



**ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE DÖNER ELEKTROT
KULLANARAK DELİK DELMEDE DİELEKTRİK SIVISINA
KARIŞTIRILAN TOZLARIN VE ISITMANIN İŞLEME PERFORMANSINA
ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI VE MULTİ FİZİK SİMÜLASYONU**

Oğuz ERDEM

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2016

Oğuz ERDEM tarafından hazırlanan "ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE DÖNER ELEKTROT KULLANARAK DELİK DELMEDE DİELEKTRİK SIVISINA KARIŞTIRILAN TOZLARIN VE ISITMANIN İŞLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI VE MULTİ FİZİK SİMÜLASYONU" adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. İbrahim USLAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

İkinci Danışman: Prof. Dr. Can ÇOĞUN

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Çankaya Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Prof. Dr. Haluk DARENDELİLER

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, ODTÜ

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Yusuf USTA

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Doç. Dr. Teyfik DEMİR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, TOBB ETÜ

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 23/03/2016

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Metin GÜRÜ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Oğuz ERDEM

23/03/2016

ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE DÖNER ELEKTROT KULLANARAK DELİK
DELMEDE DİELEKTRİK SIVISINA KARIŞTIRILAN TOZLARIN VE ISITMANIN
İŞLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI VE MULTİ FİZİK
SİMÜLASYONU

(Doktora Tezi)

Oğuz ERDEM

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2016

ÖZET

Bu çalışmada, dielektrik sıvı olarak karbon tozu (derişim oranları: 10 g/lt ve 15 g/lt) ve nişasta tozu (derişim oranları: 15 g/lt ve 30 g/lt) içeren silikon yağı, elektro erozyon ile işlemede (EEİ) daha iyi delik yüzey kalitesi elde etmek için kullanılmıştır. EEİ performans çıktılarını (işparçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı, bağıl aşınma, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve işparçası mikro yapısı) belirlemek için silikon yağı karışımlarıyla EEİ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Silikon yağına karbon tozu katkısı İİH'yi ortalama %156 artırırken silikon yağına nişasta tozu katkısı İİH'yi ortalama %18 düşürdüğü tespit edilmiştir. En düşük ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri 10 g/lt karbon ve 15 g/lt nişasta tozu katkılı karışımda elde edilmiştir. Bu karışımın ortalama yüzey pürüzlülüğünü katkısız silikon yağına göre %69 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, EEİ'nin sayısal modellemesi için literatürde daha önce denenmemiş multi fizik simülasyon (MFS) modeli de tasarlanmıştır. MFS modeli için, dielektrik sıvı ve işparçası içerisinde belirlenen iki kritik noktada mesh'den bağımsızlık analizi gerçekleştirilmiştir. Zamana bağılı MFS modelinin analizlerinde plazma kanalının özellikleri elde edilmiştir. Benzer şekilde, elektrot ve işparçası içerisindeki sıcaklık dağılımları da tespit edilmiştir. İşparçası sıcaklık dağılımları yardımıyla sayısal İİH değerleri hesaplanmıştır. Son olarak, sayısal İİH değerleri ile deneysel İİH değerlerinin kıyaslanmasıyla MFS modeli doğrulanmıştır.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Elektro erozyon ile işleme, multi fizik simülasyonu

Sayfa Adedi : 203

Danışman : Prof. Dr. İbrahim USLAN

İkinci Danışman : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

INVESTIGATION AND MULTI PHYSICS SIMULATION OF EFFECT OF ADDING
POWDER INTO DIELECTRIC FLUID AND HEATING ON PROCESSING
PERFORMANCE IN DRILLING WITH ELECTRIC DISCHARGE MACHINING
USING ROTARY ELECTRODE

(Ph. D. Thesis)

Oğuz ERDEM

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2016

ABSTRACT

In this study, as a dielectric fluid, silicone oil including carbon powder (concentration ratios: 10 g/l and 15 g/l) and starch powder (concentration ratios: 15 g/l and 30 g/l) were used to obtain better hole surface quality in electric discharge machining (EDM). In order to determine the EDM performance outputs (workpiece removal rate (WRR), electrode wear rate, relative wear, workpiece surface roughness and workpiece microstructure), the EDM experiments were carried out with silicone oil mixtures. It was found that the carbon powder addition into the silicone oil increased the WRR by 156% on average, whereas the addition of starch powder into the silicone oil reduced the WRR by 18% on average. The lowest average surface roughness value was obtained for 10 g/l carbon and 15 g/l starch powder added mixture. It was determined that this mixture reduced the average surface roughness values by 69% compare to the pure silicone oil. Moreover, for numerical modeling of the EDM, multi physics simulation (MPS) model which was previously non-tested in the literature was also designed. The mesh independency analysis was carried out for MPS model by the selected two critical points into the dielectric fluid and the workpiece. In the analysis of time-dependent MPS model, the properties of the plasma channel was obtained. Similarly, the temperature distribution in the electrode and the workpiece were also determined. With the help of workpiece temperature distribution, numerical WRR values were calculated. Finally, the MPS model was verified by comparing the numerical WRR values with the experimental ones.

Science Code : 91438

Key Words : Electric discharge machining, multi physics simulation

Page Number : 203

Supervisor : Prof. Dr. İbrahim USLAN

Co-Supervisor : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam sürecinde beni yönlendiren, bilgi ve tecrübeleriyle karşılaştığım zorlukları aşmamda yardımcı olan saygıdeğer ve kıymetli danışman hocalarım Prof. Dr. İbrahim USLAN ve Prof. Dr. Can ÇOĞUN'a saygı ve şükranlarımı sunarım.

Değerli görüş ve tavsiyeleriyle tez çalışmamın kalitesinin artırılmasında önemli katkıları bulunan tez izleme komitesi üyeleri, Prof. Dr. Rahmi ÜNAL ve Doç. Dr. Teyfik DEMİR'e teşekkür ederim.

Deneysel çalışmalarım sırasında yardımlarını esirgemeyen kıymetli hocalarım, Doç. Dr. Oğuzhan YILMAZ, Yrd. Doç. Dr. Levent URTEKİN ve Öğr. Grv. Dr. H. Bekir ÖZERKAN'a, simülasyon modeli kurulumunda yardımlarını esirgemeyen değerli arkadaşım Arş. Grv. Murat ERBAŞ'a ve çalışmalarımda beni cesaretlendiren kıymetli teknisyen ağabeylerim Yusuf ŞAHİNKAYA ve İsmail AYAŞLI'ya şükranlarımı sunarım.

Bugünlere gelmemde maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen aile fertlerime teşekkür ederim.

111M596 No'lu TÜBİTAK-1001 projesiyle çalışmamın deney düzeneğinin kurulmasında destek sağlayan TÜBİTAK Araştırma Destek Programları Başkanlığına (ARDEB) teşekkür ederim.

2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Yurt İçi Doktora Bursuyla (2014 yılı 3. Dönem bursiyer) çalışmalarım esnasında maddi destek sağlayan TÜBİTAK Bilim İnsanı Destekleme Daire Başkanlığına (BİDEB) teşekkürlerimi sunarım. Bilimin ve bilim insanının destekçisi TÜBİTAK ile bana bu imkanları sağlayan Türkiye Cumhuriyeti Devletine de sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiv
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xxii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. EEİ'de Delik Delme ve TKEEİ İçin Yapılmış Çalışmalar	4
2.2. EEİ'nin Mekanizması ve EEİ Plazmasının Matematiksel ve Ampirik Modelleri.....	12
3. TEORİ	31
3.1. Plazma Teorisi.....	31
3.1.1. Plazmanın tanımı.....	31
3.1.2. Plazmanın özellikleri ve oluşma fiziği.....	31
3.2. Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ).....	31
3.2.1. EEİ'nin temel elemanları ve kontrol sistemleri	31
3.2.2. EEİ yönteminin teorisi	32
3.2.3. EEİ'nin parametreleri	34
3.2.4. EEİ'de tekrardan katılaşmış katman (TKK) kavramı	38
3.2.5. EEİ'de yüzey pürüzlülüğü kavramı	39
3.3. Elektro Reoloji	40

	Sayfa
3.3.1. Elektro reoloji kavramı	40
3.3.2. Elektro reolojik akışkanlar	41
3.3.3. Elektro reolojik akışkanların reolojisi	41
3.4. EEİ'nin SEA İçin Modelleme Teorisi	42
3.4.1. Mevcut EEİ modellerinde yapılan kabuller	43
3.4.2. Mevcut EEİ modellerinde kullanılan ampirik denklemler.....	44
3.4.3. Mevcut EEİ modellerinin bilgisayar ortamındaki analizlerinde izlenen adımlar.....	50
3.4.4. Mevcut EEİ modellerinin kusurları.....	54
3.5. Termal Analiz.....	58
3.5.1. Termogravimetrik analiz (TGA).....	58
3.5.2. Diferansiyel termal analiz (DTA)	58
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	59
4.1. Geliştirilmiş EEİ Tezgahı Sistemlerinin Tasarımı ve İmalatı	60
4.1.1. Dielektrik tank sistemi tasarımı ve imalatı	63
4.1.2. Dielektrik tank ısıtması ve sıcaklık ölçüm ünitesi tasarımı ve imalatı	67
4.1.3. Takım döndürme sistemi ünitesi tasarımı ve imalatı	69
4.2. Malzemeler.....	71
4.2.1. İşparçaları.....	71
4.2.2. Elektrotlar.....	72
4.2.3. Dielektrik sıvı.....	73
4.2.4. Karbon tozu ve nişasta tozu	73
4.3. Deney Parametreleri.....	74
4.4. Toz Boyutu Analizi	75

	Sayfa
4.5. Deney Tasarımı	75
4.6. Elektro Reoloji Deneyleri	76
4.7. TGA/DTA Deneyleri	77
4.8. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri.....	78
4.9. Mikro Yapı İncelemeleri	78
4.10. İlave Deney Çalışmaları.....	78
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	79
5.1. Toz Boyutu Analiz Sonuçları.....	79
5.2. Elektro Reoloji Deney Sonuçları	79
5.3. TGA/DTA Analizleri Sonuçları.....	81
5.4. EEİ Deneylerinde Karşılaşılan Problemler ve Çözümleri	84
5.4.1. Küçük çaplı elektrotlardaki akış problemleri ve çözümleri	84
5.4.2. Karıştırma ünitesinde yaşanan problem ve çözümü	85
5.4.3. Nişasta tozu konsantrasyonlarında yaşanan problemler ve çözümleri.....	85
5.5. EEİ Deneylerinin Performans Çıktılarının Karşılaştırılması	86
5.5.1. İİH'nin farklı karışımlarda sıcaklık ve elektrot dönüş hızıyla değişimi	86
5.5.2. EAH'nin farklı karışımlarda sıcaklık ve elektrot dönüş hızıyla değişimi.....	89
5.5.3. BA'nın farklı karışımlarda sıcaklık ve elektrot dönüş hızıyla değişimi	91
5.6. İşparçalarının Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Karşılaştırılması	93
5.7. Mikro Yapı Karşılaştırılması.....	95
5.8. Ti6Al4V İşparçasıyla Yapılan Deneylerinin Sonuçları	97
5.9. Çalışmada Yapılan İlave Deneylerin Sonuçları	97
5.9.1. R _a değerini iyileştirme çalışmaları	98
5.9.2. İİH değerini 4 mm ³ /dak üzerine çıkarma çalışmaları	99

Sayfa

5.9.3. Silikon yağıyla 1 mm'lik elektrot kullanılarak delik delme çalışmaları....	101
6. MFS MODELİNİN TASARIMI	103
6.1. MFS Modelinin Tasarımında Faydalanılan Literatürde Yapılmış Kabuller	104
6.1.1. MFS modelinde yapılan kabuller ve ihmaller	107
6.2. MFS Modelinin Geometrisinin Oluşturulması.....	108
6.3. MFS Modeli İçin Sınır ve Başlangıç Şartlarının Tanımlanması	111
6.3.1. Sınır şartları.....	111
6.3.2. Başlangıç şartları (t=0 anında)	112
6.4. ANSYS'de Bulunan ve MFS Modeli İçin Kullanılan Çözücü Denklem Takımları.....	112
6.4.1. Elektriksel ısınma.....	112
6.4.2. Yönetici denklemler	113
6.4.3. Birleşik ısı transferi denklemi (ing. conjugate heat transfer).....	114
6.4.4. Batmazlık (ing. buoyancy)	114
6.4.5. Elektromanyetik denklemleri	114
6.5. MFS Modeline Malzeme Özelliklerinin Girilmesi	115
6.5.1. Dielektrik sıvının (suyun) özelliklerinin girilmesi.....	115
6.5.2. İşparçası ve elektrot özelliklerinin girilmesi	118
6.6. MFS Modelinde Kullanılan Radyasyon Tipinin Tanımlanması	118
6.7. MFS Modelinde Kullanılan Dielektriğin Akış Özelliklerinin Tanımlanması.....	119
6.8. MFS Modelinde Doğal Konveksiyon Özelliklerinin Tanımlanması	119
6.9. MFS Modelinde Süre Kontrollü Akımın Tanımlanması	120
6.10. MFS Modelinin Geometrisinin Mesh (Ağ) Edilmesi	121
6.11. MFS Modeli İçin Değişken Zaman Adımının Tanımlanması.....	122
6.12. Analizin Sonuçlarını Anlık Gözlemlemek İçin Nokta Tanımlaması	122

	Sayfa
6.13. Mesh'den Bağımsızlık Analizi (MBA)	123
6.14. MFS Modelinin Analizi Sonucunda Elde Edilecek Çıktılar	124
6.15. MFS Modelinin Doğrulanması İçin Yapılan Simülasyon Çalışmaları	125
6.15.1. AISI4140 çeliği işparçası - pirinç elektrotla gerçekleştirilen simülasyon analizi.....	125
6.15.2. Ti6Al4V alaşımı işparçası - bakır elektrotla gerçekleştirilen simülasyon analizi.....	125
6.15.3. Başka bir araştırmacının deneysel çalışmasıyla modeli doğrulama çalışmaları	125
6.16. Doğulamada Kullanılan EEİ'de TTK Kavramı	126
7. MFS MODELİNİN ANALİZ SONUÇLARI.....	127
7.1. MFS Modelinin MBA Sonuçları.....	127
7.2. AISI4140 İşparçası-Pirinç Elektrot İçin Yapılan Analiz Sonuçları	129
7.2.1. Plazma bölgesindeki akım dağılımı	129
7.2.2. Plazma bölgesindeki radyasyon dağılımı.....	130
7.2.3. Plazma bölgesindeki sıcaklık dağılımı.....	130
7.2.4. AISI4140 çeliğinin işlenmesinde pirinç elektrotun sıcaklık dağılımı.....	132
7.2.5. AISI4140 çeliğinin sıcaklık dağılımı	132
7.3. Ti6Al4V Alaşımının Analizi Sonuçları	133
7.3.1. Ti6Al4V alaşımının bakır elektrotla işlenmesinde plazma bölgesinin özellikleri	133
7.3.2. Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde bakır elektrotun sıcaklık dağılımı	135
7.3.3. Ti6Al4V alaşımının sıcaklık dağılımı.....	136
7.4. Başka Bir Araştırmacının Çalışmasından Oluşturulan Analizlerin Sonuçları	137
7.4.1. Ti6Al4V alaşımı-bakır elektrotla yapılan analiz ($I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s).....	137
7.4.2. IN718 - bakır elektrotla yapılan analiz ($I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s).....	140

	Sayfa
7.5. MFS Modelinin Analiz Sonuçlarının Yorumlanması	143
8. MFS MODELİNİ DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI.....	145
8.1. MFS Modelinin Doğrulanmasında İzlenen Yöntemler.....	145
8.2. TKK'nin Ölçülmesi	150
8.2.1. İşlenmiş deney numunelerine yapılan yüzey işlemleri	151
8.3. Doğrulama Sonuçları	153
8.3.1. AISI4140 çeliği-pirinç elektrot için yapılan analizin doğrulanması	153
8.3.2. Ti6Al4V alaşımı-bakır elektrot için yapılan analizin doğrulanması.....	155
8.3.3. Başka bir araştırmacının çalışmasından oluşturulan analizlerin doğrulanması.....	157
8.4. Doğrulama Sonuçlarına Genel Bakış ve Tartışma	160
9. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	165
9.1. Deneysel Çalışma Sonuçları	165
9.2. MFS Model Çalışmasının Sonuçları	168
9.2.1. Öneriler	169
KAYNAKLAR	171
EKLER.....	187
EK-1. Dielektrik tankı teknik resmi.....	188
EK-2. Dielektrik tankı katı modeli.....	189
EK-3. DBAS teknik resmi	190
EK-4. Mengene sistemi teknik resmi.....	191
EK-5. Piyano tipi kontrol panosu.....	192
EK-6. Seramik pistonlu pompa ve by-pass sistemi	193
EK-7. Seramik pistonlu pompa ve elektrik motoru bağlantısı.....	194
EK-8. Sehpa	195

Sayfa

EK-9. Basınç başlığı teknik resmi	196
EK-10. Basınç başlığı	197
EK-11. Thermo Haake RS600 elektro tork reometre	198
EK-12. Exstar TG/DTA 7300 termal analiz cihazı.....	199
EK-13. Surrconder SE1200 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı.....	200
EK-14. Mengeneden sökölmeven işparçası, kılavuz ve elektrot duruşu	201
ÖZGEÇMİŞ	202



ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 4.1. Furkan EDM M25A tezgahının teknik özellikleri.....	61
Çizelge 4.2. AISI4140 çeliğinin kimyasal bileşimi	71
Çizelge 4.3. AISI4140 çeliğinin mekanik özellikleri.....	71
Çizelge 4.4. AISI4140 çeliğinin ısı ve elektrik özellikleri	71
Çizelge 4.5. Pirinç ve bakır elektrotların özellikleri	73
Çizelge 4.6. Silikon yağının özellikleri.....	73
Çizelge 4.7. Karbon ve nişasta tozlarının teknik özellikleri	74
Çizelge 4.8. Deneylerde kullanılan sabit ve değişken parametreler	74
Çizelge 4.9. Elektro reoloji deneyleri için oluşturulan karışımların formülasyonu.....	75
Çizelge 4.10. EEİ deneylerinde kullanılan karışımların formülasyonu	76
Çizelge 4.11. Termal analiz için oluşturulan karışımların özellikleri.....	78
Çizelge 5.1. Ti6Al4V işparçalarıyla EEİ'de delik delme deneylerinin sonuçları	97
Çizelge 5.2. 75 °C'de F karışımında döner elektrotla farklı EEİ parametrelerindeki deneyler.....	99
Çizelge 5.3. 75 °C'de B karışımında farklı EEİ parametrelerindeki deneyler	100
Çizelge 6.1. MFS modeli için işparçalarının gereken özellikleri.....	118
Çizelge 6.2. MFS modeli için elektrotların gereken özellikleri.....	118
Çizelge 7.1. MFS modelinde gerçekleştirilen analizler	144
Çizelge 8.1. 2 mm'lik elektrotlarla suda yapılan işlemlerdeki deneysel İİH değerleri	145
Çizelge 8.2. AISI4140- Cu ile yapılmış ($I_d= 3A$, $t_d=25 \mu s$, $t_p= 50 \mu s$) deney sonuçları.....	154
Çizelge 8.3. AISI4140-Pb için hesaplanan yeni L uzunlukları ($I_d=3 A$, $t_d=25 \mu s$, $t_p=50 \mu s$).....	155

Çizelge	Sayfa
Çizelge 8.4. AISI4140-Pb için yapılan analizi doğrulaması ($I_d=3$ A, $t_d=25\mu s$, $t_p=50$ μs).....	155
Çizelge 8.5. Ti6Al4V-Cu ile yapılmış ($I_d=3$ A, $t_d=25$ μs , $t_p=50$ μs) deney sonuçları	155
Çizelge 8.6. Ti6Al4V-Cu için hesaplanan yeni L uzunlukları ($I_d=3$ A, $t_d=25$ μs , $t_p=50$ μs).....	156
Çizelge 8.7. Ti6Al4V-Cu için yapılan analizi doğrulaması ($I_d=3$ A, $t_d=25$ μs , $t_p=50$ μs).....	156
Çizelge 8.8. Ti6Al4V-Cu ile yapılmış ($I_d=12$ A, $t_d=35$ μs , $t_p=26$ μs) deney sonuçları ...	157
Çizelge 8.9. Ti6Al4V-Cu için hesaplanan yeni L uzunlukları ($I_d=12$ A, $t_d=35$ μs , $t_p=26$ μs).....	158
Çizelge 8.10. Ti6Al4V-Cu için yapılan analizi doğrulaması ($I_d=12$ A, $t_d=35\mu s$, $t_p=26$ μs).....	158
Çizelge 8.11. IN718-Cu ile yapılmış ($I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μs , $t_p=16$ μs) deney sonuçları ...	159
Çizelge 8.12. IN718-Cu için hesaplanan yeni L uzunlukları ($I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μs , $t_p=16$ μs).....	159
Çizelge 8.13. IN718-Cu için yapılan analizi doğrulaması ($I_d=12$ A, $t_d=35$ μs , $t_p=16$ μs).....	160
Çizelge 8.14. Analizi doğrulama çalışmalarının genel sonuçları	160

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. EEİ sistemi: a) EEİ'nin temel elemanları, b) işleme bölgesi	32
Şekil 3.2. EEİ yönteminde: a) 1. adım, b) 2. adım, c) 3. adım.....	33
Şekil 3.3. EEİ yönteminde: a) 4. adım, b) 5. adım, c) 6. adım.....	33
Şekil 3.4. EEİ yönteminde: a) 7. adım, b) 8. adım, c) 9. adım.....	34
Şekil 3.5. Gerilim kontrollü vurum jeneratöründe gerilim ve akım dalga biçimleri	35
Şekil 3.6. EEİ'de vurum frekansının yüzey kalitesine etkisi.....	37
Şekil 3.7. Izquierdo ve arkadaşlarının çalışmasında katmanların şematik gösterimi	39
Şekil 3.8. Yüzey pürüzlülüğünde ölçüm ve örnekleme uzunluğu	40
Şekil 3.9. Viskozite ve kayma hızına bağlı akış türleri.....	42
Şekil 3.10. Plazma kanalının şematik gösterimi	45
Şekil 3.11. EEİ modellerinde enerji dağılımının şematik gösterimi	45
Şekil 3.12. Modellerdeki Gaussian ısı dağılımı: a) genel görünüm, b) kesit görünüm ..	46
Şekil 3.13. Isı dağılımının işparçası içerisinde r eksenine göre ters simetrik dağılımı...	47
Şekil 3.14. Olasılık yoğunluk fonksiyonu.....	48
Şekil 3.15. EEİ'de tek kıvılcım için kullanılan ısı transferi modelinin şematik gösterimi	51
Şekil 3.16. Model çalışmalarında elde edilen işparçasındaki sıcaklık eğrileri	54
Şekil 3.17. EEİ modellerde kaldırılan hacmin hesaplanması	54
Şekil 3.18. EEİ'de zamana bağlı akım ve gerilim değerleri.....	56
Şekil 4.1. Furkan EDM M25A elektro erozyon tezgahı	62
Şekil 4.2. Geliştirilmiş EEİ tezgahı ve deney sisteminin şematik gösterimi	62
Şekil 4.3. Geliştirilmiş EEİ tezgahı (GEEİT)	63
Şekil 4.4. Dielektrik tankı: a) tank gövdesi, b) tank ayakları ve konik tabanı.....	64

Şekil	Sayfa
Şekil 4.5. Tank içerisindeki delikli boru ağ sistemi (DBAS)	66
Şekil 4.6. Mengene sistemi	67
Şekil 4.7. Seramik kılavuzlar: a) farklı iç çaplardaki, b) içerisinde elektrot olan hali....	67
Şekil 4.8. Elimko PT100 termokapılın: a) tank dışı görünüşü, b) tank içi görünüşü.....	69
Şekil 4.9. AISI4140 işparçaları: a) kesilmiş işparçaları, b) taşlanmış işparçaları.....	72
Şekil 4.10. Ti6Al4V (Grade 5) levhalar.....	72
Şekil 5.1. Karışımların viskozite-sıcaklık değişimi ($E=0$ kV/mm)	79
Şekil 5.2. Karışımların viskozite-elektrik alan değişimi ($T=30$ °C)	80
Şekil 5.3. Karışımların viskozite-elektrik alan değişimi ($T=75$ °C)	81
Şekil 5.4. Katkısız silikon yağının TGA/DTA grafiği	82
Şekil 5.5. Silikon yağı + karbon tozu (15 g/lt) karışımının TGA/DTA grafiği	82
Şekil 5.6. Silikon yağı + nişasta (200 g/lt) karışımının TGA/DTA grafiği	83
Şekil 5.7. Silikon yağı + karbon (15 g/lt) + nişasta (200 g/lt) karışımının TGA/DTA grafiği.....	83
Şekil 5.8. Dönmeyen elektrotla işlemede farklı karışımların 30 ve 75 °C'deki İİH'leri	87
Şekil 5.9. Döner elektrotla işlemede farklı karışımların 30 ve 75 °C'deki İİH'leri	88
Şekil 5.10. Dönmeyen elektrotla işlemede farklı karışımların 30 ve 75 °C'deki EAH'leri	90
Şekil 5.11. Döner elektrotla işlemede farklı karışımların 30 ve 75 °C'deki EAH'leri	90
Şekil 5.12. Dönmeyen elektrotla işlemede farklı karışımların 30 ve 75 °C'deki BA'ları	92
Şekil 5.13. Döner elektrotla işlemede farklı karışımların 30 ve 75 °C'deki BA'ları	93
Şekil 5.14. Dönmeyen elektrotla farklı karışımlarda işlemede işparçalarının R_a 'ları	94
Şekil 5.15. Döner elektrotla farklı karışımlarda işlemede işparçalarının R_a 'ları.....	94
Şekil 5.16. Karışımlarda işlenmiş yüzeyler: a)A, b)B, c)C, d)D, e)E, f)F, g)G, h)H, i)I, j)W.....	96

Şekil	Sayfa
Şekil 5.17. İşlenmiş AISI4140 numune ($I_d=1,5$ A, $t_d=3$ μ s, $t_p=50$ μ s) ($R_a=0,34$ μ m)	99
Şekil 5.18. Farklı EEİ parametrelerinde kaba işlemler: a) 12 A-400 μ s, b) 12 A-800 μ s	100
Şekil 6.1. Zhang ve arkadaşlarının çalışmasında işparçasındaki sıcaklık eğrileri	104
Şekil 6.2. Tan ve arkadaşlarının çalışması: a) model, b) sıcaklık dağılımları	105
Şekil 6.3.Üç boyutlu yüzey topoğrafyası	107
Şekil 6.4. Yüzey topoğrafyası: a) tahmin edilen yüzeyin, b) gerçek işlenmiş yüzeyin	107
Şekil 6.5. AISI4140 çeliğinin işlenmiş yüzeyinde görülen ve üçgeni andıran çıkıntılar	109
Şekil 6.6. MFS modeli: a) elektrot-işparçası şematik görünümü, b) tasarlanan geometri	110
Şekil 6.7. MFS modelinde iki boyutlu geometriler üzerinde tanımlanan sınır şartları...	111
Şekil 6.8. Suyun sıcaklığa bağlı C_p değerleri	115
Şekil 6.9. Suyun sıcaklığa bağlı k değerleri	117
Şekil 6.10. Suyun sıcaklığa bağlı σ değerleri	117
Şekil 6.11. Süre kontrollü akım değeri (on-off kontrollü)	120
Şekil 6.12. MFS modelinin geometrisini mesh ederken kullanılan köşe kırıcı noktalar	121
Şekil 6.13. İki boyutlu mesh atılmış MFS modeli (32000 eleman)	122
Şekil 6.14. İki boyutlu MFS modelindeki anlık çıktı kontrol noktaları	123
Şekil 7.1. Plazma bölgesindeki P1 noktasının eleman sayısı ile değişen sıcaklık grafiği	127
Şekil 7.2. İşparçası içerisindeki P4 noktasının eleman sayısı ile değişen sıcaklık grafiği	128
Şekil 7.3. Plazma bölgesi akım dağılımı (AISI4140-Pb; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s)....	129
Şekil 7.4. Plazma bölgesi radyasyon dağılımı (AISI4140-Pb; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s)	131

Şekil	Sayfa
Şekil 7.5. Plazma bölgesi sıcaklık dağılımı (AISI4140-Pb; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s).....	131
Şekil 7.6. Pirinç elektrotun sıcaklık dağılımı (İşleme: AISI4140; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s).....	132
Şekil 7.7. AISI4140 çeliğinin sıcaklık dağılımı (Elektrot: Cu; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s).....	133
Şekil 7.8. Plazma bölgesi akım dağılımı (Ti6Al4V-Cu; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s).....	134
Şekil 7.9. Plazma bölgesi radyasyon dağılımı (Ti6Al4V-Cu; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s).....	134
Şekil 7.10. Plazma bölgesi sıcaklık dağılımı (Ti6Al4V-Cu; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s).....	135
Şekil 7.11. Bakır elektrotun sıcaklık dağılımı (İşleme: Ti6Al4V; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s).....	135
Şekil 7.12. Ti6Al4V alaşımının sıcaklık dağılımı (Elektrot: Cu; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s).....	136
Şekil 7.13. Plazma bölgesi akım dağılımı (Ti6Al4V-Cu; $I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s).....	137
Şekil 7.14. Plazma bölgesi radyasyon dağılımı (Ti6Al4V-Cu; $I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s).....	138
Şekil 7.15. Plazma bölgesi sıcaklık dağılımı (Ti6Al4V-Cu; $I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s).....	138
Şekil 7.16. Bakır elektrotun sıcaklık dağılımı (İşleme: Ti6Al4V; $I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s).....	139
Şekil 7.17. Ti6Al4V sıcaklık dağılımı (Elektrot: Cu; $I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s).....	139
Şekil 7.18. Plazma bölgesi akım dağılımı (IN718-Cu; $I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s)...	140
Şekil 7.19. Plazma bölgesi radyasyon dağılımı (IN718-Cu; $I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s).....	141
Şekil 7.20. Plazma bölgesi sıcaklık dağılımı (IN718-Cu; $I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s).....	141

Şekil	Sayfa
Şekil 7.21. Bakır elektrotun sıcaklık dağılımı (İşleme: IN718; $I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s).....	142
Şekil 7.22. IN718 alaşımının sıcaklık dağılımı (Elektrot: Cu; $I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s).....	142
Şekil 7.23. MFS modelinde elektrot-plazma kanalı-işparçasındaki sıcaklık eğrileri	143
Şekil 7.24. İşparçasından ergimiş bölgeler: a)A1, b)A2, c) A3 ve d) A4	144
Şekil 8.1. AISI4140: a) sıcaklık dağılımı, b) ergime sıcaklığını (1688 K) aşan bölge...	146
Şekil 8.2. AISI4140 çeliğinden kaldırılan talaşın hacmini hesaplamak için alınan ölçümler	146
Şekil 8.3. TKK kavramının modele uyarlanması.....	147
Şekil 8.4. TKK eklenmesiyle oluşan yeni uzunlukların ($L1^*$, $L2^*$ ve $L3^*$) hesaplanması	148
Şekil 8.5. İİH: a) ergimiş bölge, b) 360° döndürülmeyle elde edilen üç boyutlu hacimler.....	150
Şekil 8.6. Delinmiş AISI4140: a) yarım işparçası, b) kırmızı bölgenin büyütülmüş hali.....	150
Şekil 8.7. Delinmiş Ti6Al4V: a) yarım işparçası, b) kırmızı bölgenin büyütülmüş hali.....	151
Şekil 8.8. Kör delik delinip dağlanmış ve parlatılmış AISI4140 çeliği işparçası	152
Şekil 8.9. Katmanlar: a)A bölgesi; TKK, b) B bölgesi; IEB, c) C bölgesi; ana metal ...	153
Şekil 8.10. AISI4140 kör delik işlenmesi: a) kör delik köşesi, b) kör delik tabanı	155
Şekil 8.11. Ti6Al4V kör delik işlenmesi: a) kör delik köşesi, b) kör delik tabanı	156
Şekil 8.12. Ti6Al4V ($I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s): a) genel görünüm, b) delik sol kenar.....	158
Şekil 8.13. IN718 ($I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s): a) genel görünüm, b) delik sol kenar.....	159
Şekil 8.14. Çoğun ve arkadaşlarının çalışmasında TKK kalınlığı: $3,5 \pm 1,5$ μ m (3 A, 25 μ s)	161
Şekil 8.15. Hasçalık ve arkadaşının çalışmasındaki TKK kalınlıkları.....	162

Şekil**Sayfa**

Şekil 8.16. Li ve arkadaşlarının çalışmasında IN718 parçalardaki TKK kalınlıkları..... 163



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklama

A_s	İşparçasıyla akışkan arasındaki yüzey alanı, [m ²]
c_p	Özgül ısı kapasitesi, [kJ/kg.K]
I	Akım, [A]
I_d	Boşalım akımı, [A]
J	Akım yoğunluğu, [A/m ²]
k	Isıl genleşme, [1/K]
Q	Debi, [m ³ /s]
R_a	Ortalama yüzey pürüzlülüğü, [μm]
T	Sıcaklık, [K]
t	Süre, [μs]
t_d	Vurum süresi, [μs]
t_p	Bekleme süresi, [μs]
V	Gerilim, [V]

Kısaltmalar

Açıklama

ANOVA	Değişken analizi
BA	Bağıl aşınma
DBAS	Delikli boru ağ sistemi
EAH	Elektrot aşınma hızı
İİH	İşparçası işleme hızı
MBA	Mesh'den bağımsızlık analizi
MFS	Multi fizik simülasyonu
SEA	Sonlu elemanlar analizi

1. GİRİŞ

Elektro erozyon ile işleme (EEİ), günümüzde yüksek kalitede kalıp ve takım imalatında yaygın olarak kullanılan, alışılmamış imal usullerinden biridir. EEİ, dielektrik sıvı içerisine daldırılmış iletken elektrot yardımıyla elektriksel iletken bir işparçasından yüksek frekanslı elektriksel boşalmalar sayesinde küçük metal parçaların koparılması (ergime ve buharlaşma yoluyla) esasına dayanır. Bu işleme yönteminde herhangi bir mekanik kesme kuvveti yoktur. Elektriksel boşalım enerjisinin artması, işlenen işparçası yüzeyinde daha büyük ve derin ergime kraterlerinin oluşumuna sebep olur. EEİ’de enerji boşalması, elektronik kontrollü vurumlarla (ing. puls) sağlanır ve mikro saniyeler düzeyinde gerçekleşir [1]. Günümüzde geliştirilen elektronik kontrol sistemleri sayesinde yöntem daha güvenilir ve hassas bir işleme metodu haline gelmiştir [2].

EEİ yöntemi, işleme fiziği aynı olan dalma tipi elektro erozyon (ing. die sinking EDM) ve tel erozyon (ing. wire EDM) olmak üzere iki gruba ayrılmış olup elektrik iletken tüm malzemelerin işlenmesinde kullanılabilmektedir [3]. Geleneksel talaşlı imalat yöntemlerinde işlemede etkili olan: işparçası sertliği, tokluğu, ergime sıcaklığı gibi özellikler EEİ açısından önemli değildir. Bu yöntemde, elektrotla işparçası birbirine temas etmediğinden kesme kuvveti ve onun olumsuz etkileri oluşmamaktadır. Bu nedenle yöntem, işleme esnasında kırılabilecek küçük, narin ve aşırı gevrek parçaların işlenmesinde daha çok tercih edilmektedir. Aynı zamanda EEİ yöntemi, geleneksel yöntemlerle imalatı zor parçaların işlenmesinde zaman ve maliyet açısından önemli seviyede tasarruf sağlayabilmektedir [4-7].

Üstün yüzey kalitesine sahip küçük boyutlu delik ihtiyacı özellikle bilgisayar, iletişim ve elektronik sektöründe kullanılan kalıplarda ve işparçalarında yoğunudur. Ayrıca son yıllarda uzay sanayinde ve biyomedikal sektöründe kullanılan işlenmesi zor malzemelere de küçük boyutlu delik delme işlemine oldukça ihtiyaç duyulmaktadır. Yine, iki boyutlu parçaların ve ekstrüzyon kalıplarının tel erozyon yöntemiyle üretimi esnasında kalıba/parçaya teli geçirmek için açılması gereken ilk deliğin düşük yüzey pürüzlülük değerlerinde ve çapının ise küçük boyutlarda olması istenmektedir. Günümüz imalatçıları, bu gibi talepleri karşılamak için tasarladıkları özel aparatları/üniteleri dalma tipi elektro erozyon tezgahları üzerine monte ederek dalma tezgahlarını delik delme tezgahlarına dönüştürmüşlerdir.

Üretilen pratik çözümlere rağmen, klasik delik delme tezgahlarıyla işleme de, kalıplara ve işparçalarına açılmış küçük boyutlu silindirik ve silindirik olmayan deliklerin yüzey pürüzlülüğünün iyileştirilmesi ve parlatılması halen zor işlemlerdir. Bu yüzey iyileştirme ve parlatma işlemlerinin EEİ'de klasik delik delme işlemi (ing. Traditional Drilling Process) esnasında gerçekleştirilmesi genelde mümkün değildir.

Bu çalışmada, klasik delik delme işleminden farklı olarak küçük boyutlu deliklerin yüzey kalitelerinin artırılması ve parlatma işleminin işleme esnasında gerçekleştirilebilmesi için: a) elektrotun kendi ekseninde döndürülmesi (döner elektrot), b) ortası delik elektrot kullanımı (elektrot içinden dielektrik sıvı püskürtme), c) ısıtılmamış ve ısıtılmış silikon yağı+nişasta tozu+karbon tozu karışımından oluşan dielektrik sıvı kullanımı denenmiştir. Gaz yağı veya diğer hidrokarbon esaslı alışılmış dielektrik sıvılar yerine, insan/çevre sağlığına zararsız silikon yağının işleme performansı etkilerinin daha rahat anlaşılabilmesi adına EEİ delik delme endüstrisinde çok tercih edilen su dielektrikle performans çıktılarının kıyaslanması ve böylelikle silikon yağının, EEİ delik delme işlemi için uygunluğunun sınanması amaçlanmıştır. Silikon yağı içerisine katılacak karbon tozu yardımıyla uygulanan elektrik alanı içerisinde karbon taneleri, işparçası ve elektrot arasında köprüler oluşturarak boşalım kıvılcımını daha küçük kıvılcımlara parçalaması (birden çok kıvılcıma) ve böylece boşalım enerji yoğunluğunu azaltması amaçlanmıştır. Bu sayede daha küçük ergime kraterlerinin oluşturulması ve sonucunda daha iyi yüzey kalitesi elde edilmesi beklenmektedir. Silikon yağı içerisine katılacak nişasta tozu sayesinde yüksek elektrik alanı içerisinde polarize olarak döner elektrot yardımıyla işparçası yüzeyine çarptırılması ve bu sayede yüzeyin parlatılması hedeflenmiştir. Deneysel çalışmaların yanı sıra, yöntemin daha önce denenmemiş Multi Fizik Simülasyonu (MFS) da gerçekleştirilerek EEİ literatüründe olmayan öncü bir teorik çalışma yapılması amaçlanmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

EEİ yöntemi imalatla yaygın olarak kullanılıyorsa da düşük işparçası işleme hızı (İİH) ve kratersi yüzey yapısı bu yöntemin kullanımını bazı uygulamalar için kısıtlamaktadır. EEİ ile elde edilen yüzeyler mikroskop altında incelendiğinde, elektriksel boşalımların oluşturduğu kraterlerin üst üste binmesiyle oluşan yüzeyin genellikle pürüzlü olduğu görülür [8]. EEİ’de yüzey kalitesi ve yüzey pürüzlülük değerlerini etkileyen parametreler: işparçası malzemesi [7, 9-14], elektrot malzemesi [7, 15-19], boşalım akımı [10, 16, 20, 21], vurum süresi [7, 16, 18], dielektrik sıvısı (türü, uygulama şekli, içerisine katılan çeşitli metal ve metal olmayan tozlar, uygulama basıncı) [8, 18, 22-24], elektrot ve işparçası kutuplaması [10, 15, 24, 25], açık devre voltajı [7, 23], işleme akımı [7, 8, 23-26], işleme süresi [10, 15, 16, 27, 28] ve elektrot boyutu [13, 17, 28] olarak sıralanabilir.

Parlak yüzeyler gerektiren plastik enjeksiyon ve pres döküm kalıplarında, genellikle kaba EEİ sonrasında ikinci bir bitirme işlemi (hassas işleme-finiş) uygulanmaktadır. Bitirme işlemi yüksek yüzey kalitesi elde etmeyi amaçlarken, kaba işleme yüksek işleme hızını hedefler [12]. Son yıllarda her iki aşamayı da birleştiren toz katkılı elektro erozyon ile işleme (TKEEİ) yönteminde dielektrik sıvı içerisine, çoğunlukla 100 µm’den küçük olmak üzere grafit, silikon, silikon karbür, alüminyum, alüminyum oksit, nikel, titanyum, krom ve bakır tozları ilave edilerek ve uygun işleme parametreleri seçilerek işleme performansı iyileştirilebilmektedir [3, 7, 8, 23, 27-29]. Bu girişimler: İİH’yi artırmak, elektrot aşınma hızını (EAH) azaltmak, ortalama yüzey pürüzlülüğünü (R_a) ve mikro çatlakları azaltmak, elektriksel boşalım bölgesinde yüksek elektriksel iletkenlik sağlayarak boşalım kırılcımlarını birçok parçaya ayırmak için yapılmaktadır.

EEİ yönteminin kullanım alanlarını genişletmek, işlenen yüzeylerde istenilen özellikleri sağlamak, işleme süresini kısaltmak, EAH’yi azaltmak ve İİH’yi artırmak için birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan güncel deneysel çalışmalar arasında, döner disk elektrotla büyük çaplı deliklerin işlenmesi [30], kompozit elektrotla işleme [31, 32], ultrasonik titreşim ünitesinin elektro erozyon tezgahına eklenmesiyle oluşturulan bir sistemle işleme [26, 33, 34], toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiş elektrotlar kullanarak işleme [15, 16, 35], dielektrik sıvı içerisine çeşitli metal tozları katılarak alaşımlanmış yüzey katmanı oluşturma [9, 17, 27, 28] gibi araştırmalar örnek gösterilebilir. Bazı çalışmalarda EEİ ile

ilgili ana problemlere çözüm arayışları yer almaktadır. Bu problemler: a) elektrotun aşınması [36, 37], b) işleme yüzeylerinde farklı metalurjik özelliklerde katmanlar oluşması [9, 17, 25, 38], c) hızlı soğuma nedeniyle oluşan sert ve kırılgan yapıya sahip tekrardan katılmış katmanın kalıcı gerilmelerden dolayı meydana gelen mikro çatlaklar ve soğuma esnasında hızlı katılmasından dolayı yüzeyde hapsolan gazlardan ötürü gözenekli bir yapı oluşması [39, 40], d) işleme aralığında işleme atıklarının meydana getirdiği bölgesel kirlenmeden dolayı işparçası-elektrot çifti arasındaki kısa devre oluşumu ve bunun sonucunda $\dot{I}H$ 'de düşüş, EAH'de ve R_a 'da artış [37, 41] olarak sıralanabilir.

2.1. EEİ'de Delik Delme ve TKEEİ İçin Yapılmış Çalışmalar

Literatürde EEİ yönteminde toz karışimli dielektrik sıvı kullanılarak yapılmış sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Chow ve arkadaşları, Al ve SiC tozlarını gaz yağı dielektrik içerisine ilave ederek yaptıkları çalışmada $\dot{I}H$ 'yi, EAH'yi, R_a 'yı ve elektriksel boşalım gerilim dalga formlarını incelemişlerdir. Bu çalışmalarında, klasik EEİ'ye göre $\dot{I}H$ artmış, R_a azalmıştır. SiC tozlarıyla yapılan çalışmada Al tozlarıyla yapılan çalışmaya nazaran daha yüksek $\dot{I}H$ değerleri elde edildiği, bunun yanında her iki tip tozlu işlemede boşalım aralığının büyüdüğü ve elektriksel boşalım enerjisinin işleme yüzeyine daha iyi dağıldığı, yüzey görünümünün iyileştiği ve en düşük R_a değerlerine sahip yüzeylerin Al tozlarıyla yapılan işlemede elde edildiği saptanmıştır. Lin, Yan ve Chang [26] EEİ ve ultrasonik işleme mekanizmalarını birleştirerek gerçekleştirdikleri çalışmada $\dot{I}H$ 'yi artırmak ve boşalım akımının (I_d) işleme yüzeyine daha homojen dağılmasını sağlamak amacıyla, dielektrik olarak kullandıkları saf su ve gazyağı içerisine 3 μm ve 9 μm ortalama boyutlarında SiC tozlarını karıştırmışlardır. SiC tozları katılmış deneylerde toz konsantrasyonu (C) arttıkça $\dot{I}H$ 'nin belirgin şekilde arttığını ve en yüksek $\dot{I}H$ 'ye 9 μm boyutlarında SiC tozu katılmış saf sulu çalışmada ulaştıklarını belirtmişlerdir. 3 μm boyutunda SiC tozunu gazyağına karıştırarak gerçekleştirdikleri deneylerde, saf su kullanılan deneylere göre vurum süresi (t_d) arttıkça daha iyi yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeyler elde etmişlerdir [42].

Uno, Okada ve Çetin, alüminyum bronz malzemeden yapılan plastik enjeksiyon kalıpların nikel malzemeyle kaplanması ve takım çeliklerinin yüzeyinde sert titanyum karbür tabakası oluşturulmasına yönelik çalışmalarında dielektrik içerisine nikel ve karbon tozlarını karıştırmışlardır. Nikel tozlu dielektrikte alüminyum bronz malzeme yüzeyinde,

işleme esnasında tek bir kıvılcımın oluşturduğu kraterin boyutlarının nikel tozu konsantrasyonunun artmasıyla azaldığını ve buna bağlı olarak klasik EEİ ile işlenen yüzeylere nazaran daha iyi (düşük R_a sahip) yüzeyler elde edildiğini belirtmişlerdir. Ergiyip tekrar katılaşan tabakada nikelin biriktiğini ve bu tabakanın kalınlığının nikel tozu konsantrasyonunun artmasıyla arttığını ve saf gaz yağı kullanılarak elde edilen yüzeylere nazaran daha sert, aşınma dayanımı yüksek ve homojen nikel alaşımlanmış yüzey tabakası oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Titanyum elektrot ve karbon tozu karışımlı gazyağı kullanarak yaptıkları çalışmada, elektrot aşınmasını artırmak ve böylece TiC içeren işparçası yüzey katmanının oluşumunu kolaylaştırmak için elektrotu ters kutuplayarak sert TiC içeren alaşımlanmış yüzey katmanı elde etmişlerdir. Vurum süresinin artmasıyla alaşımlanmış tabaka kalınlığının artarak klasik EEİ'ye nazaran daha pürüzsüz ve aşınma dayanımı yüksek yüzeyler elde etmişlerdir [27]. Ming ve He, gazyağı dielektrik içerisine çeşitli iletken ve inorganik-oksit toz taneciklerini ayrı ayrı karıştırarak su verilmiş ve tavllanmış yüksek karbonlu çelik işparçalarını işlemişlerdir. Toz karışımı dielektrik kullanımında, saf gaz yağıyla yapılan işlemeye oranla malzeme işleme hızının arttığını, takım aşınma hızının azaldığını ve yüzey pürüzlülüğünün gözle görülür şekilde iyileştiğini tespit etmişlerdir. Gaz yağına karıştırılan tozlar sayesinde, dielektriğin iyonizasyon gerilimini düşürerek boşalım aralığının genişlediğini, ısıl gerilmelerin ve mikro çatlakların azaldığını, ergimiş ve sertleşmiş tabaka kalınlığının azaldığını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda işlenmiş yüzey katmanlarını X-ışını taramasıyla incelediklerinde martensit miktarının arttığını, östenit ve sementit miktarının azaldığını gözlemlemişlerdir. Ayrıca, yüzey katmanlarının mikro sertlik değerlerinde saf gaz yağıyla yapılan çalışmaya nazaran artış olduğunu tespit etmişlerdir [28]. Narumiya ve arkadaşları, Si, Al, grafit tozlarını dielektrik sıvıya karıştırdıkları çalışmada, tozlarla alaşımlanmış ve klasik EEİ'ye göre daha düzgün yüzeylerin daha kısa işleme sürelerinde elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Boşalım aralığının genişlemesiyle birlikte işleme artıklarının yüzeylerden daha iyi süpürülerek malzeme işleme hızının arttığını vurgulamışlardır. En iyi R_a değerine ($0,8 \mu m$) Al tozlu çalışmada ulaşıldığını ve işleme süresinin en çok bu çalışmada kısaldığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, toz karışımı bütün işlemlerde işlenen yüzeylerin korozyon dayanımının arttığını ifade etmişlerdir [17]. Wong ve arkadaşları, C, Si, Al, SiC, MoS₂ ve cam gibi malzeme tozlarını dielektrik sıvı içerisine değişik oranlarda karıştırdıkları çalışmada, özellikle C, Si ve MoS₂ tozlarının, Al, SiC ve cam tozlarına nazaran daha iyi yüzeyler elde edilmesinde etkili olduklarını belirtmişlerdir [9].

Tzeng ve Lee, Al, Cr, Cu ve SiC tozlarının boyutlarının, öz kütlelerinin, ısı iletkenliklerinin ve dielektrikteki konsantrasyonlarının, İİH'ye ve EAH'ye etkilerini incelemişlerdir. Sonuç olarak, 100 µm boyutundaki büyük tozların elektriksel boşalım aralığını genişlettiğini ve toz konsantrasyonu arttığında büyük toz boyutlarının takım aşınmasını arttırdığını, küçük boyutlu tozlarda ise İİH'yi arttığını ve takım aşınmasının azaldığını ifade etmişlerdir. Yüksek öz kütleye sahip olmasından dolayı dielektrik sıvı içerisinde homojen karışmayan Cu tozlarının ise saf gaz yağıyla yapılan deneylerdeki boşalım aralığıyla aynı boyutlarda olduğunu gözlemlemişlerdir. En yüksek işleme hızına Cr tozunda ulaşılmıştır. Tozların işleme performansına belirtilen etkilerine rağmen, boşalım akım değişiminin işleme performansına etkisinin toz boyutu, toz konsantrasyonu ve diğer parametrelerden daha fazla olduğu vurgulanmıştır [18]. Masui ve arkadaşları, tungsten tozu kullanarak takım çeliklerinin yüzeyinde tungsten alaşımlı bir yüzey katmanı oluşturmuşlardır. Alaşımlanan yüzey tabakasındaki tungsten miktarının, elektrotun negatif kutuplanması ve uygulanan düşük akımla arttığını gözlemlemişlerdir. İşlenmiş yüzeyin pürüzlülüğü, sertliği, korozyon, aşınma dayanımı gibi özelliklerin önemli derecede iyileştiği görülmüştür [10].

König ve arkadaşları, saf suyla şeker tozu, glikol, gliserin, polietilen, glikol gibi bileşiklerin çözeltilerini dielektrik sıvı olarak kullanmışlardır. Bunlardan, gliserinli suyun yüzey pürüzlülüğü ve malzeme işleme hızı açılarından daha iyi sonuçlar verdiğini tespit etmişlerdir. Şeker tozu katılmış çözeltide işlenmiş parçaların yüzey pürüzlülüğünün saf suyla işlenmiş parçalarınkinden daha iyi olduğu ve yine malzeme işleme hızının arttığını ifade etmişlerdir [43]. Zhao ve arkadaşları, bakır elektrot kullanarak çelik işparçası işledikleri çalışmada, 10 µm boyutundaki alüminyum tozlarını dielektrik sıvı içerisine karıştırmışlar ve boşalım aralığının büyüdüğünü, boşalım kanalının genişlediğini ve yüzeylerde düzgün, geniş ve sığ kraterler oluştuğunu saptamışlardır. Ayrıca, yüksek I_d ve düşük t_d gibi işleme parametreleri seçilerek yapılan deneylerde, işleme veriminin arttığı ve daha düşük pürüzlülük değerinde yüzeyler elde edildiği tespit edilmiştir [8]. Uno ve Okada, 15 µm ortalama boyutundaki Si tozlarını kullanarak plastik enjeksiyon ve pres döküm kalıbı imalatlarında yaygın kullanılan SK3 karbonlu takım, SKD11 ve SKD61 alaşımlı takım çeliklerini işlemişlerdir. Si tozlu dielektrikte boşalım aralığının saf gaz yağıyla yapılan çalışmaya göre genişlediğini ve işparçasıyla elektrot arasında kısa devre oluşmadığını belirtmişlerdir. SKD61 işparçalarının yüzeyinin klasik EEİ'ye göre daha pürüzsüz olduğunu ancak diğer işparçalarının yüzeylerinde aynı durumun gözlenemediğini

ve işparçası malzemesinin yüzey pürüzlülüğüne önemli etkisinin olduğunu ifade etmişlerdir [12].

Mohri ve arkadaşları, klasik EEİ ile işlenmiş işparçası yüzeylerini daha sonra bitirme işlemi olarak Si tozu karışımlı dielektrikle işleyerek yüzeylerin özelliklerini ve korozyon dayanımını incelemişlerdir. Si tozlarının işparçasıyla elektrot arasındaki boşalım aralığını genişlettiğini ve boşalım akımının işleme bölgesine daha iyi dağıtıldığını vurgulayarak, işleme süresinin klasik EEİ'ye nazaran kısaldığını, işlenmiş yüzeylerin pürüzlülük değerlerinde azalma olduğunu ve korozyon dayanımının arttığını belirtmişlerdir [13]. Kruth ve arkadaşları, toz metalürjisi yöntemiyle imal edilmiş elektrotlar kullandıkları çalışmalarında W, Co, Mo, Mn tozlarını dielektrik sıvı içerisine karıştırarak işparçası yüzeylerin R_a 'sını ve mikro yapılarını incelemişlerdir. W, Co, Mo ve Mn tozlarıyla 0,2 μm R_a altında yüzeyler elde etmişler. W tozlu çalışmada, tozların işlenmiş yüzeye %10'nun üzerinde alaşımlandığını ve yüzeyde mikro çatlakların oluştuğunu tespit etmişlerdir [19]. Uno ve arkadaşları, nikel tozları karıştırılmış dielektrik kullanarak, alüminyum bronz ve çelik işparçalarının yüzeylerinde yüksek aşınma dayanımına sahip nikel alaşımlı yüzey katmanı oluşturmuşlardır. Her iki işparçasında aynı İİH ve düşük bağıl aşınma (BA) değerlerine ulaşıldığı ve klasik EEİ'ye göre nikel tozlu işlemede yüzeylerin R_a değerlerinin daha az olduğu ifade edilmiştir. Ayrıca, nikel tozu konsantrasyonunun artmasıyla yüzeyde oluşturulan nikel alaşımlı yüzey katmanının kalınlığının arttığı ve yüzeylerin aşınma dayanımının arttığı vurgulanmıştır [22]. Özerkan ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada, dielektrik sıvı içerisine katılan grafit ve borik asit tozlarının yüzey pürüzlülüğüne, İİH'ye, EAH'ye, mikro yapıya ve yüzey sertliğine etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Her iki toz karışımlı dielektrik sıvıda vurum süresi arttıkça R_a 'nın kötüleştiği görülmüştür. Borik asit tozlu çalışmada tüm toz konsantrasyonlarında aynı t_d için saf gaz yağıyla elde edilen yüzeylere oldukça yakın R_a değerleri elde edilmiş, artan toz konsantrasyonu ile R_a değerlerinde saf gaz yağında elde edilenlere göre belirgin bir iyileşme görülmemiştir. Grafit tozlu çalışmada ise R_a , saf gaz yağı kullanılarak elde edilen yüzeylere göre iyileşmiştir. Borik asit tozlu deneylere göre grafit tozlu deneyler daha iyi R_a vermiştir [44].

Bu çalışmanın yüzey parlatma işlemiyle ilgili olarak, EEİ alanında olmamakla beraber Kim ve arkadaşlarının çalışmasında, nişasta, silika, alümina, zeolit ve iletkenliği düşük polimerlerin elektro-reolojik akışkan içerisine katılmasının mümkün olduğu belirtilmiştir

[45]. Li ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada ise optik lensler için umut verici bir çalışma ortaya çıkmıştır. 25 dakika süreyle 3000 V gerilim altında K9 camları (ing. optical borosilicate crown glass) parlatılırken kullanılan parlatma sıvısı içerisine alümina, cerium (cam-lenslerin parlatılmasında kullanılan bir tür aşındırıcı), silica, titanyum dioksit, ve nişasta tozları katılmıştır. Çalışmada elektro-reolojik sıvı olarak %47 silikon yağı, %47 nişasta (parlatıcı) ve %4 seryum ($\text{Ce}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ -aşındırıcı) kullanılmıştır. Cam yüzeyinin parlatılmasıyla yüzey pürüzlülüğü 8,46 nm R_a değerinden 3,45 nm R_a değerine inmiştir [46, 47].

Kumar ve Batra, TKEEİ'de kalıp çeliklerinin yüzey özelliklerindeki değişikliği araştırmışlardır. Gaz yağı içerisine tungsten karpit tozları (WC ve W_2C) katarak üç farklı kalıp çeliği sırasıyla: OHNS (ing. oil-hardening non-shrinkable), D2 kalıp çeliği (HC-HCr) ve sıcak iş çeliği (H13) işparçalarını kullanarak farklı işleme parametrelerinde (akım, vuruş süresi ve bekleme süresi) negatif kutuplama ve yanal dielektrik püskürtmesiyle deneyler yapmışlardır. Yaptıkları X-ışını dağılımı (XRD), taramalı elektron mikroskobu (TEM) ve optik (ışık) mikroskop araştırmalarında tüm işparçalarında tungsten ve karbon tozlarıyla yüzey alaşımlamanın oldukça önemli etkisi olduğunu ve mikro yüzey sertliğini %100 arttığını keşfetmişlerdir [48]. Teimouri ve Baseri, çalışmalarında döner elektrotun ve manyetik alanın EEİ'nin işleme performansına etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmada işparçası olarak 1.2080X210Cr12 soğuk iş çeliği ve elektrot olarak ortası tek delik bakır elektrot kullanmışlardır. Elektrotun dönme etkisini belirlemek için elektrot dönüş hızı olarak: 0, 200, 500, 800 ve 1000 dev/dak ve manyetik alanın etkisini belirlemek için: manyetik alan olmaksızın, düşük yoğunluklu manyetik alan (0,38 T) ve yüksek yoğunluklu manyetik alan (1,2 T) altında deneyler yapmışlardır. Döner elektrot santrifüj kuvveti oluşturarak işleme bölgesinden talaşları uzaklaştırmaya yardımcı olarak işleme performansını iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Manyetik alan, talaşları işleme bölgesinden toplayarak/çıkararak ark/kısa devreleri ve verimsiz boşalımları azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca artan elektrot dönüş hızıyla yüzey pürüzlülüğünün azaldığını belirtmişlerdir [49].

Singh ve arkadaşları, yaptıkları çalışmalarında AA6061/10%SiC alüminyum alaşımlı kompozit işparçasını EEİ'de toz katkılı ve toz katkısız gaz yağı kullanarak işleme performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmada boşalım akımının, vuruş süresinin, bekleme süresinin ve açık devre voltajının işleme

performansına etkilerini ve yüzey pürüzlülüğüne etkilerini araştırmışlardır. İşleme parametreleri ve İİH arasındaki ilişkiyi matematiksel olarak tespit etmişlerdir. Tungsten tozu katkılı gaz yağıyla yapılan deneylerde İİH değerinin %48,43 arttığını belirtmişlerdir. Toz katkısız gaz yağıyla yapılan deneylerle kıyaslandığında işleme yüzeylerinde tekrar katılaşma bölgelerinde %42,85 azalma ve yüzey özelliklerinde iyileşme tespit etmişlerdir [50].

Hourmand ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada Al-Mg₂Si metal matrisli kompozit malzemesine EEİ'de İİH, EAH ve yüzey pürüzlülüğü performansı çıktıları açısından incelemişlerdir. Deneylerde boşalım akımı olarak: 3, 6 ve 9 A ve vurum süresi olarak: 10, 100 ve 200 µs farklı değerler kullanılmıştır. Deney çıktılarını değişken analizi (ANOVA) yaparak İİH ve EAH değerleri için matematiksel bağıntılar elde etmişlerdir. Yapılan mikro yapı analizinde boşalım voltaj değerleri, boşalım akımı ve vurum süresi, yüzey profiline doğrudan etki eden parametreler olduğunu saptamışlardır [51]. Singh ve arkadaşları, EEİ'de süper alaşım Co605 işparçasının işlenmesinde dielektrik sıvı içerisine iletken grafit tozu katarak işleme parametreleri olarak farklı akım, vurum süresi, bekleme süresi ve boşalım voltaj değerleri denemişlerdir. Toz katkısız dielektrik işlenen işparçasının yüzeyinin mikro sertlik değeri 1315,2 HV iken grafit tozu katkılı dielektrikle işlenen işparçasının 1608,30 HV olarak elde etmişlerdir. Ayrıca, yüzey pürüzlülük değeri grafit tozu katkılı dielektrikle işlenen işparçasında 2,23 µm'den 1,99 µm'ye düştüğünü belirtmişlerdir. TEM analizi sonucunda, dielektriğe grafit tozu katkısıyla işparçası yüzeyinde düzgün ve homojen krater yapısı elde edildiğini belirtmişlerdir. Optimum/uygun işleme parametresinin 9 A akım ve 20 µs vurum süresi olduğunu tespit etmişlerdir. Dielektrikte artan grafit tozu konsantrasyonu işparçasına kendinden yağlama özelliği kattığını fakat yüzey pürüzlülüğü açısından önemli değişikliğe yol açmadığını tespit etmişlerdir [52].

Reddy ve arkadaşları, ticari EEİ sıvısı (SAE450) içerisine grafit tozu ve yağlayıcı (SPAN20) madde tozu katmak suretiyle PH17-4 paslanmaz çelik işparçalarına bakır elektrot kullanarak farklı işleme parametrelerinde deneyler yaparak işleme performansının etkilerini araştırmışlardır. İİH, EAH ve yüzey pürüzlülüğü değerlerinin değişken analiziyle matematiksel bağıntılarını tespit etmişlerdir. Deney numunelerini TEM'de analiz etmişlerdir. Deneysel çalışma sonucunda dielektrik sıvı içerisindeki yağlayıcı (SPAN20) tozları dielektrik sıvının iletkenliğini artırdığını ve dolayısıyla boşalma süresini kısaltarak

İİH'yi artırdığını tespit etmişlerdir. Ayrıca yağlayıcı tozlar, dielektrik içerisindeki grafit tozlarının topaklanmasını engelleyerek homojen boşalımlar sağlanmasına katkı sağladığını belirtmişlerdir. Boşalma akımının İİH, yüzey pürüzlülüğü ve ısı etkilenecek katman (beyaz katman kalınlığı) açısından EEİ için en önemli işleme parametresi olduğunu belirtmişlerdir [53]. Yine aynı yazarlar mevcut çalışmalarının deney sonuçlarını Taguchi anlamlı metoduyla optimize etmişlerdir [54].

Kumar, EEİ'de AISI-D2 kalıp çeliğinin işlenmesinde aynaya benzer bitmiş yüzey elde etmek için deneysel çalışma yapmıştır. Bu çalışmada, 55 nm ortalama boyuta ve tüp şekline sahip karbon tozu kullanılmıştır. Nano boyuttaki karbon tozlarının dielektrik içerisinde homojen şekilde dağılması için özel karıştırma ünitesi tasarlanmıştır. En iyi yüzey kalitesini elde etmek için farklı toz konsantrasyonları (0-6 g/lt) denenmiştir. İşleme deneylerinin çıktıları (İİH, R_a vb.) değişken analizine tabii tutulmuş ve matematiksel olarak ifade edilmiştir. İşlenen yüzeyler TEM'de incelenmiştir. En uygun toz konsantrasyonunun 4 g/lt olduğu tespit edilirken bu konsantrasyona sahip dielektrikle yapılan işlemlerde İİH %80 oranında artmış ve yüzey pürüzlülüğü %67 oranında azalmıştır. Yine 3 A akım değerinde yapılan işlemlerde toz katkısı yapılmadan önceki İİH değeri 0,2 mm³/dak iken 4 g/lt karbon tozu katkısıyla İİH değeri 1 mm³/dak değerine çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğü değeri ise 1,2 µm'den 0,4 µm değerine düşmüştür [55].

Peng ve arkadaşları, geniş yüzey alanına, düşük yoğunluğa ve optik özelliklere sahip olduğu için son yıllarda gittikçe popüler olan delikli/gözenekli küresel yapıdaki ve mikro boyuttaki nikel tozlarını üretmek için silisyum tozu katkılı dielektrikte EEİ'de basit, hızlı ve düşük maliyetli yöntem geliştirmişlerdir. Deneylerde, elektrot ve işparçası olarak saf nikel, dielektrik sıvı olarak deiyonize su ve toz katkısı olarak 38 µm ortalama boyuta sahip silisyum tozu kullanılmıştır. Toz konsantrasyonu 6 g/lt olarak ve işleme parametreleri ise: 45 A akım, 90 µs vurum süresi ve 15 µs bekleme süresi olarak ayarlanmıştır. Dielektrik sıvı içerisinde süzülen (filtre edilen) toz karışımı sodyum hidroksit çözeltisinde beş kez yıkandıktan sonra TEM'de incelenmiştir. Toz katkısız ve silisyum tozu katkılı deiyonize suyla yapılan deneylerde, silisyum tozu katkısı daha büyük delikli ve daha küçük kabarcıklı nikel tozları oluşumuna imkan sağladığını tespit etmişlerdir [56].

Son yıllarda titanyum ve titanyum alaşımlı implantlar, insan vücuduna biyo uyumundan dolayı oldukça yaygın kullanılmaktadır. Chen ve arkadaşları, mikro akımlı EEİ'de farklı

işleme parametreleri ve deiyonize su içerisine 35 µm ortalama boyutta Ti tozu katarak Ti işparçalarının yüzey özelliklerini incelemişlerdir. Grade 4 saf Ti işparçası ve elektrotla 0,1 ila 0,8 A arasında değişen akım değerlerinde, 10 ila 80 µs arasında değişen vurum süreleri ve 30 µs bekleme süresi işleme parametrelerinde farklı deneyler yapmışlardır. Yapılan TEM analizinde toz katkısız deiyonize suda yapılan işlemlerde özellikle 0,2 A akım, 30 µs vurum süresi değerlerinden sonra yüzeylerde çatlaklar tespit edilmiş ve bu çatlaklar akım değeri 0,5 A değerinden sonra daha da büyümüştür. Fakat 6 g/lit konsantrasyona sahip Ti tozlu deiyonize suda yapılan işlemlerde büyük çatlakların görülmediği ve yüzeyin oldukça homojen ve kratersi yapıda elde edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca 6 g/lit Ti katkılı deiyonize suda 0,1 A akım ve 30 µs vurum süresiyle yapılan işlemlerde oldukça düzgün, homojen hidrofilite özelliğe sahip yüzeyler elde ettiklerini ve bu yüzey kalitesinin diş implantlarında aranan bir özellik olduğunu belirtmişlerdir [57]. Singh ve arkadaşları, EEİ'de süper alaşım Co605 işparçasının işlenmesinde dielektrik sıvı içerisine iletken grafit tozu katarak EEİ'de işleme deneyleri yapmışlardır. Yapılan deneylerin sonuçlarına Taguchi metodu uygulayarak İİH, EAH ve yüzey pürüzlülüğü değerlerini analiz etmişlerdir. Optimum (uygun) işleme parametresinin 9 A akım ve 20 µs vurum süresi olduğunu tespit etmişlerdir [52, 58]. Yine, Singh ve arkadaşları, AA6061/10%SiC alüminyum alaşımlı kompozit işparçasını EEİ'de toz katkılı ve toz katkısız gaz yağı kullanmanın yüzey karakteristiği üzerine etkilerini araştırmışlardır. Toz katkısız gaz yağıyla yapılan deneylerle kıyaslandığında işleme yüzeylerinde tekrar katılaşma bölgelerinde %42,85 azalma ve yüzey özelliklerinde iyileşme tespit etmişlerdir [50, 59].

Sidhu ve arkadaşları, EEİ'de metal matrisli kompozit malzemeleri toz katkılı dielektrikle farklı işleme parametreleriyle işlemede, yüzey özelliklerine etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde işparçası olarak sırasıyla 65vol%SiC/A356.2, 10vol%SiC-5vol%quartz/Al ve 30vol%SiC/A359 kullanılmıştır. Üç farklı dielektrik sıvı sırasıyla: saf EEİ yağı, EEİ yağı + bakır tozu (6 g/lit) ve EEİ yağı + grafit tozu (6 g/lit) kullanılmıştır. Yapılan XRD ve TEM analizlerinde bakır tozu katkılı ve grafit tozu katkılı dielektrikle işlenen numuneler kıyaslandığında bakır tozu katkılı dielektrikle işlenmiş numuneleri daha sert yüzeyler sahip olduğu tespit edilmiştir [60]. Bai ve arkadaşları, literatürde az rastlanan toz katkılı kuruya yakın EEİ yönteminin farklı işparçası ve elektrotlar kullanarak işleme verimi üzerine araştırma yapmışlardır. Bu çalışmada MQL adını verdikleri bir karıştırma ünitesinde katı, sıvı ve gazdan oluşan bir karışımı dielektrik olarak kullanmışlardır. Burada katı: silisyum tozu, sıvı: EEİ yağı ve gaz: havadan oluşmaktadır. Bu karışım 0,4-0,8 MPa farklı basınç

değerleriyle işleme ortamına püskürtülmüştür. Deneysel çalışmada kullanılan EEİ tezgahı CNC kontrollüdür ve özel tasarlanan bir üniteyle elektrotu 200-2000 dev/dak arasında kendi ekseninde döndürebilmişlerdir. İşparçası olarak: W18Cr4V çeliği ve 45 Karbon çeliği, elektrot olarak: dış çapı 4 mm ve iç çapı 2 mm olan tek delik bakır ve pirinç elektrotlar kullanılmıştır. Farklı işleme parametrelerinde deneyler yapmışlar ve TEM analizleri yapmışlardır. Yazarlar yaptıkları çalışmayla toz katkılı kuruya yakın EEİ yönteminin termal olgusunu/fenomenini, İİH'yi ve deiyonizasyon prensibini açıklamışlardır [61].

2.2. EEİ'nin Mekanizması ve EEİ Plazmasının Matematiksel ve Ampirik Modelleri

EEİ verimliliği: İİH, EAH ve işparçasının yüzey pürüzlülüğü ve istenen geometrik toleransların tamlığıyla hesaplanır. Bu işlem esnasındaki girdi enerjisi birçok parçaya (işparçasına, elektrotta, dielektrik sıvıya vb.) ayrılır. Dağılan enerji daha çok İİH'ye ve işparçası yüzey pürüzlülüğüne etki etmektedir. Ayrıca bu işlemde elektrik enerjisi, ısı enerjisine dönüşmekte ve bu yüzden de teorik modellemeler ağırlıklı olarak ısı transferi denklemlerini ve enerji dağılım denklemlerini temel almaktadır. EEİ yönteminin temel kısıtlayıcı unsuru prosesin yavaş gerçekleşmesidir ve bundan dolayı İİH önemli bir çıktı parametresidir. İşparçasına transfer edilen enerjiyi doğru ve verimli şekilde tahmin etmek ısıl modellerdeki hata oranını azalmaktadır. Singh, farklı işleme parametrelerinde ısı transferi denklemlerinden faydalananarak işparçasına aktarılan enerjinin % dağılımını elde etmek için matematiksel model çalışması ve deneysel çalışmalar yapmıştır. Tungsten karpit işparçasıyla yaptıkları EEİ deneyleri sonuçlarına değişken analizi yapmıştır. Kurulan matematiksel modelde, Fourier ısı denklemleri ve noktasal ısı akısı denklemleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda işparçasına transfer edilen enerjiyi: akım, vurum süresi ve elektrotların polaritesine bağlı fonksiyon şeklinde ifade etmiştir. Akım ve vurum süresine bağlı olarak işparçasına transfer edilen enerjinin %6,1 ile %26,82 oranında değiştiğini tespit etmiştir [62].

Shabgard ve arkadaşları, EEİ'de girdi parametrelerinin plazma kanalı verimine etkilerinin matematiksel modellenmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Tek kıvılcım için işparçası ve elektrot üzerindeki sıcaklık dağılımlarını elde etmek için ABAQUS programında bir kod kullanarak Sonlu Elemanlar Analizi (SEA) yapmışlardır. Simülasyon çalışmasında, sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri ve zamana bağlı plazma kanalı yarıçapı yaklaşımları

kullanılmıştır. Modelde silindirik koordinatlarda Gauss ısı iletim denklemini kullanarak sekiz adet kabul yapmışlardır. Sıcaklık dağılım profilinden faydalanılarak krater boyutlarını hesaplamışlardır. Sonuçlara göre artan boşalım akımı, plazma çakma verimini doğru orantılı etkilerken, artan vurum süresi plazma çakma verimini ters orantılı olarak etkilediğini tespit etmişlerdir. Deneysel çalışmalarda AISI H13 çeliği, bakır elektrot ve dielektrik sıvı olarak ELF2 yağı kullanılmıştır. Yaptıkları deneysel çalışma sonuçlarıyla modeli doğrulamışlardır. Plazma çakma verimini doğru tahmin edebilmek için verilen enerji dağılımının doğru olarak bilinmesi gerektiği kararına varmışlardır [63].

EEİ'nin işleme aralığı/boşluğu olgusunu mikro ölçekli zaman zarfında deneysel olarak analiz etmek oldukça karmaşıktır. Fakat işleme aralığı, EEİ yöntemiyle işlenmiş parçaların yüzeylerinde istenen optimum özelliklerin sağlanması açısından kritik önem arz etmektedir. Yine de EEİ'de ki zamana ve mesafeye (uzaklığa) bağlı yüksek mertebeli doğrusal olmayan dinamik plazmanın mekanizması ve ısı akısı olgusu henüz tam manasıyla anlaşılabilmiş değildir. Guo ve arkadaşları, EEİ'de ASP2023 takım çeliğiyle tek kıvılcım için Gauss ısı akısı denklemlerini kullanarak, plazma kanalının yarıçapını zamana bağlı fonksiyon gibi tanımlayarak ve yenilikçi akım fonksiyonu kullanarak SEA modelini ANSYS programında geliştirmişlerdir. Modelde, boşalım akımının ve vurum süresinin işparçası üzerindeki sıcaklık dağılım profiline, krater şekline ve ölçülerine etkisini araştırmışlardır. EEİ sıcaklığının uzun vurum sürelerinde ve artan akım değerlerinde arttığını tespit etmişlerdir. Fakat bu artışta akımın doğrusal etki gösterdiğini, vurum süresinin ise doğrusal olmayan etki gösterdiğini belirtmişlerdir [64].

Kansal ve arkadaşları, TKEEİ için SEA kullanarak iki boyutlu axisimetrik bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen modelde: sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri, Gauss ısı dağılımı, işparçası-elektrot-dielektrik arasındaki % ısı dağılımı, vurum-bekleme süresi ve faz değişimi (entalpi) gibi kabullerden/tanımlamalardan faydalanmışlardır. Model için ANSYS (version 5.4) programında 4 noktalı quadrilateral elemanlı ve iki boyutlu modelden, İİH değerlerini ve sıcaklık dağılım profillerini elde etmişlerdir. 59 HRC sertliğe sahip AISI D2 kalıp çeliği işparçası, bakır elektrot ve gaz yağı dielektrikle deneysel çalışmalar yapmışlardır. Deneysel çalışmalarda osiloskop yardımıyla akım ve voltaj değerlerini elde etmişlerdir. Model sonuçları ve deney sonuçları kıyaslandığında mükemmele yakın uygunluk olduğunu belirtmişlerdir [65]. Yine Kalajahi ve arkadaşı, EEİ'de İİH için SEA ile ısı bir model geliştirmişlerdir. Oluşturulan model enerji dağılım

faktörü, plazma verimliliği, faz değişiklikleri, ısı bölgesinin şekli ve boyutu (gauss ısı dağılımı) gibi önemli birkaç nokta göz önünde bulundurulmuştur. İşparçasındaki sıcaklık dağılımının yarıçapı ve derinliği tespit edilmiştir. AISI H13 takım çeliği, işparçası ve bakır elektrotla yaptıkları deneysel çalışmalarla modellerini doğrulamışlardır. Ayrıca İİH için bir quadratik polinom regresyon modeli önermişlerdir [66].

Zhang ve arkadaşları, EEİ'de plazma kanalının ısı akısının karakteristiğini belirlemek için yeni bir metot geliştirmişlerdir. Oluşturdıkları termal modelde: Gauss ısı dağılımını, işparçasına transfer edilen enerji için dağılım oranı (f_c) ve plazma kanalı çapı (R_{pc}) için zamana bağlı fonksiyondan oluşan kabuller yapmışlardır. Model üzerinde yapılan denemelerde $R_{pc}=500 \mu m$ ve işparçasına aktarılan enerjinin %50 ($f_c=0,5$) olduğu durumlarda işparçasında $T=685738 \text{ }^\circ C$ gibi çokta gerçekçi olmayan sonuçlar elde ettiklerini ifade etmişlerdir. Bu sonuç doğrultusunda zamana bağlı plazma kanalı çapı denklemini K gibi bir sabitle çarpılması ve zamanın üstel bir fonksiyon şeklinde ifade edilmesi gerektiğini belirtmişlerdir. Bu şekilde ifade edilen R_{pc} değeriyle deneyleri tekrarlayarak makul sonuçlar elde etmişlerdir [67].

Benzer şekilde Sarıkavak ve Coğun, EEİ mekanizmasının ısıl modelini geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri modelde: silindirik koordinatlarda Gauss ısı iletim denklemini ve zaman ifadesi üstel fonksiyon şeklinde olan plazma kanalı yarıçapı denklemini kullanmışlardır. ANSYS programında tetrahedron eleman kullanarak 16960 düğüm noktasında 9870 elemandan oluşan zamana bağlı üç boyutlu ısı analiz yapmışlardır. Analiz sonucunda sıcaklık dağılım eğrileri elde etmişlerdir. Plazma sıcaklığını (T_p) 3000, 5000, 8000 ve 10000 $^\circ C$ farklı sıcaklık değerleri alarak analizi, $mm^3/vurum$ değerleri açısından deneysel sonuçlarla kıyaslamışlardır. Modelde varsayılan Gauss tipi ısı dağılımının doğruluğunu tespit etmişlerdir. Yüksek işleme parametrelerindeki (25 A akım ve 50 μs vurum süresi) model analiz sonuçları deneysel sonuçların altında kaldığını ifade etmişlerdir. Çalışmada, deneysel ve teorik sonuçlardan plazma çapı (R_p) büyüdükçe işleme performansı değerlerinin (İİH ve krater çapı (R_m)) arttığı görülmüştür. R_p değeri boşalım akımı ve vurum süresiyle doğru orantılı olduğundan bu işleme parametrelerinin artmasının, İİH ve R_m 'yi arttırdığını deneysel ve teorik olarak teyit etmişlerdir. Çalışma sonucunda, farklı araştırmacılar tarafından farklı işleme koşullarında yapılmış deneysel çalışmaların bu çalışmada geliştirilen sonlu elemanlar modeliyle yakın sonuçlar verdiğini ifade etmişlerdir. Geliştirilen model, EEİ'de, işleme performansına birincil derecede etkili olan işleme

parametrelerini (boşalım akımı, boşalım gerilimi, vurum süresi, vurum bekleme süresi, iletimle ısı transferi, taşınım ile ısı transferi katsayıları) içerdiğinden, birçok karşılaştırma çalışmasında ve önceden işleme performans çıktılarının ($\dot{I}_{IH}$, R_m , gibi) hesaplanmasında kullanılabilecek nitelikte olduğunu belirtmişlerdir [68, 69].

Son yıllarda, araştırmacılar 1-999 μm ölçülere sahip parçaları işleyebilen, 5 μm 'den daha az işleme aralığına sahip ve 9-10 ila 5-10 J aralığında enerji aktarabilen mikro EEİ ($\mu\text{-EEİ}$) ile ilgilenmektedirler. Özel ve hassas jeneratörlere sahip $\mu\text{-EEİ}$ 'deki plazma kanalının uygun şekilde modellenmesi oldukça zordur. Plazma kanalı yarıçapı sadece vurum süresine değil aynı zamanda aktarılan enerji yoğunluğuna da bağlıdır. Ghiculescu ve arkadaşları, $\mu\text{-EEİ}$ 'nin SEA ile ısı modelini geliştirerek klasik EEİ ve Ultrasonik Elektro Erozyon ile İşleme (UEEİ) yöntemlerinde mikro geometrilerde yapılan işlemlerinin kıyaslanması üzerine araştırma yapmışlardır. Modeli, COMSOL Multiphysics programında plazma kanalı yarıçapını zamana bağlı üstel fonksiyon olarak modellemişlerdir. Modelden krater geometrilerini ve işparçası yüzeyindeki sıcaklık değerlerini elde etmişlerdir. Normal $\mu\text{-EEİ}$ tezgahına ilave edilmiş bir vibratör (elektrotu 20 kHz ve 2 μm genlikte titreterek) kullanılarak UEEİ deneyleri yapmışlardır. Model sonuçlarıyla deneysel sonuçları kıyaslamışlar ve yakın olduğunu belirtmişlerdir [70].

Yine, Somashekhar ve arkadaşları, $\mu\text{-EEİ}$ 'de elektro-termal yaklaşımı için sayısal yaklaşımla matematiksel model geliştirmişlerdir. Geliştirilen iki boyutlu matematiksel model ısı transferi prensiplerine dayanmaktadır. ANSYS programında Gauss ısı dağılımına sahip ısı kaynağı ve özellikleri sıcaklığa bağlı AISI 316L çeliğinin zamana bağlı analizleri yapılarak işparçasındaki krater boyutu ve sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Kapsamlı termal analiz sonuçları deneysel çalışma sonuçlarına oldukça yakın olduğunu belirtmişlerdir. Tek kıvılcım için krater derinliği sırasıyla modelde 2,92 μm iken deneysel çalışmada 2,67 μm olarak tespit edilmiştir [71].

Aich ve Banerjee, destek vektör makinesi (DVM) adını verdikleri regresyon algoritmasıyla EEİ'nin matematiksel modellemesini gerçekleştirmişlerdir. Gauss radyal ısı dağılımını kernel fonksiyonu olarak ve ε -duyarsız kayıp fonksiyonunu da ısı kayıpları için tasarlamışlardır. Matematiksel modeli, $\dot{I}_{IH}$ ve R_a açısından ayırarak parça yığın optimizasyonunu gerçekleştirmişlerdir.

Benzer şekilde EEİ'nin mekanizmasını açıklamak için birçok elektro-termal tabanlı model çalışmaları yapılmıştır. Fakat her bir model farklı özelliklere ve yaklaşımlara sahiptir. Her bir modeldeki İİH mekanizması arasındaki farklılıkları ortaya çıkarmak önem arz etmektedir [72]. Yeo ve arkadaşları, literatürdeki beş adet EEİ modeli hakkında kritik değerlendirmeler ve nümerik karşılaştırmalar yapmışlardır. Snoeys'in, Van Dijck'in, Jilani'in ve Di Bitonto'nun modellerini sıcaklık dağılımı, krater geometrisi ve İİH açısından analiz etmişlerdir. Gelecekte bu amprik modellerin ısı akısı ve enerji dağılımı terimlerinin birleşmesiyle daha gelişebileceğini öngörmüşlerdir [73].

Özellikle yüksek sertliğe sahip üç boyutlu malzemelere mikro düzeydeki geometrilerde dik işleme yapmak için mikro Elektro Erozyon ile Dik İşleme (μ -EEDİ) yöntemi çok verimlidir. Fakat keskin köşeli takımların μ -EEDİ yöntemindeki aşınma problemlerinden dolayı birçok telafi metodunun gelişmesine neden olmuştur. Zhang ve arkadaşları, μ -EEDİ yönteminde sabitlenmiş uzunluk telafi metodunun simülasyonu ile konik takımların geometrisini tahmin etme çalışmaları yapmışlardır. Öncelikle takım ve işparçasının geometrisini iki boyutlu matris olarak matematiksel modelini oluşturmuşlardır. Daha sonra, işleme prosesini: kıvılcımlama, yatay besleme ve dikey besleme olmak üzere üç parçaya ayırmışlardır. Son olarak simülasyon çalışmalarını doğrulamak için bir dizi deneysel çalışma yapmışlardır. Simülasyon modeliyle deneysel sonuçlar arasındaki %4'lük bağıl hata olduğunu belirtmişlerdir [74].

μ -EEİ yönteminin vurum süresi ultra kısadır ve hem elektriksel hem de ısı bir etki olduğu için boşalma talaş kaldırma işleminde önemli rol oynar. Fakat çoğu araştırmacı μ -EEİ'nin işleme mekanizmasını incelerken sadece ısı etkileri üzerine yoğunlaşmışlardır. Guo ve arkadaşları, iki-sıcaklık modeli olan atomistik süreç modeliyle moleküler dinamik simülasyon modelinin birleşimi olan modeli tek kıvılcım için μ -EEİ'de işparçası için kullanmışlardır. Bu model sayesinde plazma kanalının giriş enerjisini, sıcaklığı ve ısı gerilmeleri analiz etmişlerdir [75].

Yüzey doğruluğu/hassasiyeti ve boyut hassasiyeti (geometrik toleranslara uygunluk) EEİ yönteminin kritik olgularıdır. Şu sıralar çoğu araştırma çalışmaları: tekrardan katılmış katman kalınlığı, yüzey krater yoğunluğu ve yüzey pürüzlülüğü gibi yüzey doğruluğu kriterlerinin EEİ yönteminin değişken parametreleriyle (akım, vurum süresi ve bekleme süresi) ne şekilde etkilendiğini araştırma odaklıdır. Dewangan ve arkadaşları, belirsiz

TOPSIS ve hassasiyet analiziyle EEİ'de yüzey doğruluğu ve boyut hassasiyeti üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yüzey tepki metodolojisiyle deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında aynı zamanda AISI P20 çeliği için yüzey özelliklerini iyileştirmek/geliştirmek için en uygun işleme parametrelerini tespit etmişlerdir. Deneysel sonuçlara değişken analizi yaparak en etkili parametreyi saptamışlardır. Yapılan analizlerde en uygun işleme parametreleri: 1 A akım, 10 μ s vurum süresi, 0,2 s takım çalışma süresi ve 1,5 s takım geri çekilme süresi olarak tespit etmişlerdir [76].

İİH'nin matematiksel modellenmesi için gerçek değer olarak enerji dağılımı ve plazma çapının ne oranda büyüdü bilinmesi gerekir. Plazma kanalının büyümesi, elektrotlar arası enerji dağılımı, buharlaştırma işlemi, tekrar katılmış yüzeyin tanımı, plazma çakma verimi ve işparçası üzerinde dağılan sıcaklığı matematiksel olarak düşünmek oldukça zor ve karmaşıktır. Bu yüzden İİH'nin matematiksel model sonuçlarıyla deneysel çalışma sonuçları karşılaştırıldığında büyük farklılıklar görülmektedir. Bu gibi durumların üstesinden gelebilmek için Panda ve Bhoi, Levenberg-Marquardt geriye yayılma tekniğiyle sigmoid aktivasyon fonksiyonunun biçimsel mimarı uygunluğunu yapay ileri beslemeli sinirsel ağ modeliyle İİH değerlerini tahmin etmeye çalışmışlardır. Bu yapay sinirsel ağ modelinde karmaşık fiziksel olgular olmaksızın yorumlamalar yapmışlardır. Bu modelin, deneysel sonuçlarla kıyaslandığında daha hassas ve daha hızlı sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir [77].

EEİ'nin işleme mekanizmasında: ısı, kimyasal ve elektriksel olgular eş zamanlı gerçekleşir. Izquierdo ve arkadaşları, yaptıkları literatür araştırmasında EEİ'nin genelde tek kıvılcım için yapılmış model çalışmalarının olduğunu ve çok kıvılcımın EEİ'de etkilerini araştırmak için matematiksel bir model geliştirmişlerdir. EEİ esnasında işparçası üzerinde dağılan sıcaklık alanlarını tek kıvılcımı süperpoze ederek çok kıvılcım için elde etmişlerdir. Matematiksel hesaplamalarda sonlu fark şeması kullanılmıştır. Verilen işleme parametrelerinde işparçasına iletilen enerjiyi, plazma kanalı yarıçapını ve İİH tahmininde matematiksel modelin sonuçları vasıtasıyla tersine tanımlama (ing. inverse identification) yapılmıştır. Modelde, kartezyen koordinatlarda Fourier ısı iletim denklemi, plazma kanalı yarıçapı için zamana bağlı üstel fonksiyon ve verilen enerjinin dağılımı kabulleri kullanılmıştır. Merkezi farklar kullanılarak analizler gerçekleştirilmiş ve bir algoritma geliştirilmiştir. Model için doğrulama yapılmış ve İİH, yüzey pürüzlülüğü için % hata oranları tespit edilmiştir.

İki boyutlu parçaların/geometrilerin hassas şekilde oluşturulmasında yaygın olarak tercih edilen Tel Elektro Erozyon ile İşleme (TEEİ) yönteminin işleme mekanizmasında tel çapı, tel ilerleme hızı, akım yoğunluğu ve vurum süresi gibi önemli parametreler vardır [78]. Das ve Jashi, mikro TEEİ (μ -TEEİ) yönteminde kıvılcımın erozyon oranına, limitlerine ve kabiliyetlerine açıklık getirecek matematiksel bir model geliştirmişlerdir. Bu noktada geliştirdikleri kapsamlı matematiksel model: plazma özelliklerini, ısı özelliklerini ve tek kıvılcım ile çok kıvılcım esnasında μ -TEEİ'de tel titreşiminin etkisini kapsamaktadır. Model tarafından hesaplanan kıvılcımın erozyon oranı: voltaj, tel çapı, kıvılcım sayısı ve tel titreşimine bağlı özellikler gösterirken tel ilerleme hızından bağımsız özellikler göstermiştir. Modelin doğrulama çalışmalarında deneysel çalışmalarla oldukça örtüşen değerler elde ettiklerini ifade etmişlerdir [79].

Giridharan ve Samuel, yaptıkları çalışmada fiziksel ve termal özellikleri kullanarak SEA ile TEEİ yöntemindeki krater yapısını modellemişlerdir. Modellerinde ısı analiz kullanmışlardır. Tek kıvılcım için üstel (eksponansiyel) bir ısı akısı denklemi kullanarak Gauss ısı akısı dağılım denklemleriyle ANSYS programında modelleme yapmışlardır. Modelde: toplamda 7 adet kabul, 4 sınır şartı ve bir adet ilk sıcaklık değeriyle çözüm yapmışlardır. Modelde, enerji dağılım faktörü (f_c) kullanarak kabuller de bulunmuşlardır. Plazma kanalını tek kıvılcım gibi kabul edip zamana ve akıma bağlı denklemle ifade etmişlerdir. İki boyutlu analizlerde işparçası üzerindeki sıcaklık dağılımlarını elde etmişler ve modeli üç boyutlu hale dönüştürmüşlerdir. Üç boyutlu modelde, işparçası üzerindeki sıcaklık dağılımı, işparçasının erime sıcaklığını geçtiği bölgeleri işlenmiş hacim olarak yorumlamışlardır. Yaptıkları deneysel çalışmaların sonuçlarıyla oluşturdukları ısı modeli doğrulamışlardır. Yaptıkları TEM analiziyle modeldeki krater yapılarını kıyaslamışlardır. Önerdikleri ısı modelde krater çapının deney yapmadan önce tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir [80].

Kuru TEEİ, dielektrik ortam olarak gaz kullanılan ve yeni gelişen çevreci bir teknolojidir. Kuru TEEİ, daha düzgün işleme, daha düşük yüzey pürüzlülüğü ve daha kısa işleme aralığı gibi avantajlar sunmaktadır. Deneysel çalışmalar göstermektedir ki kuru işleme, geleneksel sıvı dielektrikle işlemeden oldukça farklıdır. Wang ve arkadaşları, kuru TEEİ'nin tek kıvılcım için sıcaklık ve akış alanı simülasyon çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında silindirik koordinatlarda Gauss ısı akısı denklemini, akış için ise Navier-Stokes denklemlerini ve SEA için ANSYS programını kullanmışlardır. İşparçası olarak 45

çeliği ve dielektrik olarak ise gaz kullanmışlardır. Gaz dielektrikle yapılan işlemleri kıyaslamak için gaz yağıyla da aynı deneyleri yapmışlardır. Aynı akım ve vurum süresi değerlerinde yapılan deneylerde gaz dielektrikte daha küçük krater yapıları ve dolayısıyla daha düşük R_a değerleri elde edilmiştir [81].

Son yıllarda, EEİ'de manyetik alanın etkisinin araştırıldığı birçok çalışma mevcuttur. Govindan ve arkadaşları, tek kıvılcım için kuru EEİ'de manyetik alanın etkisini deneysel araştırmasını ve matematiksel modellemesini araştırmışlardır. Deneysel çalışmalar farklı işleme parametrelerinde hem kuru hem de sıvı EEİ deneylerini manyetik alan altında gerçekleştirmişlerdir. Manyetik alan içerisindeki Lorentz kuvvetlerinin etkisiyle hem kuru hem de sıvı EEİ yüzey özelliklerinin değiştiğini tespit etmişlerdir. Manyetik alanın, plazma kanalı çapına etki ederek işleme sonrası oluşan kraterin çapını küçülttüğünü belirtmişlerdir. Uygulanan tek kıvılcım için yapılan deneylerde elde edilen krater çaplarında manyetik alan etkisi: kuru EEİ için %81 ve sıvı EEİ için de %67 krater çaplarında küçültme gözlemlenmiştir. Oluşturulan matematiksel modelde, Lorentz kuvvetlerinin krater çapına olan etkisinin öngörülebileceğini belirtmişlerdir [82].

Yine, literatürde EEİ'nin işleme mekanizmasından yola çıkılarak modellenmiş diğer çalışmalar da mevcuttur. Krötz ve arkadaşları, EEİ'deki plazma kanalı ve ısı dağılımından faydalanarak tek kıvılcım için mikro Elektro-Kimyasal Ark İşleme (μ -EKAİ) yöntemini modellemişlerdir. Modellerinde işparçası üzerinde vurumdan dolayı oluşan krater çapı, vurum süresinden daha çok etkilendiğini tespit etmişlerdir [83]. Benzer şekilde EEİ ile ilgili olabilecek çalışmalar arasında Hamdan ve arkadaşları, yaptıkları çalışma özellikle plazma kanalında gerçekleşen fiziksel olaylara açıklık getirmektedir. Heptan içerisinde iki plaka arasındaki nano saniye vurumlu mikro boyutta elektriksel boşalımların oluşturduğu dinamik hava kabarcıklarını ve şok dalgalarını, Gilmore modeliyle açıklamaya çalışmışlardır [84]. Hamdan ve arkadaşlarının bir diğer çalışmasında, aralarında 10 μ m mesafe olan pim-plaka elektrotların heptan içerisinde μ -EEİ yardımıyla oluşturulan kıvılcımın yüzeylerde oluşturduğu kraterlerin matematiksel ve SEA modelleri üzerine çalışmışlardır. Isıl modelde Arbitrary Lagrangian Eulerian metoduyla yüzeyler tanımlamışlar ve analizi COMSOL programında gerçekleştirmişlerdir. Modellerini deneysel çalışma sonuçlarıyla kıyaslayarak doğrulamışlardır. Çalışma sonucunda krater çapını ve geometrisini etkileyen en önemli parametrenin Thomson-Marangoni kuvvetleri olduğunu ifade etmişlerdir.

Nano EEİ (n-EEİ) özellikle son yıllarda ilgi duyulan bir alan olmasına karşın, henüz tamamlanmamış teorisi yüzünden gelişimi sekteye uğramaktadır [85]. Zhang ve arkadaşları, n-EEİ'de tek kıvılcım için moleküler dinamik simülasyon (MDS) ve iki-sıcaklık modeli (İSM) birleşiminden oluşan hesaplamalı bir simülasyon modeli geliştirmişlerdir. Geliştirilen bu iki boyutlu model, n-EEİ'de erime işlemi, parçalanma (ing. disintegration), ablasyon (ing. ablation), katılaşma ve kalıcı gerilme analizleri gerçekleştirilmiştir [86]. Yine EEİ mekanizmasına farklı açıklama getirecek çalışmalardan Ming ve arkadaşları, Gauss İşleme Regresyonu (GİR) ve SEA tabanlı EEİ'nin melez (hibrit) işleme modelinin geliştirilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Çalışmalarında EEİ için Bayesian regresyonuna dayalı GİR ve SEA tabanlı bir Melez Akıllı İşleme (MAİ) modeli önermişlerdir. Tek kıvılcım için geliştirilen MAİ modelinde, SEA ile İİH'yi ve R_a 'yı tahmin edebilmek için: gizli ısı, işparçasına aktarılan ısı enerjisi faktörü katsayısı (f_c) ve plazma çakma verimi gibi olgular içermektedir. Model: gauss ısı akısı, zamana ve akıma bağlı plazma kanalı yarıçapı denklemi ve ısı dağılım faktörüne bağlıdır. ANSYS programında toplam 9 kabulle yapılan çalışmalarda, işparçası üzerindeki sıcaklık dağılım eğrileri elde edilmiştir. AISI W1 takım çeliği işparçası 12 A akım, 70 μ s vurum süresi ve 40 V boşalım voltajıyla deneysel çalışma yapılarak MAİ modeli sonuçlarıyla kıyaslanmış ve yapılan doğrulama da ortalama bağıl hata sırasıyla: İİH için %14,75 ve R_a için %20,74 olarak tespit edilmiştir. İİH'yi ve R_a 'yı etkileyen en önemli faktörün akım olduğunu ifade etmişlerdir [87].

Somashekhar ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada çok kıvılcım için μ -EEİ'nin işleme mekanizmasına Sonlu Hacimler Metodu (SHM) ile sayısal çözümler yaparak açıklık getirmişlerdir. Modelde Gauss ısı akısı dağılımını kullanarak toplam 11 adet kabul, 1 başlangıç şartı ve 4 adet sınır şartıyla axisimetrik koordinatlarda çözümler yapmışlardır. Toplam enerji dağılımını: elektrota giden enerji, işparçasına giden enerji, plazma kanalına giden enerji ve enerji kayıpları olarak düşünmüşlerdir. SHM'de grid hacimle ($k-1$, k , $k+1$ ve $j-1$, j , $j+1$) Cranck-Nicolson kapalı çözüm metoduyla MatLAB programında sayısal çözümleri gerçekleştirmişlerdir. x ve y koordinatlarında sıcaklık dağılımlarını elde etmişlerdir. Önerilen sayısal modeli deneysel bir çalışmayla doğrulamışlar ve yakın sonuçlar elde ettiklerini ifade etmişlerdir [88].

Hinduja ve Kunieda, literatürdeki Elektro Kimyasal İşleme (EKİ)'de ve EEİ'de, SEA ve SHM ile yapılmış tüm ısı model çalışmalarını tekrar incelemişlerdir. Modellerin çoğunun

ısı iletim denklemlerine dayalı kabuller içeren çalışmalar olduğunu belirtmişlerdir. EEİ'nin modellenmesi için gelecek çalışmaların daha doğru sınır şartları ve özellikle daha doğru enerji dağılımıyla plazma kanalının modellenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Daha doğru sınır şartlarıyla daha güçlü multi-fizik simülasyon çalışmalarının mevcut modellerin kesin şekilde yerini alacaklarını rapor etmişlerdir [89].

Subbu ve arkadaşları, kuru μ -EEİ yöntemindeki plazmayı sistematik olarak karakterize etmek için optik yayılma spektroskopi kullanmışlardır. Plazma ve parametreleri: plazma sıcaklığı, elektron yoğunluğu, debye (dipol moment ölçü birimi) uzunluğu ve gamma parametrelerini optik spektra yardımıyla kayıt edilmiştir. Kayıt edilen spektrallardan, çift çizgi metodu ve değiştirilmiş Saha denklemiyle sırasıyla plazma sıcaklığı ve elektron yoğunluğu hesaplanmıştır. Bu iki değerle de debye uzunluğu ve plazma parametresi hesaplanmıştır. Bunlara ilaveten EEİ bölgesi için log elektron yoğunluğu-log sıcaklık grafikleri elde edilmiştir. TEM kullanılarak morfolojik analiz yapılarak farklı enerjilerde krater yapıları incelenmiştir. Krater yapısı: takım geometrisine, vurum sayısına ve vurum enerjisine bağlı olduğunu ifade etmişlerdir [90].

Elektro Ark İşleme (EAI) yöntemi son yıllarda özellikle yüksek sertliğe sahip malzemelerin işlenmesinde oldukça tercih edilmektedir. EAI'yi açıklamak için EEİ yönteminin teorisinden sıklıkla faydalanılır. Boşalım akımı ve vurum süresi açısından EAI ve EEİ farklı olmasına rağmen EAI ve EEİ arasında özel bir fark yoktur. Zhang ve arkadaşları, EAI ve EEİ'nin farklı karakterlerini belirlemek için tek kıvılcımda plazma kanalı ve krater geometrisi gibi temel olgular üzerine matematiksel model çalışmaları yapmışlardır. Deneysel sonuçlarda: boşalım akımı ve vurum süresi: plazma çapına ve sıcaklığına, krater geometrisine ve işleme esnasında kısa devre oluşumuna etki ettiği tespit etmişlerdir [91].

Yine, Yu-kui ve arkadaşları, EEİ'nin farklı bir uygulaması olan μ -EEİ'de yığma/biriktirme işleminin kuru ortamda ısı modellemesi üzerine çalışmışlardır. Tek kıvılcım için model çalışmaları ANSYS programında gerçekleştirilmiştir. Modelde, Gauss ısı akısı dağılımı ve enerji dağılım denklemleri kullanılmıştır. İşparçası olarak yüksek hız çeliği, elektrot olarak pirinç (+ kutuplama) ve dielektrik ortam olarak hava kullanılmıştır. Deneysel çalışmalarda akım olarak (2,2-6 A), vurum süresi olarak (2-8 μ s) ve yığma süresi olarak (120 dak.) kullanılmıştır. Deneysel çalışmada çelik yüzey üzerinde yaklaşık 200 μ m çapında ve 1,2

mm boyunda silindirik hacmi sıkı şekilde yığmayı/biriktirmeyi başarmışlardır [92]. Zhang ve arkadaşları, EEİ'de plazma çapı ve enerji dağılımını belirlemek için yeni bir termo-fizik model geliştirip SEA yöntemiyle araştırmışlardır. Enerji dağılımını ve plazma çapını belirlemek için metalografik metot ve eş sıcaklık eğrilerini kullanarak elde edilmiştir. Çalışmalarında silindirik koordinatlarda Fourier ısı iletim denklemini kullanarak sıcaklık dağılımı eğrilerini çıkartmışlardır. İşparçasına ısı akısı noktasında Gauss ısı akısı denklemi kullanılmıştır. Başlangıçta kaldırılan hacmin hesabında katı modelleme programları kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Ölçümlere ve hesaplamalara dayalı ısı modelin sonucunda yazarlar: plazma çapı dağılımına karar verirken gerçek EEİ'ye daha yakın ve tutarlı yaklaşımların alınması gerektiği kanaatine varmışlardır [93].

Geleneksel imalat yöntemlerinin verimi malzemelerin mekanik özellikleri ve işlenecek parçaların geometrilerinin karmaşıklığıyla sınırlıyken, ısı bir proses olan EEİ'nin verimi bu gibi kısıtlamalardan etkilenmez. Habib, EEİ prosesi esnasında işleme parametrelerinin etkilenmiş yüzey metodolojisine etkilerini araştırmak için kapsamlı bir matematiksel model geliştirmiştir. Geliştirilen matematiksel modelin farklı işleme parametrelerinde (akım, vurum süresi) değişken analizi (ANOVA) yaparak İİH, EAH, R_a değerlerine etkilerini araştırmıştır. Yaptığı deneysel çalışmalara TEM analizi ve işleme parametreleri için optimizasyon çalışması gerçekleştirmiştir. Geliştirdiği matematiksel model, deneysel sonuçlara yakınsamıştır [94].

Eubank ve arkadaşları, sıvı ortamda EEİ'de Değişken Kütleli Silindirik Plazma Modeli (DKSPM) üzerine çalışmalar yapmışlardır. DKSPM üç adet diferansiyel denklemden: birincisi akış dinamiği denklemi, ikincisi enerji denge denklemi ve üçüncüsü radyasyon denklemidir. Termo-fiziksel özellikler: plazma entalpisi, kütle yoğunluğunu ve sıcaklıkla iyonize olmuş suyun parçacık fraksiyonu/dağılımı hakkında bilgi verebilmektedir. Denklemlerin nümerik/sayısal çözümlerinden plazma yarıçapı, plazma sıcaklığı, plazma basıncı ve plazma içerisindeki enerji dağılımı elde edilmiştir. 500 μ s'lik uzun vurum sürelerinden sonra bile plazma sıcaklığı 5000 K ve plazma basıncı 4 bar olarak sürdüğünü tespit etmişlerdir. Çalışmadaki nicel ispatlarla, aşırı ısıtmanın (ing. superheating) EEİ için en baskın mekanizma olduğu kanıtlanmıştır. Katot, anot ve plazma modeli serisinde gelişen bazı nicel tutarsızlıklar ne şekilde düzeltilebileceği de çalışmada tartışılmıştır [95].

Shanmugam ve arkadaşları, EEİ'nin hareketli/dinamik mesh özelliği kullanılarak SEA modelini gerçekleştirmişlerdir. Analitik denklemler kullanılarak erozyon katsayısını hesaplayıp modelde kullanmışlardır. Sonra bu katsayıyı deneysel çalışmalarla doğrulamışlardır. Daha sonra, erozyon katsayısı kullanılarak COMSOL Multiphysics 4.2 programında model oluşturmuşlar ve EEİ'de delik delme verimini araştırmışlardır. Yazılım/model kullanılarak μ -EEİ'de işleme süresini tahmin etme oldukça kritik bir faktör olduğunu belirtmişlerdir. İşleme süresinin tahmini, özellikle mikro ölçekli elektrot kullanılarak yapılan EEİ'de delik delme proseslerinde zaman ve kaynak açısından oldukça fayda sağlamaktadır. Yazarlar yapmış oldukları yazılım/model sayesinde gerçek deneyler olmaksızın işleme süresinin tahmin edilebileceğini belirtmişlerdir [96].

EEİ'de elektriksel boşalmaların oluşturduğu eş olmayan yerel ısı genişlemeler, işlenmiş malzemelerin yüzey katmanlarında termal gerilmelere neden olmaktadır. Bu termal gerilmeler, eğer akma gerilmesi mukavemetini geçerse parçanın soğuma sonrasında kalıcı olarak kalır. Bu olgular için: EEİ esnasında ısıtmanın ve dielektriğin soğumasının, EEİ için ısı transferinin, malzemelerin davranışlarının ve kalıcı gerilmenin modellenmesi gerekir. Salah ve arkadaşları, EEİ'de AISI 316L çeliğiyle yaptıkları deneysel çalışmada (5 A akım, 5 μ s vurum süresi ve 46 V boşalım voltajı) sonuçlarıyla elde ettikleri termal-eş gerilme eğrilerini, geliştirdikleri matematiksel modelin analiz sonuçlarıyla kıyaslamışlardır. Model analiz sonuçlarıyla literatürdeki diğer deneysel çalışmaların sonuçları arasında uygunluk olduğunu ifade etmişlerdir [97].

Ti alaşımları herkesin bildiği gibi işlenmesi zor havacılık malzemeleridir. Yüksek takım maliyetinden dolayı geleneksel mekanik yöntemler yerine Ti alaşımlarının işlenmesinde daha verimli olan EEİ tercih edilmektedir. İşleme performansına büyük etkisi olmasına rağmen Ti alaşımlarının EEİ sürecinde enerji dağılımına nadiren değinilmektedir. Shen ve arkadaşları, Ti-6Al-4V alaşımının EEİ'de farklı işleme parametrelerinde enerji dağılımını yeni bir model çalışmasıyla açıklamışlardır. Geliştirilen matematiksel model aynı zamanda EEİ için elektrotlar arası mesafe, vurum süresi, polarite ve elektrot şekli gibi parametrelerin etkisini de ele almaktadır. Modelden, enerji dağılım karakteristiğinin daha çok güç yoğunluğundan etkilendiği ve enerjinin daha çok anottan katoda doğru dağıldığını tespit etmişlerdir. Bu tespitlerin, diğer yapılmış çalışmalarda tespitlerle örtüştüğünü ve diğer yazarlarla fikir birliğinde olduklarının altını çizmişlerdir. Elektrotlar arası mesafenin artması enerjinin daha çok dielektriğe geçmesine ve vurum süresinin artması ise enerjinin

daha çok işparçasına geçmesine neden olduğunu belirtmişlerdir. İğne şeklindeki elektrotlarla yaptıkları deneysel çalışmalarda disk şeklindeki elektrotlara nazaran daha fazla oranda enerji transferi edilebildiğini tespit etmişlerdir [98].

EEİ'nin bir diğer önemli mekanizması olan ısıtım/radyasyonla ısı iletimi son yıllarda araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Adineh'in yaptığı çalışmada, ısıtım ile olan kayıpları diğer modellerdeki gibi ısı ve enerji denklemleri içerisinde değil, ayrı bir mekanizma olarak incelemiştir. Enerji denklemi içerisinde Net Dağılım Katsayısı (NDK) ifadesini monte ederek matematiksel model oluşturmuştur. Plazma kanalının moleküler foto iyonizasyonunun sıcaklık ve basınç altında formül şeklinde ifade etmiştir. Gaz yağı ve deiyonize su için NDK'yı denemiş ve NDK'nın deiyonize suda ısıtımından dolayı oluşan ısı kayıplarını daha iyi ifade ettiğini belirtmiştir [99].

Titanyum alaşımlarının yüksek şok direnci, yüksek özgül mukavemeti, yüksek sıcaklık mukavemeti, olağanüstü korozyon direnci ve insan vücuduna biyo uyumu gibi özelliklerinden dolayı: havacılık, kimya ve medikal endüstrilerinde oldukça yaygın kullanılmaktadır. Fakat Ti alaşımlarının yüksek kimyasal tepkime ve düşük ısı iletim katsayısı gibi özellikleri yüzünden EEİ'de bile yüksek işleme maliyetlerine neden olmaktadır. Bao-cheng ve arkadaşları, Ti alaşımlarının EEİ'de tek kıvılcım için aksi simetrik üç boyutlu termo-fizik modeli SEA kullanılarak gerçekleştirmişlerdir. Sıcaklık dağılımını ve İİH'yi daha verimli/düzgün elde edebilmek için plazma kanalı yarıçapı değerini zamana ve boşalım akımına bağlı denklemlerle, işparçasının erimesi ve buharlaşması için gereken ısıyı ifade etmek için Gauss ısı akısı denklemini kullanmışlardır. Modellemeyi ANSYS (ver. 12.0) programında gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, model analizi sonucundaki İİH değerlerinin, deneysel çalışma sonucundaki İİH değerleriyle çok yakın olduklarını belirtmişlerdir. Kurulan modelin, EEİ mekanizmasının teorik kurulumu açısından dikkate değer bir çalışma olduğunu belirtmişlerdir [100].

EEİ'nin termal modellerindeki kabuller modelin performans çıktılarını, doğruluk ve hassasiyet açısından büyük ölçüde etkilemektedir. Tan ve Yeo, μ -EEİ'de üst üste gelen kraterleri modelleme çalışması yapmışlardır. Çalışmalarında diğer çalışmalardan farklı olarak zamanla genişleyen dairesel ısı kaynağı ve ısı akısı yaklaşımını tek kıvılcım için kullanmışlardır. Modelin, iki boyutlu SEA çalışmalarını ANSYS programında gerçekleştirmişlerdir. Krater yapıları ve şekilleri için programdan alt ve üst sınırlar elde

edilip maksimum krater yarıçapı (R_{max}) yorumlanmıştır. Boşalım enerjisi arttığında, R_{max} 'ın arttığını tespit etmişlerdir. Model analiz ve deneysel çalışma sonuçlarının bir birine yakın olduklarını ifade etmişlerdir [101].

Talaş konsantrasyonu ve kabarcık hacim oranı: elektrotla işparçası arasındaki boşluğu (işleme bölgesini), ardışık boşalımları ve EEİ verimini etkilemektedir. Bu yüzden EEİ'de ardışık boşalımlar esnasındaki talaş ve kabarcık hareketleri mekanizmasının açıklanması gerekir. Fakat işleme aralığının gözlenmesi ve simule edilmesi çok zor olduğundan talaş ve kabarcık hareketlerinin mekanizması tam anlamıyla anlaşılamamıştır. Wang ve Han, EEİ'de ardışık boşalımlarda talaş ve kabarcık hareketlerinin üç boyutlu hacimde akışını/hareketini matematiksel olarak modellemişlerdir. Fluent programında oluşturdukları modeli doğrulamak için deneysel çalışmalar da yapmışlardır. Deney sonuçları, modeli mümkün kılmıştır [102].

Fonseca ve Marafona, EEİ'de kullanılan dielektrik sıvının deiyonizasyon süresinin EEİ performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Bu çalışmayı, matematiksel model sonuçlarıyla deneysel çalışma sonuçlarının kıyaslanmasında ortaya çıkan farklılıkların sebeplerini açıklamak ve dielektrik sıvının deiyonizasyon süresinin EEİ performansını ne şekilde etkilediğini belirlemek için yapmışlardır. ABAQUS programını kullanarak EEİ'de ki plazmayı oluşturmak için elektrik-termal analizi birlikte gerçekleştirmişlerdir. Farklı işleme parametrelerinde yaptıkları deneysel çalışmalarda işparçası olarak St37-DIN17100 çeliği, elektrot olarak bakır ve dielektrik sıvı olarak hidrokarbon esaslı dielektrik (CastrolSE Fluid180) kullanmışlardır. Hem deneysel çalışmalarda hem de kurulan modelde dielektrik sıvının deiyonizasyonu için geçen süre İİH'yi ve EAH'yi etkilediğini tespit etmişlerdir. Yazarlar, İİH ve EAH değerlerinin düşük vurum süreleri değerlerinde azaldığını, artan vurum süreleri değerlerinde ise arttığını göstermişlerdir [103].

Yine Shabgard ve arkadaşları, EEİ'de işleme parametrelerinin plazma kanalı verimine etkisini matematiksel olarak modellemişlerdir. Tek kıvılcım için EEİ'de plazma kanalı yarıçapını zamana ve akıma bağlı denklem şeklinde ve ısı iletimini de silindirik koordinatlarda Gauss tipi ısı iletimi şeklinde kabul ederek, işparçası ve elektrottaki sıcaklık dağılımlarını ABAQUS programında SEA gerçekleştirmişlerdir. Sıcaklık dağılımını krater geometrisini ve çapını hesaplamada kullanmışlardır. Farklı işleme parametrelerinde

deneysel çalışmalar yapıp krater yapısına etkilerini yorumlamışlardır. Deneysel çalışmalarla modeli kıyaslamış ve tutarlı olduğunu belirtmişlerdir [104].

EEİ'de oluşan plazma, her iki elektrik iletken elektrottan talaş kaldırılır. Weingartner ve arkadaşları, sıcaklığa bağlı termo-fiziksel bir model geliştirmişlerdir. Modelde kartezyen koordinatlarda sıcaklık dağılımını işparçası ve elektrot için elde etmişlerdir. Deneysel çalışmalarda AISI 1010 çeliği ve CuZn39Pb3 pirinç alaşımı işparçalarına farklı elektrotlarla işleme deneyleri yapılmıştır. Deneysel çalışmaları Simülasyon-1, Simülasyon-2 ve Simülasyon-3 analiz sonuçlarıyla kıyaslamışlar ve Simülasyon-2 analiz sonuçları deneysel sonuçlara yakınsamıştır. Yazarlar, zamana bağlı ısı denklemleriyle modelin tekrar kurularak, sıcaklığa bağlı ilk modelin karşılaştırılması gerektiğini ifade etmişlerdir [105]. Revaz ve arkadaşları, sıvı içersindeki EEİ'de katot işparçası üzerindeki yerel mikro termokapul vasıtasıyla alınan sıcaklık değerleriyle plazma kanalı özellikleri hakkında yorum yapmışlardır. Çalışmalarında: 5 A akım, 100 µs vurum süresi ve 10 µm plazma aralığı/işleme aralığı değerleriyle deneyler yapmışlardır. Sıcaklık değerleri birbirinden bağımsız iki yolla: a) katot işparçası üzerine yerleştirilmiş mikro termokapulün geniş frekans aralığında (ing. bandwith) ve yüksek çözünürlükte tek kıvılcım için yapılan ölçümlerden, b) erime sıcaklığına yakın tekrar katılmış bölgelerde, eş sıcaklık çizgilerinin maksimum genişlemeye maruz kalan kısımlarının hesaplanmasıyla elde edilmiştir. Bu sıcaklık verilerini oluşturdukları matematiksel modelle kıyaslamışlardır. Modele göre: işparçasına enerji aktarımını %10 ve plazma kanalı yarıçapı ($r_{\text{plazma}} \propto t^n$) formülündeki üstel değerin $n=0,2$ olarak tespit etmişlerdir [106].

Tan ve Yeo, literatürdeki benzer çalışmalardan yola çıkarak nano boyutta toz katkılı μ -EEİ'nin SEA ile modellenmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır. Termal iletim modelinde çok kıvılcım yaklaşımını kullanarak Gauss ısı iletim dağılımını işparçasına uygulayacak algoritmayı geliştirmişlerdir. SEA'da iki boyutlu sıcaklık dağılımlarını elde etmişlerdir. Deneylerde işlenen işparçalarının yüzeylerine TEM analizi yapılmış ve modelden elde edilen krater özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Model sonuçlarının yakınsadığını belirtmişlerdir [107].

Izquierdo ve arkadaşları, EEİ'nin temel yönlerini anlamak için süperpoze edilmiş ardışık boşalımları simule etme yeteneği olan termal bir model geliştirmişlerdir. Çok kıvılcım için geliştirilen modelde, işparçasına iletilen % enerji dağılımı, plazma kanalı çapının büyümesi,

malzeme kaldırma mekanizması ve konvektif soğuma etkisi araştırılmıştır. Farklı işleme parametrelerine sahip iki farklı rejim için hem deneysel hem de simulasyon çalışmaları yapmışlardır. Her iki rejim için de yapılan EEİ deneylerindeki yüzey pürüzlülüğü, ısı etkilenmiş katman özellikleri ve bitirme operasyonları sonuçları, modelin analiz sonuçlarıyla iyi uyum sağladığı ve doğru tahminlerde bulunduklarını belirtmişlerdir [108].

EEİ esnasında dielektriğin kırılmasında sonra, 50 ns gibi çok kısa bir sürede plazma oluşur ve daha sonra stabil olarak devam eder. Oluşan plazma, işleme bölgesinde geniş bir hacmi etkiler. Akkor hale gelmiş sıvı metalik işparçasının işlenmiş bölgelerinde işleme sonrası bile ışıma (radyasyon) devam eder. Tipik bir plazma spektrası elektrotlardan gelen saf olmayan ışın yayınımla birlikte güçlü H_{α} ve sürekli radyasyon gösterir. Böylece plazma, çoğunluğu hidrojen olan kırılmış dielektrik sıvı moleküllerinden ve elektrotların artıklarından (talaşlarından) oluşur. Descoeudres ve arkadaşları, EEİ plazmasını zaman ve belirli alanda/yerde hızlı optik yayılım spektroskopisiyle tanımlamaya çalışmışlardır. Çalışmalarında kurdukları özel düzenek sayesinde spektrograf kamerayla plazma anına imaj işleme yapmışlardır. CCD (ing. charge coupled device) kamerayla 16 adet spektrayı yorumlamışlardır. Plazmanın belirli zaman aralıklarındaki elektron yoğunluklarını tespit edebilmişlerdir [109].

Gerçek EEİ esnasındaki boşalmalar genelde kabarcıklar ve talaşla dolu bir işleme aralığında gerçekleşir. Aynı zamanda gerçek EEİ sürecinde işleme aralığındaki dielektrik, sıvı ve gaz fazından oluşmaktadır. Kojima ve arkadaşları, EEİ'de ark plazmasının çapının spektroskopik ölçümleri üzerine çalışma yapmışlardır. Yapmış oldukları çalışmada, kare hızı 16000 fps olan FASTCAM-ultima spektrometresiyle 8 μ s poz süresiyle gözlem yapmışlardır. Deneylerde 36 A akım, 120 V açık devre voltajı ve 300 μ s vurum süresiyle 2 mm çapında bakır elektrotlar kullanmışlardır. Çalışmada, optik spektroskopi vasıtasıyla plazma kanalının radyal sıcaklık dağılımı elde edilmiştir. Plazma kanalı yarıçapı 0,1-0,3 mm arasında iken plazma sıcaklığını 5000 K olarak hesaplamışlardır. Fakat 0,3 mm'den sonra düzgün ölçümler alamadıkları için hesaplayamadıklarını belirtmişlerdir. Dielektrik sıvının kırılması/deiyeonize olması için 5 μ s gibi bir sürenin geçmesi gerektiğini ifade etmişlerdir [110].

Ayrıca Natsu ve arkadaşları, EEİ'de plazma kanalının genişlemesini anlamak için yaptıkları çalışmada, plazma kanalının genişlemesini dielektrik sıvının kırılmasında bir kaç

mikro saniye sonra tamamlandığını tespit etmişlerdir. Bu tespitin bugüne kadar yapılan kabullerden farklı olduğuna dikkat çekmişlerdir [111]. Descoeudres ve arkadaşları daha önceki çalışmalarına ilaveten belirli zaman ve belirli alanda spektroskopiyle EEİ'nin plazmasını tekrardan analiz etmişlerdir [112]. Önceki çalışmalarındaki benzer sonuçları elde ettiklerini belirtmişlerdir [109, 112].

Yine, Revaz ve arkadaşları vurum tipi EEİ'de yerel sıcaklığın tepkisini araştırmak için çalışmalar yapmışlardır [113]. Daha önceki çalışmalarındaki gibi mikro termokapuller kullanmışlar ve benzer sonuçları elde etmişlerdir [106, 113]. Optik yayılım spektroskopiyle birçok çalışmaları olan Descoeudres ve arkadaşları bu çalışmalardan [109, 112] farklı olarak plazma anında elektron yoğunluğunun aşırı derecede artışı, H_{α} çizgilerini birleştirici etki gösterdiğini tespit etmişlerdir. H_{α} : dalga boyu 656,28 nm olan Balmer serisiyle ifade edilen derin-kırmızı gözle görülebilen spektral ışınlardır. Elektron sıcaklıklarını 0,7 eV civarında düşük ve kabaca sabit olduğunu belirtmişlerdir. Düşük elektron sıcaklıkları, yüksek yoğunluk ve diğer spektroskopik deliller, EEİ plazmasının ideal olmayan (ing. non-ideal) plazma olduğunu gösterdiğini belirtmişlerdir [114].

Pillans ve arkadaşları, EEİ kıvılcımlarının fiber optik kablo demetleriyle özelliklerini belirlemek için çalışma yapmışlardır. Tasarladıkları özel düzenek sayesinde Katot/Anot/Plazma (KAP) bilgisayar simülatörüyle fiber optik kablo demetlerinden aldıkları optik sinyalleri monokrometre fotodedektörlerde dönüştürerek DAQ devre kartına ve MATLAB tabanlı bir yazılıma iletmişlerdir. Osiloskoptan aldıkları değişken akım değerleri ve optik sinyalleri KAP simülatöründe yorumlamışlardır. Dielektrik olarak kullandıkları BP EEİ yağındaki talaşları, optik sinyalleri bozdukları gerekçesiyle proses esnasında filtre etmişlerdir. Optik sinyallerin dalga boyları, plazma anında değişken akım değerleri ve bağıl yoğunluk gibi verileri yorumlayarak plazma hakkında sonuçlar çıkarmışlardır. Plazma sıcaklığını, Saha denklemine benzer şekilde 9000-30000 K aralığında olduğunu tespit etmişlerdir [115].

Albinski ve arkadaşları, EEİ plazmasının 411,85 ve 413,29 nm bağıl yoğunluğa sahip Fe-I spektral çizgileri vasıtasıyla zamana bağlı plazma sıcaklığını ölçmek için çalışma yapmışlardır. Deneysel çalışmalarda elektrot olarak: NC6 (+ kutuplu) ve M1E (- kutuplu), dielektrik sıvı olarak kozmetik parafin kullanılmıştır. Tasarladıkları deney düzeneğinde monokromatörler (M1 ve M2), lensler (L1 ve L2), fotomultipler (PM1 ve PM2), %50

oranında yansıtıcı ayna (M), osiloskop (O) ve bilgisayar (C) kullanılmıştır. Elde ettikleri plazma yayınımlarının/ışınımlarının dalga boylarını plazma sıcaklığı hesaplamak için kullanmışlardır. Seçilmiş ışınların en sıcak olan bölgelerini plazma bölgesi kabul ederek monokromatördeki dar aralıkta dalga boyunu $\lambda=410$ nm ayarlanıp spektral genişlik çıktıları 0,1 nm'de elde edilip sıcaklıklar ölçülmüştür. EEİ plazma sıcaklığını %20 belirsizlikte ölçebildiklerini belirtmişlerdir [116].

Yine Nagahanumaiah ve arkadaşları, μ -EEİ'de spektroskopi vasıtasıyla plazma sıcaklığını ve elektron yoğunluğunu ölçerek plazma özelliklerini belirleme çalışmaları yapmışlardır. Plazma karakteristiğinin belirlenmesinde elektrot boyutu, işleme aralığı, akım ve voltaj gibi değişken parametrelerin etkilerini anlamak için Taguchi metoduna bağlı L-18 ortogonal deney seti/dizisi sistematik olarak kullanılmıştır. Çizgi eşleştirme metodu ve H_{β} spektral çizgilerini tam genişletilmesi yöntemi kullanılarak sırasıyla plazma sıcaklığını ve elektron yoğunluğunu hesaplamışlardır. İşleme aralığı ve elektrot boyutu, plazma karakteristiğini önemli derecede etkilediğini belirtmişlerdir. Düşük enerji boşalımlı μ -EEİ yöntemi, daha yüksek enerji boşalımlı geleneksel EEİ yöntemine kıyasla daha yoğun, daha düşük sıcaklık özelliğine sahip ve ideal olmayan bir proses olduğunu ifade etmişlerdir. Ortalama plazma sıcaklığı olarak 6170 K ve elektron yoğunluğu olarak $3,5 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ ($\Gamma=0,475$ 'te) tespit etmişlerdir [117].

Yapılan literatür araştırmasında EEİ'de delik delmede genellikle hidrokarbon esaslı dielektrik sıvıların ve suyun kullanıldığı tespit edilmiştir. Silikon yağı dielektrik çoğunlukla dalma EEİ yönteminde tercih edildiği görülmüştür. Yine literatürde, silikon yağı kullanılarak EEİ'de delik delme için gerçekleştirilmiş herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Ayrıca dielektrik sıvının ısıtılmasının etkilerini araştıran herhangi bir çalışma da bulunmamaktadır. Bu çalışma, yukarıda belirtilen boşluklara/eksik alanlara cevap vererek bilme önemli katkı sağlamıştır.

Yapılan incelemelerde görülen şu ki, araştırmacılar tasarladıkları modellerde; EEİ mekanizmasının sadece ısı etkisini ele alarak tek bir amprik denklem kullanımından yola çıkılarak tüm EEİ teorisine açıklık getirilmeye çalışılmıştır [51-106]. Fakat, EEİ yöntemi birden çok fiziksel olayın eş zamanlı gerçekleştiği karmaşık bir imalat şeklidir. EEİ'nin işleme mekanizmasında: Elektriksel ısınma (ing. joule heating) ile plazma oluşumu, plazma ortamında (kanalı) oluşan elektriksel kıvılcımla elektrottan işparçasına ısı transferi,

elektromanyetizma, taşınım ile ısı transferi (doğal konveksiyon), radyasyon (ışınım) ile ısı transferi, uygulanan akımın süresi kontrol edilerek soğuma ve işleme ortamı temizliği, dielektrik sıvıda akış, EEİ esnasında işparçası yüzeyinde kaldırılan talaşın belirli bir miktarının tekrardan yüzeye katılması, gibi fiziksel olaylar ve daha fazlası mevcuttur. Bu fiziksel olayları bir arada ve zamana bağlı (transient) şekilde inceleyen hiçbir analiz modeline (MFS modeline) yapılan literatür araştırmasında rastlanılmamıştır. Bu çalışma, modelleme teorisi açısından EEİ literatüründe olmayan öncü bir çalışma olarak önemli katkılar sağlamıştır.



3. TEORİ

3.1. Plazma Teorisi

3.1.1. Plazmanın tanımı

Plazma terimi genellikle maddenin dördüncü hali olarak tanımlanır. Katı bir maddenin sıcaklığının artırılmasıyla moleküller daha enerjik olarak sıvı hale daha sonrada gaz haline dönüşür. Gaz hali içerisindeki yeterli sıcaklığa sahip moleküller, serbestçe hareket eden gaz atomlarını, elektronları ve iyonları oluşturmak için ayrışır ve plazmayı oluştururlar [118].

3.1.2. Plazmanın özellikleri ve oluşma fiziği

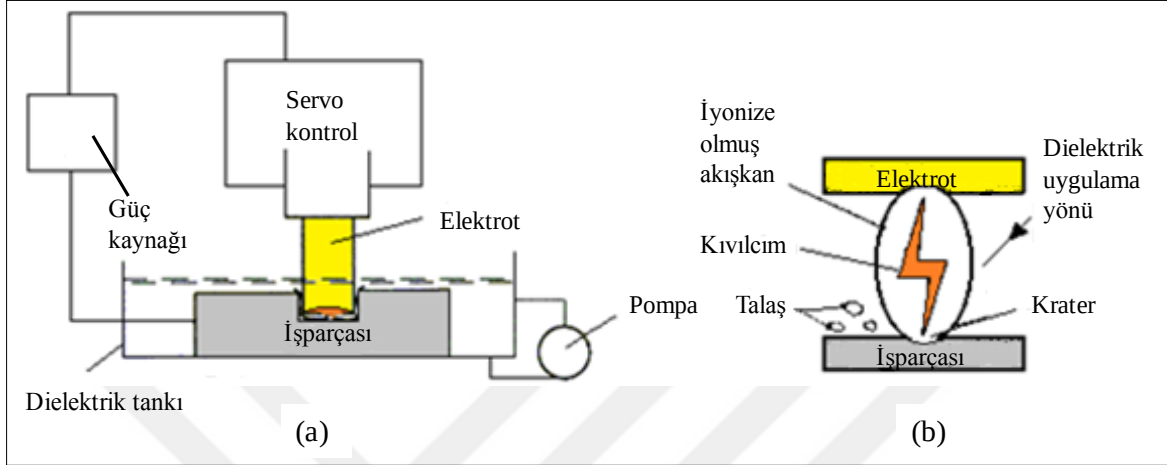
Serbest elektrik yükleri (elektronlar ve iyonlar) plazmayı elektriksel olarak bazen altın ve bakırdan bile daha iletken hale getirebilir. Plazma, elektromanyetik alanlara daha güçlü etkileşimli olarak cevap verir. Plazma içindeki parçacıklar, sürekli birbiriyle etkileşerek kollektif davranış sergilerler [119-121]. Plazma, maddeye ısı enerjisi verilmesiyle elde edilmesinin yanı sıra başka yöntemlerle de elde edilebilir. Üretim yöntemleri plazmalarının isimlerini belirler. Doğru akım (d.c) elektriksel deşarj, alternatif akım (a.c) elektriksel deşarj, puls deşarj ve dielektrik bariyer deşarj gibi farklı üretim tekniklerine ve farklı özelliklere sahip plazmalar vardır [118-121].

3.2. Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ)

3.2.1. EEİ'nin temel elemanları ve kontrol sistemleri

EEİ'nin temel elemanları ve kontrol sistemleri: elektrot (takım), işparçası ve dielektrik sıvının içinde bulunduğu işleme tankı, vurum jeneratörü, dielektrik sirkülasyon sistemi ve servo ilerleme mekanizmasından meydana gelmektedir (Şekil 3.1.a). Yöntemde servo ilerleme mekanizmasının kontrolüyle, elektrotla işparçası arasındaki mesafe her zaman sabit tutulup vurum jeneratörü tarafından üretilen enerji (kıvılcımlar) sayesinde işparçasından çok küçük kraterler şeklinde talaş kaldırılır (Şekil 3.1.b). Elektrot ve

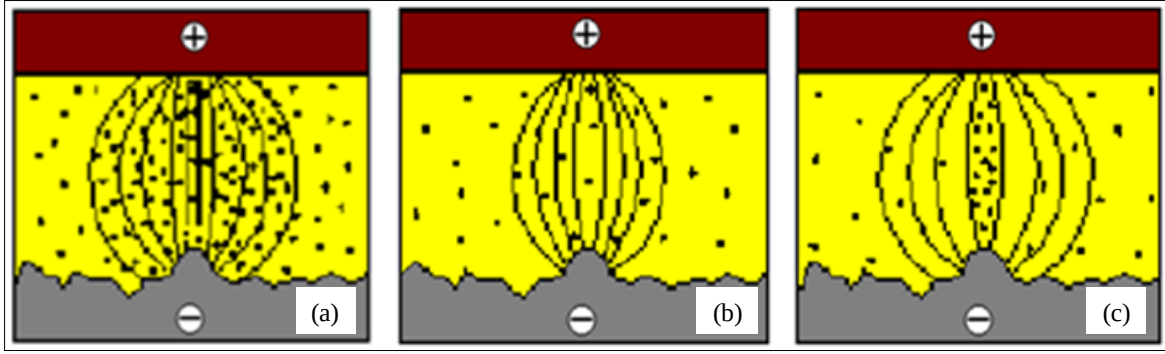
işparçasının ergimesi sonucu oluşan işleme artıkları, dielektrikle ortamdan uzaklaştırılmakta ve bu döngü işparçası istenilen forma gelene kadar devam etmektedir [29].



Şekil 3.1. EEİ sistemi: a) EEİ'nin temel elemanları, b) işleme bölgesi [29]

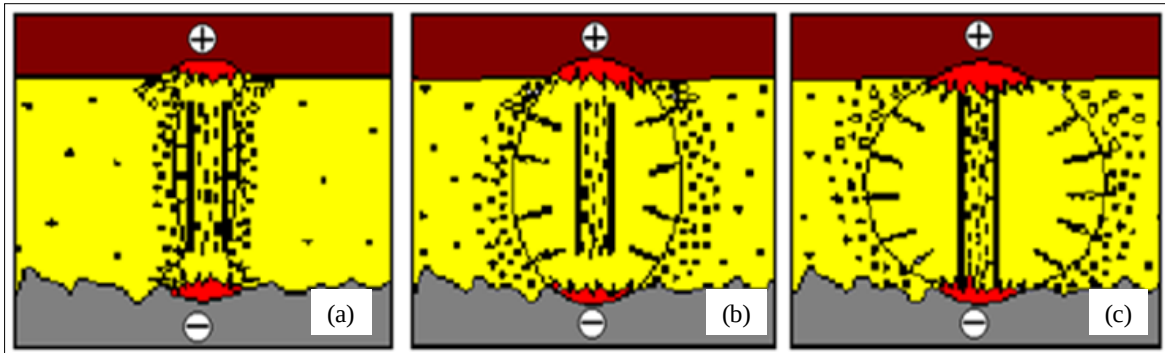
3.2.2. EEİ yönteminin teorisi

Yöntemin işleme fizliğini açıklamak üzere birçok teori geliştirilmiştir. Bunlar; ısı-elektrik teori, ısı-mekanik teori ve elektro-mekanik teori olarak sıralanabilir. Bunlar arasında en çok tercih edilen ise ısı-elektrik teoridir [29, 122, 123]. Bu teoride: vurum jeneratörünün kutuplarına bağlanan elektrotla işparçası işleme tankına yerleştirilir. İşleme bölgesinde kontrol edilebilir elektriksel direnç sağlayabilmek için dielektrik sıvı kullanılır. Yeterli gerilim oluşmadan elektrotla işparçası arasında akımın geçmemesi için dielektrik sıvının (gaz yağı, saf su, vb.) iyi bir yalıtkan olması gerekir. Vurum jeneratöründen elektrotla işparçasına akım uygulandığında, elektrotla işparçası arasındaki en yakın mesafede elektriksel alan güçlenir. Bu güçlenme sonucunda, dielektrik sıvı içerisinde bulunan çok küçük tanecikler elektriksel alanın güçlendiği bölgeye doğru toplanmaya başlar. Bu sırada gerilim hızla artarken akım değeri sıfırdır (Şekil 3.2.a). Elektriksel alanın merkezinde bulunan dar bir bölgede (kanalda) yüklü taneciklerin sayısı arttıkça, dielektrik sıvının yalıtkanlık özelliği bu kanal boyunca gittikçe azalır. Bu noktada gerilim maksimum değerine ulaşırken akım halen sıfır değerindedir (Şekil 3.2.b). Dielektrik sıvının yalıtkanlığı minimum değere ulaştığında artık elektrotla işparçası arasından akım geçmeye başlar. Bu esnada gerilim düşmeye başlarken akım hızla artmaktadır (Şekil 3.2.c).



Şekil 3.2. EEİ yönteminde: a) 1. adım, b) 2. adım, c) 3. adım [29]

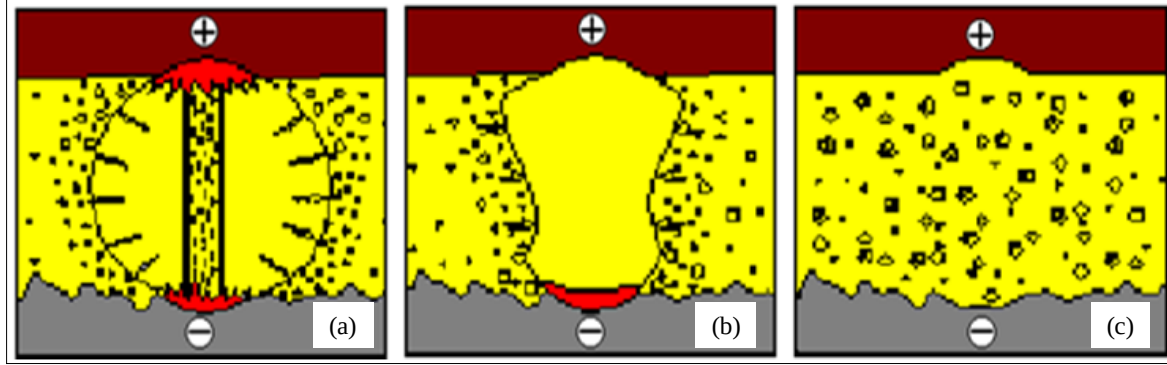
Akımın artmasıyla bu bölgedeki sıcaklık da hızla artar. Yüksek sıcaklık dielektrik sıvının, işparçasının ve elektrotun çok küçük bir bölümünü buharlaştırır. Böylece elektrotla işparçası arasında bir kanal (plazma kanalı) oluşur (Şekil 3.3.a). Oluşan hava kabarcıkları, plazma kanalından dışarı doğru çıkmaya çalışırlar. Elektriksel alan, plazma kanalı etrafındaki yüklü tanecikleri kanala doğru çeker ve kanal etrafında yoğunluk arttığı için plazma kanalı sınırlanır. Akım artmaya, gerilim azalmaya devam eder (Şekil 3.3.b). Vurum süresi sonuna kadar akım ve gerilim değişmez. Plazma kanalıyla doğrudan temasta olan işparçası yüzeyi ergimiş haldedir. Fakat, bölgedeki hava kabarcıklarının basıncı, bu yüzeyin hareketini engeller (Şekil 3.3.c).



Şekil 3.3. EEİ yönteminde: a) 4. adım, b) 5. adım, c) 6. adım [29]

Vurum süresi bitiminde yani bekleme süresinin başlangıcında akım ve gerilim değerleri sıfıra düşer. Bu aşamada sıcaklığın hızla azalması ve hava kabarcıklarının dağılmasıyla işparçasından kopartılan ergimiş talaşlar kanaldan dışa doğru hareket etmeye başlar (Şekil 3.4.a). Basıncı ve temiz dielektrik sıvının, işlemin gerçekleştiği bölgeye gelmesiyle işparçası yüzeyindeki işleme artıkları (talaşlar) ortamdaki uzaklaştırılır. Ortamdan uzaklaştırılamayan ergimiş metal, işparçası yüzeyinde soğuyarak tekrardan katılaşmış

katmanı oluşturur. İşparçası ve elektrottan koparılan parçalar dielektrik sıvı içerisine dağılırlar. Hava kabarcıkları ise dielektrik sıvı yüzeyine çıkarlar (Şekil 3.4.b).



Şekil 3.4. EEİ yönteminde: a) 7. adım, b) 8. adım, c) 9. adım [29]

Son durumda, elektrotla işparçası arasında bulunan birbirine en yakın iki nokta artık aşınmıştır. Aynı proses yeni en yakın iki nokta arasında da tekrarlanır. Bu adımlar, vurum süresi ve bekleme süresine bağlı olarak saniyede 5000-250000 kez tekrarlanabilir [2, 29, 122, 123]. Son yıllarda EEİ yönteminde, özel tasarlanan iletken katmanlar (yardımcı elektrotlar) ve işleme ortamına iletken tozların püskürtülmesi (yığılması) ile iletken olmayan seramiklerin (Zr_2O , Al_2O_3 , vb.) ve yarı iletken malzemelerin işlenmesine olanak sağlanmaktadır [124]. Fakat bu işlemler endüstriyel anlamda henüz, yöntemin elektrik iletken malzemelerin işlenmesinde gördüğü rağbeti yakalayamamıştır.

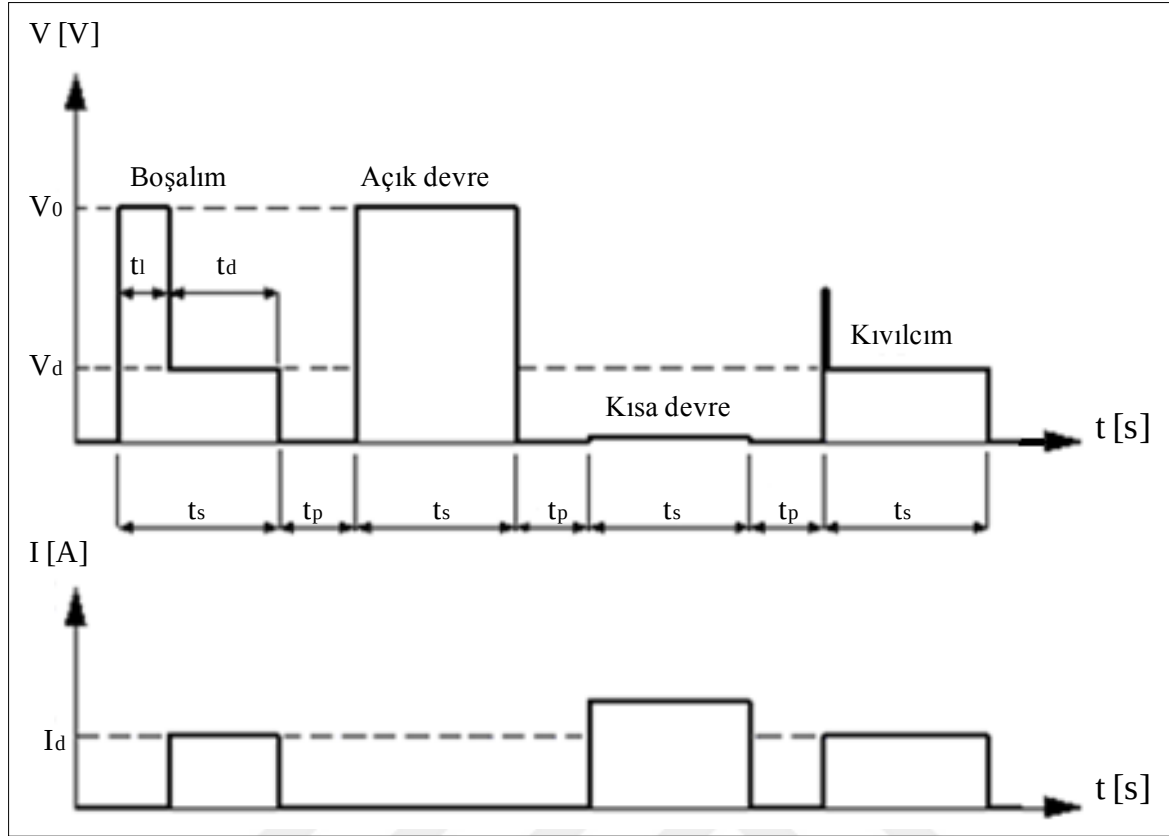
3.2.3. EEİ'nin parametreleri

Elektriksel parametreler

Elektriksel parametreler EEİ'nin işleme mekanizmasında en etkin parametrelerdir. Bunlar;

- ✓ Boşalım enerjisi (E_d); gerilim kontrollü vurum jeneratöre sahip elektro erozyon tezgahlarında boşalım (vurum) enerjisi (E_d) aşağıdaki denklemle hesaplanmaktadır (Eş. 3.1). Eş. 3.1'de, V_d ; boşalım gerilimi, I_d ; boşalım akımı ve t_d ; boşalım süresidir. İşleme aralığındaki elektriksel boşalımın tipik gerilim ve akım değişimleri ($V(t)$ ve $I(t)$) Şekil 3.5'te gerilim kontrollü bir vurum jeneratörü için gösterilmiştir [125].

$$E_d = V_d \cdot I_d \cdot t_d \quad (3.1)$$



Şekil 3.5. Gerilim kontrollü vurum jeneratöründe gerilim ve akım dalga biçimleri [125]

- ✓ Boşalım akımı (I_d); kıvılcım boşalması sırasında meydana gelen akım değeridir. Yüzey kalitesini ve talaş kaldırma hızını etkileyen en önemli parametredir. Endüstriyel amaçlı elektro erozyon tezgahları 0,5 ile 100 A aralığındadır. Çok yüksek boşalım akımı değerleri, aşırı ısının işparçası yüzeyine zarar vermesinden dolayı nadiren kullanılmaktadır.
- ✓ Ortalama işleme akımı (I); bir elektro erozyon döngüsünde kıvılcım oluşması esnasında görülen akım değerlerinin ortalamasıdır.
- ✓ Vurum süresi (t_d); elektrotla işparçası arasında, gerilimin ilk uygulanma anı ile kıvılcım boşalmanın bitiş anı arasındaki toplam süre olarak ifade edilebilir. Elektrot aşınmasını ve yüzey kalitesini etkileyen önemli bir parametredir.
- ✓ Bekleme süresi (vurum ara süresi) (t_p); birbiri ardına oluşan iki boşalım arasında geçen süredir. İşlem talaşlarının ortamdan uzaklaştırılması ve dielektrik sıvının tekrar iyonize olması bekleme süresi boyunca gerçekleşmektedir. Bekleme süresi, toplam işleme süresini artırdığından zaman kaybı gibi görünmesine rağmen, EEİ'nin kararlılığı için gereklidir.

- ✓ Gecikme süresi (t_i); kıvılcım boşalması öncesinde dielektrik sıvının iyonize olması için geçen süredir.
- ✓ Boşalım süresi (t_s); işleme aralığı boyunca akımın boşaldığı süredir.
- ✓ Çevrim süresi (t_c); vurum süresinin (t_d) ve bekleme süresinin (t_p) toplamıdır (Eş. 3.2).

$$t_c = t_d + t_p \quad (3.2)$$

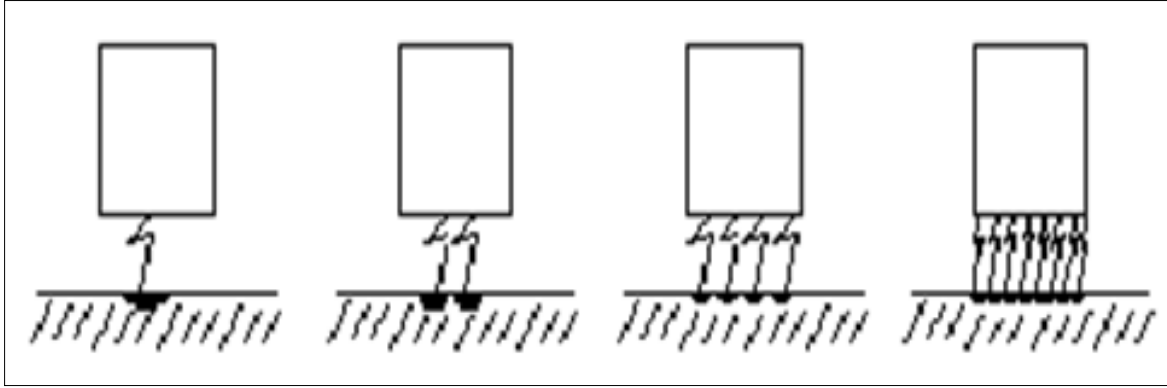
- ✓ Açık devre gerilimi (V_o); vurum jeneratörü tarafından uygulanan ve boşalımının olmadığı anda işleme aralığında görülen gerilim değeridir.
- ✓ Boşalım gerilimi (V_d); elektrotla işparçası arasında kıvılcım boşalımının devam ettiği sürece ölçülen gerilim değeridir.
- ✓ İşleme aralığı; elektrotla işparçası arasındaki işleme esnasında servo mekanizması tarafından sabit tutulan mesafedir [4, 5, 6, 29].

Kutuplama (polarite)

Kutuplama, elektrota göre boşalımın akış yönünü belirleyen durumdur. İİH'yi ve EAH'yi belirleyen önemli bir faktördür. Elektrot ve işparçası malzemelerine bağlı olarak kutup seçimi, kaba ve ince işleme için önem arz etmektedir. EEİ'de kutuplama, elektrotun sahip olduğu kutba göre adlandırılır. İşlenecek malzeme özelliklerine ve elektrot üretim şekli, tipi ve malzeme özelliklerine göre kutuplamaya karar verilir [29, 122].

Vurum frekansı (f_c)

Jeneratör tarafından elektrotla işparçası arasına birim zamanda uygulanan gerilim vurumlarının sayısıdır. Diğer işleme parametreleri sabit kalmak koşuluyla vurum frekansı arttıkça yüzey pürüzlülüğü azalmaktadır. Bunun sebebi, işleme için gerekli boşalım enerjisinin birden çok sayıda kıvılcım tarafından işlenecek yüzeye iletilmesidir. Böylelikle yüzeyde oluşan krater boyutları küçülmektedir (Şekil 3.6). TKEEİ, işleme bölgesinde çok sayıda köprü oluşturarak boşalım enerjisinin yoğunluğunu azaltıp aynı özelliklere sahip daha çok sayıdaki kıvılcımın işlenecek yüzeye etki etmesine olanak sağlar. Böylelikle vurum frekansı artırılmadan benzer etki TKEEİ'de elde edilebilmektedir [29].



Şekil 3.6. EEİ'de vurum frekansının yüzey kalitesine etkisi [29]

İşparçası işleme hızı (İİH)

İşparçası işleme hızı (İİH), birim zamanda işparçası yüzeyinden kaldırılan malzeme hacmidir (Eş. 3.3).

$$\text{İİH (mm}^3/\text{dak)} = \text{İşparçasından kaldırılan hacim (mm}^3) / \text{İşleme süresi (dak)} \quad (3.3)$$

Elektrot aşınma hızı (EAH)

EEİ'de elektrottan da bir miktar malzeme kaybı gerçekleşir. EAH, birim zamanda elektrottan aşınan malzeme hacmidir (Eş. 3.4).

$$\text{EAH (mm}^3/\text{dak)} = \text{Elektrottaki aşınan hacim (mm}^3) / \text{İşleme süresi (dak)} \quad (3.4)$$

Bağıl aşınma (BA)

Bağıl aşınma, EAH değerinin İİH değerine oranıdır (Eş. 3.5). Boşalım akımı ve vurum süresi BA'yı etkileyen en önemli parametrelerdir. Düşük ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemeleri, yüksek ergime sıcaklığına sahip elektrot malzemelerine nazaran daha fazla aşındığı için BA değerleri de daha yüksektir [31]. Ayrıca, TKEEİ'de işleme bölgesindeki tozların boşalım aralığını genişletmesiyle daha düşük BA değerleri elde edilebilmektedir [18, 24, 28, 29].

$$\text{BA} = \text{EAH} / \text{İİH} \quad (3.5)$$

Dielektrik sıvı

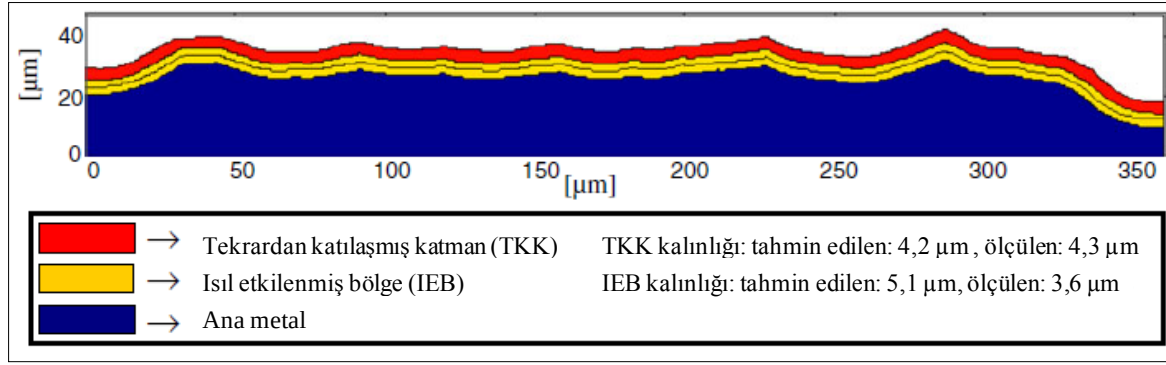
EEİ yönteminde çoğunlukla, hidrokarbon esaslı (sıvı madeni yağlar, gaz yağı vb.) sıvılar dielektrik olarak kullanılmaktadır. EEİ yönteminin verimli bir şekilde gerçekleşebilmesi için dielektrik sıvının temelde iki özelliğe sahip olması gerekmektedir: a) boşalım gerilimi değerine ulaşıncaya kadar elektrik yalıtkanlığını koruyacak kadar elektriksel dirence sahip olmak, b) boşalım sonrasında çok hızlı bir şekilde deiyonize olabilmektir. Aşırı ısınma, dielektrik sıvının bozunmasına ve bozunma sonrası zehirli gaz ve karbonların ortaya çıkmasına sebep olmaktadır. Oluşan gazlar, İİH değerinin azalmasına ve karbon ise elektrotla işparçası üzerinde birikerek ark tipi vurumların oluşmasına sebep olur.

Elektrot

Elektrot malzemelerinde istenen en temel özellikler: yüksek ısı kapasite ve yüksek ergime sıcaklığı değerleridir. Elektrot aşınması bu değerlerle ters orantılıdır. Yüksek ergime sıcaklığına ve yüksek ısı kapasiteye sahip elektrot malzemelerinin aşınması daha azdır [19]. Ayrıca EEİ'de kullanılan elektrotun üretim şekli, geometrisi ve boyutları işlenecek yüzeylerin kalitesini belirgin şekilde etkiler. Kolay işlenebilirlik, yüksek İİH ve düşük aşınma ideal elektrot malzemesi özellikleridir. Bakır, bu niteliklerin çoğuna sahip olduğundan elektrot yapımında en çok tercih edilen malzemedir. Ayrıca Toz Metalurjisi üretim teknikleriyle üretilmiş bakır-grafit, bakır-tungsten ve çinko alaşımlarından özel elektrotlar yöntem için kullanılmaktadır [19, 23].

3.2.4. EEİ'de tekrardan katılaşmış katman (TKK) kavramı

EEİ'de boşalım esnasında işparçası yüzeyinde ergiyen malzeme, bekleme süresi boyunca dielektrik sıvı tarafından ortamdan hızlı bir şekilde uzaklaştırılmazsa, tekrardan işparçası yüzeyine yapışır/katılaşır [126]. İşparçası yüzeyinde gerçekleşen bu olayda: işparçası yüzeyi çeşitli katmanlardan oluşur [108, 127, 128]. Bunlar: a) tekrardan katılaşmış katman (TKK), b) ısı etkilenmiş bölge (IEB) ve c) ana metal olarak ifade edilirler [108, 129, 130] (Şekil 3.7).



Şekil 3.7. Izquierdo ve arkadaşlarının çalışmasında katmanların şematik gösterimi [108]

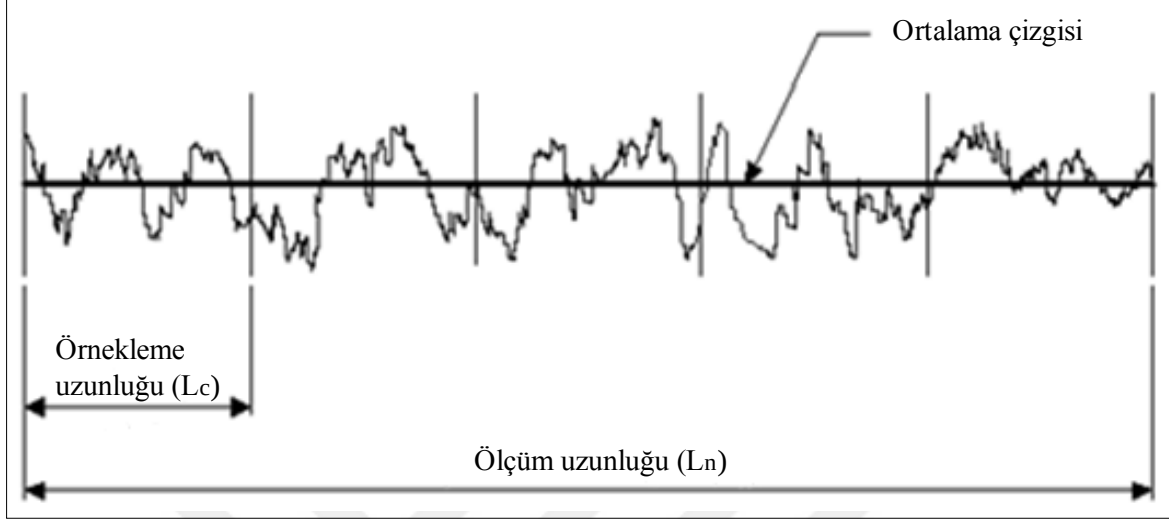
TKK kalınlığı, işleme parametrelerine bağlı olarak değişir [131]. Akım ve vurum süresi [132], dielektrik sıvı tipi ve özellikleri [133], dielektrik sıvı içerisine toz katkısı [134], dielektriğin işleme ortamına uygulanma şekli [129], elektrot tipi ve üretim yöntemi [130, 132], işparçası fiziksel özellikleri [135-137] TKK kalınlığı üzerinde önemli rol oynayan parametrelerdir.

Genellikle kalıcı gerilmelerin görüldüğü TKK, mikro çatlaklar ve mikro kraterler içerir [138-140]. İşparçası veya elektrottan dielektrik sıvı içerisine karışan/geçen karbon, EEİ ile işlenmiş yüzeyin sertliğini artırmaktadır [141]. Kalıcı gerilmeler ve mikro çatlaklar içeren aşırı sert TKK, aşındırıcı taneler (silikon karpit, alümina veya elmas) sayesinde lepleme (ing. lapping) [142], manyetik alan içerisinde aşındırıcı tozlarla fırçalama (ing. brushing) [143] ve yüzeye elektro ışını uygulama (ing. electron beam irradiation) [144] işlemleriyle giderilebilmektedir.

3.2.5. EEİ'de yüzey pürüzlülüğü kavramı

Herhangi bir yüzey profilinin genel hali Şekil 3.8'de görülmektedir. Ortalama çizgisi: cismin üstünde ve altında kalacak alanları eşit olacak şekilde kesen hayali çizgiye denir. Ortalama çizgisi pürüzlülük tanımında referans olarak kullanılır ve matematiksel olarak yüzey profilinin ağırlık merkezi şeklinde ifade edilebilir. “ L_c ” ile ifade edilen aralık örnekleme uzunluğudur. Örnekleme uzunluğu yüzeyin pürüzlülük değerini hesaplamada öncelikli olarak seçilen parametredir. “ n ” adet örnekleme uzunluğunun bir araya gelmesiyle “ L_n ” şeklinde ifade edilen ölçüm uzunluğu oluşmaktadır (Şekil 3.8). Eğer bir profilden n adet örnekleme uzunluğu alınırsa, ölçüm uzunluğu $L_n = n \times L_c$ olarak ifade

edilir. Pratikte en çok tercih edilen yüzey pürüzlülüğü parametresi: olan ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) dır [29, 122].



Şekil 3.8. Yüzey pürüzlülüğünde ölçüm ve örnekleme uzunluğu [29, 122]

Ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a)

Ortalama çizgisinden ölçülen yükseklik değişimlerinin mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır (Bkz. Şekil 3.8) (Eş. 3.6). Burada $F(x)$ herhangi bir x mesafesinde profilin ortalama çizgisine uzaklığıdır. R_a matematiksel olarak [122]:

$$R_a = \frac{1}{L_c} \int_0^{L_c} |F(x)| dx \quad (3.6)$$

3.3. Elektro Reoloji

3.3.1. Elektro reoloji kavramı

Elektro reoloji (ER), elektrik alana maruz kalan bir akışkanın, akış özelliklerinde meydana gelen değişimlerin incelendiği bir bilim dalıdır. Yani, elektro reoloji’de elektrik alanın sıvı eriyikler (dispersiyonlar) üzerine olan etkisiyle ilgilenilir. Bu etki, ya sıvının akmaya karşı gösterdiği direnç ya da sıvının katıya dönüşme isteği şeklinde açıklanabilir. Bu olayları etkileyen en önemli parametreler: elektrik alan kuvvetinin büyüklüğü, alan frekansı, kayma hızı, kayma gerilimi, sıcaklık, tanecik boyutu, süspansiyon içerisindeki katı tane derişimi

(veya tanecik hacim kesri), süspansiyon ortamı, dağılan taneciklerin özellikleri ve süspansiyon içerisindeki organizasyonu (ing. promoter) olarak sıralanabilir [145, 146].

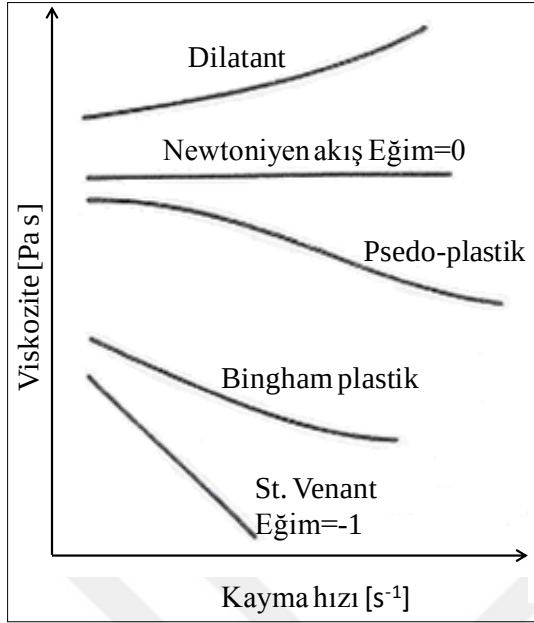
3.3.2. Elektro reolojik akışkanlar

Elektro reolojik akışkanlar (ERA), bir elektrik alanının varlığında fiziksel halini değiştirebilen sıvı maddelerdir. Elektro reolojik bir akışkan, maruz kaldığı elektrik alanının şiddetine bağlı olarak su gibi serbestçe akabilir, bal gibi süzülebilir ya da jelatin gibi katılaşabilir [146]. ERA'ların elektrik alan kuvvetinin etkisiyle birkaç milisaniyede viskozitelerinde gösterdikleri artış, akışkana uygulanan titreşimleri kontrol edebilmeleri ve enerji sönmüleyebilmeleri önemli özellikleridir [146-148].

3.3.3. Elektro reolojik akışkanların reolojisi

Bir akışkanın elektro reolojik yanıt vermesinin sebebi, sürekli faza uygulanan sabit elektrik alanla birlikte dağılmış parçacıkların polarize olması şeklinde açıklanabilir. Elektrik alan uygulanmasıyla komşu parçacıklar birbirini çekmekte ve dik lif yapılar oluşmaktadır. Oluşan lif yapıları, süspansiyonun viskozitesinde artışa sebep olur [146]. Viskozitedeki artış, ERA'nın akış ve davranış karakterini değiştirir. Bir ERA'nın reolojik özellikleri, elektrik alan uygulandığında, Newtoniye'den Bingham türü akışa (Şekil 3.9) kadar geçiş sergileyebilir [149-151].

Akış özellikleri açısından negatif eğime viskozite olarak 1000 Pa s değerinden daha küçük değerlerde geçilir [149]. Psedo plastik akış davranışı, diş macununun sıkıldığında tüpünden çıkışını andırır [150, 151]. Oysa ki, EEİ'de hem küçük çaplı delik delmede hem de hacim kalıpcılığındaki hassas işlemlerde kullanılacak ERA'lardan, psedo plastik akış davranışından ziyade St. Venant akış davranışı beklenir. St. Venant akış davranışı: kapalı bir kanalda suyun akışına yakın özellikleri sergileyen akış türüdür.



Şekil 3.9. Viskozite ve kayma hızına bağlı akış türleri [149]

3.4. EEİ'nin SEA İçin Modelleme Teorisi

Son yıllarda, özellikle imalat yöntemlerinin SEA ve SHM ile modellenmesi giderek önem arz etmektedir. EEİ'nin teorisi üzerine yapılmış birçok model çalışmasına [62-117] rağmen EEİ'nin işleme fiziği, rastlantısal (stokastik) ve anlaşılması güç bir kavram [77] olduğu için modellenmesi de oldukça zordur. EEİ'nin işleme mekanizmasında birçok fiziksel olay: ısı, kimyasal ve elektriksel olgular eş zamanlı gerçekleşir [78, 105]. Bu işlem esnasındaki girdi enerjisi, birçok parçaya (işparçasına, elektrota, dielektrik sıvıya, kaldırılan talaşa vb.) ayrılır. Dağılan enerji daha çok, İİH'ye ve işparçası yüzey pürüzlülüğüne etki etmektedir. Ayrıca bu işlemde elektrik enerjisi, ısı enerjisine dönüşmekte ve bundan dolayı teorik modellemeler ağırlıklı olarak ısı transferi denklemlerini ve enerji dağılım denklemlerini temel almaktadır. EEİ verimliliği; İİH, EAH ve işparçasının yüzey pürüzlülüğü ve istenen geometrik toleransların tamlığıyla/doğruluğuyla [76] ifade edilir.

EEİ'nin karmaşık fenomenolojisini (öz bilimi) açıklamak için literatürde genelde ısı-elektrik teorisi kullanılarak model çalışmaları yapılmıştır [70]. Teorik modeller, uygun başlangıç ve sınır şartlarıyla birlikte makul kabuller yardımıyla zamandan bağımsız ısı iletim denklemlerinin çözümü şeklindedir. Fakat, çözümleri kolaylaştırmak için yapılmış birçok kabulden sonra denklemlerin kapalı şekildeki çözümünden elde edilen sonuçlar gerçek EEİ koşullarından (durumundan) oldukça uzak kalmaktadır. Bunun yanı sıra,

işleme fiziği ihmal edilerek yapılan bazı kabuller, modelin performans çıktıları (İİH, EAH ve R_a) doğruluk ve hassasiyet açısından büyük ölçüde etkilemektedir [77, 101]. İİH'nin matematiksel modellenmesi için gerçek değer olarak enerji dağılımı [62, 67, 70, 75, 93] ve plazma çapının ne oranda büyüdüğünün [70, 77, 93, 111] bilinmesi gerekir. Fakat, plazma kanalının büyümesi [93, 108], elektrotlar arası enerji dağılımı [67, 95, 98, 111], buharlaştırma işlemi [95], tekrar katılmış yüzeyin tanımı [94, 97], plazma çakma verimi [63, 95, 98] ve işparçası üzerinde dağılan sıcaklığı [63, 65, 67-70, 75, 95, 98], matematiksel olarak düşünmek oldukça zor ve karmaşıktır. Bu yüzden model çalışmalarında elde edilen teorik İİH değerleriyle deneysel çalışmalar sonunda elde edilen İİH değerleri karşılaştırıldığında büyük farklılıklar görülebilmektedir [77]. Ayrıca EEİ'nin diğer önemli olguları: ışınlam/radyasyonla ısı iletimi [99], talaş konsantrasyonu ve kabarcık hacim oranı [102, 110], işleme aralığı [64], dielektriğin kırılma süresi [102, 103, 109, 111], dielektriğin cinsi [81], plazma sıcaklığı ve elektron yoğunluğu [90, 95, 106, 109, 112-117], plazma karakteristiği [117], elektrotların şekli ve geometrisi [74] ve manyetik alan [82] EEİ'nin işleme verimine doğrudan etki etmektedir.

Hinduja ve Kunieda [89], EKİ'de ve EEİ'de, SEA ve SHM ile yapılmış literatürde var olan tüm ısı model çalışmalarını tekrar incelemiş ve kapsamlı bir araştırma çalışması gerçekleştirmişlerdir. İnceledikleri modellerin çoğunun, sadece ısı iletim denklemlerine dayalı olduğunu belirtmişlerdir. EEİ'nin ısı modellemesi için, daha doğru sınır şartları ve özellikle daha doğru enerji dağılımı oranıyla, plazma kanalının modellenmesi gerektiğini ifade etmişlerdir. Fakat, yakın gelecekte daha doğru sınır şartlarıyla daha güçlü multi fizik simülasyon modellerinin, mevcut ısı modellerin kesin şekilde yerini alacaklarını bildirmişlerdir.

3.4.1. Mevcut EEİ modellerinde yapılan kabuller

Mevcut EEİ modellerini basitleştirmek ve çözülebilir hale getirebilmek amacıyla araştırmacılar tarafından aşağıdaki kabuller yapılmıştır [63-69, 71, 77, 85, 87, 88, 101, 104]. Bunlar;

- ✓ Modellerin çoğu tek bir kıvılcım için geliştirilmiştir,
- ✓ İşparçası malzemesi homojen ve izotropiktir,
- ✓ İşparçasındaki ısı transferi, iletim (ing. conduction) yoluyla olmaktadır,

- ✓ Kıvılcım, elektrot yüzeyinde düzenli dairesel bir ısı kaynağı oluşturmaktadır,
- ✓ Plazma kanalı düzgün silindirik bir şekle sahiptir,
- ✓ İşparçası eksenlerinde simetriktr,
- ✓ Işıma (radyasyon) vb. ısı kayıpları ihmal edilmiştir,
- ✓ Verilen elektrik enerjisi sadece ısı enerjine dönüşür ve belirli oranda (% değer) dağılır.

Analizdeki denklem çözümlerini kolaylaştırmak için araştırmacılar tarafından yapılmış kabuller, gerçek EEİ koşullarını tam olarak yansıtamamasının yanı sıra, modelin performans çıktılarını, doğruluk ve hassasiyet açısından oldukça etkileyeceği de kaçınılmaz olarak görülmektedir. Her ne kadar SEA yapılan model çalışmalarında bu gibi kabuller makul karşılansa da, birçok araştırmacı ampirik denklem içerisine yerleştirdikleri katsayılar (çarpanlar) vasıtasıyla modellerini yakınsatmayı ve işleme koşullarını gerçeğe yakın hale getirmeyi uygun görmüşlerdir.

3.4.2. Mevcut EEİ modellerinde kullanılan ampirik denklemler

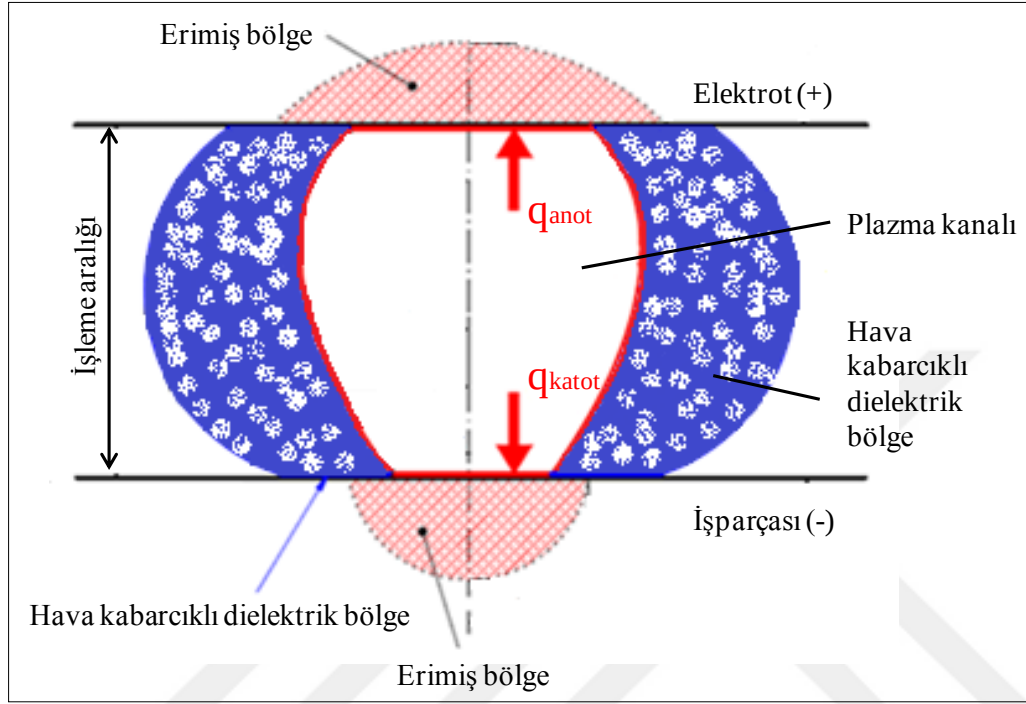
EEİ'de işparçası ve elektrot ara yüzünde aşırı ısınmadan dolayı plazma kanalı oluşmaktadır (Şekil 3.10). Plazma kanalında elektriksel akıma bağlı olarak oluşan ısınma (ing. joule heating), işparçasından vurum süresi boyunca talaş kaldırılmasına (işlemeye) olanak sağlar [65, 66, 68-70].

Literatürdeki model çalışmalarının çoğu, silindirik koordinat sisteminde [62-71, 73, 77, 78, 80, 81, 87, 88, 92, 93, 100, 101, 104] ve bazıları ise kartezyen koordinat sisteminde [78, 97, 105] incelenmiştir. Mevcut EEİ model çalışmaların tamamında yönetici denklem (ing. governing equation) olarak Fourier ısı iletim denklemi kullanılmıştır. Çünkü bu modellerde, verilen elektriksel enerjinin tamamı ısı enerjisine dönüşeceği ve dönüşen enerji işparçasına ısı iletimiyle olacağı kabul edilmiştir. Mevcut modellerde, katılardaki ısı iletimi için silindirik koordinatlar Fourier ısı iletim denklemi kullanılmıştır (Eş. 3.7).

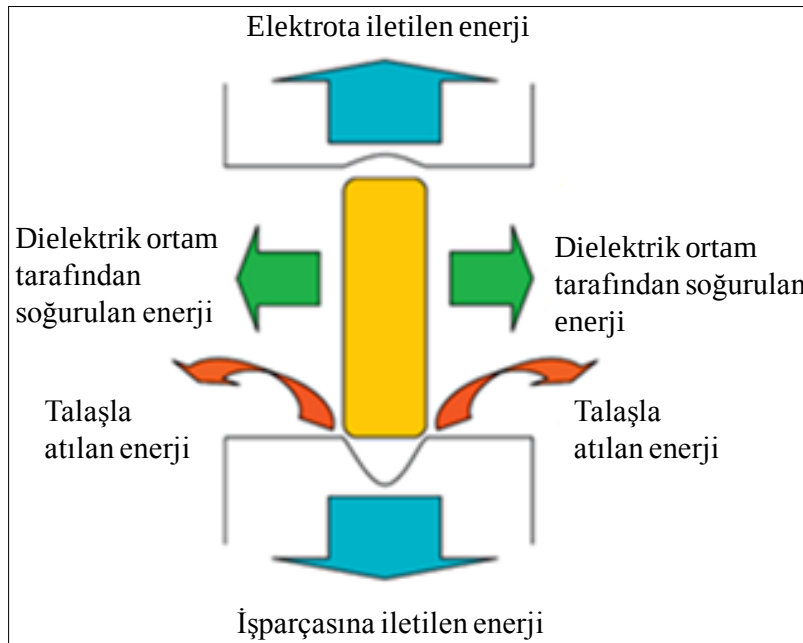
$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(K r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (3.7)$$

Eş. 3.7'de, ρ ; işparçası yoğunluğu, C_p ; işparçası özgül ısısı, K ; işparçasının ısıl iletkenlik katsayısı, T ; sıcaklık, t ; zaman, r ve z koordinat eksenleridir. Çoğu araştırmacı, bu işlem

esnasındaki girdi enerjisinin birçok parçaya (işparçasına, elektrota, dielektrik sıvıya, talaşa vb.) ayrılışını % enerji dağılım (f_c) kabulü yaparak modellerini (Şekil 3.11) yakınsatmayı amaçlamışlardır [66, 67, 73, 78, 88, 93, 95, 98, 111].



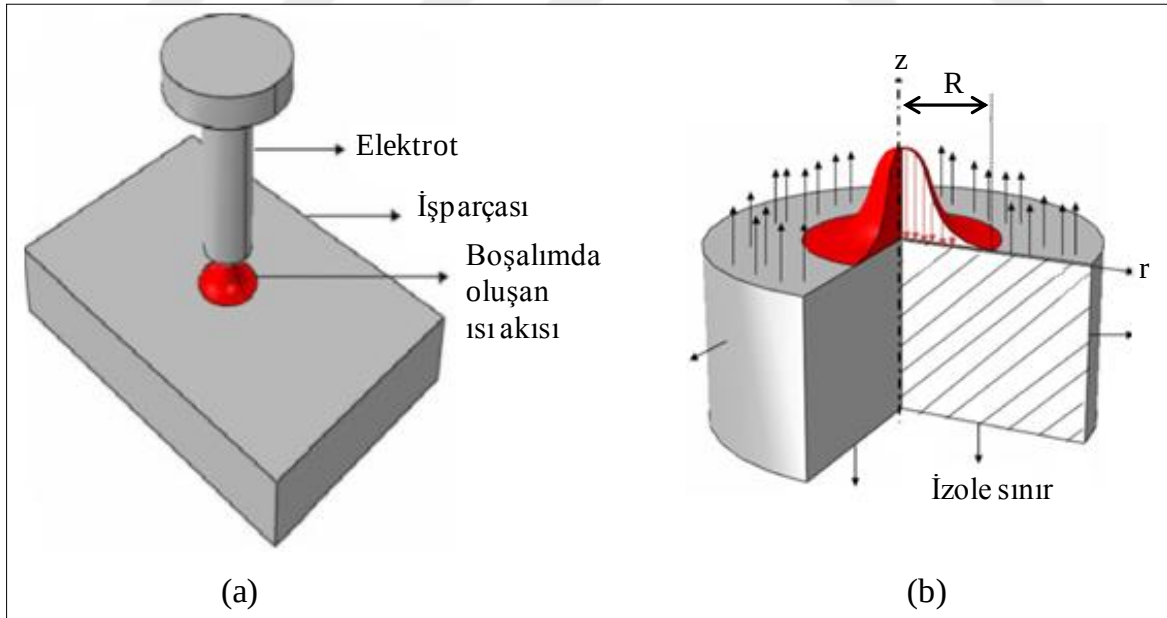
Şekil 3.10. Plazma kanalının şematik gösterimi [70]



Şekil 3.11. EEİ modellerinde enerji dağılımının şematik gösterimi [78]

Araştırmacılar, f_c katsayısını belirlerken herhangi bir ölçüm yapmadan tamamen model üzerinde basit denemeler yaparak elde ettikleri sonuçlardan faydalanmışlardır. Örneğin Zhang ve arkadaşları [67], yaptıkları çalışmada işparçasına aktarılan enerjinin %10 olduğunu ($f_c=0,1$) varsayarak modeli analiz etmeye başlamışlardır. Daha sonra çıkan analiz sonuçlarına göre f_c değerini 0,1-0,5 arasında farklı değerlerde denemişler ve en uygun değerin $f_c=0,44$ olduğuna karar vermişlerdir.

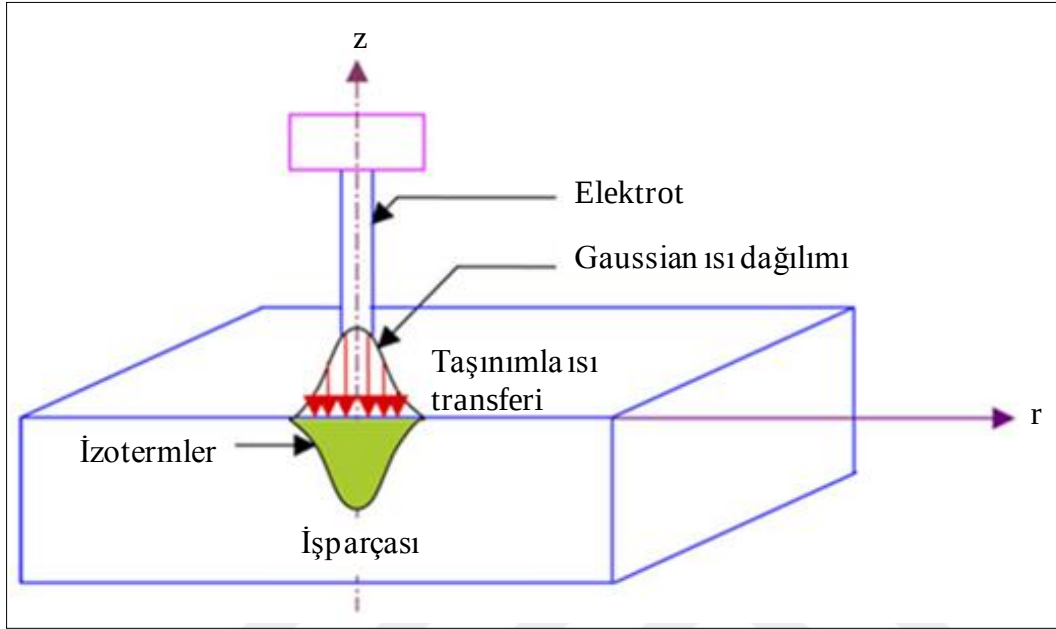
Uygulanan enerjinin tamamen ısı şeklinde iletileceği kabulünden sonra araştırmacılar, daha önce yaptıkları deneysel çalışmalardan, işparçasına iletilen bu ısı enerjisinin Gaussian dağılım fonksiyonuna uygunluk gösterdiğini tespit etmişlerdir. Bu tespitten sonra yapılan analiz çalışmalarının neredeyse çoğu, işparçasına aktarılan ısı enerjisi üzerine gerçekleşmiştir [73-82]. Çünkü EEİ'deki en önemli performans çıktısı: İİH değeridir. Literatürdeki mevcut modellerin [62-71, 73, 77, 78, 80, 81, 87, 88, 92, 93, 95, 97, 100, 101, 103, 104, 105, 107] neredeyse tamamında kullanılan Gaussian dağılımı (Şekil 3.12) elektrottan işparçasına şeklinde tanımlanmış ve Şekil 3.12.a'da kırmızı bölgeyle temsil edilmiştir.



Şekil 3.12. Modellerdeki Gaussian ısı dağılımı: a) genel görünüm, b) kesit görünüm [66]

Mevcut modellerde, sadece elektrot, ısı kanalı (plazma) ve işparçası vardır (Bkz. Şekil 3.12.a). Yani, EEİ esnasında dielektrik sıvı ortam ve işlemedeki gerçek rolü birçok çalışmada ihmal edilmiştir. Bu durum, EEİ'nin fiziğine oldukça aykırı gözükmemektedir. Bu

modellerde uygulanan ısı enerjisi, işparçası içerisinde r eksenine boyunca simetrik olarak yayılmaktadır. İşparçası içerisindeki bu yayılma, Şekil 3.13'te yeşil bölgeyle temsil edilmiştir [65].



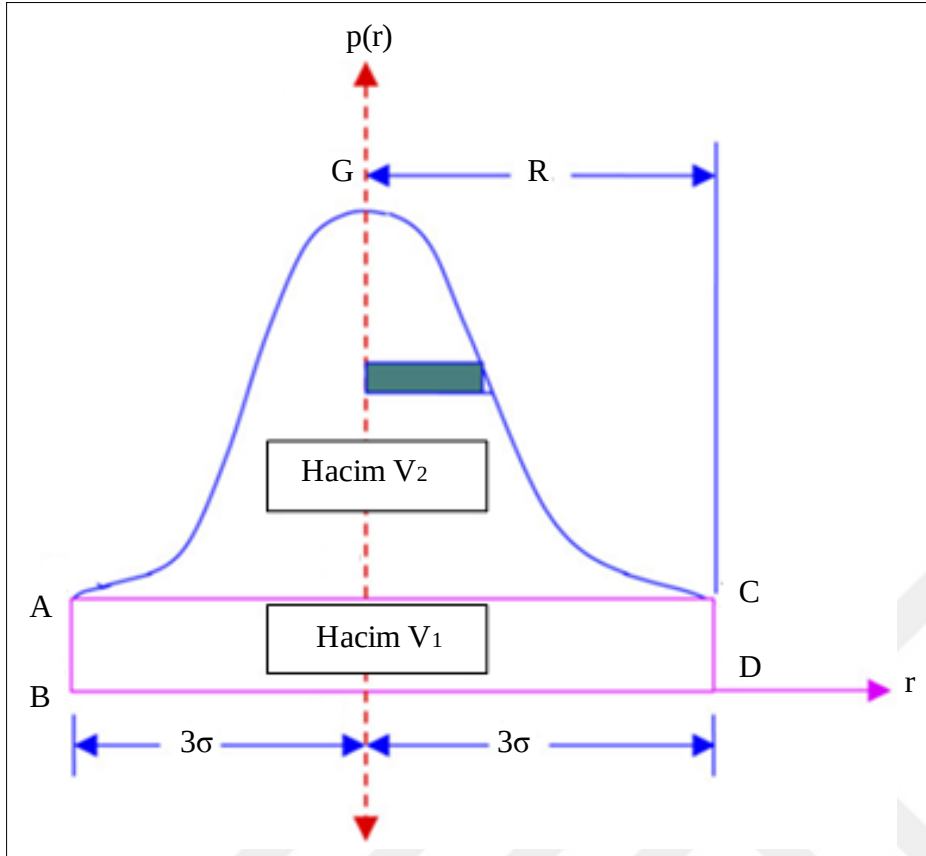
Şekil 3.13. Isı dağılımının işparçası içerisinde r eksenine göre ters simetrik dağılımı [65]

Matematiksel model için işparçasına iletilen bu ısı, silindirik koordinatta denklem olarak elde edilmesi SEA programları için gereklidir. Araştırmacıların çoğu benzer şekilde, analitik denklemlere belirli deneysel çalışmalar sonucunda ve/veya gözlemlerin/ölçümlerin sonucunda elde ettikleri anlamlı parametreleri bir çarpan şeklinde ekleyerek denklemleri, ampirik denklemler haline dönüştürmüşlerdir. Literatürde birçok model çalışmasında kullanılan Gaussian dağılımının tanımı ve Gaussian ısı dağılım denkleminin türetilmesi aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

Gaussian dağılımı; istatistik, biyoloji ve daha birçok alanda kullanılan, temeli olasılık yoğunluk fonksiyonuna (Eş. 3.8) dayanan bir dağılımdır (Şekil 3.14) [65].

$$p(r) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (3.8)$$

Eş. 3.8'deki $\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}$ terimi, dağılımın tepe noktası değeridir ve σ değeri ise standart sapmadır.



Şekil 3.14. Olasılık yoğunluk fonksiyonu [65]

Olasılık yoğunluk fonksiyonu, sonsuza gidilmediği sürece pratikte/matematiksel olarak asla sıfır değerine ulaşmaz. Burada; R'nin -3σ ve $+3\sigma$ değerinde $p(r)$ fonksiyonu Gaussian dağılımı adı verilen özel dağılım gösterir. $R=3\sigma$ için; Eş. 3.9 elde edilir.

$$p(r) = \frac{3}{\sqrt{2\pi}R} e^{-4,5\frac{r^2}{R^2}} \quad (3.9)$$

$r = 0$ 'da $p(r)=Q_0$ olur. Q_0 ; işparçası merkezine uygulanan maksimum ısı yoğunluğudur. r ekseninde işparçasına aktarılan ısı denklemi $Q_{w(r)}$ elde edilir (Eş. 3.10).

$$Q_w(r) = Q_0 e^{-4,5\frac{r^2}{R^2}} \quad (3.10)$$

İşparçası içerisindeki enerji durumu ise Eş. 3.10'un birim alan için integral alınmasıyla elde edilir (Eş. 3.11).

$$\begin{aligned}
\oint Q_w(r) dA &= \int_0^R Q_w(r) 2\pi r dr \\
&= \int_0^R Q_0 e^{-4,5 \frac{r^2}{R^2}} 2\pi r dr \\
&= -\frac{\pi R^2}{4,5} Q_0 e^{-4,5 \frac{r^2}{R^2}} \Big|_0^R \\
&= 0,2191\pi Q_0 R^2 \\
Q_w(r) &= 0,2191\pi Q_0 R^2
\end{aligned} \tag{3.11}$$

İşparçası içerisindeki enerji, uygulanan elektriksel güce/enerjiye ($E=V.I$) eşittir. Fakat burada, araştırmacılar tarafından EEİ yönteminde uygulanan elektriksel enerji (E) ifadesine % enerji dağılım faktörü dahil edilmesi düşünülmüştür (Eş. 3.12).

$$E = f_c VI \tag{3.12}$$

Eş. 3.12'de, f_c : işparçasına aktarılan % enerji dağılım faktörü, V ; boşalım voltajı ve I ; boşalım akımıdır. Eş. 3.11 ile Eş. 3.12 birbirine eşitlenirse Q_0 değeri elde edilir (Eş. 3.13).

$$\begin{aligned}
f_c VI &= 0,2191\pi Q_0 R^2 \\
Q_0 &= \frac{4,57 f_c VI}{\pi R^2}
\end{aligned} \tag{3.13}$$

Eş.3.10'da bulunan Q_0 değeri yerine Eş. 3.13'te bulunan değer yazılırsa en genel haldeki r ekseninde işparçasına aktarılan ısı denklemi $Q_w(r)$ elde edilir [65, 66] (Eş. 3.14).

$$Q_w(r) = \frac{4,57 f_c VI}{\pi R^2} e^{-4,5 \frac{r^2}{R^2}} \tag{3.14}$$

Literatürdeki birçok modelde, r 'ye bağlı işparçasına aktarılan ısı denklemi olarak Eş. 3.14 kullanılmıştır [62-71, 73, 77, 78, 80, 81, 87, 88, 92, 93, 95, 97, 100, 101, 103-105, 107]. Literatürde yer alan çalışmalarda ısı kaynağı noktasal olarak ifade edilen çalışmalar mevcuttur. Lakin, işparçası yüzeyinde noktasal ısı kaynağı yerine, akım ve vurum süresine bağlı olarak genişliği değişen bir ısı kaynağının [62, 63, 65, 67-70, 78, 80, 81, 87, 88, 92, 93, 95, 97, 98, 101, 103, 104, 107] plazma kanalı boyunca etkimesinin daha gerçekçi

sonuçlar verdiği birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir. Araştırmacılar, Eş. 3.14'te bulunan R değerleri yerine, zamana ve akıma bağlı plazma kanalı yarıçapı (R_{pc}) değerlerinin (Eş. 3.15) girilmesi daha düzgün sonuçlar verebildiğini yaptıkları analizlerle tespit etmişlerdir [62].

$$R_{pc} = K \cdot I^m \cdot t_{on}^n \quad (3.15)$$

Eş. 3.15'deki K ; sistem sabiti, I ; akım, t_{on} ; vurum süresi, m ; akım üst değeri ve n ; vurum süresi üst değeridir. Burada araştırmacılar, kendi modellerine uygun olan K , m ve n değerlerini almışlardır. Örneğin; Shabgard ve arkadaşları [63], yaptıkları çalışmada Eş. 3.15'i kullanmışlar ve $K=2,04 \times 10^{-3}$, $m=0,43$ ve $n=0,44$ alarak analizleri gerçekleştirmişlerdir. Son olarak Eş. 3.15, Eş. 3.14 içersindeki R değerleri yerine yazılırsa Eş. 3.16 elde edilir.

$$Q_w(r) = \frac{4,57 f_c V I}{\pi R_{pc}^2} e^{-4,5 \frac{r^2}{R_{pc}^2}} \quad (3.16)$$

Yapılan birçok ihmal ve varsayımdan sonra elde edilen r 'ye bağlı ısı denklemi (Eş. 3.16), literatürdeki çoğu model çalışmasının tek denklemi olarak yer almış ve EEİ teorisine açıklık getirmek için kullanılmıştır [62-71, 73, 77, 78, 80, 81, 87, 88, 92, 93, 95, 97, 100, 101, 103-105, 107].

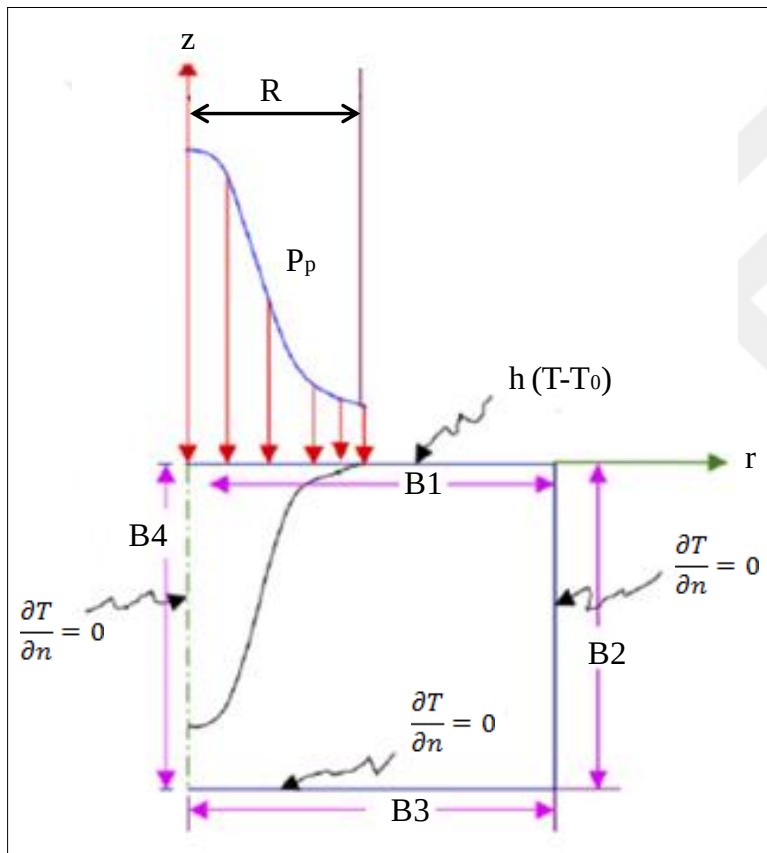
3.4.3. Mevcut EEİ modellerinin bilgisayar ortamındaki analizlerinde izlenen adımlar

EEİ modellerinde, plazma gücü (P_p) için Gaussian dağılımından elde edilen ısı iletim denklemi (Eş. 3.16) kullanılmıştır. Yani $P_p = Q_w(r)$ şeklinde ifade edilmiştir (Şekil 3.15). Araştırmacılar bu denklem içersindeki zamana ve akıma bağlı plazma yarıçapı (R_{pc}) ve % enerji dağılımı (f_c) değerlerinin modeli yakınsatacağını varsaymışlardır.

Mevcut EEİ modellerinde, işparçası ve elektrot içersindeki sıcaklık dağılımlarını elde edebilmek için silindirik koordinatlarda Fourier ısı iletim denklemi kullanılmıştır [62-71, 73, 77, 78, 80, 81, 87, 88, 92, 93, 95, 97, 100].

Uygun sınır şartları ve başlangıç şartlarıyla modeller tasarlanmıştır [62-71, 73, 77, 78, 80, 81, 87, 88, 92, 93, 95, 97, 100, 101, 103-105, 107]. Birçok araştırmacı, EEİ'de tek kıvılcım için ısı transferi modelini benzer sınır şartları ve başlangıç şartında tasarlamıştır (Şekil 3.15) [63, 65, 68, 69, 71, 87, 88, 92].

Model analizini basitleştirmek adına birçok araştırmacı, model geometrisindeki simetriden faydalanmış ve sınır şartları tanımlayacakları geometriyi küçültmüşlerdir [63, 65, 68, 69, 71, 87, 88, 92].



Şekil 3.15. EEİ'de tek kıvılcım için kullanılan ısı transferi modelinin şematik gösterimi [68]

EEİ modeli, z eksenine etrafında simetriktir. Plazma kanalının dışında kalan yüzeylerde ortamdaki dielektrik sıvı nedeniyle taşınım ile ısı transferi meydana gelir. Bu noktada, araştırmacılar dielektrik sıvı kavramına sadece B1 sınır şartında değinmişlerdir. Oysa ki dielektrik sıvı gerçekte, işparçasının çevresinde de bulunmakta ve bu sınırlarda işparçasının soğumasına yardımcı olmaktadır. Şekil 3.15'de görüldüğü üzere sınır şartları:

B1 sınırında

✓ Eğer $r = R$ 'ye kadar ise;

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = P_p = Q_{w(r)} \quad (3.17)$$

Eş. 3.17'de, $P_p = Q_{w(r)}$ plazma gücünü ve K ; işparçası ısı iletkenlik katsayısını belirtmektedir [62-71, 73, 77, 78, 80, 81, 87, 88, 92, 93, 95, 97, 100, 101, 103-105, 107].

✓ Eğer $r > R$ ise;

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = h(T - T_0) \quad (3.18)$$

Eş. 3.18'de, 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 ifade eder.

B2, B3 ve B4 sınırlarında

$$\frac{\partial T}{\partial n} = 0 \quad (3.19)$$

İlk şart

T_0 = Oda sıcaklığıdır.

EEİ'de ortam sıcaklığında bulunan elektrotlar, birkaç mikro saniyede oluşan plazmanın etkisiyle bölgesel olarak ergime ve buharlaşma sıcaklıklarına erişir. Her bir vurumdaki (boşalımdaki) plazma gücü (P_p) gücü $Q_{w(r)}$ 'den hesaplanır [80]. Hesaplanan P_p değeri, B1 sınırındaki denklemlerde (Eş. 3.18) yerine konularak (K , h ve T_0 bilindiği için) analiz programlarında basit integral işlemleriyle T değerleri elde edilir. Bu noktada bazı araştırmacılar modellerinde, plazma gücünü (P_p) hesaplamak yerine, direkt sabit plazma sıcaklığı (T_p) değeri yani ($P_p = T_p$) alarak sınır şartındaki diferansiyel denklemi daha basit

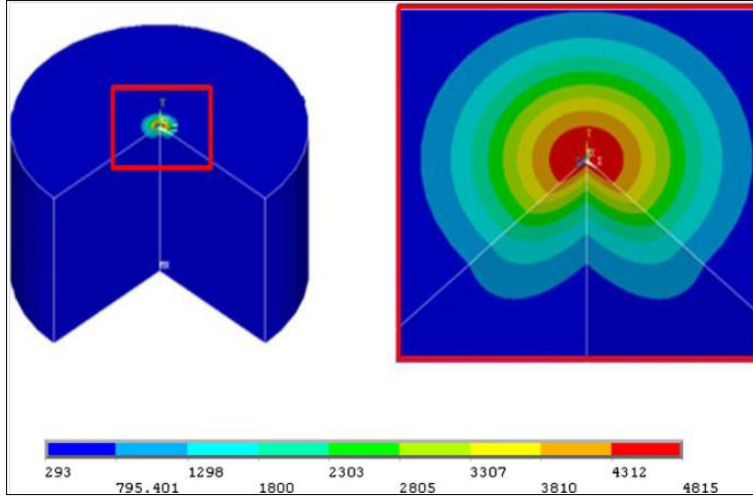
ele almışlardır. Örneğin; Sarıkavak ve Coğun [68, 69], plazma sıcaklığını (T_p); 3000, 5000, 8000 ve 10000 °C farklı sıcaklık değerleri kabul ederek modellerini analiz etmişlerdir.

Plazmada oluşan enerjinin bir kısmı dielektrik sıvı içerisinde kaybolmakta, bir kısmı anot ve bir kısmı da katot tarafından iletilmektedir. Bu noktada, literatürde EEİ'de enerji dağılımına açıklık getirmek için yapılmış çalışmalar [63, 65, 67-70, 75, 95, 98] da bulunmaktadır.

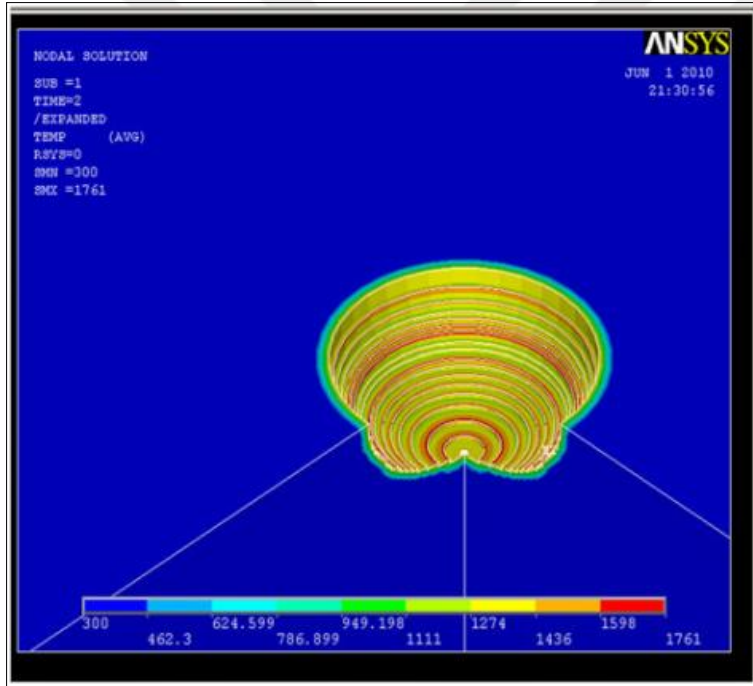
Literatürdeki bazı çalışmalarda [67-70, 78, 87, 88, 92], boşalım gücü ve vuruş süresi değerlerinin yüksek olması, işleme performansını artırdığı ve aktif olmayan kıvılcım sayısını (kısa devre) azalttığı belirtilmiştir. Yine birçok çalışmada [62, 63, 65, 67-70, 78, 80, 81, 87, 88, 92, 93, 95, 97, 98, 101, 103, 104, 107], EEİ'nin işleme mekanizmasında, dielektrik sıvı içerisinde bulunan, işparçası ve elektrot arasında oluşan plazma kanalında: elektrik enerjisinin tamamının ısı enerjisiye (ısı kaynağına) dönüştüğü varsayımı yapılmaktadır.

Son olarak araştırmacılar, problemlerine uygun üç boyutlu katı model parçalara elde ettikleri ampirik denklemleri, uygun sınır şartları tanımlayarak makul mesh kalitesinde ve eleman sayısında SEA yapan ANSYS [64-69, 71, 78, 80, 81, 85, 87, 89, 92, 93, 100-102, 105, 107, 108] veya COMSOL Multiphysics [70, 96] gibi kapsamlı programları kullanarak modellerinin analizini zamandan bağımsız (kararlı halde) şekilde gerçekleştirmişlerdir. İki boyutlu geometri için ANSYS programının kullanıldığı çalışmaların [56, 90] dışında Matlab [72, 74, 77, 88, 94, 104] ve ABAQUS [63, 103] gibi sayısal programlarında kullanıldığı çalışmalar da mevcuttur. Mevcut modellerde, SEA yapan ANSYS ve COMSOL gibi programların analiz sonuçlarından, işparçası içerisindeki sıcaklık dağılımları elde edilerek yorumlanmıştır (Şekil 3.16). Burada işparçası içerisindeki sıcaklık eğrilerinin işparçası malzemesinin erime sıcaklığını geçtiği bölgeler işaretlenerek [66, 87] SEA programı vasıtasıyla hacim (Şekil 3.17) hesaplatılmıştır [71]. Benzer hesaplamalar elektrot (takım) için de yapılmıştır.

Çoğu araştırmacı, krater geometrisi ve boyutları için SEA programlarını kullanmışlardır. Kraterin çapı, derinliği ve yarıçapı gibi boyutları program vasıtasıyla ölçmüşlerdir [90]. Yine, Zhang ve arkadaşları, krater geometrisini tanımlayarak yüzey pürüzlülüğü hakkında yorumlarda bulunmuşlardır [91].



Şekil 3.16. Model çalışmalarında elde edilen işparçasındaki sıcaklık eğrileri [66]



Şekil 3.17. EEİ modellerde kaldırılan hacmin hesaplanması [71]

3.4.4. Mevcut EEİ modellerinin kusurları

Bölüm 3.4.1 ve Bölüm 3.4.2'de mevcut modellerin özelliklerinin açıklamalarından yola çıkarak literatürdeki mevcut modellerin eksikleri özetlenirse; araştırmacılar tarafından EEİ yönteminin analizinin gerçekleştirilebilmesi adına kısmen makul olmayan ve işleme fiziğine aykırı kabuller yapılarak basitleştirilmiştir [62-117]. Araştırmacıların çoğu, EEİ'deki işleme mekanizmasını sadece katıdan katıya ısı transferi şeklinde düşünmüştür.

Hiçbir modelde dielektrik sıvı ve dielektrikte plazma fazı irdelenmemiştir. Modellerdeki kabuller, modeli gerçek işleme koşullarından oldukça uzaklaştırmaktadır. Hatta bazı analiz çalışmalarında, ısı kaynağı noktasal olarak tanımlanıp işparçası ve elektrotun birbirlerine temas ettirilmesi suretiyle ısı transferi gerçekleştirilmiştir. Oysa ki bu durum gerçek EEİ yöntemiyle örtüşmemekte ve işparçasıyla elektrot arasında işleme esnasında herhangi bir mekanik temasın bulunmadığı bilimsel gerçeğine aykırı düşmektedir.

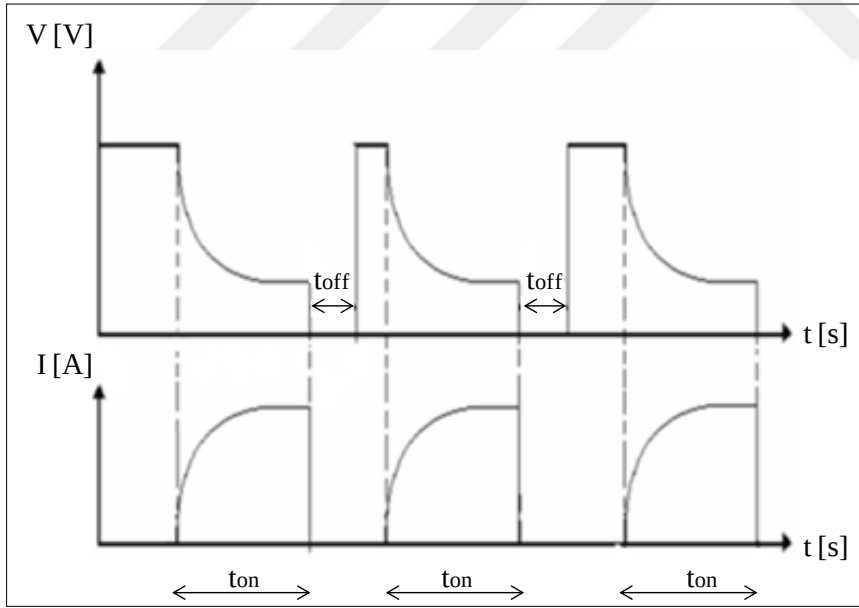
Yapılan incelemelerde görülen şu ki, araştırmacılar tasarladıkları modellerde: EEİ mekanizmasının sadece ısı etkisini ele alarak tek bir amprik denklem (Bkz. Eş. 3.16) kullanımından yola çıkılarak tüm EEİ teorisine açıklık getirilmeye çalışılmıştır [51-106]. Fakat, EEİ yöntemi, birden çok fiziksel olayın eş zamanlı gerçekleştiği karmaşık bir imalat şeklidir. EEİ'nin işleme mekanizmasında;

- ✓ Elektriksel ısınma (ing. joule heating) ile plazma oluşumu,
- ✓ Plazma ortamında (kanalı) oluşan elektriksel kıvılcımla elektrottan işparçasına ısı transferi,
- ✓ Elektromanyetizma,
- ✓ Taşınım ile ısı transferi (doğal konveksiyon),
- ✓ Radyasyon (ışınım) ile ısı transferi,
- ✓ Uygulanan akımın süresi kontrol edilerek soğuma ve işleme ortamı temizliği,
- ✓ Dielektrik sıvıda akış,
- ✓ EEİ esnasında işparçası yüzeyinde kaldırılan talaşın belirli bir miktarının tekrardan yüzeye katılması, gibi fiziksel olaylar ve daha fazlası mevcuttur.

Yapılan literatür araştırmasında [62-117], bu fiziksel olayları bir arada ve zamana bağlı (transient) şekilde inceleyen hiçbir analiz modeline (MFS modeline) rastlanılmamıştır. Diğer önemli bir husus da; mevcut EEİ modellerinde kullanılan akım ve gerilim değerleridir. Mevcut modellerde araştırmacılar, zamandan bağımsız sabit akım ve sabit gerilim değerleri kullanmışlardır. Lakin, pratikte bu durum böyle gerçekleşmemektedir. Akım kontrollü EEİ tezgahlarındaki mikro saniye düzeyinde çalışan elektronik anahtarlama sistemi vasıtasıyla prosesteki akım zamana bağlı olarak kontrol edilebilmektedir. Akım, istenen zaman aralığında uygulanabilmekte (vurum süresi (t_{on})) ve istenen zaman aralığında da kesilebilmektedir (bekleme süresi (t_{off})) (Şekil 3.18). Mevcut

analiz modellerinin hepsinde bu durum göz ardı edilerek EEİ'nin gerçek işleme koşullarından uzaklaşmıştır [62-117].

Ayrıca araştırmacılar, sabit akım ve sabit gerilim değerlerini kullanarak hesapladıkları elektriksel gücü ($E=V.I$), modellerinde ısı enerjisi olarak kullanmışlardır. Şekil 3.18'den de bu elektriksel enerjinin (E) araştırmacıların varsaydığı şekilde sürekli uygulanacak bir değer olamayacağı ve bekleme süresi boyunca (akım kesme) bu gücün sıfır değerinde olacağı anlaşılmaktadır. Aynı zamanda çoğu araştırmacı, bu işlem esnasındaki girdi enerjisinin birçok parçaya (işparçasına, elektrotta, dielektrik sıvıya, talaşa vb.) ayrılışını % enerji dağılım (f_c) kabulü yaparak modellerini yakınsatmayı amaçlamışlardır [66, 67, 73, 78, 88, 93, 95, 98, 111]. Araştırmacılar, modellerindeki % enerji dağılımı (f_c) katsayısını belirlerken herhangi bir ölçüm yapmadan tamamen model üzerinde basit denemelerle gerçekleştirmişlerdir. Günümüzde EEİ esnasında deneysel veri toplayabilmek halen oldukça güçken (işleme aralığının dar olması, yüksek sıcaklık vb.) enerji dağılımı için bu şekilde kabuller yapmak modellerin güvenilirliğine şüphe düşürmektedir.



Şekil 3.18. EEİ'de zamana bağlı akım ve gerilim değerleri [2]

Dikkat edilmesi gereken diğer önemli noktalar ise: literatürdeki tüm modellerde, dielektrik sıvının işleme performansına (kabuller hariç) gerçek anlamdaki etkilerinin göz ardı edilmesidir. Ayrıca, dielektrik sıvının ısıtılması sonucu ortaya çıkan plazma fazının oluşma fiziği hakkında açıklamalarda bulunulmamasıdır. Oysa ki, EEİ'de dielektrik sıvının

deiyonizasyonu ve plazma oluşumu en önemli mekanizmalarıdır. Çünkü işlemeyi gerçekleştirecek elektriksel kıvılcım bu iki önemli mekanizma sayesinde oluşabilmektedir.

Araştırmacıların çoğu, plazma ortamını (kanalını) silindir şeklinde bir ortam olarak düşünmüşlerdir. Bu silindirik ortamın yarıçapını ampirik bir denklemle ifade etmişler ve bu ortamdan sadece ısı transferi gerçekleştiğini ve plazmayı bir ısı kaynağı olarak kabul etmişlerdir. Fakat, araştırmacıların model çalışmalarında: ne plazmanın nasıl oluştuğu hakkında ne de plazmanın özellikleri (plazma sıcaklığı, basıncı vb.) hakkında açıklama yapılmıştır. Mevcut modellerinin tamamında, bu silindirik kanalın özellikleri (sıcaklığı, basıncı, elektrik iletkenliği vb.) karmaşık mekanizmasından dolayı incelenememiştir [62-117]. Dahası optik yayılım spektroskopi, yüksek hızlı CCD kameralar ve fiber optik kablolu mikro termokapullar vasıtasıyla plazma kanalının özelliklerini deneysel olarak inceleyen araştırmacılar [112-117] bile, bu bölge hakkında kesin hükümler vermekten kaçınmışlardır. Dielektrik sıvı kavramını modellerinde kullanan araştırmacılar ise; plazma kanalı içerisinde dielektrik sıvının etkisini yok kabul etmişlerdir. Plazma kanalı dışında ise: dielektrik sıvıya taşınım ile ısı transferi (Eş. 3.20) gerçekleştiğini (Bkz. Şekil 3.15) düşünerek:

$$q = h \cdot A_s (T_s - T_\infty) \quad (3.20)$$

analize diferansiyel denklem şeklinde Eş. 3.21'i:

$$K \frac{\partial T}{\partial z} = h \cdot (T_s - T_\infty) \quad (3.21)$$

eklemişlerdir. Bu kabul, olayın fizikine aykırı gözükmesine de Eş. 3.20 ve Eş. 3.21'deki 'h' ısı taşınım katsayısı; sıkıştırılabilir-sıkıştırılamaz akış tipinden, viskoz-viskoz olmayan akış tipinden, laminar-türbülanslı akış tipinden, dahili-harici akış tipinden ve en önemlisi sıcaklıktan etkilenmektedir. Çoğu araştırmacı, bu 'h' değerini sabit kabul ederek analizinin güvenilirliğini azaltmaktadır. Oysa ki, günümüz SEA programları, 'h' değerini sıcaklık gradyanlarından daha hassas hesaplanabilmektedir. Programların sağladığı bu imkandan faydalanılmamış olması bir eksiklik olarak değerlendirilmektedir.

Optik yayının spektroskopisi ve yüksek hızlı CCD kameralar vasıtasıyla yapılan çalışmalarda [109] araştırmacılar: oluşan plazmanın işleme bölgesinde geniş bir hacmi etkilediğini ve işlenmiş bölgelerde akkor hale gelmiş sıvı işparçasının, işleme sonrasında bile ışımanın (radyasyonun) belirli bir süre devam ettiğini belirtmişlerdir. EEİ yönteminde radyasyon önemli bir mekanizma olmasına rağmen, hiçbir model çalışmasında radyasyonla ısı transferinin işlemeye etkisi araştırılmamıştır [62-117]. Yine, EEİ yönteminde işleme performansına önemli etkileri olan işparçası-elektrot arası mesafe (işleme aralığı) parametresi mevcut modellerde analize dahil edilmemiştir. Bu çalışmalarda, işleme aralığının sadece öneminden bahsedilmiştir. Son olarak da literatürdeki modellerde: işparçası ve elektrot malzemelerinin sıcaklığa bağlı fiziksel özellikleri (C_p , k , σ) göz ardı edilmiştir. Ayrıca, EEİ'nin işleme mekanizmasında bulunan yüzeyde TKK kavramının, mevcut model çalışmalarında bulunmaması da eksiklik olarak görülebilir.

3.5. Termal Analiz

3.5.1. Termogravimetrik analiz (TGA)

TGA'da sistematik olarak arttırılan sıcaklık sonucunda, analiz edilecek numunenin (örnek) ağırlığında meydana gelecek olan değişiklikler, sıcaklığın veya zamanın fonksiyonu olarak ifade edilir. Termogravimetrik analiz cihazı, hassas bir terazi, fırın, sıcaklık kontrol cihazı, programlayıcı ve bir kaydediciden oluşmaktadır. Kaydedici, numune ağırlığının sıcaklığa karşı grafiğini çizer [152].

3.5.2. Diferansiyel termal analiz (DTA)

DTA'da, numuneyle bir referans bileşik arasındaki sıcaklık farkı ölçülerek sistemin absorbladığı (içine aldığı) veya emitlediği (açığa verdiği) ısı gözlenir. Analizde: sistem ve referansın sıcaklıkları sabit bir hızda artırılır. Numune ve referans arasındaki sıcaklık farkı, sıcaklığın fonksiyonu olarak elde edilir. DTA, TGA sistemine benzer bir sistemdir. Başlangıçta tartılmış numune ve referans bileşik, küçük kapsüller içerisine yerleştirilir. Sisteme bağlı olan programlayıcı, fırının sıcaklığının doğrusal bir hızla yükselmesini kontrol eder. Numune ve referans termokupları birbirlerine seri olarak bağlanırlar. Numune ve referansın arasındaki sıcaklık farkından bir akım oluşur ve programlayıcı vasıtasıyla değişim algılanıp ağırlık farkı-sıcaklık grafiği çizilir [152].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

EEİ parametreleri (boşalım akımı, vurum süresi, bekleme süresi, polarite vb.) performans çıktılarını (İİH, EAH, R_a ve yüzey topoğrafyası) doğrudan etkileyen parametreler oldukları için bu çalışmada, EEİ parametrelerinin değiştirilmesiyle performans çıktıları üzerinde oluşacak etkilerin görülmesinden ziyade farklı toz derişim oranlarıyla oluşturulan silikon yağı karışımların işleme performansı açısından uygunluğunun araştırılması amaçlanmıştır. Yani, silikon yağına yapılan karbon ve nişasta tozlarının hangi derişim oranında en iyi sonuçları verebileceği, silikon yağının ısıtmanın ve elektrotu döndürmenin çıktı performansları üzerine etkileri araştırılması hedeflenmiştir.

Bunlara ilaveten çalışmada, özellikle silikon yağına yapılacak nişasta tozu katkısının delik yüzeylerindeki parlatma etkisinin görülmesi de amaçlanmıştır. Bu parlatma etkisinin 50 A gibi boşalım akımı ve 1600 μ s gibi vurum süresiyle gözlemlenmesinin neredeyse imkansız olacağı düşünülmüştür. Çünkü bu değerlerde yapılacak işlemlerde oldukça kaba ve yanmış yüzeyler elde edileceği kaçınılmazdır. Diğer taraftan 1,5 A boşalım akımı ve 3 μ s vurum süresiyle hassas ve düşük R_a değerine sahip yüzeyler elde edilebileceğine rağmen oldukça düşük İİH ve oldukça yüksek EAH değerleri elde edilmesi kaçınılmazdır. Bu hususlar ve literatürdeki benzer çalışmalardaki performans çıktıları [153, 154] göz önünde bulundurularak, çalışmada EEİ parametreleri sabit olarak: 3 A boşalım akımı, 25 μ s vurum süresi ve 50 μ s bekleme süresi olarak alınmıştır.

Çalışmada, farklı toz derişim oranlarıyla oluşturulan silikon yağı karışımların işleme performansı açısından incelenmesi temel amaç olduğu için dielektrik püskürtme basıncı ve elektrot döndürme hızı parametrelerinin sabit değerler alınması düşünülmüştür. Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmalarında [16, 153], 100 bar püskürtme basıncıyla deiyonize su kullanılarak ortası delik 2 mm'lik elektrotlarla Ti6Al4V ve IN718 işparçalarına işlemler yapıldığı belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılan silikon yağının gerek kıvamı ve gerekse ER özellikleri göz önünde bulundurulduğunda püskürtme basıncının 100 bar daha yüksek değerde olması gerektiği düşünülmüştür. Bundan dolayı çalışmada, silikon yağının ve kıyaslama yapılacak diğer dielektriğin (suyun) püskürtme basıncı 140 bar olarak kabul edilmiştir. Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasında [154], farklı hızlarda (200, 400 ve 600 dev/dak) dönen elektrotların işleme performansına çok büyük etkiler oluşturmadığı

(elektrot hızında her 200 dev/dak'lık artış, İİH'de yaklaşık %16'lık artış sağlamakta) tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada, dönmeyen ve maksimum hızda dönen (deney sistemi maksimum 1000 dev/dak ile dönebilmekte) elektrotlar arasındaki ara hız değerlerinin araştırılması gerek görülmemiştir. Temelde, elektrotun maksimum hızda dönmesinin ve dönmemesinin performans çıktıları açısından ne gibi etkiler oluşturacağını araştırılması amaçlanmıştır.

Isıtma olmayan (ısıtıcı rezistans açılmadan) işleme deneylerinin oda sıcaklığında (25 °C) yapılacağı ve EEİ'nin başlamasından sonra işlemeden dolayı dielektrik sıcaklığının kendiliğinden yaklaşık 3-5 °C daha artacağı dikkate alınarak, ısıtma olmayan işlemede dielektrik sıcaklığı 30 °C kabul edilmiştir. Deneysel çalışmalarda da, ısıtma yapılmayan dielektriklerin sıcaklıkları 28-30 °C olarak ölçülmüştür. Isıtma yapılarak dielektriğin hangi sıcaklığa getirileceğine karar verirken, insan ve çevre sağlığı için risk oluşturmayacak bir değerde olması ve sıcaklık artışıyla viskozite değerinin akış için uygun konuma getirilmesi göz önünde bulundurularak 75 °C olması öngörülmüştür.

Silikon yağı içerisine yapılacak toz katkıları belirlenirken benzer çalışmalardan faydalanılarak karbon tozu katkısının 10 ve 15 (g/lt) olması ve nişasta tozu için 15 ve 30 (g/lt) olması düşünülmüştür [29, 44].

Ayrıca çalışmada, silikon yağının işleme performansı etkilerinin daha rahat anlaşılabilmesi adına EEİ delik delme endüstrisinde çok tercih edilen suyla performans çıktılarının kıyaslanması düşünülmüştür. Böylelikle silikon yağının EEİ delik delme işlemi için uygunluğunun sınanması amaçlanmıştır.

Son olarak, EEİ parametrelerinin sabit tutulup silikon yağı ve karışımlarının EEİ için uygunluğu belirlendikten sonra farklı EEİ parametreleriyle ilave deneysel çalışmalar yapılarak performans çıktıları üzerine etkilerinin de görülmesi düşünülmüştür.

4.1. Geliştirilmiş EEİ Tezgahı Sistemlerinin Tasarımı ve İmalatı

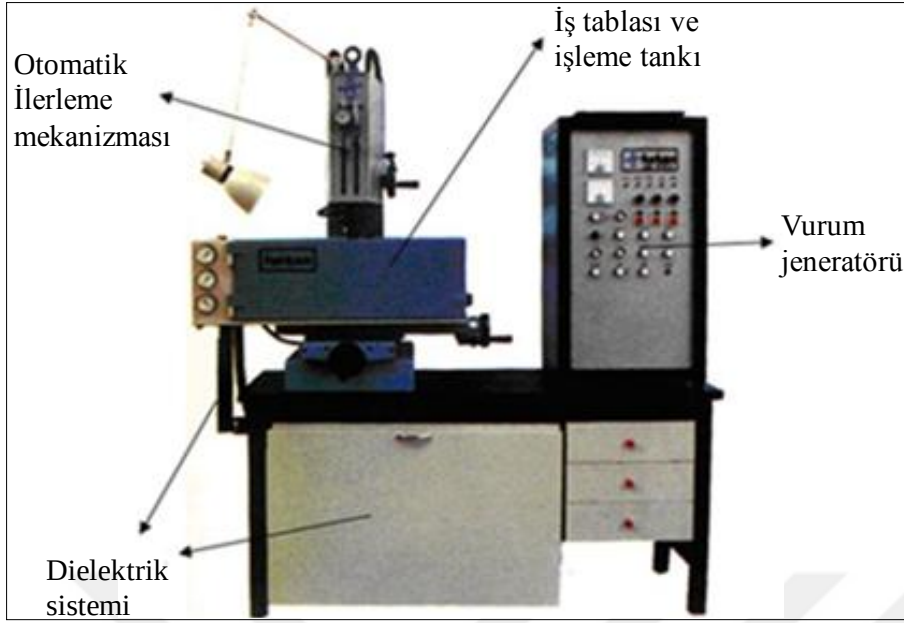
Deneysel çalışmalarda, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Takım Tezgahları Laboratuvarında bulunan FURKAN marka EDM M25A tipi endüstriyel elektro erozyon

tezgahı mevcut halinin üzerine yapılan ek sistemler vasıtasıyla kullanılmıştır (Şekil 4.1). Tezgaha ait teknik özellikler Çizelge 4.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1. Furkan EDM M25A tezgahının teknik özellikleri [29]

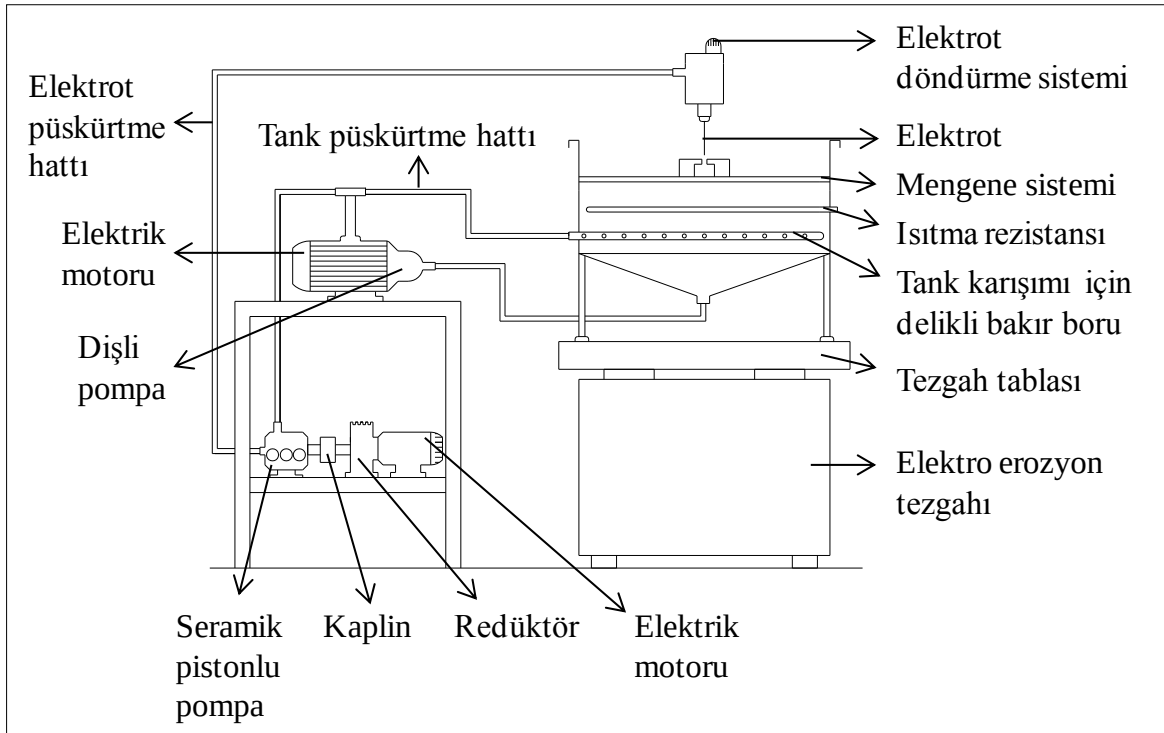
Vurum Jeneratörü	
Maksimum çalışma akımı	25 A
Maksimum talaş kaldırma (%20 Aşınma)	Grafit (-) / Çelik (+) iken, 350 mm ³ /dak.
Güç seviyesi kademeleri	1/16 (1,5A), 1/8 (3A), 1/4 (6A), 1/2 (12A), 1 (25A)
Minimum elektrot aşınması	%0,5
Makine Gövdesi	
İş tablası ölçüleri (XxY)	550 x 250 mm
Tabla hareket ölçüleri (XxY)	300 x 200 mm
Tabla kızakları	Tümüyle taşlanmış kırlangıç yataklı, konik kamalı
Tabla hareket mekanizması	Trapez vidalı, elle kontrol
İşleme tankı (XxYxZ)	860 x 470 x 280 mm
Maksimum işparçası ölçüleri (XxYxZ)	660 x 410 x 200 mm
Z Eksen	
Hareket kursu	160 mm
Okuma hassasiyeti	0,01 mm
Kaba hareket kızıağı	Tümüyle taşlanmış kırlangıç yataklı
Kaba hareket mekanizması	Trapez vidalı, elle kontrol

Deneysel düzeneğinin kurulmasından önce, imalat sanayinde kullanılan EEİ tezgahları ve klasik EEİ delik delme tezgahları incelenmiş ve bu çalışmanın taleplerini karşılayacak ilave aparatlar ve sistemler tespit edilmiştir. Tasarım aşamasında, literatürdeki EEİ’de ortasından dielektrik püskürten döner elektrotla yapılmış delik delme çalışmaları [153-158] incelenerek bu çalışma arasında paralellikler sağlanmıştır. Fakat dielektriğin ısıtılmasıyla ilgili çalışmaya rastlanılmamıştır. Ayrıca, dielektrik içerisine katılan tozların işleme esnasında karıştırılmasıyla ilgili çalışmaların da oldukça sınırlı oldu tespit edilmiştir.



Şekil 4.1. Furkan EDM M25A elektro erozyon tezgahı [29]

Bu çalışma için kullanılacak elektro erozyon tezgahının mevcut sistemleri (tank, karıştırma sistemi vb.) deneysel çalışmalarda istenen koşulları sağlayamayacağı çalışma öncesinde tespit edilmiştir. Bu gereksinimler göz önüne alınarak geliştirilmiş EEİ tezgahı tasarlanmış (Şekil 4.2) ve imalatı gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.3).



Şekil 4.2. Geliştirilmiş EEİ tezgahı ve deney sisteminin şematik gösterimi



Şekil 4.3. Geliştirilmiş EEİ tezgahı (GEEİT)

Deneysel çalışmalarda kullanılacak GEEİT üç alt sistemden oluşmaktadır. Bunlar; dielektrik tank sistemi, dielektrik tank ısıtması ve sıcaklık ölçüm ünitesi ve takım döndürme sistemidir.

4.1.1. Dielektrik tank sistemi tasarımı ve imalatı

Tezgahın mevcut tank sistemi çalışmada hedeflenen dielektrik sıvının sıcaklığının kontrol edilmesinin yanı sıra içerisine katılacak karbon ve nişasta tozlarının homojen şekilde karıştırılmasını sağlayacak nitelikte olmadığı görülmüştür. Bu gereksinimler göz önüne alınarak dielektrik tank sistemini üç alt bölüme ayrılarak tasarlanmış ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Bunlar; tank gövdesi, tank dielektrik sıvı karıştırma ünitesi ve iş parçası bağlama (mengene) sistemidir.

Tank gövdesi

Yeni üretilecek tankın, tezgahın mevcut tankı üzerine modüler şekilde konumlandırılmasına karar verilmiştir. Bu durumda mevcut tankın ölçüleri sınırlayıcı

olmuştur. Yeni tankın eni; 700 mm, boyu; 400 mm ve yüksekliği; 400 mm'dir. Dielektrik sıvının deneyler esnasında hızlı ısınma probleminin önüne geçmek için tank, mümkün olabilecek en büyük hacimde tasarlanmıştır (EK-1). İşleme deneyleri sırasında beklenen diğer bir problem ise; dielektrik sıvı içerisine katılan tozların (karbon, nişasta) tank dibine çökmesi ve dielektrik sıvı içerisinde homojen olarak dağılamamasıdır. Bu problemi en aza indirmek için tankın taban kısmına aşağıya doğru koniklik verilmiş ve dielektrik sıvının tank içinden emişinin taban düzleminin orta noktasından yapılması sağlanmıştır. Tasarlanan tankın hacmi yaklaşık 56 lt dir. Deneylerde kullanılacak dielektrik sıvı sıcaklığının 25-95 °C'de olması, tankın kimyasal ve fiziksel etkilere maruz kalacak olması ve tank imalatı sırasında gerekli bükme ve kaynak işlemleri nedeniyle üretilcek tank malzemesinin 2 mm kalınlığında 304 paslanmaz çelik sac olmasına karar verilmiştir.

Tezgah başlığıyla (kafasıyla) tablası arasındaki mesafe yaklaşık 450 mm'dir (başlık en üst pozisyonda iken). Tankın tam yatayda yerleştirilebilmesi için tankın ayakları ayarlı (somun-cıvata ayak) olarak tasarlanmıştır (EK-2). Tankın 2 mm kalınlığındaki paslanmaz sac levhaları, lazerle kesilmiş ve argon kaynağıyla birleştirilmiştir. İmal edilen tank, tezgah üzerine yerleştirilerek gerekli denge ayarları su terazisi yardımıyla yapılmıştır (Şekil 4.4.a). Tabladaki eğim farklılıkları krom ayaklar sayesinde giderilmiş ve işleme için gerekli olan düzlemsellik sağlanmıştır (Şekil 4.4.b).



Şekil 4.4. Dielektrik tankı: a) tank gövdesi, b) tank ayakları ve konik tabanı

Tank dielektrik sıvı karıştırma ünitesi

Bu çalışmada, geleneksel EEİ tezgahlarındaki nozul görevini döner elektrot üstlenmektedir. Çalışmada, elektrot kendi ekseninde dönmekte ve ortasından basınçlı dielektrik sıvı püskürtülmektedir. Geleneksel EEİ’de işleme ortamına nozul yardımıyla dışarıdan dielektrik sıvı püskürtme dengeli (stabil) bir işleme için yeterlidir. Ancak, bu projede yapılacak deneysel çalışmalar için tek başına bu uygulama yetersiz kalacaktır. Bunun nedeni ise geleneksel EEİ’den farklı olarak dielektrik sıvı içerisine işleme performansına ve yüzey kalitesine etki edecek toz katkılarının (karbon, nişasta) yapılacak olmasıdır. Toz katkılı dielektrik sıvının, mümkün olduğunca homojen şekilde işleme ortamına yollanması gerekmektedir. Çözüm olarak tank içerisine döşenmiş kapalı döngü delikli boru ağ sisteminden (DBAS) dielektrik sıvının püskürtülmesi ve ortamda jakuzi benzeri bir etkinin yaratılması düşünülmüştür. Yapılan malzeme araştırmasında, 15 mm çapta olan borular içerisinde bir tek bakır boruların bağlantı (ing. fittings) elemanlarının mevcut olduğu tespit edildiğinden karıştırma ünitesinin borularının 15 mm çapta bakır boru olmasına karar verilmiş ve DBAS tasarlanmıştır (EK-3). Karıştırma ünitesi için dört adet 90 derecelik dirsek, dokuz adet T bağlantısı, 3 metre 15 mm çapında bakır boru ve altı adet gümüş kaynak teli kullanılmıştır. Bakır borular üzerine delinecek deliklerin sayısı, çapı ve hangi aralıklarla delineceğine karar verilirken basit bir hesap (Eş. 4.1) yapılmıştır.

G.K.A; Giren kesit alan

Ç.K.A; Çıkan kesit alan

$$G.K.A \geq \text{Ç.K.A}$$

$$\pi \cdot r^2 \geq \pi \cdot r^2 \cdot n \quad (4.1)$$

Burada sıvının girdiği kesit alan, çıktığı kesit alandan küçük eşit olmalıdır. n toplam delik sayısıdır. Dielektrik sıvı giriş çapı 15 mm ve çıkan çap (delinecek delik çapı) 1 mm olduğunda;

$$\pi \cdot 7,5^2 \geq \pi \cdot 0,5^2 \cdot n$$

$$n \leq 225$$

bulunur. Bu veriler ışığında kenarlardaki borularda 25 mm aralıklar ve 120 derecelik açılarla üçer delik, ortadaki borularda 50 mm aralıklarla ve 90 derecelik açılarla dörder

adet delik açılmıştır. Toplamda 164 adet (1 mm çapında) delik delinerek kapalı döngü delikli bakır boru ağı oluşturulmuştur (Şekil 4.5).

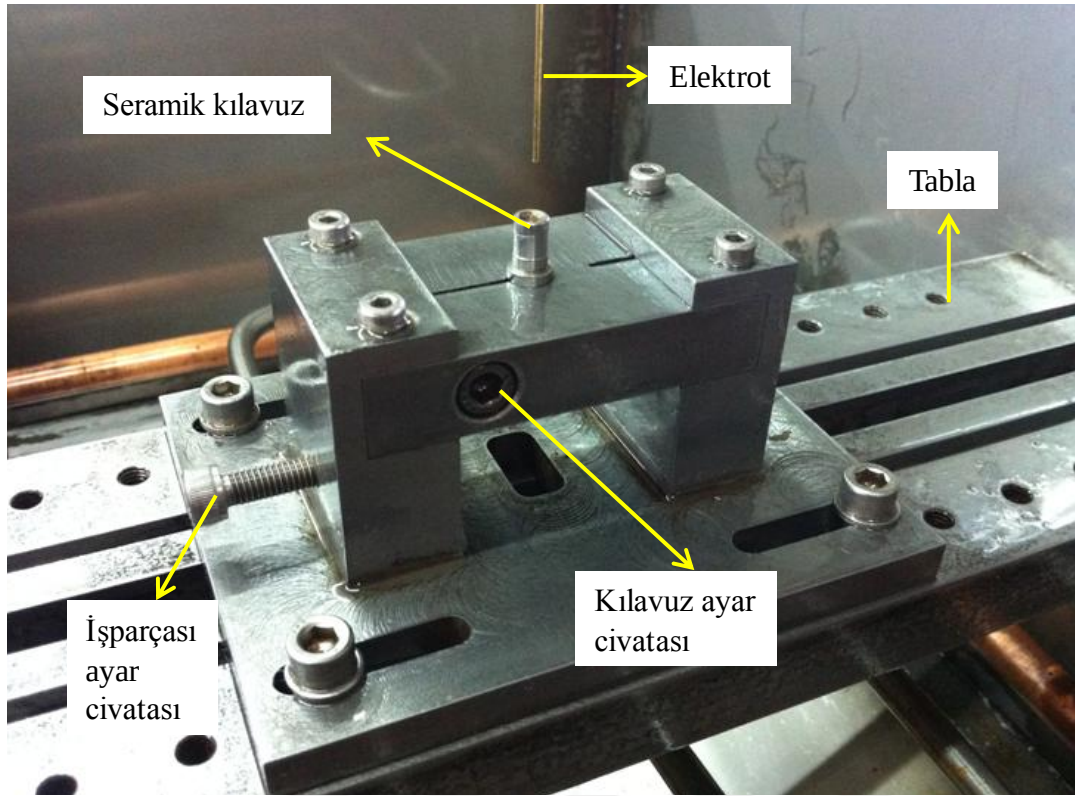


Şekil 4.5. Tank içerisindeki delikli boru ağı sistemi (DBAS)

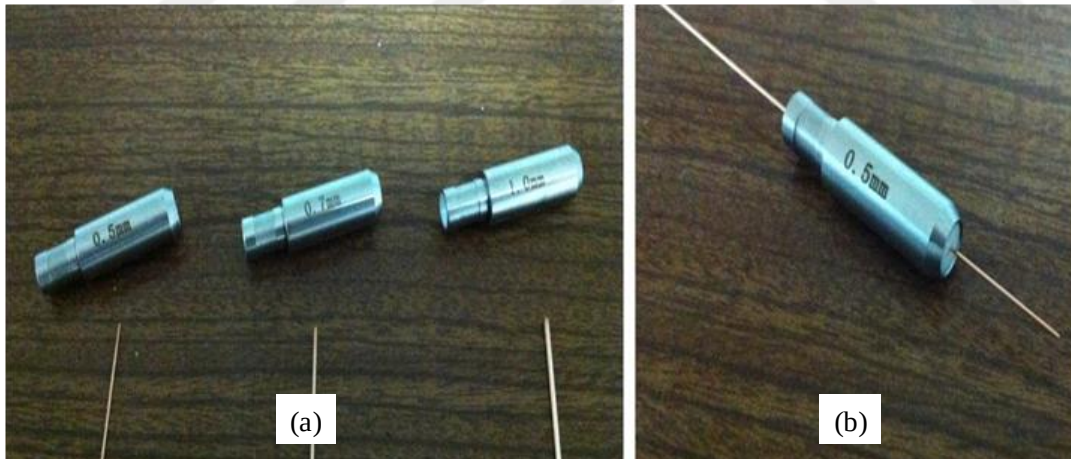
Mengene (işparçası bağlama) sistemi

Deneysel çalışmalar sırasında işparçasının hızlı şekilde sökülüp-takılmasına olanak sağlayacak bir mekanizması olan ve seramik kılavuzu üzerinde taşıyabilecek bir mengene sistemi tasarlanmıştır (EK-4). Mengene sistemi; mengene tablası, mengene kafası ve seramik kılavuz tableti olmak üzere üç parçadan meydana gelmektedir (Şekil 4.6). Bunlar;

- ✓ Mengene tablası; mengene kafasını ve seramik kılavuz tabletini taşıyan parçadır.
- ✓ Mengene kafası; mengene kafasındaki mengene çeneleri sabit olacak şekilde üretilmiş ve parça sıkıştırma işlemi bir cıvata yardımıyla yapılmıştır. Ayrıca, seramik kılavuz tabletinin gireceği kanallar, mengene çeneleri üzerine açılmıştır.
- ✓ Seramik kılavuz tableti; yapılacak deneysel çalışmalarda, farklı çaplarda elektrotlar ve bu nedenle farklı çaplarda seramik kılavuz kullanılmıştır. Seramik kılavuzların dış gömlekleri çelik ve 8 mm çapındadır. Kılavuzların dış gömlekleri tüm ölçülerde standarttır (8 mm). Bu çalışmada 1,0 ve 2,0 mm çaplarda seramik kılavuzlar kullanılmıştır (Şekil 4.7). Seramik kılavuz tableti, seramik kılavuzların tutulmasında kullanılmıştır.



Şekil 4.6. Mengene sistemi



Şekil 4.7. Seramik kılavuzlar: a) farklı iç çaplardaki, b) içerisinde elektrot olan hali

4.1.2. Dielektrik tank ısıtması ve sıcaklık ölçüm ünitesi tasarımı ve imalatı

Isıtma ve sıcaklık kontrol ünitesinin (ISKÜ) görevi, dielektrik sıvı sıcaklığını kontrol etmek ve tüm sistemin tek merkezden kontrolünü sağlamaktır. ISKÜ; rezistans, termokapıl, sıcaklık kontrol cihazı ve kontrol panosundan oluşmaktadır.

Rezistans

Yaklaşık 56 lt olan tank içerisindeki dielektrik sıvıyı (silikon yağı) ısıtmak için gereken rezistansın hesaplanmasında aşağıdaki analizden (Eş. 4.2) [159] faydalanılmıştır.

$$\dot{Q} = \frac{m.c.\Delta T}{dt} \quad (4.2)$$

$$d_{\text{silikon}} = 0,920 \text{ g/cm}^3 \text{ 25 } ^\circ\text{C'de}$$

$$c_{\text{silikon}} = 1,150 \text{ kJ/kg.K 25 } ^\circ\text{C'de}$$

$$V_{\text{silikon}} = 56 \text{ lt} = 56000 \text{ cm}^3$$

$$m_{\text{silikon}} = d_{\text{silikon}} \cdot V_{\text{silikon}}$$

$$m_{\text{silikon}} = 0,920 \cdot 56000 = 51,5 \text{ kg}$$

Elde edilen değerler Eş. 4.2'de yerlerine konursa;

$$\dot{Q} = \frac{51,5 \text{ kg} \cdot 1,15 \text{ kJ/kg.K} \cdot 274 \text{ K}}{1 \text{ hr}}$$

$$\dot{Q} = 16227,7 \text{ kJ/hr}$$

$$\dot{Q} = 4507,7 \text{ W} \cong 4,5 \text{ kW}$$

Çevresel ısı kayıpları ve diğer etkenlerde göz önüne alınarak kullanılacak rezistansın 4,6 kW olmasına karar verilmiştir. Metal kılıf içerisinde, boyu tankın her yerine yayılacak şekilde hesaplanmış ve monte edilmiştir. Rezistansın tank içerisine montajında, sızdırmazlık elemanları olarak kağıt conta (klingirik conta) kullanılmıştır. Rezistans, mümkün olduğunca mengene sistemine yakın fakat termokapıl'dan uzak bölgeye monte edilmiştir.

Termokapıl

Dielektrik sıvısının sıcaklığını (25-95 °C) algılamayla görevli olup dielektrik sıvı içerisinde çalışacaktır. ISKÜ'de Elimko PT100 tipi termokapıl kullanılmıştır. Termokapılın tank içerisindeki sızdırmazlığı bakır contayla sağlanmıştır. Termokapılın tank içerisindeki yerine karar verilme aşamasında işleme bölgesiyle aynı dielektrik seviyesinde olmasına göz önünde bulundurulmuştur. (Şekil 4.8).



Şekil 4.8. Elimko PT100 termokapılın: a) tank dışı görünüşü, b) tank içi görünüşü

Sıcaklık kontrol cihazı

Termokapıl'dan gelen sıcaklık datasını bünyesinde değerlendirerek ayarlanan (ing. set) sıcaklığa göre rezistansa akım gönderen kontrol cihazıdır (Elimko 2000M tipi ($\pm 0,5$ °C)).

Kontrol panosu

Tüm sistemi kontrol etmek için piyano tipi elektrik panosu imal ettirilmiştir (EK-5). İSKÜ'nün kontrolünün yanı sıra dielektrik sıvının sirkülasyonunu sağlayacak devirdaim pompasının, basınç başlığındaki pistonlu pompanın ve takım döndürme amaçlı d.c elektrik motorunun kontrolünü de sağlar.

4.1.3. Takım döndürme sistemi ünitesi tasarımı ve imalatı

Tank içi hızlı dolaşımın yüksek debili bir dişli pompa, yüksek basınçlı püskürtmenin ise seramik pistonlu bir pompayla sağlanmasına karar verilmiştir. Elektrotun kendi ekseninde dönme hareketi basınç başlığı sistemi adı verilen bir üniteyle sağlanmıştır. Takım döndürme sistem ünitesi; dielektrik sıvı kontrol sistemi ve basınç başlığı sistemi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

Dielektrik sıvı kontrol sistemi

Sistemde dolaşacak dielektrik sıvısının gereken debi ve basınç ayarlarının yapılacağı sistemdir. Dielektrik sıvı kontrol sistemi devirdaim pompası, pistonlu pompa, elektrik motoru ve redüktör, dolaşım boruları, küresel vanalar, manometreler ve buhar hortumları gibi bileşenlerden oluşmaktadır. Aşağıda sunulan sistem bileşenleri tedarik edilmiş ve sistem sehpa üzerinde bir araya getirilmiştir;

- ✓ Devirdaim pompası; 1 beygir gücünde, 62 lt/dak debiye sahip WATER marka dişli pompa kullanılmıştır. Bu pompa hem tank içerisindeki dielektrik sıvısının döngüsünü hem de pistonlu pompanın dielektrik sıvısını sağlamaktadır. Dişli pompalar genellikle yüksek debi değerlerine sahip iken düşük basınç değerleri üretmektedir. Tüm sistemin sirkülasyonu için dişli pompa tercih edilmiştir.
- ✓ Pistonlu pompa; basınç başlığına sağlanacak basınçlı dielektrik sıvı için SUTEMPump SP 1420 marka seramik pistonlu pompa kullanılmıştır. 200 bar basınca kadar dielektrik sıvı sağlayabilmektedir. Üzerindeki by-pass mekanizmasıyla güvenli çalışma sağlamak ve ayar vanasıyla basıncı ayarlanabilmektedir (EK-6).
- ✓ Elektrik motoru ve redüktör; pistonlu pompanın sürülebilmesi için kullanılmıştır. 0,37 kW VOLT marka elektrik motoru 147 devir/dak çıkış devri olan YILMAZ redüktöre bağlanmıştır. Redüktörün çıkış mili bir kaplin vasıtasıyla pistonlu pompaya bağlanmıştır (EK-7).
- ✓ Sehpa imalatı; Dielektrik sıvı kontrol sisteminin bileşenlerini bir araya toplamak için sehpa imal edilmiştir (EK-8).

Basınç başlığı sistemi

İçerisinden dielektrik sıvı geçecek elektrotu tutacak ve kendi ekseninde dönüş hareketini sağlayacak olan başlıktır. Yüksek basınca dayanıklı olması gereken ve tezgah kafasına monte edilebilecek basınç başlığı sisteminin teknik resmi oluşturulmuştur. Basınç başlığı sisteminde bulunan dc motorun devir kontrolü (servo) bir doğru akım güç kaynağı ile gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan basınç başlığı sistemi (EK-9) imal edilmiş ve elektro erozyon tezgahı başlığına üzerine monte edilmiştir (EK-10).

4.2. Malzemeler

4.2.1. İşparçaları

Deneylelerde işparçası olarak AISI4140 kalıp çeliği (Şekil 4.9) ve Ti6Al4V (Şekil 4.10) kullanılmıştır. AISI4140 çeliğinin kimyasal bileşimi Çizelge 4.2’de, mekanik özellikleri Çizelge 4.3’te, termal ve elektrik özellikleri ise Çizelge 4.4’te belirtilmiştir [160].

Çizelge 4.2. AISI4140 çeliğinin kimyasal bileşimi [160]

Element	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo
%	0,38-0,43	0,75-1,0	0,035	0,04	0,15-0,30	0,8-1,1	0,15-0,25

Çizelge 4.3. AISI4140 çeliğinin mekanik özellikleri [160]

Özellikler	Değer
Özgül ağırlık	7 700 [kg/m ³] (25°C’de)
Poisson oranı	0,27-0,30 (25°C’de)
Elastik modülü	190-210 [GPa] (25°C’de)
Çekme mukavemeti	655 [MPa]
Akma mukavemeti	417 [MPa]
Sertlik	197 [HB] (815 °C’de tavlanmış)

Çizelge 4.4. AISI4140 çeliğinin ısı ve elektrik özellikleri [160]

Özellikler	Değer
Termal genleşme	12,3x10 ⁻⁶ [1/°C]
Termal iletkenlik	42,7 [W/m-K]
Özgül ısı kapasitesi	473 [J/kg-K]
Elektrik direnci	222x10 ⁻⁹ [Ω-m]

AISI4140 çeliği 20x20 mm kare lama şeklinde satın alınmıştır. Daha sonra 40 mm’lik parçalar halinde kesilmiştir (Şekil 4.9.a). Kesilen her bir iş parçasının dört geniş yüzeyine

taşılama işlemi uygulanarak yüzeyler parlatılmış (Şekil 4.9.b) ve deneylere hazır hale getirilmiştir. Kesilen işparçaları yan yana getirilerek tank mengenesi yardımıyla birleştirilmektedir. Deneylerdeki elektro erozyonla işleme iki işparçası çiftinin ara yüzünde gerçekleştirilecektir.



Şekil 4.9. AISI4140 işparçaları: a) kesilmiş işparçaları, b) taşlanmış işparçaları



Şekil 4.10. Ti6Al4V (Grade 5) levhalar

4.2.2. Elektrotlar

Deneylerde kullanılan pirinç ve bakır elektrotlar 0,5-2 mm arasında değişik dış çaplarda ve 400 mm uzunluğundadır. Bu elektrotların ortası tek deliklidir. Pirinç ve bakır elektrotlar iyi elektrik iletkenliği, yüksek erime noktası, iyi ısı iletkenlik ve yüksek talaş kaldırma oranlarından dolayı EEİ'de en yaygın tercih edilen elektrot çeşitleridir. Pirinç [161] ve bakır [162] elektrotların teknik özellikleri Çizelge 4.5'de belirtilmiştir.

Çizelge 4.5. Pirinç ve bakır elektrotların özellikleri

Özellikler	Pirinç	Bakır
Molar kütle	321,398 [kg/k mol]	63,546 [kg/k mol]
Özgül ağırlığı	8470 [kg/m ³]	8960 [kg/m ³]
Ergime sıcaklığı	890-900 [°C]	1084 [°C]
Özgül ısı kapasitesi	380 [J/kg.K]	384,4 [J/kg-K]
Isıl iletkenliği	115 [W/m.K]	401 [W/m.K]
Elektrik iletkenliği	6,6 x 10 ⁻⁶ [ohm-cm]	1,724 x 10 ⁻⁶ [ohm-cm]
Elektrot şekli ve tipi	Silindirik tüp (ortası tek delik)	Silindirik tüp (ortası tek delik)
Elektrot dış çapı	2 [mm]	2 [mm]
Elektrot iç delik çapı	1,2 [mm]	1,2 [mm]

4.2.3. Dielektrik sıvı

Bu çalışmada dielektrik sıvı olarak silikon yağı ve su kullanılmıştır. Silikon yağının özellikleri Çizelge 4.6’da verilmiştir [163].

Çizelge 4.6. Silikon yağının özellikleri

Özellik	Değer
Kinematik Viskozite	350 mm ² /s
Dinamik Viskozite	340 mPa s
Viskozite-Sıcaklık Katsayısı	0,595
Yoğunluk	0,968 g/cm ³ 20 °C’de
Isı Genleşme Katsayısı	925 150 °C’de
Isı İletkenliği	0.15 50 °C’de
Parlama Noktası	>300 °C
Uçuculuk	<1,5 %

4.2.4. Karbon tozu ve nişasta tozu

Silikon yağı içerisine katılan karbon ve nişasta tozları Merck firması tarafından üretilmiştir. Karbon ve nişasta tozlarının teknik özellikleri Çizelge 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.7. Karbon ve nişasta tozlarının teknik özellikleri [163]

Özellik	Karbon tozu	Nişasta tozu
Ticari İsim/Tedarik	104206 Graphite/Merck Co.	101252 Starch/Merck Co.
Yoğunluk	2,2 g/cm ³	0,3 g/cm ³
Suda çözünürlük	12,01 g/mol, 20 °C suda	50 g/lt, 90 °C suda
pH değeri	5-6	6,0-7,5

4.3. Deney Parametreleri

Deneylerde kullanılan sabit ve değişken parametreler Çizelge 4.8’de verilmiştir. Bu çalışmada, EEİ’nin elektriksel parametreleri (boşalım akımı, vurum süresi, bekleme süresi vb.) ve silikon yağı uygulama basıncı sabit tutulmuştur. Silikon yağı içerisine katılan toz (karbon, nişasta) konsantrasyonları, silikon yağının sıcaklığı ve elektrot dönüş hızı değişken parametreler olarak kullanılmıştır.

Çizelge 4.8. Deneylerde kullanılan sabit ve değişken parametreler

Parametre Türü	Deney Parametreleri	Değerler
Sabit	Boşalım akımı [A]	3
	Vurum süresi [μ s]	25
	Bekleme (ara) süresi [μ s]	50
	Çalışma süresi	(sürekli çalışma)
	Geri çekme	(yok)
	Kutuplama	elektrot (+), işparçası (-)
	İşparçası	AISI4140 ve Ti6Al4V
	Elektrot	Pirinç ve bakır elektrotlar (ortası delik)
	Silikon yağı püskürtme basıncı [bar]	140, elektrot içinden
Değişken	Elektrot dönüş hızı [dev/dak]	0 ve 1000
	Silikon yağı sıcaklığı [°C]	30 ve 75
	Karbon tozu konsantrasyonu [g/lt]	0, 10 ve 15
	Nişasta tozu konsantrasyonu [g/lt]	0, 100 ve 200

4.4. Toz Boyutu Analizi

Silikon yağı içerisine katılan karbon ve nişasta tozlarının ortalama boyutları Malvern Mastersizer lazerle boyut ölçme cihazıyla belirlenmiştir.

4.5. Deney Tasarımı

Değişken parametrelerden karbon ve nişasta tozlarının farklı konsantrasyonlarından oluşan 9 farklı dielektrik sıvı (Çizelge 4.9) elde edilmiştir. Oluşturulan dielektrik karışımların formülasyonu ve teorik yoğunlukları Çizelge 4.9'da belirtilmiştir. Dielektrik karışımların (EEİ deneyleri yapılmadan önce) elektro-reoloji ve termal analizleri yapılarak EEİ'ye uygunlukları tespit edilmiştir. Bu dielektrik sıvıları 30 °C ve 75 °C sıcaklıkta (9x2=18 adet), 0 (dönmeyen elektrot) ve 1000 dev/dak elektrot dönüş hızında denemek amacıyla (18x2=36 adet) 36 adet deney yapılmıştır. Silikon yağındaki 36 adet deneyi karşılaştırmak için dielektrik olarak suyla (su dielektrik) denemeler yapılmıştır. Su dielektrikle 0 dev/dak ve 1000 dev/dak elektrot dönüş hızında, 30 °C ve 75 °C'de olmak üzere toplam 4 adet deney daha yapılmıştır. Bu çalışmanın MFS modelini doğrulama adına, Ti6Al4V levhalarla 75 °C su dielektrikte 3 A boşalım akımı, 25 µs vurum süresi ve 50 µs bekleme süresinde dönmeyen 2 mm'lik ortası tek delik bakır elektrotla 140 bar dielektrik püskürtme basıncında EEİ'de delik delme deneyleri de yapılmıştır.

Çizelge 4.9. Elektro reoloji deneyleri için oluşturulan karışımların formülasyonu

Dielektrik Karışımın Kodu	Karışımın Formülasyonu
A	Silikon yağı (katkısız)
B	Silikon yağı + Karbon (10 g/l)
C	Silikon yağı + Karbon (15 g/l)
D	Silikon yağı + Nişasta (100 g/l)
E	Silikon yağı + Nişasta (200 g/l)
F	Silikon yağı + Karbon (10 g/l) + Nişasta (100 g/l)
G	Silikon yağı + Karbon (10 g/l) + Nişasta (200 g/l)
H	Silikon yağı + Karbon (15 g/l) + Nişasta (100 g/l)
I	Silikon yağı + Karbon (15 g/l) + Nişasta (200 g/l)

İlk denemelerde silikon yağına nişasta tozu katkısında yaşanan problemlerden sonra, yeni oranlara sahip konsantrasyonlar hazırlanmıştır. Oluşturulan yeni konsantrasyonlarda karbon tozunun oranları değiştirilmeden nişasta tozu oranları değiştirilmiştir (Çizelge 4.10). Toz katkılı karışımlar hazırlanırken 0,005 g hassasiyette elektronik terazi kullanılmıştır. EEİ deneylerinde 10 farklı dielektrik sıvı/karışım kullanılmıştır. Bu yeni oranlarla hazırlanan karışımlarla yapılan deneylerde herhangi bir problem yaşanmamıştır.

Çizelge 4.10. EEİ deneylerinde kullanılan karışımların formülasyonu

Dielektrik Karışımın Kodu	Karışımın Formülasyonu
A	Silikon yağı (katkısız)
B	Silikon yağı + Karbon (10 g/lt)
C	Silikon yağı + Karbon (15 g/lt)
D	Silikon yağı + Nişasta (15 g/lt)
E	Silikon yağı + Nişasta (30 g/lt)
F	Silikon yağı + Karbon (10 g/lt) + Nişasta (15 g/lt)
G	Silikon yağı + Karbon (10 g/lt) + Nişasta (30 g/lt)
H	Silikon yağı + Karbon (15 g/lt) + Nişasta (15 g/lt)
I	Silikon yağı + Karbon (15 g/lt) + Nişasta (30 g/lt)
W	Su

Çizelge 4.10'da, silikon yağı (A) ve farklı formülasyonlarına sahip karışımlarının (B-I), EEİ delik delmede performans çıktıları açısından kıyaslanabilmesi için farklı bir dielektrik olarak suyun da kullanılması düşünülmüştür. Bu amaç doğrultusunda yapılacak çalışmada, farklı formülasyonlardaki silikon yağı ve karışımları arasında İİH, EAH, R_a ve yüzey özellikleri açısından hangisinin daha iyi olduğunun araştırılması hedeflenmiştir. İİH, EAH ve BA değerlerinin tespiti için işparçaları ve elektrotların işleme öncesi ağırlıkları terazi vasıtasıyla ölçülmüştür. İşleme sonrası işparçaları ve elektrotlar gaz yağıyla temizlenip basınçlı havayla kurutulduktan sonra ağırlıkları ölçülmüştür.

4.6. Elektro Reoloji Deneyleri

Çalışmada, ERA reoloji deneylerinin yapılmasındaki amaç: elektro tork reometre testleri ve EEİ deneyleri arasındaki benzeşimlerden kaynaklanmaktadır. Bunlar; a) EEİ tezgahında

elektrotun kendi eksenini etrafında dönmesinden dolayı elektrotla sıvı arasında oluşan tork ile elektro tork reometre cihazında dielektrik sıvının paralel plakalar arasında hareket ederek yarattığı tork arasında, b) EEİ tankında dielektrik sıvının ısıtılması ile elektro tork reometre cihazında silikon yağı + nişasta tozu + karbon tozu karışımlarının ısıtılması arasında ve c) EEİ sırasında dielektrik sıvının ve nişasta/karbon tozlarının elektrik boşalimleri altındaki davranışı ile elektro tork reometre cihazında silikon yağı içerisindeki taneciklerin elektrik alan (E) karşısındaki davranışı (polarize olması), olarak sıralanabilir. Silikon yağına nişasta tozu ve karbon tozu katkısıyla elde edilen dielektrik karışımların belli bir kayma hızı değerinde farklı sıcaklık ve farklı elektrik alan altındaki davranışları (viskozite, elektrik alan kuvveti, karışım oranı, sıcaklık) incelenmiştir. Viskozite, başta sıcaklık olmak üzere karbon ve nişasta derişimine (g/lt), akışkan özellikleri (silikon yağı) ve elektrot dönme hızı gibi parametrelerden etkilendiği için kritik önem arz etmektedir. Elektrik alan altında, karbon ve nişasta tozlarının polarizasyonu incelenirken, sıcaklığa bağlı olarak viskozite (ağdalılık) ölçümleri yapılmıştır. Karışımların viskozite değerleri ölçülürken dönen konsantrik silindir yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem de genel olarak, torsiyon reometresinde (döner kesme hız tahrikli reometre) çift konik disk içerisindeki test boşluğunda bulunan numuneler, diskin dönmeye (salınım yapmaya) başlamasıyla bir kayma hızı (s^{-1}) oluşturur. Bu etkiyle paralel disk yüzeyleri arasındaki mesafede bir kayma gerilmesi (Pa) oluşur. Kayma gerilmesinin kayma hızına oranıyla istenen sıcaklıkta ve elektrik alanında viskozite (Pa s) değerleri elde edilir. Elektro reoloji deneyleri, Thermo-Haake RS600 model 35 mm çapında paralel plakalı elektro tork reometre cihazında gerçekleştirilmiştir (EK-11). Belirtilen 9 farklı karışımdan (Bkz. Çizelge 4.10) hazırlanan yaklaşık 100 ml hacmindeki numunelerin 30-45-60-75 ve 90 °C sıcaklıklarda reometre diski dönüş hızı (1000 dev/dak ($17 s^{-1}$)) için viskozite değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca 9 farklı karışımın T=30 °C ve T=75 °C’de 0-0,5-1-1,5-2-2,5-3 ve 3,5 kV/mm elektrik alanları altında viskozite değerleri tespit edilmiştir.

4.7. TGA/DTA Deneyleri

TGA/DTA deneyleri, Exstar TG/DTA7300 termal analiz cihazında gerçekleştirilmiştir (EK-12). 4 farklı karışımda hazırlanan yaklaşık 100 ml hacimdeki numunelerin hava ortamında 10 °C/dak ısıtma hızıyla TGA/DTA analizi yapılmış ve % ağırlık kaybı-sıcaklık grafikleri elde edilmiştir. Analizlerin hava ortamında yapılması EEİ deneyleriyle benzerlik oluşturma amaçlıdır.

Çizelge 4.11. Termal analiz için oluşturulan karışımların özellikleri

Kod	Karışımın Formülasyonu	Yoğunluk [g/cm ³]
I	Silikon yağı (katkısız)	0,968
II	Silikon yağı + Karbon (15 g/lt)	0,976
III	Silikon yağı + Nişasta (200 g/lt)	0,700
IV	Silikon yağı + Karbon (15 g/lt) + Nişasta (200 g/lt)	0,707

4.8. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

İşparçası yüzey pürüzlülüğü ölçümleri Surrcoorder SE1200 tipi detektör uçlu portatif yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı vasıtasıyla yapılmıştır (EK-13). Ölçümlerde örnekleme uzunluğu standart tablolardan 0,8 mm ve ölçüm uzunluğu 2,5 mm olarak seçilmiştir. Ölçümlerde R_a , R_z ve R_q yüzey pürüzlülüğü parametreleri kaydedilmiş olmakla beraber bu çalışmanın sonuçlarının sunumunda sadece R_a parametresi kullanılmıştır. İşparçalarının işlenmiş yüzeyinden 3 farklı noktadan (delik girişi, ortası ve çıkışı) ölçüm alınmış ve ölçümlerin aritmetik ortalaması kullanılmıştır.

4.9. Mikro Yapı İncelemeleri

Mikro yapı incelemesi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümündeki Olympus marka dijital kamera donanımlı optik mikroskopla gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemesinde, işparçaları %2 nitrik asit + %98 saf etanol çözeltisiyle 45 dakika dağlanmıştır. Daha sonra dağlanan işparçası yüzeyleri sodyum hipoklorit + %5 toz anyonik madde karışımıyla fırçalanarak temizlenmiştir. 10 kat büyütmeyle önceden belirlenen noktalardan mikro yapı fotoğrafları çekilmiştir.

4.10. İlave Deney Çalışmaları

İİH değerini 4 mm³/dak üzerine çıkarma, R_a değerini 0,3 µm civarına indirme ve 1 mm'lik ve altı çaplardaki elektrotlarla delik delme bu çalışmanın hedefleri olarak belirlenmişti. Yaşanabilecek olumsuzluklar karşısında, daha iyi R_a ve yüksek İİH değerleri elde ederek hedefleri tutturabilmek amacıyla çalışmada yeni/farklı EEİ parametreleriyle deneyler yapılmış ve sonuçları yorumlanmıştır.

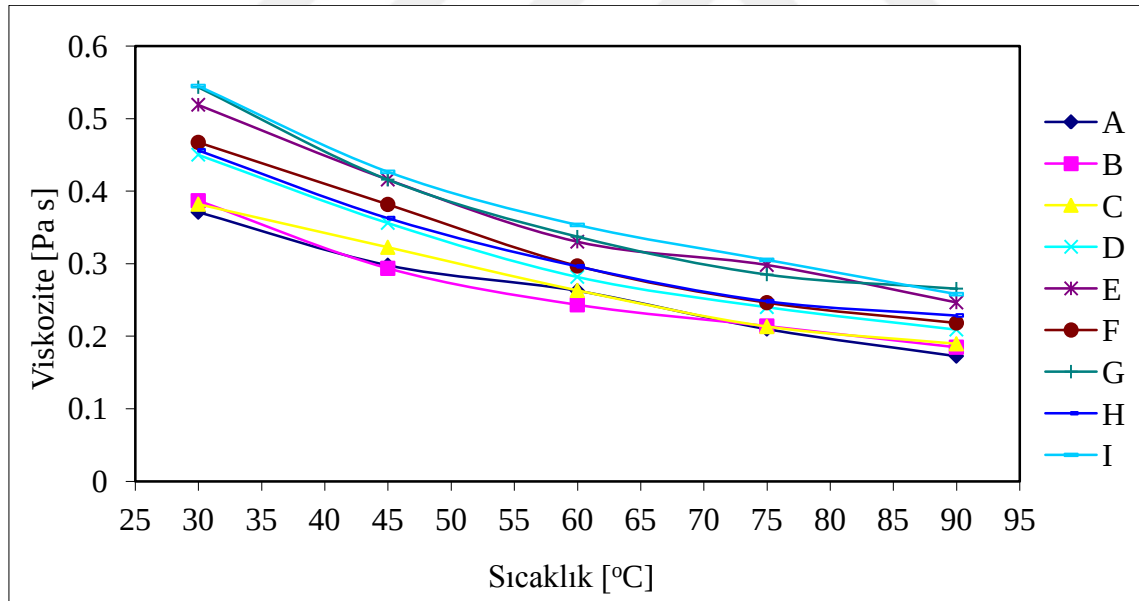
5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

5.1. Toz Boyutu Analiz Sonuçları

Çalışmada kullanılan karbon tozunun ortalama boyutu ($d_{0,5}$) 17,88 μm , nişasta tozunun ortalama toz boyutu ise 5,26 μm ölçülmüştür. Her iki toz malzemenin boyutları EEİ işleminde herhangi bir sorun çıkarmayacağı düşünülerek öğütme işlemine tabii tutulmamıştır.

5.2. Elektro Reoloji Deney Sonuçları

Şekil 5.1’de 9 farklı karışımdan hazırlanan numunelerin (Bkz. Çizelge 4.10) 1000 dev/dak (17 s^{-1}) reometre diski dönüş hızı için ve elektrik alan uygulamadan ($E=0\text{ kV/mm}$), 30, 45, 60, 75 ve 90 °C sıcaklıklarda viskozite değerlerinin değişimi görülmektedir.

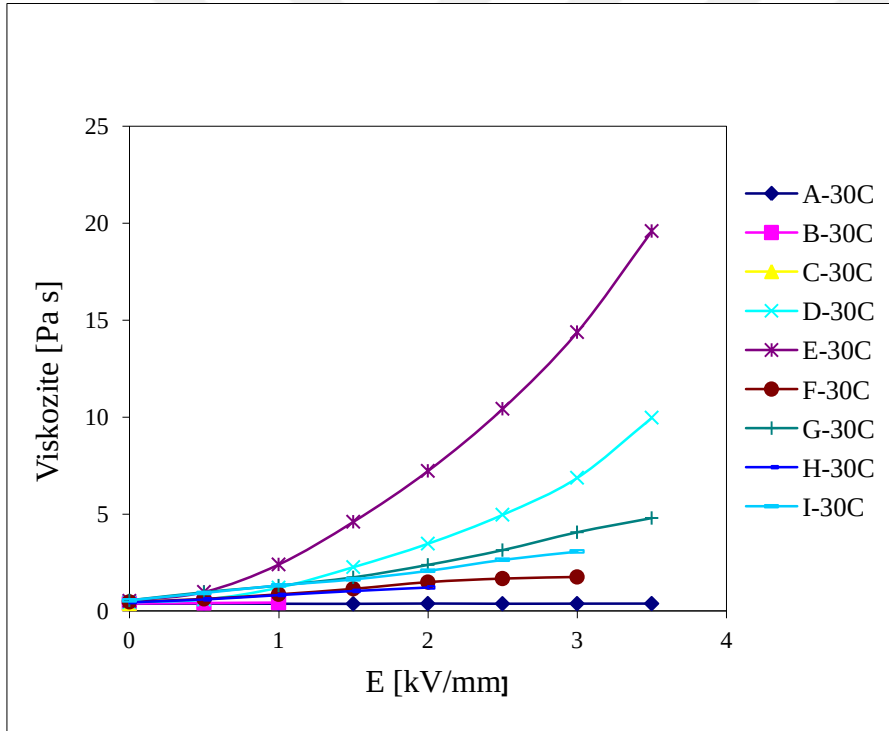


Şekil 5.1. Karışımların viskozite-sıcaklık değişimi ($E=0\text{ kV/mm}$)

Bütün karışımlarda sıcaklık değeri arttıkça viskozite değerlerinin düştüğü görülmektedir (Bkz. Şekil 5.1). Yani sıcaklık değeri yükseldikçe akışa karşı gösterilen direnç azalmaktadır. ‘A’ karışımının (katkısız silikon yağı) viskozite değerleri diğer karışımların viskozite değerlerinden düşüktür. En yüksek toz katkısı olan ‘I’ karışımının viskozite değerleri de en yüksektir. Bütün karışımların viskozite değerleri oldukça düşük

olduğundan elektrik alan uygulanmayan karışımların viskozite değerleri EEİ'de dielektrik akışı açısından sorun yaratmayacak görünümündedir.

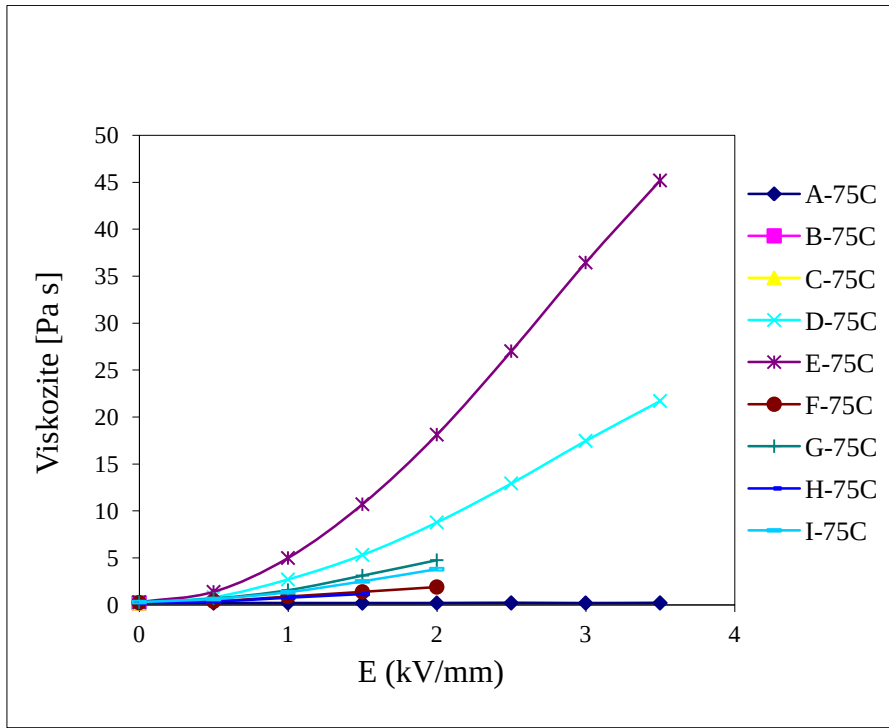
Takip eden diğer grup deneylerde 9 farklı karışımın $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $T=75\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 0; 0,5; 1; 1,5; 2; 2,5; 3 ve 3,5 kV/mm elektrik alanları altında viskozite değerleri tespit edilmiştir (Şekil 5.2 ve Şekil 5.3). Sıcaklık değerlerinin 35 ve 75 $^{\circ}\text{C}$ seçilmesinin sebebi EEİ deneylerinin bu iki sıcaklıkta yapılacak olmasıdır. Karbon tozu katkısı olan karışımlarda (B ve C karışımları), karışımın iletkenliği arttığı için tork reometre cihazı ark oluşturmuş ve ölçümü durdurmuştur. B karışımı (10 g/lt karbon tozu katkılı) için 1 kV/mm elektrik alan uygulamasından sonra viskozite ölçümü yapılamamıştır. C karışımı (15 g/lt karbon tozu katkılı) için 0,5 kV/mm elektrik alan uygulamasından sonra ölçüm yapılamamıştır.



Şekil 5.2. Karışımların viskozite-elektrik alan değişimi ($T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Şekil 5.2 ve Şekil 5.3 bir arada incelendiğinde A karışımının (katkısız silikon yağı) elektrik alan altında çok farklı reolojik özellikler göstermediği görülmektedir. D ve E karışımlarının elektrik alan altında diğer karışımlara nazaran oldukça yüksek viskozite değerleri göstermiştir. Bu karışımlarda elektrik alan arttığında viskozite değerleri de artmaktadır. A karışımının 3,5 kV/mm elektrik alan altında viskozite değeri 0,216 Pa.s iken, E karışımın aynı elektrik alan altındaki viskozite değeri 45,196 Pa.s'dır (yaklaşık 210 kat).

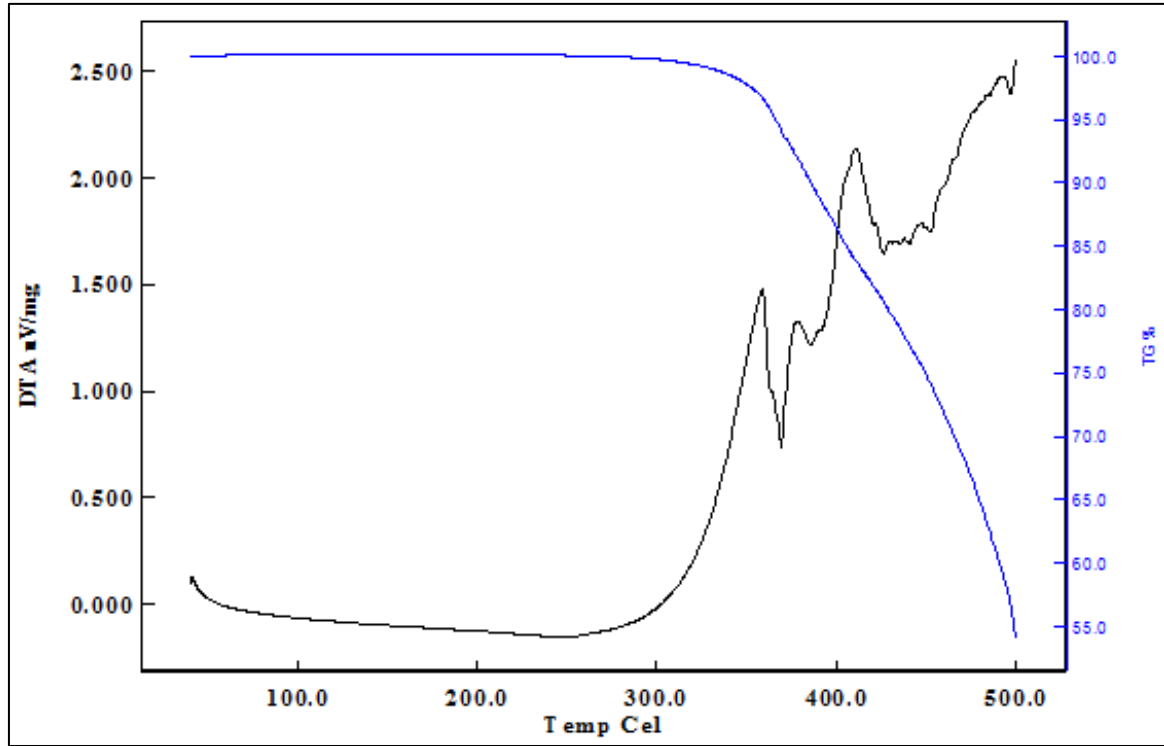
Bu durumun EEİ deneylerinde işleme ortamında dielektrik akışı açısından sorun oluşturabileceği düşünülmüştür. Karbon ve nişasta tozu katkılı karışımlarında (F, G, H ve I karışımları) viskozite değerleri elektrik alan uygulamasıyla artmaktadır. Bu duruma nişasta tozunun neden olduğu düşünülmüştür. Yine bu karışımlarda 2,5 kV/mm elektrik alan uygulamasından büyük değerlerde viskozite ölçümü yapılamamıştır (karbon tozunun sebep olduğu ark oluşumu nedeniyle).



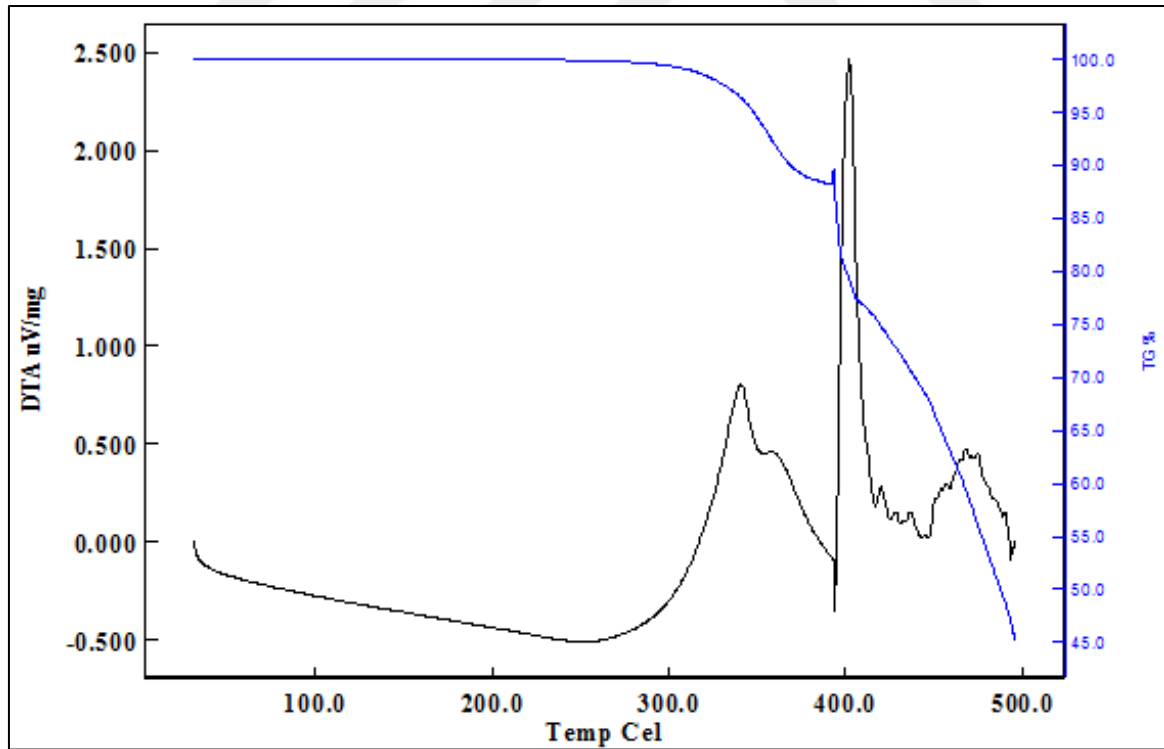
Şekil 5.3. Karışımların viskozite-elektrik alan değişimi (T=75 °C)

5.3. TGA/DTA Analizleri Sonuçları

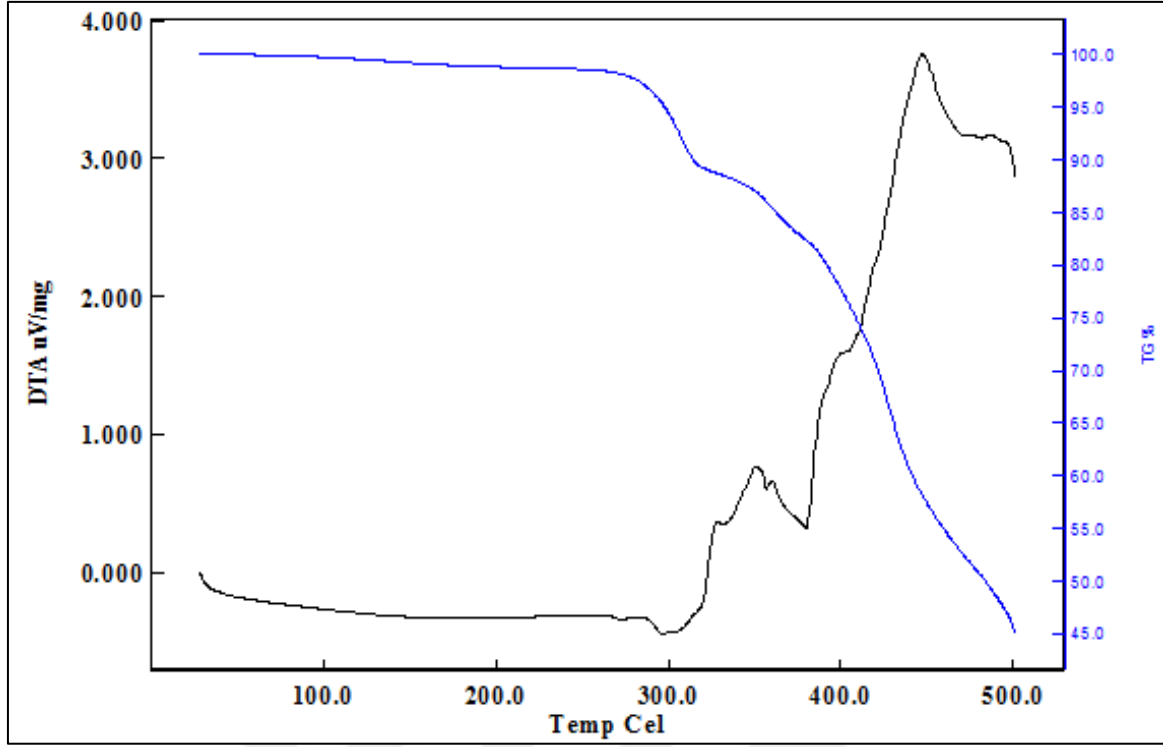
Karışımların hava ortamında 10 °C/dak ısıtma hızıyla 500 °C'ye kadar olan TGA/DTA analizleri gerçekleştirilmiş ve % ağırlık kaybı-sıcaklık değişimleri elde edilmiştir (Şekil 5.4-Şekil 5.7). Şekil 5.4-Şekil 5.7 incelendiğinde tüm karışımların 300 °C'de bozunmaya başladığı görülmektedir. Katkısız silikon yağında 300 °C'ye kadar hiç kütle kaybı görülmezken, katkılı silikon yağlarında az miktarlarda kütle kayıpları görülmüştür. Bütün karışımlarda 300 °C'den sonra önemli kütle kayıpları (bozunma) gözlenmiştir. EEİ deneylerinin 30 °C ve 75 °C dielektrik sıcaklığında yapılacağı düşünüldüğünde 300 °C'den sonra tespit edilen bozunmanın işleme sırasında sorun yaratmayacağı kararına varılmıştır.



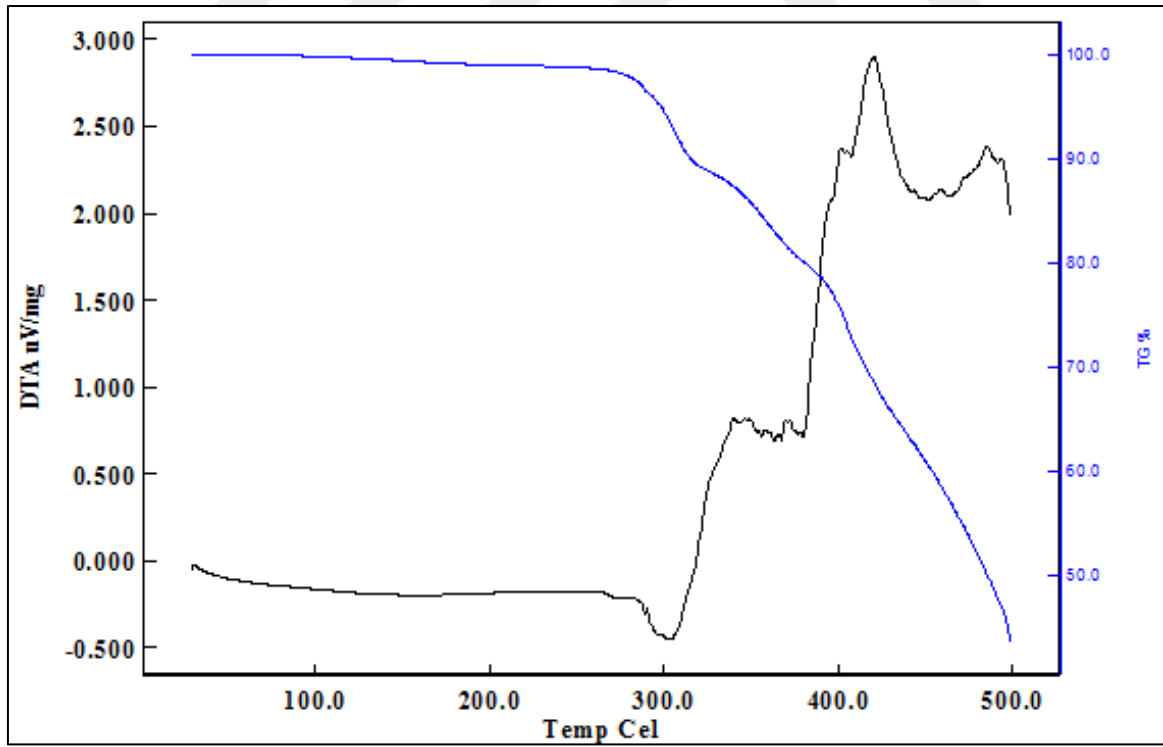
Şekil 5.4. Katkısız silikon yağının TGA/DTA grafiği



Şekil 5.5. Silikon yağı + karbon tozu (15 g/lt) karışımının TGA/DTA grafiği



Şekil 5.6. Silikon yağı + nişasta (200 g/lt) karışımının TGA/DTA grafiği



Şekil 5.7. Silikon yağı + karbon (15 g/lt) + nişasta (200 g/lt) karışımının TGA/DTA grafiği

5.4. EEİ Deneylerinde Karşılaşılan Problemler ve Çözümleri

5.4.1. Küçük çaplı elektrotlardaki akış problemleri ve çözümleri

- ✓ EEİ deneylerine başlanmadan önce katkısız silikon yağı ve katkılı silikon yağlarının reolojik özellikleri araştırılmış ve dielektrik akışı anlamında sorun yaratmayacağı öngörülmüştü. Aynı şekilde deneylere başlamadan önce katkısız silikon yağı için termal analizler de yapılmıştı. Şeffaf ve kokusuz olan silikon yağı, insan sağlığı ve çevre için oldukça zararsız bir akışkan olmasına karşın oldukça koyu kıvamlıdır. İlk denemelerde katkısız silikon yağının püskürtme basıncı 140 bar değerine ayarlanmış, 0,5 mm çapta ortası tek delik pirinç elektrot kullanılmış, ancak elektrot içerisinden dielektrik akışı/geçışı gözlenememiştir. Katkısız silikon yağının viskozitesini azaltmak için sıcaklık 90 °C'ye çıkarılmasına rağmen akış gerçekleşmemiştir. Püskürtme basıncı deneme amaçlı olarak 160 bar seviyelerine kadar çıkarılmasına rağmen yine akış sağlanamamıştır. Daha sonra 0,7 mm çapta elektrot denenmiş ancak yine akış elde edilememiştir.
- ✓ İkinci aşamada, 1 mm çapta elektrot kullanılmış ve elektrot içerisinden sızıntı şeklinde bir akış gözlenmiştir. Sıcaklık ve uygulama basıncı artırılrsa da akışta çok büyük değişiklikler gözlenmemiştir. Elektrot içinden akış olmaması veya çok kısıtlı olması nedeniyle işparçalarına delik delmede kirlilikten (işleme sonrası işparçası talaşları) dolayı tezgahın kararsız çalıştığı gözlemlenmiştir. Delinen işparçaları incelendiğinde delik giriş-çıkış bölgelerinde zayıf püskürtme koşullarından dolayı yüzeyden eriyen/buharlaştan malzemenin (talaşın) tekrar işparçasına kaynak olduğu (yapıştığı) görülmüştür. 1 mm çaplı elektrotla 20 adet EEİ deneyi sonucunda birçok işleme sıkıntısıyla karşılaşılmıştır. Deneylerin ilerleyen aşamalarında silikon yağı içerisine katılacak karbon ve nişasta tozlarının daha farklı akış problemleri doğurabileceği düşünülerek 1 mm çaplı elektrot kullanımından vazgeçilmiştir.
- ✓ Üçüncü aşamada, ortası tek delikli 2 mm dış çapta pirinç elektrot kullanılmıştır. Silikon yağı için bu çaplı elektrotlarda 60 bar'dan 140 bar'a kadar olan püskürtme basınç aralığında ve 25 °C'den 90 °C'ye kadar olan sıcaklık aralığında mükemmel akış özellikleri görülmüştür. Yapılan EEİ delme deneylerinde oldukça düzgün delikler delinmiş ve delik yüzeyinin istenen niteliklerde olduğu (minimum karbon kirlenmesi, düzgün yüzey, vb) görülmüştür.

5.4.2. Karıştırma ünitesinde yaşanan problem ve çözümü

Silikon yağı içerisine katılan karbon ve nişasta tozlarının homojen şekilde karışması için bakır boru sistemi tasarlanmış ve üretilmişti. Katkısız silikon yağı ile yapılan ön denemelerde bakır borular üzerindeki 1 mm çapındaki deliklerin karıştırma için yetersiz kaldığı gözlemlenmiştir. İlerleyen deneysel aşamalarda silikon yağı içerisine katılacak karbon ve nişasta tozlarının karışmayı daha da zorlaştıracığı düşünüldükten deliklerin bazılarının (özellikle boru sisteminin tank köşesine gelen kısımlarında) çapı 1 mm'den 2 mm'ye genişletilmiştir. Bu genişletme işlemi sonucunda tank içinde tatmin edici bir karıştırma elde edilmiştir.

5.4.3. Nişasta tozu konsantrasyonlarında yaşanan problemler ve çözümleri

- ✓ Silikon yağına katılan karbon tozu (B ve C karışımları) tank içerisinde homojen şekilde dağılmış ve EEİ'de sorun oluşturmamıştır. Ancak, sadece nişasta tozu katkılı silikon yağı karışımları (D ve E karışımları) EEİ'de sorunlar oluşturmuştur. Başlangıçta silikon yağı tank içerisinde 75 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Yağın ısıtılması esnasında homojen sıcaklık dağılımı elde edebilmek için karıştırma sistemi çalıştırılmıştır. Sonra 75 °C sıcaklıktaki silikon yağı tank içerisinden 2 adet 20 lt'lik kovalara boşaltılmıştır. Daha sonra litrede 100 grama (100 g/lt) denk gelecek kütle miktarındaki nişasta tozu her iki kovaya boşaltılarak 15 dakika süre mikser vasıtasıyla karıştırılmıştır. Kova içerisinde topaklanan nişasta tozları dağıtılmış ve homojen karışım elde edilene kadar karıştırma işlemine devam edilmiştir. Kova içerisindeki karıştırma işleminden sonra, her iki kova tank içerisine tekrar boşaltılmış ve karıştırma sistemi 30 dakika çalıştırılarak tank içerisinde homojen karışım elde edilmeye çalışılmıştır. Fakat, dielektrik sıvı (silikon-nişasta karışı) oldukça koyu kıvamlı bir hal almıştır. Karıştırma işleminden sonra EEİ deneylerine geçilerek işparçasına 2 mm'lik pirinç elektrotla delik delinmeye başlanmıştır. Delik delme işleminin ilk 10 dakikalık süresinde tezgah oldukça düzensiz/kararsız çalışmıştır. İşlemin 20'nci dakikasında tezgahın kafası, elektrotu eğerek durdurma sensörüne dokunmak suretiyle işlemeyi durdurmuştur. Acil durma sonrası yapılan incelemede, işparçası ve elektrot üzerinde topaklanmış nişasta tozları gözlemlenmiştir. Tanktaki karışım boşaltıldığında tank tabanında çok fazla miktarda nişasta tozu tortusu/lapası görülmüştür. Aşırı miktardaki nişasta kalıntısı özellikle

işleme bölgesinde tortulaşarak işparçası-elektrot arasında yalıtkan bir katman/bölge oluşturmuş ve tezgah kafasının ilerleme mekanizmasını devre dışı bırakmıştır.

- ✓ Yapılan ön denemeler sonrasında nişasta konsantrasyonunun azaltılmasına karar verilmiş, 50 g/lt nişasta tozu katkılı karışım denenmiştir. 50 g/lt nişasta tozu katkılı karışımla yapılan EEİ'de 100 g/lt konsantrasyonla benzer olumsuzluklar yaşanmıştır. İşparçası yaklaşık 7 mm derinliğinde işlenebilmiş ve kör delik girişinde yanma/kaynaklaşma gözlenmiştir.
- ✓ Üçüncü aşamada silikon yağından 30 g/lt nişasta tozu katkılı karışım denenmiş ve başarılı işleme/delme sonuçları elde edilmiştir. Bu tespitlerle, 30 g/lt nişasta tozu konsantrasyonunun kullanımına karar verilmiştir. Benzer şekilde EEİ deneylerinde kullanılacak D karışımı (silikon yağı + nişasta (100 g/lt)) oranının 15 g/lt nişasta olarak değiştirilmesi uygun görülmüştür. 15 g/lt nişasta tozu katkılı karışımla yapılan EEİ deneyleri diğer karışımlara nazaran daha kısa sürede ve sorunsuz gerçekleşmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen 30 g/lt ve 15 g/lt nişasta tozu katkılı delme deneylerinin tamamında başarılı sonuçlar elde edilmiş ve tüm deneylerde deliklerde 20 mm derinliğe başarıyla inilmiştir.

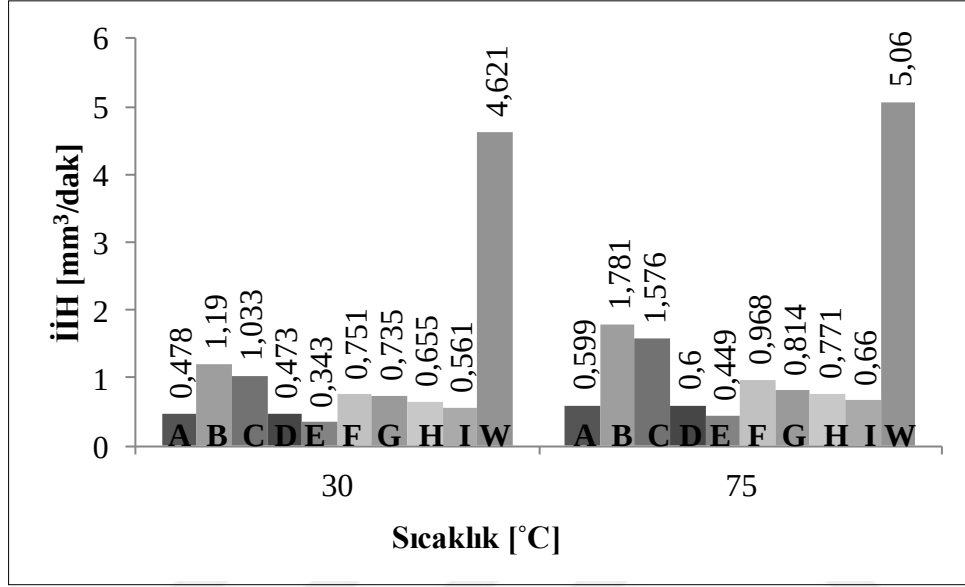
Tsai ve arkadaşları yaptıkları dalma elektro erozyon çalışmasında 100, 200 ve 300 g/lt nişasta tozu katkılı silikon yağı karışımları kullanarak işleme gerçekleştirebilmişlerdir [164]. Fakat bu çalışmanın, Tsai ve arkadaşlarının çalışmasına göre en büyük farklılığı; EEİ'de küçük çaplı delik delme uygulamasının yapılmasıdır. EEİ'de delik delme işlemi, dalma elektro erozyona nazaran çok daha sıkıntılıdır. Delik delme işleminde işleme bölgesi kapalı bir bölge olduğu için ortamın temizlenmesi hayli zorlaşmaktadır. Bu bağlamda, yapılan çalışma Tsai ve arkadaşlarının çalışmasından oldukça farklıdır.

5.5. EEİ Deneylerinin Performans Çıktılarının Karşılaştırılması

5.5.1. İİH'nin farklı karışımlarda sıcaklık ve elektrot dönüş hızıyla değişimi

Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağına 10 g/lt karbon tozu katkısı (B karışımı) 30 °C ve 75 °C dielektrik sıcaklıkları için İİH değerini %148 ve %197 artırmıştır. Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağına 15 g/lt karbon tozu katkısı, aynı dielektrik sıvı sıcaklıkları için İİH değerini %116 ve %163 artırmıştır (Şekil 5.8).

İİH değerlerindeki bu belirgin artışın sebebi, silikon yağı içerisindeki karbon tozu tanelerinin işleme bölgesinde birden çok yerde boşalım köprüsü oluşturarak boşalım anında toz katkısız EEİ'ye göre daha çok iletkenlik sağlaması ve böylelikle işparçasıyla elektrot arasındaki boşalım enerjisinin daha etkili bir şekilde işleme bölgesine dağılmasını sağlayarak işleme/operasyon süresini kısaltmasıdır.

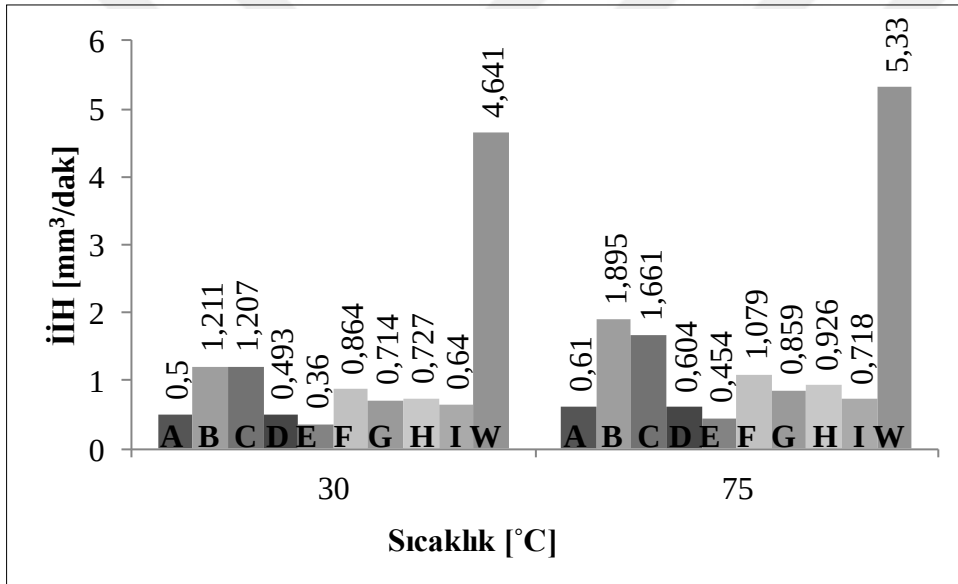


Şekil 5.8. Dönmeyen elektrotla işlemede farklı karışımların 30 ve 75 °C'deki İİH'leri

Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağına 15 g/lt nişasta tozu katkısı (D), 30 °C ve 75 °C dielektrik sıvı sıcaklıkları için İİH değerini %0,2 ve %1,05 düşürmüştür (Şekil 5.8). Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağına 30 g/lt nişasta tozu katkısı (E), aynı dielektrik sıcaklıkları için İİH değerini %33 ve %39 düşürmüştür. Artan nişasta tozu miktarıyla İİH değerlerindeki düşüşün sebebi, silikon yağı içerisindeki nişasta tozu tanelerinin elektrik alan altında kötü iletken özellik sergilemesi ve dielektrik sıvının viskozite değerlerinin artırmasından dolayı işleme bölgesinde istenen püskürtme/temizleme şartlarının sağlanamaması yüzünden işleme/operasyon süresini uzamasıdır. Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağına karbon ve nişasta tozu katkısı yapılan karışımlarda (F, G, H ve I karışımları) 30 °C ve 75 °C'de İİH değerlerinin, sadece nişasta tozu katkısı yapılan karışımlarda (D ve E) ve katkısız silikon yağında (A) yapılan deneylerdeki İİH değerlerinden daha yüksektir. İİH değerlerindeki bu artışa, karışım içerisinde bulunan karbon tozunun neden olduğu değerlendirilmektedir. Dönmeyen elektrotla işlemede 30 °C ve 75 °C için, katkısız silikon yağında (A) ve toz katkılı karışımlarında (B, C, D, E, F, G, H ve I) yapılan deneylerdeki İİH değerleri, su dielektrikle

yapılan deneylerdeki İİH değerlerinden oldukça düşüktür. Dönmeyen elektrotla işlemede su dielektrik, silikon yağına göre 30 °C ve 75 °C’de yaklaşık 9 kat daha hızlı işleme olanağı sağlamaktadır. Dielektrik sıvı sıcaklığının 30 °C’den 75 °C’ye artırılması katkısız silikon yağı ve tüm karışımlar için (su dielektrik dahil) İİH değerini belirgin olarak artırmıştır (Bkz. Şekil 5.8).

Döner elektrotla yapılan işlemlerde (Şekil 5.9), silikon yağına yapılan toz katkıları dönmeyen elektrotla yapılan işlemlerle (Bkz. Şekil 5.8) benzer karakteristikler göstermektedir. Yani, silikon yağına karbon tozu katkısı İİH değerlerini artırırken, nişasta tozu katkısı İİH değerlerinde düşüşe sebebiyet vermektedir.



Şekil 5.9. Döner elektrotla işlemede farklı karışımların 30 ve 75 °C'deki İİH'leri

Döner elektrotla işlemede su dielektrik, katkısız silikon yağına göre 30 °C ve 75 °C için dönmeyen elektrotla işlemeye benzer şekilde yaklaşık 9 kat hızlı işleme olanağı sağlamaktadır (Şekil 5.9). Elektrotun döndürülmesi sayesinde dönmeyen elektroda göre 30 °C’de ki tüm karışımlarda İİH değerlerinde %0,5 ile %16,84 arasında, 75 °C’de ki tüm karışımlarda %1,84 ile %20,1 arasında artış tespit edilmiştir. Genel olarak bakıldığında elektrotun döndürülmesi bütün karışımlarda İİH değerini artırmıştır (Bkz. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9). Bu sonuç, Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasıyla örtüşmektedir [154].

Dönmeyen ve döner elektrotla yapılan işlemlerde silikon yağının tüm karışımlarındaki sıcaklık artışı, İİH değerini %17,65 ile %56,48 arasında artırmıştır. Su dielektrik

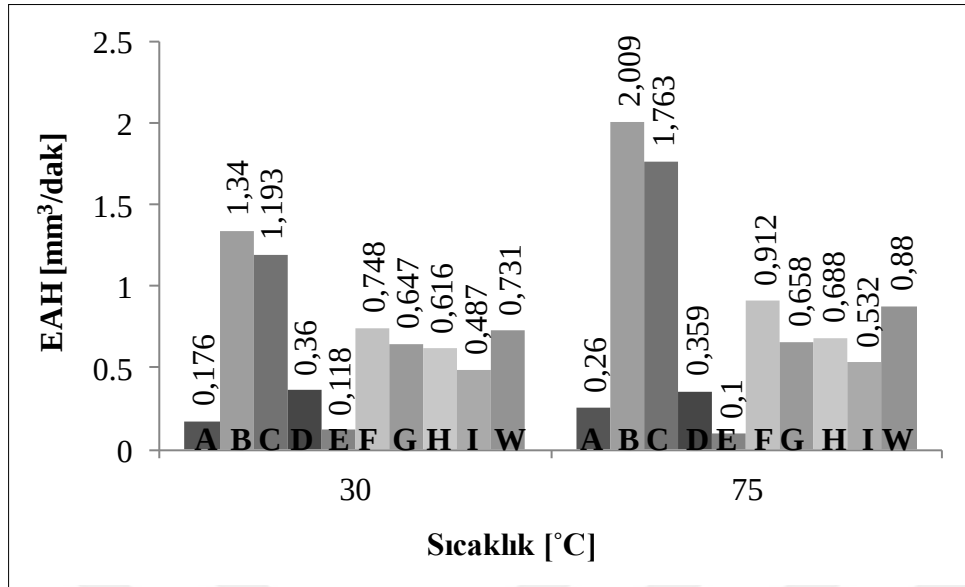
sıcaklığında yapılan artış ise İİH değerini %9,5 ile %14,84 arasında artırmaktadır. Yani, İİH değerlerini artırmak için silikon yağını ve karışımlarını (A-I) ısıtmak, suyu (W) ısıtmaktan daha etkili olduğu ve İİH'de daha yüksek artışa olanak sağladığı (sıcaklık artışı silikon yağında İİH'yi %56,48 artırırken suda sıcaklık artışı İİH'yi %14,84 artırmıştır) tespit edilmiştir (Bkz. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9). Bu sonuca silikon yağının ER özelliklerinin sebep olduğu düşünülmektedir. Deneyler esnasında silikon yağının ısıtılmasıyla da koyu kıvamının ciddi oranlarda azalarak daha akışkan duruma geldi gözlemlenmiştir. İİH açısından silikon yağının suyla kıyaslanmasında, silikon yağının (A) ve karışımlarının (B-I) özellikle hızlı gerçekleştirilmesi gereken işlemlerde (EEİ'de hızlı delik delme) iyi bir dielektrik olamayacağı sonucuna varılmıştır. Çalışmanın amaçları kısmında da belirtildiği üzere bu sonuca varabilmek için silikon yağının başka bir dielektrikle (su) kıyaslanmasının da oldukça kolaylık sağlayan bir karar olduğu görülmüştür (Bkz. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9).

5.5.2. EAH'nin farklı karışımlarda sıcaklık ve elektrot dönüş hızıyla değişimi

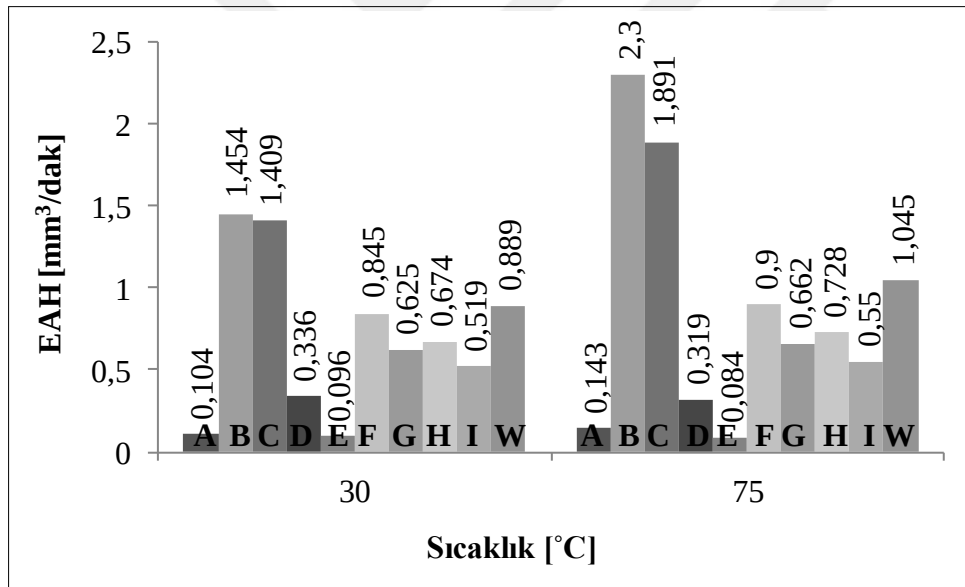
Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağına 10 g/lt karbon tozu katkısı (B), 30 °C ve 75 °C için EAH değerini %661 ve %672 artırmıştır (Şekil 5.10). Silikon yağına 15 g/lt karbon tozu katkısı (C), aynı sıcaklıklarda EAH değerini %577 ve %578 artırmıştır.

Elektro reoloji deneylerinde B ve C karışımları için 0,5 kV/mm elektrik alan değerinde aşırı iletkenlikten dolayı ark oluştuğundan ölçüm yapılamamıştı (Bkz. Şekil 5.3). Bu projede yapılan deneylerde uygulanan elektrik alanı ($E = 80 \text{ V}/30 \mu\text{m}$) yaklaşık 2,7 kV/mm olup elektro reoloji deneylerinde uygulanan elektrik alanından çok yüksektir. Diğer deyişle dielektrik ortam çok iletken hale geçmiştir. Deneylerde kullanılan bekleme süresinde (t_p) dielektrik sıvı tamamen deiyonize olamadığından ark tipi vurumlar belirgin olarak artmış, bu da doğrudan EAH'yı artırmıştır. Çalışmada kullanılan elektriksel parametreler sabit olduğundan EAH değerini düşürmenin uygun yolu olarak karbon tozu konsantrasyonunun azaltılması öngörülmüştür.

Elektrotun döndürülmesiyle, 30 °C'de karbon ve nişasta tozu katkılı F, H ve I karışımlarında EAH değerlerinde %6,5 ile %12,9 arasında, 75 °C'de G, H ve I karışımlarında EAH değerlerinde %3,4 ile %5,9 arasında artış tespit edilmiştir (Şekil 5.10 ve Şekil 5.11).



Şekil 5.10. Dönmeyen elektrotla işlemede farklı karışımların 30 ve 75 °C'deki EAH'leri



Şekil 5.11. Döner elektrotla işlemede farklı karışımların 30 ve 75 °C'deki EAH'leri

Özerkan [29] ve Ünşes'in [165] çalışmalarında, her ne kadar farklı elektriksel parametreler kullanılmış olsa da, gaz yağına 5 g/lit karbon tozu katkısı EAH değerini %8 ile %55 arasında artırmıştır. Bu projede dielektrik olarak kullanılan silikon yağına karbon tozu katkısı (10 g/lit ve 15 g/lit) iletkenlik açısından çok daha fazla etki göstererek EAH'yı %600 civarında artırmıştır. Bu sonuç, silikon yağındaki karbon tozu konsantrasyonunun diğer tip dielektriklere göre daha dikkatli ayarlanması gerektiğini ortaya çıkarmıştır.

Dönmeyen ve döner elektrotla 30°C ve 75°C’de yapılan deneylerde silikon yağının nişasta tozu katkılı karışımlarının (D, E, F, G, H, I) diğer karışımlara nazaran daha düşük EAH değerleri verdiği ve bu sonuca göre nişasta tozu katkısının EAH'yı dengeleyici bir etki gösterdiği kanaatine varılmıştır. Bu durumun, nişasta tozunun karışımların (D-I) elektrik iletkenliğini düşürerek EAH'nin azalmasına yardımcı olduğu düşünülmektedir.

Diğer taraftan, dalma EEİ ile işlemeden farklı olarak EEİ ile delik delme de kullanılan elektrotlar sarf malzemeler oldukları için ve ayrıca EEİ ile delik delme işleminde EAH'nin, İİH ve R_a kadar kritik olmadığı göz önünde bulundurulduğunda silikon yağının yüksek EAH değerleri vermesinin kullanılabilirliği açısından sorun teşkil etmeyeceği düşünülmüştür.

5.5.3. BA'nın farklı karışımlarda sıcaklık ve elektrot dönüş hızıyla değişimi

Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağına 10 g/lt karbon tozu katkısı (karışım B), 30 °C ve 75 °C’de BA değerini %158 ve %205 artırmıştır. Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağına 15 g/lt karbon tozu katkısı (C), 30 °C ve 75 °C’de BA değerini %156 ve %213 artırmıştır (Şekil 5.12). BA değerlerindeki bu artışların sebebi EAH değerlerinin çok yüksek olmasıdır.

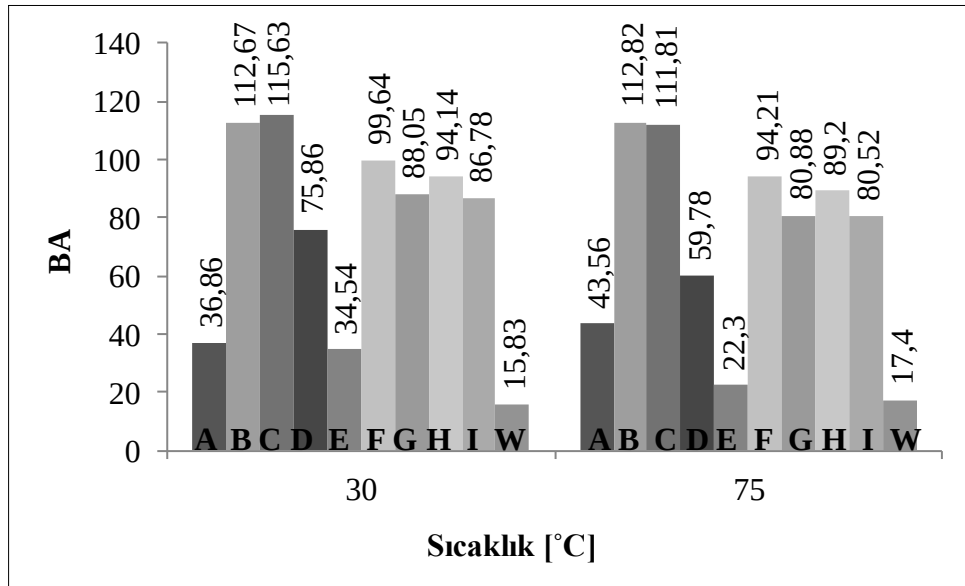
EEİ delik delme operasyonunda delikli tel elektrot ucuz bir malzeme de olsa %100’ün üzerine çıkan BA değerleri elektrotların sıklıkla değiştirilmesi gereğinden dolayı pratikte istenmeyen bir durumdur. Literatürdeki TKEEİ ilgili bazı çalışmalarda karbon tozu katkısının BA değerlerini düşürdüğü belirtilmiştir [29, 44, 165]. Bu sonuca göre silikon yağı içerisindeki karbon tozu konsantrasyonunun titizlikle (daha düşük değerlere) ayarlanmasının gereği ortaya çıkmaktadır.

Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağına 30 g/lt nişasta tozu katkısı (E), 30 °C ve 75 °C’de BA değerini %6,7 ve %95 düşürmüştür. Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağında (A) ve toz katkılı karışımlarında (B, C, D, E, F, G, H ve I) 30 °C ve 75 °C’de, yapılan deneylerdeki BA değerleri, su dielektrikle yapılan deneylerdeki BA değerlerinden oldukça yüksektir.

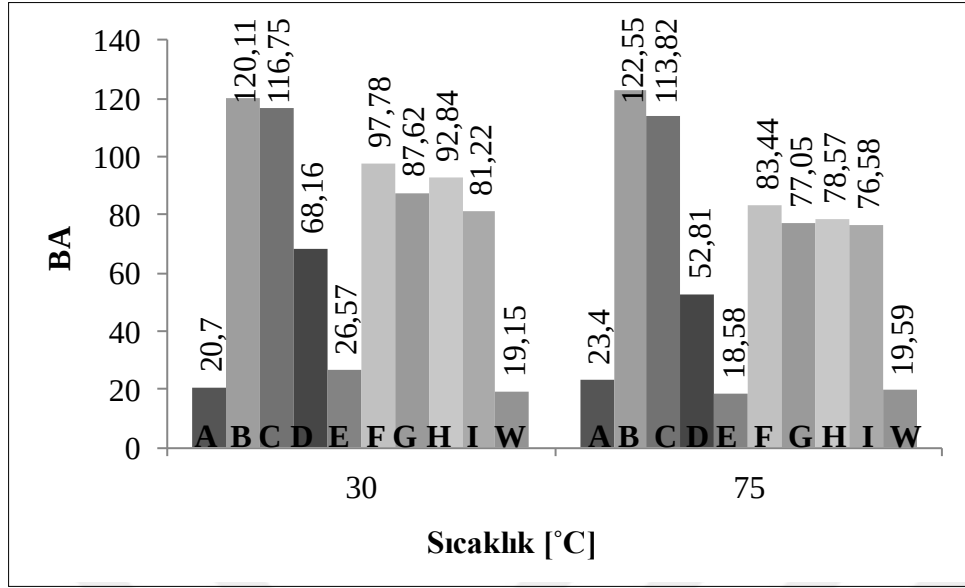
Dönmeyen elektrotla işlemede su dielektrik, silikon yağına göre gerek 30 °C’de ve gerekse 75 °C’de yaklaşık 2,5 kat daha düşük BA değerleri vermiştir (Şekil 5.12). Şekil 5.13 incelendiğinde döner elektrotla yapılan işlemlerde, silikon yağına yapılan toz katkıları katkısız silikon yağına göre BA değerlerini artırırken, nişasta tozu katkısı BA değerlerinde düşüş sağlamaktadır.

Döner elektrotla karbon ve nişasta tozu katkılı karışımlarla (F, G, H ve I) 30 °C’de yapılan deneylerdeki BA değerlerinde %1,4 ile %6,8 arasında, 75 °C sıcaklıktaki aynı karışımlarla yapılan deneylerdeki BA değerlerinde ise %5 ile %13,5 arasında düşüş tespit edilmiştir (Şekil 5.12 ve Şekil 5.13). Dönmeyen ve döner elektrotlarla yapılan işlemlerde A, B ve su (W) dielektrik hariç diğer bütün karışımlarındaki sıcaklık artışı, BA değerlerini genel olarak düşürmektedir. BA’nın düşmesinin sebebi İİH’nin artmasındandır.

Hem döner hem de dönmeyen elektrotlarla yapılan işlemlerde gerek 30 °C’de ve gerekse 75 °C’de su dielektrik, silikon yağı (A) ve karışımlarına (B-I) nazaran çok daha düşük BA değerleri elde edilmiştir. Bu duruma, suyla daha yüksek İİH değerleri ve nispeten daha düşük EAH değerlerin elde edildiğinden kaynaklandığı tespit edilmiştir.



Şekil 5.12. Dönmeyen elektrotla işlemede farklı karışımların 30 ve 75 °C'deki BA'ları

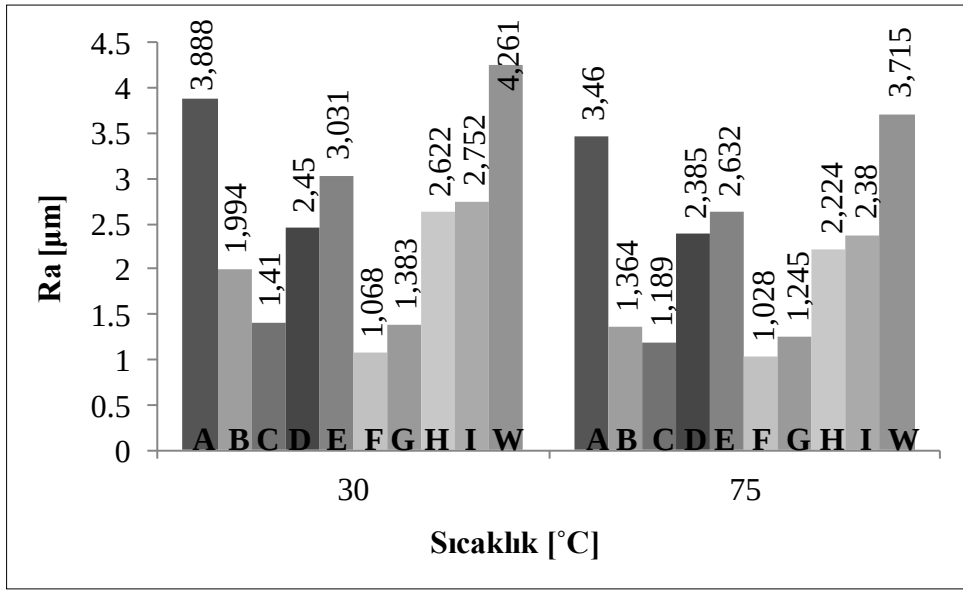


Şekil 5.13. Döner elektrotla işlemede farklı karışımların 30 ve 75 °C'deki BA'ları

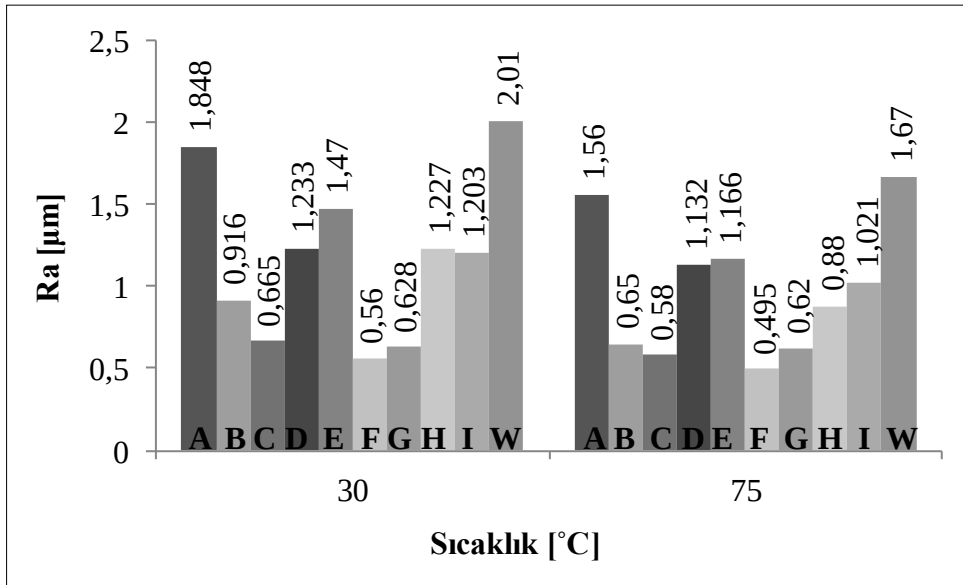
5.6. İşparçalarının Yüzey Pürüzlülük Değerlerinin Karşılaştırılması

Dönmeyen ve döner elektrotla yapılan deneylerde (30 °C ve 75 °C'de) farklı konsantrasyonlardaki dielektrik sıvılar için işparçalarının R_a değerlerinin değişimi sırasıyla Şekil 5.14 ve Şekil 5.15'de gösterilmiştir. Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağına 10 g/lt ve 15 g/lt karbon tozu katkısı (karışım B ve C), 30 °C ve 75 °C'de R_a değerlerini azaltmıştır (Şekil 5.14). Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağına 10 g/lt ve 15 g/lt nişasta tozu katkısı (karışım D ve E) 30 °C ve 75 °C'de R_a değerlerini azaltsa da bu iyileşme karbon tozu katkısındaki iyileşme kadar belirgin değildir. Silikon yağına 10 g/lt karbon ve 15 g/lt nişasta tozu katkılı karışımda (F) yapılan deneylerde diğer karışımlara göre oldukça düşük R_a değerleri tespit edilmiştir. Su dielektrikte yapılan deneylerde katkısız silikon yağı ve toz katkılı silikon yağı karışımlarına nazaran daha pürüzlü yüzeyler elde edilmiştir. Döner elektrotla yapılan işlemlerde (Şekil 5.15), silikon yağına yapılan toz katkıları dönmeyen elektrotla yapılan işlemlerle (Şekil 5.14) benzer karakteristik özellikler göstermektedir. Gerek sabit gerekse döner elektrotla yapılan deneylerde silikon yağına 10 g/lt karbon ve 15 g/lt nişasta tozu katkılı karışım (F) diğer karışımlara göre gerek 30 °C gerekse 75 °C'de en düşük R_a değerlerini vermiştir (Şekil 5.14 ve Şekil 5.15). Dönmeyen ve döner elektrotla 30 °C ve 75 °C'de silikon yağı (A) ve karışımları (B-I) ile yapılan EEİ delik delme deneylerinde işlenmiş yüzeylerin R_a 'sı suya kıyasla daha düşük çıkmıştır (Şekil 5.14 ve Şekil 5.15). Bu sonuçlara göre, daha kalite/düzgün ve hassas (daha düşük R_a 'ya sahip yüzeyler) yüzeylerin işlenmesinde silikon yağının ve karışımlarının

kullanılabilir bir dielektrik olabileceği görülmüştür. Hatta en düşük R_a değeri ($0,495 \mu\text{m}$) 75°C 'de F karışımında döner elektrotla işlemede elde edilmiş ve bu değerin, katkısız silikon yağına (A) kıyasla yaklaşık %69 daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 5.15). Yani, silikon yağına yapılan karbon ve nişasta tozu katkılarının işleme yüzeylerini daha da iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca silikon yağının (A) ve karışımlarının (B-I) ısıtmak ve elektrotu döndürmek R_a 'yı azalttığı tespit edilmiştir [166, 167].



Şekil 5.14. Dönmeyen elektrotla farklı karışımlarda işlemede işparçalarının R_a 'ları



Şekil 5.15. Döner elektrotla farklı karışımlarda işlemede işparçalarının R_a 'ları

5.7. Mikro Yapı Karşılaştırılması

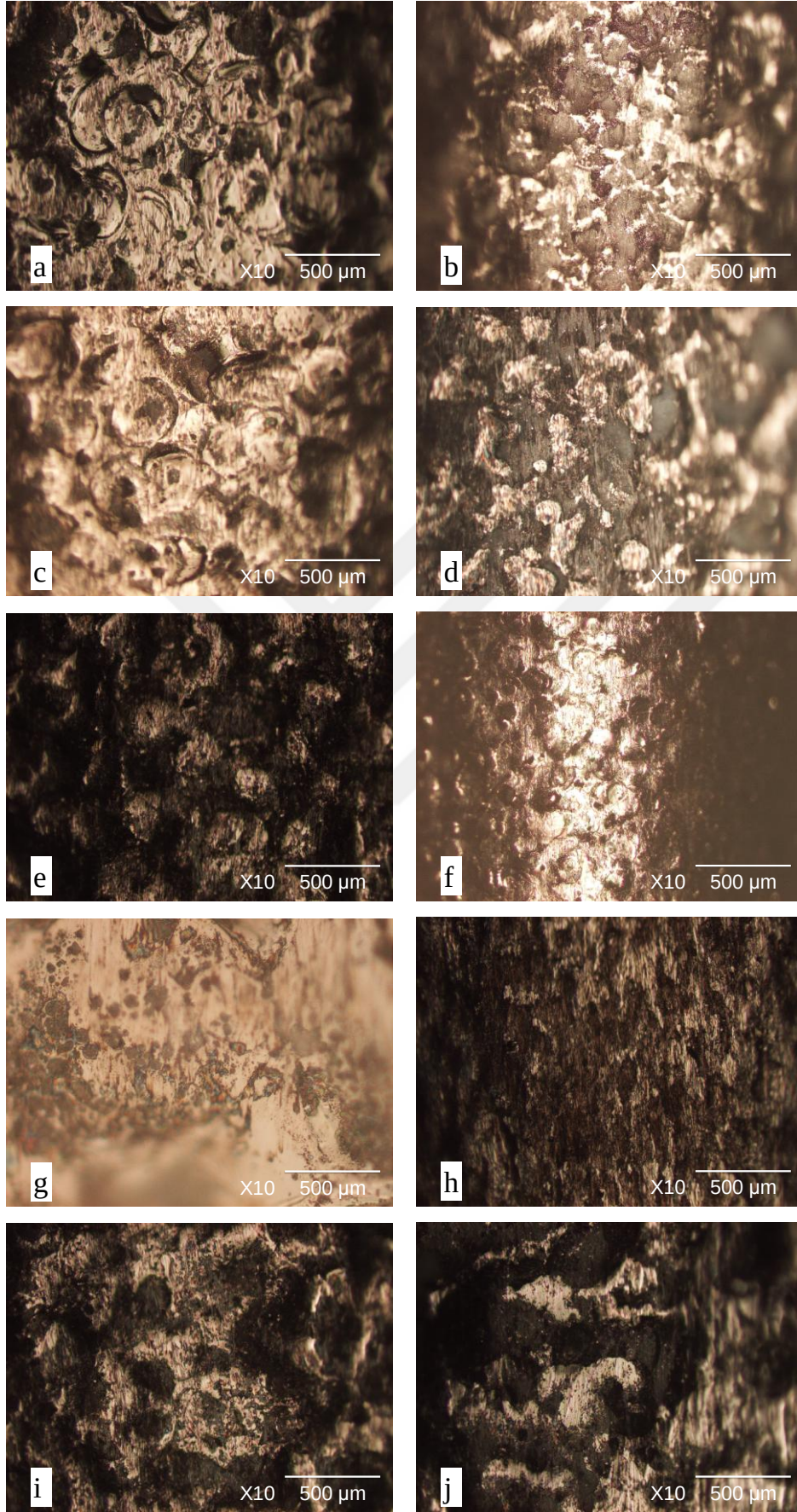
Bu çalışmada, silikon yağı içerisine karıştırılan nişasta ve karbon tozu yanında silikon yağının yüksek sıcaklıklara kadar problemsiz ısıtılabilmesi sayesinde ısıtmanın, karıştırılan tozların ve toz derişimlerinin yüzey topoğrafyasının değişimine etkisi incelenebilmiştir.

Şekil 5.16'da silikon yağı (A) ve karışımlarıyla (B-I) ve suyla (W) 140 bar basınçta ve sabit EEİ parametreleriyle ($I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s ve $t_p=50$ μ s) işlenmiş yüzeylerin optik (ışık) mikroskobu fotoğrafları görülmektedir. Burada, karbon tozu katkılı olan B (10 g/lt) ve C (15 g/lt) karışımlarıyla (Şekil 5.16.b ve Şekil 5.16.c), her ikisi de sadece nişasta tozu katkılı olan D (15 g/lt) ve E (30 g/lt) karışımlarıyla (Şekil 5.16.d ve Şekil 5.16.e) ve ayrıca G-H-I karışımlarıyla (Şekil 5.16.g, Şekil 5.16.h ve Şekil 5.16.i) işlenmiş yüzeylerin optik (ışık) mikroskobu fotoğrafları, oldukça yakın görsel özellikler sergilediği ve kıyaslama açısından anlamlı farkların oluşmadığı görülmüştür. Fakat Şekil 5.16.a, Şekil 5.16.b, Şekil 5.16.f ve Şekil 5.16.j'ye bakıldığında daha belirgin farklılıkların olduğu gözlemlenebilir.

Buna göre, döner elektrotla 75°C'de katkısız silikon yağıyla (A) yapılan işlemede, işparçası yüzeyinde geniş kraterler görülmektedir (Şekil 5.16.a). Silikon yağına 10g/lt karbon tozu katkısı (B) birim alanda daha çok sayıda ancak daha sığ ve küçük çaplı kraterler oluşmasını sağlamış, yüzey tepelerinin sivri uçları yuvarlanmıştır (Şekil 5.16.b).

Silikon yağına 10 g/lt karbon ve 15 g/lt nişasta tozu katkılı karışımla (F) yapılan işlemede işparçası yüzeyindeki kraterlerin sivri uçları oldukça azalmış ve işparçası yüzeyi nişasta tozunun aşındırma (cılalama) etkisi sayesinde daha parlak bir görüntü almıştır (Şekil 5.16.f).

Daha önce Tsai ve arkadaşlarının EEİ dışı bir uygulama çalışmalarında da benzer bir parlatma etkisi sağlandığı tespit edilmişti [164]. 75°C'de döner elektrot ve su (W) dielektrikle yapılan işlemede işparçası yüzeyinde karbon kalıntılarının yoğun olduğu kratersi yapı ve oldukça derin vadiler dikkat çekmektedir (Şekil 8.16j). Buna karşın 75°C'de döner elektrot ve katkısız silikon yağı (A) dielektrikle yapılan işlemede işparçası yüzeyinde nispeten daha az karbonlaşmış bölgeler görülmektedir. Krater çapları su ile işlenmiş yüzeylerdekilere nazaran daha küçük ve sivri tepeler nispeten daha azdır (Şekil 5.16.a).



Şekil 5.16. Karışımlarda işlenmiş yüzeyler: a)A, b)B, c)C, d)D, e)E, f)F, g)G, h)H, i)I, j)W

Su dielektrikle işlenmiş yüzeydeki karbon birikimleri ve derin vadiler, bu dielektriğin yüksek İİH değerleri vermesine rağmen düşük R_a istenen yüzeylerin işlenmesinde sıkıntılar oluşturabileceğini göstermiştir. Bir başka açıdan, su dielektriğin yüksek İİH değeri sağlaması pratikte özellikle hızlı işlemlerde (yüksek boşalım akımları, yüksek vurum süreleri gibi) oldukça kolaylık sağlayabileceği de göz ardı edilmemelidir.

5.8. Ti6Al4V İşparçasıyla Yapılan Deneylerinin Sonuçları

Bu çalışmanın MFS modelinin başka bir malzemeye doğrulanması için Ti6Al4V levhalarla 3 A boşalım akımı, 25 μ s vurum süresi ve 50 μ s bekleme süresinde işleme deneyleri yapılmıştır. Bu işleme koşullarında dönmeyen 2 mm'lik bakır elektrotla 140 bar püskürtme basıncındaki suyla EEİ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Aynı işleme deneyi 3 kez tekrarlandıktan sonra İİH ve EAH değerlerinin ortalaması alınmıştır (Çizelge 5.1). İşleme deneyleri başarıyla gerçekleştirilerek Ti6Al4V levhalara 2 mm'lik 20 mm derinliğinde delikler delinmiştir.

Çizelge 5.1. Ti6Al4V işparçalarıyla EEİ'de delik delme deneylerinin sonuçları

Deney No	EEİ Parametreleri	İİH [mm ³ /dak]	EAH [mm ³ /dak]
1	3 A akım, 25 μ s vurum ve 50 μ s bekleme süresi	1,438	5,118x10 ⁻³
2	3 A akım, 25 μ s vurum ve 50 μ s bekleme süresi	1,610	8,258x10 ⁻³
3	3 A akım, 25 μ s vurum ve 50 μ s bekleme süresi	1,402	5,938x10 ⁻³
Ort.	İİH ve EAH'nın ortalama değerleri	1,483	6,438x10 ⁻³

5.9. Çalışmada Yapılan İlave Deneylerin Sonuçları

Bu çalışmada, düşük İİH ve yüksek R_a sonuçlarının elde edilmesinin sebebi; çalışmanın en özgün yanlarından biri olan silikon yağı kullanımıdır. Gaz yağı dielektrikle bu çalışmada elde edilenden daha iyi R_a ve daha yüksek İİH değerlerine ulaşılabilmesi mümkündür. Fakat, gaz yağı dielektriğin 42 °C'den daha yüksek sıcaklıklara ısıtılması ve içerisine homojen dağılımlı nişasta tozu katkısı da mümkün değildir (alev alma ve nişasta topaklanması sorunlarından dolayı). Diğer bir deyişle, ısıtmanın ve nişasta katkısının R_a ve İİH'yi nasıl etkileyebileceğinin araştırılması ancak dengeli reolojik davranışlarıyla bilinen

silikon yağı kullanımıyla mümkün olmuştur. Buna karşın, silikon yağının çalışmada yarattığı olumsuzluklar çok detaylı olarak Bölüm 5.4'te belirtilmiştir.

Tüm bu olumsuzluklara rağmen, daha iyi R_a ve yüksek İİH değerleri elde edebilmek amacıyla çalışmada yeni deneyler yapılmış ve sonuçları yorumlanmıştır. Yapılan deneyler, seçilmiş olan işleme parametreleri ve elde edilen sonuçların yorumlanması/tartışılması aşağıda sunulmuştur;

5.9.1. R_a değerini iyileştirme çalışmaları

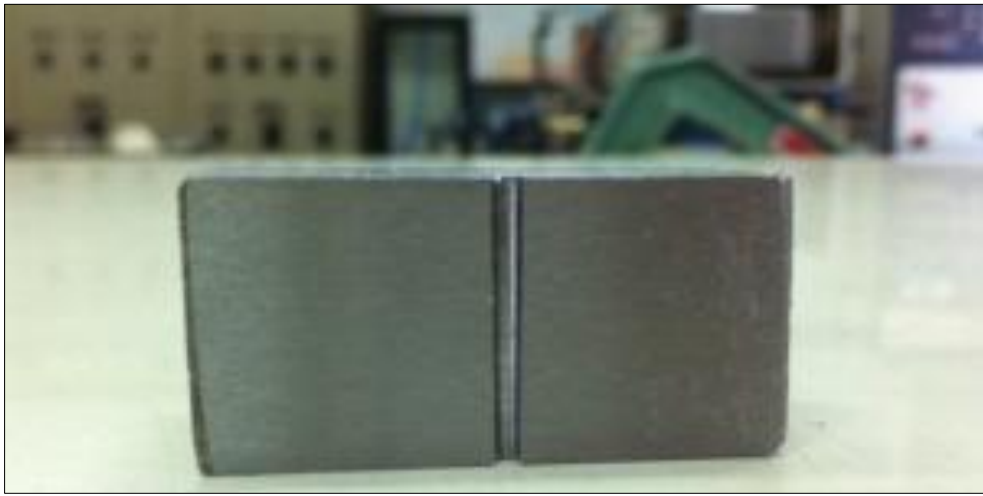
Bölüm 5.5 ve Bölüm 5.6'da sunulduğu üzere elektrotu döndürerek, silikon yağını ısıtarak ve karbon-nişasta tozlarını silikon yağına belirli oranlarda katarak delik yüzeyinin R_a 'sında iyileştirmeler sağlanabilmişti. Fakat, elde edilen en iyi R_a değeri 0,495 μm seviyesinde idi (3 A boşalım akımı, 25 μs vurum süresi, 50 μs bekleme süresi, 75 °C sıcaklık, F karışımı, döner elektrot için). Çalışmada yapılan deneylerde delik delme sürelerini kısaltabilmek amacıyla, öngörülen 12 μs vurum süresi yerine 25 μs vurum süresi kullanılması doğal olarak R_a 'nın da yüksek değerlerde çıkmasına sebep olmuştur. Deliğin R_a değerlerinin 0,3 μm civarına düşürülmesi için 75 °C'de F karışımında 2 mm'lik döner elektrotla (1000 dev/dak) farklı EEİ parametrelerinde deneyler yapılmıştır. Altı farklı işleme parametre seti kullanılmış (Çizelge 5.2) ve 1,5 A boşalım akımı, 3 μs vurum süresi, 50 μs bekleme süresinde R_a 0,34 μm değeri elde edilebilmiştir (Şekil 5.18). Çizelge 5.2'den görüldüğü üzere İİH'de belirgin bir düşüş gözlenmiştir.

Endüstriyel uygulamalarda, çalışmada kullanılan tüp elektrotlarla delik delmede önce yüksek vurum süresi ve yüksek akım kullanılarak deliğin kaba boşaltılması yapılacağından ek deneylerde elde edilen düşük İİH bitirme/finiş işlemi için sıkıntı yaratmayacaktır (son bitirme/finiş işlemi için makul bir İİH değeri).

Böylece çalışmada, R_a değeriyle ilgili hedeflenen değere önemli ölçüde yaklaşılmış ve makul bir İİH değeri için sadece kendi başına pürüzlülüğü 0,3 mikron civarlarına indirebilecek çalışma koşulları ve işleme parametrelerini elde etmeye yönelik ilave çalışmalar yapılması gereksinimi karşılanmıştır.

Çizelge 5.2. 75 °C'de F karışımında döner elektrotla farklı EEİ parametrelerindeki deneyler

Deney No	EEİ Parametreleri	R _a (ort.) [μm]	İİH [mm ³ /dak]
1	3 A boşalım akımı, 12 μs vurum süresi, 50 μs bekleme süresi	0,93	0,732
2	3 A boşalım akımı, 6 μs vurum süresi, 50 μs bekleme süresi	0,84	0,604
3	3 A boşalım akımı, 3 μs vurum süresi, 50 μs bekleme süresi	0,72	0,532
4	1,5 A boşalım akımı, 12 μs vurum süresi, 50 μs bekleme süresi	0,57	0,218
5	1,5 A boşalım akımı, 6 μs vurum süresi, 50 μs bekleme süresi	0,46	0,117
6	1,5 A boşalım akımı, 3 μs vurum süresi, 50 μs bekleme süresi	0,34	0,024

Şekil 5.17. İşlenmiş AISI4140 numune ($I_d=1,5$ A, $t_d=3$ μs, $t_p=50$ μs) ($R_a=0,34$ μm)

5.9.2. İİH değerini 4 mm³/dak üzerine çıkarma çalışmaları

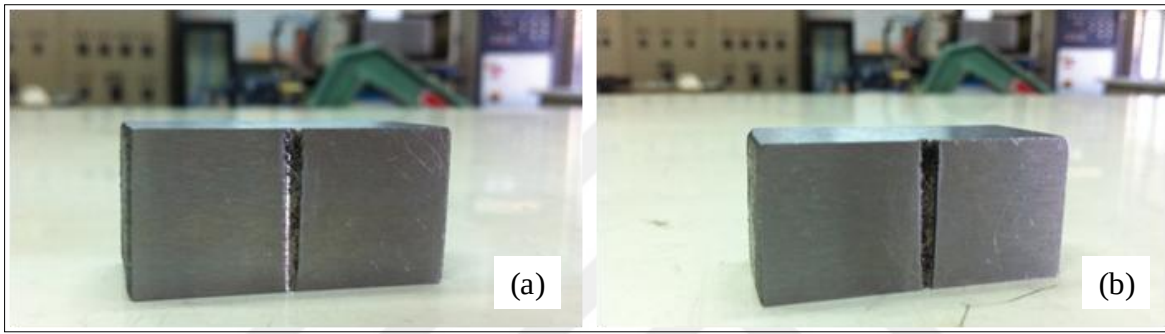
Çalışmada elde edilen en yüksek İİH değeri 3 A boşalım akımı, 25 μs vurum süresi, 50 μs bekleme süresi, 75°C sıcaklık, B karışımı ve döner elektrotla yapılan işlemede 1,895 mm³/dak'dır. (Bkz. Şekil 5.9). Bu bilgiler ışığında, aynı sıcaklık, aynı karışım ve 2 mm'lik döner elektrotla (1000 dev/dak) farklı işleme koşullarında iki grup ek deney daha yapılmıştır.

Yapılan ilk grup ek deneylerde; Çizelge 5.3'deki işleme koşulları kullanıldığında, görüldüğü üzere 12 A boşalım akım ve 800 μs vurum süresi için 21,35 mm³/dak'a varan İİH değerleri elde edilmiştir. Fakat, bu durumda elde edilen R_a değerleri sadece "kaba boşaltma" için makul görülebilecek değerlerdir. Elde edilen delik yüzeyleri kaba (yüksek R_a) olduğu kadar yüzey yanmasından, karbon birikiminden ve çapaklardan olumsuz

etkilenmiştir (Şekil 5.19). Ayrıca Şekil 5.19.b'deki delikte yüksek vurum süresinden dolayı aşırı koniklik dikkat çekmektedir.

Çizelge 5.3. 75 °C'de B karışımında farklı EEİ parametrelerindeki deneyler

Deney No	EEİ Parametreleri	R _a (ort.) [µm]	İİH [mm ³ /dak]
1	12 A boşalım akımı, 200 µs vurum ve 100 µs bekleme süresi	8,59	12,66
2	12 A boşalım akımı, 400 µs vurum ve 100 µs bekleme süresi	9,53	15,20
3	12 A boşalım akımı, 800 µs vurum ve 100 µs bekleme süresi	11,84	21,35



Şekil 5.18. Farklı EEİ parametrelerinde kaba işlemler: a) 12 A-400 µs, b) 12 A-800 µs

Yapılan ikinci grup ek deneylerde; R_a'yı makul bir değerde tutabilmek için EEİ parametreleri olarak daha önceki deneylerde kullanılan 3 A boşalım akımı ve 50 µs bekleme süresi sabit tutulmuş, yüzey pürüzlülüğünde ikinci önemde etkin işleme parametresi olan vurum süresi değeri olarak 50 µs'ye yükseltilmiştir. Bu deneyler, B karışımında ve 2 mm'lik döner elektrotla gerçekleştirilmiştir. Aşağıda deneylerde kullanılan diğer parametreler sunulmuştur;

- ✓ B karışımı gaz kabarcığı çıkma başlangıcı olan 93 °C'ye kadar ısıtılmıştır. Silikon yağı karışımında önemli seviyede akışkanlık sağlanmıştır.
- ✓ İşleme ortamının daha etkin temizlenmesi için tezgah kısa süreli kafa kaldırma moduna ayarlanmıştır. Bunun için tezgahın çalışma süresi 8. kademeye (12,8 s) ve geri çekilme süresi 2. kademeye (0,2 s) ayarlanmıştır. Bu çalışma rejimi, İİH'yi oldukça yükseltmiş, ancak delik boyut hassasiyetini olumsuz etkilemiştir. Delik çapı %6-11 civarında büyümüştür (delik boyut hassasiyet kaybı). Ayrıca, kafa kaldırma hareketi sırasında yaşanan ölü zamanlar toplam delik delme süresini az da olsa artırmıştır.

- ✓ Vurum süresinin 50 μ s'ye yükseltilmesi, kafa kaldırma modunun işleme ortamı temizliğini oldukça kolaylaştırması ve B karışımının sıcaklığının 75 °C'den 93 °C'ye artırılması, İİH'nin 4,26 mm³/dak değerine çıkmasına olanak sağlamıştır. Fakat, bu sıcaklıkta silikon yağından çıkmaya başlayan aşırı buharın laboratuvar ortamından uzaklaştırılması gerektiği tespit edilmiştir. B sıvısı içerisinde nişasta tozunun olmaması (silikon yağına nişasta tozu katkısı işleme rejimini/sürekliliğini olumsuz etkilemekte) İİH'nin artışında önemli katkı sağlamıştır. Bu koşullarda (ek deneyler) yapılan ek işleme deneylerindeki ortalama yüzey pürüzlülüğü değerinde (1,78 μ m) ilk deneylerde elde edilenlere değere (1,3 μ m) göre çok büyük bir değişim görülmemiştir. Böylece, “su dışındaki bir dielektrikle sadece İİH'yi 4 mm³/dak'a çıkartabilecek çalışma koşulları ve işleme parametrelerini elde etmeye yönelik ilave çalışmalar yapılması” gereksinimi karşılanmıştır.

5.9.3. Silikon yağıyla 1 mm'lik elektrot kullanılarak delik delme çalışmaları

Deneyisel çalışmalarda 1 mm ve altındaki çaplardaki elektrotların içinden silikon yağı püskürtmesi sağlanamadığı için 2 mm'lik elektrotların kullanılması zorunluluğu doğmuştur. Daha üst seviyede başarı (silikon yağıyla 1 mm'lik delik delebileme) sağlama amaçlı olarak aşağıdaki yöntemler uygulanmıştır;

- ✓ 1 mm çapında delik delinmesi ve deliğin parlatılması için ek deneyisel çalışmalar yapılmıştır. Toz katkısız ısıtılmamış gaz yağı dielektrik kullanılarak, 3 A boşalım akımı, 25 μ s vurum süresi, 50 μ s bekleme süresi, 1 mm'lik elektrot ortasından 140 bar püskürtme basıncı ve 1000 dev/dak dönme hızında iki adet işparçasına 1 mm çapında ve 20 mm derinliğinde delikler başarıyla delinmiştir.
- ✓ Başarıyla gerçekleştirilen ilk delme işleminden sonra işparçası numunesi mendenen sökümü, delik R_a değeri ortalama 0,58 μ m (delik başında 0,53; ortasında 0,58 ve sonunda 0,64 μ m) olarak ölçülmüştür.
- ✓ Daha sonra ikinci deneyin işparçası numunesi mendeneye bağlanarak delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deliğin çapı küçük olduğundan elektrot-delik relatif pozisyonunun bozulmaması için ikinci deneyin numunesi mendenen sökülmemiş, seramik kılavuzdan elektrot değişimi yapılmamıştır (EK-14). Takiben tank içerisindeki gaz yağı dielektrik boşaltılmış, tank kurutulmuş, F karışımı tanka doldurulmuş (işparçası üst yüzeyini örtecek seviyede) ve 75 °C'ye kadar ısıtılmıştır.

- ✓ 1 mm'lik elektrot içinden F karışımı akamadığı için elektrot sadece 1000 dev/dak dönüş hızında döndürülmüştür. Tıkanmalardan dolayı işlemenin durmaması için tezgah kafa kaldırma moduna (çalışma süresi 5. kademeye (1,6 s) ve geri çekilme süresi 7. kademeye (6,4 s)) ayarlanmıştır.
- ✓ Daha sonra 3 saat süreyle delik parlatması yapılmıştır. Bu sürenin ilk 35 dakikasında F karışımında bulunan karbon tozu sayesinde boşalım kıvılcımları oluşmuş (sesten anlaşılmış), ancak bu süre içinde elektrotun çok düzensiz bir ilerleme ve işleme rejimi sergilediği görülmüştür. İşleme sırasında elektrot yaklaşık 18-20 kere delikten çıkmıştır. Bu süre sonunda elektrot ucu delik dibine erişmiştir. Deneyin başında işparçası numunenin altına konan çelik saca dokunma nedeniyle elektrot kendiliğinden geri çekilmiştir (ortadan püskürtme olmadığından derin delik dibinde aşırı sayıda ark tipi vurum oluşumu başlamış ve bunun sonucunda tezgahın servo kontrol sistemi kafayı (elektrotu) geri çekmiştir).
- ✓ Elektrot geri çekildiğinden (ilk 35 dakika sonrası) dolayı işleme yapılamamış bu yüzden tezgah “dokunma ayar” moduna getirilmiştir (sadece elektrotun işparçasına ilk dokunduğu dikey pozisyonun tespiti için seçilen bir ayar modudur). Bu modda tezgah, elektrotu aşağı doğru ilerletmekte ve işparçasına dokunma noktasına erişince sesli bir uyarı vererek elektrotu o pozisyonda tutmaktadır. Deney, sadece elektrotun delik içinde döndüğü durumda (parlatma amaçlı) 2,5 saat sürdürülmüştür. Bu sırada elektrot-delik arasında dielektrik püskürtmesi mümkün olmadığından (elektrot içinden püskürtme olmadığından) 2,5 saat süresince manuel olarak her 5-6 dakikada bir elektrot 20 mm yukarı kaldırılarak elektrot-işparçası arasına taze F karışımı sıvısı girmesi sağlanmıştır. Deney sonunda karbon ve nişasta tozlarının delik yüzeyini aşındırarak parlatma etkisi sayesinde R_a değerlerinde %12 civarında iyileşme sağlanarak R_a değeri ortalama 0,51 μm olarak ölçülmüştür (delik başı 0,48; ortası 0,50 ve sonu 0,55 μm R_a).
- ✓ Bu durumda var olan 1 mm'lik elektrot kullanılarak ancak işleme boşalımları kullanılmaksızın her ne kadar yavaş bir parlatma söz konusu olsa da F karışımı içerisindeki her iki tozun bir arada yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmede etkili olduğu ortaya konmuştur.

6. MFS MODELİNİN TASARIMI

Bu çalışmada, EEİ'de daha önce denenmemiş olan ve birden çok fiziksel olguyu sahip MFS modelinin tasarlanması amaçlanmıştır. MFS modeli sayesinde yapılacak analizlerle EEİ'nin karmaşık teorisine açıklık getirecek öncü bir çalışma yapılması da amaçlanmıştır. MFS modelinin, bilime yenilik getirecek olmasının yanı sıra EEİ'de modellemeyi yeni bir alana (tam modellemeye) taşıyacağı düşünülmektedir. Ayrıca zamana bağlı (transient) MFS modeli, ön mühendisliğe de katkı sağlayarak EEİ'de, işleme öncesi tahminler yapabilme olanağı sunabilecektir.

MFS modelinin tasarımından önce, literatürdeki mevcut model çalışmaları incelenerek özellikle tasarım aşamasında ve kabullerin yapılması aşamasında, olumlu katkılar sağlayabilecek noktaların belirlenmiştir. Ayrıca, mevcut model çalışmalarının olumsuz sayılabilecek yönleri değerlendirilip tasarım aşamasında bunlardan kaçınılmıştır. MFS modelinin tasarımında, ANSYS 14.0 Release içerisindeki CFX programı kullanılmıştır. Tasarlanan MFS modelinin diğer ısı model çalışmalarından farkları aşağıdaki şekilde sıralanabilir;

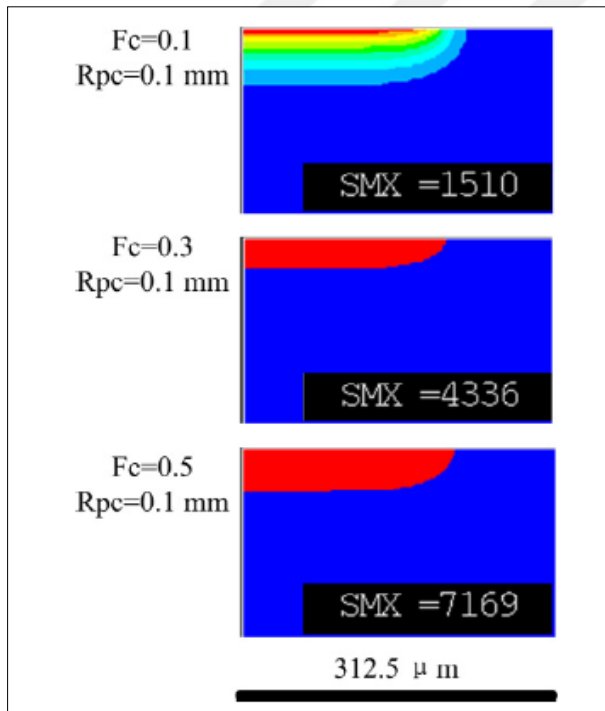
- ✓ Süre kontrollü akım değeri verebilme (vurum süresi ve bekleme süresi kavramı),
- ✓ Elektriksel ısınma (ing. joule heating) ile plazma oluşumu,
- ✓ Dielektrik sıvının yüksek sıcaklıktaki (plazma fazındaki) zamana bağlı fiziksel özellikleri (C_p , k , σ),
- ✓ Plazma ortamı sayesinde elektrottan işparçasına elektriksel ısınmayla ısı transferi,
- ✓ Elektromanyetizma (manyetizma kullanılmadan sadece elektrik alan modellenmesi),
- ✓ Taşınım ile ısı transferi (doğal konveksiyon),
- ✓ Radyasyon (ışınım) ile ısı transferi,
- ✓ Dielektrik sıvıda akış,
- ✓ EEİ esnasında işparçası yüzeyinde kaldırılan talaşın belirli bir miktarının tekrardan yüzeye katılması kavramı,
- ✓ Gerçek EEİ koşullarına benzeyen iki boyutlu model geometrisi,

MFS modelinde, bu gibi fiziksel olayların hepsi birlikte (eş zamanlı) ve zamana bağlı (ing. transient) olarak EEİ'nin teorik analizleri gerçekleştirilmiştir. Modelde hiçbir ampirik

denklem kullanılmamış ve gerçek EEİ koşullarını yansıtacak sınır şartları ve başlangıç şartları belirlenmiştir. Model için yapılan ihmaller makul düzeyde tutulmuştur.

6.1. MFS Modelinin Tasarımında Faydalanılan Literatürde Yapılmış Kabuller

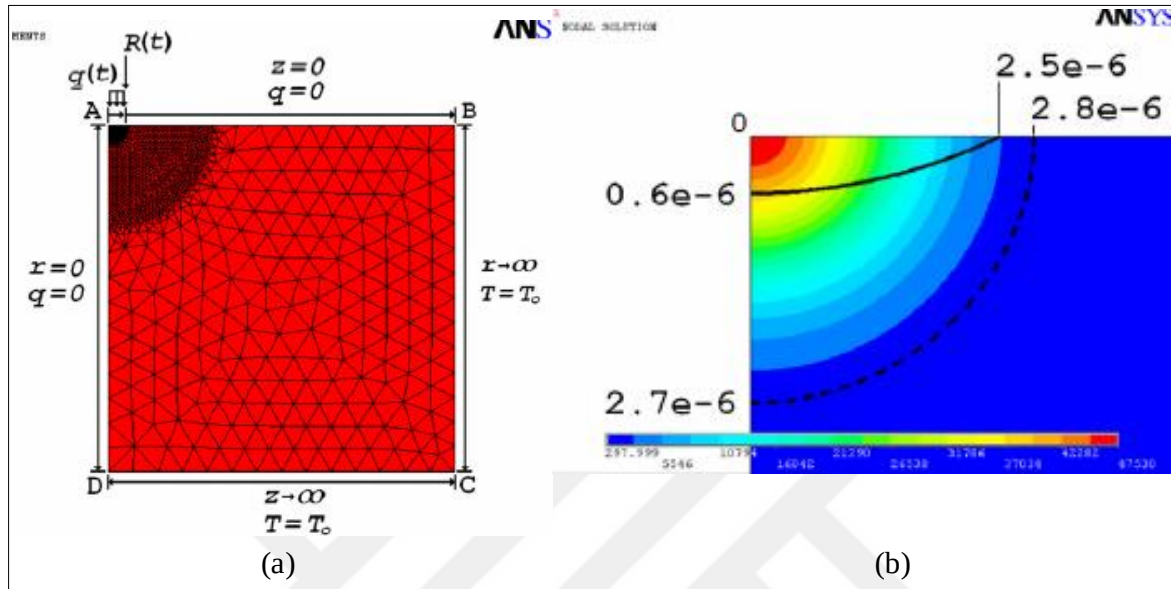
Hem iki boyutlu model çalışmalarında hem de üç boyutlu model çalışmalarında araştırmacılar tarafından, işparçasının ergime sıcaklığını aşan bölgeleri gerek elle (manuel) gerekse programlar vasıtasıyla ölçümleri alınarak işparçasından kaldırılan talaşın hacmi hesaplanmıştır [64-71, 73, 75, 78, 80, 81, 83, 87, 92, 93, 96, 97, 100, 101, 105, 107]. Bu kabulü birkaç örnek çalışmayla açıklamak gerekirse; Zhang ve arkadaşlarının çalışmasında işparçası yüzeyine tanımlanan noktasal ısı kaynağı yardımıyla işparçası içerisinde sıcaklık eğrileri elde edilmiştir. Daha sonra işparçası erime sıcaklığını aşan sıcaklık eğrileri program vasıtasıyla kırmızı renkle belirlenip erimiş bölge (kaldırılan talaş bölgesi) elde edilmiştir (Şekil 6.1) [67].



Şekil 6.1. Zhang ve arkadaşlarının çalışmasında işparçasındaki sıcaklık eğrileri [67]

Yine bu kabul sadece İİH değerinin hesaplanmasından ziyade, yüzey pürüzlülüğü değerinin belirlenmesinde [101, 107] de kullanılmıştır (Şekil 6.2). Tan ve arkadaşının çalışmasında, iki boyutlu modelde işparçası yüzeyine tanımlanan noktasal ısı kaynağı

sayesinde işparçası içerisinde sıcaklık eğrileri (Şekil 6.2.a) elde edilmiş ve bu eğrilerden erime sıcaklığını aşan eğrilerin erimiş bölge kabul edilmesiyle bölge üzerinden uzunluk ölçümleri alınarak teorik yüzey pürüzlülük (Şekil 6.2.b) değerleri hesaplamışlardır [101].

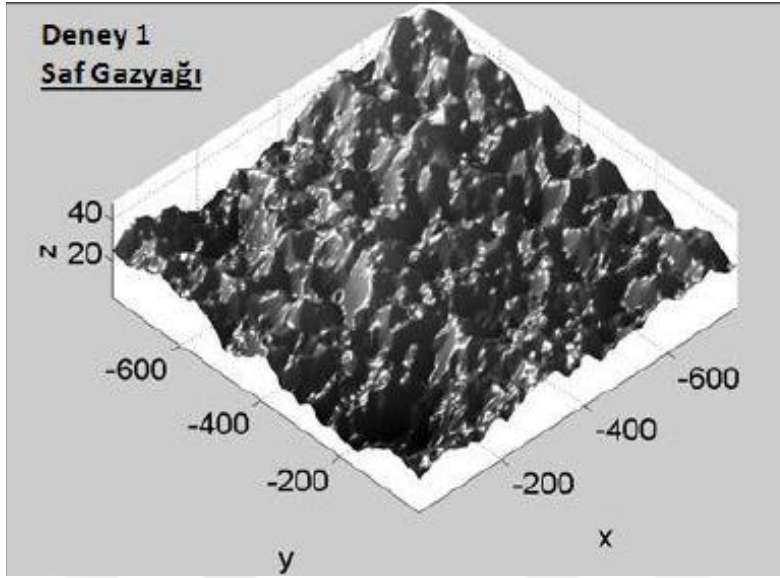


Şekil 6.2. Tan ve arkadaşlarının çalışması: a) model, b) sıcaklık dağılımları [101]

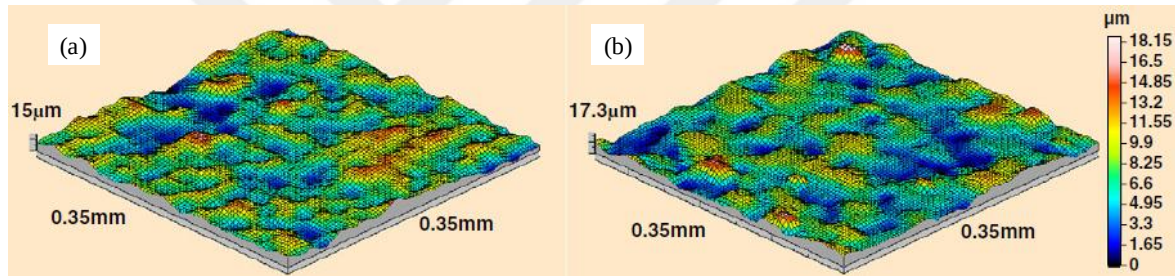
Hem iki boyutlu model çalışmalarında hem de üç boyutlu model çalışmalarında araştırmacılar tarafından, elektrottan işparçasına ısı aktarımı plazma kanalı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Bazı çalışmalarda ısı kaynağı noktasal tanımlanırken [101, 105, 107], birçok çalışmada silindirik kanal olarak tanımlanmıştır [64-69, 71, 73, 74, 80]. Bu noktaya kadar model çalışmalarında yapılan plazma kanalı kabulü makul görünse de, tasarım aşamasında plazma bölgesi bir geometri olarak tasarlanıp elektrot ve işparçası arasına yerleştirilmiştir. Oysa ki, EEİ'de kıvılcım dielektrik sıvı içerisinde elektrotla işparçası arasındaki en kısa mesafede kendiliğinden oluşur. Olayın bilimsel açıklaması: bir iletken gerilim uygulandığı zaman, iletken içinde meydana gelen elektrik alanının yönü: (+) kutuptan (-) kutba doğrudur. İletken içindeki serbest elektronlar (-) yüklü olduklarından bunların hareketi elektrik alan yönüyle zıttır [168]. Vurum jeneratöründen elektrotla işparçası arasına akım uygulandığı zaman, elektrotla işparçası arasındaki en yakın mesafede elektriksel alan güçlenmekte ve akımın bu bölgeden geçme potansiyeli oldukça artmaktadır. Birbirine eşit uzaklığa sahip iki iletken levha arasında bu etkileşimin görülmesi neredeyse imkansızdır. İki iletken arasında elektron atlaması, daima birbirine en yakın (en sivri uç) noktalarda gerçekleşir. Yağmurlu havalarda yıldırımın yeryüzünden bulutlara en yakın olan noktaya ve genellikle iletken sivri objeler düşmesi de bu sebeptendir.

EEİ'nin işleme koşullarında da bu durum mevcuttur. Zaten hiçbir malzemenin pratikte yüzeyi pürüzsüz (girintisiz-çıkıntısız) değildir. Gerek malzemeler işlenmiş olsun gerekse işlenmemiş, yüzeyde bu girinti ve çıkıntılar mevcuttur.

MFS modelin geometrisinin tasarımında, dielektrik sıvı içerisinde kendiliğinden gerçekleşecek plazma kanalının oluşması için uygun geometrinin tasarlanması gerektiği düşünülmüş ve literatürde yüzey topoğrafyasıyla ilgili yapılmış çalışmalar incelenmiştir. Örneğin: Ünses'in çalışmasında [169], Ti-6Al-4V alaşımı işparçalarının, bakır elektrotla saf gaz yağı ve grafit tozu katkılı gaz yağında belirli EEİ parametrelerinde işlemler gerçekleştirilmiştir. İşlenmiş deney numunelerinin R_a değerlerinin yanı sıra işlenen yüzeylerin topoğrafyalarının çıkarılması için fotometrik stereo yöntemi kullanılan optik bir cihazla işlenen yüzeylerin fotoğrafları çekilmiştir. Fotometrik stereo yöntemi, iki boyutlu görüntülerden gölge bilgisini kullanarak üç boyutlu geriçatım elde etmede kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu yöntemde, kamera ve yüzey sabit tutulurken, farklı yönlerden, pozisyonları bilinen ışık kaynaklarıyla çekilmiş en az üç görüntüdeki parlaklık değerinin değişiminden ve ışık yönünden her piksel için yüzeyin normali hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu yüzey normallerinin altında kalan alan hesaplanarak yüzey derinlik bilgisine ulaşılmakta ve yüzey topoğrafisi oluşturulmaktadır. Matlab ile yazılmış bir kod ile iki boyutlu görüntüler üç boyutlu yüzey topoğrafyasına dönüştürülmüştür ve ölçeklendirilmiştir (Şekil 6.3). Şekil 6.3'te görülen yüzeyde, vadi ve tepeyi andıran girinti ve çıkıntıların açıkça görüldüğü bildirilmiştir. Saf gaz yağıyla işlemede, tepelerin uç kısımlarının oldukça sivri olduğu tespit edilmiştir. Yine, Izquierdo ve arkadaşları [108], EEİ'nin temel yönlerini anlamak için süperpoze edilmiş ardışık boşalımları simüle etme yeteneği olan termal bir model geliştirmişlerdir. Çok kıvılcım için geliştirilen üç boyutlu termal modelde, farklı işleme parametrelerine sahip iki farklı rejim için hem deneysel hem de simulasyon çalışmaları yapılmıştır. Her iki rejim için de yapılan EEİ deneylerinde: yüzey pürüzlülüğü, ısı etkilenmiş katman özellikleri ve bitirme operasyonları sonuçları, geliştirilen modelle tahmin edilmeye çalışılmıştır. Yüzey topoğrafyası açısından modelin analiz sonuçlarıyla, işlenmiş parçaların yüzey topoğrafya özellikleri iyi uyum sağladığını ve model sayesinde doğru tahminlerde buluna bildiklerini belirtmişlerdir (Şekil 6.4). Şekil 6.4.b'de görülen EEİ ile gerçek işlenmiş yüzeyin topoğrafyasında tepeleri andıran çıkıntılar görülebilmektedir.



Şekil 6.3. Üç boyutlu yüzey topoğrafyası [169]



Şekil 6.4. Yüzey topoğrafyası: a) tahmin edilen yüzeyin, b) gerçek işlenmiş yüzeyin [108]

Bu bilgilerin ışında, SEA programında elektrik akımının elektrottan işparçasına geçişini kolaylaştırmak ve plazmanın oluşabilmesini sağlayabilmek için iki boyutlu modelin tasarımında, elektrot ve işparçası arasında sivri uç geometrisi öngörülmüştür.

6.1.1. MFS modelinde yapılan kabuller ve ihmaller

- ✓ MFS modelinde kullanılan dielektrik (su) başlangıçta saf olarak kabul edilmiştir. Analizlerin, tek çevrimde gerçekleştirileceği düşünülürse: birinci çevrim (vurum + bekleme) sonunda işparçasından kaldırılan talaşın ve elektrottan kopan parçaların dielektriğe karışmasında dolayı dielektriğin yoğunluğundaki artışın ve ortam kirliliğinin (analizde ikinci vurumun gerçekleştirilmeyeceği göz önüne alındığında) önemsiz olacağı düşünülerken modelde ihmal edilmiştir. Ayrıca, işleme ortamında ilk vurumdan sonra oluşabilecek hava kabarcıkları da model çalışmasında ihmal edilmiştir.

- ✓ Elektriksel boşalma, elektrotla işparçası arasındaki en yakın iki nokta arasında gerçekleşeceği için model geometrisi tasarlanırken elektrot ve işparçasına çıkıntılar verilerek pürüzlülük etkisi (girinti-çıkıntı) oluşturulmuştur. Bu geometri tasarlanırken daha önceden işlenmiş numunelerin yüzey özelliklerinin incelenmesi sonucunda benzeşim yapılarak üçgen şeklinde olması kabul edilmiştir.
- ✓ Model geometrisi tasarımında elektrotla işparçası arasındaki mesafe 5 μm olarak kabul edilmiştir (deneysel çalışmalar esnasında tezgah üzerindeki komparatör vasıtasıyla bu değer ölçülmüştür).
- ✓ Tek bir çevrim için gerçekleştirilen analiz sonucunda, elektrot ve işparçasından elde edilen sıcaklık eğrilerine bakılarak kaldırılan işparçası ve elektrot hacimleri hesaplanmıştır. İşparçasının ve elektrotun ergime sıcaklığını geçen eğrilerin üstünde kalan hacimler kaldırılan hacim olarak kabul edilmiştir.
- ✓ Teorik sonuçlarda TKK kavramı var olmadığından dolayı teorik sonuçların, deneysel sonuçlara nazaran daha büyük çıkması öngörülmektedir. Bu yüzden, TKK kavramının etkilerinin, model sonuçlarına yansıtılarak modelin güvenilirliğine ve doğruluğuna katkı sağlayacağı düşünülmüştür.
- ✓ MFS modelini doğrulama çalışmalarında izlenecek yöntem olarak: analiz sonuçlarından İİH değerinin hesaplanması için: iki boyutlu analiz sonuçlarının (mm^2/vurum) üç boyutlu deneysel çalışma sonuçlarıyla (mm^3/vurum) kıyaslanabilmesi adına, analizden elde edilen iki boyutlu ergimiş işparçası bölgesinin hayali olarak 360° döndürülmesiyle elde edilecek hacmin hesaplanmasıyla deneysel sonucun kıyaslanması şeklinde olması kabul edilmiştir.

6.2. MFS Modelinin Geometrisinin Oluşturulması

Bu model çalışmasının tek vurum için gerçekleştirileceği göz önüne alındığında, elektrotta ve işparçasında birer adet sivri ucun (çıkıntının) arzu edilen pürüzlülük etkisini sağlayacağı düşünülmüştür. Gerek literatürdeki yüzey topoğrafya çalışmalarından [108, 169] edinilen bilgilere gerekse bu çalışmanın işleme deneylerinden elde edilmiş yüzeylerin (Şekil 6.5) incelenmesinde elde edilen sonuçlara göre: elektrot ve işparçasına tasarlanacak çıkıntıların üçgen şeklinde olması model için daha uygun olacağına karar verilmiştir. Elektrot ve işparçasında tasarlanacak üçgen geometrinin tasarımında daha önce işlenmiş deney numunelerinin optik (ışık) mikroskop incelemelerinden faydalanılmıştır. Üçgen geometrinin boyutları belirlenirken işlenmiş parça yüzeyinden mümkün olduğunca çok

üçgeni andıran çıkıntılar belirlenmiştir. Bu irili ufaklı üçgensel bölgelerin ortalama taban uzunlukları $50\ \mu\text{m}$ ve ortalama yükseklikleri $17,5\ \mu\text{m}$ olarak hesaplandıktan sonra, tepe açısı 110° ($\tan\alpha = 25/17,5$ den; $\alpha=110^\circ$ hesaplanır) olan ikizkenar dik üçgen olarak tasarlanmıştır.

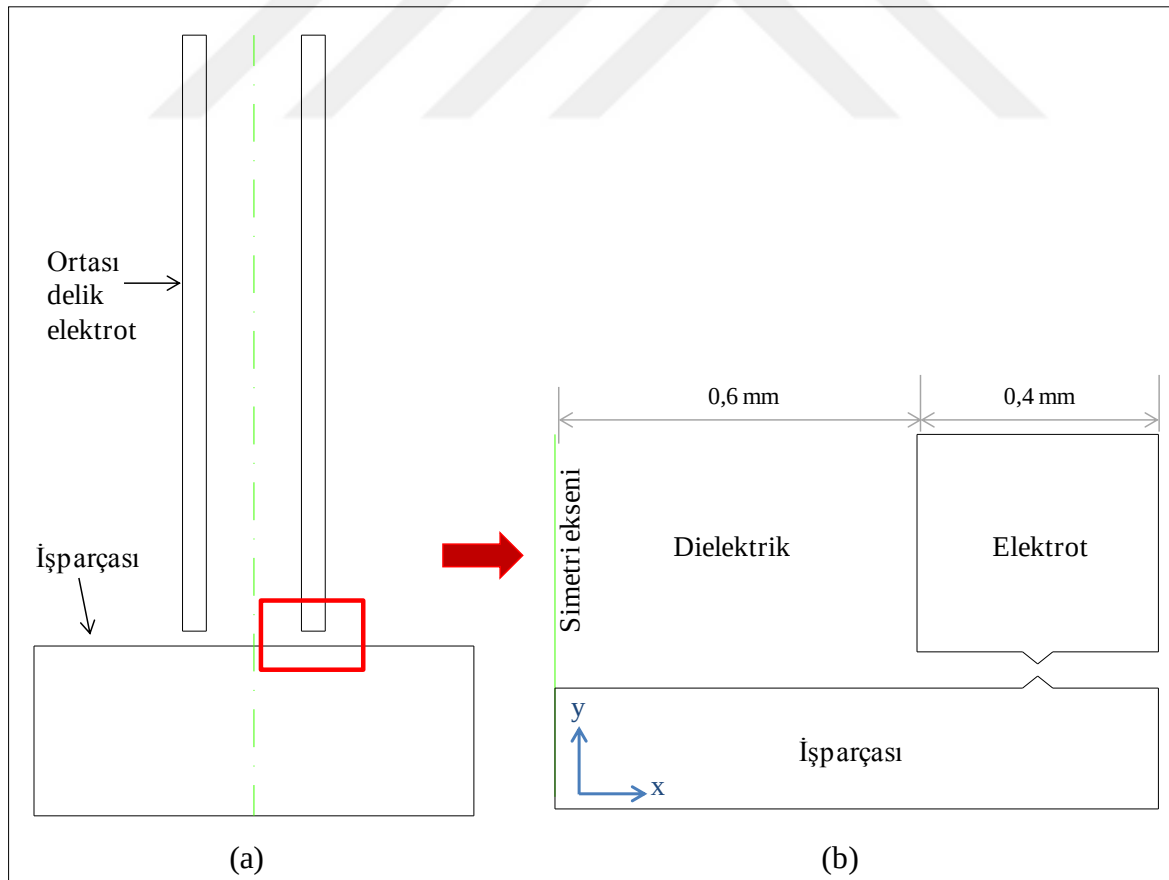
İki boyutlu modelin geometrisi tasarlanırken, deneysel çalışmalardaki gerçek koşulları yansıtacak iki boyutlu elektrot ve işparçası geometrilerin kesitleri de göz önünde bulundurulmuştur. Deneysel çalışmalardaki $2\ \text{mm}$ 'lik dış çap ve $1,2\ \text{mm}$ 'lik iç çapa sahip elektrot ve işparçasının şematik görünümü Şekil 6.6.a'da görülmektedir. Analizi küçültmek ve çözümleri basitleştirmek için Şekil 6.6.a'da görülen kırmızı dikdörtgen içerisindeki alan MFS modelinin geometrisi olarak tasarlanmıştır (Şekil 6.6.b).



Şekil 6.5. AISI4140 çeliğinin işlenmiş yüzeyinde görülen ve üçgeni andıran çıkıntılar

ANSYS-CFX programındaki iki boyutlu geometrinin tasarımında, problemin x ekseninde var olan gerçek ölçüleri kullanılmıştır. Bunun nedeni: hem elektrottan verilecek akım yoğunluğu (J/m^2) değerinin hem de elektrotun içindeki delikten verilecek akış özelliklerinin (hız, debi) x eksenі üzerindeki sınır şartlarında tanımlanacak olmasıdır. Bu gerekçelerle birlikte MFS modelinin doğruluğunun ve hassasiyetinin sağlanması açısından, gerçek koşullarda x ekseninde hangi geometri varsa, MFS modelinin x ekseninde de aynı geometrinin olması gerektiği düşünülmüştür. Bu durumda, MFS modelinin x ekseninde, elektrotun iç boşluğunun yarısı $0,6\ \text{mm}$ ve elektrotun et kalınlığı $0,4\ \text{mm}$ olarak

tasarlanmıştır (Şekil 6.6.b). MFS modelinin y eksenini tasarımı boyutsal anlamda küçültme yapılması düşünülmüştür. Çünkü, y ekseninde elektrotun gerçek boyunun 400 mm olduğu ve işparçasının gerçek yüksekliğinin 20 mm olduğu göz önünde bulundurulduğunda, MFS modelinin y ekseninde bu boyutlarda tasarlanacak elektrot ve işparçası geometrisinin modeli mesh etme işleminde oldukça fazla düğüm (node) ve eleman sayısına sebep olacaktır. MFS modelinde tek bir kıvılcımın yüzeye kıyasla çok küçük bir bölge (elektrot ve işparçasındaki üçgen çıkıntılarda) gerçekleşeceği kabulü düşünüldüğünde, y eksenini için böylesine büyük bir geometriyi tasarlamak çokta akılcı gözükmemektedir. Analizi basitleştirmek adına, y eksenindeki gerçek koşulların sadece 600 μm 'lik bir kısmı tasarlanmıştır. Bu kısımlar, elektrot yüksekliği; 360 μm , elektrot-işparçası arası boşluk; 40 μm ve işparçası yüksekliği; 200 μm şeklindedir (Şekil 6.6.b). Benzer şekilde analizin çözümlerini kısaltmak adına iki boyutlu geometrilerin simetrilerinden faydalanılmıştır. Ortası delik elektrotun merkez eksenini simetri eksenini kabul edilmiş ve iki boyutlu geometrilerin yarısı tasarlanmıştır (Şekil 6.6.b).

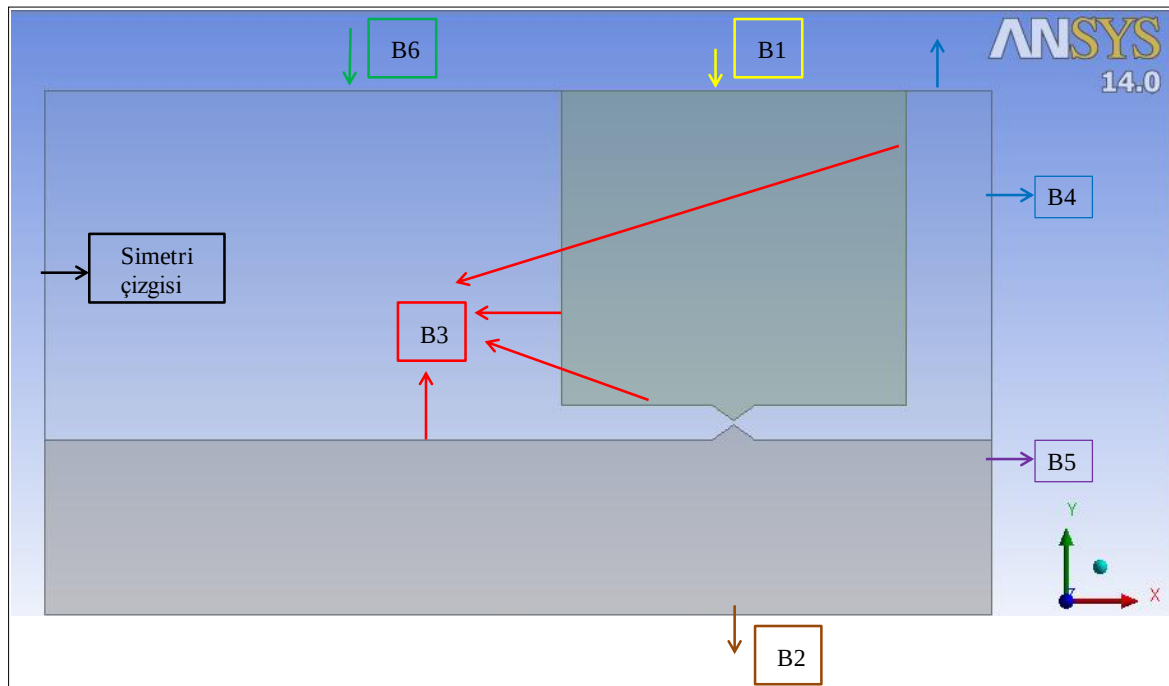


Şekil 6.6. MFS modeli: a) elektrot-işparçası şematik görünümü, b) tasarlanan geometri

6.3. MFS Modeli İçin Sınır ve Başlangıç Şartlarının Tanımlanması

6.3.1. Sınır şartları

İki boyutlu MFS modeli için gerçek EEİ koşullarını yansıtacak sınır şartları Şekil 6.7'de verilmiştir.



Şekil 6.7. MFS modelinde iki boyutlu geometriler üzerinde tanımlanan sınır şartları

Sınır şartlarının tanımları;

- ✓ B1; elektrotun üst yüzey alanıdır. Süre kontrollü akım yoğunluğunun girildiği sınır şartıdır.
- ✓ B2; işparçası alt taban alanıdır. Toprak (ing. ground) sınır şartıdır. $V=0$, $T_{\text{grd}}=60\text{ }^{\circ}\text{C}$ dir.
- ✓ B3; elektrotun yanal yüzey alanları ve alt tabanı, işparçasının üst yüzey alanı ile iki yanal alanıdır. Ara yüzey tipi sınır şartı (ing. domain interface side (ing. coupled)) dır. Katı yüzey ile sıvı yüzeylerin birbirine temas ettiği bölgelerdir. Bu sınır şartlarındaki ara yüzeylerde, sıcaklık değişimi ve elektrik alan değişimi katı ve sıvı bölgeleri için eşittir.
- ✓ B4; su bölgesinin üst yüzey alanı ile dış yanal alanıdır. Basınç çıkışı (ing. opening type) sınır şartıdır. Bernoulli tipi basınç çıkışı için Eş. 6.1 kullanılır.

$$\frac{P}{\rho} + \frac{1}{2} u^2 = C \quad (6.1)$$

- ✓ B5; izole sınır şartıdır. İşparçasının belirli bir kesiti alındığı için bu yüzeyin normalde suyla teması olmadığı için izole alınmıştır. $Q=0$, $E=0$.
- ✓ B6; akış girişi (ing. velocity inlet) sınır şartıdır. ($u=0$, $v=0,2763$ m/s)

6.3.2. Başlangıç şartları ($t=0$ anında)

- ✓ Elektrot sıcaklığı $T_{\text{elek}} = 60$ °C dir.
- ✓ $J=0$ dır. Bir iletkenin birim kesitinden geçen elektrik akımına akım yoğunluğu [A/m^2] denir ve J ile gösterilir [170].
- ✓ Dielektrik sıvı (su) bölgesinde iki boyutlu model için $u = 0$, $v = 0,2763$ m/s ($-v$ yönünde) ve $P=100$ kPa dır.

6.4. ANSYS'de Bulunan ve MFS Modeli İçin Kullanılan Çözücü Denklem Takımları

6.4.1. Elektriksel ısınma

Sonlu hacimler metodu plazma fiziğinde elektriksel ısınma (ing. joule heating) kavramı belirli bir hacim için Eş. 6.2'de belirtilmiştir.

$$\frac{dP}{dV} = J \cdot E \quad (6.2)$$

Burada J ; akım yoğunluğunu [A/m^2] ve E ; elektrik alanı ifade etmektedir. $J = \sigma \cdot E$ dir. Bu ifade de, σ ; elektrik iletkenlik katsayısı [S/m] dır. Eş. 6.2'de J ifadesi yerine konursa birim hacimde Eş. 6.3 elde edilir [171].

$$\frac{dP}{dV} = \frac{J^2}{\sigma} \quad (6.3)$$

Elektriksel ısınma denklemi sayesinde MFS modelindeki dielektrik sıvı içerisinde plazma kanalı oluşturulmuştur.

6.4.2. Yönetici denklemler

MFS modelinde yönetici denklemler (ing. governing equations) olarak; süreklilik denklemi (Eş. 6.4), momentum denklemi (Eş. 6.5) ve termal enerji denklemi (Eş. 6.6) kullanılmaktadır.

Süreklilik denklemi

Eş. 6.4'ün $\partial\rho/\partial t$ terimi; zamana bağlı yoğunluk değişimini ve $\nabla\cdot(\rho U)$ terimi; birim hacimdeki kütlenin konvektif taşınımıyla transferini (ing. convective transfer term) ifade etmektedir. Bu denklem tüm sınır şartlarında kullanılmaktadır [171].

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho U) = 0 \quad (6.4)$$

Momentum denklemi

Eş. 6.5'in sol tarafındaki terimlerden $\partial(\rho U)/\partial t$ terimi; zamana bağlı momentum değişimini, $\nabla\cdot(\rho U \times U)$; birim hacimdeki momentum değişiminin konvektif taşınımıyla transferini ifade etmektedir. Eş. 6.5'in sağ tarafındaki terimler ise $-\nabla p$; birim hacimdeki basınç değişiminin konvektif taşınımıyla transferini, $\nabla\tau$; birim hacimdeki akışa karşı sürtünme direnci değişiminin konvektif taşınımıyla transferini ve S_m ; dış etkenleri ifade etmektedir. Burada dış etken doğal konveksiyondur. Doğal konveksiyon için Bossinesq doğal konveksiyon denklemi kullanılmıştır (Bölüm 6.8). Momentum denklemi, akışın olduğu tüm sınır şartlarında kullanılmaktadır [171].

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho U \times U) = -\nabla p + \nabla\tau + S_m \quad (6.5)$$

Termal enerji denklemi

Eş. 6.6'nın sol tarafındaki terimlerden $\partial(\rho h)/\partial t$ terimi; birim hacimdeki zamana bağlı enerji değişimini, $\partial p/\partial t$; zamana bağlı basınç değişimini, $\nabla\cdot(\rho U h)$; birim hacimdeki enerjinin konvektif taşınımıyla transferini (ing. convective term) ifade etmektedirler. Eş.

6.6'nın sağ tarafındaki terimler ise $\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$; birim hacimdeki ısı değişiminin konvektif taşınım ile transferini, $U \cdot \nabla p$; birim hacimdeki basınç değişiminin konvektif taşınım ile transferini ve S_E ; dış etkenleri ifade etmektedir. Burada dış etken elektriksel ısınmadır. Bu denklem, tüm sınır şartlarında kullanılmaktadır [171].

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U h) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + U \cdot \nabla p + S_E \quad (6.6)$$

6.4.3. Birleşik ısı transferi denklemi (ing. conjugate heat transfer)

Eş. 6.7'nin sol tarafındaki $\partial(\rho h)/\partial t$ terimi; birim hacimdeki zamana bağlı enerji değişimini ifade etmektedir. Eş. 6.7'nin sağ tarafındaki $\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$ terimi; katı hacimdeki hacimsel ısı değişiminin konvektif taşınım ile transferini ve S_E ; dış etkenleri ifade etmektedir. Burada dış etken joule heating dir. Bu denklem katılar içerisindeki ısı transferinin çözümünde kullanılır. Yani elektrot içerisinde (B1-B3) ve işparçası içerisinde (B3-B2) kullanılır [178].

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + S_E \quad (6.7)$$

6.4.4. Batmazlık (ing. buoyancy)

Eş. 6.8 ve Eş. 6.9 sıcaklık farkının yoğunluk üzerine ve basınç üzerine etkilerini ifade eder. Su içerisindeki akış bölgelerini kapsayan sınır şartlarında kullanılır. Bu ifadeler, doğal konveksiyonla ilgilidir [171] (Bölüm 6.8).

$$S_{M,buoy} = (\rho - \rho_{ref})g \quad (6.8)$$

$$p_{abs} = p + p_{ref} + \rho_{ref} \vec{g} \cdot (\vec{r} - \vec{r}_{ref}) \quad (6.9)$$

6.4.5. Elektromanyetik denklemleri

Eş. 6.10'daki E ; elektrik alan, ϕ ; elektrik potansiyeldir. Bu denklem (Eş. 6.10); elektrot içerisindeki (B1-B3), su içerisindeki (elektrot-su, işparçası-su (B3)) ve işparçası içerisindeki (B3-B2) elektrik alanı hesaplamak için kullanılmıştır. MFS modelinde

elektromanyetizma kullanılmayacağı için elektromanyetik denklemindeki manyetik alan ifadeleri sıfırlanmıştır ($B=0$) [171].

$$E = -\nabla\varphi \quad (6.10)$$

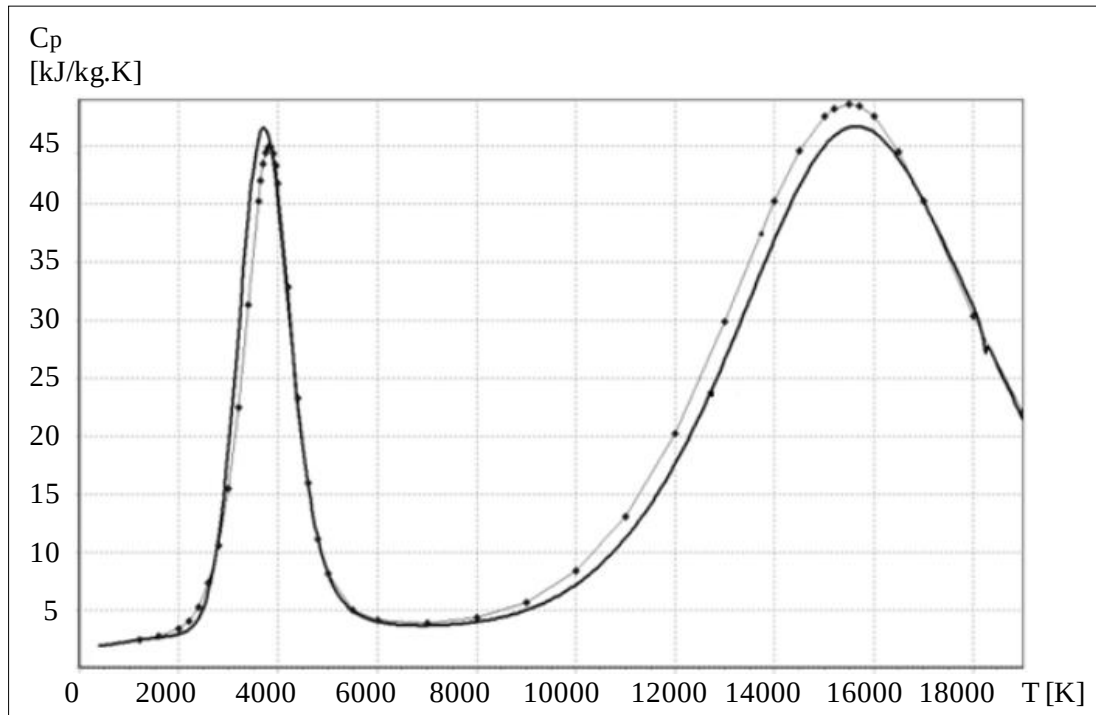
6.5. MFS Modeline Malzeme Özelliklerinin Girilmesi

6.5.1. Dielektrik sıvının (suyun) özelliklerinin girilmesi

MFS modelini, diğer modellerden farklı kılan en önemli nokta: dielektrik sıvı (su) kullanılarak plazma kanalının oluşturulmuş olmasıdır. Plazma kanalı, elektriksel ısınma (ing. joule heating) ile oluşturulacağı için suyun plazma halindeki C_p , k ve σ değerlerinin sıcaklığa bağlı denklemler olarak programa girilmesi gerekmektedir.

Özgül ısı kapasitesi (ing. specific heat capacity) (C_p)

Özgül ısı kapasitesi için yapılan araştırmada, suyun 20000 K sıcaklığa kadar ki C_p [kJ/kg.K] değerlerine (plazma halini içeren) grafiksel olarak ulaşılmıştır (Şekil 6.8).



Şekil 6.8. Suyun sıcaklığa bağlı C_p değerleri [172]

Grafikten (Bkz. Şekil 6.8); WebPlotDigitizer programı vasıtasıyla x ve y değerleri excell tablosu olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda araştırmacıların çalışmalarında C_p için vermiş oldukları excell tablolarındaki değerler de kontrol edilmiştir [172]. Elde edilen excell tabloları 5 bölgeye ayrılarak 5. dereceden en uygun polinomlar uydurulmuştur (ing. best fit). Daha sonra bu polinomların katsayı terimleri ve değişken değerleri toplanarak tek ifade de birleştirilmiştir (Eş. 6.11). Birleştirilen sıcaklığa bağlı C_p değeri CFX programının istediği formatta (udf kodu) yazılarak programa girilmiştir.

$$C_p = \sum_{n=0}^5 a_n T^n \quad (6.11)$$

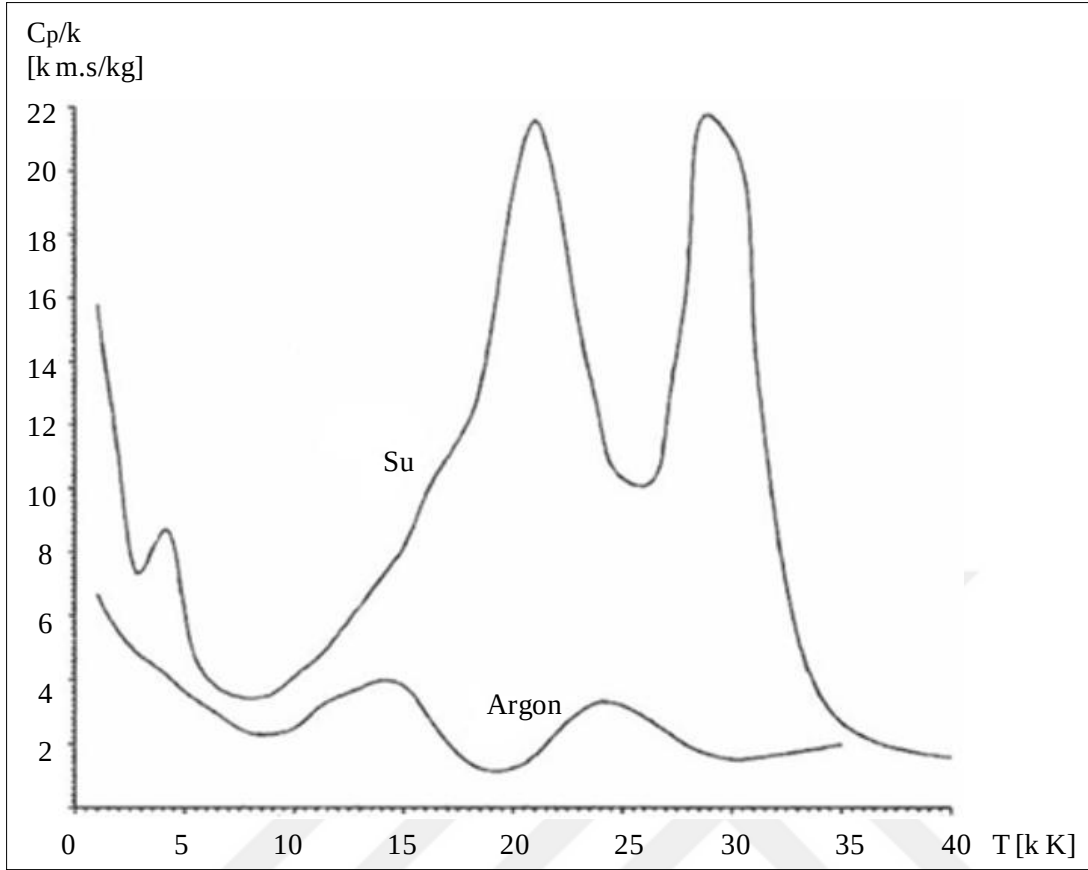
Isıl genleşme (ing. thermal expansivity) (k)

Isıl genleşme için yapılan araştırmada, suyun 40000 K sıcaklığa kadar ki k [1/K] değerlerine (plazma halini içeren) grafiksel olarak ulaşılmış ancak grafikten 20000 K kadar ki değerler kullanılmıştır (Şekil 6.9) [173]. Şekil 6.9'daki grafikten C_p değerlerine benzer şekilde WebPlotDigitizer programı vasıtasıyla x ve y değerleri excell tablosu olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu C_p/k grafiğinin x değerleri Şekil 6.8'den elde edilen fonksiyona girilerek yeni y değerleri bulunmuş ve bulunan bu yeni y değerleri, C_p/k grafiğinin y değerlerine bölüldüğünde k değerleri tablo halinde elde edilmiştir. k değerleri excell tabloları, 3 bölgeye ayrılarak 3. dereceden en uygun polinomlar uydurulmuştur (ing. best fit). Daha sonra bu polinomların katsayı terimleri ve değişken değerleri toplanarak tek ifade de birleştirilmiştir (Eş. 6.12). Birleştirilen sıcaklığa bağlı k değerleri CFX programının istediği formatta (udf kodu) yazılarak programa girilmiştir.

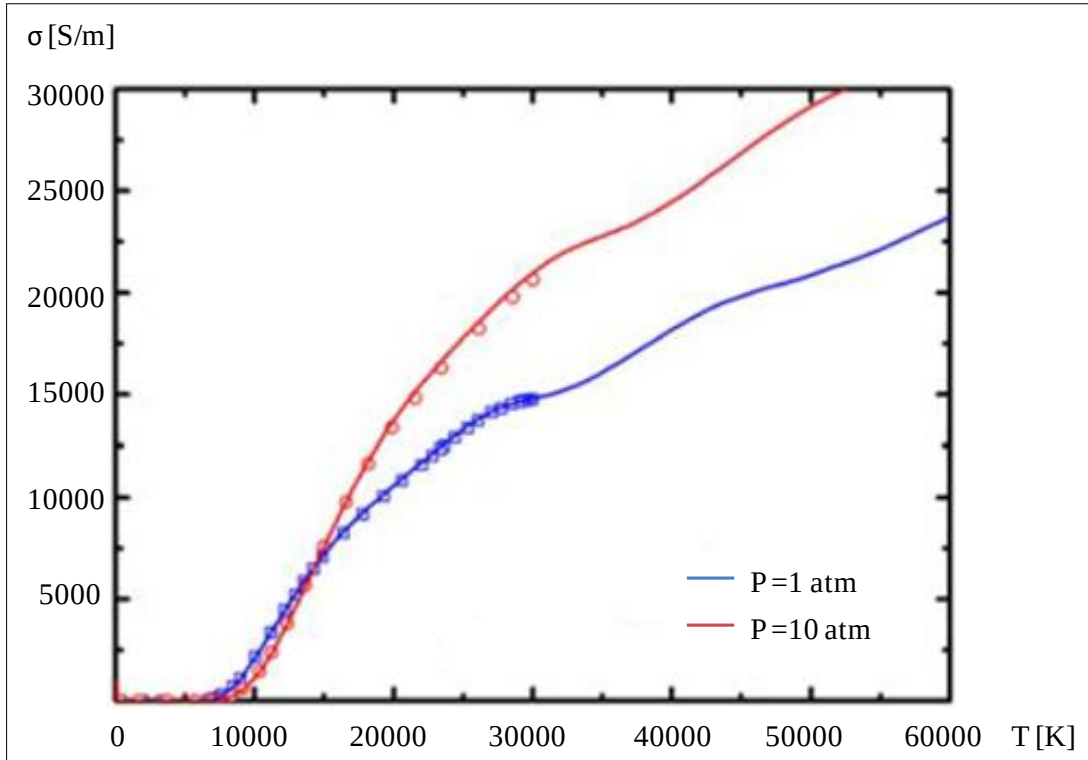
$$k = \sum_{n=0}^3 a_n T^n \quad (6.12)$$

Elektriksel iletkenlik (ing. electrical conductivity)

Elektriksel iletkenlik için yapılan araştırmada, suyun 60000 K sıcaklığa kadar ki σ [S/m] değerlerine (plazma halini içeren) grafiksel olarak ulaşılmış ancak grafikten 20000 K kadar ki değerler kullanılmıştır (Şekil 6.10) [174]. Şekil 6.10'daki grafikten; WebPlotDigitizer programı vasıtasıyla x ve y değerleri excell tablosu olarak elde edilmiştir. Elde edilen excell tabloları 2 bölgeye ayrılarak 4. dereceden en uygun polinomlar uydurulmuştur.



Şekil 6.9. Suyun sıcaklığa bağlı k değerleri [173]



Şekil 6.10. Suyun sıcaklığa bağlı σ değerleri [174]

6.5.2. İşparçası ve elektrot özelliklerinin girilmesi

İşparçaları ve elektrotlar

Bu çalışmadaki analizlerde kullanılan işparçaları; AISI4140 çeliği [160], Ti6Al4V ve IN718 [175] malzemelerinin C_p , k ve σ değerleri programa girilmiştir. MFS modeli için gereken malzeme özellikleri Çizelge 6.1'de belirtilmiştir. Bu çalışmadaki analizlerde elektrot olarak bakır ve pirinç malzemeleri kullanılmıştır. Bakır elektrotun C_p [176], k [177] ve σ [178] değerleriyle pirinç elektrotun C_p , k , ve σ [161] değerleri programa girilmiştir (Çizelge 6.2).

Çizelge 6.1. MFS modeli için işparçalarının gereken özellikleri

Özellikler	AISI4140	Ti6Al4V	IN718
Molar kütle	435,836 [kg/k mol]	446,0697 [kg/k mol]	462.201075 [kg/k mol]
Özgül ağırlığı	7700 [kg/m ³]	4430 [kg/m ³]	8190 [kg/m ³]
Ergime sıcaklığı	1684 [K]	1933 [K]	1617 [K]
Özgül ısı kapasitesi	473 [J/kg.K]	526,3 [J/kg-K]	435 [J/kg-K]
Isıl iletkenliği	42,7 [W/m.K]	6,7 [W/m.K]	11,2 [W/m.K]
Elektrik iletkenliği	222 x 10 ⁻⁹ [ohm-m]	0,000178 [ohm-cm]	0,000121 [ohm-cm]

Çizelge 6.2. MFS modeli için elektrotların gereken özellikleri

Özellikler	Pirinç	Bakır
Molar kütle	321,398 [kg/k mol]	63,546 [kg/k mol]
Özgül ağırlığı	8470 [kg/m ³]	8960 [kg/m ³]
Ergime sıcaklığı	1198 [K]	1357 [K]
Özgül ısı kapasitesi	380 [J/kg.K]	384,4 [J/kg-K]
Isıl iletkenliği	115 [W/m.K]	401 [W/m.K]
Elektrik iletkenliği	6,6 x 10 ⁻⁶ [ohm-cm]	1,724 x 10 ⁻⁶ [ohm-cm]

6.6. MFS Modelinde Kullanılan Radyasyon Tipinin Tanımlanması

MFS modelinde radyasyon çeşidi olarak P1 modeli kullanılmıştır. Radyasyon modeli sadece su için tanımlanmıştır. P1 radyasyon modeli izotropik ve/veya yönden bağımsızdır.

Spektral radyasyon ısı akısı yayılma, absorbe etme ve doğrusal saçılma ortamı terimleriyle ifade edilmiştir (Eş. 6.13) [171].

$$q_{rv} = - \frac{1}{3(K_{av}-K_{sv})-AK_{sv}} \nabla G_v \quad (6.13)$$

6.7. MFS Modelinde Kullanılan Dielektriğin Akış Özelliklerinin Tanımlanması

Bu çalışmada, iki boyutlu modelde dielektrik sıvıya başlangıç şartlarında hız değeri olarak ($u = 0$ ve $v = -0,2763$ m/s) ve başlangıç koşullarında $P=100$ kPa verilmiştir. İki boyutlu analiz çalışmalarında suya, $-v$ yönünde $0,2763$ m/s hız değerindeki kararlı hal (ing. steady state) ön analiz 1000 zaman adımı (ing. time step) yapıldıktan sonra, zamana bağlı (ing. transient) genel analiz üzerine yapılmıştır. Başlangıçtaki $\dot{Q}$ debi değerinden yola çıkılarak ve modelin geometrisi (Bkz. Şekil 6.6.b) göz önünde bulundurularak $V_{bağlı}$ hız değeri hesaplanmıştır (Eş. 6.14). B noktasında hızdan ve kesit alanlardan faydalanılarak $V_{bağlı}$ hız bulunur. 't' ifadesi birim kalınlıktır (Eş. 6.14).

$$\dot{Q} = 0,0004 \text{ m}^3/\text{dak} = 6,666666667 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A = 2\pi r h$$

$$= 2 \cdot \pi \cdot (40 \times 10^{-6}) \cdot (0,8 \times 10^{-3})$$

$$V = \frac{\dot{Q}}{A} = \frac{6,666666667 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}}{2,010619298 \times 10^{-7} \text{ m}^2} = 33,157 \text{ m/s}$$

$$V_B \cdot h \cdot t = V_{bağlı} \cdot h \cdot t \quad (6.14)$$

$$(33,157) \cdot (5 \times 10^{-6}) = V_{bağlı} \cdot (0,6 \times 10^{-3})$$

$$V_{bağlı} = 0,2763 \text{ m/s}$$

6.8. MFS Modelinde Doğal Konveksiyon Özelliklerinin Tanımlanması

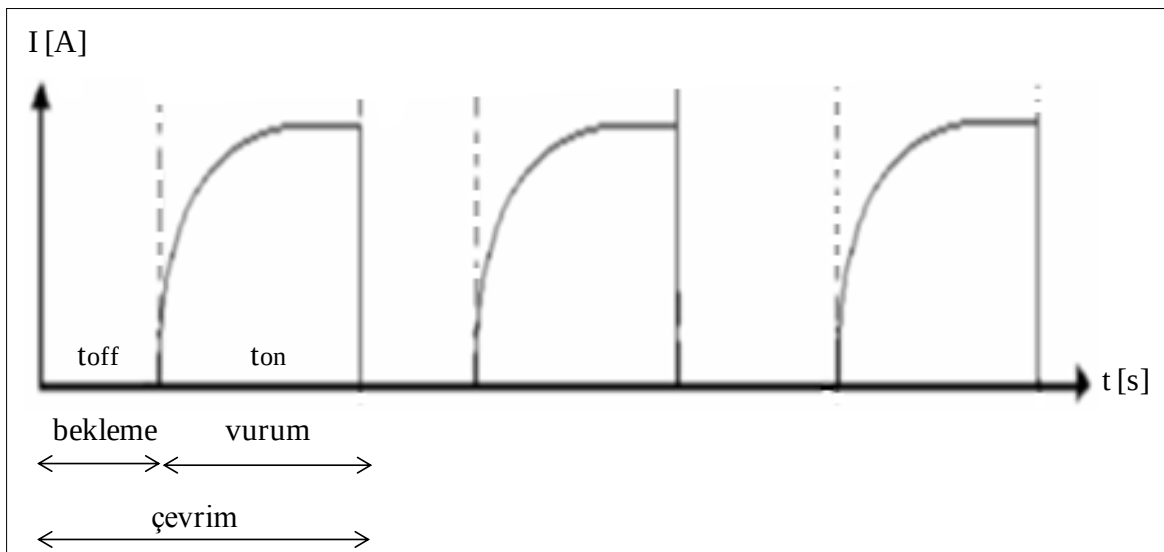
Doğal konveksiyon için Bossinesq doğal konveksiyon denklemi kullanılmıştır. Bu denklem akışın olduğu tüm sınır şartlarında kullanılmaktadır (Eş. 6.15) [171]. Eş. 6.15'de, ρ_{ref} ; sabit referans yoğunluk, T_{ref} ; buoyancy referans sıcaklığı ve β ; ısıl genleşmeyi ifade etmektedir (Eş. 6.16) [171].

$$\rho - \rho_{ref} = -\rho_{ref}\beta(T - T_{ref}) \quad (6.15)$$

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \cong \frac{1}{T} \quad (6.16)$$

6.9. MFS Modelinde Süre Kontrollü Akımın Tanımlanması

MFS modelinde, diğer EEİ model çalışmalarından farklı olarak, gerçek EEİ akım karakteri olan süre kontrollü akım yoğunluğu değerleri verilmiştir (Şekil 6.11). Diğer model çalışmaları gibi sürekli akım değeri kullanılmamıştır. Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta da: programa doğrudan akım değeri değil de akım yoğunluğu değerinin (J) girilmesi gerekliliğidir. Bu çalışmadaki akım yoğunluğu değeri (J) hesaplaması, $J=I/A_s$ burada I; akım [A] ve A_s ; kesit alan [m^2] dir (Eş. 6.17). Deneysel çalışmalarda, EEİ tezgahında akım seviyesi kademesi 1/8 konumunda ayarlandığında ortalama akım değeri 3 Amper (tepe akımı 4,5 A) dir. Kesit alanın hesaplanması içinde: elektrot dış yarıçapı = 1 mm ve iç delik yarıçapı = 0,6 mm dir (Bkz. Şekil 6.6). Akım yoğunluğunun giriş bölgesinden işleme bölgesine etkisini kaybettirmeden taşınması gerekmektedir. Mevcut iki boyutlu geometri için bir odaklanma faktörü gerekmektedir. Akım 0,4 mm bir boyuttan girip 1 μm bir noktaya odaklanmaktadır (Eş. 6.18). Bu etkide göz önünde bulundurulduğunda akım yoğunluğu değeri Eş. 6.19'da elde edilir.



Şekil 6.11. Süre kontrollü akım değeri (on-off kontrollü) [29]

$$A_s = \frac{\pi(D_{dis}^2 - D_{iç}^2)}{4} = \frac{\pi(2^2 - 1,2^2)}{4} = 2,010619298 \text{ mm}^2 = 2,010619298 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

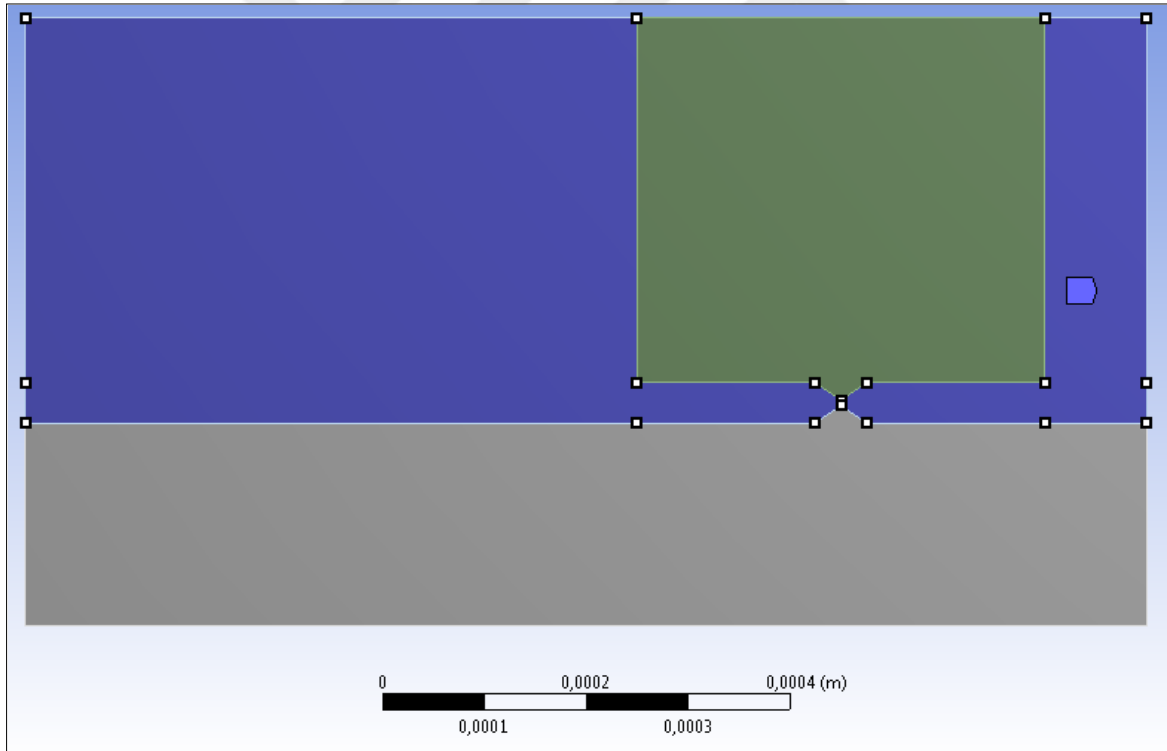
$$J = \frac{I}{A_s} = \frac{3 \text{ A}}{2,010619298 \times 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,493 \times 10^6 \cong 1,5 \times 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (6.17)$$

$$O.F = \frac{0,4 \text{ mm}}{2 \text{ } \mu\text{m}} = \frac{4 \times 10^{-4} \text{ m}}{2 \times 10^{-6} \text{ m}} = 200 \quad (6.18)$$

$$J^* = (O.F).J = (200).(1,5 \times 10^6) = 300 \times 10^6 \text{ A/m}^2 \quad (6.19)$$

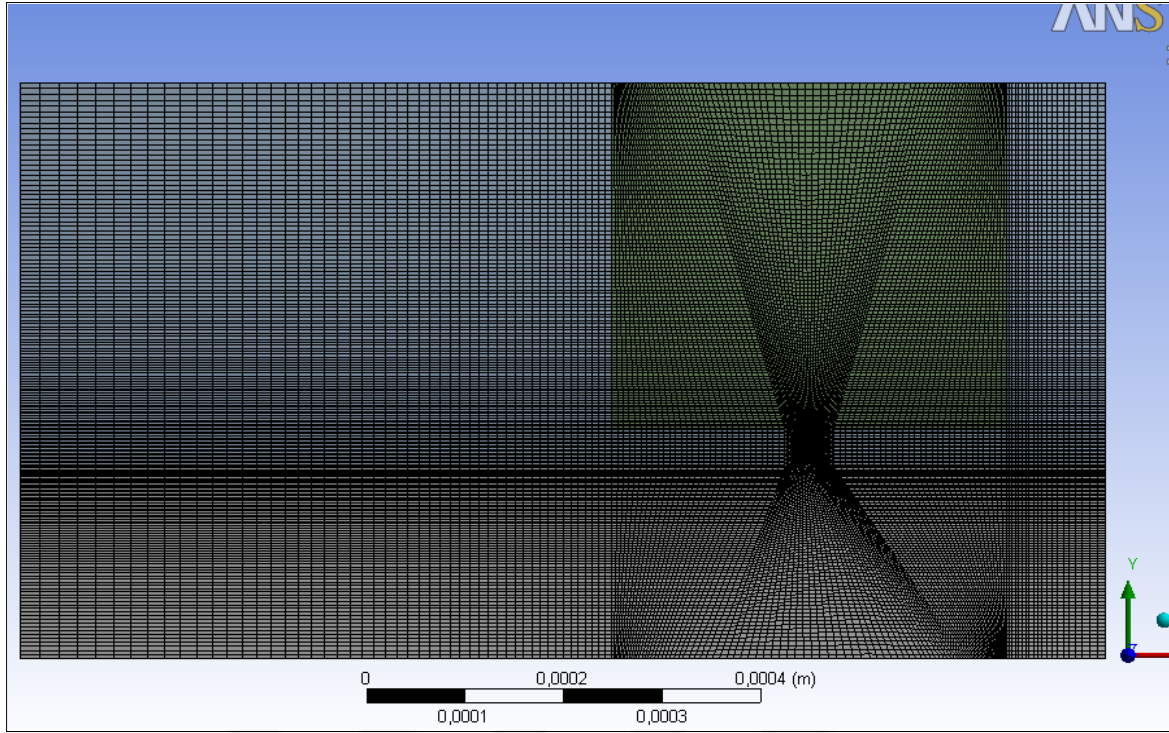
6.10. MFS Modelinin Geometrisinin Mesh (Ağ) Edilmesi

İki boyutlu modelde, minimum boyutu 1×10^{-6} m ve maksimum boyutu 1×10^{-4} m olan yüksek kalitede mesh kullanılmıştır. Modele mesh atılırken köşe kırıcılar (ing. egde split) (Şekil 6.12) kullanılarak mesh'in istenen bölgelerde daha düzgün gerçekleşmesi ve düğüm noktalarında birleşmesi sağlanmıştır.



Şekil 6.12. MFS modelinin geometrisini mesh ederken kullanılan köşe kırıcı noktalar

İki boyutlu tasarlanan geometri, dört noktalı dörtgen elemanla mesh edilmiştir. Plazmanın gerçekleşeceği düşünülen bölgede daha fazla eleman olması için ve düzgün birleşmelerin elde edilebilmesi (nokta-noktaya birleşme) için iyileştirmenin (ing. refinement) seviyesi 3. düzeyde tutulmuştur. MFS modelini mesh etme işlemi gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.13).



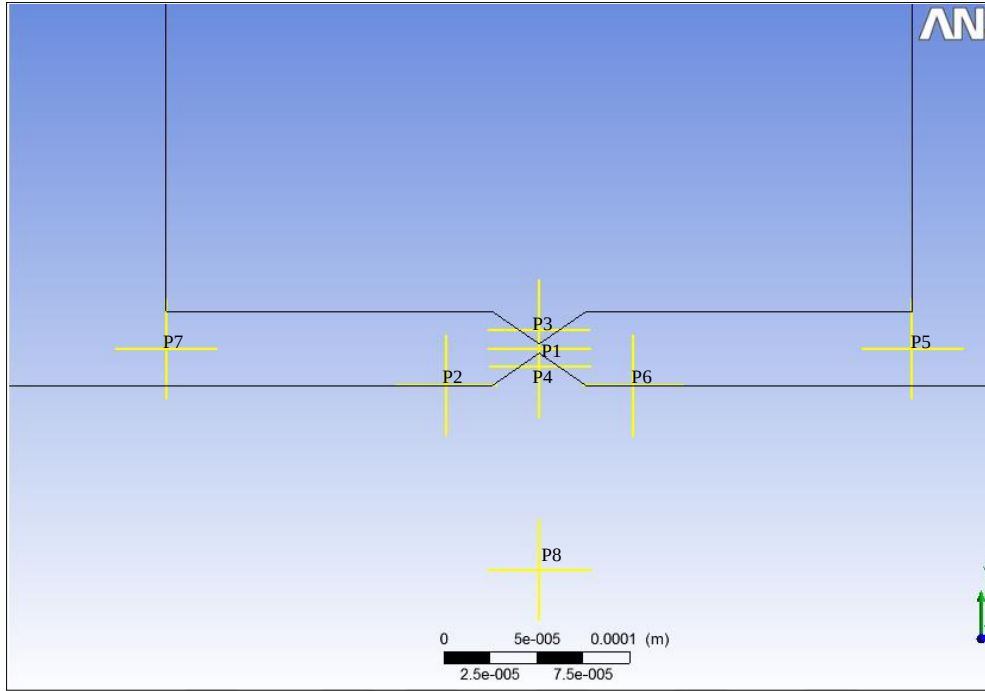
Şekil 6.13. İki boyutlu mesh atılmış MFS modeli (32000 eleman)

6.11. MFS Modeli İçin Değişken Zaman Adımının Tanımlanması

Zamana bağlı (ing. transient) analiz için sabit zaman adımı (ing. time step) kullanılındansa, değişken zaman adımı (ing. adaptive time step) kullanılmıştır. Çünkü değişken zaman adımı özelliği, sabit zaman adımına göre daha hızlı çözüm vermektedir. Değişken zaman adımı özelliğinde: maksimum ve minimum zaman aralığında program belirtilen hata miktarına göre kendisi ayar yaparak zaman adımına karar vermektedir.

6.12. Analizin Sonuçlarını Anlık Gözlemlemek İçin Nokta Tanımlaması

Zamana bağlı gerçekleşen analizin çözümlerini (sıcaklık, basınç vb.) anlık görebilmek amacıyla modelde noktalar (ing. output control point) tanımlanmıştır. Ayrıca, ANSYS-CFX programının sağladığı olanakla, analiz sonunda program tarafından oluşturulan sonuç dosyasında bu noktaların yerleri değiştirilebildiği gibi yeni noktalarda tanımlanabilmektedir (Şekil 6.14). Sonuç dosyasından arzu edildiği takdirde yeni tanımlanan noktaların da analiz sonuçları (değer, grafik, resim vb.) elde edilebilmektedir.



Şekil 6.14. İki boyutlu MFS modelindeki anlık çıktı kontrol noktaları

6.13. Mesh'den Bağımsızlık Analizi (MBA)

Sayısal yöntemler, matematik problemlerinin, aritmetik işlemlerle çözülebilmelerini sağlayacak şekilde formüle edildiği tekniklerdir. Çeşitli sayısal yöntemler olmasına karşın, hepsinin ortak bir özelliği vardır: hepsi, değişmez bir biçimde çok sayıda aritmetik işlemler içerir [179]. Mühendislik uygulamaları, hiç de nadir olmayan ve analitik yollardan çözülmesi çoğu zaman olanaksız olan büyük sayıda denklem sistemlerini, doğrusallıktan sapmaları ve karmaşık geometrileri içerir [180]. SEA, çeşitli mühendislik problemlerine kabul edilebilir bir yaklaşımla çözüm arayan bir sayısal çözüm yöntemidir [181]. SEA'da model geometrisi uygun olan birçok elemana bölünür. Elemanlar düğüm noktası olarak bilinen noktalarda tekrardan birleştirilirler [182]. Bu sayede, bir elemana ait özelliklerden yola çıkılarak tüm sistemi temsil edecek şekilde eleman denklemleri birleştirilerek tüm sisteme ait denklem takımı elde edilir. Analize bağlı olarak bu şekilde çok sayıda denklem elde edilebilir [183]. SEA'da modelin mesh (ağ) bilgileri (düğüm noktası sayısı ve eleman tipi) büyük önem arz etmektedir. Çoğu zaman problemin doğru ve hassas çözümünün elde edilmesi için farklı mesh'lerin denenmesi gerekebilmektedir. Analizi ön hazırlık aşamasındaki (ing. pre process) mesh etme/atma işleminde, eleman sayısının gereğinden fazla arttırılması hem çözümün uzamasına hem de hata yapma oranının artmasına neden olur [183]. Gereksiz yere işlem sayısını arttırmamak ve zamandan tasarruf sağlamak için iki

boyutlu ve üç boyutlu modellerin geometrileri mesh edilirken, eleman tipine göre mesh optimizasyonunun ve ele alınan problemin özelliklerine göre modelin eleman sayısından bağımsızlığının veya diğer bir deyişle MBA'nın (ing. mesh independence analysis) yapılması gerekir. MBA; model için belirlenen kritik bir nokta etrafındaki bölgenin, minimum eleman boyutu değiştirilmeden daha sık bölünmesiyle eleman sayısının artırılması ve dolaylı olarak düğüm sayısının artırılması şeklindedir. Kritik nokta etrafında artan düğüm sayısı çözümü daha hassas hale getirmesine karşın, eleman sayısındaki artış belirli bir seviyeden sonra çözüm değerlerindeki (örneğin: belirlenen noktadaki sıcaklık, basınç, gerinme vb.) farklar açısından ihmal edilebilir düzeye ulaşır. Çözüm değeri-eleman sayısı grafiğinde, eğimin sifıra yaklaştığı bölgeler model için en uygun eleman sayısı değerini ifade eder [183, 184].

Bu çalışmada, MFS modeli için en uygun eleman sayısını belirlemek için MBA gerçekleştirilmiştir. Aslında MBA için tek bir nokta yeterli olmasına karşın, MFS modelinin verimini ve MBA'nın da güvenilirliğini artırmak için iki farklı noktada MBA yapılması gerektiğine karar verilmiştir. MFS modelinde, MBA için dielektrik sıvı (P1 noktası) ve işparçası (P4 noktası) içerisinde belirlenen kritik noktalar (Bkz. Şekil 6.14) etrafında sistemli şekilde bölme yöntemiyle artırılan eleman sayıları sonucunda modelin toplam eleman sayısı da artmıştır. MBA'da sırasıyla; 2000, 4000, 8000, 16000, 32000, 65000, 130000, 250000, 350000 ve 500000 eleman sayısından oluşan MFS modellerinin analizleri gerçekleştirilmiş ve bu noktalardaki sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Daha sonra eleman sayısı-sıcaklık grafiği yorumlanarak en uygun eleman sayısına karar verilmiştir.

6.14. MFS Modelinin Analizi Sonucunda Elde Edilecek Çıktılar

Analiz sonucunda plazma kanalının özellikleri (sıcaklık ve akım yoğunluğu), işparçasındaki sıcaklık dağılımı, dielektrik sıvısındaki sıcaklık dağılımları, radyasyon özellikleri, elektriksel (elektrik alan vb.) özellikler, enerji dağılım özellikleri (elektrot-dielektrik sıvı-işparçası arasında dağılan enerji miktarı) ve plazma sıcaklığı değerleri elde edilecektir. Ayrıca bu özelliklerle ilgili videolar elde edilecektir. İşparçasındaki sıcaklık dağılımlarından, işparçası erime sıcaklığını geçen bölgeler SEA programı vasıtasıyla belirlenerek (Bölüm 6.1.1'de 4. kabul) İİH değeri hesabında analizin doğrulanması için kullanılacaktır.

6.15. MFS Modelinin Doğrulaması İçin Yapılan Simülasyon Çalışmaları

İki boyutlu MFS modelin doğrulama çalışmalarında, deneysel çalışmaların sonuçlarından faydalanılmıştır. Doğrulama çalışmalarında MBA'dan sonra belirlenen en uygun eleman sayısı ile oluşturulan MFS modelinin analizlerinden elde edilen teorik İİH değeriyle; a) deneysel kısmında gerçekleştirilen AISI4140 deneyleriyle kıyaslama, b) bu çalışmanın deney düzeneği kullanılarak yeniden gerçekleştirilmiş Ti6Al4V deneyleriyle kıyaslama ve c) başka bir araştırmacının deneysel çalışmasıyla (Ti6Al4V ve IN718) kıyaslama şeklinde özetlenebilir.

6.15.1. AISI4140 çeliği işparçası - pirinç elektrotla gerçekleştirilen simülasyon analizi

Bu çalışmada AISI4140 çeliği işparçasına, ortası delik 2 mm'lik dönmeyen pirinç elektrot kullanılarak 3 A boşalım akımı, 25 μ s vurum süresi, 50 μ s bekleme süresinde 75 °C su (140 bar) kullanılarak EEİ işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu koşulları aynen sağlayacak MFS modeli tasarlanarak en uygun eleman sayısında analiz gerçekleştirilmiştir. Teorik İİH değeri sonuçlarıyla deneysel İİH sonuçları kıyaslanarak MFS modeli doğrulanmıştır.

6.15.2. Ti6Al4V alaşımı işparçası - bakır elektrotla gerçekleştirilen simülasyon analizi

MFS modelinin farklı bir malzemeyle de doğruluğunu sınamak için Ti6Al4V işparçasına aynı işleme parametrelerinde ve koşullarında deneysel çalışmalar yapılması kararlaştırılmıştır. Ti6Al4V işparçasına 2 mm'lik dönmeyen bakır elektrotla 75 °C suda (140 bar basınçta) 3 A boşalım akımı, 25 μ s vurum süresi, 50 μ s bekleme süresinde EEİ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deney koşullarını aynen yansıtacak MFS modeli tasarlanarak analizi gerçekleştirilmiştir. Teorik İİH değeri sonuçlarıyla deneysel İİH sonuçları kıyaslanarak MFS modeli farklı malzeme için bir kez daha doğrulanmıştır.

6.15.3. Başka bir araştırmacının deneysel çalışmasıyla modeli doğrulama çalışmaları

MFS modelinin bu çalışmada gerçekleştirilen deneysel çalışmaların (AISI4140 ve Ti6Al4V işparçalarıyla yapılan) sonuçlarıyla doğrulanmasına ilaveten başka bir araştırmacının yapmış olduğu deneysel çalışmayla da doğrulamanın, MFS modelinin

tarafsız ve güvenilir olabileceğini göstermek için düşünülmüştür. Bu sebepten, Yılmaz ve arkadaşlarının [175] yapmış olduğu deneysel çalışmayla MFS modelin tekrar doğrulanması kararlaştırılmıştır. Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasında gerçekleştirilen EEİ delik delme deneyleri MFS modelinde birebir tasarlanarak analizler gerçekleştirilmiştir. Doğrulama için Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasının tercih edilme sebepleri şu şekilde sıralanabilir;

- ✓ Su dielektriğin kullanımı MFS model çalışması için en kritik noktadır. Çünkü sudan başka bir dielektriğin yüksek sıcaklıklardaki C_p , k ve σ gibi özelliklerinin bulunması oldukça güçtür. Bu sebepten Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasında da su kullanılmış olması bu çalışmanın tercih edilmesinde en önemli noktadır.
- ✓ Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasında, 2 mm'lik ortası tek delik bakır elektrot kullanılmıştır. Bu durum, MFS modelindeki elektrot geometrisinde herhangi bir değişikliğine gerek oluşturmayacak olması büyük kolaylık sağlayacaktır.
- ✓ Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasında, IN718 ve Ti6Al4V işparçalarına EEİ delik delme işlemi gerçekleştirilmiştir. Aynı çalışma içerisinde iki farklı malzemeyle deneysel çalışma yapılmış olmasından ötürü, MFS modelinin doğrulanmasında fazladan bir malzemeyle daha kıyaslama olanağı sunacaktır.
- ✓ Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasında, IN718 işparçası: 8,2 A boşalım akımı, 35 μ s vurum süresi ve 16 μ s bekleme süresinde işlenmiştir. Ti6Al4V işparçası ise: 12 A boşalım akımı, 35 μ s vurum süresi ve 26 μ s bekleme süresinde işlenmiştir. Dolayısıyla MFS modelinin farklı akım, vurum-bekleme süresi değerlerinde denenebileceği düşünülmüştür.

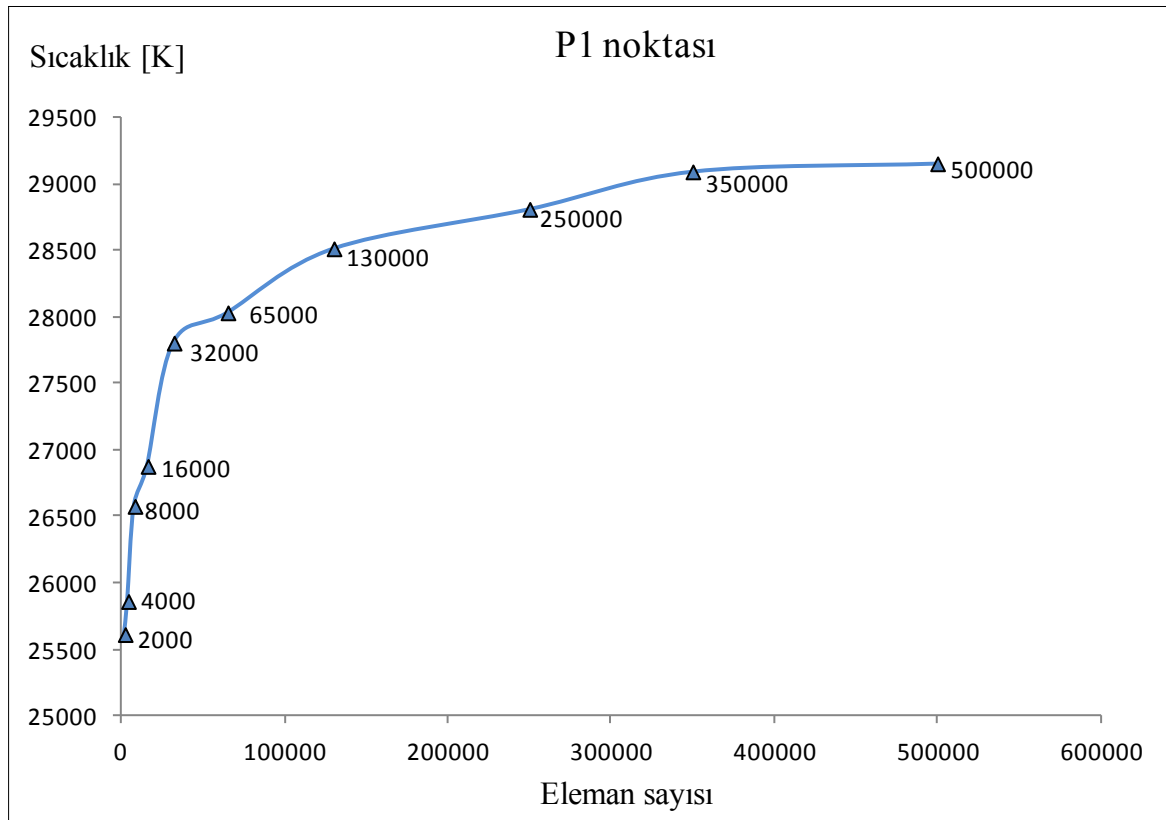
6.16. Doğrulamada Kullanılan EEİ'de TTK Kavramı

Son zamanlarda EEİ'deki TTK kavramına açıklık getirmek için, hem deneysel çalışmalara [57-59, 108, 185] hem de model çalışmalarına [186, 187] oldukça ilgi gösterilmektedir. MFS modeli simülasyonu sonucunda, işparçası içerisinde elde edilen sıcaklık eğrileri yardımıyla işparçasında ergime sıcaklığını aşan bölgelerin hatları program vasıtasıyla belirlenmiştir. Ergimiş bölge olarak nitelendirilebilecek bu bölge üzerine, deneysel çalışmalardan ölçülen TTK kalınlığı tekrardan eklenmiştir/sıvanmıştır. TTK kalınlığı, kör delik olarak işlenmiş deney numunelerinin, kör delik tabanından alınan ölçümlerin aritmetik ortalaması şeklinde belirlenmiştir. Ergimiş bölgeye ilave edilen TTK kalınlığından sonra teorik İİH değeri hesaplanmış ve doğrulama gerçekleştirilmiştir.

7. MFS MODELİNİN ANALİZ SONUÇLARI

7.1. MFS Modelinin MBA Sonuçları

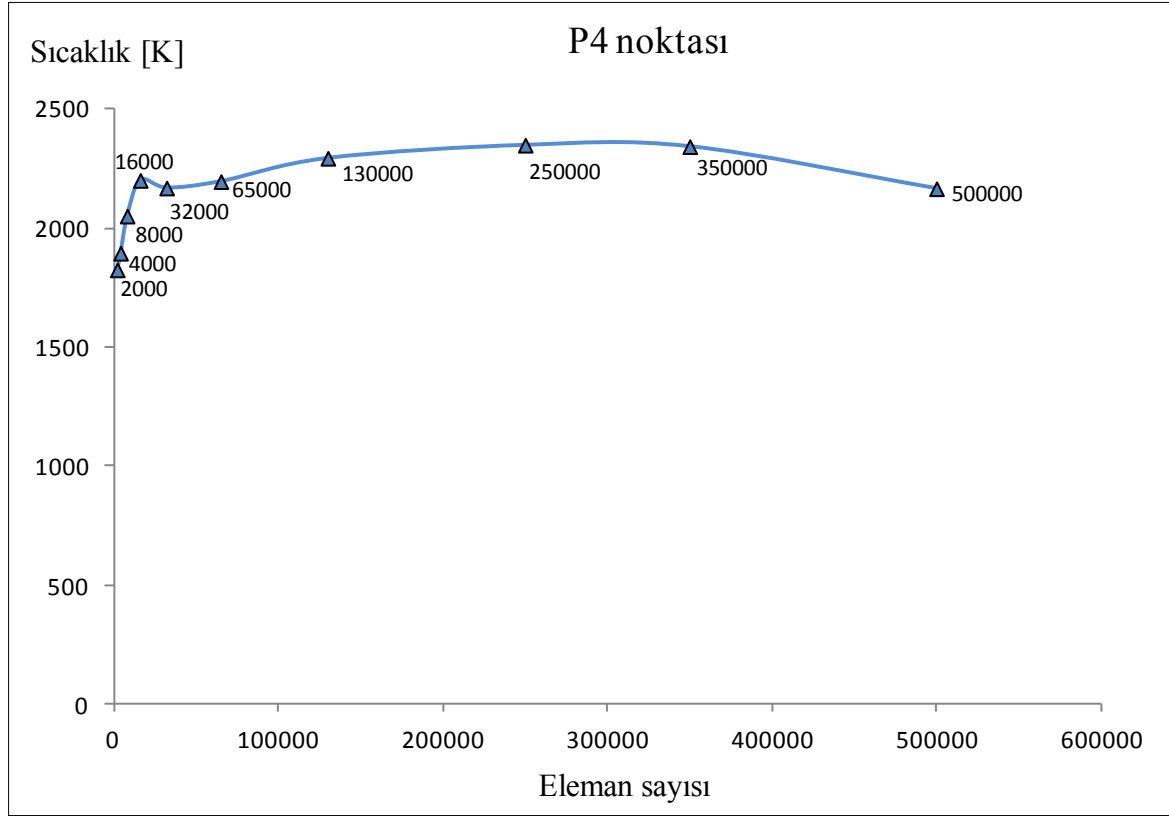
MBA'lar sonucunda P1 ve P4 noktalarındaki sıcaklık değerleri elde edilmiştir (program csv uzantılı bir dosyada sonuç değerini verebilmektedir). Elde edilen sonuçlardan eleman sayısı-sıcaklık grafikleri çizilmiştir (Şekil 7.1 ve Şekil 7.2).



Şekil 7.1. Plazma bölgesindeki P1 noktasının eleman sayısı ile değişen sıcaklık grafiği

Şekil 7.1'den görüleceği üzere, 2000'den 32000 eleman sayısına kadar elde edilen çözümlerde, P1 noktasının sıcaklığı eleman sayısının artmasıyla çok hızlı şekilde artmakta (artış eğimi yüksek) ve bu artış yaklaşık 1000-1500 K kadar olduğu görülebilmektedir. 32000'den 250000 elemana kadar P1 noktasının sıcaklık artış eğilimi orta seviyelerde gerçekleştiği tespit edilmiştir. 250000 ile 500000 eleman aralığında ise, P1 noktasının sıcaklık artış eğimin diğer aralıklara nazaran oldukça düştüğü görülmektedir. 350000 ile 500000 eleman aralığında ise, P1 noktasının sıcaklık artış eğiminin sıfıra çok yaklaştığı ve eleman sayısı açısından çözümlerin kararlı bir hale geçtiği ve bu noktadan sonra modelin

eleman sayısının artırılmasına gerek olmadığına karar verilmiştir. Bu sonuçlara göre, P1 noktası için yapılan MBA'ya göre en uygun eleman sayısının 350000 olduğuna karar verilmiştir.



Şekil 7.2. İşparçası içerisindeki P4 noktasının eleman sayısı ile değişen sıcaklık grafiği

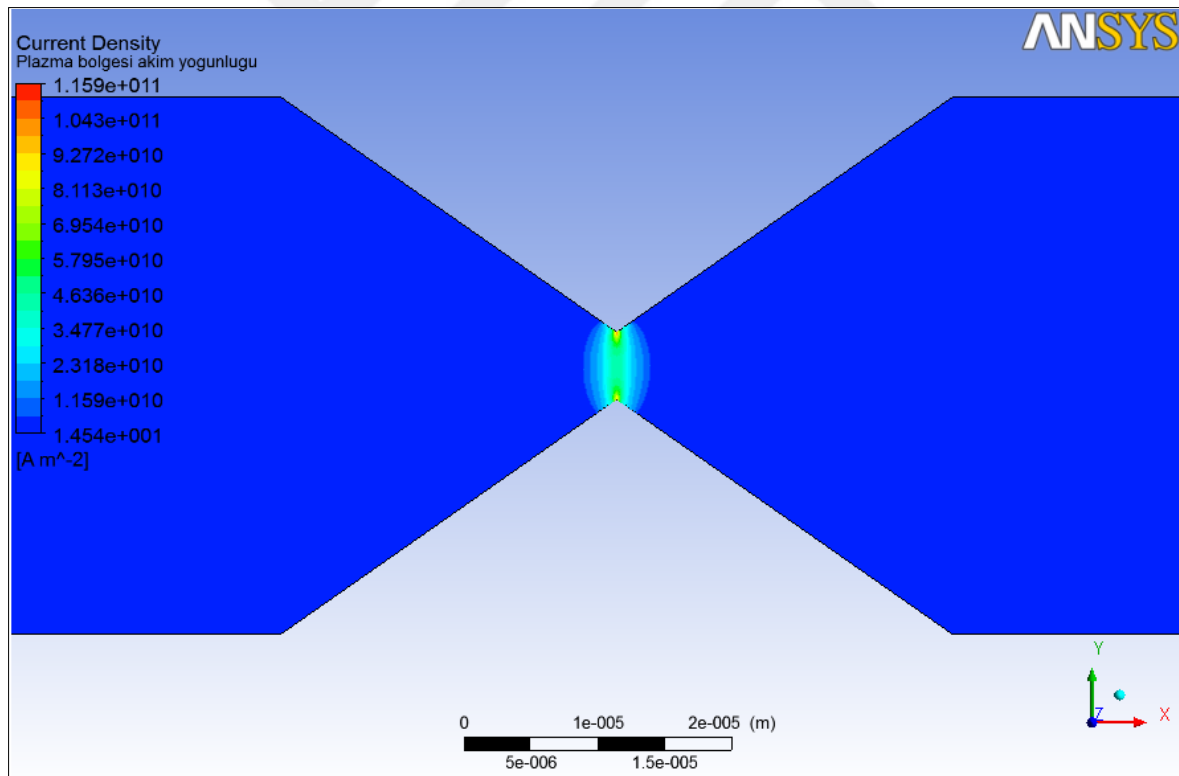
Şekil 7.2'den görüleceği üzere, 2000'den 16 000 aralığında eleman sayısının artırılması P4 noktasının sıcaklık değerini hızlı şekilde artırmaktadır (eğim en yüksek seviyede). 16 000 ile 250000 aralığında eleman sayısının artışı P4 noktasının sıcaklığını orta seviyede etkilemektedir. 250000 ile 500000 bölgesinde ise eleman sayısının artırılması sıcaklık değerine oldukça az etki etmektedir (eğim sıfıra yakın). 500000 elemanda ise istenmeyecek şekilde, artış yerini azalışa bırakmıştır (eğim negatif). Bu sonuçlara göre P4 noktası için yapılan MBA'ya göre en uygun eleman sayısının da 350000 olduğu görülmektedir. MFS modeli için en uygun eleman sayısı değerinin 350000 olduğu iki farklı bölgede iki farklı noktada (P1 ve P4) yapılan MBA sayesinde bulunmuştur.

7.2. AISI4140 İşparçası-Pirinç Elektrot İçin Yapılan Analiz Sonuçları

Tasarlanan MFS modelinde, AISI4140 çeliği işparçası ve pirinç elektrotla 3 A boşalım akımı, 25 μ s vurum süresi ve 50 μ s bekleme süresinde 75 °C su dielektrikte tek çevrim için analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar alt başlıklarda sunulmuştur.

7.2.1. Plazma bölgesindeki akım dağılımı

Şekil 7.3'ten görüleceği üzere akım, iki iletken metal (elektrot-işparçası) arasındaki en kısa mesafeden ve kesit alanı en az olan (en sivri uç) bölgeyi tercih ederek geçmiştir. Özellikle elektrot ve işparçası arasında kalan en kısa mesafedeki su bölgesinde yüksek yoğunlukta ($1,159 \times 10^{11}$ A/m²) akım geçişi, plazmanın bu bölgede gerçekleştiğinin göstergesidir. Şekil 7.3'te elektriksel boşalım gerçekleşeceği plazma kanalı açıkça görülmektedir.



Şekil 7.3. Plazma bölgesi akım dağılımı (AISI4140-Pb; $I_d=3$ A, $t_d=25\mu$ s, $t_p=50$ μ s)

Bu sonucun fiziksel açıklaması şu şekilde yapılabilir: İşleme bölgesinde kontrol edilebilir elektriksel direnç sağlayabilmek için dielektrik sıvı kullanılır. Yeterli gerilim oluşmadan elektrotla işparçası arasında akımın geçmemesi için dielektrik sıvının (gaz yağı, saf su, vb.)

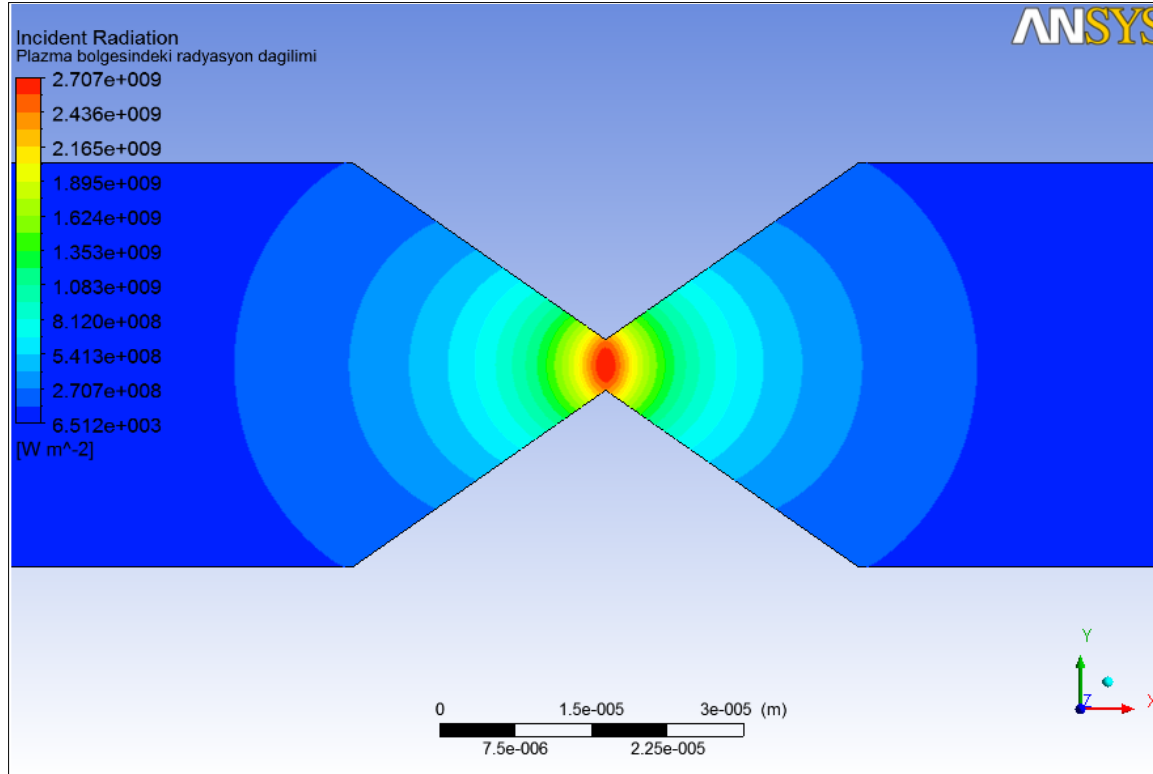
iyi bir yalıtkan olması gerekir. Vurum jeneratöründen elektrotla işparçasına akım uygulandığında, elektrotla işparçası arasındaki en yakın mesafede elektriksel alan güçlenir. Bu güçlenme sonucunda, dielektrik sıvı içerisinde bulunan çok küçük tanecikler elektriksel alanın güçlendiği bölgeye doğru toplanmaya başlar. Elektriksel alanın merkezinde bulunan dar bir bölgede (kanalda) yüklü taneciklerin sayısı arttıkça, dielektrik sıvının yalıtkanlık özelliği bu kanal boyunca gittikçe azalır. Dielektrik sıvının yalıtkanlığı minimum değere ulaştığında artık elektrotla işparçası arasından akım geçmeye başlar. Bu esnada gerilim düşmeye başlarken akım hızla artmaktadır. Akımın artmasıyla bu bölgedeki sıcaklık da hızla artar. Yüksek sıcaklık dielektrik sıvının, işparçasının ve elektrotun çok küçük bir bölümünü buharlaştırır. Böylece elektrotla işparçası arasında bir kanal (plazma kanalı) oluşur.

7.2.2. Plazma bölgesindeki radyasyon dağılımı

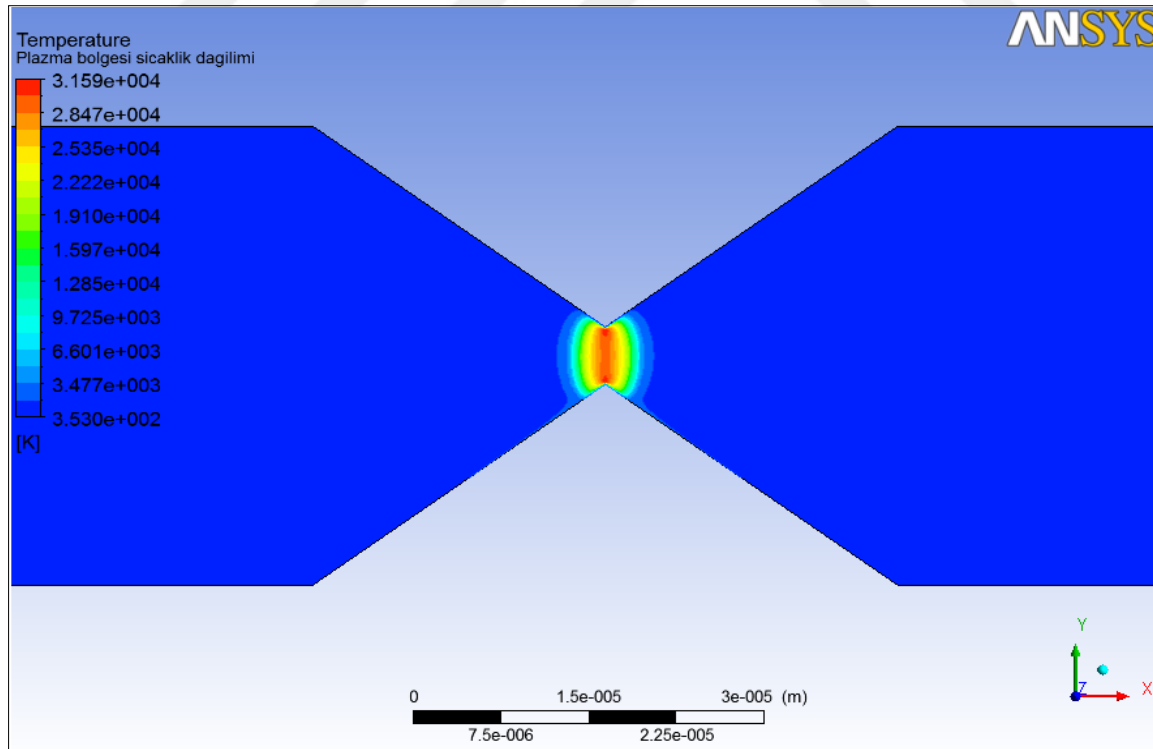
Şekil 7.4'e bakılırsa, plazma kanalının olduğu dar bölgede (kırmızı bölge) radyasyon enerjinin en yüksek ($2,707 \times 10^9 \text{ W/m}^2$) değere ulaştığı görülebilmektedir. Zaten analizin başında P1 radyasyon modeli sadece sıvı bölge için (su) tanımlanmıştır. Şekil 7.4'ten de anlaşılacağı üzere özellikle işleme bölgesine yakın yerlerde daha yüksek radyasyon enerji değerleri görülebilmektedir. Bu sonuçta, plazma kanalının bu bölgede gerçekleştiğinin bir göstergesidir.

7.2.3. Plazma bölgesindeki sıcaklık dağılımı

Şekil 7.5'e bakılırsa, plazma kanalının olduğu dar bölgede (kırmızı bölge) suyun sıcaklık değerinin merkezde yaklaşık 31590 K kadar ulaştığı görülebilmektedir. Bu bölge plazmanın merkez sıcaklığını temsil etmektedir. Plazmanın merkezinden uzaklaşıldıkça sıcaklık değerleri giderek azalmaktadır. Plazma sıcaklığı ortalama olarak 12000 K civarındadır. Plazma kanalı olarak nitelendirilebilecek bölgenin, yaklaşık sıcaklığı 3400 K değerinde olan bir kabuk bölgeyle sınırlandığı görülebilmektedir. Kabuk bölgenin ise, sıcaklığı 353 K olan dielektrik sıvıyla çevrelendiği açıkça görülebilir.



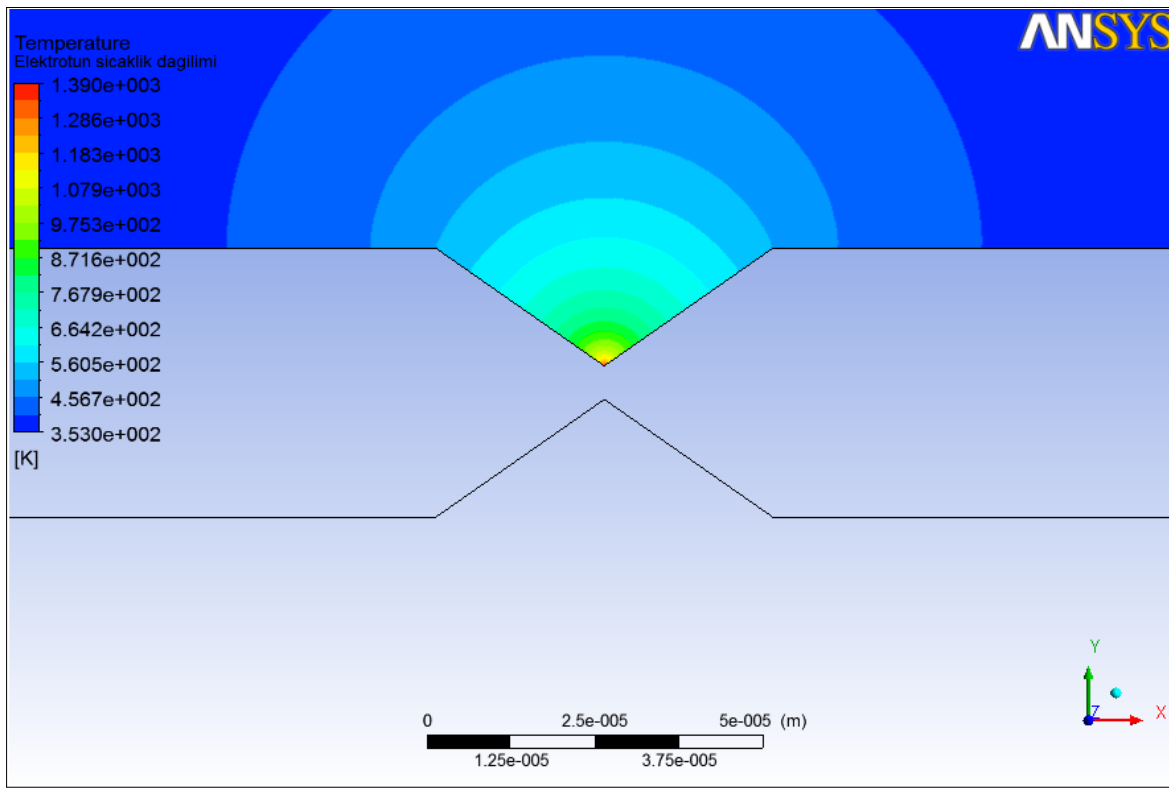
Şekil 7.4. Plazma bölgesi radyasyon dağılımı (AISI4140-Pb; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s)



Şekil 7.5. Plazma bölgesi sıcaklık dağılımı (AISI4140-Pb; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s)

7.2.4. AISI4140 çeliğinin işlenmesinde pirinç elektrotun sıcaklık dağılımı

Şekil 7.6'da pirinç elektrottaki sıcaklık dağılım eğrileri görülmektedir. Pirinç elektrot bölgesindeki en yüksek sıcaklık 1390 K olarak görülmektedir. Bu demektir ki: 1 çevrim sonunda ($t_d=25 \mu s + t_p=50 \mu s = 75 \mu s$) pirinç elektrottun erime sıcaklığını ($925^\circ C = 1198 K$) aşacak bir sıcaklık değerinin var olmasından dolayı pirinç elektrotta aşınmanın olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat, Şekil 7.6'dan anlaşılabileceği üzere 1200 K aşan sıcaklık bölgesi oldukça dar bir bölgedir ve program üzerinde ölçülmesine imkan yoktur.

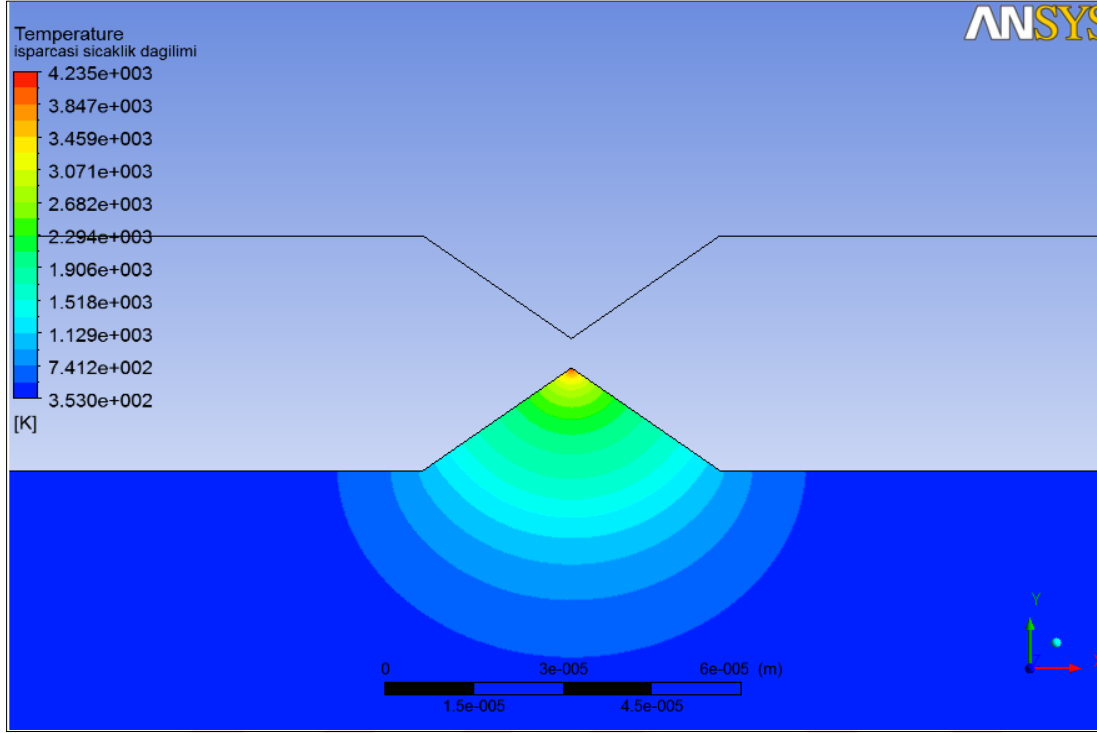


Şekil 7.6. Pirinç elektrotun sıcaklık dağılımı (İşleme: AISI4140; $I_d=3 A$, $t_d=25\mu s$, $t_p= 50 \mu s$)

7.2.5. AISI4140 çeliğinin sıcaklık dağılımı

Şekil 7.7'de işparçasının 1 çevrim için geçen süredeki sıcaklık dağılım eğrileri görülmektedir. Bu çalışmada kullanılan AISI4140 çeliğinin erime sıcaklığı 1688 K ($1415^\circ C$) dir. Şekil 7.7'den görüleceği üzere koyu mavi bölgeyle temsil edilen alan, erime sıcaklığından küçük olan sıcaklıkları ifade etmektedir. MFS modelinin doğrulama çalışmalarında: işparçası içerisindeki sıcaklık dağılımları kullanılarak malzeme için erime

sıcaklığını geçen bölgeler kaldırılan talaş olarak kabul edilmiştir. Bu kabulle, teorik İİH değerleri hesaplanmıştır.



Şekil 7.7. AISI4140 çeliğinin sıcaklık dağılımı (Elektrot: Cu; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s)

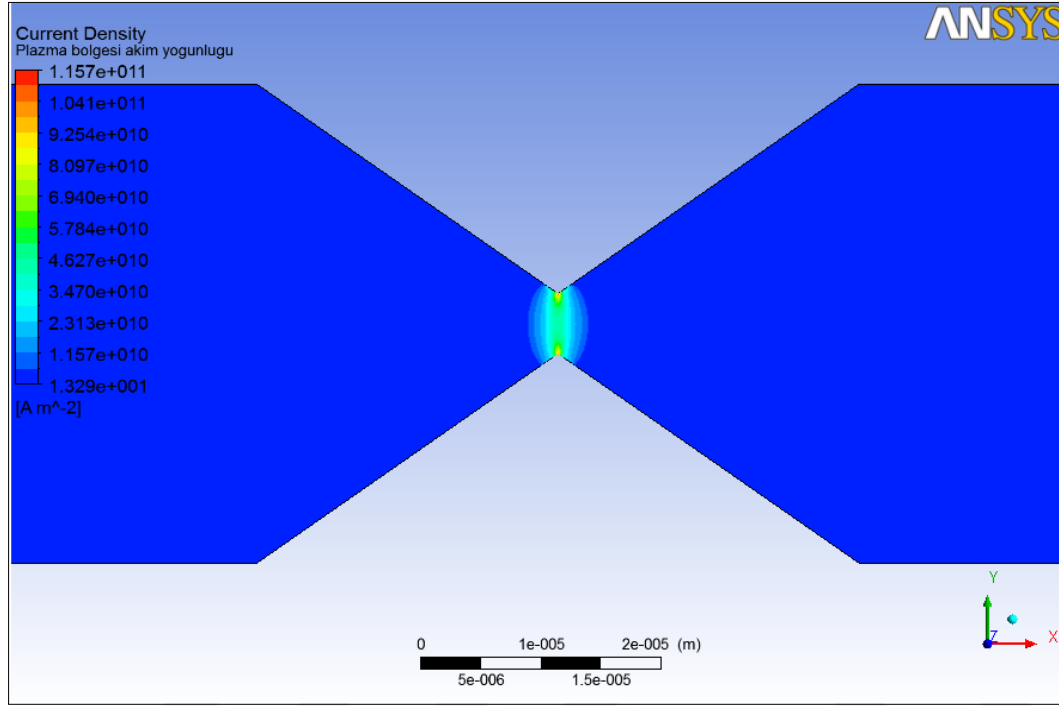
7.3. Ti6Al4V Alaşımının Analizi Sonuçları

Tasarlanan MFS modelinde, Ti6Al4V alaşımı işparçası ve bakır elektrotla 3 A boşalım akımı, 25 μ s vurum süresi ve 50 μ s bekleme süresinde 75 °C su dielektrikte tek çevrim için analiz gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar alt başlıklarda sunulmuştur:

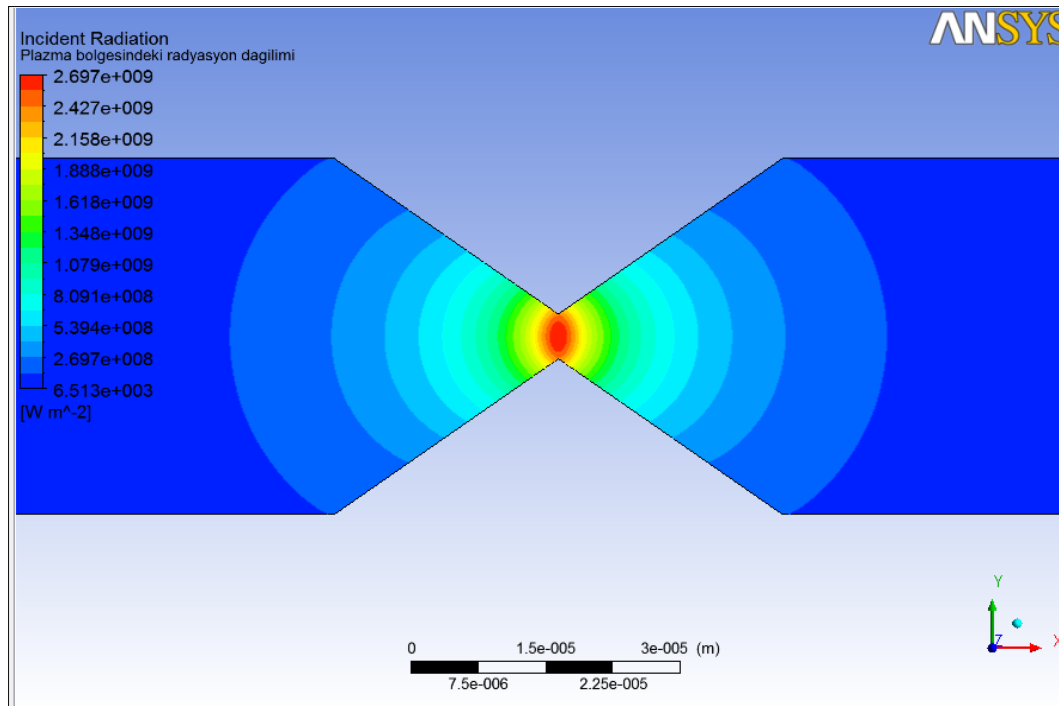
7.3.1. Ti6Al4V alaşımının bakır elektrotla işlenmesinde plazma bölgesinin özellikleri

Ti6Al4V-bakır elektrot analiz çalışmasında plazma bölgesindeki akım yoğunluğu dağılımı AISI4140-pirinç elektrot analiziyle aynı dielektrik kullanıldığı ve aynı EEİ parametreleri (akım,vurum-bekleme süreleri) kullanıldığı için benzer davranışlar sergilemiştir. Şekil 7.8'den görüleceği üzere akım, iki elektrot (elektrik iletken metal) arasındaki en kısa mesafeden ve kesit alanı en az olan (en sivri uç) bölgeyi tercih ederek geçmiştir. Özellikle elektrot ve işparçası arasında kalan en kısa mesafedeki su bölgesinde en yüksek yoğunlukta ($1,159 \times 10^{11}$ A/m²) akım geçişi, plazmanın bu bölgede gerçekleştiğinin (Şekil 7.8)

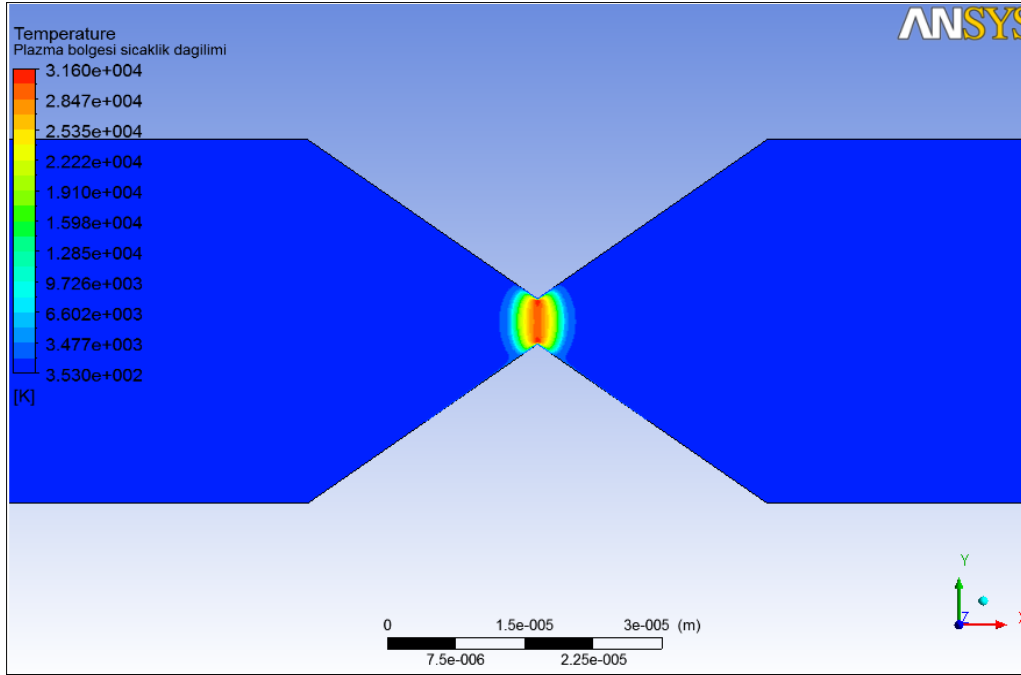
göstergesidir. Aynı dielektrik kullanımından dolayı plazma bölgesindeki radyasyon dağılımı (Şekil 7.9) ve plazma bölgesi sıcaklık dağılımı (Şekil 7.10) genel olarak benzerlik göstermiştir.



Şekil 7.8. Plazma bölgesi akım dağılımı (Ti6Al4V-Cu; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s)



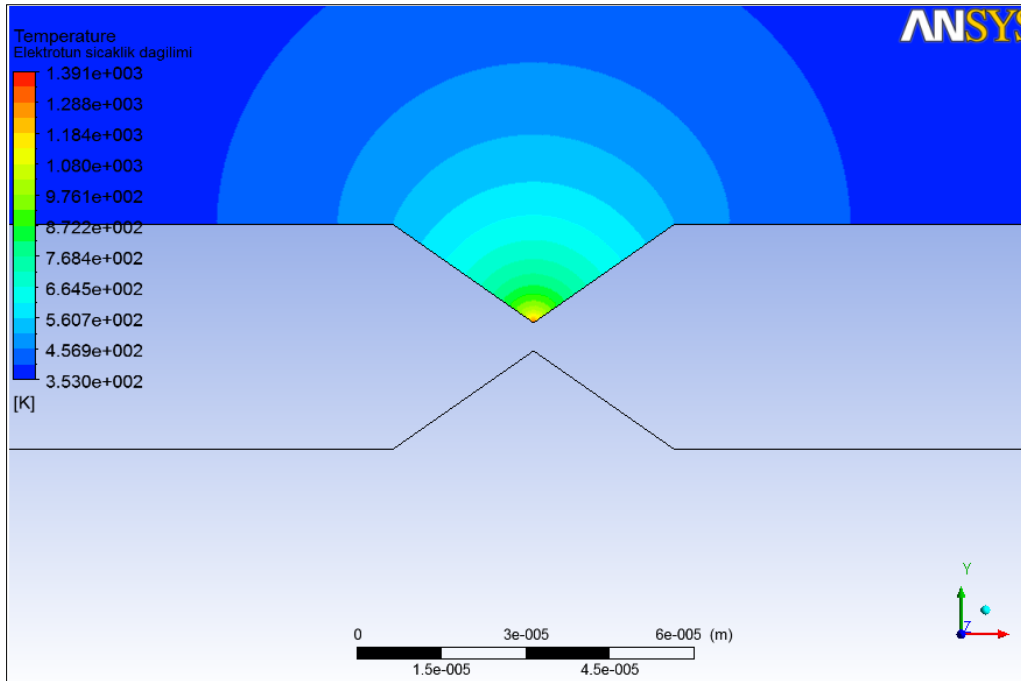
Şekil 7.9. Plazma bölgesi radyasyon dağılımı (Ti6Al4V-Cu; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s)



Şekil 7.10. Plazma bölgesi sıcaklık dağılımı (Ti6Al4V-Cu; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s)

7.3.2. Ti6Al4V alaşımının işlenmesinde bakır elektrotun sıcaklık dağılımı

Şekil 7.11'de bakır elektrottaki sıcaklık dağılım eğrileri görülmektedir. Bakır elektrot bölgesindeki en yüksek sıcaklık 1391 K olarak görülmektedir.

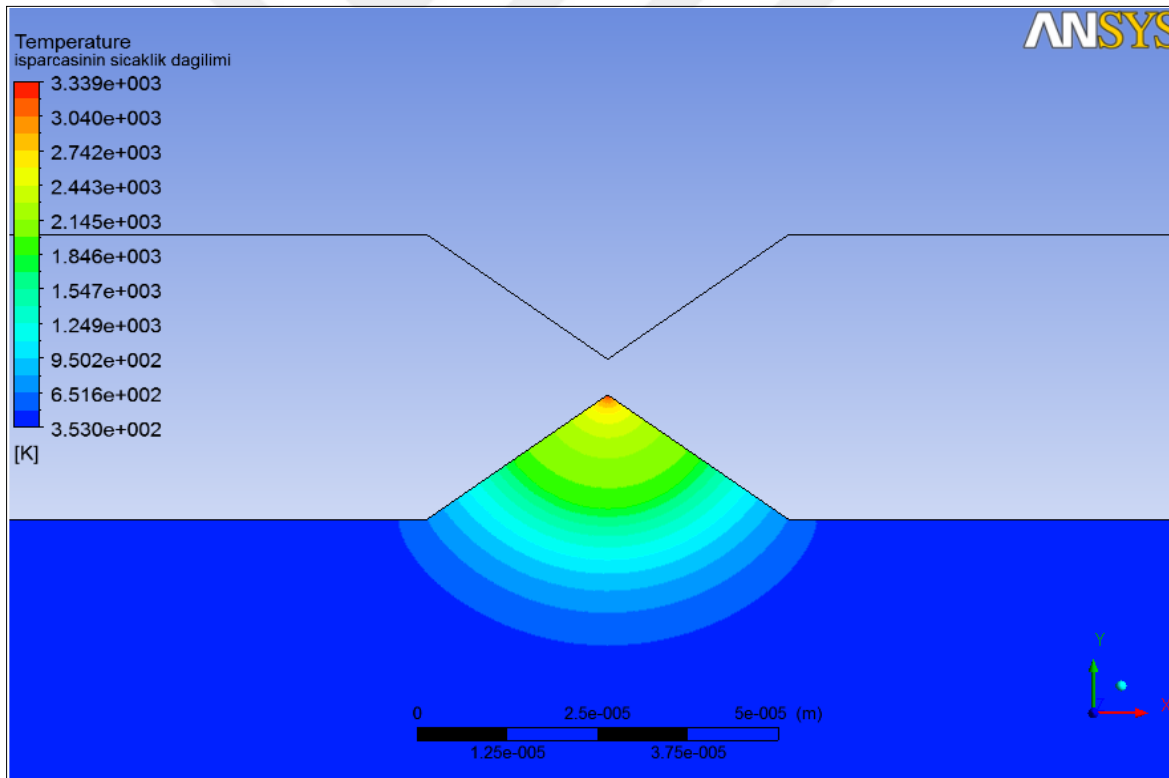


Şekil 7.11. Bakır elektrotun sıcaklık dağılımı (İşleme: Ti6Al4V; $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s)

Bu demektir ki: 1 çevrim sonunda ($t_d=25 \mu s + t_p=50 \mu s = t_c=75 \mu s$) bakır elektrottun erime sıcaklığını ($1084^\circ C = 1357 K$) aşan bir sıcaklık değerinin var olmasından dolayı bakır elektrotta aşınmanın olduğu sonucuna varılmıştır. Fakat, $1357 K$ aşan sıcaklık bölgesi çok dar bir aralıktır (Bkz. Şekil 7.11). Program üzerinde ölçüm alınmasına olanak olmadığı için EAH ile ilgili değer hesaplanamamaktadır.

7.3.3. Ti6Al4V alaşımının sıcaklık dağılımı

Şekil 7.12'de işparçasının 1 çevrim için geçen süredeki sıcaklık dağılım eğrileri görülmektedir. Bu analizde kullanılan Ti6Al4V alaşımının erime sıcaklığı $1933 K$ ($1660^\circ C$) dir. Şekil 7.12'den görüleceği üzere koyu mavi bölgeyle temsil edilen alan, ergime sıcaklığından küçük olan sıcaklıkları ifade etmektedir.



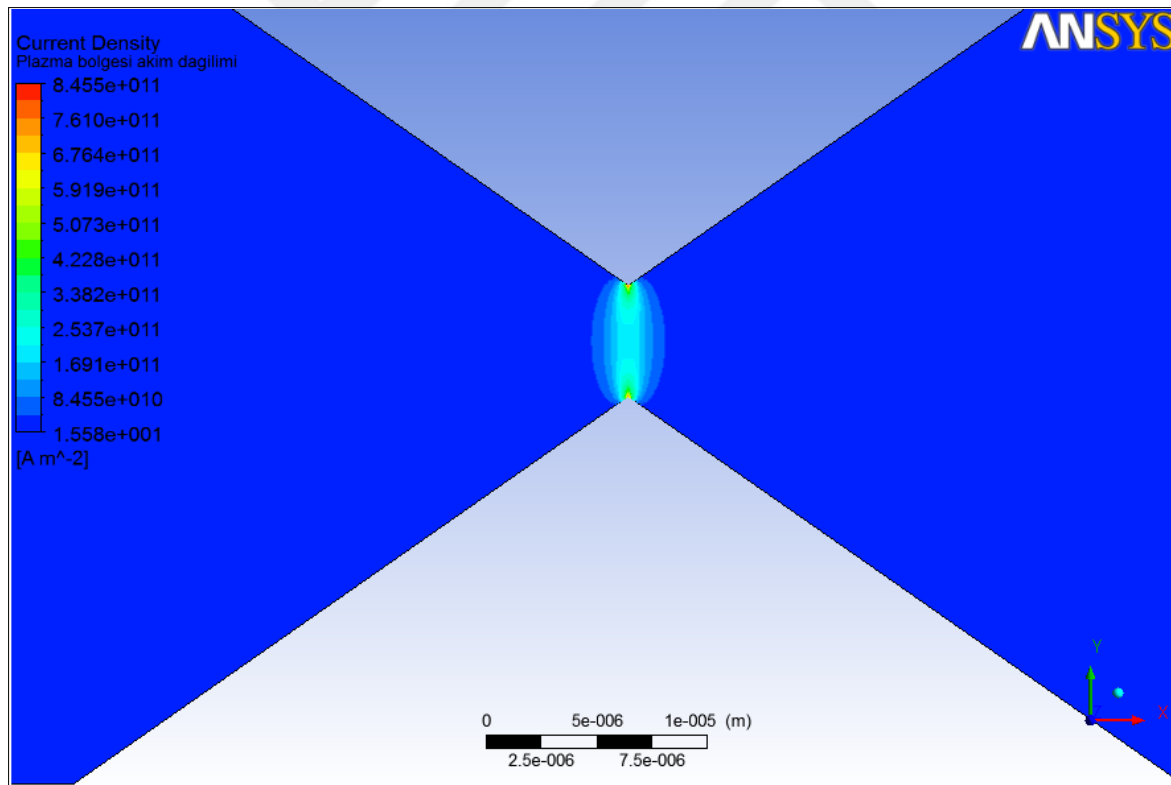
Şekil 7.12. Ti6Al4V alaşımının sıcaklık dağılımı (Elektrot: Cu; $I_d=3 A$, $t_d=25 \mu s$, $t_p=50 \mu s$)

Ti6Al4V alaşımıyla AISI4140 çeliğinin MFS modeli analizinde aynı işleme parametreleri kullanılmasına karşın iki analiz kıyaslandığında: AISI4140 çeliği işparçasındaki sıcaklık eğrileri dikeyde daha fazla yol alabildiği görülebilmektedir (Bkz. Şekil 7.7). Yani, ısıyı Ti6Al4V alaşımına göre daha iyi iletmediği görülebilmektedir.

7.4. Başka Bir Araştırmacının Çalışmasından Oluşturulan Analizlerin Sonuçları

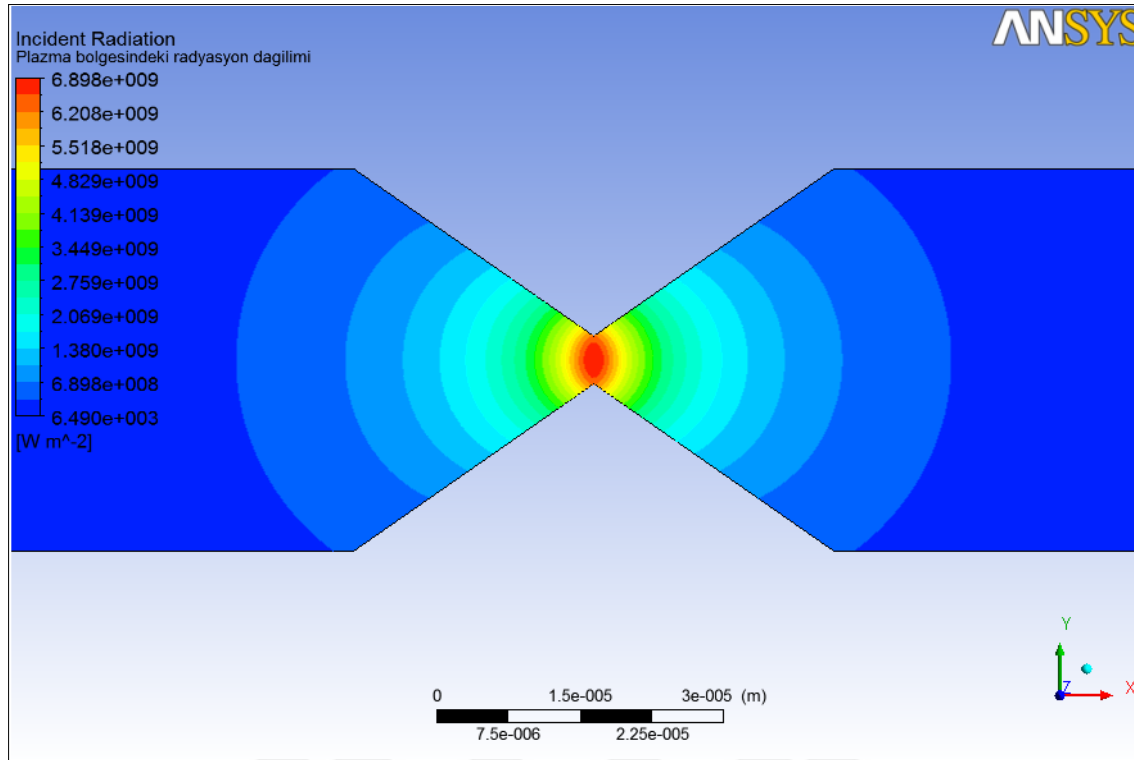
7.4.1. Ti6Al4V alaşımı-bakır elektrotla yapılan analiz ($I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s)

Şekil 7.13'te Ti6Al4V alaşımının bakır elektrotla 12 A boşalım akımı, 35 μ s vurum süresi ve 26 μ s bekleme süresinde su dielektrikle yapılan analizin sonucunda plazma bölgesindeki akımın dağılımı görülmektedir. Bu analizde, akımın (12 A) ve vurum süresinin (35 μ s) daha yüksek olmasından dolayı dielektrikteki akım yoğunluğu değeri Ti6Al4V alaşımın 3 A akım ve 25 μ s'de yapılan işlemlerindeki (Bkz. Şekil 7.12) akım yoğunluğu değerlerinden doğal olarak daha yüksek çıkmıştır. Yapılan analizlerde suyun, yaklaşık 100 ns sonra 5000 K sıcaklık değerlerine ulaşabildiği tespit edilmiştir. Yani, suyun plazma fazına geçmesi, vurum süresinin başlangıcında ve oldukça hızlı şekilde olmaktadır.

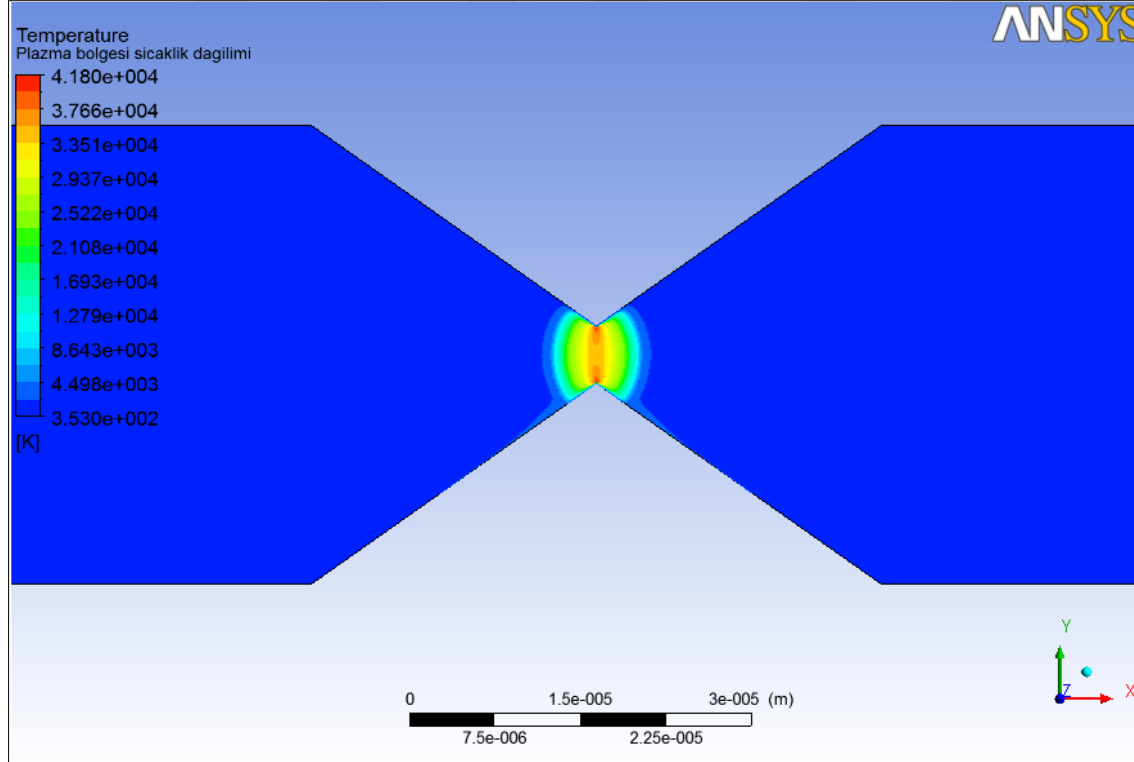


Şekil 7.13. Plazma bölgesi akım dağılımı (Ti6Al4V-Cu; $I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s)

Akım ve vurum süresinin artmasından dolayı plazma bölgesinin radyasyon enerjisi (Şekil 7.14) ve sıcaklığı da artmıştır (Şekil 7.15).

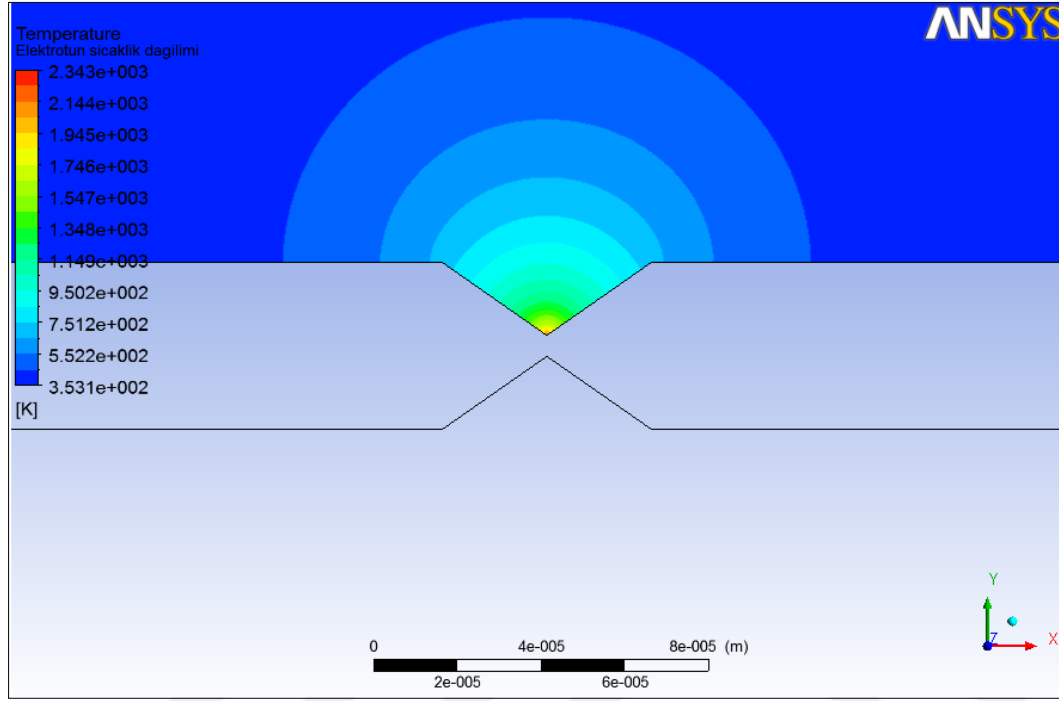


Şekil 7.14. Plazma bölgesi radyasyon dağılımı (Ti6Al4V-Cu; $I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s)

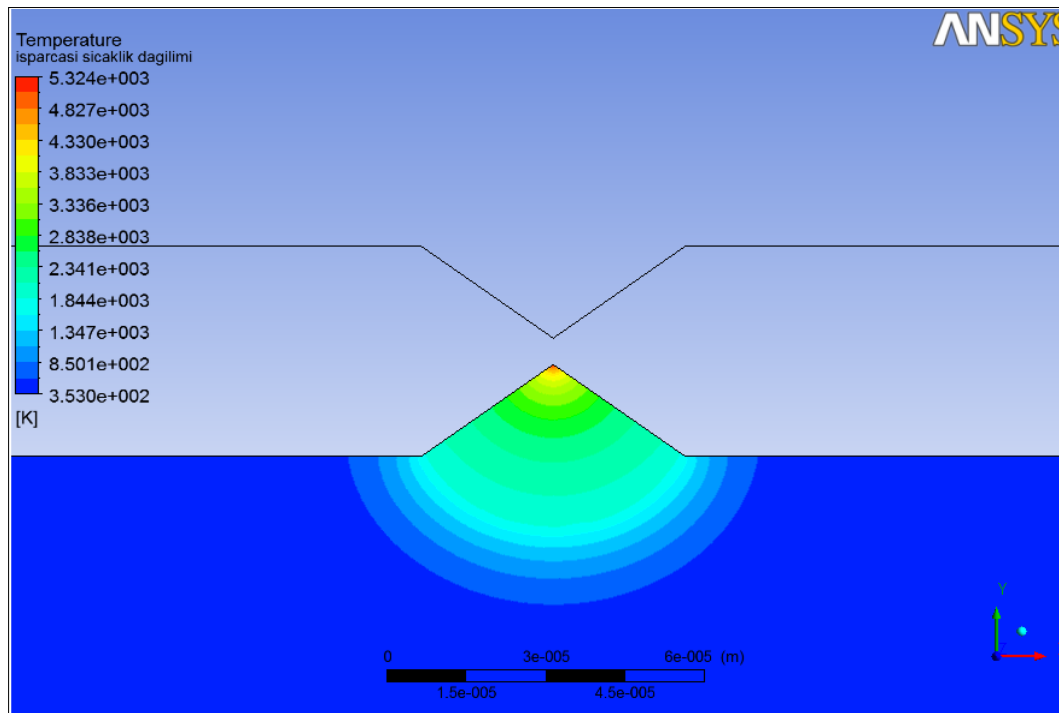


Şekil 7.15. Plazma bölgesi sıcaklık dağılımı (Ti6Al4V-Cu; $I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s)

Ti6Al4V alaşımının bakır elektrotla $I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s işleme koşullarında yapılan analizi sonucunda bakır elektrottaki sıcaklık dağılımı Şekil 7.16'da ve işparçasındaki sıcaklık eğrileri Şekil 7.17'de verilmiştir.



Şekil 7.16. Bakır elektrotun sıcaklık dağılımı (İşleme: Ti6Al4V; $I_d=12$ A, $t_d=35\mu$ s, $t_p=26$ μ s)

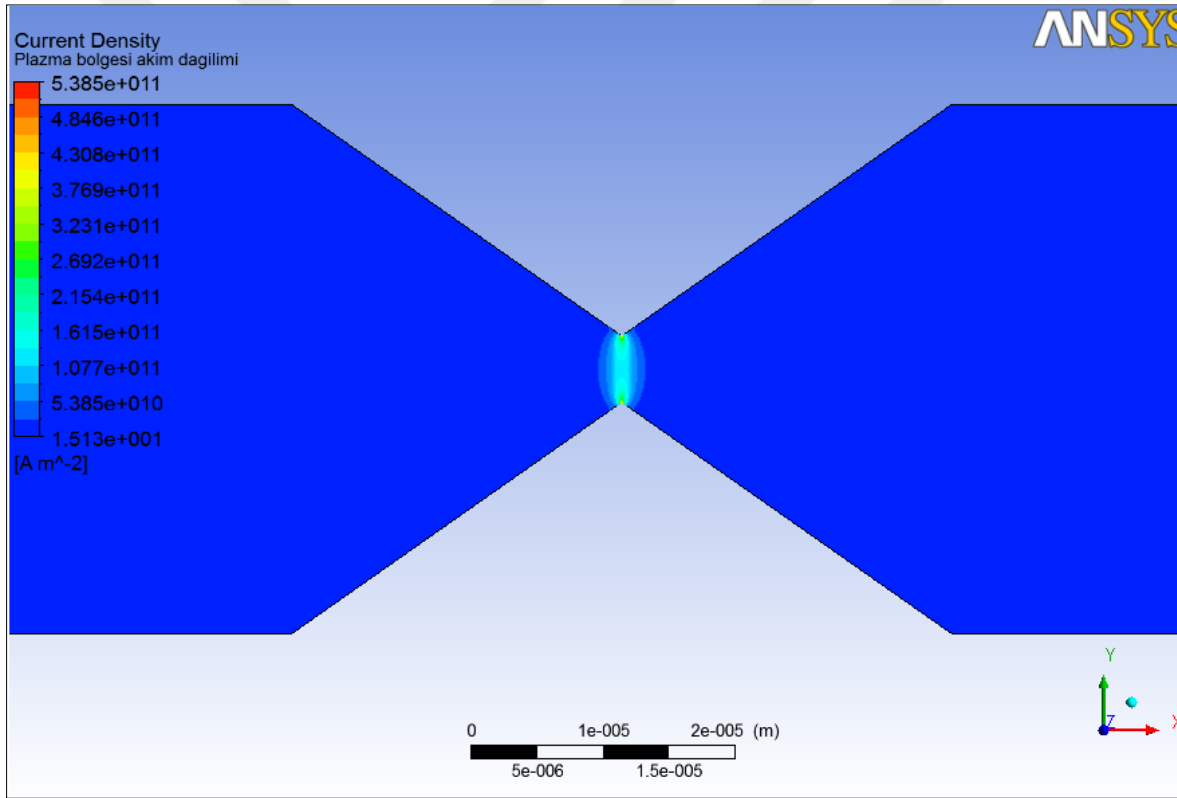


Şekil 7.17. Ti6Al4V sıcaklık dağılımı (Elektrot: Cu; $I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s)

7.4.2. IN718 - bakır elektrotla yapılan analiz ($I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s)

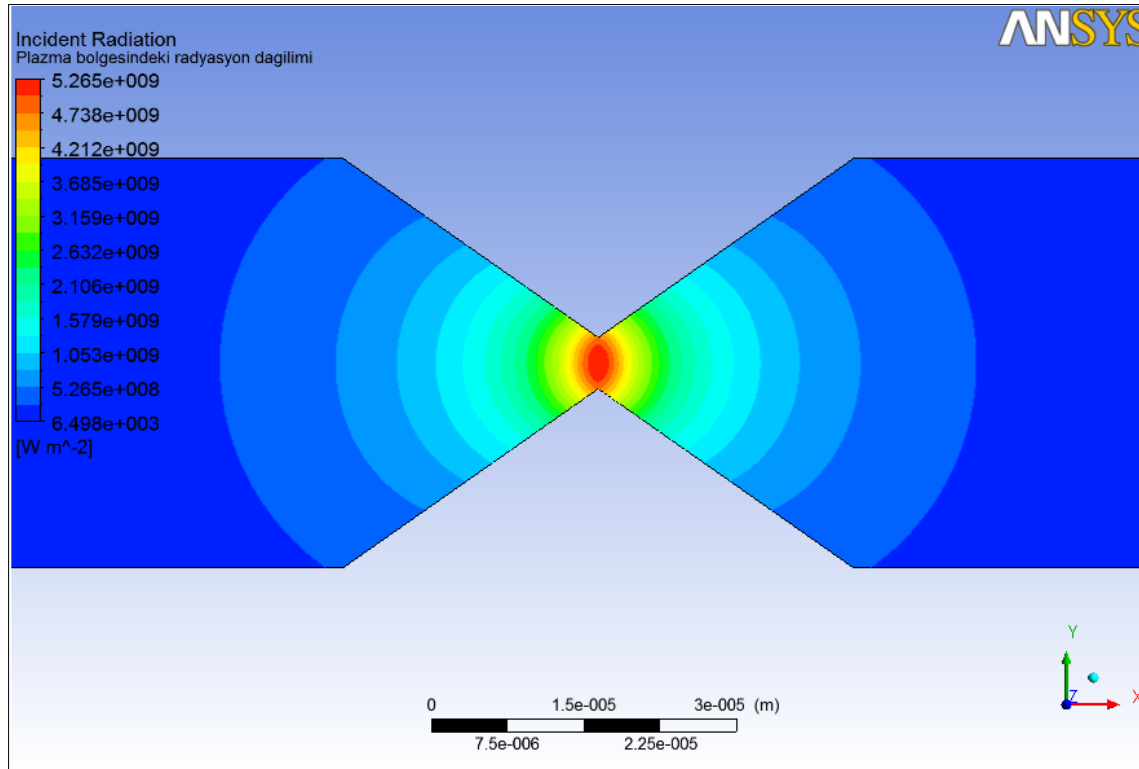
AISI4140 ve Ti6Al4V işparçalarının su dielektrik kullanılarak yapılan analiz çalışmalarına benzer şekilde IN718 alaşımının işlenmesinde plazma bölgesindeki akım dağılımı aynı özelliklere sahiptir (Şekil 7.18).

Bu malzemeyle yapılan işlemedeki dielektriğin (suyun) radyasyon enerjisi dağılımı Şekil 7.19'da ve sıcaklık dağılımı ise Şekil 7.20'de verilmiştir. Ayrıca bu analizde kullanılan bakır elektrotun sıcaklık dağılımı Şekil 7.21'de, işparçasının sıcaklık dağılımı ise Şekil 7.22'de verilmiştir.

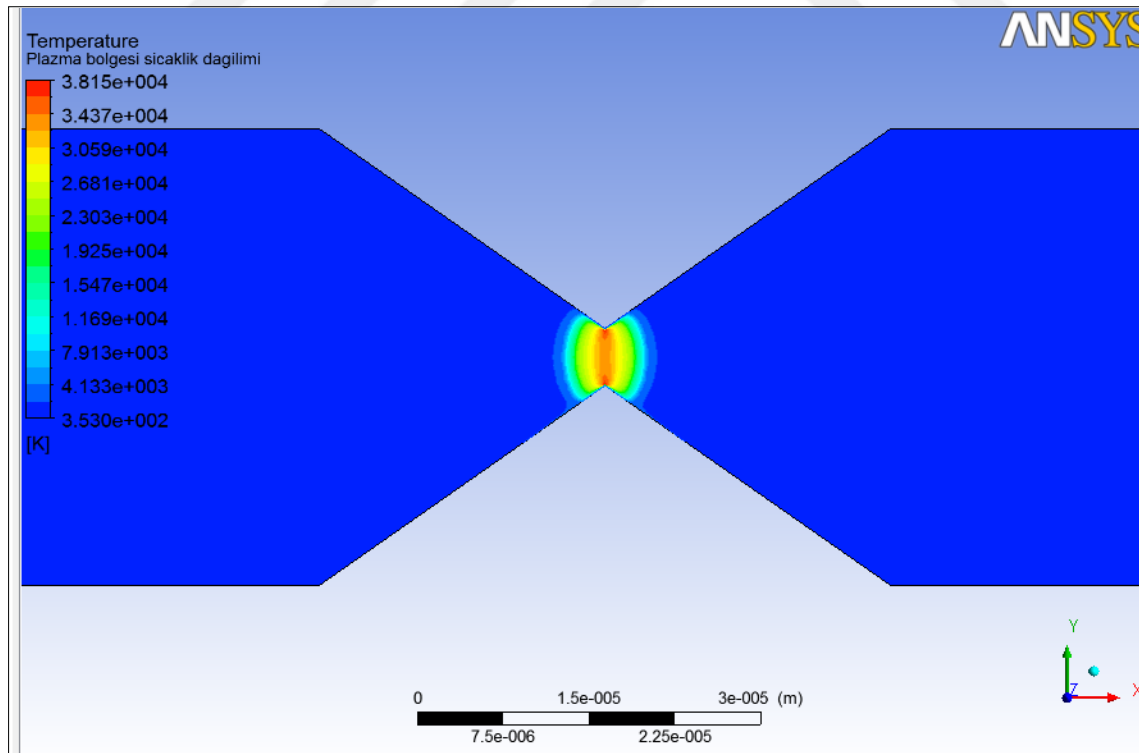


Şekil 7.18. Plazma bölgesi akım dağılımı (IN718-Cu; $I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s)

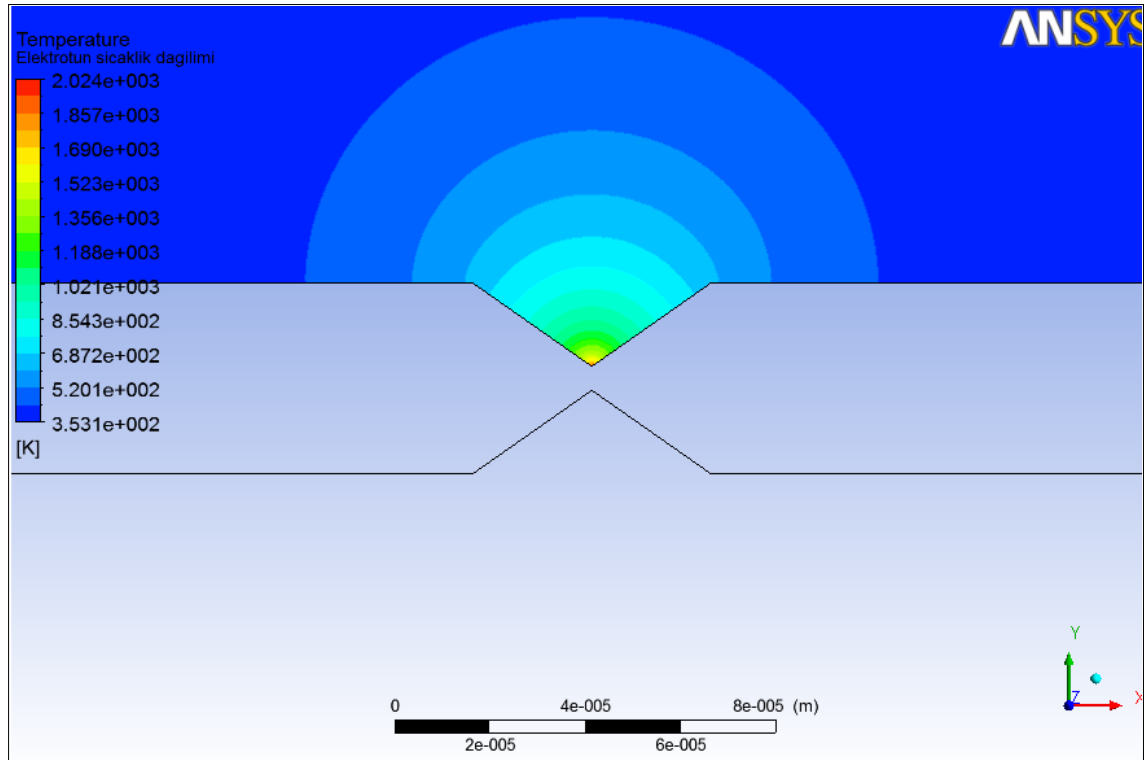
IN718-Cu analiziyle Ti6Al4V-Cu analizinde aynı vurum süresi kullanılmasına rağmen maksimum akım yoğunluğu değeri Ti6Al4V analizinde $8,455 \times 10^{11}$ A/m² olarak elde edilmiştir. IN718-Cu analizinin aksine akımın dielektrik sıvıdan geçtiği bölge daha geniştir (Bkz. Şekil 7.13). Şekil 7.18'de görüldüğü üzere maksimum akım yoğunluğu $5,385 \times 10^{11}$ A/m² dir. Bunun sebebi boşalım akımı (8,2 A) dır.



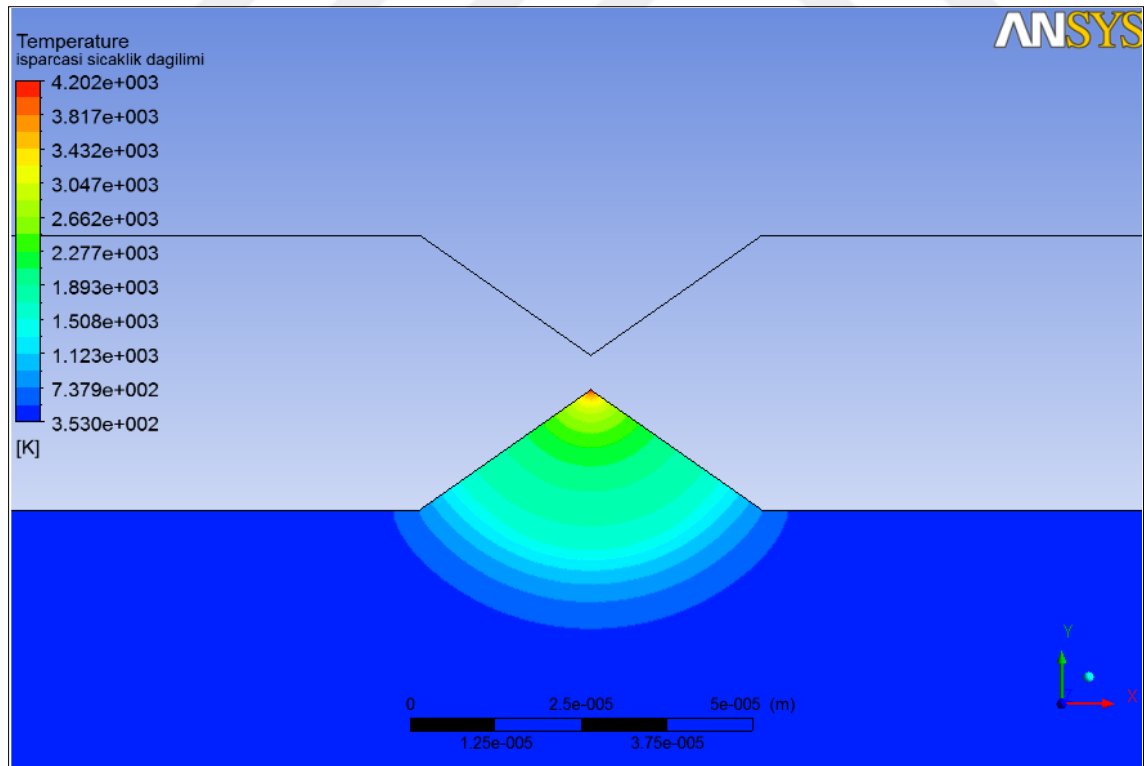
Şekil 7.19. Plazma bölgesi radyasyon dağılımı (IN718-Cu; $I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s)



Şekil 7.20. Plazma bölgesi sıcaklık dağılımı (IN718-Cu; $I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s)



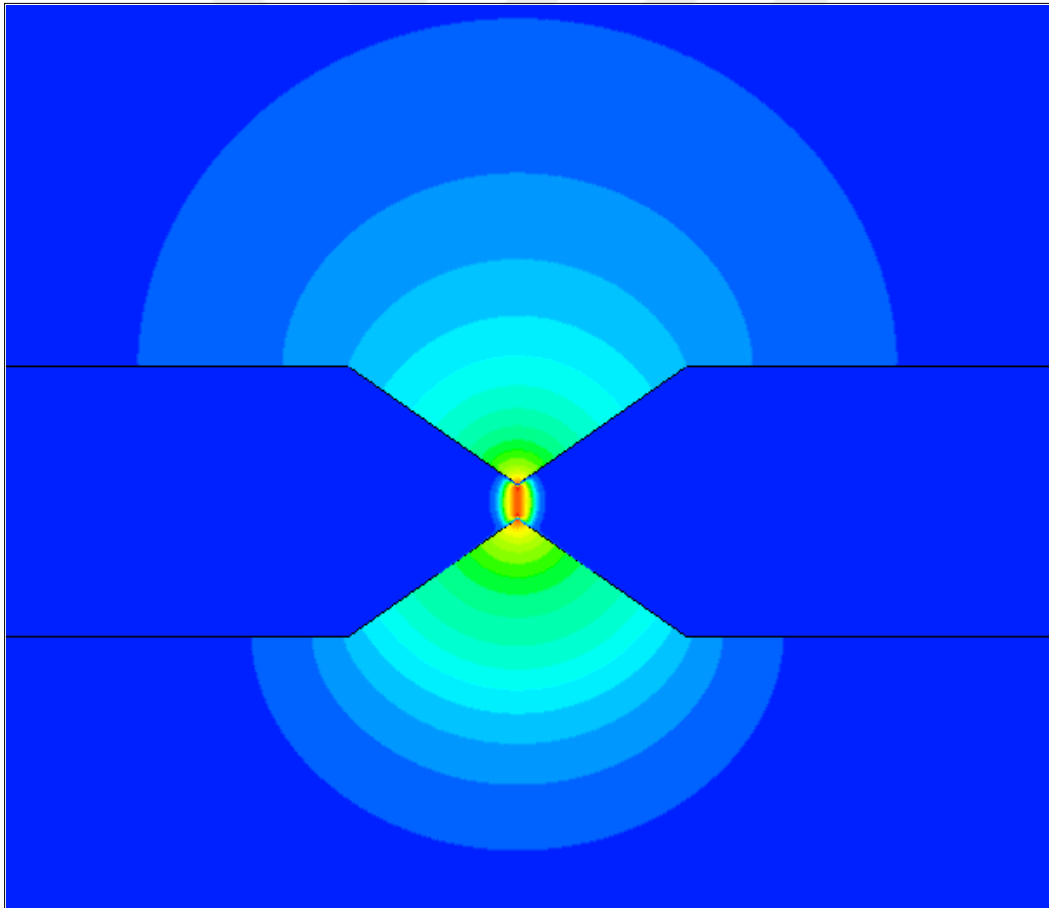
Şekil 7.21. Bakır elektrotun sıcaklık dağılımı (İşleme: IN718; $I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s)



Şekil 7.22. IN718 alaşımının sıcaklık dağılımı (Elektrot: Cu; $I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s)

7.5. MFS Modelinin Analiz Sonuçlarının Yorumlanması

CFX programında iki boyutlu analiz sonuçlarına bakıldığında: MFS modelinin tasarım aşamasındaki hedeflerin ve bu çalışmayı diğer çalışmalardan ayıran temel noktaların tamamı başarıya ulaşmıştır. Türünün ilk örneği olan bu çalışmada: ampirik denklem kullanılmadan yapılan makul kabullerle gerçek EEİ durumunu yansıtacak sınır şartları ve başlangıç şartlarında süre kontrollü akım yoğunluğu değeri verilerek: suyun yüksek sıcaklıktaki (plazma fazındaki) zamana bağlı fiziksel özellikleri (C_p , k , σ) kullanılarak elektriksel ısınma (ing. joule heating) ile plazma oluşumu ve plazma ortamı sayesinde elektrottan işparçasına elektriksel ısınmayla ısı transferi gerçekleştirilebilmiştir (Şekil 7.23). Bu ısı transferi vasıtasıyla işparçasından talaş kaldırabilmiş ve bu esnada radyasyon ve doğal konveksiyonun da etkileri görülebilmektedir.



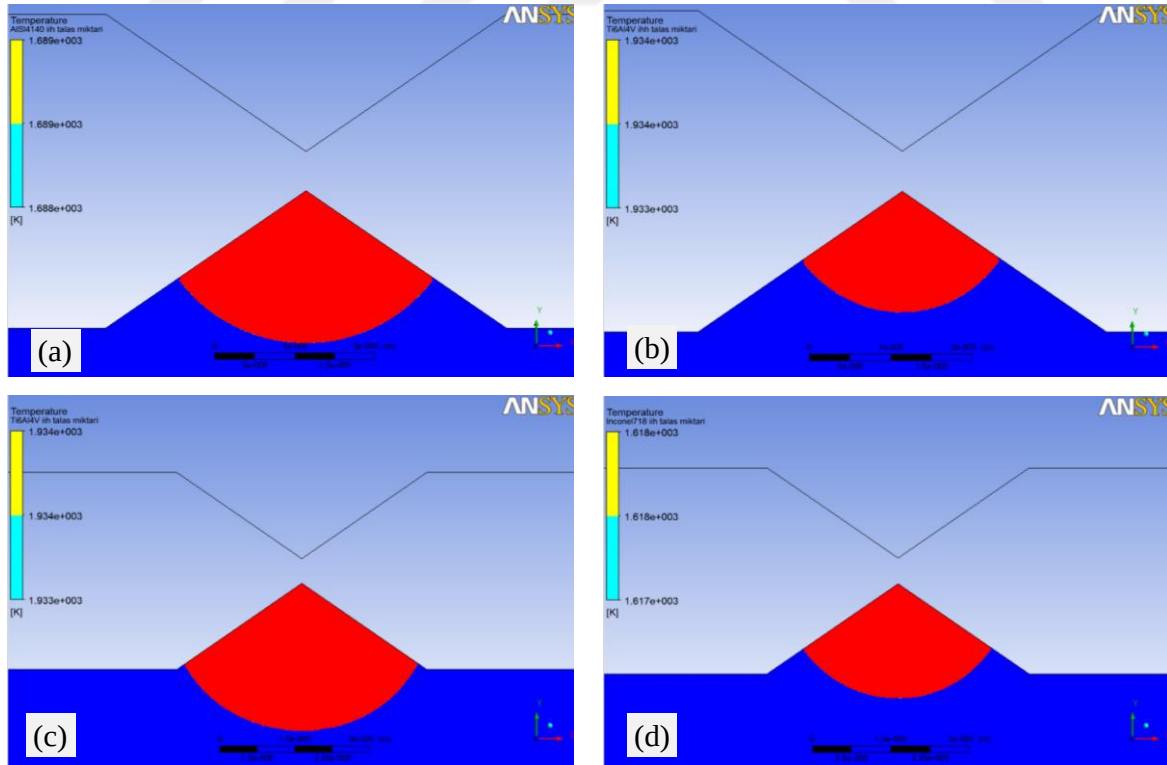
Şekil 7.23. MFS modelinde elektrot-plazma kanalı-işparçasındaki sıcaklık eğrileri

MFS modeli, farklı işparçası malzemeleri (AISI4140, Ti6Al4V ve IN718) ve farklı elektrot malzemeleriyle (pirinç ve bakır) tasarlanıp 3 farklı işleme parametresinde (3 A-25 μ s, 8,2

A-35 μ s ve 12 A-35 μ s) zamana bağılı şekilde analiz edilmiştir (Çizelge 7.1). Analizler sonucunda: her işparçasında farklı boyutlarda sıcaklık eğrileri elde edilmiştir. MFS modelinin dördüncü kabulü gereği (Bkz. Bölüm 6.1.1); işparçasının ve elektrotun ergime sıcaklığını geçen eğrilerin üstünde kalan bölge kaldırılan hacim olarak kabul edilip program vasıtasıyla bu bölgelerin hatları belirlenmiştir (Şekil 7.24). Her işparçasının ergime sıcaklığı farklı olduğu için işlenmiş bölgenin de farklı olacağı dolayısıyla İİH değerinin farklı olacağı tespit edilmiştir. Bu farklılıklar MFS modelini doğrulama çalışmalarında irdelenmiştir.

Çizelge 7.1. MFS modelinde gerçekleştirilen analizler

MFS modeli analiz kodu	İşparçası-elektrot	İşleme parametreleri
A1	AISI4140-Pb	$I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s
A2	Ti6Al4V-Cu	$I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s
A3	Ti6Al4V-Cu	$I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s
A4	IN718-Cu	$I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s



Şekil 7.24. İşparçasından ergimiş bölgeler: a)A1, b)A2, c) A3 ve d) A4

8. MFS MODELİNİ DOĞRULAMA ÇALIŞMALARI

Bu bölüme kadar MFS modelinin hazırlık işlemleri (ing. preprocessing) ve çözüm (ing. processing) işlemleri gerçekleştirilmiştir. SEA'nın belki de en önemli aşaması olan değerlendirme işlemleri (ing. postprocessing) içerisinde bulunan doğrulama (ing. validation) işlemleri modelin geçerliliği için yapılması gerekir.

8.1. MFS Modelinin Doğrulanmasında İzlenen Yöntemler

Toplamda gerçekleştirilen 4 farklı MFS analizinin doğrulama çalışmalarında, deneysel çalışmalardan elde edilen İİH değeriyle analizlerin sonuçlarından hesaplanan teorik İİH değerlerinin kıyaslanması şeklinde bir yöntem izlenmiştir. Analiz sonuçlarının kıyaslanacağı deneysel İİH sonuçları Çizelge 8.1'de belirtilmiştir.

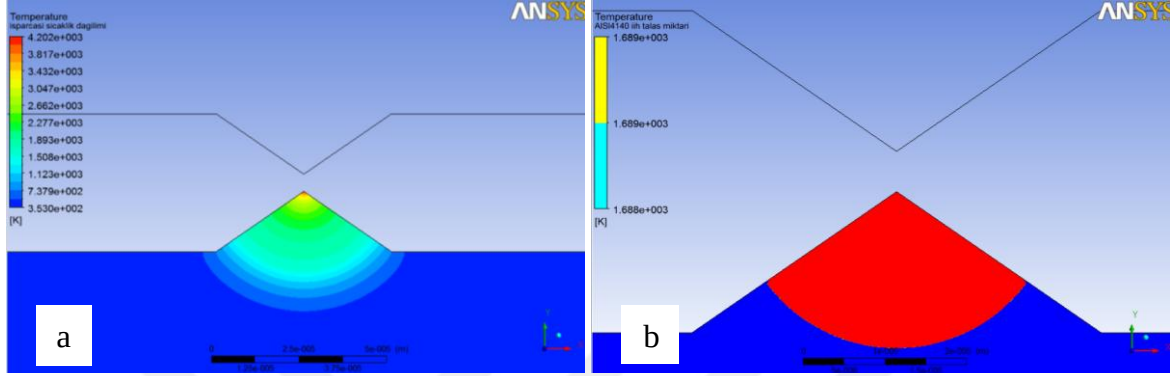
Çizelge 8.1. 2 mm'lik elektrotlarla suda yapılan işlemlerdeki deneysel İİH değerleri

Deney Kodu	İşparçası-elektrot	İşleme parametreleri	İİH [mm^3/vurum]
D1	AISI4140-Pb	$I_d=3 \text{ A}$, $t_d=25 \text{ } \mu\text{s}$, $t_p=50 \text{ } \mu\text{s}$	$6,3 \times 10^{-6}$
D2	Ti6Al4V-Cu	$I_d=3 \text{ A}$, $t_d=25 \text{ } \mu\text{s}$, $t_p=50 \text{ } \mu\text{s}$	$1,8 \times 10^{-6}$
D3-(yılmaz)	Ti6Al4V-Cu	$I_d=12 \text{ A}$, $t_d=35 \text{ } \mu\text{s}$, $t_p=26 \text{ } \mu\text{s}$	$1,2 \times 10^{-5}$
D4-(yılmaz)	IN718-Cu	$I_d=8,2 \text{ A}$, $t_d=35 \text{ } \mu\text{s}$, $t_p=16 \text{ } \mu\text{s}$	$7,4 \times 10^{-6}$

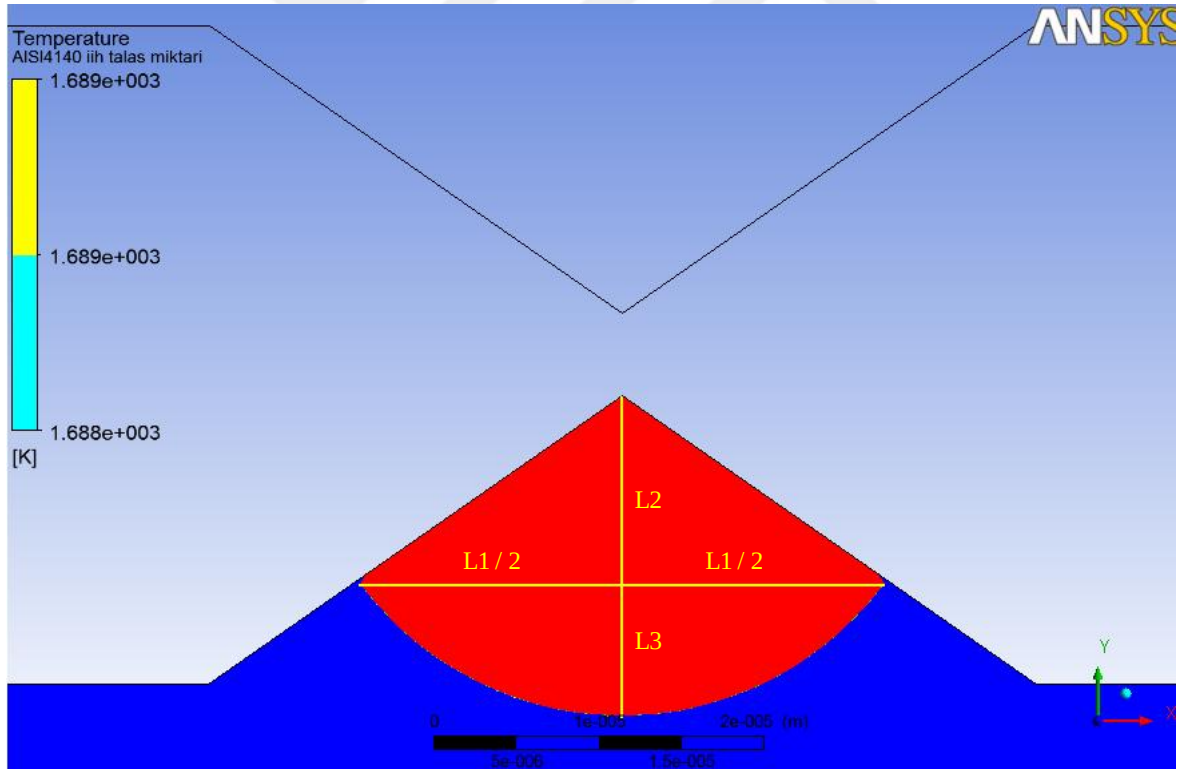
İki boyutlu MFS modelinden teorik İİH değerlerinin hesaplanmasında literatürdeki benzer yaklaşım olan işparçası içerisinde erime sıcaklığını aşan kısımların ergimiş bölge kabulü kullanılmıştır [64-71, 73, 75, 78, 80, 81, 83, 87, 92, 93, 96, 97, 100, 101, 105, 107]. Tek bir vurdurmdan sonra işparçası içerisindeki sıcaklık eğrilerinden, işparçasının ergime sıcaklık değerini aşan eğriler ergimiş malzeme olarak kabul edilmiş ve bu bölgenin sınırları belirlenirken (ing. contour) analiz programından faydalanılmıştır (Şekil 8.1).

Şekil 8.1.a'da AISI4140 çeliğinin tek vurum için yapılan analiz sonrası sıcaklık dağılımı görülmektedir. Şekil 8.1.b'de ise AISI4140 çeliğinin ergime sıcaklığını (1688 K) geçen bölgeler kırmızı, altında kalan bölgeler mavi olarak program vasıtasıyla belirlenmiştir.

Şekil 8.1.b'deki gibi ergime bölgesini kırmızı renkle ve ergime olmayan bölgenin mavi renkle ifade edilmesi model üzerinden uzunluk ölçümleri almada oldukça kolaylık sağlamaktadır. Elde edilen tek renkli talaş geometrisinden hacim değeri hesaplamak için ölçümler alınmıştır (Şekil 8.2).



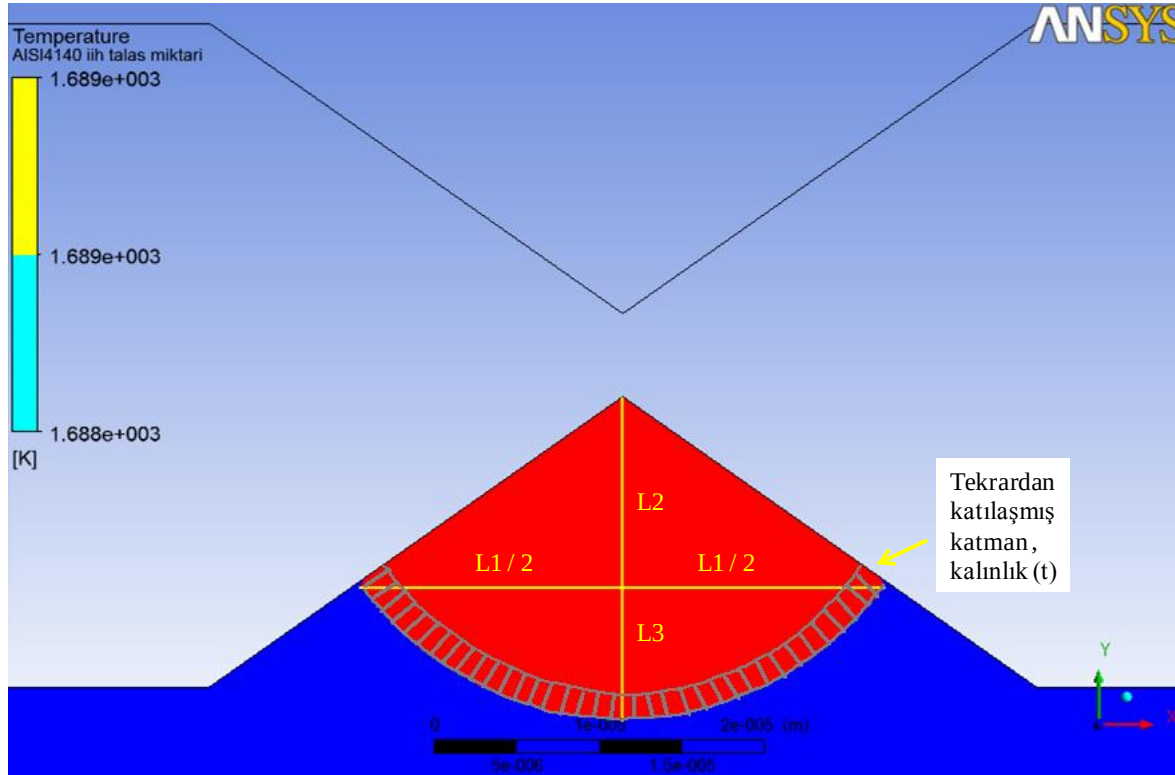
Şekil 8.1. AISI4140: a) sıcaklık dağılımı, b) ergime sıcaklığını (1688 K) aşan bölge



Şekil 8.2. AISI4140 çeliğinden kaldırılan talaşın hacmini hesaplamak için alınan ölçümler

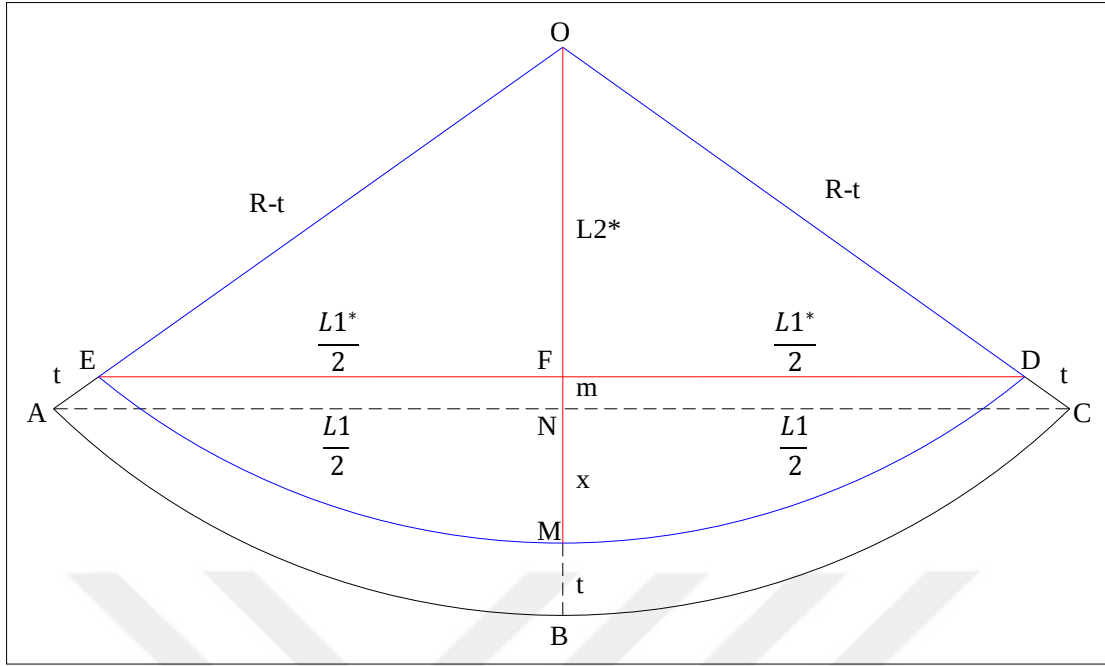
MFS model çalışmasını, literatürdeki diğer modellerden ayıran bir diğer özellikler olarak TKK kavramının modelde dikkate alınmasıdır. Zaten bu etki deneysel sonuçlarda var olduğu bilindiğinden ve deneysel sonuçların değiştirilemez mutlak sonuçlar olduğundan,

iki boyutlu modelden hesaplanan hacim değerlerine TKK kavramının etkisinin yansıtılması gerektiği düşünülmüştür. TKK kalınlığı belirlenirken: işlenmiş deney numunelerine bir takım yüzey işlemleri (yüzeyin kaba temizliği, zımparalama, parlatma ve dağlama) uygulandıktan sonra optik (ışık) mikroskop vasıtasıyla TKK kalınlığı (t) ölçülmüştür. Analizden hesaplanacak talaş hacim değerinde (teorik İİH), TKK kavramı var olmadığından dolayı teorik sonuçların, deneysel sonuçlara nazaran daha büyük çıkacağı öngörülmektedir. Bu sebepten, TKK kalınlığının (t) herhangi bir hacim hesabı yapılmadan önce analiz sonucunda elde edilen geometriye uyarlanması ve alınan uzunlukların (L1, L2 ve L3) tekrardan hesaplanması gerektiği düşünülmüştür (Şekil 8.3).



Şekil 8.3. TKK kavramının modele uyarlanması

Şekil 8.3'te gri renkli taralı alan TKK'yi temsil etmektedir. Şekil 8.3'ten anlaşılabacağı üzere modelden daha önce alınan L1, L2 ve L3 uzunlukları yapılan bu kabulde değişmektedir. Yani, işlenmiş deney numuneleri üzerinden ölçülen t değeri (tekrardan katılmış katman kalınlığı) L1, L2 ve L3 uzunluklarını azaltarak L1*, L2* ve L3* uzunluklarına dönüştürmektedir. Yeni uzunluklar (L1*, L2* ve L3*) hesaplanırken, analiz sonucunda elde edilen geometri üzerinden alınan uzunlardan (L1, L2 ve L3) faydalanılmıştır (Bkz. Şekil 8.3).



Şekil 8.4. TKK eklenmesiyle oluşan yeni uzunlukların ($L1^*$, $L2^*$ ve $L3^*$) hesaplanması

Şekil 8.4'te EMD yayı ile ABC yayı arasında kalan bölge TKK'yi ifade etmektedir. Mavi çizgilerle çizilmiş bölge ise TKK'nin modele uyarlanmasından sonraki yeni ergimiş bölgeyi temsil ederken bu bölgenin hesaplanmasında kırmızı çizgilerle çizilmiş yeni uzunluklar kullanılmıştır. Burada;

$|OB| \perp |AC|$ ve $|ED| \parallel |AC|$ olduğuna göre,

$$|AC| = L1$$

$$|AN| = \frac{L1}{2}$$

$$|ON| = L2$$

$$|FB| = L3$$

$|OA| = |OC| = R$ ifade etmektedir. TKK kabulüyle değişen uzunluklar:

$$|ED| = L1^*$$

$$|EF| = \frac{L1^*}{2}$$

$$|OF| = L2^*$$

$$|FM| = L3^*$$

$|OE| = |OD| = R - t = R^*$ olarak ifade edilmiştir. Bu uzunlukların hesaplanmasında üçgen benzerlikleri (Eş. 8.1 ve Eş. 8.2) ve eşitliklerden (Eş. 8.3-Eş. 8.5) faydalanılır.

✓ OEF üçgeni benzer OAN üçgeni olduğuna göre,

$$\frac{R-t}{R} = \frac{L1^*/2}{L1/2} = \frac{L1^*}{L1} \quad (8.1)$$

✓ OFD üçgeni benzer ONC üçgeni olduğuna göre,

$$\frac{R-t}{R} = \frac{L2^*}{L2^*+m} = \frac{L2^*}{L2} \quad (8.2)$$

$$m = L2 - L2^* \quad (8.3)$$

$$x = L3 - t \quad (8.4)$$

$$L3^* = m + x \quad (8.5)$$

L1, L2, L3 ve R bilindiğine göre Eş 8.1-8.5'ten L1*, L2*, L3* ve R* hesaplanabilir. Bulunan yeni uzunluklardan eriyen bölgenin (talaş) hacminin hesaplanarak deneysel sonuçla kıyaslanması gerekir (Şekil 8.5.a).

Şekil 8.5.a'da görülen erimiş bölgenin alanından hacim hesaplanması için orta eksenini etrafında 360° döndürüldüğünde bir adet koni ve bir adet küre parçası elde edilir (Şekil 8.5.b).

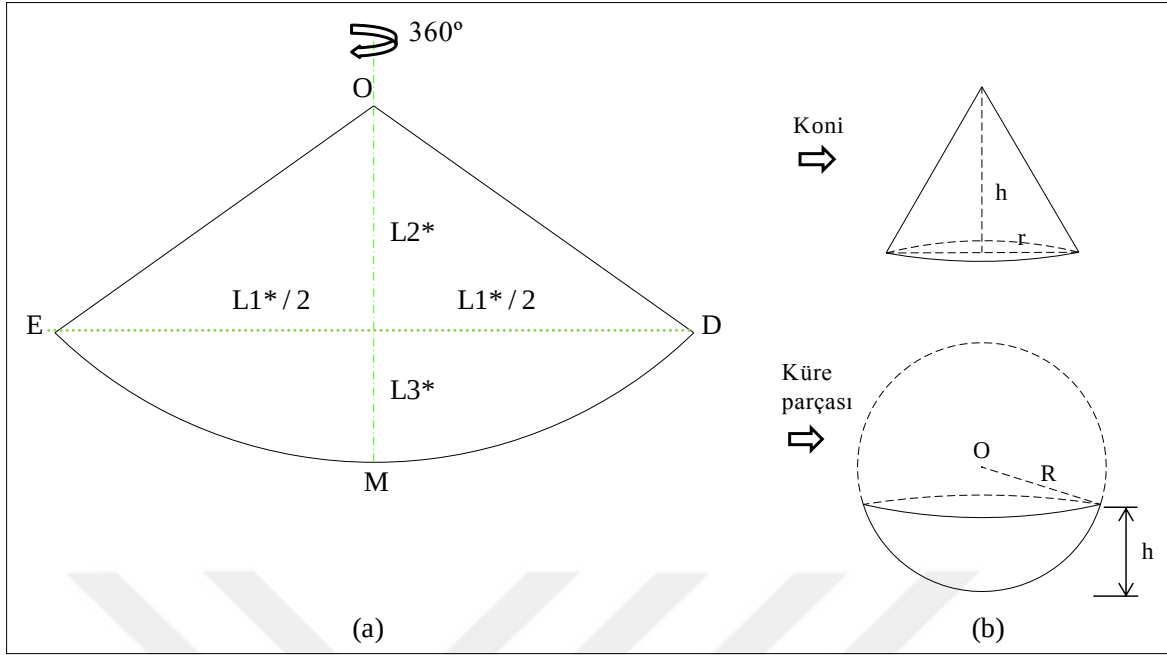
Şekil 8.5.b'deki koni ve küre parçasının hacim formülleri [188] verilmiştir (Eş 8.6 ve Eş. 8.7). Bu hacimlerin hesabı için gereken uzunluklar TKK'nin modele eklenmesiyle Eş 8.1-8.5'den L1*, L2* ve L3* olarak hesaplanmıştır.

$$V_{Koni} = \frac{1}{3} \pi r^2 h \quad (8.6)$$

$$V_{Küreparçası} = \frac{1}{3} \pi h^2 (3R - h) \quad (8.7)$$

Koninin hacim hesabında: $r = L1^*/2$ ve $h=L2^*$ olarak alınmıştır.

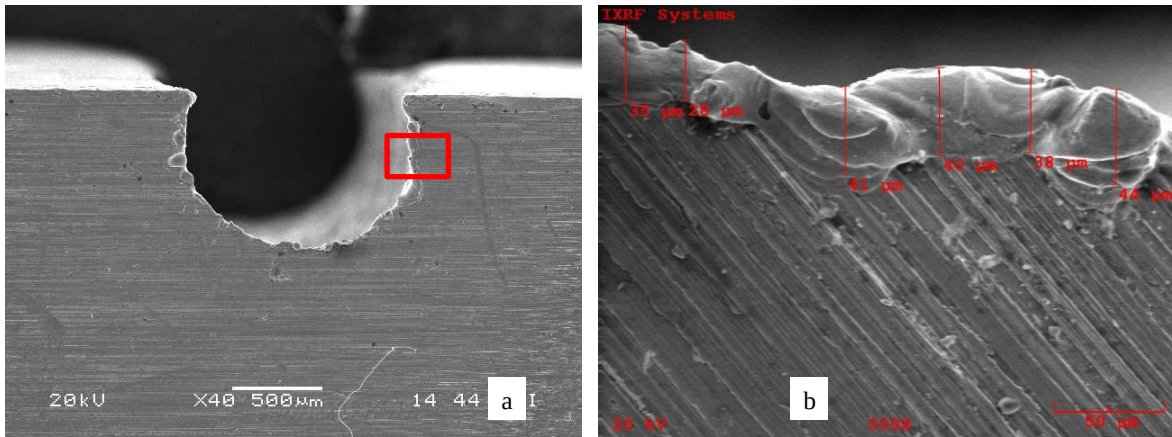
Küre parçasının hacim hesabında: $R = \sqrt{(L1^*/2)^2 + (L2^*)^2}$ ve $h=L3^*$ olarak alınmıştır.



Şekil 8.5. İİH: a) ergimiş bölge, b) 360° döndürülmeyle elde edilen üç boyutlu hacimler

8.2. TKK'nin Ölçülmesi

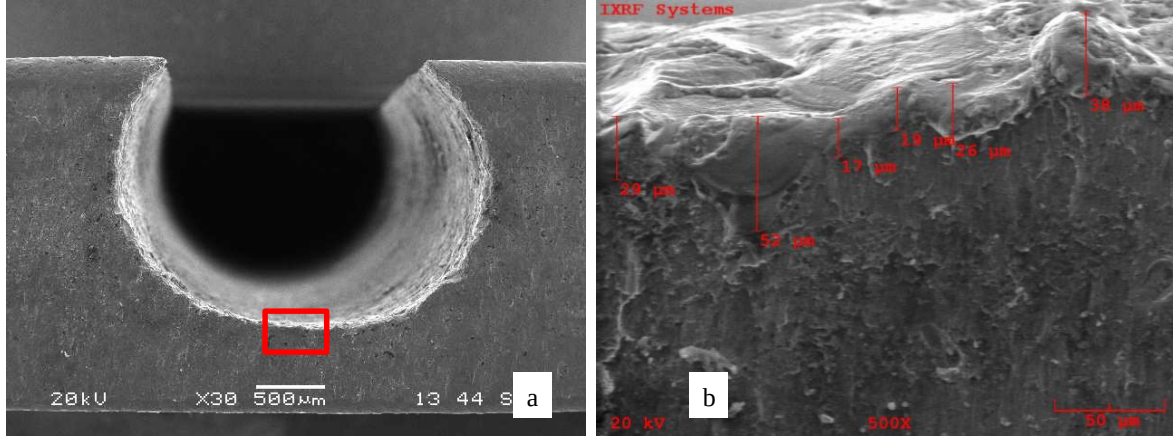
TKK belirlenmesi için ilk olarak, delinmiş yarım AISI4140 (Şekil 8.6) ve Ti6Al4V (Şekil 8.7) işparçalarının kesitlerine bakılmıştır.



Şekil 8.6. Delinmiş AISI4140: a) yarım işparçası, b) kırmızı bölgenin büyütülmüş hali

Şekil 8.6.a'da delinmiş AISI4140 yarım işparçası üzerinde görülen kırmızı bölgenin büyütülmesiyle görüldüğü üzere: eriyen işparçası delik çeperlerine tıpkı yanardağ magmasını andıracak şekilde akmıştır. TKK'nin bu şekilde tespit edilmesi doğruluk açısından kuşku uyandırmıştır. Çünkü; TKK'nin, bu magma gibi akmış yapının altında

bulunduğu düşünülmektedir. Benzer çelişki, Ti6Al4V alaşımının delinmiş yarım parçası için de geçerlidir (Şekil 8.7).



Şekil 8.7. Delinmiş Ti6Al4V: a) yarım işparçası, b) kırmızı bölgenin büyütülmüş hali

Ayrıca, MFS modeli tasarlanırken elektrot ve işparçası arasında gerçekleşecek tek bir kıvılcımın yatay eksendeki işparçasını etkileyeceği kabul edilmişti. Şekil 8.6 ve Şekil 8.7'den anlaşılacağı üzere şayet MFS modelinde işparçası komple delinmiş olsaydı geçerli olurdu. Fakat, MFS modelinin tek vurum için analiz edileceği düşünüldüğünde işparçasının kör delik olabileceği hayal edilmiştir.

Bu gerekçeler doğrultusunda, AISI4140 ve Ti6Al4V işparçalarına aynı işleme parametrelerinde kör delikler delinmiştir. Kör delik delinmiş yarım işparçalarına optik (ışık) mikroskopta bakılmasına karar verilmiştir. Optik mikroskop incelemeleri için yüzey işlemleri gerçekleştirilmiştir.

8.2.1. İşlenmiş deney numunelerine yapılan yüzey işlemleri

TKK'yi belirlemek için işlenmiş deney numunelerine bir takım yüzey işlemleri (yüzeyin kaba temizliği, zımparalama, parlatma ve dağlama) uygulandıktan sonra optik (ışık) mikroskop vasıtasıyla TKK ölçülmüştür. Öncelikle tüm numuneler (AISI4140, Ti6Al4V ve IN718) suyla yıkanıp sentetik kıllı diş fırçasıyla fırçalandıktan sonra etil alkolle yıkanıp fön makinesiyle kurutulmuştur. Daha sonra tüm numuneler 200, 400 ve 600 numara zımparalarda 3 dakika zımparalandıktan sonra 1200 numara zımparayla 5 dakika zımparalama işlemine tabii tutulmuştur. Sonra yine tüm numuneler elmas macunu ile 10

dakika kadife keeyle parlatılmıştır. Daha sonra AISI4140 eliği numunesi: Nital çözeltisinde (%5 nitrik asit + %95 etil alkol) 1 dakika dağlanmıştır [189]. Sonra numune akan musluk suyunda yıkanmış ve kuruması beklenmeden bol etil alkolle tekrar yıkanmıştır. Son olarak etil alkolle yıkanan numune fön makinesiyle kurutulmuştur (şekil 8.8).

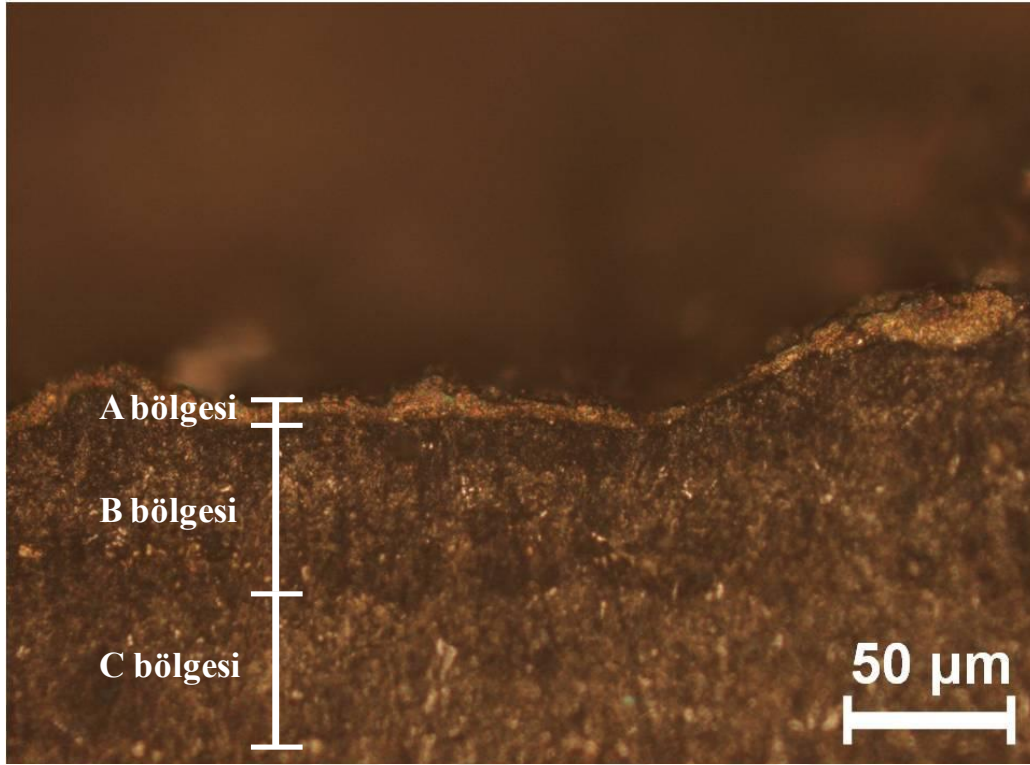


şekil 8.8. Kör delik delinip dağlanmış ve parlatılmış AISI4140 eliği işparçası

Ti6Al4V numuneleri, 0,5 mol HCl + 0,5 mol H₂SO₄ çözeltisinde 60 dakika dağlanmıştır [190]. Sonra numune akan musluk suyunda yıkanmış ve kuruması beklenmeden bol etil alkolle tekrar yıkanmıştır. Son olarak etil alkolle yıkanan numune fön makinesiyle kurutulmuştur.

IN718 numunesi, %50 HCl + %50 Metanol çözeltisinde 60 dakika dağlanmıştır [191]. Dağlama sonrası AISI4140 ve Ti6Al4V için yapılan benzer temizleme işlemleri IN718 için de gerçekleştirilmiştir.

Yapılan optik mikroskop incelemesinde, AISI4140 eliği kör delik taban yüzeyinde oluşan katmanlar (TKK, ısıl etkilenmiş bölge (IEB) ve ana metal) belirlenmiştir (şekil 8.9).



Şekil 8.9. Katmanlar: a)A bölgesi; TKK, b) B bölgesi; IEB, c) C bölgesi; ana metal

8.3. Doğrulama Sonuçları

8.3.1. AISI4140 çeliği-pirinç elektrot için yapılan analizin doğrulanması

Bu çalışmada AISI4140 çeliği işparçasına, ortası delik 2 mm'lik dönmeyen pirinç elektrot kullanılarak 3 A boşalım akımı, 25 μ s vurum süresi, 50 μ s bekleme süresinde 75 °C su (140 bar) kullanılarak EEİ işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu koşullarda gerçekleştirilen EEİ deneylerinde İİH=5,06 mm³/dak ve EAH=0,88 mm³/dak olarak elde edilmiştir. Bu deneysel sonuçların tek vurum içinkine değerlere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bir çevrim içerisinde: bir kez vurum (boşalma) ve bir kez beklemenin gerçekleştiği düşünüldüğünde, bir dakikalık süre içerisindeki çevrim sayısı bulunduğunda dolaylı olarak bir dakikalık süre içerisinde kaç kez vurumun da gerçekleştiği bulunmuş olur. Örneğin AISI4140 çeliği ($t_d=25 \mu$ s ve $t_p=50 \mu$ s) için İİH=5,06 mm³/dak ise mm³/vurum değeri hesaplaması;

$$1 \text{ dakika} = 60 \times 10^6 \mu\text{s} = 6 \times 10^7 \mu\text{s}$$

$$1 \text{ dakikadaki çevrim sayısı} = 6 \times 10^7 \mu\text{s} / 75 \mu\text{s} = 800000 \text{ çevrim}$$

1 çevrimde 1 kez vurum gerçekleştiğine göre; 800000 çevrimde 800000 vurum gerçekleşmiştir. O zaman;

800 000 vurumda 5,06 mm³ hacim kalkarsa

1 vurumda x kalkar

$x = 6,325 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{vurum}$ elde edilir.

Ya da daha kısa şekilde 1 dakika kalkan hacim miktarının çevrim süresine bölünmesi de:

$6 \times 10^7 \mu\text{s}$ 5,06 mm³ hacim kalkarsa

75 μs x kalkar

$x = 6,325 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{vurum}$ olarak aynı sonucu verir.

AISI4140 çeliği işparçasına, ortası delik 2 mm'lik dönmeyen pirinç elektrot kullanılarak ($I_d=3 \text{ A}$, $t_d=25 \mu\text{s}$, $t_p=50 \mu\text{s}$) 75 °C su (140 bar basınçta) kullanılarak yapılan deneysel çalışma sonuçları Çizelge 8.2'de verilmiştir.

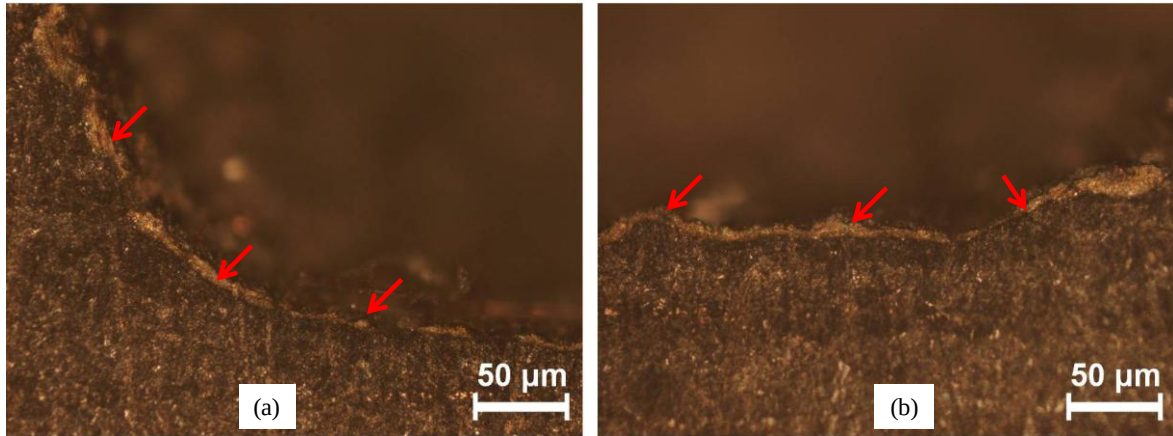
Çizelge 8.2. AISI4140- Cu ile yapılmış ($I_d= 3\text{A}$, $t_d=25 \mu\text{s}$, $t_p= 50 \mu\text{s}$) deney sonuçları

İşleme-aşınma	İİH [mm ³ /dak]	İİH [mm ³ /vurum]	EAH [mm ³ /dak]	EAH [mm ³ /vurum]
Değer	5,06	$6,3 \times 10^{-6}$	0,88	$1,1 \times 10^{-6}$

İşlenmiş numunelere yapılan yüzey işlemleri (zımparalama, parlatma, dağlama) sonra optik mikroskop incelemesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.10)

Şekil 8.10'da görüldüğü üzere TKK kırmızı oklarla gösterilmiştir. Kör delik tabanından ve köşelerinde altışar adet ölçüm alınarak toplamdan 18 adet ölçümün ortalaması alınarak TKK kalınlığı 3,6 μm olarak tespit edilmiştir. Bu katman kalınlığının Şekil 8.10'dan da anlaşılacağı üzere tekrardan işparçası yüzeyine sıvandığı açıkça görülmektedir. Elde edilen TKK değeriyle L1*, L2* ve L3* uzunlukları Eş 8.1-8.5 kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 8.3).

Daha sonra L1*, L2* ve L3* uzunluklarıyla Eş 8.6 ve Eş. 8.7 kullanılarak teorik talaş hacim değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 8.4).



Şekil 8.10. AISI4140 kör delik işlenmesi: a) kör delik köşesi, b) kör delik tabanı

Çizelge 8.3. AISI4140-Pb için hesaplanan yeni L uzunlukları ($I_d=3$ A, $t_d=25$ µs, $t_p=50$ µs)

İşparçası-elektrot	t [µm]	L1* [mm]	L2* [mm]	L3* [mm]
AISI4140-Pb	$3,6 \pm 1,2$	0,025	0,009	0,006

Çizelge 8.4. AISI4140-Pb için yapılan analizi doğrulaması ($I_d=3$ A, $t_d=25$ µs, $t_p=50$ µs)

İşparçası-elektrot	V_{analiz} (A1) [mm ³ /vurum]	$V_{deneysel}$ (D1) [mm ³ /vurum]	% fark miktarı
AISI4140-Pb	$3,5 \times 10^{-6}$	$6,3 \times 10^{-6}$	- 44

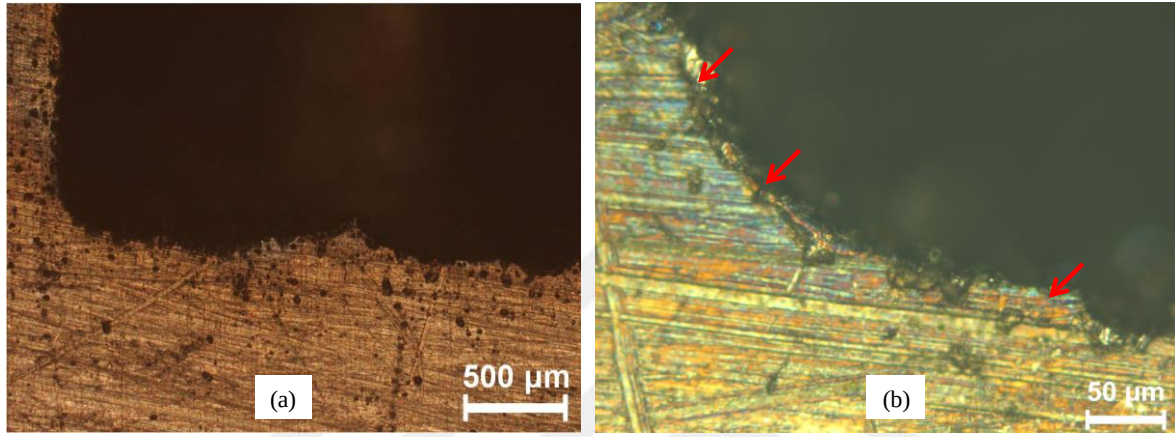
8.3.2. Ti6Al4V alaşımı-bakır elektrot için yapılan analizin doğrulanması

Ti6Al4V işparçasına 2 mm'lik dönmeyen bakır elektrotla 75 °C suda (140 bar basınçta) 3 A boşalım akımı, 25 µs vurum süresi, 50 µs bekleme süresinde EEİ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda İİH ve EAH değerleri elde edilmiş ve arzu edilen birimsel dönüşümler gerçekleştirilmiştir (Çizelge 8.5). İşlenmiş numunelere yapılan yüzey işlemlerinden sonra optik mikroskop incelemesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.11).

Çizelge 8.5. Ti6Al4V-Cu ile yapılmış ($I_d=3$ A, $t_d=25$ µs, $t_p=50$ µs) deney sonuçları

İşleme-aşınma	İİH [mm ³ /dak]	İİH [mm ³ /vurum]	EAH [mm ³ /dak]	EAH [mm ³ /vurum]
Değer	1,483	$1,8 \times 10^{-6}$	$6,4 \times 10^{-3}$	$8,1 \times 10^{-9}$

Şekil 8.11'de görüldüğü üzere TKK kırmızı oklarla gösterilmiştir. Kör delik tabanından ve köşelerinde altışar adet ölçüm alınarak toplamdan 18 adet ölçümün ortalaması alınarak TKK kalınlığı $5,8 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir. Bu katman kalınlığının Şekil 8.11'den de anlaşılacağı üzere tekrardan işparçası yüzeyine sıvandığı açıkça görülmektedir. Elde edilen TKK değeriyle $L1^*$, $L2^*$ ve $L3^*$ uzunlukları Eş 8.1-8.5 kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 8.6).



Şekil 8.11. Ti6Al4V kör delik işlenmesi: a) kör delik köşesi, b) kör delik tabanı

Çizelge 8.6. Ti6Al4V-Cu için hesaplanan yeni L uzunlukları ($I_d=3 \text{ A}$, $t_d=25 \mu\text{s}$, $t_p=50 \mu\text{s}$)

İşparçası-elektrot	t [μm]	$L1^*$ [mm]	$L2^*$ [mm]	$L3^*$ [mm]
Ti6Al4V-Cu	$5,8 \pm 1,5$	0,014	0,005	0,003

Daha sonra $L1^*$, $L2^*$ ve $L3^*$ uzunluklarıyla Eş 8.6 ve Eş. 8.7 kullanılarak teorik talaş hacim değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 8.7).

Çizelge 8.7. Ti6Al4V-Cu için yapılan analizi doğrulaması ($I_d=3 \text{ A}$, $t_d=25 \mu\text{s}$, $t_p=50 \mu\text{s}$)

İşparçası-elektrot	$V_{\text{analiz}} (A2) [\text{mm}^3/\text{vurum}]$	$V_{\text{deneyisel}} (D2) [\text{mm}^3/\text{vurum}]$	% fark miktarı
Ti6Al4V-Cu	$6,2 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-6}$	- 66

8.3.3. Başka bir araştırmacının çalışmasından oluşturulan analizlerin doğrulanması

Ti6Al4V alaşımı-bakır elektrot için yapılan analizin doğrulanması

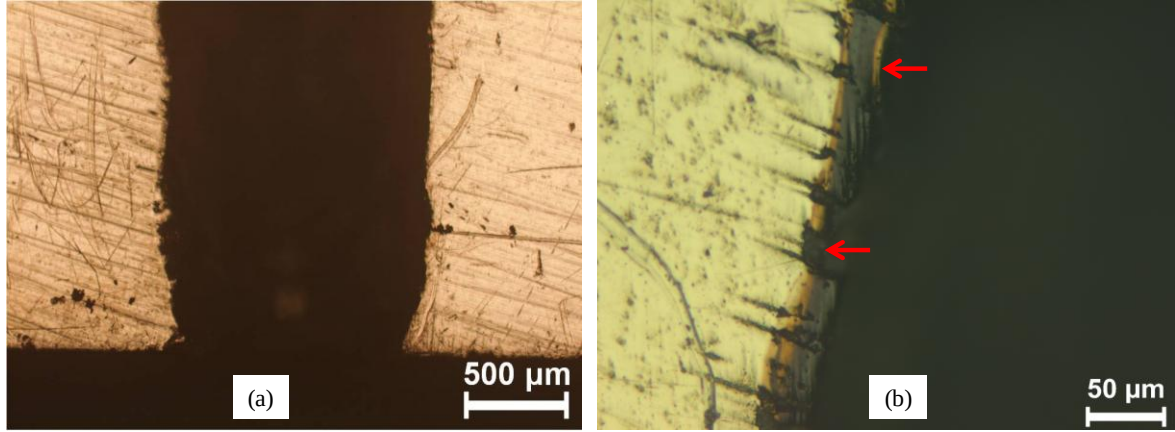
Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasında: Ti6Al4V işparçasına, ortası delik 2 mm'lik bakır elektrot kullanılarak 12 A boşalım akımı, 35 μ s vurum süresi ve 26 μ s bekleme süresinde su kullanılarak işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu koşullarda gerçekleştirilen EEİ deneylerinde İİH=0,056 g/dak ve EAH=0,282 mm/dak olarak elde edilmiştir. İİH değeri Ti6Al4V alaşımının yoğunluğuna bölünerek mm³/dak birimine dönüştürülmüştür. EAH değeri ise yüksekliği ve çapı bilinen ortası delik silindirin hacim hesabından mm³/dak'a çevrilmiştir (Çizelge 8.8).

Çizelge 8.8. Ti6Al4V-Cu ile yapılmış ($I_d=12A$, $t_d=35 \mu s$, $t_p=26 \mu s$) deney sonuçları

İşleme-aşınma	İİH [g/dak]	İİH [mm ³ /vurum]	EAH [mm/dak]	EAH [mm ³ /vurum]
Değer	0,056	$1,2 \times 10^{-6}$	0,282	$5,7 \times 10^{-7}$

Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasında: Ti6Al4V işparçasına, ortası delik 2 mm'lik bakır elektrot kullanılarak 12 A boşalım akımı, 35 μ s vurum süresi ve 26 μ s bekleme süresinde su kullanılarak işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu koşullarda tasarlanan analizin sonucun işparçasındaki sıcaklık eğrileri elde edilmiştir. Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasındaki [175], akım ve vurum süresinin daha yüksek olmasından dolayı analizde kaldırılan talaş miktarı da artmıştır. İşlenmiş numunelere yapılan yüzey işlemleri (zımparalama, parlatma, dağlama) sonra optik mikroskop incelemesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.12).

Şekil 8.12'de görüldüğü üzere TKK kırmızı oklarla gösterilmiştir. Delik kenarlarından altışar adet ölçüm alınarak toplamdan 18 adet ölçümün ortalaması alınarak TKK kalınlığı 9,1 μ m olarak tespit edilmiştir. Bu katman kalınlığının Şekil 8.12'den de anlaşılabileceği üzere tekrardan işparçası yüzeyine sıvandığı açıkça görülmektedir. Elde edilen TKK değeriyle L1*, L2* ve L3* uzunlukları Eş 8.1-8.5 kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 8.9).



Şekil 8.12. Ti6Al4V ($I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s): a) genel görünüm, b) delik sol kenar

Çizelge 8.9. Ti6Al4V-Cu için hesaplanan yeni L uzunlukları ($I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s)

İşparçası-elektrot	t [μ m]	L1* [mm]	L2* [mm]	L3* [mm]
Ti6Al4V-Cu	$9,1 \pm 2,0$	0,031	0,011	0,009

Daha sonra L1*, L2* ve L3* uzunluklarıyla Eş. 8.6 ve Eş. 8.7 kullanılarak teorik talaş hacim değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 6.10).

Çizelge 8.10. Ti6Al4V-Cu için yapılan analizi doğrulaması ($I_d=12$ A, $t_d=35\mu$ s, $t_p=26$ μ s)

İşparçası-elektrot	V_{analiz} (A3) [mm^3/vurum]	$V_{deneysel}$ (D3) [mm^3/vurum]	% fark miktarı
Ti6Al4V-Cu	$7,3 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-5}$	- 43

IN718 alaşımı-bakır elektrot için yapılan analizin doğrulaması

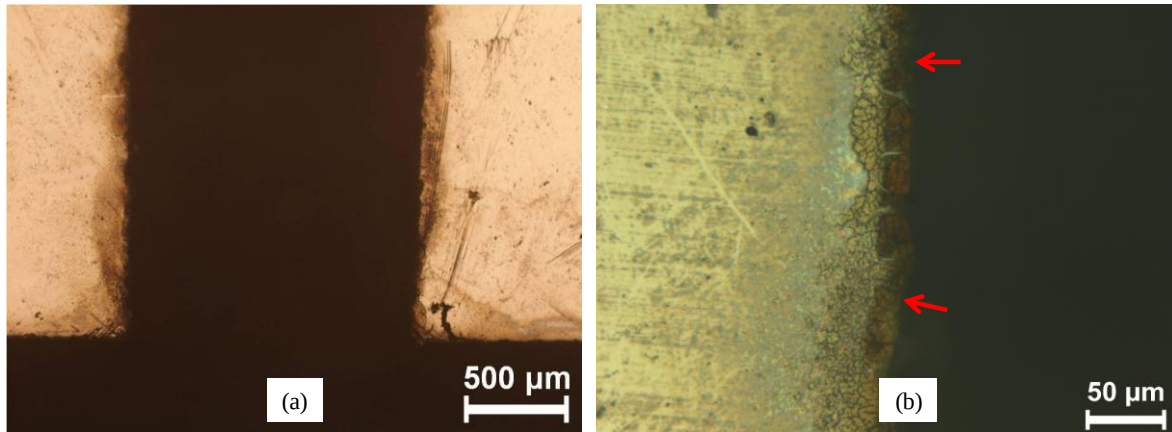
Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasında: IN718 işparçasına, ortası delik 2 mm'lik bakır elektrot kullanılarak 8,2 A boşalım akımı, 35 μ s vurum süresi ve 16 μ s bekleme süresinde su kullanılarak işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu koşullarda gerçekleştirilen EEİ deneylerinde İİH=0,072 g/dak ve EAH=0,913 mm/dak olarak elde edilmiştir. İİH değeri IN718 alaşımının yoğunluğuna bölünerek mm^3/dak birimine dönüştürülmüştür. EAH değeri ise yüksekliği ve çapı bilinen ortası delik silindirin hacim hesabından mm^3/dak 'a çevrilmiştir (Çizelge 8.11).

Çizelge 8.11. IN718-Cu ile yapılmış ($I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s) deney sonuçları

İşleme-aşınma	İİH [g/dak]	İİH [mm ³ /vurum]	EAH [mm/dak]	EAH [mm ³ /vurum]
Değer	0,072	$7,4 \times 10^{-6}$	0,913	$1,8 \times 10^{-6}$

Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasında: IN718 işparçasına, ortası delik 2 mm'lik bakır elektrot kullanılarak 8,2 A boşalım akımı, 35 μ s vurum süresi ve 16 μ s bekleme süresinde su kullanılarak işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu koşullarda tasarlanan analizin sonucun işparçasındaki sıcaklık eğrileri elde edilmiştir. İşlenmiş numunelere yapılan yüzey işlemleri (zımparalama, parlatma, dağlama) sonra optik mikroskop incelemesi gerçekleştirilmiştir (Şekil 8.13).

Şekil 8.13'te görüldüğü üzere TKK kırmızı oklarla gösterilmiştir. Delik kenarlarından altışar adet ölçüm alınarak toplamdan 18 adet ölçümün ortalaması alınarak TKK: 5,4 μ m olarak tespit edilmiştir. Bu katman kalınlığının Şekil 6.13'ten de anlaşılacağı üzere tekrardan işparçası yüzeyine sıvandığı açıkça görülmektedir. Elde edilen TKK değeriyle L1*, L2* ve L3* uzunlukları Eş 3.1-3.5 kullanılarak hesaplanmıştır (Çizelge 8.12).

Şekil 8.13. IN718 ($I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s): a) genel görünüm, b) delik sol kenarÇizelge 8.12. IN718-Cu için hesaplanan yeni L uzunlukları ($I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s)

İşparçası-elektrot	t [μ m]	L1* [mm]	L2* [mm]	L3* [mm]
IN718-Cu	$5,4 \pm 1,7$	0,026	0,009	0,006

Daha sonra L1*, L2* ve L3* uzunluklarıyla Eş. 8.6 ve Eş. 8.7 kullanılarak teorik talaş hacim değerleri hesaplanmıştır (Çizelge 8.13).

Çizelge 8.13. IN718-Cu için yapılan analizi doğrulaması ($I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s)

İşparçası-elektrot	V_{analiz} (A4) [mm^3/vurum]	$V_{deneysel}$ (D4) [mm^3/vurum]	% fark miktarı
IN718-Cu	$3,8 \times 10^{-6}$	$7,4 \times 10^{-6}$	- 47

8.4. Doğrulama Sonuçlarına Genel Bakış ve Tartışma

İki boyutta tasarlanan MFS modeli, 4 farklı çalışmayla doğrulanmıştır (Çizelge 8.14). Analizlerinin doğruluğuna TTK kalınlığı direkt olarak etki etmektedir. Bu yüzden: D1, D2, D3 ve D4 deneysel çalışmaları literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırılmış ve doğruluğu/tutarlılığı irdelenmiştir.

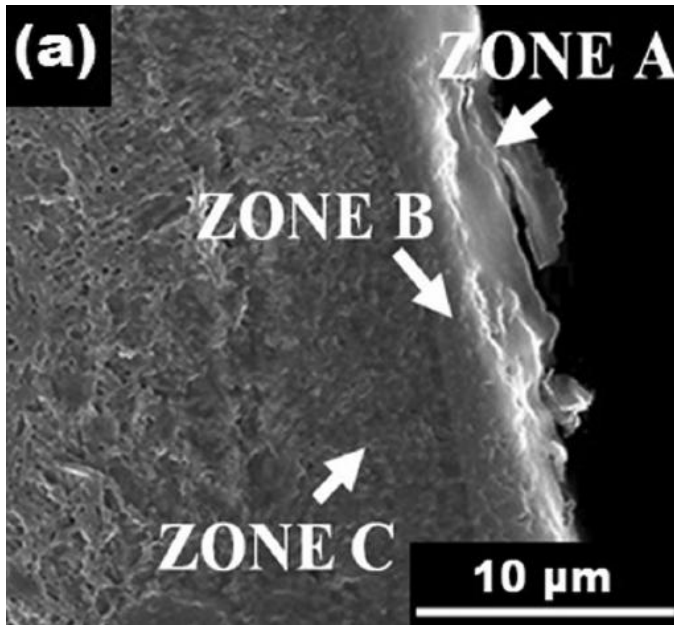
Çizelge 8.14. Analizi doğrulama çalışmalarının genel sonuçları

Doğrulama kodu	İşparçası-elektrot	İşleme parametreleri	t [μ m]	V_{analiz} [mm^3/vurum]	$V_{deneysel}$ [mm^3/vurum]	% Fark
A1-D1	AISI4140-Pb	$I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s	$3,6 \pm 1,2$	$3,5 \times 10^{-6}$	$6,3 \times 10^{-6}$	- 44
A2-D2	Ti6Al4V-Cu	$I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s	$5,8 \pm 1,5$	$6,2 \times 10^{-7}$	$1,8 \times 10^{-6}$	- 66
A3-D3	Ti6Al4V-Cu	$I_d=12$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=26$ μ s	$9,1 \pm 2,0$	$7,3 \times 10^{-6}$	$1,2 \times 10^{-5}$	- 43
A4-D4	IN718-Cu	$I_d=8,2$ A, $t_d=35$ μ s, $t_p=16$ μ s	$5,4 \pm 1,7$	$3,8 \times 10^{-6}$	$7,4 \times 10^{-6}$	- 47

D1 deneysel çalışmasında, AISI4140 çeliği işparçası ve pirinç elektrot kullanılarak $I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s, $t_p=50$ μ s parametreleriyle işlemler gerçekleştirilmiştir. Literatürde D1 deneysel çalışmasına benzer olarak, Coğun ve arkadaşlarının çalışması [132] D1 deneysel çalışmasıyla hem kullanılan işparçası benzerliğinden hem de işleme parametrelerinin aynı olmasından ötürü incelenmiştir. Sıkıştırıp sinterleme yöntemiyle (Toz Metalurjisi tekniği) üretilmiş B_4C tozu katkılı ve katkısız bakır elektrotlar kullanılarak SAE1040 çeliğine, ($I_d=3$ A, $t_d=25$ μ s), ($I_d=3$ A, $t_d=50$ μ s), ($I_d=6$ A, $t_d=25$ μ s) ve ($I_d=6$ A, $t_d=50$ μ s) oluşan dört farklı işleme parametresinde EEİ deneyleri gerçekleştirilmiştir. 3 A boşalım akımı ve 25 μ s vurum süresinde saf bakır tozundan üretilmiş elektrotla işlenmiş yüzeylerde TTK kalınlığı $3,4 \pm 1,5$ μ m olarak ölçülmüştür (Şekil 8.14). Bu sonuç, aynı işleme parametrelerine sahip D1 deneysel çalışmasında ölçülen TTK kalınlığına (D1 deneysel çalışmasında TTK

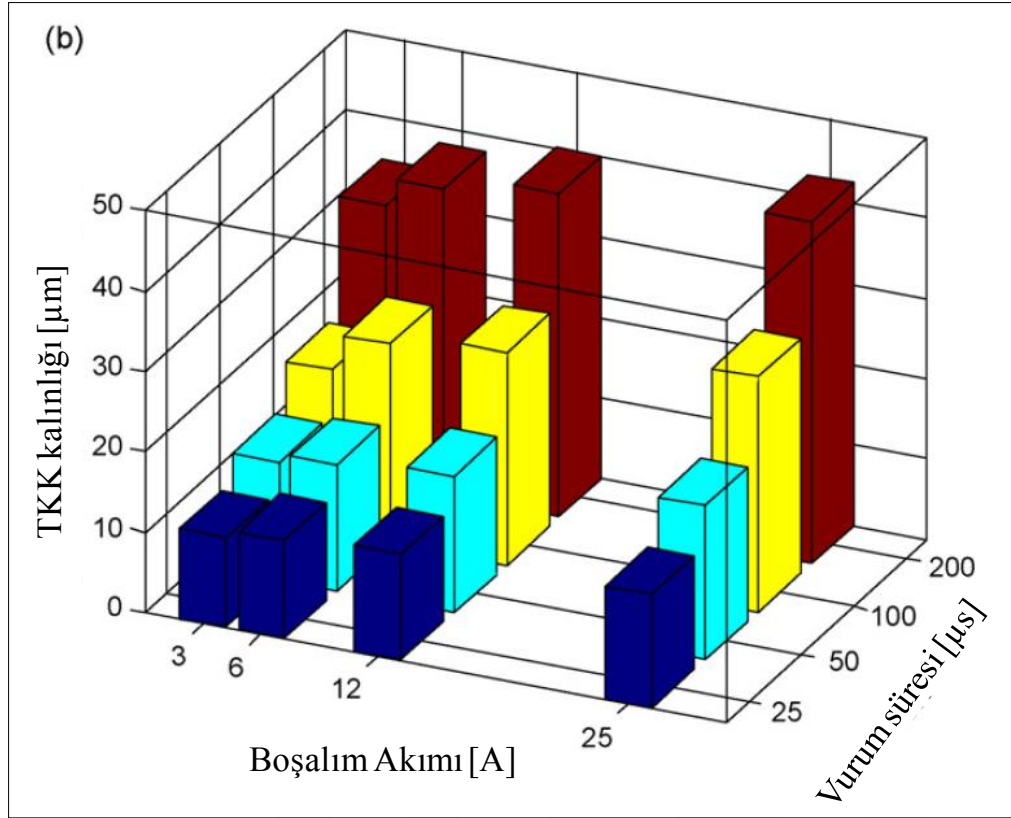
kalınlığı $3,6 \pm 1,2 \mu\text{m}$) oldukça yakın ve tutarlıdır. Yine, 6 A boşalım akımı ve 50 μs vurum süresinde saf bakır tozundan üretilmiş elektrotla işlenmiş yüzeylerde TKK kalınlığı $9,0 \pm 2,1 \mu\text{m}$ olarak tespit edilmiştir.

Şekil 8.14'te 'Zone A' olarak tanımlanan TKK'nin perlit lameller (ferrit ve sementit) içerdiği rapor edilmiştir. SAE1040 çeliğinin saf bakır elektrotla işlenmesinde, artan akım ve vurum süresi değerinin TKK kalınlığını artırdığını rapor etmişlerdir.



Şekil 8.14. Çoğun ve arkadaşlarının çalışmasında TKK kalınlığı: $3,5 \pm 1,5 \mu\text{m}$ (3 A, 25 μs)

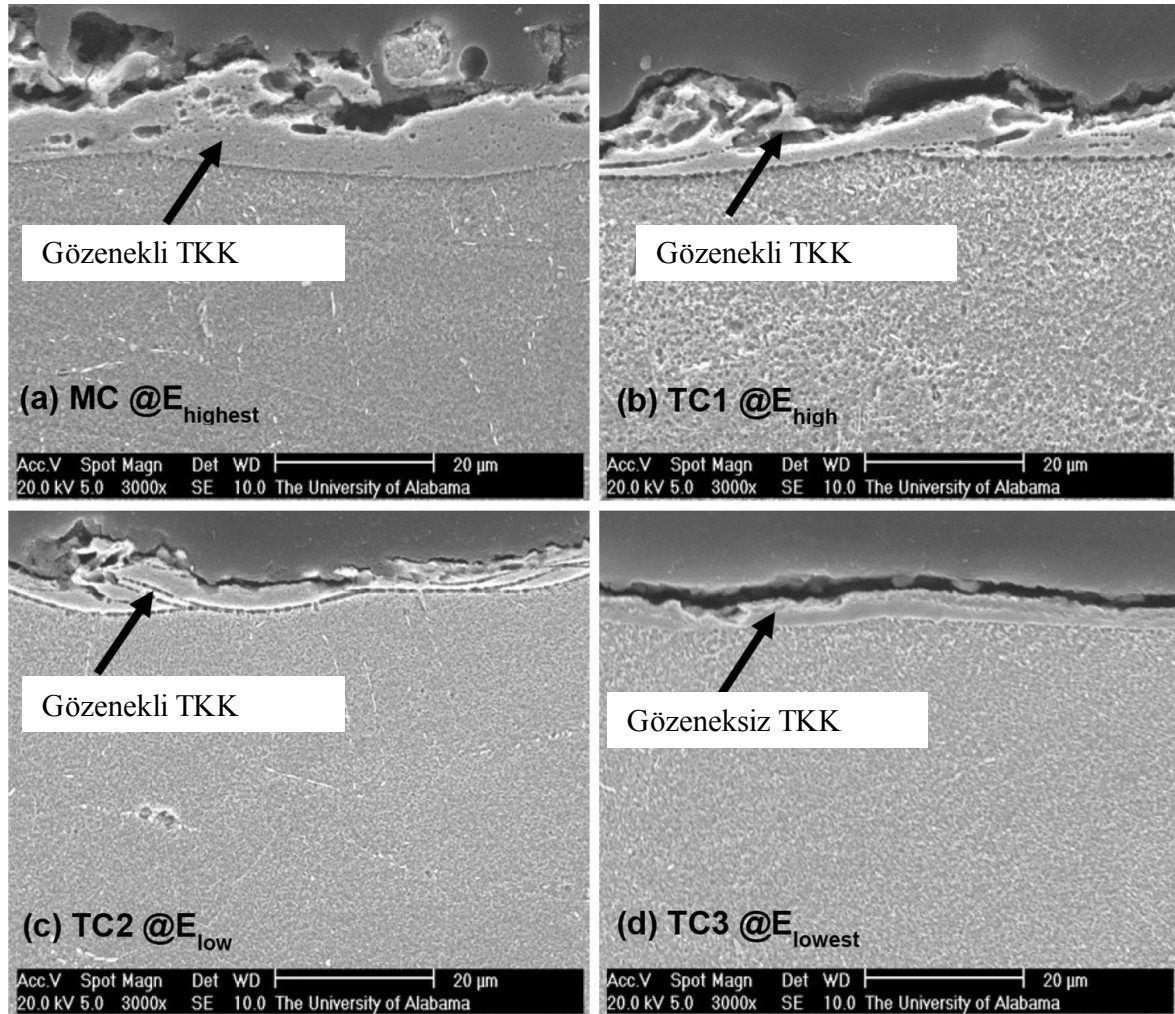
D2 ve D3 deneysel çalışmasına benzer çalışma olarak Hasçalık ve arkadaşının çalışması [192] uygun görülmüştür. Çalışmada, Ti6Al4V işparçalarına elektrolitik bakır elektrotlarla gaz yağı dielektrikte dalma EEİ gerçekleştirilmiştir. Farklı akım ve vurum sürelerinde birçok işleme deneyi gerçekleştirilmiştir. Level 1 ($I_d=3 \text{ A}$, $t_d=25 \mu\text{s}$) ve Level 2 ($I_d=12 \text{ A}$, $t_d= 50 \mu\text{s}$) adını verdikleri işleme parametreleriyle 5 mm derinlikte işlemler gerçekleştirilmiştir. İşleme parametresi açısından: Hasçalık ve arkadaşının çalışmasındaki Level 1; bu çalışmadaki D2 deneysel çalışmasıyla birebir (3 A, 25 μs) örtüşürken, Level 2; bu çalışmadaki D3 deneysel çalışmasıyla akım (12 A) olarak aynı, vurum süresi olarak ufak farklılık (D3'de 35 μs , Level 2'de 50 μs) göstermektedir. Hasçalık ve arkadaşının çalışmasıyla D2 ve D3 deneysel çalışmalarında aynı işparçası, aynı elektrot ve aynı işleme parametrelerinin kullanılması özellikle TKK kalınlığının kıyaslanması adına oldukça fayda sağlamıştır (Şekil 8. 15).



Şekil 8.15. Hasçalık ve arkadaşının çalışmasındaki TKK kalınlıkları [192]

Şekil 8.15, elektrolitik bakır elektrotla farklı parametrelerde işlenmiş Ti6Al4V işparçalarının TKK kalınlıklarını ifade etmektedir. Şekil 8.15'de görüleceği üzere 3 A ve 25 μ s işleme koşullarında TKK kalınlığı yaklaşık 7 μ m olarak tespit edilmiştir. D2 deneysel çalışmasında TKK kalınlığı; $5,8 \pm 1,5$ μ m olarak ölçülmüştü (Bkz. Çizelge 8.14). Tolerans değeri de göz önünde bulundurulsa, D2 deneysel çalışmasındaki TKK kalınlığı değerinin tutarlı olduğu söylenebilir. Yine, Hasçalık ve arkadaşının çalışmasında, 12 A ve 50 μ s işleme koşullarında TKK kalınlığı yaklaşık 12 μ m olarak rapor edilmiştir (Şekil 8.15). D3 deneysel çalışmasında ise TKK kalınlığı; $9,1 \pm 2,0$ μ m olarak tespit edilmişti. Kıyaslama yapıldığında benzer şekilde tolerans değeri ve 15 μ s'lik vurum süresi farkı da dikkate alındığında D3 deneysel çalışmasındaki TKK kalınlığı oldukça tutarlıdır. Şekil 8.15'den görüleceği üzere artan akım ve vurum süresi değerleri TKK kalınlığını artırmaktadır. Benzer sonuca aynı işparçası ve aynı elektrotla fakat farklı işleme parametreleriyle yapılmış D2 ve D3 çalışmalarında da ulaşılmıştır. D3 deneysel çalışmasının akım ve vurum süresi değerleri daha yüksek olduğu için TKK kalınlığı daha yüksek elde edilmiştir (Bkz. Çizelge 8.14).

D4 deneysel çalışmasına benzer olarak Li ve arkadaşlarının çalışması ele alınmıştır. Çalışmada, IN718 işparçaları bakır tel kullanılarak su dielektrikle tel EEİ yönteminde işparçasının dikine tel kullanılarak en yüksek-yüksek-düşük-en düşük işleme parametrelerinde 6 mm kesilmiştir. İşlenmiş yüzeylerin analizinde TKK kalınlığının 8,3 ile 13,3 μm arasında değiştiğini tespit etmişlerdir (Şekil 8.17) [193]. Bu sonuçlar, D4 deneysel çalışmasındaki TKK kalınlığı ($5,4 \pm 1,7 \mu\text{m}$) değerine tolerans değerleri dikkate alınırsa yakın olarak değerlendirilebilir.



Şekil 8.16. Li ve arkadaşlarının çalışmasında IN718 parçalardaki TKK kalınlıkları [193]

Aynı işleme parametrelerine sahip D1 ve D2 deneysel çalışmaları TKK kalınlığı açısından kıyaslandığında, D2 deneysel çalışmasındaki TKK kalınlığı ($5,8 \pm 1,5 \mu\text{m}$), D1 deneysel çalışmasındaki TKK kalınlığına ($3,6 \pm 1,2 \mu\text{m}$) nazaran daha büyük tespit edilmiştir (Bkz. Çizelge 8.14). Birçok çalışmada [194, 195] da belirtildiği üzere kötü ısı iletken ve işlenmesi zor olan Ti6Al4V alaşımı bu durum sebep olduğu düşünülmektedir. Bir diğer

önemli neden ise Ti6Al4V alaşımlarının diğer metallere (çelik vb.) göre nispeten yüksek ergime sıcaklığı olmasıdır. Ti6Al4V işparçasıyla AISI4140 çeliği kıyaslandığında, vurum süresinin sonuna kadar Ti6Al4V alaşımlarının ergitilmesi daha güç olmakta ve yüzeyden koparılan işparçası miktarı AISI4140 çeliğine göre nispeten daha az olduğu söylenebilir. İşleme bölgesinde yeterince koparılamayan yüksek sıcaklıktaki Ti6Al4V alaşımı üstelik kötü ısı iletken olduğu için dielektrik ortama da ısınıp geç iletir. Vurum süresinin bitip bekleme süresine geçişte ise soğuk dielektrik sıvı ergimiş Ti6Al4V alaşımını yüzeye tekrar sıvayarak katılaştırır. D1 ve D2 deneysel çalışmalarının TTK kalınlığı arasındaki farkın bu gerekçelerden olduğu söylenebilir.



9. SONUÇ VE ÖNERİLER

9.1. Deneysel Çalışma Sonuçları

Bu deneysel çalışmada, EEİ delik delme de ortası delik döner bir elektrot içerisinde geçirilen silikon yağının (diğer hidro karbon esaslı dielektriklere nazaran insan ve çevre sağlığına zararsız) işleme/çıktı performansı (İİH, EAH, R_a ve yüzey topoğrafyası) araştırılmıştır. Ayrıca silikon yağının işleme sırasında yoğun bir elektrik alan içerisinde olması nedeniyle, farklı oranlarda toz katkılarına sahip silikon yağı karışımlarının farklı elektrik alanlar altındaki ER davranışları da incelenmiştir. Çalışmada, silikon yağının işleme performansı etkilerinin daha rahat anlaşılabilmesi adına EEİ delik delme endüstrisinde çok tercih edilen suyla performans çıktılarının kıyaslanması düşünülmüştür. Böylelikle silikon yağının EEİ delik delme işlemi için uygunluğu araştırılmıştır. Ayrıca, silikon yağındaki karbon ve nişasta tozu derişim oranlarının, silikon yağının ısıtılmasının ve elektrot dönüşünün işleme performansına olan etkilerinin araştırılabilmesi için EEİ parametreleri (boşalım akımı, vurum süresi, bekleme süresi, polarite ve dielektrik püskürtme basıncı) sabit değerler alınmıştır.

EEİ’de daha iyi delik yüzey kalitesi elde edebilmek için dielektrik sıvı olarak içerisine değişik konsantrasyonlarda karbon ve nişasta tozu katılmış silikon yağı, takım olarak pirinç ve bakır elektrotlar, işparçası olarak AISI4140 kalıp çeliği ve Ti6Al4V kullanılmıştır. Farklı konsantrasyonlardaki ve sıcaklıklardaki dielektrik sıvının ve farklı dönüş hızlarındaki elektrotun (dönmeyen ve döner) işparçası R_a ’sı, İİH, EAH, BA ve işparçası mikro yapısı gibi EEİ’nin ana performans çıktılarına etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Yapılan çalışmadan çıkan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- ✓ EEİ ile delik delmede daha önce dielektrik sıvı olarak denenmemiş olan silikon yağı denenmiş ve dielektrik sıvı olarak kullanılabileceği anlaşılmıştır. Elde edilen İİH değerlerine bakıldığında, her ne kadar silikon yağıyla yapılan işlemlerin İİH değerleri, piyasada sıklıkla kullanılan su, gazyağı ve benzeri hidrokarbon esaslı dielektrik sıvılarına kıyasla düşük olsa da, silikon yağının; a) yüksek miktarda karbon ve nişasta tozlarını homojen bir süspansiyon olarak tutabilmesi, b) diğer yaygın dielektriklere göre çok daha yüksek sıcaklıklara ısıtılabilmesi (silikon yağının parlama

noktası 300 °C), c) diğer ticari dielektrikler gibi işleme esnasında zehirli gazlara sebep olmayarak çevre ve insan sağlığına zararsız olması ve d) düşük maliyeti gibi avantajlarının göz ardı edilmemesi gerektiği sonucuna varılmıştır.

- ✓ Farklı derişimlerde karbon ve nişasta tozlarıyla yapılan elektro reoloji ve dielektrik ısıtma deneyleri sonucunda kararlı işleme koşullarının sağlanabilmesi için silikon yağı dielektrik içinde en fazla 30 g/lit nişasta tozu olması gerektiği tespit edilmiştir. Silikon yağı kullanılarak yapılan işleme deneylerinde, 2 mm'lik (dış çap) elektrottan daha küçük çaplardaki elektrotlarla işlemenin gerçekleştirilememiştir. Ayrıca, silikon yağının EEİ ile delik delme de küçük çaplarda (1 mm ve altı) kullanılamayacağı tespit edilmiştir.
- ✓ Dönmeyen ve döner elektrotla yapılan işlemlerde karbon tozu katkılı silikon yağı karışımlarında, yüksek İİH değerleri elde edilirken, nişasta tozu katkılı silikon yağı karışımlarında düşük İİH değerleri elde edilmiştir. İİH değerlerini artırmak için silikon yağı (A) ve karışımlarını (B-I) ısıtmak, suyu (W) ısıtmaktan daha etkili olduğu ve İİH'de daha yüksek artışa olanak sağladığı (sıcaklık artışı silikon yağında İİH'yi %56,48 artırırken suda sıcaklık artışı İİH'yi %14,84 artırmıştır) tespit edilmiştir. İİH açısından silikon yağının suyla kıyaslanmasında, silikon yağının (A) ve karışımlarının (B-I) özellikle hızlı gerçekleştirilmesi gereken işlemlerde (EEİ'de hızlı delik delme) iyi bir dielektrik olamayacağı sonucuna varılmıştır.
- ✓ Silikon yağı karışımları (A-I) ve su dielektrikle yapılmış tüm işleme deneyleri göz önüne alındığında, döner elektrotla yapılan deneylerde dönmeyen elektrota göre daha yüksek İİH değerleri elde edilmiştir.
- ✓ Hem dönmeyen hem de döner elektrotla silikon yağı karışımları (A-I) ve su dielektrikle yapılmış işleme deneylerinin tümü değerlendirildiğinde, dielektrik sıvı sıcaklığını 30 °C'den 75 °C'ye çıkarılması İİH değerlerini genel olarak arttığı tespit edilmiştir.
- ✓ Karbon tozu konsantrasyonu artırıldığında daha yüksek EAH değerleri ve bunun sonucunda daha yüksek BA değerleri elde edilmiştir. Dalma EEİ ile işlemekten farklı olarak EEİ ile delik delme de kullanılan elektrotlar sarf malzemeler oldukları için ve ayrıca EEİ ile delik delme işleminde EAH'nin, İİH ve R_a kadar kritik olmadığı göz önünde bulundurulduğunda silikon yağının yüksek EAH değerleri vermesinin dielektrik sıvı olarak kullanılabilirliği açısından sorun teşkil etmeyeceği sonucuna varılmıştır.
- ✓ Döner elektrot kullanıldığında ve silikon yağına 10 g/lit karbon ve 15 g/lit nişasta tozu katkısı (F karışımı) yapıldığında saf silikon yağına (A) kıyasla R_a'da yaklaşık %69 iyileşme (düşüş) sağlanmıştır. En düşük R_a değeri de bu karışımda elde edilmiştir (0,495 µm). Silikon yağının ve toz katkılı karışımlarını ısıtmak ve elektrotu döndürmek R_a

değerlerini iyileştirmiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmede, silikon yağına tek başına nişasta tozu katkısı yerine karbon ve nişasta tozu katkısının daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Silikon yağı ve su, R_a açısından kıyaslandığında silikon yağının daha iyi bir dielektrik olabileceği kararına varılmıştır.

- ✓ Delik yüzeylerinin mikroyapı incelemelerinde, silikon yağına 10 g/lt karbon tozu katıldığında işparçası yüzeyinde oluşan kraterlerin daha sık ve küçük çaplı olduğu, yüzey kraterleri yanında görülen tepelerin uçlarının yuvarlaklaştığı tespit edilmiştir. Yüzey topoğrafyasındaki bu değişimler sonucunda daha düşük R_a değerleri elde edilmiştir. Silikon yağına 10 g/lt karbon ve 15 g/lt nişasta tozu katkısıyla oluşturulan karışım (F karışımı) ile yapılan işlemede işparçası yüzeyindeki kraterlerin sivri uçları daha da yuvarlaklaşmış ve işparçası yüzeyi nişasta tozu sayesinde daha parlak bir görünüme sahip olmuştur.
- ✓ Çalışmada yapılan ek deneyler sonucunda (delik iç yüzey ortalama yüzey pürüzlülük değerinin 0,3 μm 'ye düşürülmesi), 75 °C sıcaklıkta F karışımında 2 mm'lik döner elektrotla (1000 dev/dak dönüş hızında), 1,5 A boşalım akımı, 3 μs vurum süresi ve 50 μs bekleme süresi parametrelerinde R_a değeri 0,34 μm 'ye düşürülmüştür.
- ✓ İİH değerini 4 mm³/dak üzerine çıkartma hedefli ilk grup ek deneylerde 12 A boşalım akımı ve 200-800 μs vurum sürelerinde 21,35 mm³/dak'a varan İİH değerleri sağlanabilmiş, ancak çok kaba ve hasarlı delik yüzeyleri elde edilmiştir. 4 mm³/dak İİH yanında makul bir yüzey pürüzlülüğü için 3 A boşalım akımı, 50 μs vurum süresi, 50 μs bekleme süresi, 93 °C sıcaklıktaki B karışımında kafa kaldırma moduyla 4,26 mm³/dak İİH değeri elde edilmiştir. Bu ek deneylerde elde edilen İİH değerlerinin ilk yapılan deneylere göre yüzey pürüzlülüğünü kısmen artırdığı ancak hala R_a 'nın orta-kaba delme işlemi için kabul edilebilir seviyede olduğu görülmüştür.
- ✓ Teknik başarı ölçütlerini daha üst seviyede sağlama amaçlı olarak öncelikle 1 mm'lik elektrotla gaz yağı dielektrik kullanarak delikler delinmiştir. Takiben, F karışımında (karbon ve nişasta tozlu) 1 mm'lik elektrot halihazırda delinmiş olan delik içinde sadece döndürülerek (elektrik boşalımları kullanılmaksızın) delik yüzey pürüzlülüğü değerleri %12 civarında iyileştirilmiştir. R_a değerinin ortalama 0,51 μm elde edildiği bu ek deneylerde silikon yağı içinde asılı duran karbon ve nişasta tozlarının delik iç duvarını aşındırarak parlatması sağlanmıştır.

9.2. MFS Model Çalışmasının Sonuçları

Bu çalışmada, EEİ'de daha önce denenmemiş olan ve birden çok fiziksel olguyu sahip MFS modeli tasarlanmıştır. Modelde hiçbir ampirik denklem kullanılmamış ve gerçek EEİ koşullarını yansıtacak sınır şartları ve başlangıç şartları belirlenmiştir. Model için yapılan ihmaller makul düzeyde tutulmuştur. Yapılan çalışmadan çıkan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir;

- ✓ MFS modeli için en uygun eleman sayısını belirlemek için MBA gerçekleştirilmiştir. MBA'da sırasıyla; 2000, 4000, 8000, 16000, 32000, 65000, 130000, 250000, 350000 ve 500000 eleman sayısından oluşan MFS modellerinin analizleri gerçekleştirilmiş ve bu P1 ve P4 noktadaki sıcaklık değerleri elde edilmiştir. Daha sonra eleman sayısı-sıcaklık grafiği yorumlanarak MFS modeli için en uygun eleman sayısının 350000 olduğu tespit edilmiştir.
- ✓ MFS modelinde, ampirik denklem kullanılmadan yapılan makul kabullerle gerçek EEİ durumunu yansıtacak sınır şartları ve başlangıç şartlarında süre kontrollü akım yoğunluğu değeri verilerek; suyun yüksek sıcaklıktaki (plazma fazındaki) zamana bağlı fiziksel özellikleri (C_p , k , σ) kullanılarak elektriksel ısınma (ing. joule heating) ile plazma oluşumu ve plazma ortamı sayesinde elektrottan işparçasına elektriksel ısınmayla ısı transferi gerçekleştirilebilmiştir. Bu ısı transferi vasıtasıyla işparçasından talaş kaldırabilmiş ve bu esnada radyasyon ve doğal konveksiyonun da etkileri görülebilmıştır.
- ✓ Toplamda gerçekleştirilen 4 farklı MFS analizinin doğrulama çalışmalarında, deneysel çalışmalardan elde edilen İİH değeriyle analizlerin sonuçlarından hesaplanan teorik İİH değerlerinin kıyaslanması şeklinde bir yöntem izlenmiştir.
- ✓ İİH değeri kullanılarak yapılan doğrulama çalışmalarında, aynı işleme parametreleri kullanılarak AISI4140 ve Ti6Al4V işparçalarıyla yapılmış deneysel çalışma sonuçlarıyla analiz sonuçları kıyaslanmış ve sırasıyla; %-44'lük ve %-66'lık farkın olduğu tespit edilmiştir. MFS modelinin başka bir araştırmacın çalışmasıyla doğrulanmasında, farklı işleme parametreleri kullanılarak Ti6Al4V ve IN718 işparçalarıyla yapılmış deneysel çalışmalarda deneysel ve teorik İİH değerleri arasında: %-43'lik ve %-47'lik farkın olduğu görülmüştür.

9.2.1. Öneriler

Bundan sonra bu alanda yapılacak çalışmalarda aşağıdaki hususlar değerlendirilebilir;

- ✓ Silikon yağının akışkanlığını artırmak amacıyla inceltici çözeltiler kullanılabilir ve bu sayede daha küçük çaplı elektrot kullanımı mümkün olabilir.
- ✓ Bu çalışmada elde edilen “silikon yağının yüksek yoğunluklu metal tozlarını bile homojen bir süspansiyon halinde tutabileceği” tespiti sayesinde büyük taneli Ni, Cr, Mo ve W tozlarının dielektrik içerisine katılması mümkün olabilir.
- ✓ Silikon yağı içerisindeki karbon tozu konsantrasyonu en düşük düzeyde tutularak bu çalışmada gözlemlenen yüksek EAH ve BA değerleri azaltılabilir.
- ✓ Silikon yağı içerisine karbon ve nişasta tozu dışında aşındırıcı etkiye sahip Al_2O_3 , SiO_2 ve ZrO_2 gibi tozlar katılarak deliklerin silindirikliği ve toleransları iyileştirilebilir.
- ✓ Elektroda dönüş hareketi yanında dikine titreşim verilerek işleme performansının ne yönde değiştiği incelenebilir.
- ✓ İşleme ortamına güçlü manyetik bobinler konularak manyetizmanın işleme performansı üzerine etkileri araştırılabilir.
- ✓ Aynı deney düzeneği kullanılarak deneysel çalışma gerçekleştirilerek performans çıktılarının istatistik analizleri ve değişken analizleri gerçekleştirilebilir.
- ✓ İki boyutlu MFS modeli için farklı dielektrik sıvılar denenebilir.
- ✓ İki boyutlu MFS modelinin geometrisi değiştirilerekten analizler gerçekleştirilebilir.
- ✓ İki boyutlu MFS modeli, üç boyutlu MFS modeline dönüştürülerek daha gelişmiş bilgisayarlar (ing. workstation) analizleri gerçekleştirilebilir ve yüzey topoğrafyasıyla ilgili tahminlerde bulunulabilecek yaklaşımlar geliştirilebilir.
- ✓ Tasarlanacak üç boyutlu MFS modeli için dinamik mesh özelliği kullanılarak elektrotun döndürülebileceği bir yaklaşım geliştirilebilir.
- ✓ Tasarlanacak üç boyutlu MFS modelinde yüzey pürüzlülüğü kavramı üzerine gereken model alt yapısı oluşturularaktan simülasyon çalışmaları gerçekleştirilebilir.
- ✓ Tasarlanacak üç boyutlu MFS modelinde, dielektrik sıvı içerisine toz katkılarının etkilerini yansıtabilecek bir tasarım gerçekleştirilebilir.
- ✓ Tasarlanacak üç boyutlu MFS modelinde, ayrılmış parça modülü kullanılarak işparçasında ergitilen bölge/parçalar rastgele hareket ettirilerek talaş hareketi simule edilebilir.

- ✓ Tasarlanacak üç boyutlu MFS modelinde, işleme bölgesinde oluşan hava kabarcıklarının hareketi simule edilebilir.
- ✓ Tasarlanacak üç boyutlu MFS modeli için, işparçası yüzeyinde gerçekleşen TKK kavramını anlamlandıracak bir yaklaşımın simülasyon çalışması gerçekleştirilebilir.
- ✓ Tasarlanacak üç boyutlu MFS modeli mesh'e bağlı olmayan sayısal yöntemlerle SHM analizleri gerçekleştirilebilir.



KAYNAKLAR

1. Pandey, P.C., Shan, H.S. (1980). *Modern Machining Processes* (First edition). New Delhi: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 84-111.
2. Uhlman, E., Piltz, S., Doll, U. (2005). Machining of micro/miniature dies and models by electrical discharge machining-recent development. *Journal of Materials Processing Technology*, 167, 488-493.
3. Chow, H. M., Yan, B. H., Huang, F. Y., Hung, J. C. (2000). Study of added powder in kerosene for the micro-silt machining of titanium alloy using electro-discharge machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 101, 95-103.
4. Springborn, R. K. (1967). *Non-Traditional Machining Processes* (First edition). USA: American Society of Tool and Manufacturing Engineers, 26-84.
5. Benedict, G. F. (1987). *Nontraditional Manufacturing Processes* (Second edition). USA: Marcel Dekker Inc., 59-60.
6. McGeough, J. A. (1988). *Advanced Methods of Machining* (Third edition). England: Chapman and Hall Ltd., 48-49.
7. Simao, J., Lee, H. G., Aspinwall, D. K., Dewes, R. C., Aspinwall, E. M. (2003). Workpiece surface modification using electrical discharge machining. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43, 121-128.
8. Zhao, W. S., Meng, Q. G., Wang, Z. L. (2002). The application of research on powder mixed EDM in rough machining. *Journal of Materials Processing Technology*, 129, 30-33.
9. Wong, Y. S., Lim, L. C., Rahuman, I., Tee, W. M. (1998). Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric. *Journal of Materials Processing Technology*, 79, 30-40.
10. Masui, K., Demizu, K., Sato, Y., Sone, T. (1995). Surface modification of tool steels by alloying method using EDM process. *Process of International Symposium for Electro Machining*, 11, 419-426.
11. Chen, Y., Mahdavian, S. M. (1999). Parametric study into erosion wear in a computer controlled electro-discharge machining process. *Wear*, 236, 350-354.
12. Uno, Y., Okada, A. (1997). Surface generation in electrical discharge machining with silicon powder mixed fluid. *International Journal of Electrical Machining*, 2, 13-18.
13. Mohri, N., Saito, N., and Higashi, M. (1991). A new process of finish machining on free surface by EDM methods. *Annals of the College International Pour La Recherche En Productique*, 40(1), 207-210.

14. Paustovskii, A. V., Novikova, V. I., Korzhova, I. (2002). Morphology and hardness of a steel surface layer after electric-spark alloying with TiN-Ni alloys. ***Powder Metallurgy and Ceramics***, 41, 23-28.
15. Gangadhar, A., Shunmugam, S., Philip, P. K. (1991). Surface modification in electrodischarge processing with a powder compact tool electrode. ***Wear***, 143, 45-55.
16. Wang, Z. L., Fang, Y., Wu, P. N., Zhao, W. S., Cheng, K. (2002). Surface modification process by electrical discharge machining with a Ti powder green compact electrode. ***Journal of Materials Processing Technology***, 129, 139-142.
17. Narumiya, H., Mohri, N., Saito, N., Ootake, H., Teunekewa, Y., Takawashi, T., Kobayashi, R. (1989). EDM by powder suspended working fluid. ***Proceedings of the 9th International Symposium for Electrode Machining***, 43, 5-8.
18. Tzeng, Y. F., Lee, C. Y. (2001). Effects of powder characteristics on electrodischarge machining efficiency. ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 17, 586-592.
19. Kruth, J. P., Froyen, L., Stevens, L., Dejonghe, P. (1998). In-process alloying of the white layer of a workpiece machined by die-sinking EDM. ***International Journal of Electrical Machining***, 3, 33-38.
20. Wang, C. C., Yan, B. H., Chow, H. M., Suzuki, Y. (1999). Cutting austempered ductile iron using an EDM sinker. ***Journal of Materials Processing Technology***, 88, 83-99.
21. Bayramoğlu, M. (1994). CNC elektro erozyon tezgahlarında levha elektrotların kullanımı. ***6. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi***, ODTÜ, Ankara, 31-40.
22. Uno, Y., Okada, A., Hayashi, Y., Tabuchi, Y. (1998). Surface integrity in EDM of aluminum bronze with nickel powder mixed fluid. ***Journal of Japan Society Electrical Machining Engineers***, 32, 24-31.
23. Furutani, K., Saneto, A., Takezawa, H., Mohri, N., Miyake, H. (2001). Accretion of titanium carbide by electrical discharge machining with powder suspended in working fluid. ***Journal of International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology***, 25, 138-144.
24. Yan, B. H., Wang, C. C., Liu, W. D., Huang, F. Y. (2000). Machining characteristics of Al₂O₃/6061Al composite using rotary EDM with a dislike electrode. ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 16, 322-333.
25. Tay, F. E. H., Haider, E. A. (2001). The potential of plating techniques in the development of rapid EDM tooling. ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 18, 892-896.

26. Lin, Y. C., Yan, B. H., Chang, Y. S. (2000). Machining characteristics of titanium alloy (Ti-6Al-4V) using a combination process of EDM with USM. ***Journal of Materials Processing Technology***, 104, 171-177.
27. Uno, Y., Okada, A., Çetin, S. (2001). Surface modification of EDMed surface with powder mixed fluid. ***2nd International Conference on Design and Production of Dies and Molds***, Kuşadası, 143-149.
28. Ming, Q. Y., He, L.Y. (1995). Powder-suspension dielectric fluid for EDM. ***Journal of Materials Processing Technology***, 52, 44-54.
29. Özerkan, H. B. (2003). *Elektro Erozyon İle İşlemede Toz Karışımli Dielektrik Sıvının İşleme Performansına Etkisinin Deneyisel İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-63.
30. Her, M. G., Weng, F. T. (2001). Micro-hole machining of copper using the electro-discharge machining process with a tungsten carbide electrode compared with a copper electrode. ***The International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 17, 715-719.
31. Mohri, N., Saito, N., Tsunekawa, Y. (1993). Metal surface modification by electrical discharge machining with composite electrode. ***Annals of the College International Pour La Recherche En Productique***, 42(1), 219-222.
32. Saito, K., Kishinami, T., Konno, H., Sato, M. (1986). Development of numerical contouring control electric discharge machining (NCC-EDM). ***Annals of the College International Pour La Recherche En Productique***, 35(1), 117-120.
33. Hocheng, H., Hsu, C. C. (1995). Preliminary study of ultrasonic drilling of fiber-reinforced plastic. ***Journal of Materials Processing Technology***, 48, 255-266.
34. Khairy, A. B. E. (1990). Assessment of some dynamic parameters for the ultrasonic machining process. ***Wear***, 137, 187-198.
35. Shunmugam, M. S., Philip, P. K. (1994). Improvement of wear resistance by EDM with tungsten carbide P/M electrode. ***Wear***, 171, 1-5.
36. Bayramoğlu, M. (1995). Dalma elektro erozyon tezgahları ve nümerik kontrol. ***Makine ve Metal Teknolojisi***, 45, 157-160.
37. Masuzawa, T., Heuveiman, C. J. (1983). A self flushing method with spark erosion machining. ***Annals of the College International Pour La Recherche En Productique***, 32(1), 109-111.
38. Chen, S. L., Yan, B. H., Huang, F. Y. (1999). Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V. ***Journal of Materials Processing Technology***, 87, 157-160.

39. Bayramoğlu, M. (1995). Elektro erozyon tezgahlarında işlenen parçaların yüzey kalitesi. **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi 6. Denizli Malzeme Sempozyumu**, 320-326.
40. Kruth, J. P., Stevens, L., Froyen, L., Lauwers, B. (1995). Study of the white layer of a surface machined by die-sinking electro-discharge machining. **Annals of the College International Pour La Recherche En Productique**, 44(1), 169-172.
41. Schumacher, B. M. (1990). About the role of debris in the gap during electrical discharge machining. **Annals of the College International Pour La Recherche En Productique**, 39(1), 197-199.
42. Chow, H. M., Yan, B. H., Huang, F. Y., Hung, J. C. (2000). Study of added powder in kerosene for the micro-slit machining of titanium alloy using electro-discharge machining. **Journal of Materials Processing Technology**, 101, 95-103.
43. König, W., Jörres, L. (1987). Aqueous solutions of organic compounds as dielectrics for EDM sinking. **Annals of the College International Pour La Recherche En Productique**, 36(1), 105-109.
44. Coğun, C., Özerkan, B., Karaçay, T. (2006). An Experimental Investigation on Effect of Powder Mixed Dielectric on Machining Performance in Electric Discharge Machining (EDM). **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part B, Journal of Engineering Manufacture**, 220, 1035-1050.
45. Kim, W. B., Lee, S. J., Kim, Y. J., Lee, E. S. (2003). The electro-mechanical principle of electrorheological fluid-assisted polishing. **International Journal Machine Tools and Manufacture**, 43, 81-88.
46. Li, H., Cheng, H., Feng, Y., Tam, H. Y., Wen, Y. (2011). Investigation of electro-rheological fluid for optical finishing. **Frontiers of Optoelectronics in China**, 4(2), 170-179.
47. Liu, Z., Lin, Y., Wen, X., Su, Q. (2005). Preparation and electrorheological properties of polyquin acridine-12, dione-based suspensions, colloidal and surfaces. **Physicochemical English Aspects**, 264, 55-60.
48. Kumar, S., Batra, U. (2012). Surface modification of die steel materials by EDM method using tungsten powder-mixed dielectric. **Journal of Manufacturing Processes**, 14, 35-40.
49. Teimouri, R., Baseri, H. (2012). Effects of magnetic field and rotary tool on EDM performance. **Journal of Manufacturing Processes**, 14, 316-322.
50. Singh, B., Kumar, J., Kumar, S. (2015). Influences of Process Parameters on MRR Improvement in Simple and Powder-Mixed EDM of AA6061/10%SiC Composite. **Materials and Manufacturing Processes**, 30, 303-312.
51. Hourmand, M., Farahany, S., Sarhan, A. A. D., Noordin, M. Y. (2015). Investigating the electrical discharge machining (EDM) parameter effects on Al-Mg₂Si metal

- matrix composite (MMC) for high material removal rate (MRR) and less EWR–RSM approach. *International Journal Advanced Manufacturing Technol*, 77, 831-838.
52. Singh, A. K., Kumar, S., Singh, V. P. (2015). Effect of the addition of conductive powder in dielectric on the surface properties of superalloy Super Co 605 by EDM process. *International Journal Advanced Manufacturing Technol*, 77, 99-106.
 53. Reddy, V. V., Kumar, A., Valli, P. M., Reddy, C. S. (2015). Influence of surfactant and graphite powder concentration on electrical discharge machining of PH17-4 stainless steel. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering*, 37, 641-655.
 54. Reddy, V. V., Valli, P. M., Kumar, A., Reddy, C. S. (2015). Multi-objective optimization of electrical discharge machining of PH17-4 stainless steel with surfactant-mixed and graphite powder-mixed dielectric using Taguchi-data envelopment analysis-based ranking method. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part B, Journal of Engineering Manufacture*, 229(3), 487-494.
 55. Kumar, H. (2015). Development of mirror like surface characteristics using nano powder mixed electric discharge machining (NPMEDM). *International Journal Advanced Manufacturing Technol*, 76, 105-113.
 56. Peng, H., Yu, D., Zhang, X., Wang, S., Wen, Y. (2014). Fabrication of hollow nickel micro-spheres with high degree of hollowness by silicon powder-mixed spark erosion. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 85, 131-134.
 57. Chen, S. L., Lin, M. H., Huang, G. X., Wang, C. C. (2014). Research of the recast layer on implant surface modified by micro-current electrical discharge machining using deionized water mixed with titanium powder as dielectric solvent. *Applied Surface Science*, 311, 47-53.
 58. Singh, A. K., Kumar, S., Singh, V. P. (2014). Optimization of Parameters Using Conductive Powder in Dielectric for EDM of Super Co 605 with Multiple Quality Characteristics. *Materials and Manufacturing Processes*, 29, 267-273.
 59. Singh, B., Kumar, J., Kumar, S. (2014). Experimental Investigation on Surface Characteristics in Powder-Mixed Electrodischarge Machining of AA6061/10%SiC Composite. *Materials and Manufacturing Processes*, 29, 287-297.
 60. Sidhu, S. S., Batish, A., Kumar, S. (2014). Study of Surface Properties in Particulate-Reinforced Metal Matrix Composites (MMCs) Using Powder-Mixed Electrical Discharge Machining (EDM). *Materials and Manufacturing Processes*, 29, 46-52.
 61. Bai, X., Zhang, Q., Zhang, J., Kong, D., Yang, T. (2013). Machining efficiency of powder mixed near dry electrical discharge machining based on different material combinations of tool electrode and workpiece electrode. *Journal of Manufacturing Processes*, 15, 474-482.

62. Singh, H. (2012). Experimental study of distribution of energy during EDM process for utilization in thermal models. ***International Journal of Heat and Mass Transfer***, 55, 5053-5064.
63. Shabgard, M., Ahmadi, R., Seyedzavvar, M., Oliaei, S. N. B. (2013). Mathematical and numerical modeling of the effect of input-parameters on the flushing efficiency of plasma channel in EDM process. ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, 65, 79-87.
64. Guo, Y. B., Klink, A., Klocke, F. (2013). Multiscale modeling of sinking-EDM with gaussian heat flux via user subroutine. ***Procedia College International Pour La Recherche En Productique***, 6, 438-443.
65. Kansal, H. K., Singh, S., Kumar, P. (2008). Numerical simulation of powder mixed electric discharge machining (PMEDM) using finite element method. ***Mathematical and Computer Modelling***, 47, 1217-1237.
66. Kalajahi, M. H., Ahmadi, S. R., Oliaei, S. N. B. (2013). Experimental and finite element analysis of EDM process and investigation of material removal rate by response surface methodology. ***International Journal Advanced Manufacturing Technol***, 69, 687-704.
67. Zhang, Y., Liu, Y., Shen Y., Li, Z., Ji, R., Wang, F. (2013). A new method of investigation the characteristic of the heat flux of EDM plasma. ***Procedia College International Pour La Recherche En Productique***, 6, 450-455.
68. Sarikavak, Y., Cogun, C. (2012). Single discharge thermo-electrical modeling of micromachining mechanism in electric discharge machining. ***Journal of Mechanical Science and Technology***, 26(5), 1591-1597.
69. Sarıkavak, Y., Çoğun, C. (2010). Elektro erozyon ile işlemede işleme mekanizmasının ısıl modellenmesi. ***Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi***, 25(3), 517-531.
70. Ghiculescu, D., Marinescu, N., Nanu, S., Ghiculescu, D. (2013). Some aspects of finite element modelling of micro-EDM and ultrasonic EDM with time dependent radius of plasma channel. ***Nonconventional Technologies Review Romania***, 6, 30-35.
71. Somashekhar, K. P., Mathew, J., Ramachandran, N. (2012). Electrothermal theory approach for numerical approximation of the μ -EDM process. ***International Journal Advanced Manufacturing Technol***, 61, 1241-1246.
72. Aich, U., Banerjee, S. (2014). Modeling of EDM responses by support vector machine regression with parameters selected by particle swarm optimization. ***Applied Mathematical Modelling***, 38, 2800-2818.
73. Yeo, S. H., Kurnia, W., Tan, P. C. (2008). Critical assessment and numerical comparison of electro-thermal models in EDM. ***Journal of Materials Processing Technology***, 203, 241-251.

74. Zhang, L., Du, J., Zhuang, X., Wang, Z., Pei, J. (2015). Geometric prediction of conic tool in micro-EDM milling with fix length compensation using simulation. ***International Journal of Machine Tools Manufacture***, 89, 86-94.
75. Guo, J., Zhang, G., Huang, Y., Ming, W., Liu, M., Huang, H. (2014). Investigation of the removing process of cathode material in micro-EDM using an atomistic-continuum model. ***Applied Surface Science***, 315, 323-336.
76. Dewangan, S., Gangopadhyay, S., Biswas, C. K. (2015). Study of surface integrity and dimensional accuracy in EDM using Fuzzy TOPSIS and sensitivity analysis. ***Measurement***, 63, 364-376.
77. Panda, D. K., Bhoi, R. K. (2005). Artificial Neural Network Prediction of Material Removal Rate in Electro Discharge Machining. ***Materials and Manufacturing Processes***, 20, 645-672.
78. Izquierdo, B., Sanchez, J. A., Plaza, S., Pombo, I., Ortega, N. (2009). A numerical model of the EDM process considering the effect of multiple discharges. ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, 49, 220-229.
79. Das, S., Joshi, S. S. (2010). Modeling of spark erosion rate in microwire-EDM. ***International Journal Advanced Manufacturing Technol***, 48, 581-596.
80. Giridharan, A., Samuel, G. L. (2015). Modeling and analysis of crater formation during wire electrical discharge turning (WEDT) process. ***International Journal Advanced Manufacturing Technol***, 77, 1229-1247.
81. Wang, T., Zhe, J., Zhang, Y. Q., Li, Y. L., Wen, X. R. (2013). Thermal and fluid field simulation of single pulse discharge in dry EDM. ***Procedia College International Pour La Recherche En Productique***, 6, 427-431.
82. Govindan, P., Gupta, A., Joshi, S. S., Malshe, A., Rajurkar, K. P. (2013). Single-spark analysis of removal phenomenon in magnetic field assisted dry EDM. ***Journal of Materials Processing Technology***, 213, 1048-1058.
83. Krotz, H., Roth, R., Wegener, K. (2013). Experimental investigation and simulation of heat flux into metallic surfaces due to single discharges in micro-electrochemical arc machining (micro-ECAM). ***International Journal Advanced Manufacturing Technol***, 68, 1267-1275.
84. Hamdan, A., Marinov, I., Rousseau, A., Belmonte, T. (2014). Time-resolved imaging of nanosecond-pulsed micro-discharges in heptane. ***Journal of Applied Physics***, 47, 1-8.
85. Hamdan, A., Kosior, F., Noel, C., Henrion, G., Audinot, J. N., Gries, T., Belmonte, T. (2013). Plasma-surface interaction in heptane. ***Journal of Applied Physics***, 113, 213-303.

86. Zhang, G., Guo, J., Ming, W., Huang, Y., Shao, X., Zhang, Z. (2014). Study of the machining process of nano-electrical discharge machining based on combined atomistic-continuum modeling method. ***Applied Surface Science***, 290, 359-367.
87. Ming, W., Zhang, G., Li, H., Guo, J., Zhang, Z., Huang, Y., Chen, Z. (2014). A hybrid process model for EDM based on finite-element method and Gaussian process regression. ***International Journal Advanced Manufacturing Technol***, 74, 1197-1211.
88. Somashekhar, K. P., Panda, S., Mathew, J., Ramachandran, N. (2015). Numerical simulation of micro-EDM model with multi-spark. ***International Journal Advanced Manufacturing Technol***, 76, 83-90.
89. Hinduja, S., Kunieda, M. (2013). Modelling of ECM and EDM processes. ***College International Pour La Recherche En Productique Annals: Manufacturing Technology***, 62, 775-797.
90. Subbu, S. K., Karthikeyan, G., Ramkumar, J., Dhamodaran, S. (2011). Plasma characterization of dry μ -EDM. ***International Journal Advanced Manufacturing Technol***, 56, 187-195.
91. Zhang, M., Zhang, Q., Wang, H., Liu, G., Guo, T. (2015). Research on a single pulse discharge to discriminate EDM and EAM based on the plasma tunnel and crater geometry. ***Journal of Materials Processing Technology***, 219, 248-256.
92. Wang, Y. K., Xie, B. C., Wang, Z. L., Peng, Z. L. (2011). Micro EDM deposition in air by single discharge thermo simulation. ***Transactions of Nonferrous Metals Society of China***, 21, 450-455.
93. Zhang, Y., Liu, Y., Shen, Y., Li, Z., Ji, R., Cai, B. A novel method of determining energy distribution and plasma diameter of EDM. ***International Journal of Heat and Mass Transfer***, 75, 425-432.
94. Habib, S. S. (2009). Study of the parameters in electrical discharge machining through response surface methodology approach. ***Applied Mathematical Modelling***, 33, 4397-4407.
95. Eubank, P. T., Patel, M. R., Barrufet, M. A., Bozkurt, B. (1993). Theoretical models of the electrical discharge machining process 3rd. the variable mass, cylindrical plasma model. ***Journal of Applied Physics***, 73(2), 23-27.
96. Shanmugam, V., Krishnaraj, V., Jagdeesh, K., Kumar, V., Subash, S. (2013). Numerical Modelling of Electro-Discharge Machining Process using Moving Mesh Feature. ***Procedia Engineering***, 64, 747-756.
97. Salah, N. B., Ghanem, F., Atig, K. B. (2008). Thermal and mechanical numerical modelling of electric discharge machining process. ***The Journal Communications in Numerical Methods in Engineering***, 24, 2021-2034.

98. Shen, Y., Liu, Y., Zhang, Y., Tan, B., Ji, R., Cai, B., Zheng, C. (2014). Determining the energy distribution during electric discharge machining of Ti-6Al-4V. ***International Journal Advanced Manufacturing Technol***, 70, 11-17.
99. Adineh, V. R. (2012). Radiative Heat Loss of Electrical Discharge Machining Process Through Hydrocarbon Oil and Deionized Water Dielectric Liquids. ***Plasma Chemistry and Plasma Processing***, 32, 369-392.
100. Xie, B. C., Wang, Y. K., Wang, Z. L., Zhao, W. S. (2011). Numerical simulation of titanium alloy machining in electric discharge machining process. ***Transactions of Nonferrous Metals Society of China***, 21, 434-439.
101. Tan, P. C., Yeo, S. H. (2008). Modelling of overlapping craters in micro-electrical discharge machining. ***Journal of Physics D: Applied Physics***, 41, 1-12.
102. Wang, J., Han, F. (2014). Simulation model of debris and bubble movement in consecutive-pulse discharge of electrical discharge machining. ***International Journal of Machine Tools Manufacture***, 77, 56-65.
103. Fonseca, J., Marafona, J. D. (2014). The effect of deionisation time on the electrical discharge machining performance. ***International Journal Advanced Manufacturing Technol***, 71, 471-481.
104. Shabgard, M., Ahmadi, R., Seyedzavvar, M., Oliaei, S. N. B. (2013). Mathematical and numerical modeling of the effect of input-parameters on the flushing efficiency of plasma channel in EDM process. ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, 65, 79-87.
105. Weingartner, E., Kuster, F., Wegener, K. (2012). Modeling and simulation of electrical discharge machining. ***Procedia College International Pour La Recherche En Productique***, 2, 74-78.
106. Revaz, B., Witz, G., Flükiger, R. (2005). Properties of the plasma channel in liquid discharges inferred from cathode local temperature measurements. ***Journal of Applied Physics***, 98, 1-6.
107. Tan, P. C., Yeo, S. H. (2013). Simulation of Surface Integrity for Nanopowder-Mixed Dielectric in Micro Electrical Discharge Machining. ***The Minerals, Metals and Materials Society and Advanced Semiconductor Materials International***, 44, 711-712.
108. Izquierdo, B., Sanchez, J. A., Ortega, N., Plaza, S., Pombo, I. (2011). Insight into fundamental aspects of the EDM process using multidischarge numerical simulation. ***International Journal Advanced Manufacturing Technol***, 52, 195-206.
109. Descoeudres, A., Hollenstein, Ch., Walder, G., Demellayer, R., and Perez, R. (2008). Time and spatially-resolved characterization of electrical discharge machining plasma. ***Plasma Sources Science Technol***, 17, 10-11.

110. Kojima, A., Natsu, W., Kunieda, M. (2008). Spectroscopic measurement of arc plasma diameter in EDM. ***College International Pour La Recherche En Productique Annals: Manufacturing Technology***, 57, 203-207.
111. Natsu, W., Shimoyamada, M., Kunieda, M. (2006). Study on expansion process of EDM arc plasma. ***The Japan Society of Mechanical Engineers International Journal Series C***, 49(2), 600-603.
112. Descoeudres, A., Hollenstein, C., Walder, G., Perez, R. (2005). Time-resolved imaging and spatially-resolved spectroscopy of electrical discharge machining plasma. ***Journal of Physics D: Applied Physics***, 38, 4066-4073.
113. Revaz, B., Emery, J., Witz, G., Flükiger, R., Perez, R., Carron, J., Rappaz, M. (2005). Local Temperature Response to Pulsed Discharges in Electronic Discharge Machining (EDM) Environment. ***Institute of Industrial Electronics and Electrical Engineering Transactions on Plasma Science***, 33(3), 1067-1068.
114. Descoeudres, A., Hollenstein, C., Demellayer, R., Walder, G. (2004). Optical emission spectroscopy of electrical discharge machining plasma. ***Journal of Materials Processing Technology***, 149, 184-190.
115. Pillans, B. W., Evensen, M. H., Taylor, H. F., Eubank, P. T., Ma, L. (2002). Fiber optic diagnostic techniques applied to electrical discharge machining sparks. ***Journal of Applied Physics***, 91(4), 1780-1781.
116. Albinski, K., Musiol, K., Miernikiewicz, A., Labuz, S., Malota, M. (1996). The temperature of a plasma used in electrical discharge machining. ***Plasma Sources Science Technol***, 5, 736-742.
117. Nagahanumaiaha, Ramkumar, J., Glumac, N., Kapoor, S. G., DeVorc, R. E. (2009). Characterization of plasma in micro-EDM discharge using optical spectroscopy. ***Journal of Manufacturing Processes***, 11, 82-87.
118. Fridman, A. A., Kennedy, L. A. (2004). *Plasma Physics and Engineering* (First edition). New York: Taylor and Francis Routledge, 2-3.
119. Fridman, A. (2008). *Plasma Chemistry* (First edition). New York: Cambridge University Press, 1-2.
120. Lieberman, M. A., Lichtenberg, A. J. (1997). *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing* (Second edition). New York: John Wiley, 5.
121. Muraoka, K., Maeda, M. (2001). *Laser-aided diagnostics of plasmas and gases*. Bristol and Philadelphia: IOP Publishing, 295.
122. Genç, A. (2010). *Bor Karbür Katkılı Toz Metal Elektrotların Elektro Erozyon ile İşleme Performansının ve Yüzey Alaşımlama Karakteristiklerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 22-25.

123. Özgedik, A. (2009). *Elektro Erozyon İle İşlemede İşparçasına Uygulanan Titreşimlerin İşleme Performansına Etkilerinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 35-38.
124. Küçüktürk, G. (2008). *Elektro Erozyon İle İletken Olmayan Seramiklerin İşlenmesi İçin Yöntem Geliştirilmesi*, Doktora tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-168.
125. Çoğun, C., Erden, A. (1986). Elektro erozyon ile işleme (EDM) performansının bilgisayarlı denetiminin gerçekleştirilmesi. **2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi**, 105-112.
126. Choudhary, R., Kumar, H., Garg, R.K. (2010). Analysis and Evaluation of Heat Affected Zone in Electric Discharge Machining of EN-31 Die Steel. **Indian Journal of Engineering and Materials Sciences**, 17, 91-98.
127. Arooj, S., Shah, M., Sadiq, S., Jaffery, S. H. I, Khushnood, S. (2014). Effect of Current in the EDM Machining of Aluminum 6061 T6 and its Effect on the Surface Morphology. **Arabian Journal for Science and Engineering**, 39, 4187-4199.
128. Izquierdo, B., Plaza, S., Sánchez, J. A., Pombo, I., Ortega, N. (2012). Numerical prediction of heat affected layer in the EDM of aeronautical alloys. **Applied Surface Science**, 259, 780-790.
129. Ergün, Z. E., Çoğun, C. (2005). Elektro Erozyon İle İşleme (EEİ) İş Parçası Yüzey Karakteristiklerinin DeneySEL İncelenmesi. **Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 21(3), 427-441.
130. Gülcan, O., Uslan, İ., Usta, Y., Çoğun, C. (2015). Elektro Erozyon İle İşlemede Cu-Cr T/M Elektrot Kullanımının İşleme Performansına Etkisi. **Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 30(3), 381-394.
131. Mehta, S., Rajurkar, A., Chauhan, J. (2009). A review on current research trends in die-sinking electrical discharge machining of conductive ceramics. **International Journal of Recent Trends Engineering**, 1(5), 100-104.
132. Cogun, C., Esen, Z., Genc, A., Cogun, F., Akturk, N. (2015). Effect of powder metallurgy Cu-B₄C electrodes on workpiece surface characteristics and machining performance of electric discharge machining. **The Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture**, 220, 1035-1050.
133. Zhang, Y., Liu, Y., Ji, R., Cai, B. (2011). Study of the recast layer of a surface machined by sinking electrical discharge machining using water-in-oil emulsion as dielectric. **Applied Surface Science**, 257, 5989-5997.
134. Chen, S. L., Lin, M. H., Huang, G. X., Wang, C. C. (2014). Research of the recast layer on implant surface modified by micro-current electrical discharge machining using deionized watermixed with titanium powder as dielectric solvent. **Applied Surface Science**, 311, 47-53.

135. Lee, J. W. (2003). Microstructural evaluation and phase transformation of recast layers in electrical discharge machined dual phase Fe-Mn-Al alloy. ***Journal of Materials Science***, 38, 1679-1687.
136. Banu, A., Ali, M. Y., Rahman, M. A. (2014). Micro-electro discharge machining of non-conductive zirconia ceramic: investigation of MRR and recast layer hardness. ***International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 75, 257-267.
137. Newton, T. R., Melkote, S. N., Watkins, T. R., Trejo, R. M., Reister, L. (2009). Investigation of the effect of process parameters on the formation and characteristics of recast layer in wire-EDM of Inconel 718. ***Materials Science and Engineering A***, 513, 208–215.
138. Qu, J., Shih, A. J., Scattergood, R. O., Luo, J. (2005). Abrasive microblasting to improve surface integrity of electrical discharge machined WC-Co composite. ***Journal of Materials Processing Technology***, 166(3), 440-448.
139. Bonny, K., De Baets, P., Vleugels, J., Salehi, A., Van der Biest, O., Lauwers, B., Liu, W. (2009). EDM machinability and frictional behaviour of ZrO₂- WC composites. ***International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 41(11–12), 1085-1093.
140. Iqbal, A., Khan, A. A. (2010) Influence of process parameters on electrical discharge machined job surface integrity. ***American Journal of Engineering and Applied Sciences***, 3(2), 396-402.
141. Ho, K. H., Newman, S. T. (2003) State of the art electrical discharge machining (EDM). ***International Journal of Machine Tools and Manufacture***, 43(13), 1287-1300.
142. Rajurkar, K. P. (1985). Surface damage and shock waves in EDM. ***Proceedings of the 13th North American Manufacturing Research Conference***, 379-385.
143. Amineh, S. K., Tehrani, A. F., Mohammadi, A. (2013). Improving the surface quality in wire electrical discharge machined specimens by removing the recast layer using magnetic abrasive finishing method. ***International Journal of Advanced Manufacturing Technology***, 66, 1793-1803.
144. Murray, J. W., Clare, A. T. (2012). Repair of EDM induced surface cracks by pulsed electron beam irradiation. ***Journal of Materials Processing Technology***, 212, 2642-2651.
145. Winslow, W. M. (1947). Induced Vibration Suspension. ***Journal of Applied Physics***, 20, 1137-1140.
146. Eyrik, M. (2007). *Poli(oksümetilen)/Politiyofen Kompozitlerin Elektroteolojik Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 55-76.

147. Makela, K. K. (1999). Characterisation And Performance of Electrorheological Fluids Based On Pine Oils. **VTT Publications**, 15, 1-3.
148. Lee, H. J., Chin, B. D., Yang, S. M., Park, O. (1998). Surfactant Effect on the Stability and Electrorheological Properties of Polyaniline Particle Suspensions. **Journal of Colloid and Interface Science**, 206, 424-438.
149. Karataş, Ç. (1997). *Toz Enjeksiyon Kalıplamada Karışımın Reolojisi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Ankara, 30-85.
150. Urtekin, L. (2008). *Toz Enjeksiyon Kalıplanmış Steatit Seramiklerin Özelliklerine Kalıplama ve Sinterleme Parametrelerinin Etkisinin İncelenmesi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 23-30, 39-70.
151. Erdem, O. (2010). *Toz Enjeksiyon Yöntemiyle Kalıplanmış MgO Takviyeli Alüminanın Mekanik Özelliklerinin Araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 40-59.
152. Menczel, J. D., Prime, R. B., Gallagher, P. K. (2009). *Thermal Analysis of Polymers: Fundamentals and Applications* (First edition). New Jersey: John Wiley, 336-339.
153. Yılmaz, O., Okka, M. A. (2010). Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance. **International Journal Advanced Manufacturing Technol**, 51, 185-194.
154. Yılmaz, V., Sarıkaya, M., Dilipak, H. (2015). Deep Micro-hole Drilling For Hadfield Steel by Electro-Discharge Machining (EDM). **Original scientific article/Izvirni znanstveni-lanek**, 49(3), 337.
155. Lee, C. S., Heo, E. Y., Kim, J. M., Choi, I. H., Kim, D. W. (2015). Electrode wear estimation model for EDM drilling. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 36, 70-75.
156. Plaza, S., Sanchez, J. A., Perez, E., Gil, R., Izquierdo, B., Ortega, N., Pombo, I. (2014). Experimental study on micro EDM-drilling of Ti6Al4V using helical electrode. **Precision Engineering**, 38, 821-827.
157. D'Urso, G., Merla, C. (2014). Workpiece and electrode influence on micro-EDM drilling performance. **Precision Engineering**, 38, 903-914.
158. Zhang, L., Tong, H., Li, Y. (2015). Precision machining of micro tool electrodes in micro EDM for drilling array micro holes. **Precision Engineering**, 39, 100-106.
159. Incropera, F. P., Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (Seventh edition). New York: John Wiley and Sons, 17.
160. Bhadeshia, H., Honeycombe, S. R. (2006). *Steels Microstructure and Properties* (Third edition). Boston: Elsevier, 273-286.

161. Koçak, H. (2006). *Bakır Alaşımları El Kitabı* (Üçüncü Baskı). İstanbul: Yonca Ajans-Ofset Matbaacılık, 27-32.
162. Gürü, M., Yalçın, H. (2012). *Malzeme Bilgisi* (Üçüncü Baskı). Ankara: Palme Yayıncılık, 150-151.
163. Baden, W. (2013). *Chemicals and Reagents* (First edition). Darmstadt: Merck Kga, 977-1625.
164. Tsai, Y. Y., Tseng, C. H., Chang, C. K. (2008). Development of a combined machining method using electrorheological fluids for EDM. ***Journal of Materials Processing Technology***, 201, 565-569.
165. Unses, E., Cogun, C. (2015). Improvement of Electric Discharge Machining (EDM) Performance of Ti-6Al-4V Alloy with Added Graphite Powder to Dielectric. ***Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering***, 61(6), 409-418.
166. Erdem, O., Coğun, C., Uslan, İ., Urtekin, L., Özerken, H. B. (2013). Elektro-erozyon ile işlemede döner elektrot ile delik delmede dielektrik sıvısına karıştırılan tozların ve ısıtmanın işleme performansına etkisi. ***Makine İmalat Teknolojileri Kongresi***, 2, 212-221.
167. Erdem, O., Coğun, C., Urtekin, L., Uslan, İ., Özerkan, H. B. (2014). Toz Katkılı Dielektrikle Elektro Erozyon İşleme Performansı. ***7. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı***, 186-189.
168. Nilsson, J. W., Riedel, S. A. (2005). *Electric Circuits* (Seventh edition). Upper Saddle River, New Jersey: Pearson Prentice Hall, 12-13.
169. Unses, E. (2012). *Ti-6Al-4V Alaşımının Elektro Erozyon İle İşlenmesinde Grafit Tozu Karışımli Dielektrik Sıvının İşleme Performansına Etkisinin Deneysel İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 39-42.
170. Yağimli, M., Akar, F. (2005). *Doğru Akım Devreleri ve Problem Çözümleri* (Üçüncü Baskı). Türkiye: Beta Basım A.Ş., 6-7.
171. ANSYS, Inc. (2013). *ANSYS CFX-Solver Theory Guide*. New York: ANSYS Inc., 1-373.
172. Porytsky, P. V. (2008). Mechanisms of the Contraction of an Arc Discharge 3. Peculiarities of the Thermal Contraction of an Arc in a Molecular Gas Institute for Nuclear Research. ***National Academy of Science of Ukraine***, 1156.
173. Hrabovsky, M., Krenek, P. (2008). Properties of Thermal Plasma Generated by the Torch with Water Stabilized Arc. ***Academy of Sciences of Czech Republic***, 182 (11), 319.
174. Chung, K. J., Hwang Y. S. (2013). Thermodynamic Properties and Electrical Conductivity of Water Plasma. ***Contributions to Plasma Physics***, 53(4-5), 330-335.

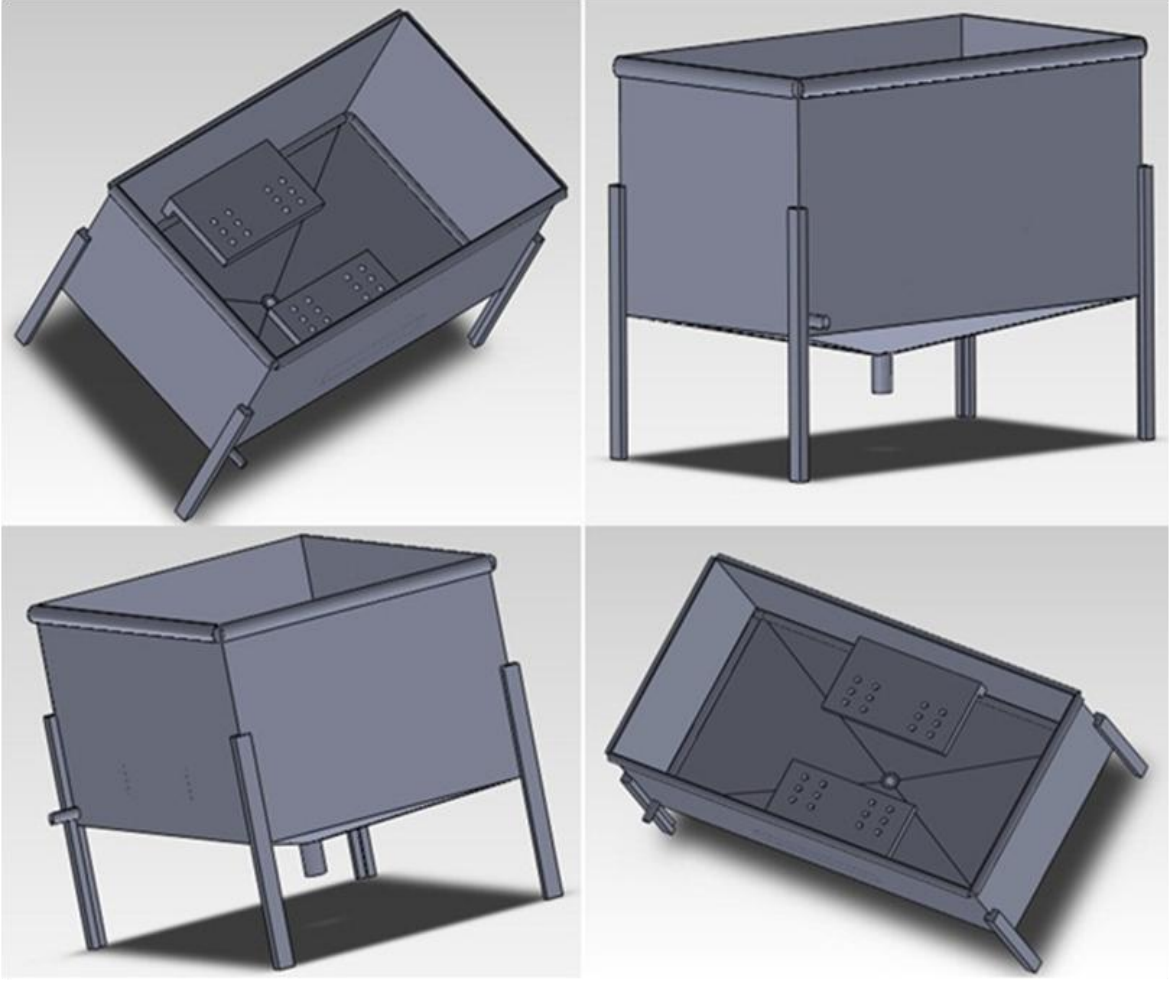
175. Yılmaz, O., Bozdana, A. T., Okka, M. A. (2014). An intelligent and automated system for electrical discharge drilling of aerospace alloys: Inconel 718 and Ti-6Al-4V. **International Journal Advanced Manufacturing Technol**, 74, 1323-1336.
176. White, G. K., Collocott, S. J. (1984). Heat Capacity of Reference Materials: Cu and W. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, 13(4), 1-5.
177. Powell, R. W., Ho, C. Y., Liley, P. E. (1966). Thermal Conductivity of Selected Materials. **National Standard Reference Data Series**, 8, 1-4.
178. Matula, R. A. (1979). Electrical Resistivity of Copper, Gold, Palladium and Silver. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, 5(4), 22-25.
179. Chapra, S. C., Canale, R. P. (2004). *Yazılım ve Programlama Uygulamalarıyla Mühendisler İçin Sayısal Yöntemler*. (Çev. H. Heperkan ve U. Kesgin). Türkiye: Literatür Yayıncılık Dağıtım Ltd. Şti. (Eserin orijinali 2002'de yayımlandı), 12-13.
180. Reddy, J. N. (2005). *An Introduction to the Finite Element Method* (Third edition). New York: McGraw-Hill Education, 56.
181. Chandrupatla, J. R., Belegundu, A. D. (2011). *Introduction to Finite Elements In Engineering* (Fourth edition). Singapore: Prentice Hall Inc., 9.
182. Özdemir, A. (2006). *Seramik Malzemelerin Kırılma Tokluğu Değerlerinin Üç Boyutlu Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Teorik Olarak Belirlenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 33.
183. Topcu, M., Taşgetiren, S. (1998). *Mühendisler İçin Sonlu Elemanlar Metodu* (Birinci Baskı). Türkiye: Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Ders Kitapları Yayın No: 007, 32, 87-88.
184. Coşkun, G., Soyhan, H. S. (2011). *Sonlu Elemanların Ağ Yöntemi Yaklaşımına Dayalı Kenar Civarlarındaki Gerilim Dağılımlarının Tekilleri*. **Mühendis ve Makina**, 52 (614), 116-125.
185. Ramasawmy, H., Blunt, L., Rajurkar, K. P. (2005). Investigation of the relationship between the white layer thickness and 3D surface texture parameters in the die sinking EDM process. **Precision Engineering**, 29, 479-490.
186. Li, J., Shi, S., Zhao, S. (2013). Modeling and Analysis of Micro-hole in Die-sinking EDM Process through Response Surface Method based on the Central Composite Design. **International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition**, 6, 351-364.
187. Çaydaş, U., Haşçalık, A. (2008). Modeling and analysis of electrode wear and white layer thickness in die-sinking EDM process through response surface methodology. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 38, 1148-1156.
188. Spiegel, M. R., Liu, J. (1999). *Schaum's Outlines Series Mathematical Handbook of Formulas and Tables* (Second edition). New York: McGraw-Hill, 17.

189. Ruellan, A., Kleber, X., Ville, F., Cavoret, J., Liatard, B. (2001). Understanding white etching cracks in rolling element bearings: Formation mechanisms and influent tribochemical drivers. ***The Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B, Journal of Engineering Manufacture***, 229(8) 886-901.
190. Nagaoka, A., Yokoyama, K., Sakai, J. (2010). Evaluation of hydrogen absorption behaviour during acid etching for surface modification of commercial pure Ti, Ti-6Al-4V and Ni-Ti superelastic alloys. ***Corrosion Science***, 52, 1130-1138.
191. Ay, M., Haşçalık, A., Çaydaş, U. (2012). Yüksek Toleranslı Plazma Arkı İle Kesme Parametrelerinin Araştırılması. ***3. Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu***, 503-514.
192. Haşçalık, A., Çaydaş, U. (2007). Electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6Al-4V). ***Applied Surface Science***, 253, 9007-9016.
193. Li, L., Wei, X. T., Guo, Y. B., Li, W., Liu, J. F. (2014). Surface Integrity of Inconel 718 by Wire-EDM at Different Energy Modes. ***Journal of Materials Engineering and Performance***, 23(8), 3051-3057.
194. Haşçalık, A., Çaydaş, U. (2014). A comparative study of surface integrity of Ti-6Al-4V alloy machined by EDM and AECG. ***Journal of Materials Processing Technology***, 190, 173-180.
195. Klocke, F., Welling, D., Dieckmann, J. (2011). Comparison of grinding and Wire EDM concerning fatigue strength and surface integrity of machined Ti6Al4V components. ***Procedia Engineering***, 19, 184-189.

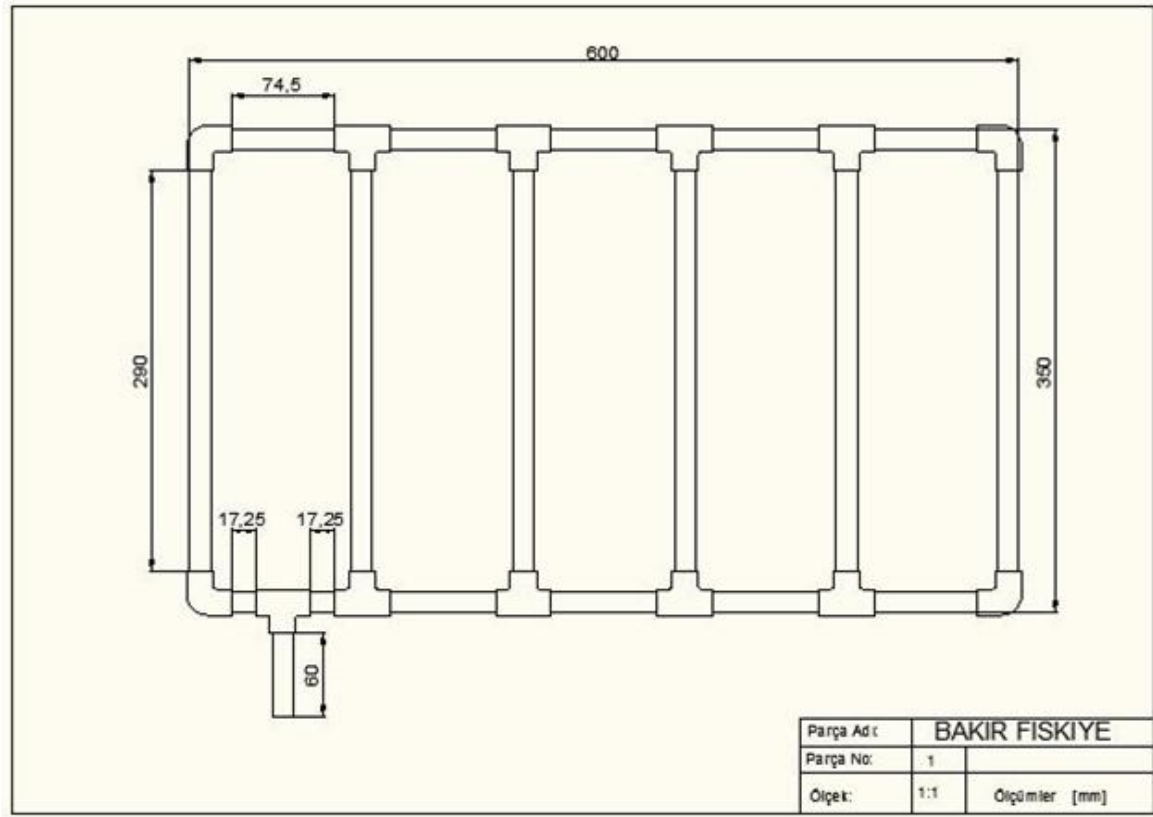


EKLER

EK-2. Dielektrik tankı katı modeli



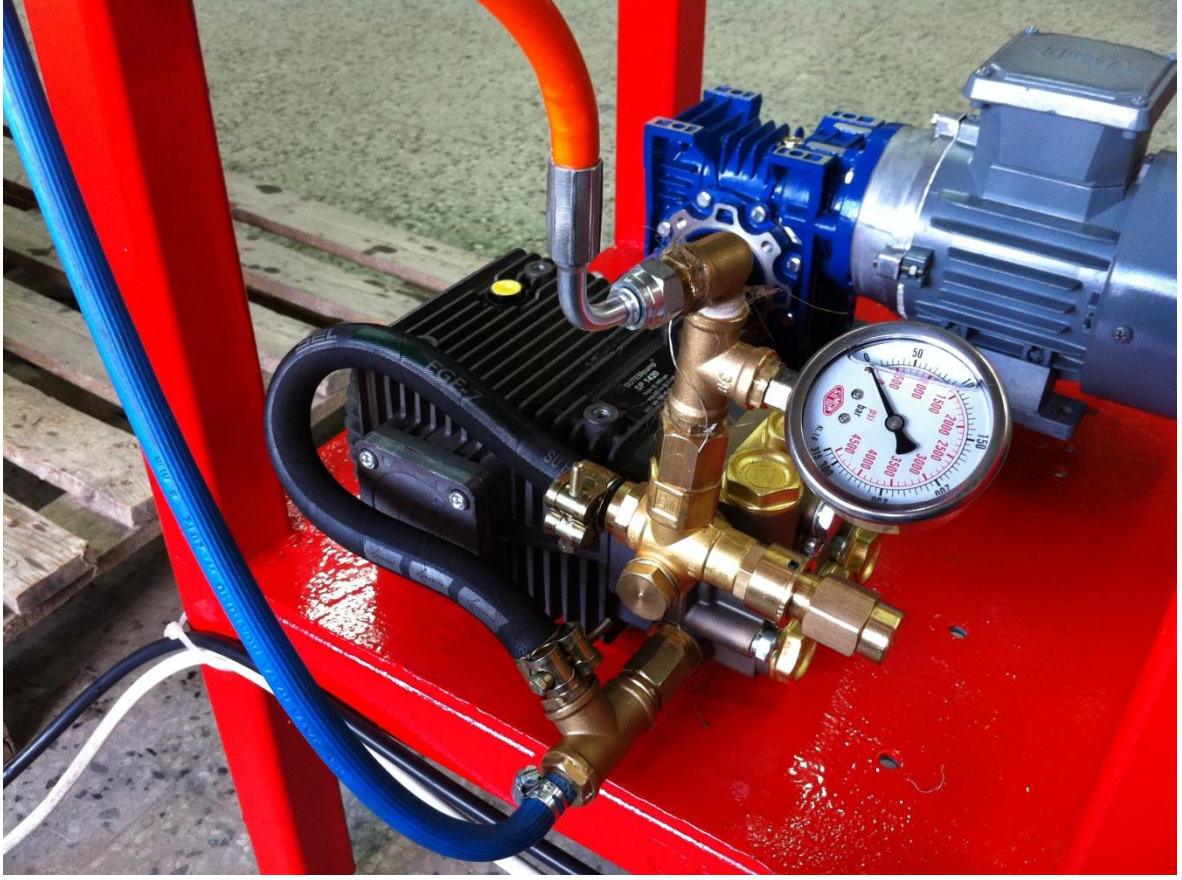
EK-3. DBAS teknik resmi



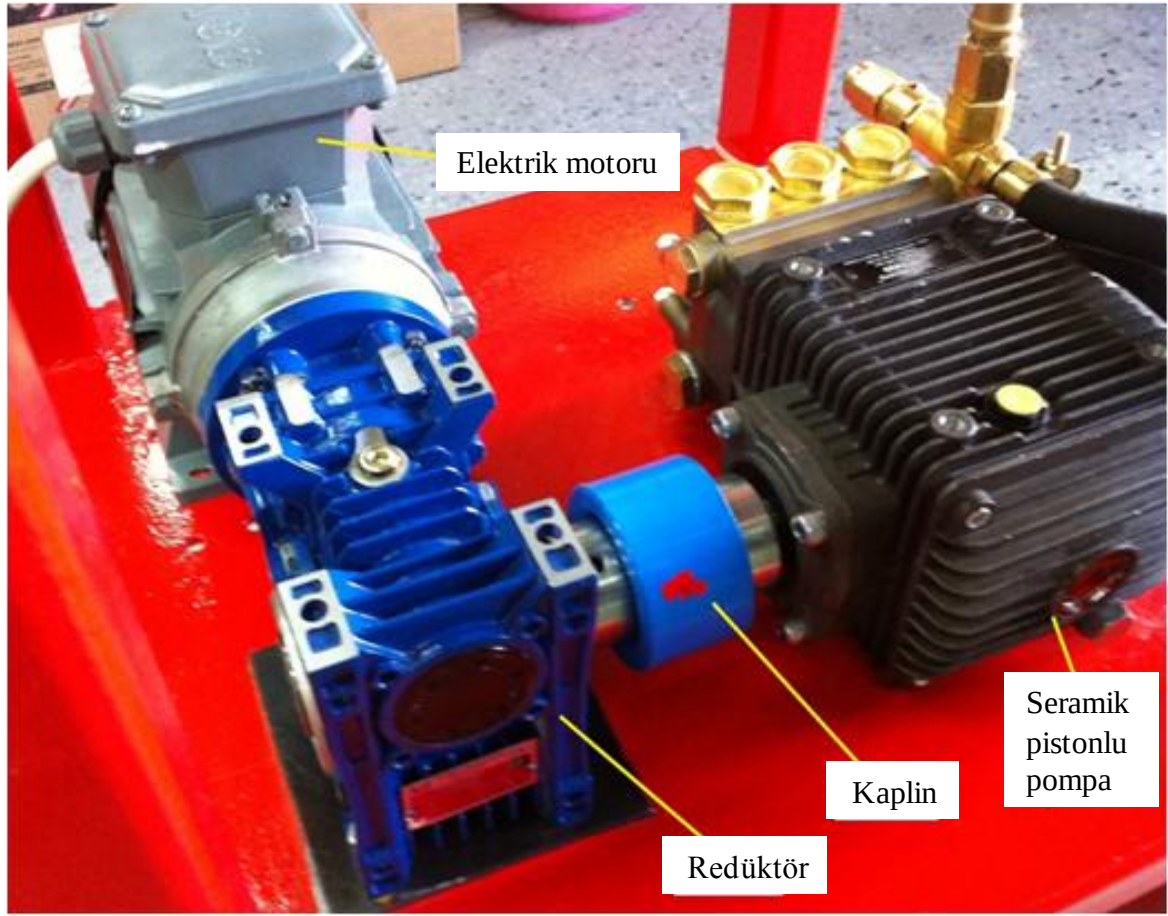
EK-5. Piyano tipi kontrol panosu



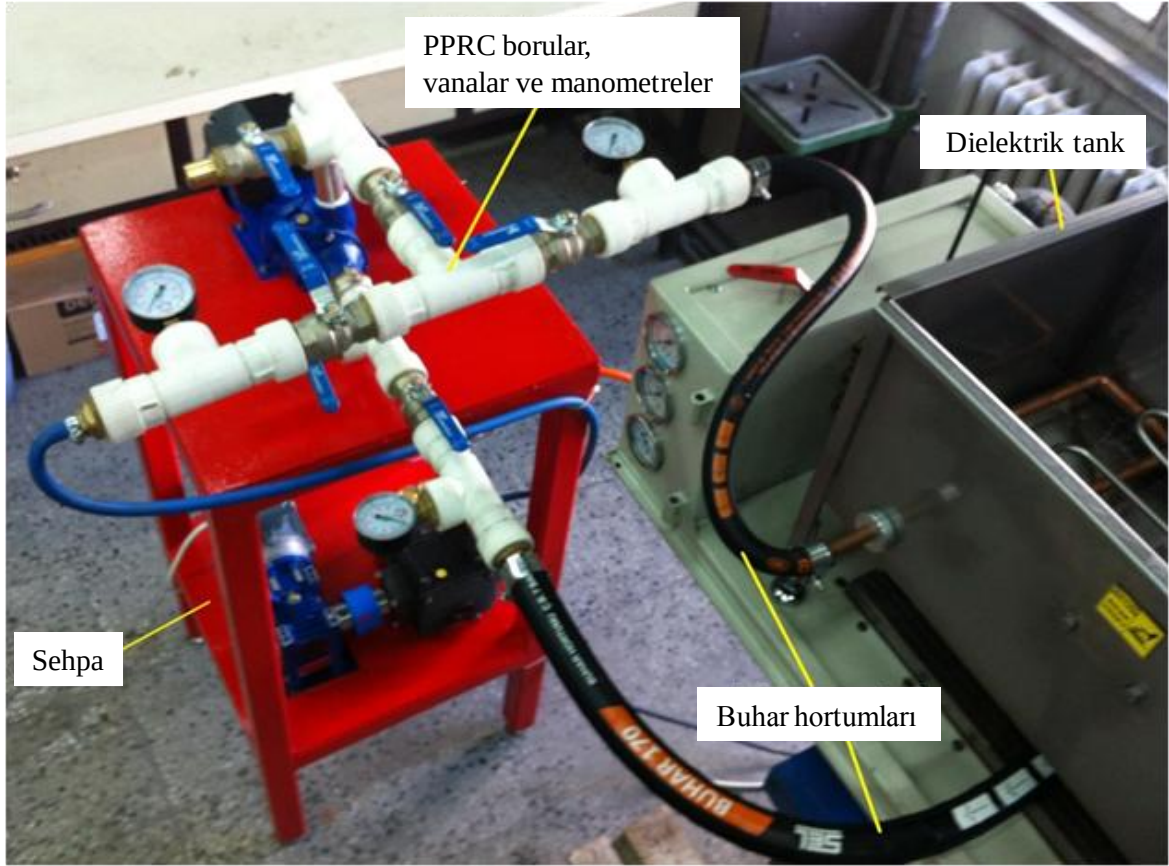
EK-6. Seramik pistonlu pompa ve by-pass sistemi



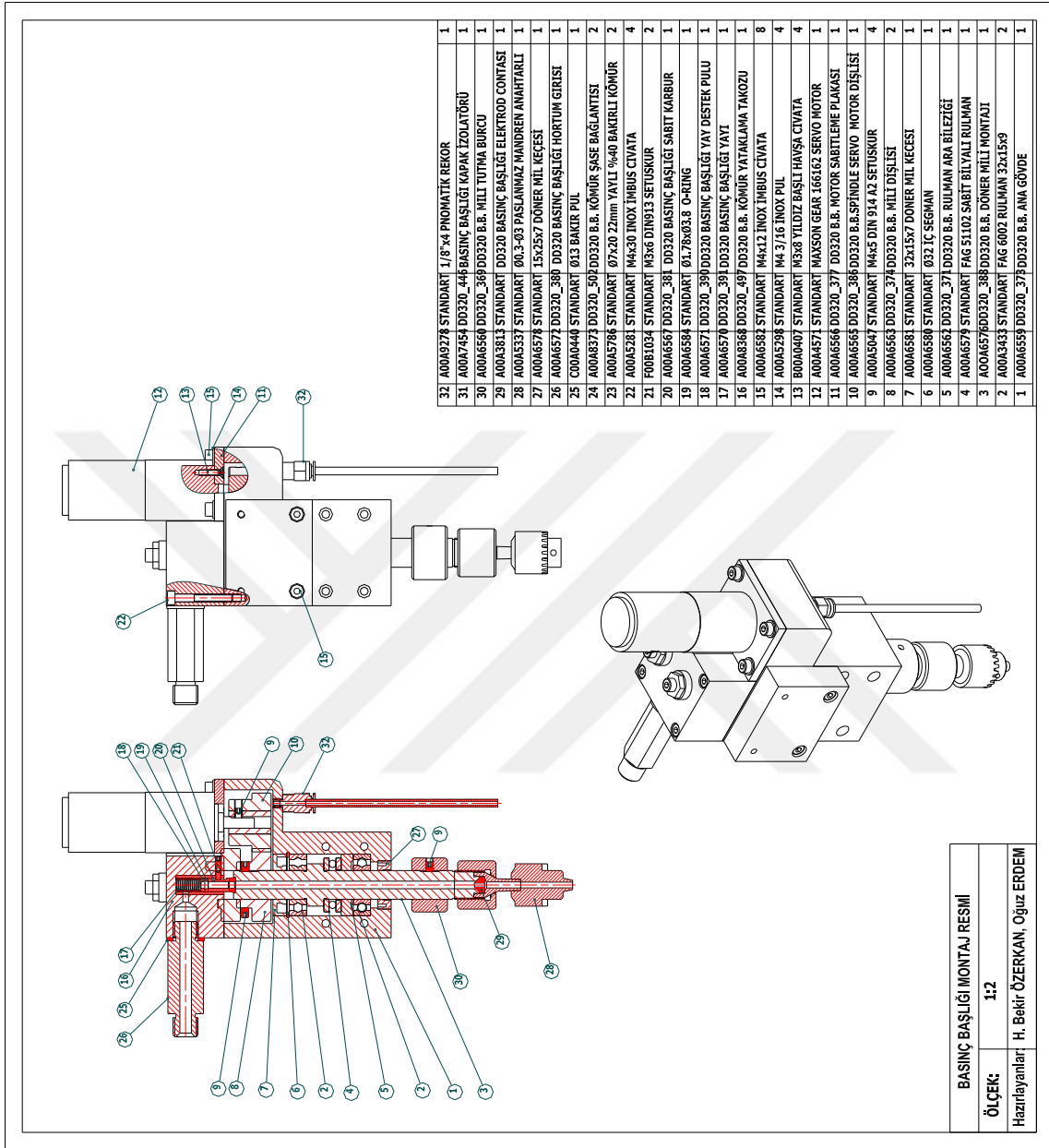
EK-7. Seramik pistonlu pompa ve elektrik motoru bağlantısı



EK-8. Sehpa



EK-9. Basınç başlığı teknik resmi

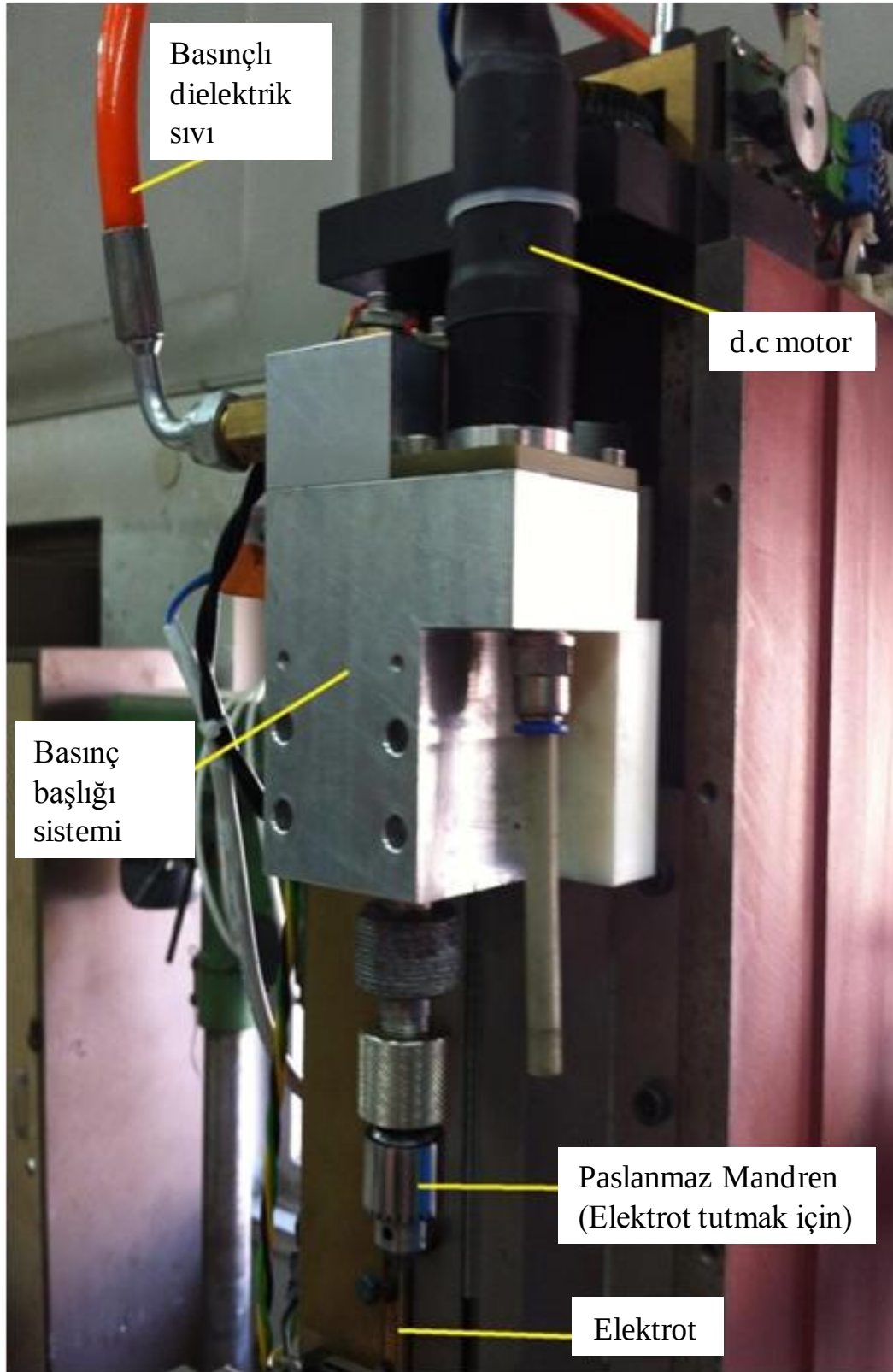


BASINÇ BAŞLIĞI MONTAJ RESMİ

1:2

Hazırlayanlar: H. Bekir ÖZERKAN, Oğuz ERDEM

EK-10. Basınç başlığı



EK-11. Thermo Haake RS600 elektro tork reometre



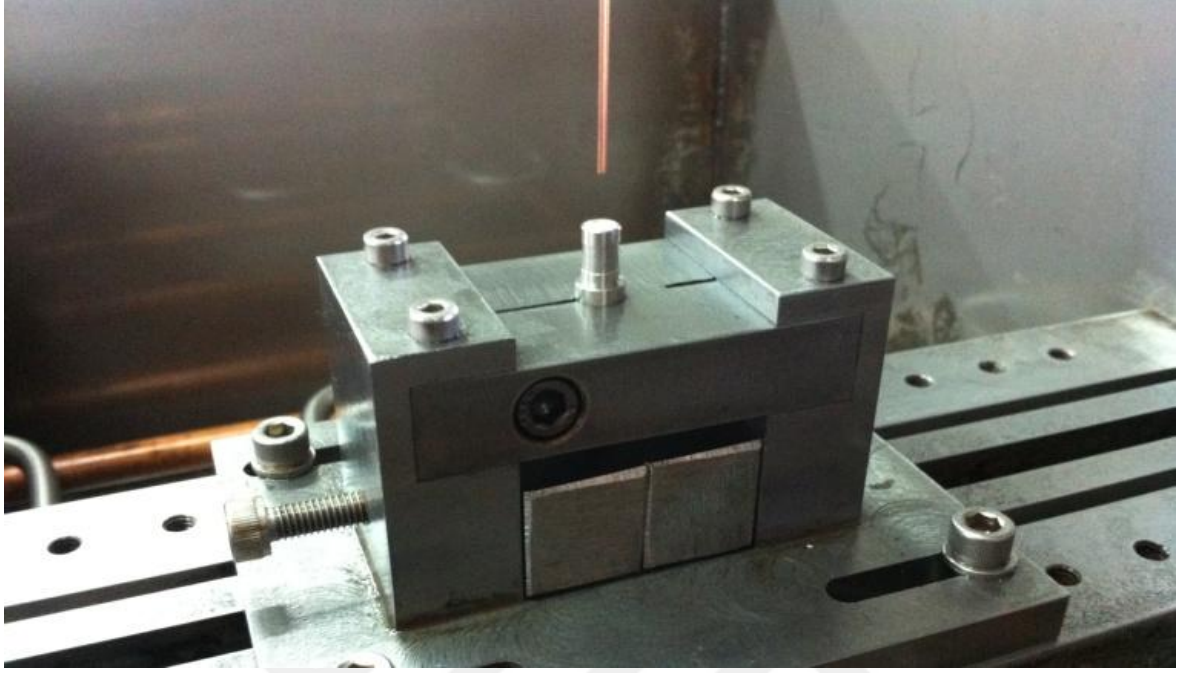
EK-12. Exstar TG/DTA 7300 termal analiz cihazı



EK-13. Surr-corder SE1200 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı



EK-14. Mengeneden söklmeyen işparçası, kılavuz ve elektrot duruşu



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERDEM, Oğuz
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 03.03.1984, Ankara
Medeni hali : Bekâr
Telefon : 0 (312) 354 07 67
Faks : 0 (312) 354 47 85
e-mail : oguzerdem@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Mühendisliği	2010
Lisans	Başkent Üniversitesi/ Makina Mühendisliği	2007
Lise	Dr. Binnaz-Rıdvan Ege Anadolu Lisesi	2002

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2014-Halen	BİDEB	Bursiyer
2012-2014	ARDEB	Bursiyer

Yabancı Dil

İngilizce

Proje-Tezler ve Burslar

- 2211-C Öncelikli Alanlara Yönelik Doktora Teşvik Bursu (11/2014-Halen) Konu: Elektro Erozyon ile İşlemede Döner Elektrot Kullanarak Delik Delmede Dielektrik Sıvısına Karıştırılan Tozların ve Isıtmanın İşleme Performansına Etkisinin Araştırılması ve Multi Fizik Simülasyonu
- Tübitak 1001 Projesi (05/2012-01/2014) Konu: Elektro Erozyonla ile İşlemede Döner Elektrot ile Küçük Çaplı Delik Delmede Dielektrik Sıvısına Karıştırılan Tozların ve Isıtmanın Yüzey Pürüzlülüğüne Etkisinin Deneysel Araştırılması

3. Yüksek Lisans Tezi (09/2008- 10/2010) Konu: Toz Enjeksiyon Kalıplanmış MgO takviyeli Alüminanın mekanik özellikleri, Tez Danışmanı: Doç. Dr. İbrahim USLAN
4. Lisans Bitirme Tezi (09/2006- 06/2007) Konu: Ekstruder Tasarımı ve İmalatı, Tez Danışmanı: Prof. Dr. Ö. Faruk ELALDI

Yayınlar

1. Erdem, O., Coğun, C., Urtekin, L., Özerkan, H. B., Uslan, I. (Basımda). Toz katkılı ve ısıtılmış Dielektriğin Elektro Erozyon ile İşlemede (EEİ) Delik Delme Performansı Üzerine Etkisi. **Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**.
2. Erdem, O., Coğun, C., Urtekin, L., Özerkan, H. B., Uslan, I. (2014). Toz Katkılı Dielektrikle Elektro Erozyon İşleme Performansı. **7. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı**, 186-189
3. Erdem, O., Coğun, C., Uslan, I., Urtekin, L., Özerkan, H. B. (2013). Elektro Erozyon ile İşlemede döner elektrot ile küçük çaplı delik delmede dielektrik sıvısına karıştırılan tozların ve ısıtmanın yüzey pürüzlülüğüne etkisinin deneysel araştırılması. **Makine İmalat Teknolojileri Kongresi**, 212-221.
4. Erdem, O., Uslan, I. (2011). Toz Enjeksiyon Kalıplanmış MgO Takviyeli Alüminanın Mekanik Özelliklerinin Araştırılması. **6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı**, 124-135.



GAZİ GELECEKTİR..