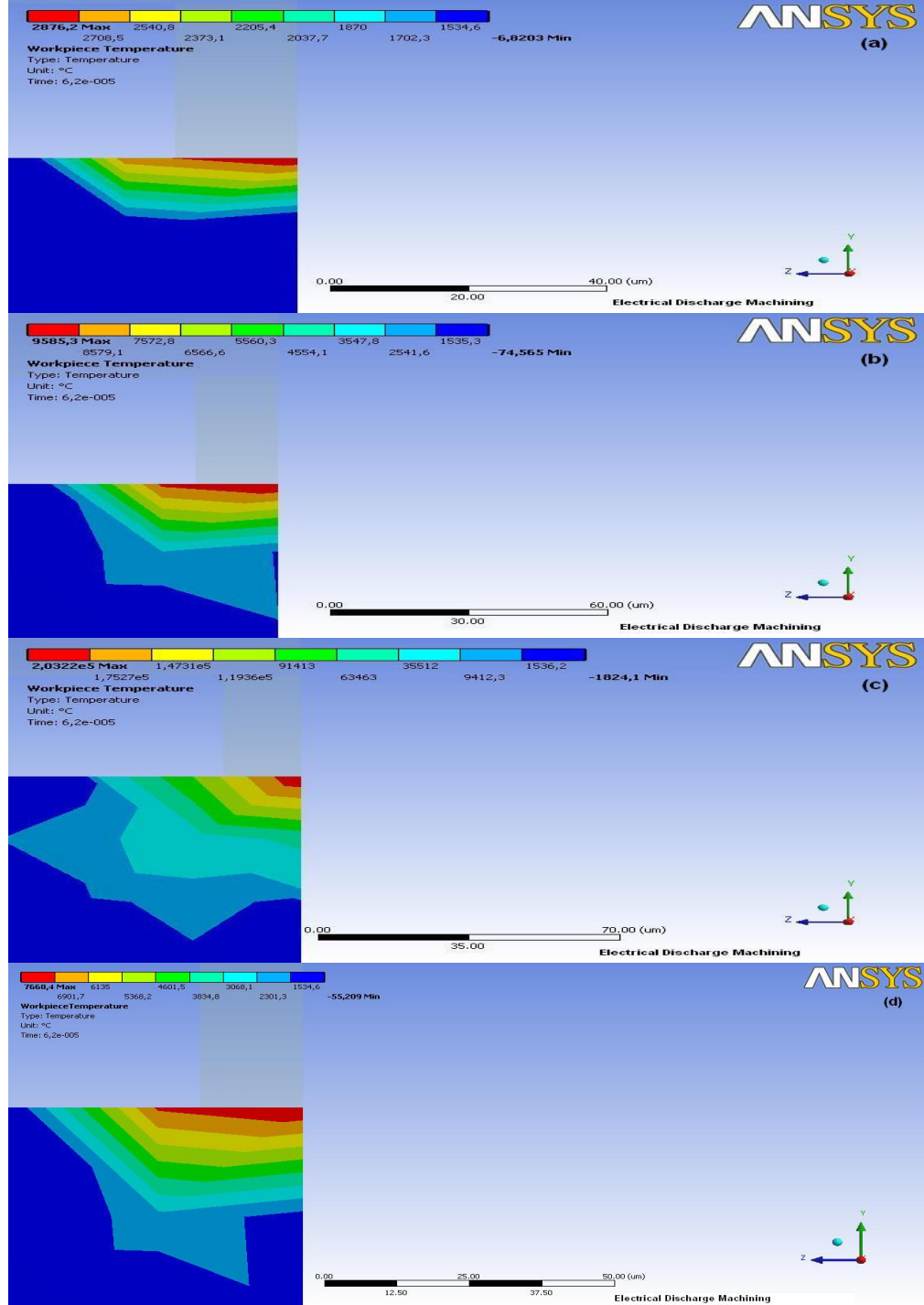
Şekil 1.1. D1, İşparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=10000^\circ\text{C}$
(c) $P_p=180\text{W}$ (d) $T_p=8000^\circ\text{C}$

EK-1. (Devam) [1] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



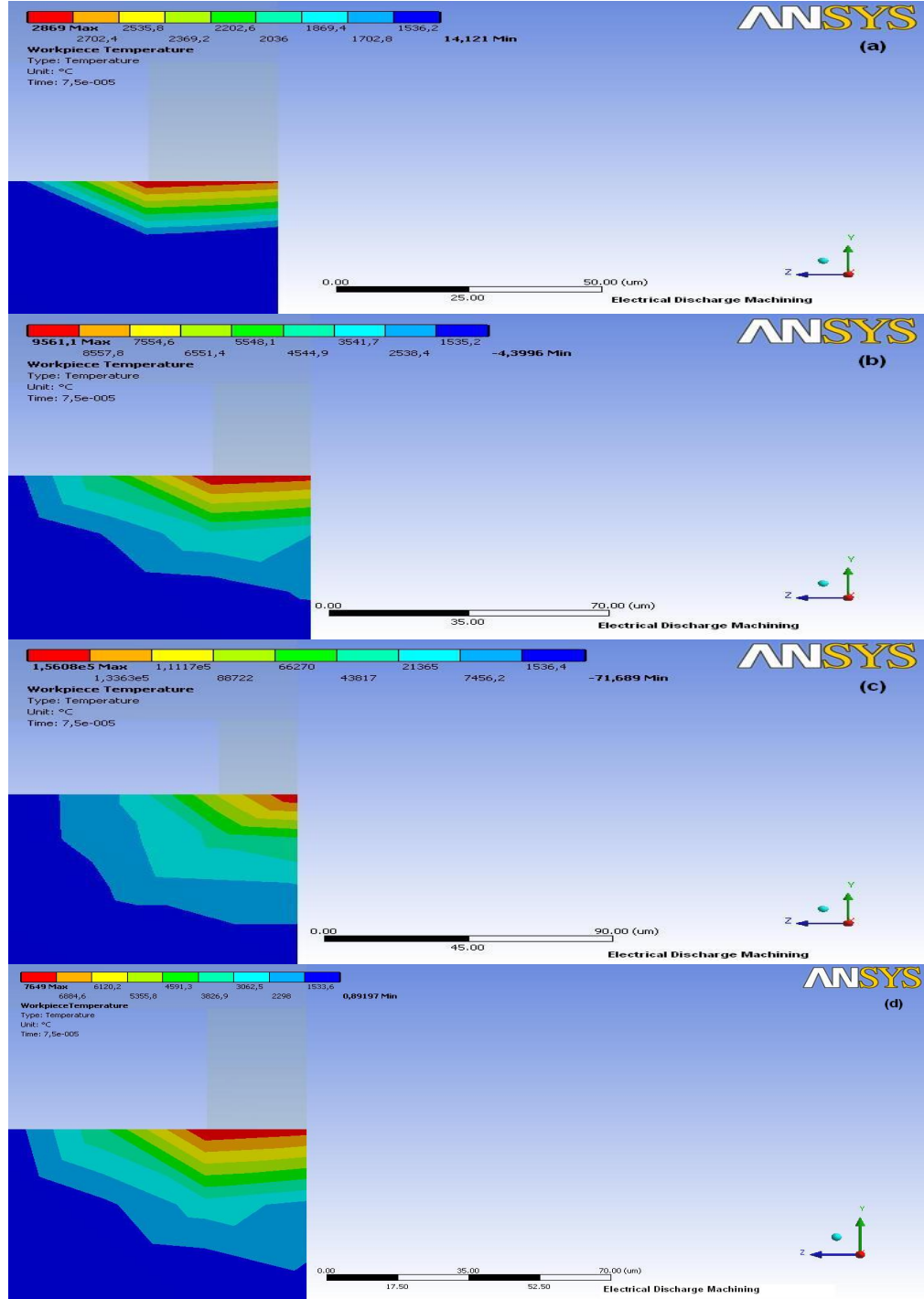
Şekil 1.2. D2, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=10000^\circ\text{C}$
 (c) $P_p=330\text{W}$ (d) $T_p=8000^\circ\text{C}$

EK-1. (Devam) [1] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



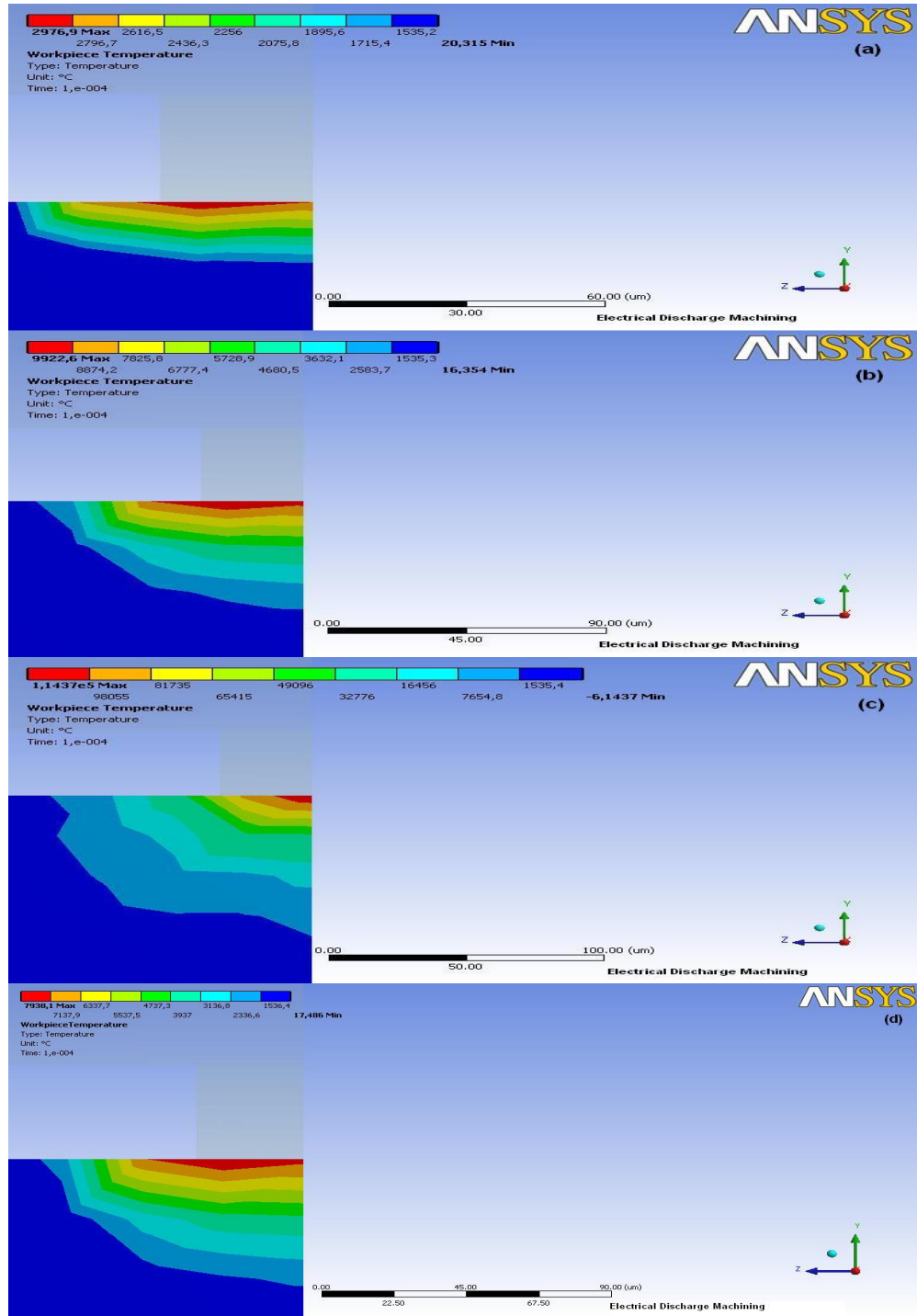
Şekil 1.3. D3, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=10000^\circ\text{C}$
 (c) $P_p=540\text{W}$ (d) $T_p=8000^\circ\text{C}$

EK-1. (Devam) [1] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



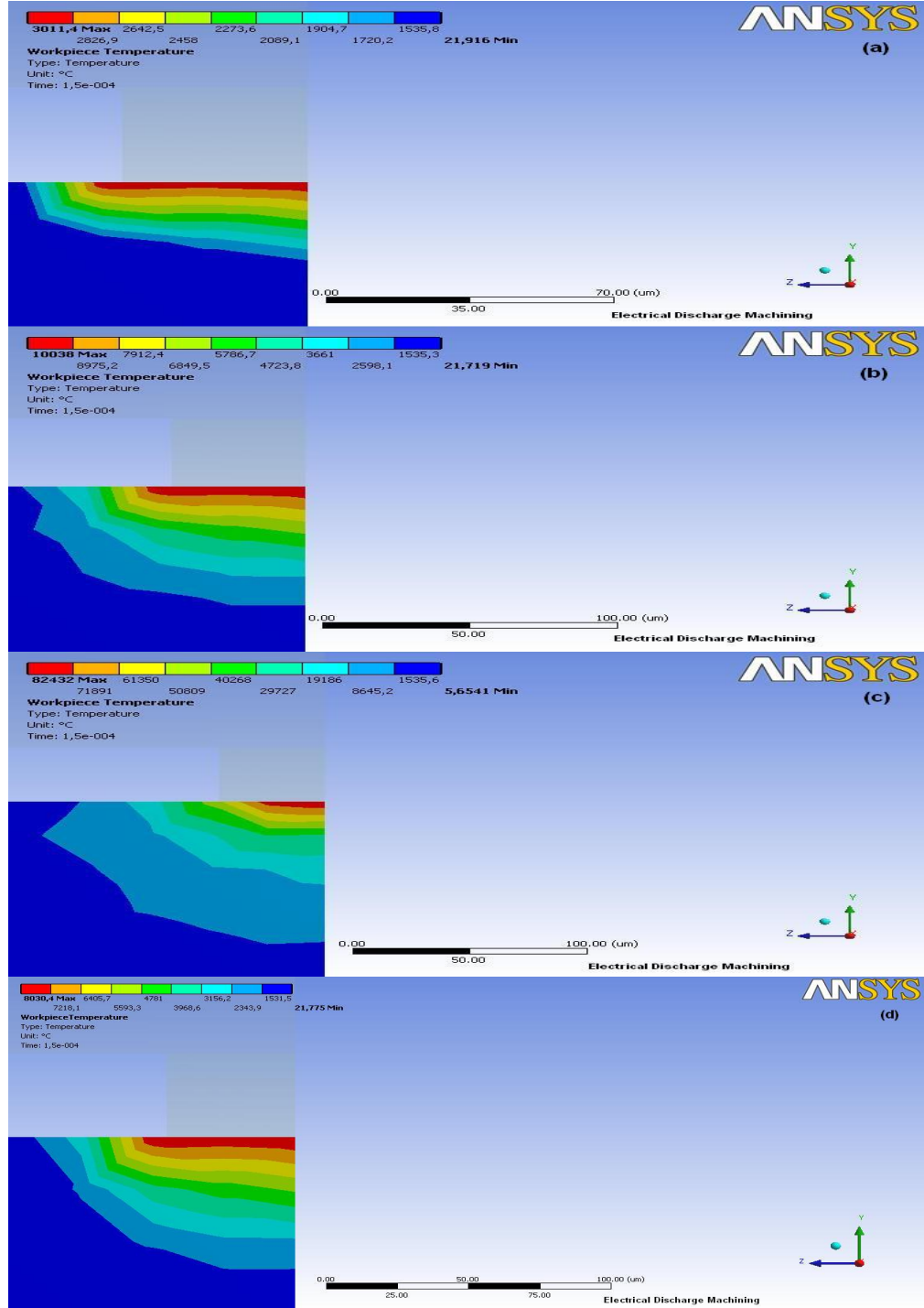
Şekil 1.4. D4, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=10000^\circ\text{C}$
(c) $P_p=540\text{W}$ (d) $T_p=8000^\circ\text{C}$

EK-1. (Devam) [1] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



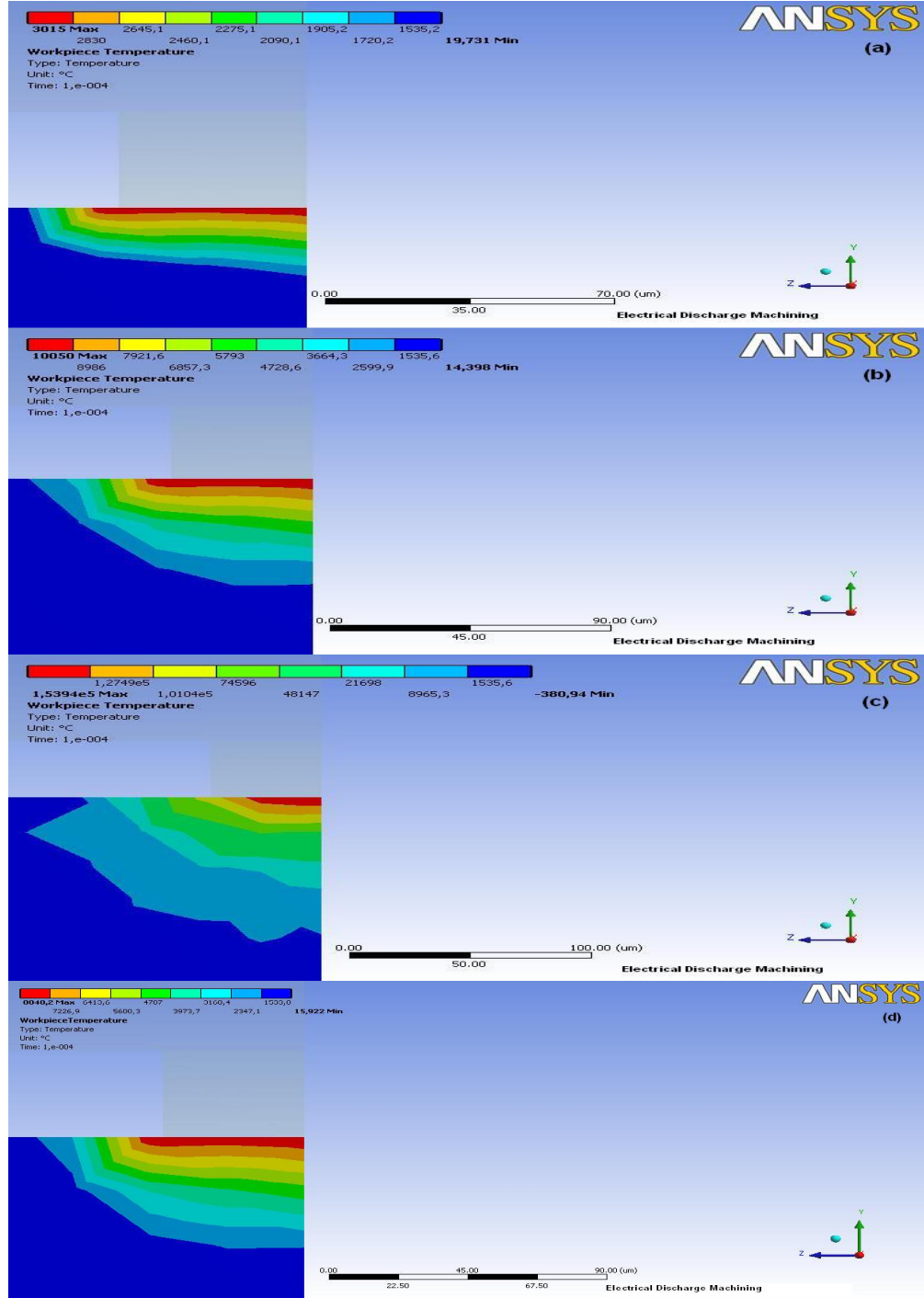
Şekil 1.5. D5, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=10000^\circ\text{C}$
 (c) $P_p=540\text{W}$ (d) $T_p=8000^\circ\text{C}$

EK-1. (Devam) [1] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



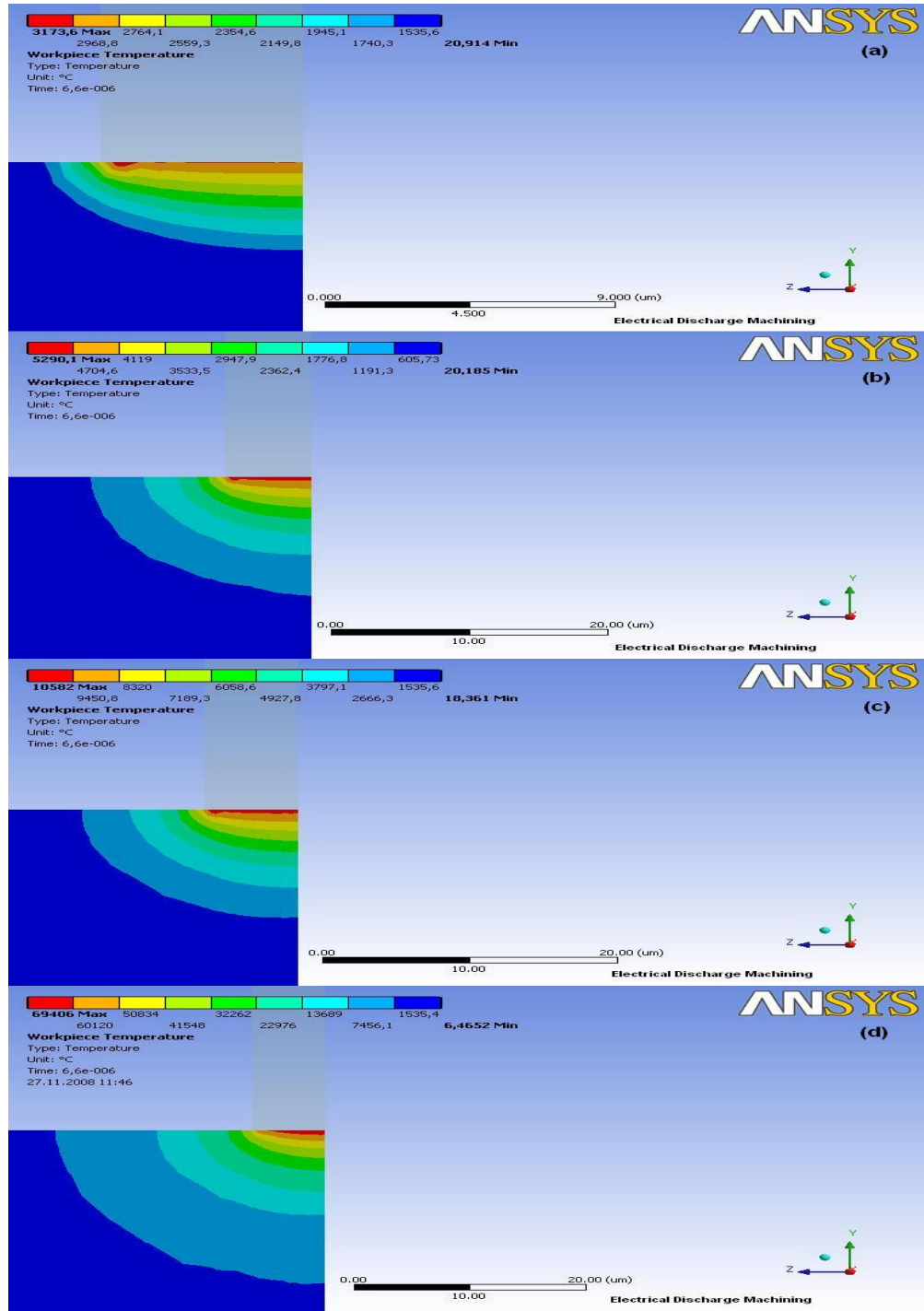
Şekil 1.6. D6, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=10000^\circ\text{C}$
 (c) $P_p=540\text{W}$ (d) $T_p=8000^\circ\text{C}$

EK-1. (Devam) [1] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



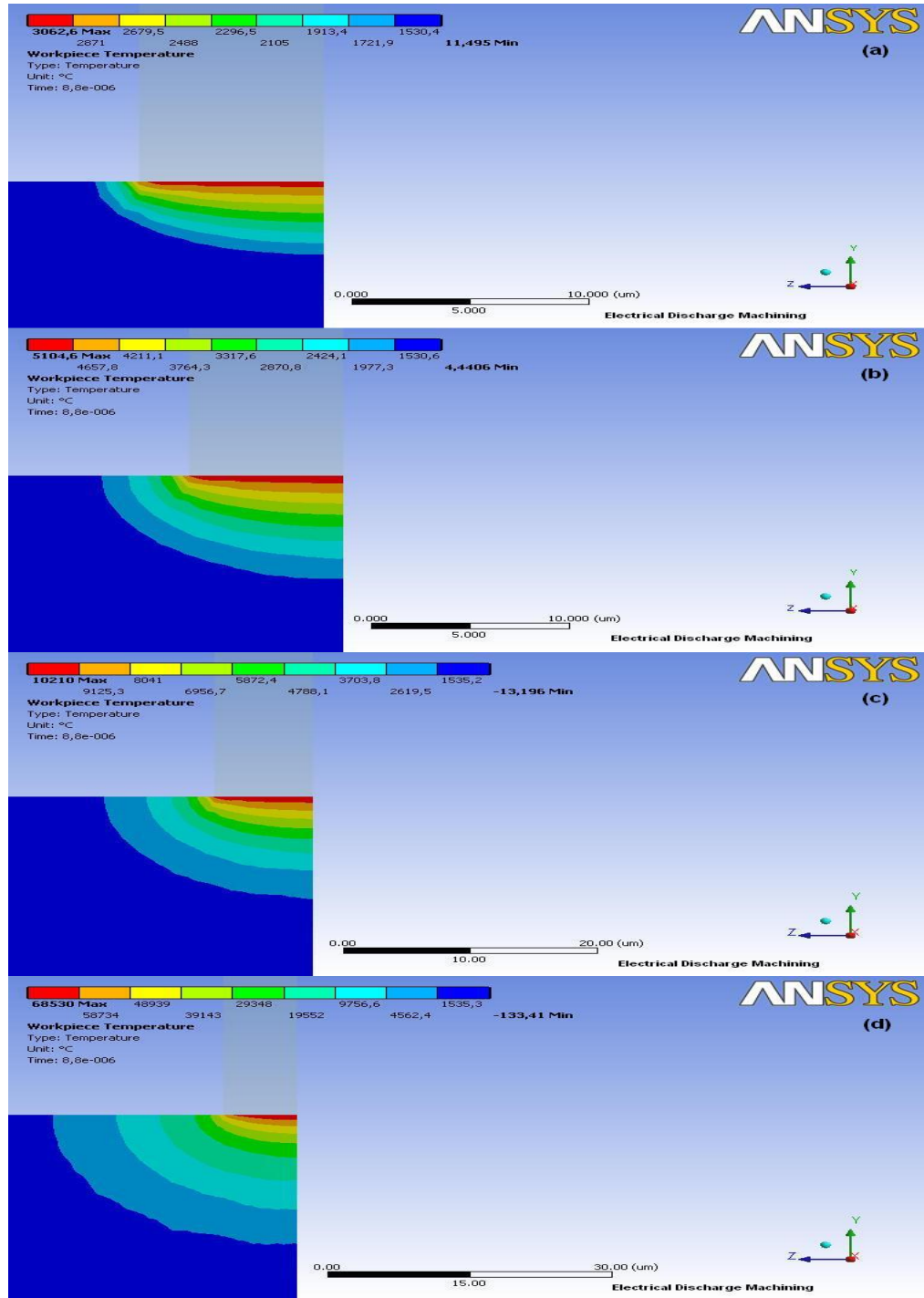
Şekil 1.7. D7, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=10000^\circ\text{C}$
(c) $P_p=1075\text{W}$ (d) $T_p=8000^\circ\text{C}$

EK-2. [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



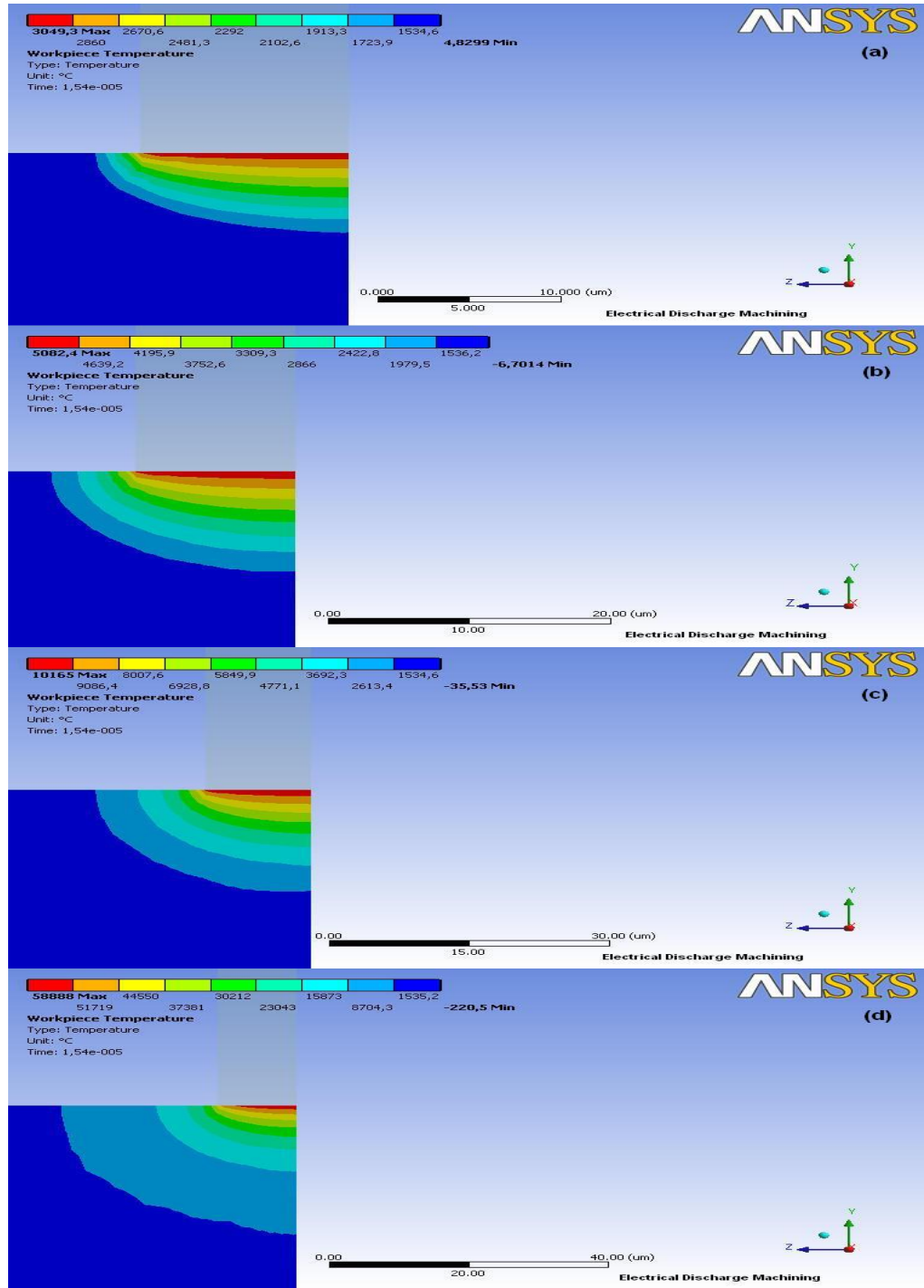
Şekil 2.1. D1, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
(c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=58,5\text{W}$

EK-2. (Devam) [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



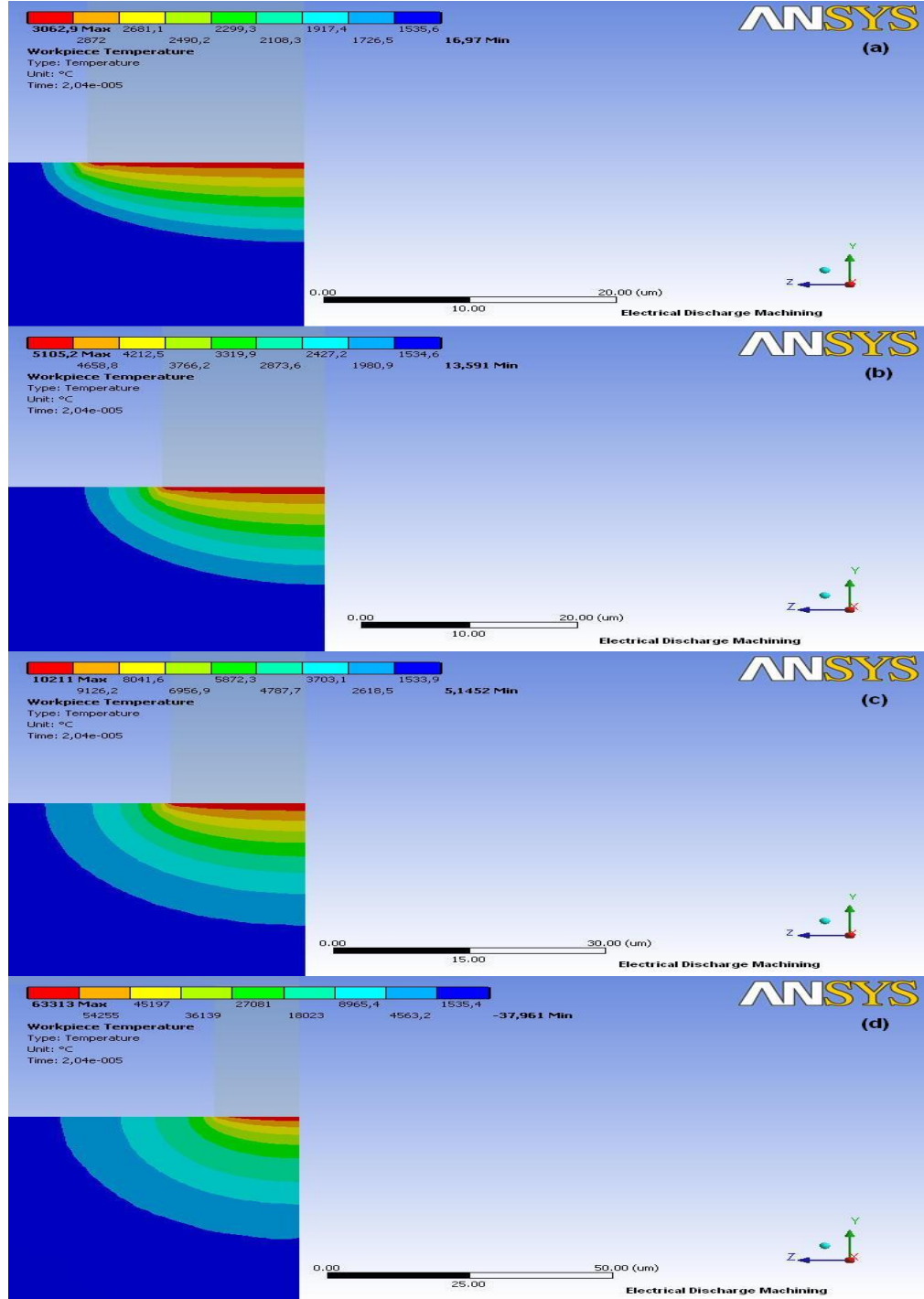
Şekil 2.2. D2, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=71,25\text{W}$

EK-2. (Devam) [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



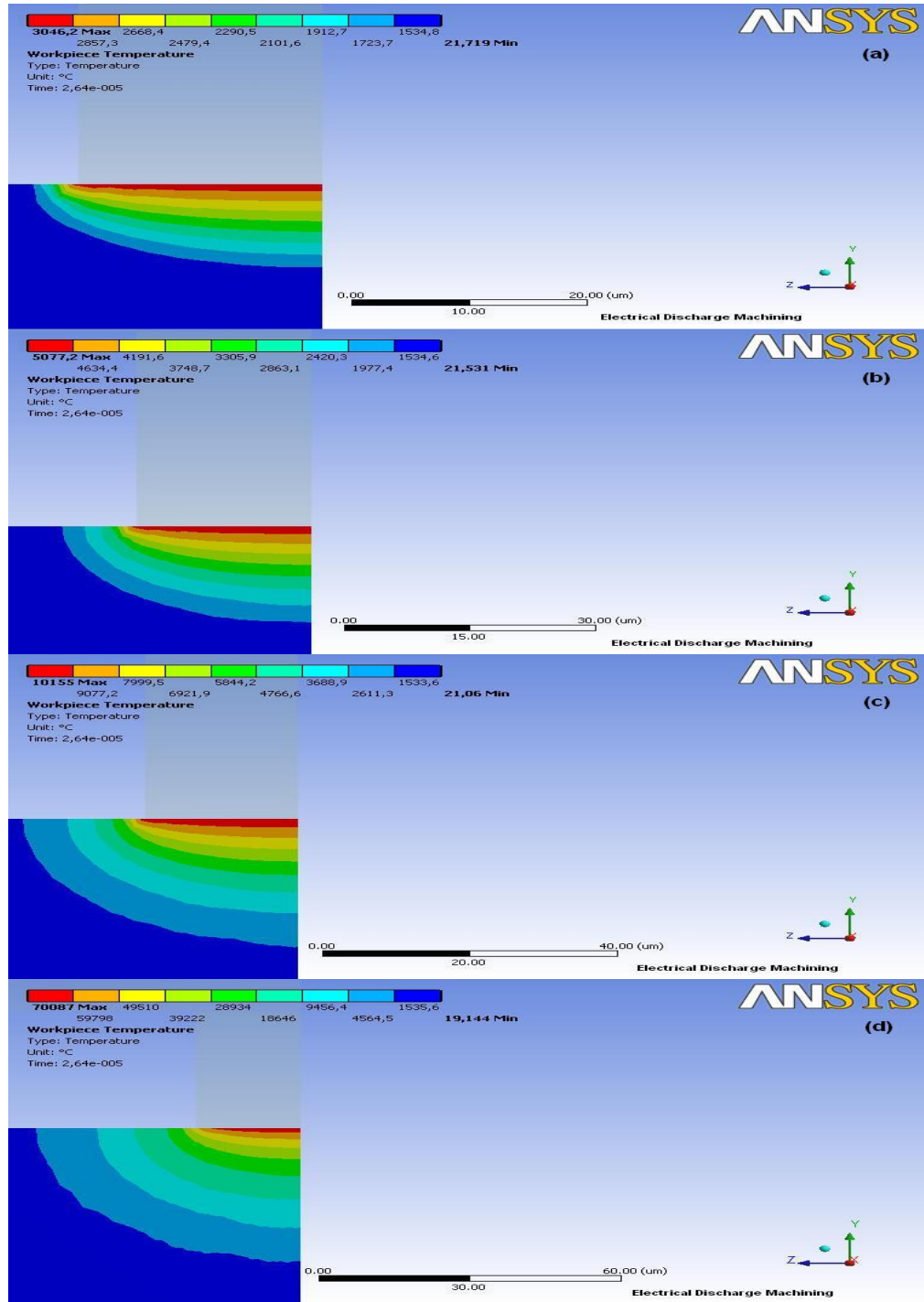
Şekil 2.3. D3, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=91,75\text{W}$

EK-2. (Devam) [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



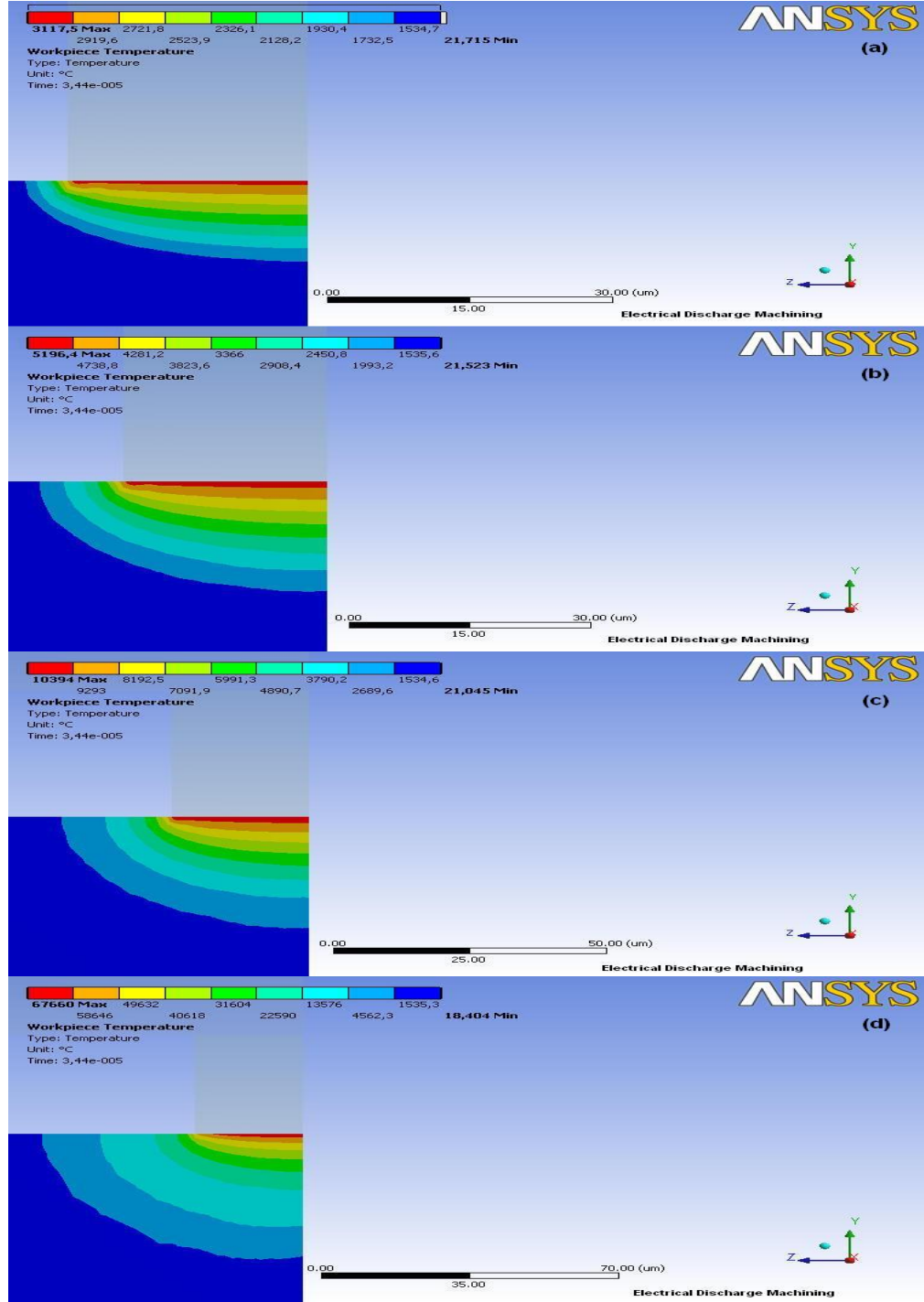
Şekil 2.4. D4, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=132,5\text{W}$

EK-2. (Devam) [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



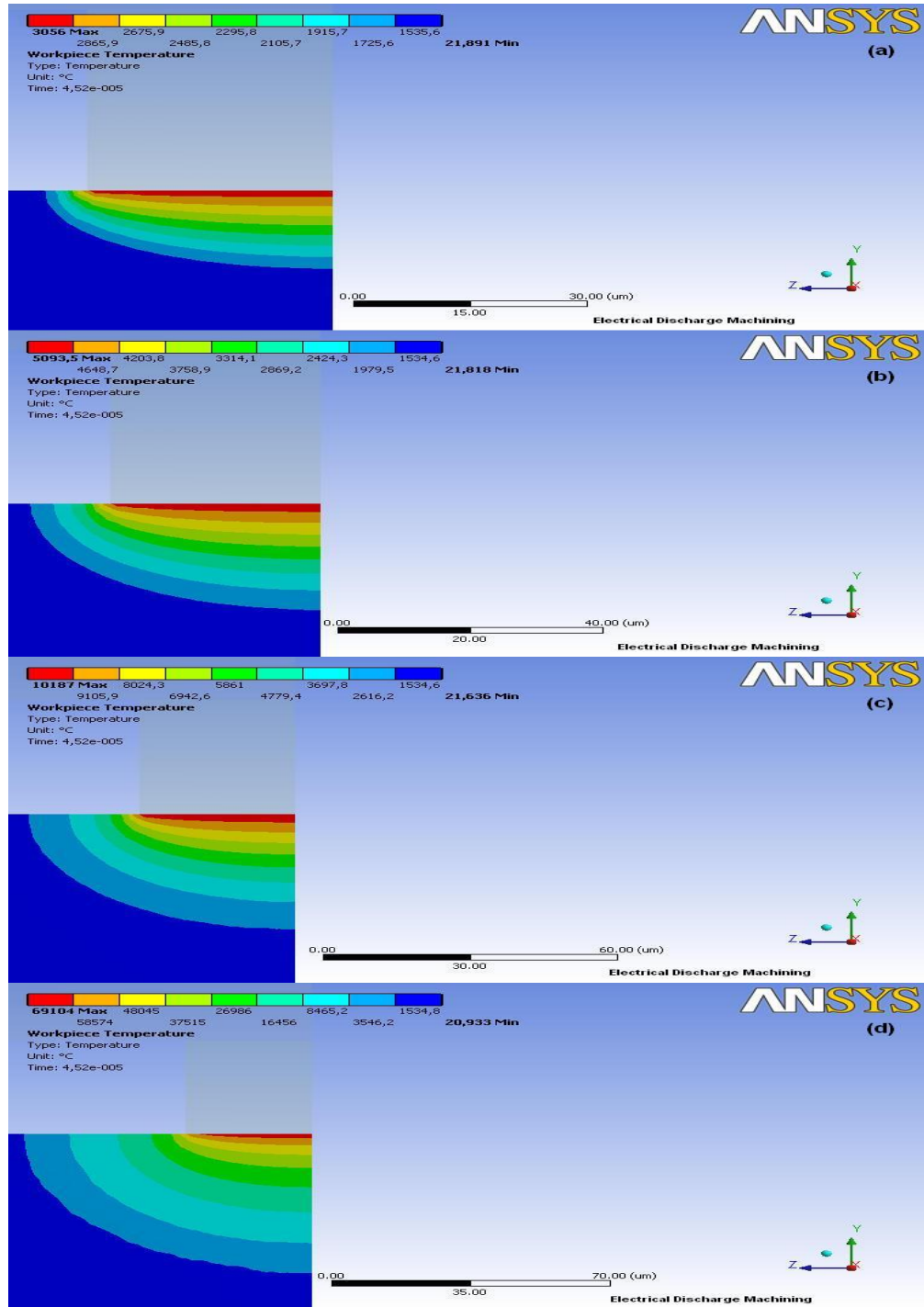
Şekil 2.5. D5, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
(c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=212,5\text{W}$

EK-2. (Devam) [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



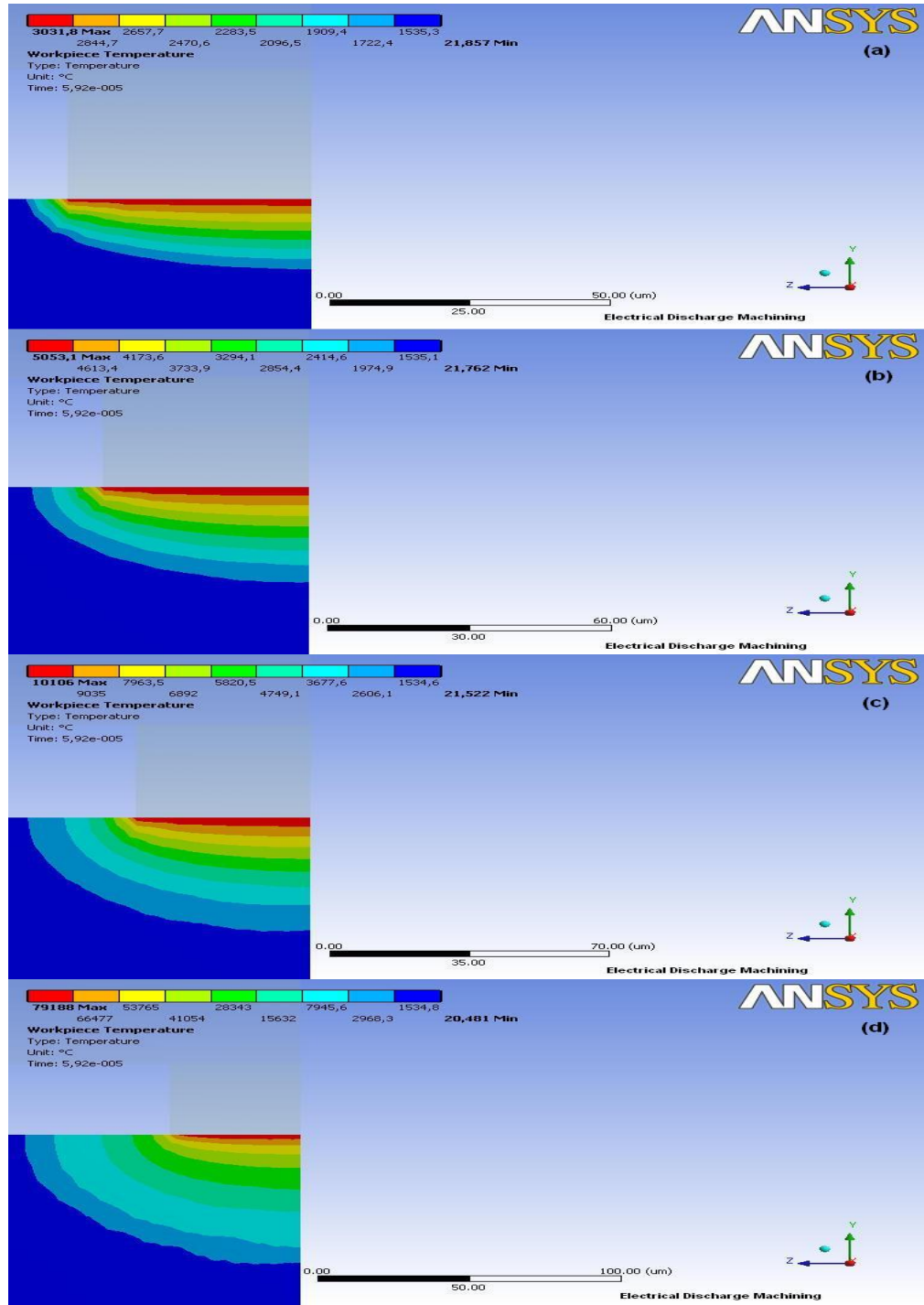
Şekil 2.6. D6, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=250\text{W}$

EK-2. (Devam) [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



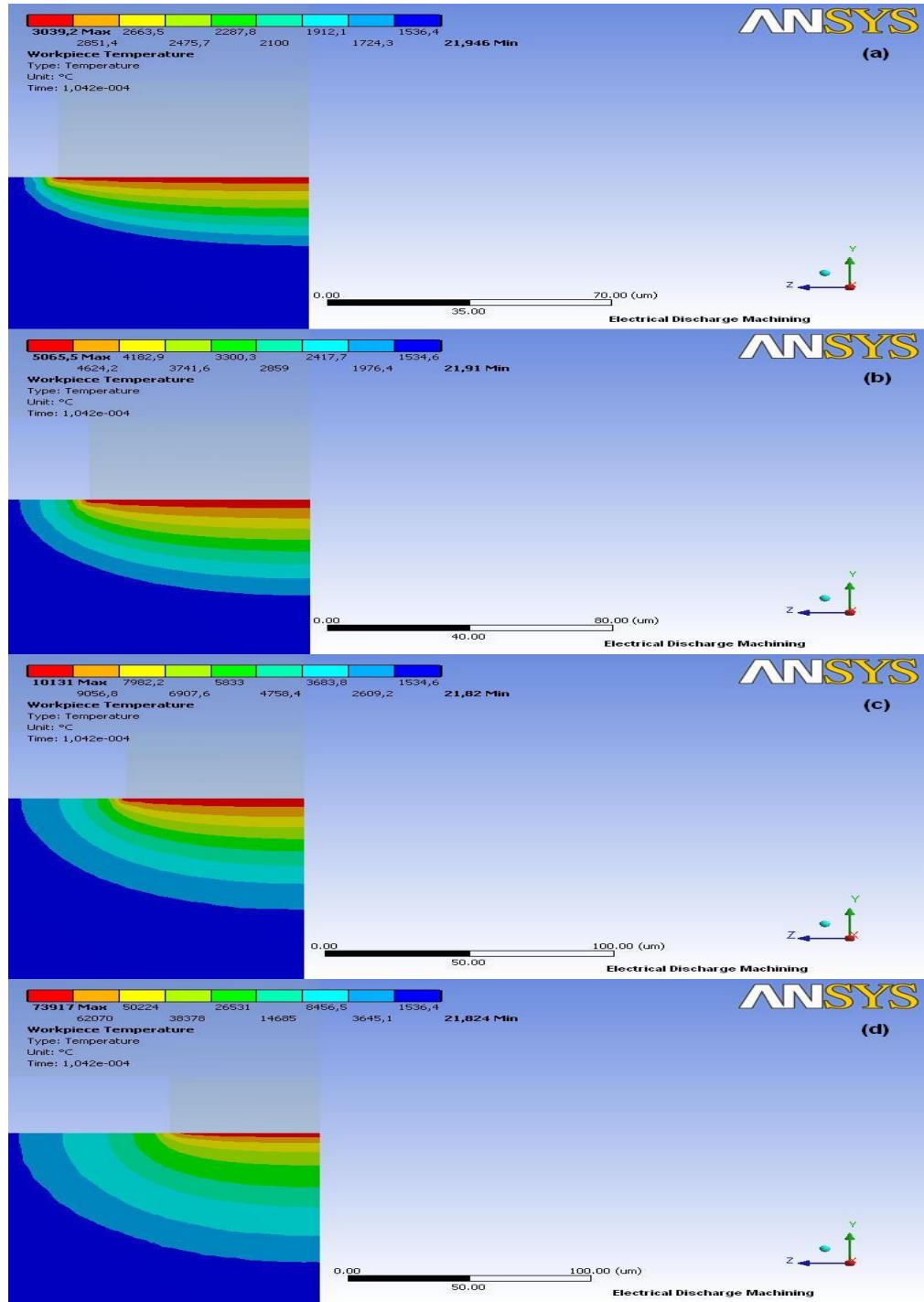
Şekil 2.7. D7, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
(c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=320\text{W}$

EK-2. (Devam) [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



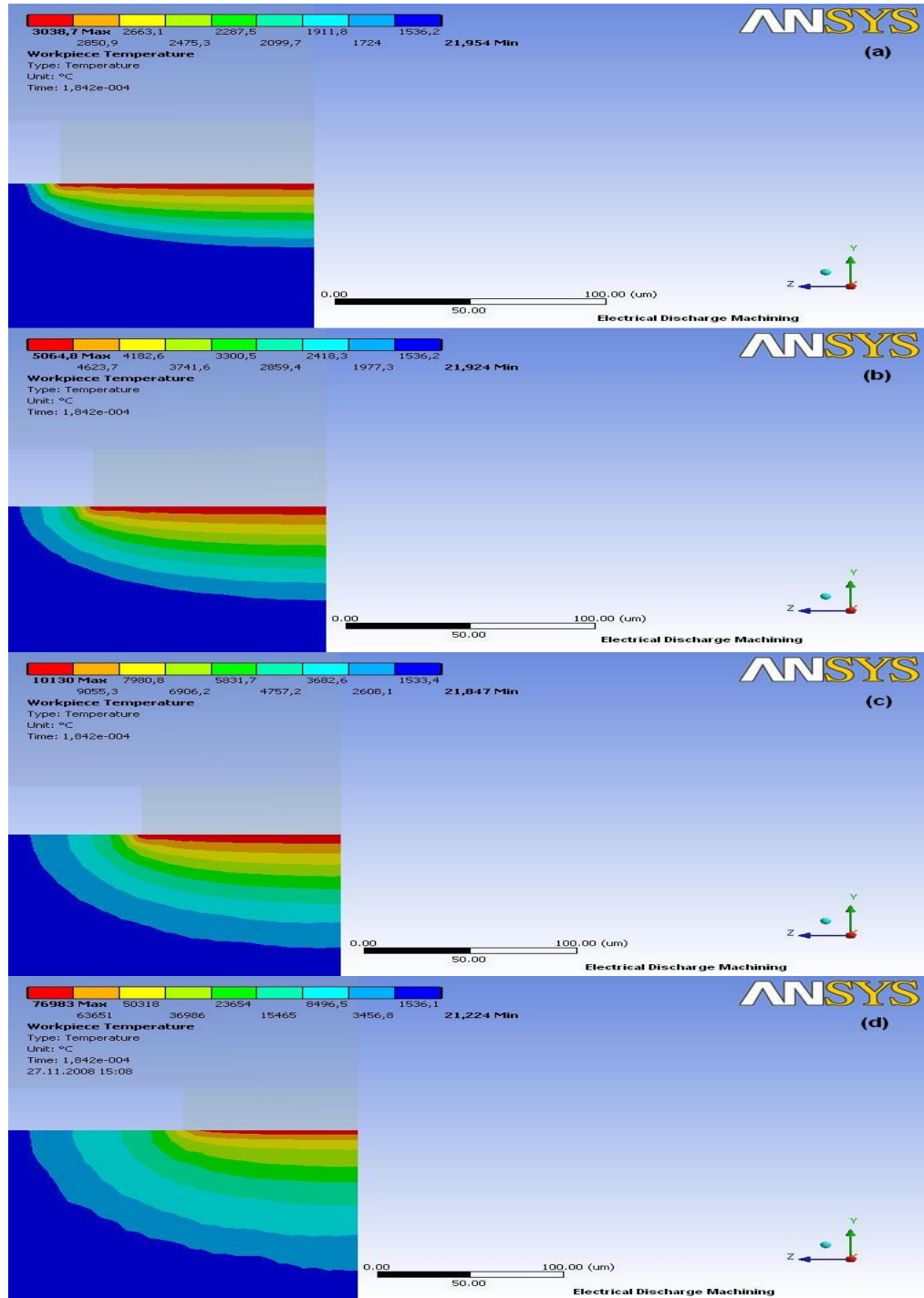
Şekil 2.8. D8, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^{\circ}\text{C}$ (b) $T_p=5000^{\circ}\text{C}$
 (c) $T_p=10000^{\circ}\text{C}$ (d) $P_p=500\text{W}$

EK-2. (Devam) [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



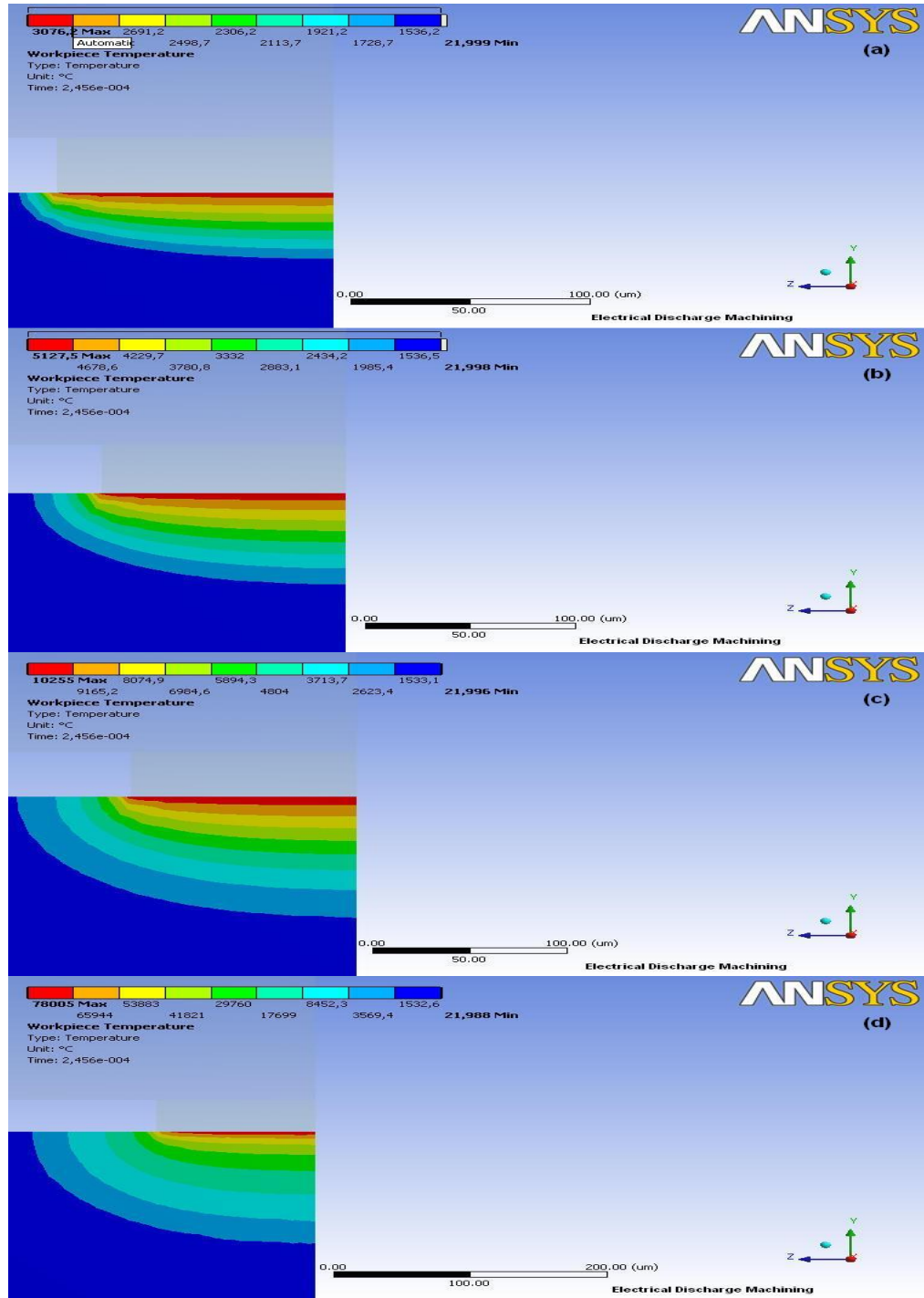
Şekil 2.9. D9, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=625\text{W}$

EK-2. (Devam) [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



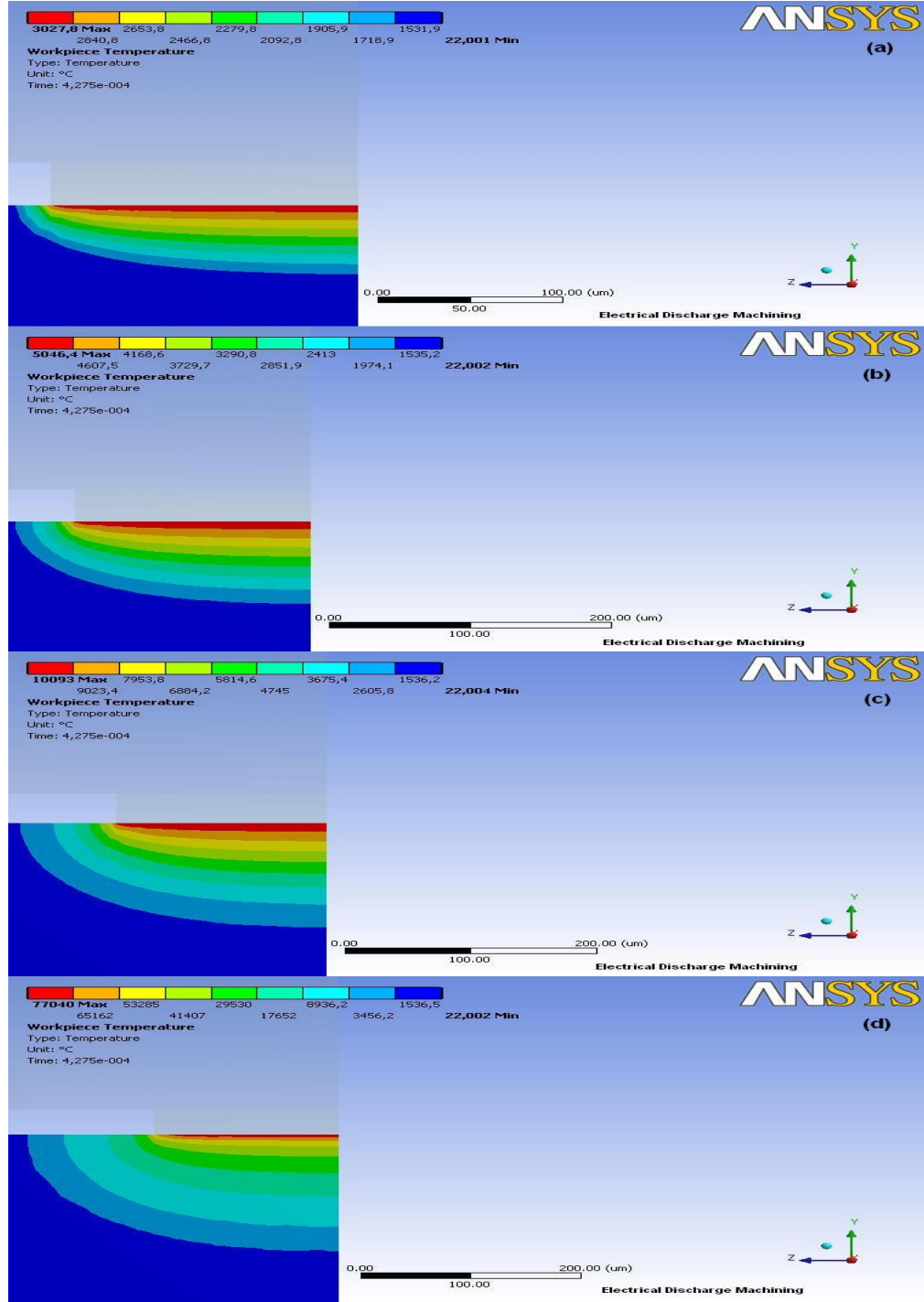
Şekil 2.10. D10, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=900\text{W}$

EK-2. (Devam) [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



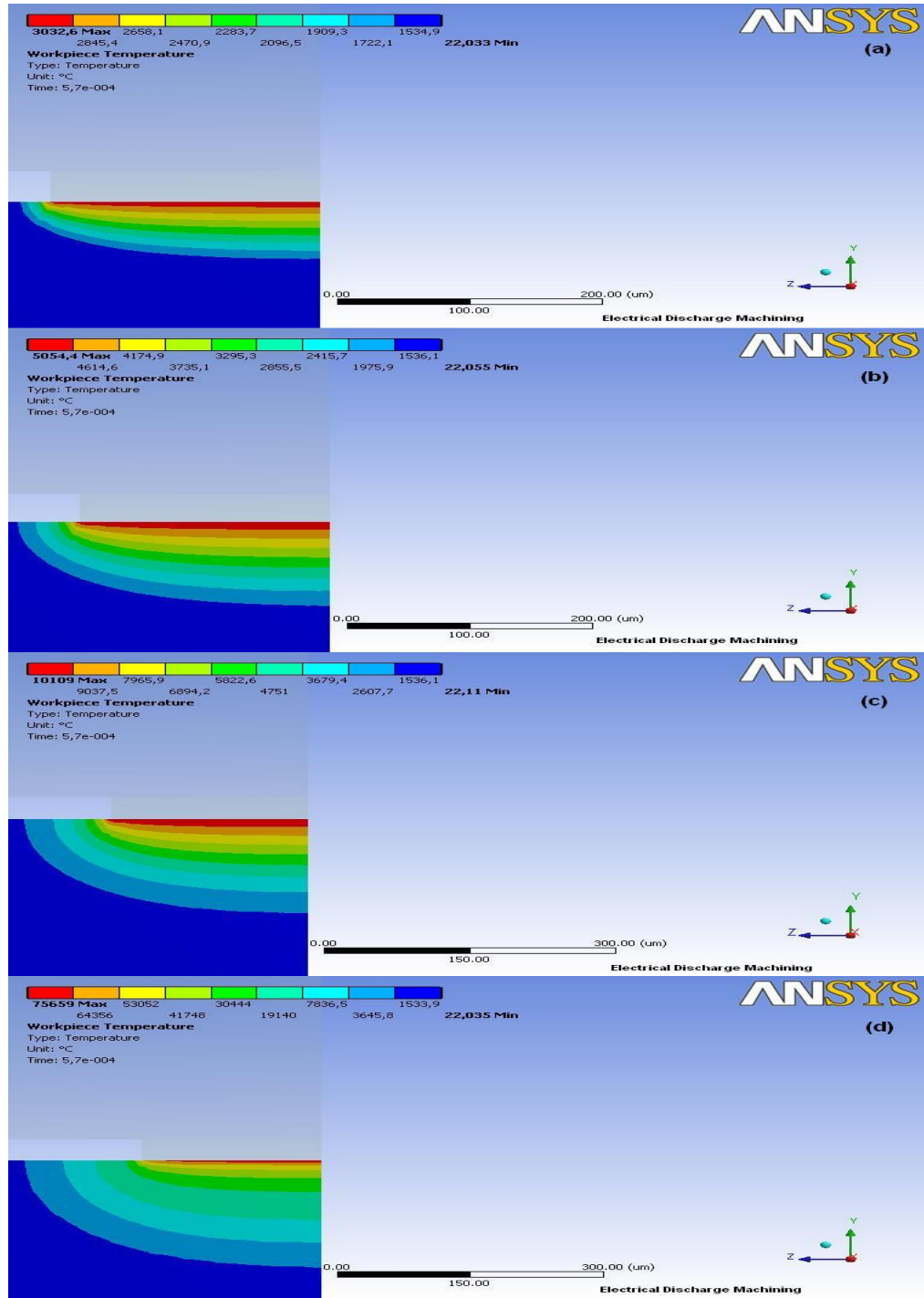
Şekil 2.11. D11, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=1100\text{W}$

EK-2. (Devam) [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



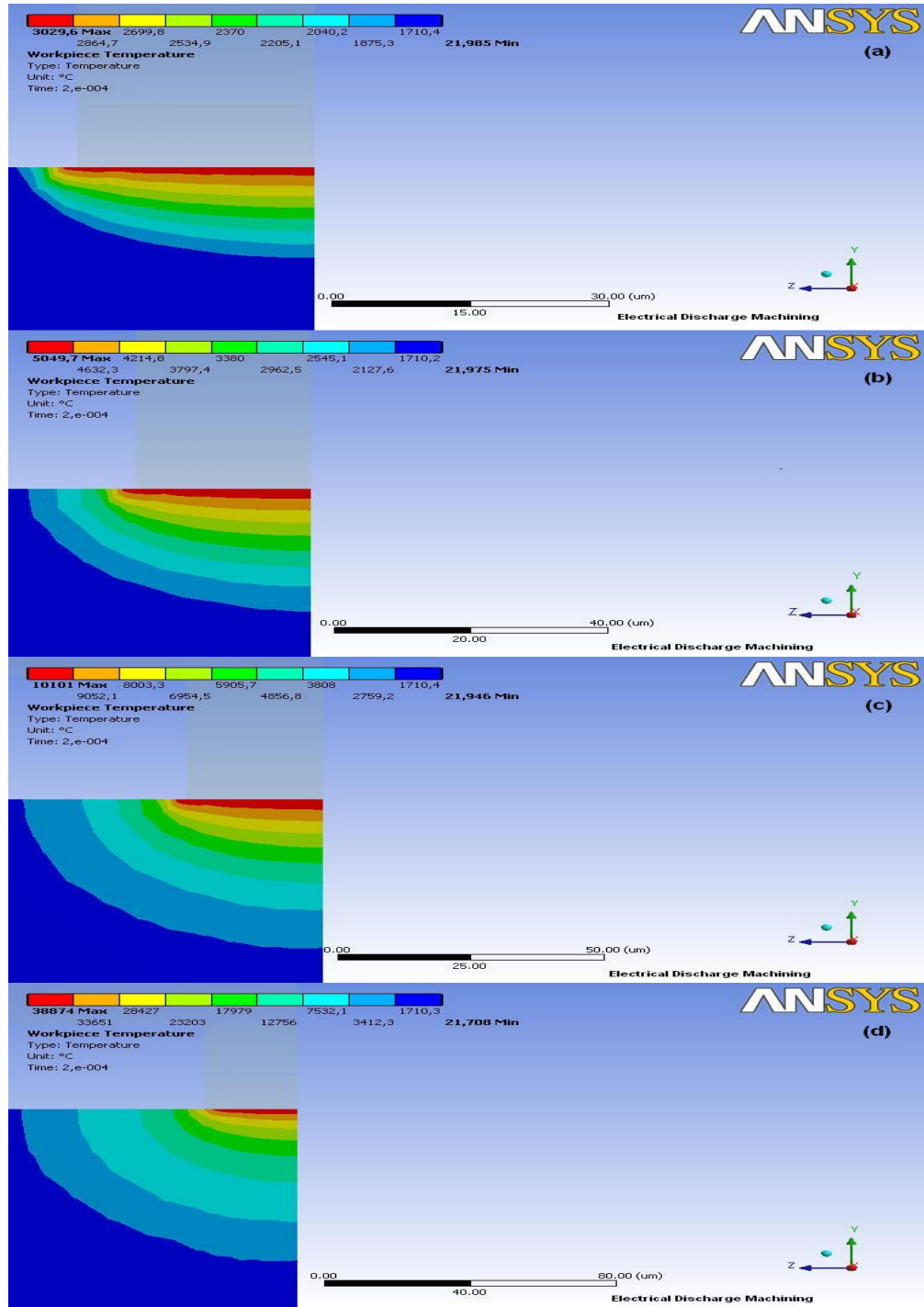
Şekil 2.12. D12, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
(c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=1450\text{W}$

EK-2. (Devam) [3] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



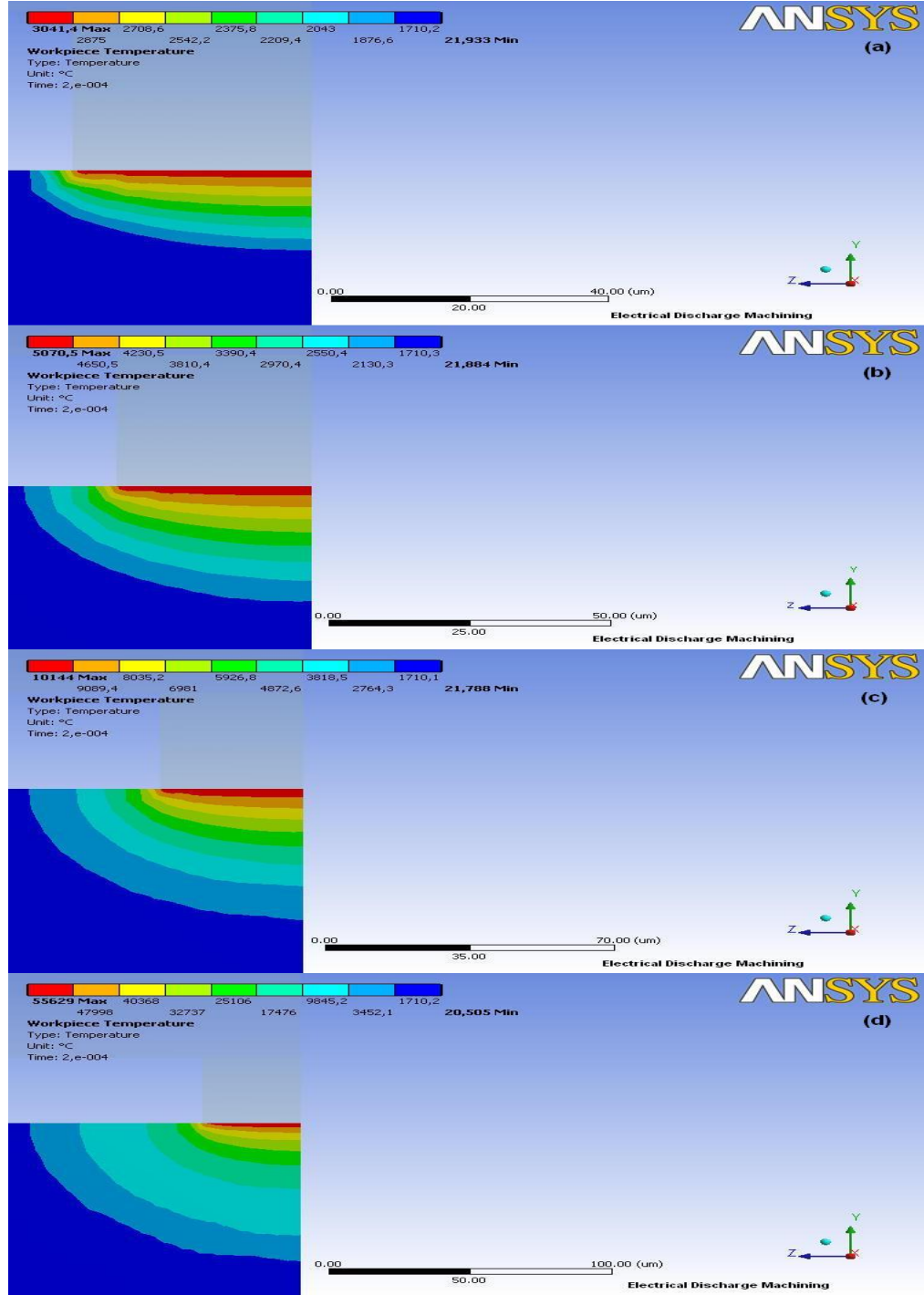
Şekil 2.13. D13, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=1700\text{W}$

EK-3. [7] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



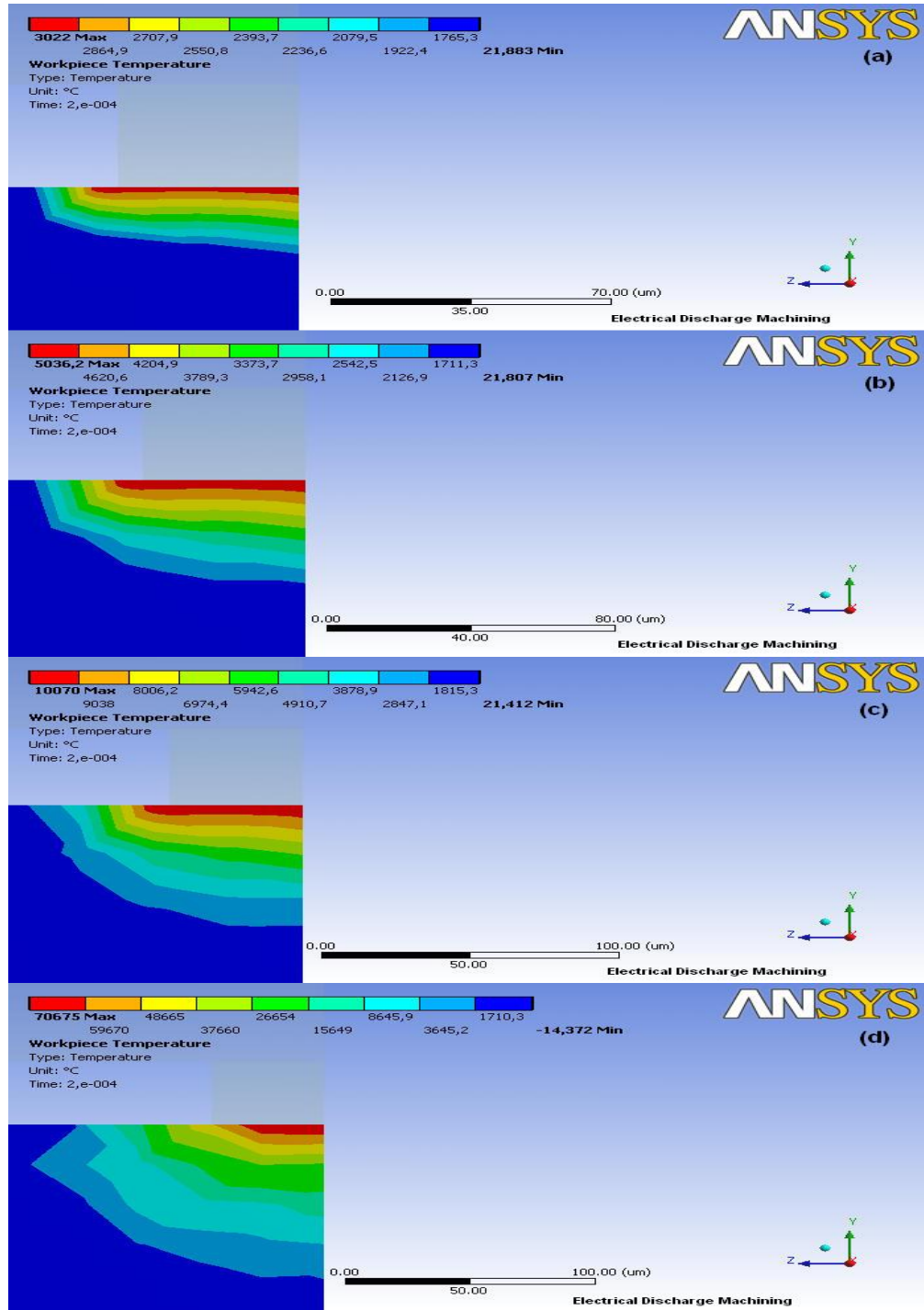
Şekil 3.1. D1, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
(c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=96\text{W}$

EK-3. (Devam) [7] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



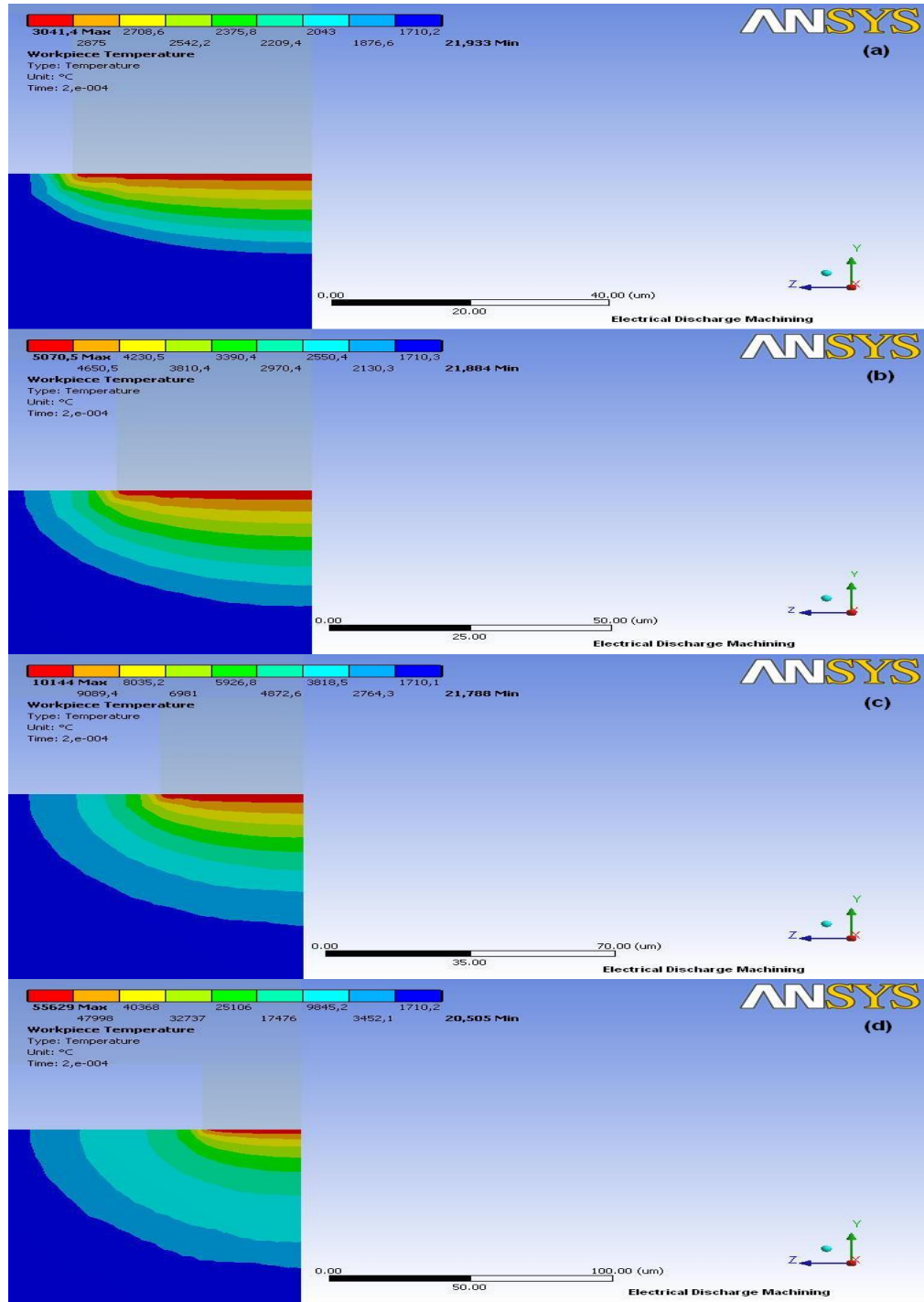
Şekil 3.2. D2, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=195\text{W}$

EK-3. (Devam) [7] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



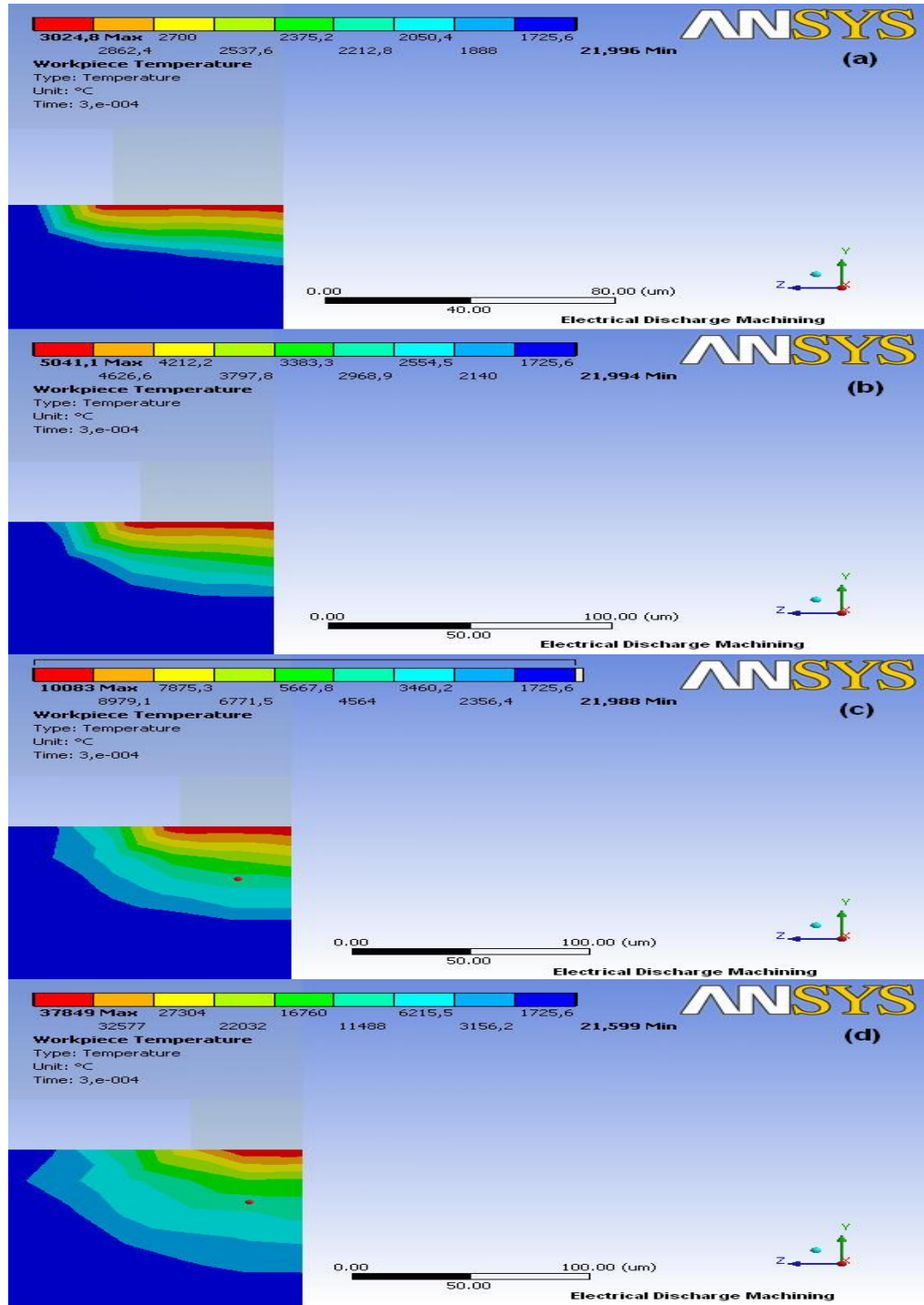
Şekil 3.3. D3, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^{\circ}\text{C}$ (b) $T_p=5000^{\circ}\text{C}$
 (c) $T_p=10000^{\circ}\text{C}$ (d) $P_p=360\text{W}$

EK-3. (Devam) [7] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



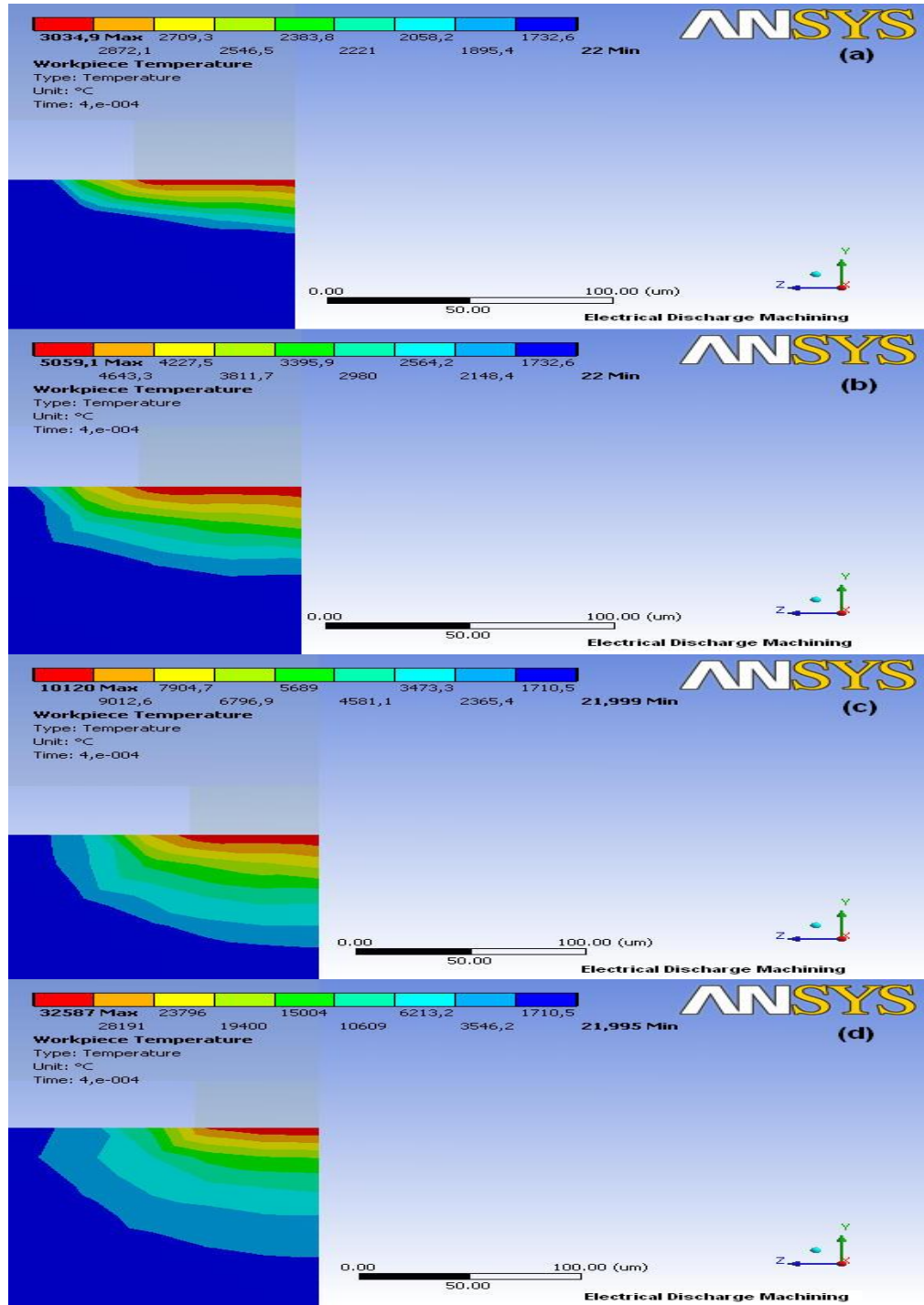
Şekil 3.4. D4, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=195\text{W}$

EK-3. (Devam) [7] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



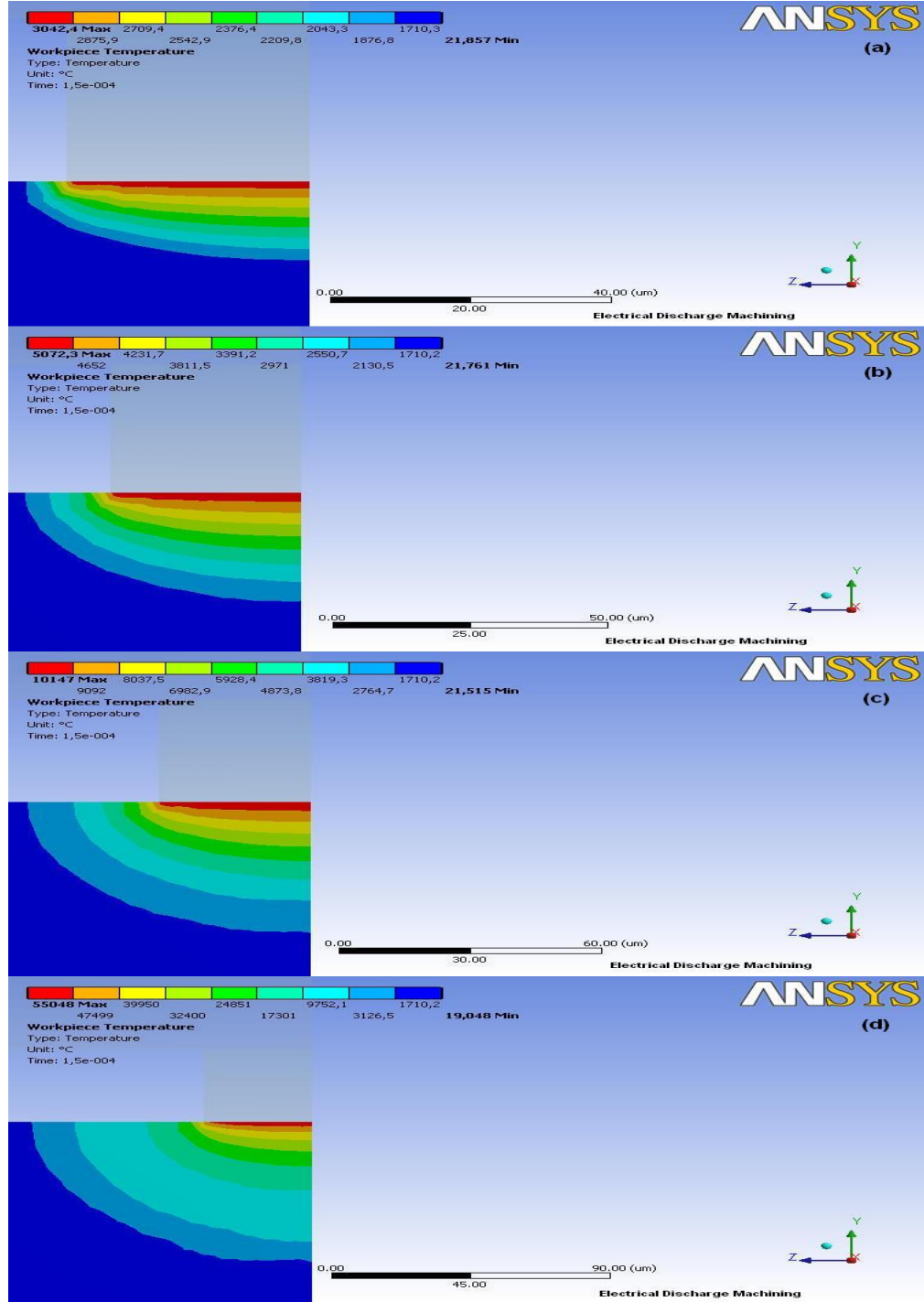
Şekil 3.5. D5, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=195\text{W}$

EK-3. (Devam) [7] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



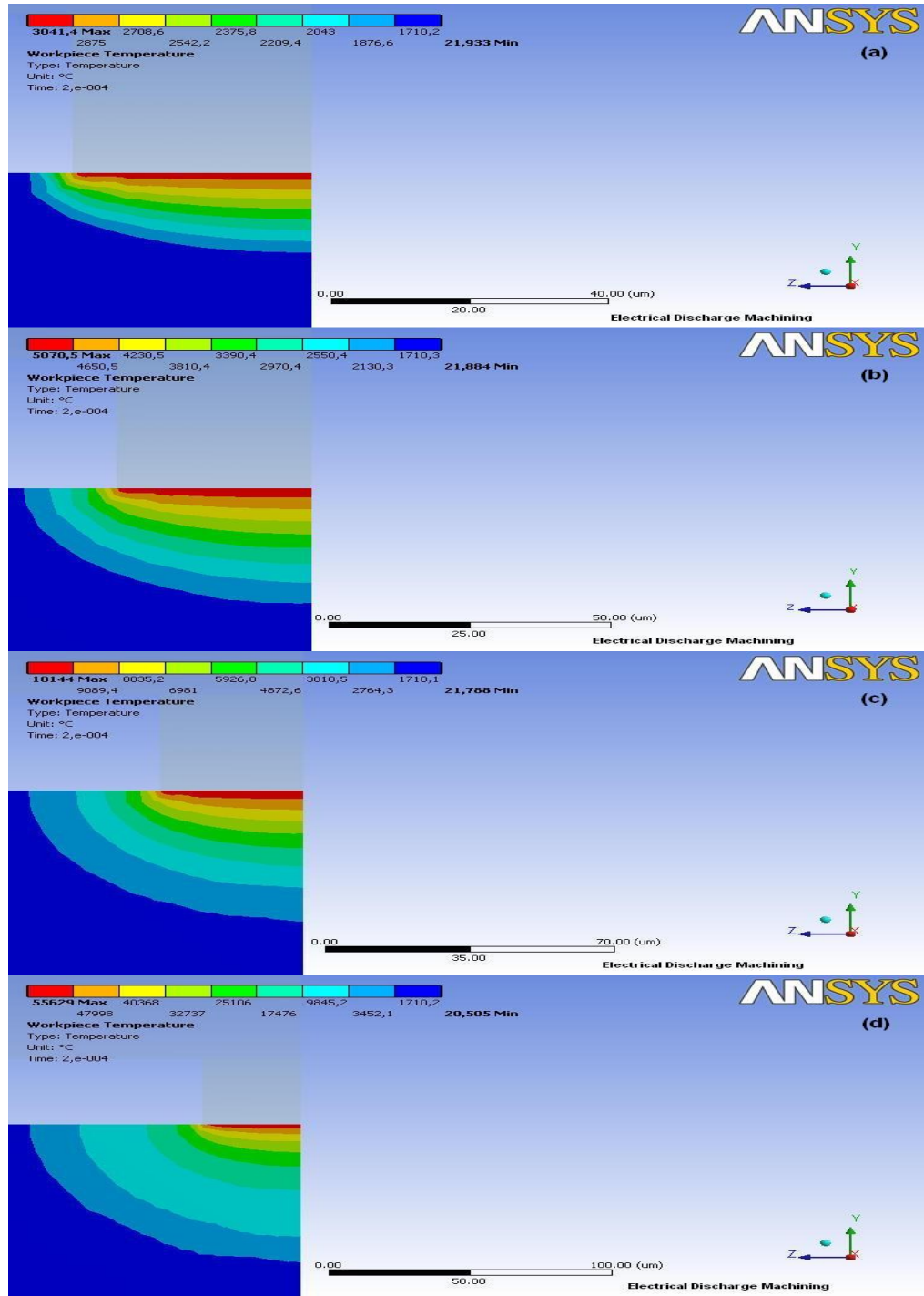
Şekil 3.6. D6, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^{\circ}\text{C}$ (b) $T_p=5000^{\circ}\text{C}$
 (c) $T_p=10000^{\circ}\text{C}$ (d) $P_p=195\text{W}$

EK-3. (Devam) [7] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



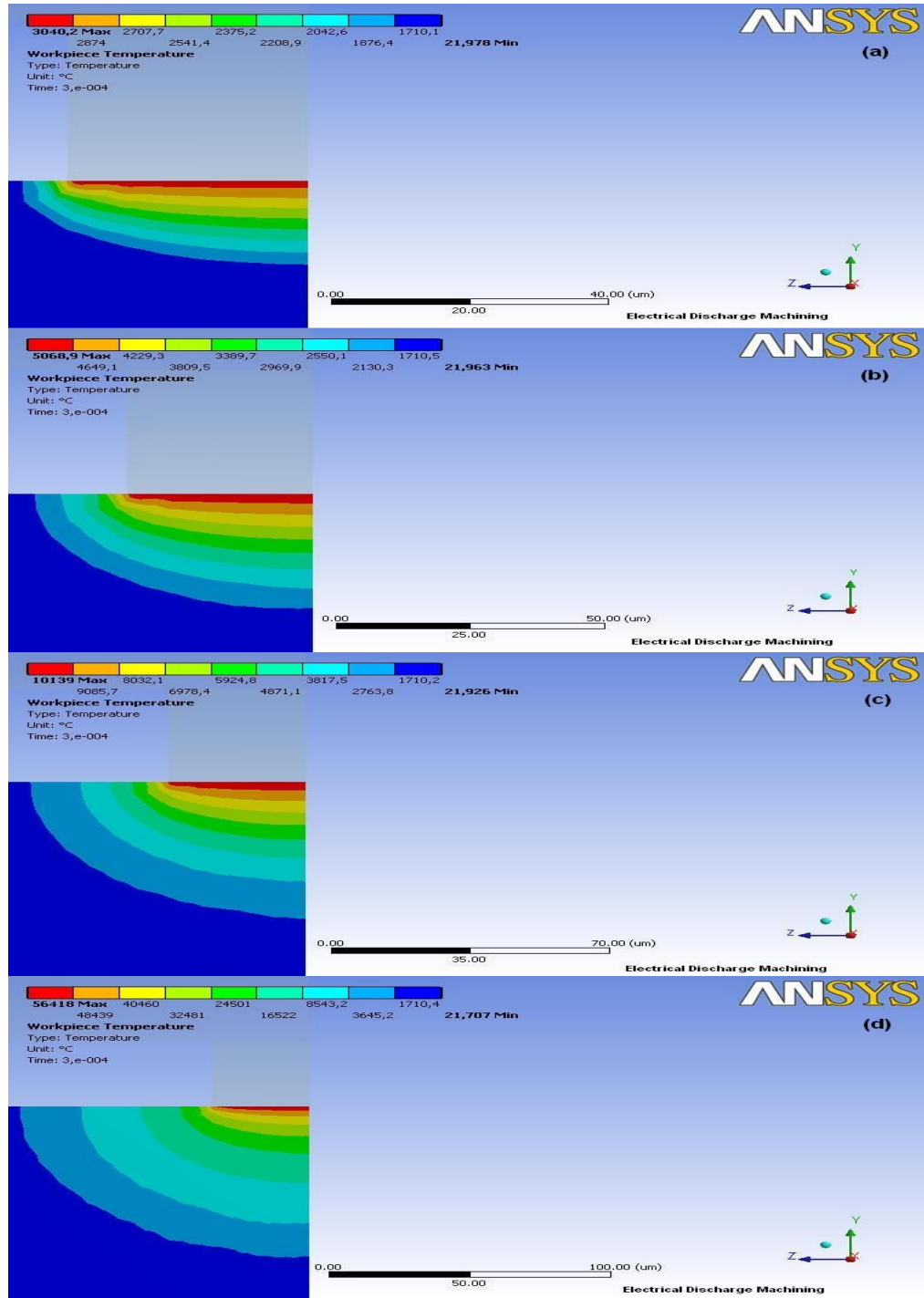
Şekil 3.7. D7, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=195\text{W}$

EK-3. (Devam) [7] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



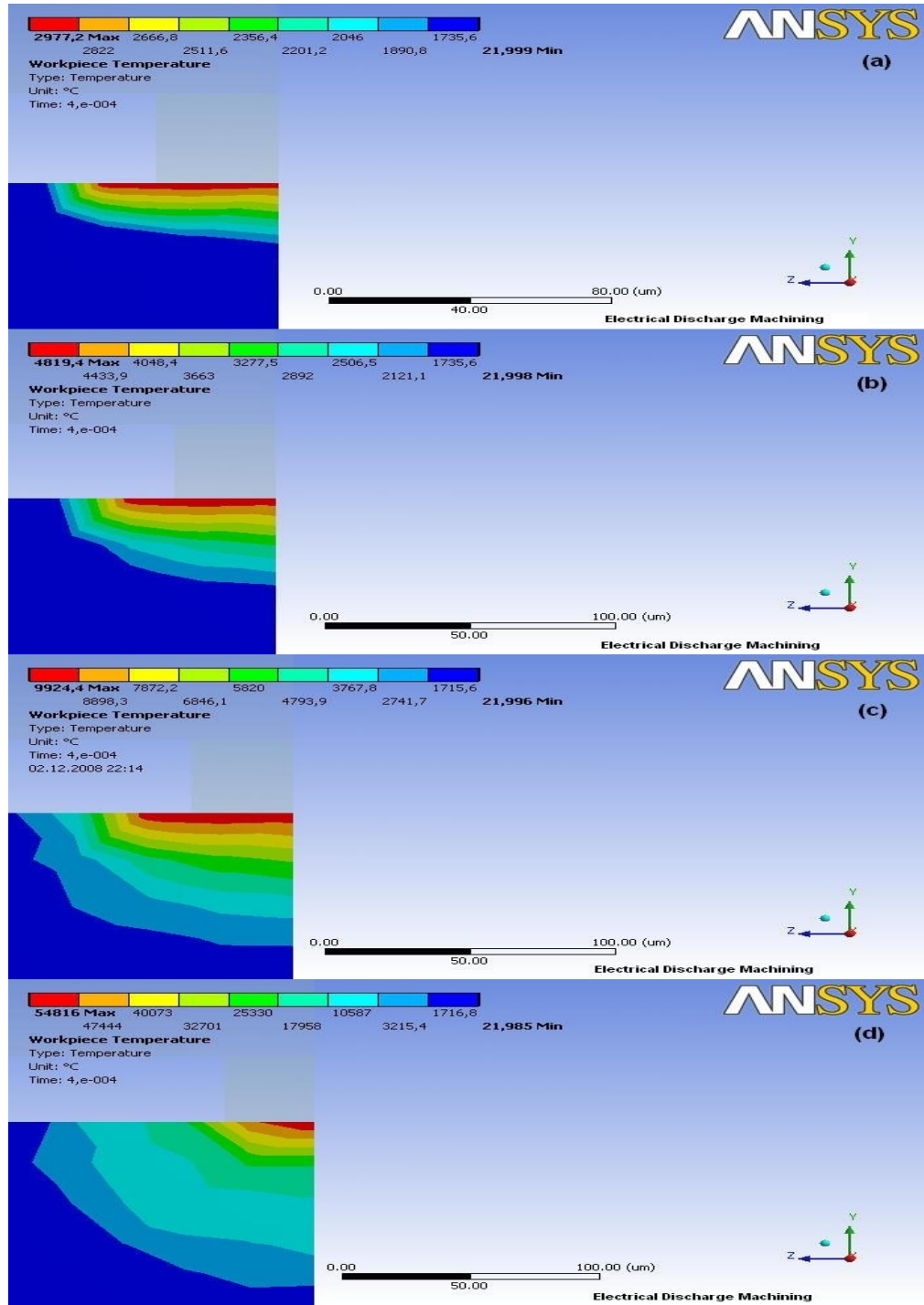
Şekil 3.8. D8, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=195\text{W}$

EK-3. (Devam) [7] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



Şekil 3.9. D9, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=195\text{W}$

EK-3. (Devam) [7] nolu referans verilerine göre analiz sonuçları



Şekil 3.10. D10, işparçası sıcaklık dağılımı, (a) $T_p=3000^\circ\text{C}$ (b) $T_p=5000^\circ\text{C}$
 (c) $T_p=10000^\circ\text{C}$ (d) $P_p=195\text{W}$

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : SARIKAVAK, Yasin
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 27.06.1983 Ankara
Medeni hali : Bekar
Telefon : 0 (506) 276 09 69
E-mail : sarikavak@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2006
Lise	Ankara Atatürk Anadolu Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006-....	T. C. Devlet Demiryolları	Makine Mühendisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Basketbol, Bilgisayar teknolojileri, İnternet