

**ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE STEREOLİTOGRAFI
TEKNİĞİ YARDIMIYLA HIZLI ELEKTROT ÜRETİMİ**

Devrim ANIL

**DOKTORA TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**HAZİRAN 2006
ANKARA**

Devrim ANIL tarafından hazırlanan ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE STEREOLİTOGRAFI YARDIMIYLA HIZLI ELEKTROT ÜRETİMİ adlı bu tezin Doktora tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof. Dr. Bedri TUÇ

Üye : Prof. Dr. Can ÇOĞUN (Danışman)

Üye : Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ

Üye : Prof. Dr. Haluk DARENDELİLER

Üye : Yrd. Doç. Dr. Merve ERDAL

Tarih : 07/06/2006

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

TEZ BİLDİRİMİ

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

Devrim ANIL

ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE STEREOLİTOGRAFI TEKNİĞİ YARDIMIYLA HIZLI ELEKTROT ÜRETİMİ

(Doktora Tezi)

Devrim ANIL

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

Haziran 2006

ÖZET

Elektro erozyon ile işleme (EEİ) elektrotlarının genellikle karmaşık geometrili olması ve aynı elektrotdan birden fazla üretilmesi ihtiyacı üretim aşamasını uzatmakta ve maliyeti artırmaktadır. Bu çalışmada hızlı prototip üretme tekniklerinden stereolitografi (SL) kullanarak elektro erozyon ile işlemede en büyük maliyet unsuru olan elektrotların kısa sürede, ucuz ve hassas olarak üretilerek işleme performanslarının araştırılması hedeflenmiştir. Yapılan çalışmanın deneysel kısmında stereolitografi ile üretilip bakır kaplanan elektrotlarla bakırdan işlenerek üretilen elektrotların performansları karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırmada elektrot aşınması, malzeme işleme hızı, işleme derinliği, işparçası yüzey pürüzlülüğü gibi parametreler göz önüne alınmıştır. Stereolitografi ile üretilip bakır kaplanan elektrotların en temel problemi kaplanan bakırın erozyon sırasında oluşan ısı nedeniyle kalkması ve elektrotların sınırlı işleme derinliklerine ulaşabilmesidir. Her iki tip elektrodun ön yüzünden işleme sırasında alınan sıcaklık ölçümleri, oluşan sıcaklığın stereolitografi elektrodun bozulmasını hızlandırdığını göstermiştir. Bozulmayı geciktirmek için stereolitografi tekniğiyle iç soğutma kanallı elektrotlar üretilmiş ve kanallarda dolaştırılan soğutma sıvısı aracılığı ile işleme sırasında oluşan ısı elektrotdan uzaklaştırılmıştır. Soğutmanın stereolitografi

elektrotların performansını ve ömrünü artırıcı bir etken olduğu görülmüş ve bu etkinin sayısal incelenmesi amacıyla Fluent paket yazılımı kullanılarak hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizleri yapılmıştır.

Bilim Kodu : 914.1.140

Anahtar Kelimeler : Elektro erozyon ile işleme, elektrot, stereolitografi, hızlı prototipleme, işleme hızı, elektrot aşınması, elektrot soğutması, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD)

Sayfa Adedi : 178

Tez Yöneticisi : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

RAPID TOOLING OF EDM ELECTRODES BY USING STEREOLITHOGRAPHY TECHNIQUE

(Ph. D. Thesis)

Devrim ANIL

**GAZI UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

June 2006

ABSTRACT

Since Electrical Discharge Machining (EDM) electrodes had complex geometries and several of them were required for machining, the required time and cost of production of electrical discharge machining electrodes were increased. The purpose of this study was to produce electrical discharge machining electrodes by using stereolithography (SL) rapid prototyping technique with minimum time, cost, high accuracy, and investigate the machining performance of these electrodes. In the experimental part of the study, the performance of solid copper electrodes and stereolithography electrodes were compared by considering parameters such as electrode wear, material removal rate, machining depth, workpiece surface roughness. The main problem of the stereolithographic electrode was peeling of copper electroplating due to heat build up in the electrode that was created during electrical discharge machining. Temperature measurements were taken from the electro erosion face of both solid copper and stereolithography electrodes indicated that the heat build up during machining speed up the failure of stereolithography electrodes. Internal cooling channels formed with stereolithography technique were improved the performance of stereolithography electrodes by dissipating heat with circulating cooling liquid inside. Cooling of

stereolithography electrodes was found to be elongating the life of the stereolithography electrodes and Fluent Computational Fluid Dynamics (CFD) program were used for analyzing numerical aspects of cooling of stereolithography electrodes.

Science Code : 914.1.140

Key Words : Electrical discharge machining, electrode, stereolithography, rapid prototyping, removal rate, electrode wear, electrode cooling, computational fluid dynamics (CFD)

Page Number : 178

Adviser : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

TEŞEKKÜR

Deneylein gerekleştirilmesinde yol gösteren nerileri, tezimin hazırlanmasındaki emeği ve değerli katkılarından dolayı muhterem hocam ve tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Can ÇOĞUN’a teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin yürütme komitesinde ye olma ltfunda bulunan, kıymetli hocalarım Sayın Prof. Dr. Süleyman SARITAş’a ve Sayın Yrd. Doç. Dr. Merve ERDAL’a teşekkür ederim.

Tezimin stereolitografik elektrot üretim aşamasında desteğini esirgemeyen Mekanik Optik Tasarım Müdürlüğü Müdürü Sayın İhsan ÖZSOY’a, ASELSAN A.ř.’ye, aynı müdürlükte görev yapan tüm arkadaşlarım ve mer Emre ORHAN’a teşekkür ederim.

Tezimin stereolitografik elektrotların aktiflenmesi ve bakır kaplanması aşamasında destek olan Sayın Servet ARAL’a ve ARAL Ticaret’in tüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Tezimin bakır kaplanmış stereolitografik elektrotların işlenmesi aşamasında desteğini esirgemeyen Sayın Nail ECEVİT’e, Sayın Serhat EKEN’e ve BİRBEN Savunma Sanayi’nin tüm çalışanlarına teşekkür ederim.

Deneyleir sırasında yardımcı olan Araştırma Görevlisi Sayın Ali ZGEDİK’e, laboratuvar çalışmalarımnda ve deneyleir esnasında bütün itenlikleriyle yardım eden takım tezgahları laboratuvarı sorumlusu Uzman Sayın Kadir YILMAZ’a, jeoloji ve uygulamalı kaya mekaniği laboratuvarı sorumlusu Sayın Aydın GÖKÇE’ye yürekte teşekkür ederim.

Tüm laboratuvar çalışmalarımnda, deneyleirimde, tezimin hazırlanmasında yardım eden, engin sevgilerini, güçlü desteklerini daima hissettiğim sevgili aileme gayret ve emeklerinden dolayı sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	xii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiii
RESİMLERİN LİSTESİ	xix
SİMGELER VE KISALTMALAR	xxi
1. GİRİŞ	1
2. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME (EEİ)	21
2.1. EEİ ile İşleme Tipleri	23
2.2. EEİ ile İşlemenin Fiziksel Prensibi	25
2.3. EEİ ile İşlemenin Temel Parametreleri	27
2.3.1. Elektriksel parametreler	28
2.3.2. Vurum jeneratörü karakteristikleri	30
2.3.3. Dielektrik sıvı parametreleri	32
2.4. EEİ ile İşlemede Performans Karakteristikleri	36
3. HIZLI PROTOTİP VE HIZLI TAKIM ÜRETİMİ	37
3.1. Hızlı Prototip Üretimi (Hızlı Prototipleme)	37
3.1.1. Hızlı prototip teknikleri	40
3.2. Hızlı Takım Üretimi (Hızlı Takımlama)	51
3.2.1. Hızlı takım üretim tekniklerinin sınıflandırılması	52

Sayfa

4. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YAZILIMI FLUENT	59
4.1. Giriş	59
4.2. Programın Yapısı	59
4.3. Programın Yetenekleri	60
4.4. Fluent ile Analize Genel Bakış	62
4.4.1. Problem çözüm adımları	62
5. DENEYSEL ÇALIŞMA	71
5.1. Elektro Erozyon Tezgahı	72
5.2. İşleme Parametreleri	74
5.3. İşparçası	74
5.4. Elektrotlar	77
5.4.1. Stereolitografik elektrotların tasarımı ve üretimi	78
5.4.2. Elektrotların tezgaha bağlanması	90
5.5. Dielektrik Sıvı ve Püskürtme Sistemi	92
5.6. Elektrot Soğutması	92
5.7. Veri Toplama Sistemi	92
5.8. Deneylerin Yapılması	93
5.8.1. Sıcaklık ölçümlerinin alınması	96
5.8.2. Ölçümlerin alınması ve değerlendirilmesi	97
6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA	103
6.1. Deney Sonuçlarının İşparçası İşleme Hızı (İİH) Yönünden İrdelenmesi	103
6.2. Deney Sonuçlarının Elektrot Ön Yüz Aşınması (ΔI_F) Yönünden İrdelenmesi	106

Sayfa

6.3. Deney Sonuçlarının İşparçası Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) Yönünden İrdelenmesi	108
6.4. Deney Sonuçlarının Elektrot Sıcaklıkları Yönünden İrdelenmesi	110
6.5. Elektrot Sıcaklıklarının Elektrot Ön Yüz Aşınmasına (Δl_F) Etkileri.....	125
6.6. Elektrot Bakır Kalınlığının Elektrot Performansına Etkileri.....	126
6.6.1. Elektrot bakır kalınlığının işleme derinliğine etkisi	126
6.6.2. Elektrot bakır kalınlığının işparçası işleme hızına ($\dot{I}H$) etkisi	128
6.6.3. Elektrot bakır kalınlığının elektrot ön yüz aşınmasına (Δl_F) etkisi.....	128
6.6.4. Elektrotların aşınma sonrası bakır kalınlığı	129
6.6.5. Elektrot bakır kalınlığının elektrot sıcaklıklarına etkisi	132
6.7. Fluent Analizleri ile SL Elektrotların Performansının İncelenmesi	135
6.7.1. Fluent analizinin çalışmada kullanılması	135
6.7.2. Deneysel ile Fluent analiz sonuçlarının karşılaştırılması	142
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	148
7.1. Sonuçlar	148
7.2. Öneriler	150
KAYNAKLAR	152
EKLER	157
EK-1 Stereolitografi reçinesi üreticisinin malzeme özellikleri veri sayfası.....	158
EK-2 Elektrotların teknik çizimleri.....	159
EK-3 Bağlama kalıbı teknik çizimleri.....	164
EK-4 Yardımcı malzemelerin teknik çizimleri	167
EK-5 Elimko E-680 veri toplama sistemi broşürü	170
EK-6 Elektrot ve işparçalarının deneyden sonraki görünüşleri	172
EK-7 Elektrot ön yüzü ve dielektrik sıcaklıkları.....	176
ÖZGEÇMİŞ	178

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. İşleme parametrelerinin elektro erozyon performansına etkileri	7
Çizelge 1.2. EEİ üretiminde kullanılan hızlı takımlama teknikleri ve bu teknikler hakkında kısa bilgi	16
Çizelge 3.1. Hızlı prototip teknolojilerinin temel özellikleri	39
Çizelge 3.2. Dolaylı takımlama yöntemleri	54
Çizelge 3.3. Doğrudan takımlama yöntemleri	56
Çizelge 5.1. EDM tezgahı teknik özellikleri	73
Çizelge 5.2. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri	74
Çizelge 5.3. İşparçası malzeme özellikleri	75
Çizelge 5.4. Stereolitografik reçinenin, bakırın ve soğutma sıvısı suyun ısı transferi analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri	77
Çizelge 5.5. SL elektrotların işleme öncesi boyutları ve kaplanan bakır kalınlıkları	95
Çizelge 6.1. Deney sonuçları	104
Çizelge 6.2. SL elektrotların bozulma şekilleri	107
Çizelge 6.3. Soğutmalı SL elektrotlarda epoksinin, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları ile su giriş çıkışı arasındaki sıcaklık farkı	118
Çizelge 6.4. Soğutmalı, soğutmasız SL elektrotların elektrot ön yüz aşınması, sıcaklığı, bakır kaplama kalınlığı ve işleme derinlikleri	126
Çizelge 6.5. SL elektrotların aşınma sonrası bakır kaplama kalınlıkları	130
Çizelge 6.6. Fluent analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırılması	143

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Değişik derinliklerdeki girintilerin ulaşabildikleri EEİ derinliğinin erozyon yüzü bakır kaplama kalınlığı ile ilişkisi	18
Şekil 2.1. EEİ' nin şematik görünüşü	21
Şekil 2.2. EEİ tezgahının ana kısımları.....	22
Şekil 2.3. EEİ ile delme ve oyma yöntemi.....	24
Şekil 2.4. EEİ ile kesme yöntemi	25
Şekil 2.5. EEİ ile taşlama yöntemi	25
Şekil 2.6. EEİ ile işlemenin fiziksel prensibi	26
Şekil 2.7. Plazma kanalı	27
Şekil 2.8. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri	28
Şekil 2.9. RC jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı	30
Şekil 2.10. RC jeneratörünün gerilim ve akım dalga tipi	30
Şekil 2.11. Döner vurum jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı	31
Şekil 2.12. Döner vurum jeneratörünün gerilim ve akım dalga tipi	31
Şekil 2.13. Isopulse jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı	32
Şekil 2.14. Isopulse jeneratörünün gerilim ve akım dalga tipi	32
Şekil 2.15. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri.....	34
Şekil 3.1. Stereolitografi sisteminin şematik görünümü	41
Şekil 3.2. Katmanlı nesne üretim sisteminin şematik görünümü	42
Şekil 3.3. Lazer ile seçici sinterleme sisteminin şematik görünümü	44
Şekil 3.4. Ergiterek yığma ile modelleme sisteminin şematik görünümü	45

Şekil	Sayfa
Şekil 3.5. Solidscape firmasının püskürterek üç boyutlu modelleme sisteminin şematik görünümü	46
Şekil 3.6. MIT üç boyutlu yazıcı sisteminin şematik görünümü	48
Şekil 3.7. Lazerle net şekillendirme sisteminin şematik görünümü	49
Şekil 3.8. Şekilleri yığarak üretme sisteminin şematik görünümü	50
Şekil 3.9. Şekilleri yığarak üretme tekniğinin avantajları	50
Şekil 3.10. Hızlı takım üretimi tekniklerinin sınıflandırılması	52
Şekil 4.1. Fluent paket programının temel yapısı	61
Şekil 4.2. Gambit programından bir görünüş.....	63
Şekil 4.3. Fluent çözücü formülasyonu seçim paneli	65
Şekil 4.4. Fluent türbülans modeli seçim paneli	66
Şekil 4.5. Fluent malzeme veri giriş paneli.....	67
Şekil 4.6. Fluent sınır şartı giriş paneli	68
Şekil 4.7. Fluent sınır şartı giriş panelleri (örnek görünüş).....	68
Şekil 4.8. Fluent sınır şartı giriş panelleri (örnek görünüş).....	69
Şekil 4.9. Fluent çözümü başlat paneli.....	70
Şekil 4.10. Fluent iterasyon paneli.....	70
Şekil 4.11. Fluent kontur grafikler çizme paneli.....	70
Şekil 5.1. İşparçası merkezleme aparatı.....	76
Şekil 5.2. SL elektrotların işleme yüzü görünüşleri.....	78
Şekil 5.3. Soğutma kanallı elektrodun Pro-Engineer modeli.....	79
Şekil 5.4. Soğutma kanalsız elektrodun Pro-Engineer modeli.....	79

Şekil	Sayfa
Şekil 5.5. İki değişik tipte soğutma kanallı elektrodun Pro-Engineer programından alınmış kesitleri	79
Şekil 5.6. Soğutma kanallı elektrodun STL alınmış görünümü	80
Şekil 5.7. Soğutma kanalsız elektrodun STL alınmış görünümü	80
Şekil 5.8. 3D Maestro programından STL dosyası işlenirken bir görünüm	82
Şekil 5.9. Soğutmalı SL elektrotta ısı çiftlerin yerleşimi	84
Şekil 5.10. Bağlama kalıbına elektrotlar ölçüm için bağlanırken kullanılan referans yüzey	87
Şekil 5.11. Elektrot ön yüz aşınması (Δl_F)	98
Şekil 6.1. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların bakır kalınlığına göre işparçası Ra değişimi grafikleri	110
Şekil 6.2. Bir numaralı deneyde bakır elektrotdan (D1) alınan sıcaklık ölçümleri	111
Şekil 6.3. İki numaralı deneyde bakır elektrotdan (D2) alınan sıcaklık ölçümleri	112
Şekil 6.4. Ondokuz numaralı deneyde bakır elektrotdan (D3) alınan sıcaklık ölçümleri	112
Şekil 6.5. Yirmi numaralı deneyde bakır elektrotdan alınan (D4) sıcaklık ölçümleri	113
Şekil 6.6. 3 numaralı deneyde soğutma kanalsız SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri	114
Şekil 6.7. 4 numaralı deneyde soğutma kanalsız SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri	115
Şekil 6.8. 5 numaralı deneyde soğutma kanalsız SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri	115
Şekil 6.9. 6 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri	116

Şekil	Sayfa
Şekil 6.10. 7 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri.....	116
Şekil 6.11. 8 numaralı deneyde soğutmasız, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri	119
Şekil 6.12. 9 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri.....	120
Şekil 6.13. 10 numaralı deneyde soğutmasız, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri	120
Şekil 6.14. 11 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri	121
Şekil 6.15. 15 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri	121
Şekil 6.16. 12 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri	122
Şekil 6.17. 13 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri	122
Şekil 6.18. 14 numaralı deneyde soğutmasız, dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri	123
Şekil 6.19. 16 numaralı deneyde soğutmasız, dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri	123
Şekil 6.20. 17 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri	124
Şekil 6.21. 18 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri	124
Şekil 6.22. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların işleme derinliklerinin bakır kaplama kalınlığına göre değişimi	127

Şekil	Sayfa
Şekil 6.23. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların $\dot{I}H$ değerlerinin bakır kaplama kalınlığına göre değişimi	128
Şekil 6.24. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların ΔI_F 'in bakır kaplama kalınlığına göre değişimi	129
Şekil 6.25. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların aşınma sonrası bakır kaplama kalınlıklarının elektrot bakır kalınlığına göre değişimi	131
Şekil 6.26. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrot ön yüzü ortalama sıcaklıklarının bakır kaplama kalınlığına göre değişimi	132
Şekil 6.27. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrot ön yüzü maksimum sıcaklıklarının bakır kaplama kalınlığına göre değişimi	133
Şekil 6.28. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların epoksi sıcaklıklarının bakır kaplama kalınlığına göre değişimi	135
Şekil 6.29. Soğutma suyu kanallarının geometrisi ve içindeki suyun ağ yapısı (Tip I)	136
Şekil 6.30. Tüm elektrodun geometrisi ve ağ yapısı	137
Şekil 6.31. Fluent ile analizi yapılan alternatif soğutma kanalı geometrileri	139
Şekil 6.32. Dört kenarı soğutma kanallı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (mevcut standart soğutma kanalı konfigürasyonu)	140
Şekil 6.33. Düz geniş soğutma kanalı eklenmiş SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (alternatif 1 soğutma kanalı konfigürasyonu)	140
Şekil 6.34. Çapraz şekilde soğutma kanalı eklenmiş SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (alternatif 2 soğutma kanalı konfigürasyonu)	141
Şekil 6.35. S şeklinde soğutma kanalı eklenmiş SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (alternatif 3 soğutma kanalı konfigürasyonu)	141
Şekil 6.36. Fluent analizi sırasında 11 numaralı elektrodun stereolitografi reçinesi sıcaklığının iterasyon sayısına göre değişimi	142
Şekil 6.37. Fluent analizi sırasında 11 numaralı elektrodun soğutma suyu sıcaklığının iterasyon sayısına göre değişimi	143

Şekil	Sayfa
Şekil 6.38. 11 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı altdan görünüşü	144
Şekil 6.39. 11 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı ortografik görünüşü	144
Şekil 6.40. 12 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı altdan görünüşü	144
Şekil 6.41. 12 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı ortografik görünüşü	145
Şekil 6.42. 15 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı altdan görünüşü	145
Şekil 6.43. 15 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı ortografik görünüşü	145
Şekil 6.44. 18 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı altdan görünüşü	146
Şekil 6.45. 18 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı ortografik görünüşü	146

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. SL elektrotların bozulma biçimleri	10
Resim 1.2. ThermoJet model üzerine elektroliz ile kaplanan ince kabuklu elektrot üretim aşamaları	19
Resim 5.1. Deney düzeneğinin ana parçaları	71
Resim 5.2. 3D Systems SLA5000 stereolitografi tezgahı ve kür fırını (ASELSAN-MGEO)	72
Resim 5.3. Tez çalışmasında kullanılan EEİ tezgahı Furkan EDM M25A	73
Resim 5.4. İşparçaları.....	75
Resim 5.5. Elektro erozyon tezgahı tablasının deney öncesi görünümü.....	76
Resim 5.6. Kürü tamamlanmış SL elektrotlar.....	82
Resim 5.7. İşleme yüzüne bakır tıplar yapıştırılmış soğutma kanallı SL elektrotlar	83
Resim 5.8. Paladyum oksit banyosuna girmeden önce maskelenmiş elektrot.....	85
Resim 5.9. Soğutma kanallı ve kanalsız SL elektrodun bakır kaplama tamamlandıktan sonra görünüşü	86
Resim 5.10. Bağlama kalıbında ölçüme hazırlanan soğutma kanallı SL elektrot	88
Resim 5.11. Elektrotları bağlama kalıbına sabitlemek için kullanılan helikoyıl	89
Resim 5.12. Soğutma kanalsız SL elektrodun işlendikten sonraki görünümü.....	89
Resim 5.13. Elektrot yardımcı malzemeleri.....	91
Resim 5.14. İşlemeye hazır soğutma kanallı SL elektrot.....	91
Resim 5.15. Soğutma ve veri toplama sisteminden bir görünüş.....	93
Resim 5.16. Soğutmalı SL elektrotta ısı çiftlerinin yerleşimi (önden).....	97

Resim	Sayfa
Resim 5.17. Soğutmalı SL elektrotta ısı çiftlerinin yerleşimi (arkadan).....	97
Resim 5.18. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı	101
Resim 5.19. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü için kesilmiş işparçası	101
Resim 6.1. Bir numaralı deney sonrası bakır elektrot (D1) ve işparçası.....	107
Resim 6.2. (a) 5 numaralı, (b) 6 numaralı deney sonrası SL elektrot ve işparçası	108
Resim 6.3. (a) 11 numaralı, (b) 17 numaralı deney sonrası SL elektrot ve işparçası	108

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklama
A, B (mm)	Elektrot eni ve boyu
C_p (J/kp-K)	Özgül ısı sığası
C_t (inç)	Kritik bakır kalınlığı
Comp. (%)	Aralık basıncı
D (mm)	Soğutma kanalı çapı
E	Yüzey pürüzlülüğünü veren vurum jeneratörü ayarı
f_p	Vurum frekansı
Gain (%)	Erozyon tezgahının z eksenli servo motorunun tepki hassasiyeti
K (W/m-K)	Sıcaklık iletim katsayısı
k	Ayarlanan yüzey hassasiyetine bağlı katsayı
M	İşleme modu
i_e (A)	Boşalım akımı
P_e (W)	Boşalım gücü
Rel. With. (mm)	İşleme sırasında elektrodun işparçasından kaldırma mesafesi
t (dakika)	Deney süresi
t_e (μs)	Boşalım süresi
t_d (μs)	Gecikme süresi
t_i (μs)	Vurum süresi
t_o (μs)	Bekleme süresi
t_p (μs)	Vurum çevrim süresi
T_c (inç)	Stereolitografik elektrodun bozulmadan işleme yapabilmesi için gerekli bakır kaplama kalınlığı

Simgeler**Açıklama****T_g (°C)**

Glass Transition Temp. (cam geçiş sıcaklığı)

U (V)

Ortalama çalışma gerilimi

u_e (V)

Boşalım gerilimi

u_i (V)

Açık devre gerilimi

W_d (mm)

İşleme derinliği

W_e (J)

Vurum enerjisi

ρ (kg/m³)

Yoğunluk

Δl_F (μm)

Elektrot ön yüz aşınması

μ (Pa.s)

Kinematik viskozite

Kısaltmalar**Açıklama****BA**

Bağlı Aşınma

CFD

Computational Fluid Dynamics

CNC

Computer Numeric Control

DC

Direct Current (doğru akım)

DLMS

Direct Metal Laser Sintering

DMDS

Direct Metal Deposition System

EDM

Electrical Discharge Machining (elektro erozyon ile işleme)

EEİ

Elektro Erozyon ile İşleme

EAH

Elektrot Aşınma Hızı

FDM

Fused deposition modeling (ergiterek yığma ile model üretimi)

FFF

Form-Fit and Function

HAD

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği

LENS

Laser engineered net shaping (lazerle net şekillendirme)

Kısaltmalar**Açıklama****LOM**

Laminated object manufacturing (katmanlı nesne üretimi)

MGEO

Mikroelektronik GÜDÜM Elektro Optik

MIT

Massachusetts Institute of Technology

MRR

Material Removal Rate (malzeme işleme hızı)

RNG

Renormalization-group (Yeniden normalize edilmiş gruplanmış)

RSP

Rapid Solidification Process (hızlı katılaşma)

SDM

Shape deposition manufacturing (yığma ile şekil verme)

SL

Stereolithography (stereolitografi)

SLA

Stereolithography apparatus

SLS

Selective laser sintering (lazer ile seçici sinterleme)

STL

Stereolithography (stereolitografi)

TWR

Tool Wear Rate (elektrot aşınma hızı)

TEW

Tool End Wear (elektrot uç aşınması)

1. GİRİŞ

Hızlı prototip (rapid prototyping) teknikleri kullanılarak hızlı takım üretimi (rapid tooling) dünyada yaygın olarak kullanılan, tasarımdan üretime geçme döngüsünü hızlandıran önemli bir adımdır. Bu yeni takım üretim tekniği üreticilere önemli kolaylıklar sağlayarak rekabetçi bir şekilde hızlı takım ve ürün üretim imkanları sağlar. Hızlı takımlama tekniği ile hacim kalıpları, enjeksiyon kalıpları ve birçok takım hızlı, hassas ve ekonomik olarak üretilmektedir.

Üretimin maliyet açısından önemli bir bölümünü oluşturması nedeniyle takım üretimi, üretim teknolojilerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Takımın hassasiyeti üretilen parçaların hassasiyetini de belirlemektedir. Takım üretimi, takımı üretilen parçanın tasarımı, takım tasarımı, üretim akışının modellenmesi, prototip üretimi ve üretilen parçaların ölçü doğrulukları ve yüzey kalitelerinin ölçümü gibi birçok adımı içermektedir. Modern takım üretim teknikleri ile üretilen takımlar, üreticilere,

- a) üretim maliyetlerinin ve teslim sürelerinin azalması,
- b) ölçüsel hassasiyetin (doğruluğun) ve kalitenin artması,
- c) deneme amaçlı az miktarlardaki ürünün hızlı bir şekilde üretilmesi,
- d) tasarım değişikliklerinin kolayca uygulanabilmesi

avantajlarını sağlamaktadır. Bu nedenlerden dolayı takım üreticileri kendi müşterileri ile olan iletişimlerini ve çalışanlarının eğitim düzeylerini artırmak, yukarıda bahsedilen hızlı takım üretimi gibi yeni teknolojiler ile beraber yüksek hızlı ve insansız işleme, bilgisayar destekli tasarım - üretim gibi teknolojilere yatırım yapmak zorundadır.

Genel olarak takım üretimi için iki temel metot vardır. Birincisi, dolu malzemeden geleneksel talaşlı imalat veya geleneksel olmayan elektro erozyon, elektro kimyasal, lazer gibi teknikler ile malzeme işleyerek takım üretimidir. İkinci metot, 1980'lerin ortasında bulunan hızlı prototip teknikleri ile takım üretimidir. Hızlı prototip

tekniklerinin ayırt edici özelliği parçanın malzeme işleyerek değil üst üste katmanların eklenmesi ile üretilmesidir. Hızlı prototip tekniklerinde üretimi yapılacak üç boyutlu parça iki boyutlu katmanlara bölünür. Lazer ve sayısal denetim gibi teknolojilerin yardımı ile ince malzeme katmanları üst üste yapıştırılarak üç boyutlu model meydana getirilir. Farklı malzemelerin kullanılması, katmanların farklı metotlarla üretimi ve birbirine yapıştırılması değişik hızlı prototip tekniklerini ortaya çıkarmıştır. Stereolitografi (Stereolithography (SLA)), katmanlı nesne üretimi (Laminated Object Manufacturing (LOM)), lazer ile seçici sinterleme (Selective Laser Sintering (SLS)), eriterek yığma ile model üretimi (Fused deposition modeling (FDM)), malzeme püskürterek üç boyutlu modelleme (Inkjets, Photopolymer Phase Change Inkjets, 3D Printing), lazerle net şekillendirme (Laser Engineered Net Shaping (LENS)) ticari olarak mevcut önemli hızlı prototip tekniklerindendir. Hızlı prototip tekniklerinin kullanılması ürün geliştirme zamanını çok kısaltması yanında ürün kalitesini de artırmıştır. Hızlı prototip teknikleri malzeme, hassasiyet, üretkenlik, parça boyutları, ve üretilen parçaların mekanik özellikleri yönünden halen gelişme süreci içindedir.

Hızlı takım üretimi doğrudan veya dolaylı olarak hızlı prototip tekniklerini kullanarak kalıp, elektro erozyon elektrodu vb. takımların üretilmesidir. Doğrudan hızlı takımlama teknikleri üretilecek takımı stereolitografiyle, metal tozlarına yapıştırıcı püskürterek veya lazer ile sinterleyerek başka hiçbir ikincil işlem kullanmadan üretmek olarak örneklenebilir. Dolaylı hızlı takım üretim tekniklerinde ise genellikle ikincil bir işlem kullanılır. Stereolitografi veya başka hızlı prototip metotları ile üretilen kalıp veya elektro erozyon elektrodu üzerine elektroliz ile bakır, nikel v.b. metallerin kaplanarak takım olarak kullanılması örnek olarak verilebilir.

Günümüz ticari ortamında bir ürünün kısa sürede müşteriye sunulması ve müşteri isteklerine göre değişikliklerin yapılabilmesi önem kazanmıştır. Ürünün hızlı bir şekilde tasarımı için tasarım aşamasında üç boyutlu modelleme programları kullanılmaktadır. Tasarım doğrulaması amacıyla geliştirilen hızlı prototip hazırlama teknikleri, ürünün kısa sürede tasarlanarak doğrulanması için günümüzde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu tekniklerin geliştirilmesinin en önemli sebebi bilgisayar

ortamında üç boyutlu tasarım programlarıyla modellenen parçaların hızlı bir şekilde prototipinin alınarak, gerekli denemelerin ve testlerin bu prototip üzerinde yapılabilmesidir. Prototipin büyüklüğüne ve kullanılan prototip tekniğine göre birkaç saat ile birkaç gün arasında değişen sürelerde üretilen prototipler tasarım doğrulama evresini çok kısaltmıştır. Üretilen prototipler kullanılarak tasarlanan parçanın şekli, eğer bir montajda kullanılacaksa montaj parçaları ile uyumu ve yerine getireceği işlevi kontrol edilebilir (form-fit and function (FFF)). Hızlı prototip teknikleri üretilecek parçanın prototipini oluşturmakta başarılı olduğundan aynı tekniklerin parçaların üretim takımlarının ve kalıplarının yapımında da kullanılabileceği düşünülmüştür. Bu sebeple son yıllarda hızlı prototip tekniklerini kullanarak hızlı takım üretimi üzerine bir çok çalışma yapılmıştır.

Tezin Amacı

Genelde elektro erozyon ile işlemenin (EEİ) performansı malzeme (işparçası) işleme hızı, elektrot aşınması ve işparçası yüzey pürüzlülüğü ile ölçülür. Tezgah ayarları ile bu performans kriterleri arasındaki ilişki bakır elektrotlar için bilinmektedir. Fakat ince bakır ile kaplanmış SL elektrotların işleme karakteristikleri, bakır elektrotlardan çok farklı olduğu için bu bilgiler SL elektrotlar için aynen kullanılamaz. İşleme sırasında oluşan ısı dielektrik sıvıya ve elektrot üzerinden tezgaha aktarılmaktadır. Bakır ile kaplanmış SL elektrotlarda ısının elektrota ve oradan tezgaha aktarılması verimli bir şekilde olmamaktadır. Stereolitografik reçine ısı transferi açısından çok kötü bir iletken olup, ısı bakır kaplamada birikip bakırın daha fazla genişleyerek SL elektrot üzerinden ayrılmasına ve kopmasına neden olmaktadır. Tezgahta bakır elektrotlar için önerilen kaba işleme ayarları kullanıldığında ortaya çıkan sıcaklık çok daha yüksek olduğu için bu bozulma daha çabuk gerçekleşmektedir. SL elektrotların üzerine ince bakır kaplanarak yapılan çalışmalar incelendiğinde [1-7], tüm çalışmaların işleme parametrelerinin elektrot performansına etkisi üzerine yoğunlaştığı görülmüştür. Çok sınırlı sayıda çalışma işleme sırasında oluşan sıcaklıkların elektrot performansına etkilerini incelemiştir [4]. Yapılan deneysel çalışmalarda [1-7] işleme parametrelerinin bazıları sabit tutulup, değiştirilen parametrelerin SL elektrodun performansı üzerindeki etkileri ortaya konulmuştur.

Bu çalışmada elektrotların yapımında gerek zaman gerekse maliyet unsurlarını azaltmak için hızlı prototip üretme tekniklerini kullanılması ve bu teknikler ile üretilen EEİ elektrotlarının performansının incelenmesi amaçlanmıştır. Öncelikle hızlı prototip teknikleri üzerinde bir kaynak taraması yapılarak tekniklerin avantaj ve kısıtlamaları incelenmiştir. Hangi ana tekniğin hangi alt yöntemlerle hızlı EEİ elektrodu üretmekte kullanılabileceği araştırılmıştır. Tezin deneysel aşamalarında kullanılabilecek hızlı prototip tekniklerinden stereolitografi, ergiterek birleştirme ile modelleme ve lazer ile seçici sinterleme literatürden detaylı olarak incelenmiştir. Yapılan literatür araştırmalarından elektrotların hızlı takımlama tekniği ile üretilmesi için stereolitografi tekniğinin daha uygun olduğu görülmüş ve tezin deneysel çalışmaları sırasında prototip üretimi için SLA5000 stereolitografi makinasından faydalanılmıştır. Deneysel çalışmada kullanılan prototip elektrotların hazırlanışı, malzeme özellikleri, kullanılan deney düzeneğinin detayları ve alınan ölçümlerin değerlendirilmesi sunulmuştur. Bu çalışmada yapılan deneylerin ana hedeflerinden biri de bakır elektrotlar ve ince bakır ile kaplanmış SL elektrotların performansının karşılaştırılmasıdır. Bu karşılaştırmalar işleme hızı, elektrot aşınması, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve elektrotlar üzerinde oluşan sıcaklıklar göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Tez çalışmasında, literatürde yer almayan SL elektrotlarda istenilen geometrilerde açılan soğutma kanalları ile yapılan soğutmanın elektrodun performansına olumlu etkisi gözlemlenmiştir. Bu amaçla bakır ve SL elektrotların işleme yüzeylerinin sıcaklığı ve soğutma suyu sıcaklıkları ısı çiftleri ile ölçülmüştür. Deneyler sonucunda elektrotların işleme yüzeylerinden, soğutma suyu giriş ve çıkış noktalarından alınan sıcaklık ölçümlerinin grafikleri ve diğer tüm deneysel sonuçlar sunulmuştur. Daha sonra toplanan deneysel veriler ışığında bilgisayar ortamında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği paket yazılımı FLUENT yardımı ile elektrotların sonlu elemanlar modelleri hazırlanmıştır. FLUENT ve deneylerden elde edilen sıcaklıklar karşılaştırılmış ve daha iyi bir soğutma elde etmek amacıyla soğutma kanalı geometrileri üzerinde değişiklikler yapılmıştır.

Geçmişte konuyla ilgili yapılan çalışmalar

Tez kapsamında yapılan literatür araştırmaları EEİ elektrotlarının stereolitografi tekniği kullanılarak üretimi konusunda çok sayıda kaynak olmadığını göstermiştir. Bulunan kaynaklar daha çok hızlı prototip teknikleri kullanılarak enjeksiyon kalıbı, press kalıbı, vb. takım üretimlerini içermektedir [8-14]. Ayrıca elektrot üretimi için stereolitografi dışında lazerle metal tozlarını sinterleme, ergimiş metalin prototip üzerine püskürtülmesi gibi başka hızlı prototip teknikleri [15-19] ve ikincil işlemler kullanılmaktadır [20-22]. Yapılan literatür taraması sırasında hızlı takımlama [23-26] ve hızlı prototip üretimi teknikleri [27-30] ile ilgili kaynaklar incelenmiştir. Literatürde stereolitografi metodu ile üretilen modellerin bakır, nikel gibi iletken malzemeler ile kaplanarak elektrot olarak kullanılmasına yönelik iki ana teknik ile karşılaşılmıştır. İlk teknik, stereolitografi ile üretilen modelin üzerine 2-3 mm gibi kalın bir bakır veya nikel tabakası kaplandıktan sonra bu kaplanmış tabakanın stereolitografi modelinden çıkartılıp içine bazı dolgu malzemeleri doldurarak elektrot olarak kullanılmasıdır [6-7, 31-35]. İkinci (tezde uygulanan) teknik, stereolitografi ile üretilen modelin üzerine 500-1000 µm gibi daha ince bakır veya nikel kaplandıktan sonra stereolitografi modelinin bu katmanın içinde destek amaçlı olarak bırakılmasıdır [1-7]. Her iki teknikte de stereolitografi ile üretilen epoksi prototiplerin elektroliz metoduyla bakır kaplanabilmesi için elektrik iletken hale getirilmesi gerekmektedir. Bu nedenle iletken olmayan plastik malzemelerin üzerine metalik kaplama yapılması konusunda da araştırma yapılmıştır [36].

Literatürde konu ile ilgili rastlanan az sayıda çalışmaların tümü deneyseldir. Yapılan bu çalışmalarda stereolitografi ile üretilen elektrotlar değişik işleme parametreleri ile denenmiş ve bakır elektrot performansı ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca stereolitografi ile üretilen elektrotların üzerine kaplanan bakır kalınlığı değiştirilerek işleme performansına olan etkileri incelenmiştir. Stereolitografi ile üretilen elektrotların en temel problemi işleme sırasında oluşan ısının elektrot üzerinden atılamaması ve bakır ile stereolitografi reçinesinin farklı genleşmesi sonucu bakır katmanın elektrot üzerinden soyulmasıdır. Elektrot üzerinden sıcaklık ölçümleri alınması ve bu

sıcaklığın neden olduğu bozulma biçimleri ile ilgili yayınlanmış sadece bir çalışma vardır [4].

Arthur, Cobb ve Dickens'ın çalışmasında [1] hızlı prototip tekniklerinden stereolitografinin EEİ elektrotlarının hızlı ve çok sayıda üretimi için potansiyel bir teknik olabileceği tartışılmıştır. Literatürdeki ilk deneysel çalışmalardan olan araştırmada stereolitografi hızlı prototip tekniği ile üretilen elektrotların ilk işleme sonuçları sunulmuştur. Çalışmada EEİ performansı üç parametre ile ilişkilendirilmiştir:

- İşparçası işleme hızı (İİH)
- Elektrot aşınma hızı (EAH)
- İşparçası yüzey pürüzlülüğü (Ra)

Çalışmada bakır ile kaplanmış SL elektrotların davranışlarının işleme sırasında oluşan ısı ile önemli şekilde etkilendiği belirtilmiştir. Çalışmada incelenen elektro erozyon parametreleri; i_e (boşalım akımı), t_i (vurum süresi), t_o (vurum ara süresi), Comp. (aralık basıncı), Gain (erozyon tezgahının z eksenli servo motorunun tepki hassasiyeti), t_p (vurum çevrim süresi) ve Rel. With. (işleme sırasında elektrodun işparçasından kaldırma mesafesi) dir. Bu parametrelerin işleme performansına doğrudan etkileri bilinmemesine rağmen genel etkileri Çizelge 1.1'de özetlenmiştir. Çalışmada kaba işlemede bakır kaplamanın ayrılarak bazı bölgelerde koptuğu görülmüştür. SL5170 stereolitografi epoksisi kullanılarak üretilen elektrotların üzeri bakır kaplanabilmesi için iletken hale getirmek amacıyla 10µm kalınlığında iletken gümüş boya kullanılmıştır. Daha sonra elektrotlar 150-200 µm bakır kaplanmış. Deneylerde kullanılan işparçası malzemesi EN30B 51-52 HRC sertliğindedir.

Tüm deneylerde 4 mm derinliğinde işleme yapılması hedeflenmiş olup kullanılan erozyon tezgahının otomatik kontrol özelliği kapatılmış ve dielektrik püskürtmesi yapılmamıştır. Yapılan 18 set deneyde elektrotlarda erken bozulmalar görülmüş ve elektrotların hiçbirisi hedeflenen derinliğe ulaşamamıştır. Çalışmada, bu tip

elektrotların bitirme (finishing) gibi az malzeme kaldırma gerektiren işlemlerde kullanılabileceği belirtilmiştir. Genel uygulamalarda kullanılabilecek elektrotları elde etmek için bakır kalınlığının 180 μm 'den fazla olması gerektiği vurgulanmıştır. İşleme sırasında oluşan sıcaklığın ölçülmesinin gerekli olduğu, SL elektrot ile üzerine kaplanan bakırın birleşme yüzeylerinden ısı çiftleri ile alınan ölçümlerle sınırlı ölçüde başarı sağlanacağı belirtilmiştir. Bazı noktalarda işlemin durdurularak alınan ölçümlere göre sıcaklığın 62⁰C'ye kadar yükseldiği belirtilmiştir. Yazarlarca elektrot üzerindeki bakır kaplamanın kalınlığı artırıldığında karşılaşılabilecek problemler aşağıdaki gibi özetlenmiştir;

- istenilen ölçülere ulaşılabilmesi için SL elektrodun ölçeğinin veya boyutlarının ayarlanması gerekmektedir.
- elektroliz ile yapılan kaplamalar dış köşelerde daha çok birikme yapmakta ve birikme kaplama kalınlığı arttıkça belirginleşmektedir.

Çizelge 1.1. İşleme parametrelerinin elektro erozyon performansına etkileri [1]

İşleme Parametresi	Birim	Pozitif ayarlama	Negatif ayarlama
i_e	A	Yüksek: İİH, EAH	Düşük: Ra, Temp.
t_i	μs	Yüksek: İİH	Düşük: Ra, Temp. Yüksek: EAH
t_o	μs	Yüksek: EAH Düşük: Ra, Temp.	Yüksek: İİH
Comp.	%	Yüksek: İİH, EAH	Düşük: Ra, Temp.
Gain	%	Yüksek: İİH, EAH	Düşük: Ra, Temp.
t_p	μs	Yüksek: İİH	Düşük: Ra, Temp. Yüksek: EAH
Rel. With.	mm	Yüksek: EAH Düşük: Ra, Temp.	Yüksek: İİH

Temp.: Elektrot ön yüz sıcaklığı

Arthur, Cobb, Dickens'ın takibeden çalışması [2] sonucunda 180 μm 'den az bakır kaplanmış elektrotların önemli bir miktar malzeme işlemeden aşındığı ve erken bozuldukları görülmüştür. Deneylerinde 15x15 mm düz kare şeklinde üretilen elektrotlar ile 4 mm sertleştirilmiş takım çeliğini işlemek hedeflenmiştir. İlk

çalışmada en başarılı sonuç veren parametre setine göre hazırlanan ikinci deney setinde erozyon tezgahının kendini ayarlayan kontrol ünitesi ve kesikli püskürtme kullanılmıştır. Böylece elektrotların %40'ı 4 mm takım çeliğini bozulmadan işleyebilmiştir. Üçüncü deney setinde, ikinci deney setindeki boşalım akımı (i_e) ve vurum süresi (t_i) maksimum değerlerinde sabit olarak alınmıştır. Üçüncü deney setindeki tüm elektrotlar başarılı olmuştur. Dördüncü deney setinde, üçüncü deney setinde maksimum değerlerinde sabitlenen i_e ve t_i parametrelerine ek olarak t_o ve kazanç parametreleri de sabitlenmiştir. Dördüncü deney setinde de üçüncü deney setindeki aynı işparçası işleme hızı ile tüm elektrotlar başarılı olmuştur.

Arthur ve Dickens'ın diğer bir çalışmasında [3] enjeksiyon kalıplarının işlenmesi için kullanılabilecek elektrotların hızlı prototip modelleri kullanılarak üretilmesi incelenmiştir. İİH ve elektrot aşınması arasındaki ilişki araştırılmıştır. Çalışmada SL elektrotlar 15x15x5 mm ölçülerinde SL5170 epoksisinden üretilmiştir. Toplam 150 elektrot üretilmiş olup tüm elektrotların ön (işleme) yüzü düz ve eşit kalınlıkta (5 mm) olabilmesi için işlenmiştir. SL elektrotları iletken hale getirmek için 10 μ m kalınlığında iletken gümüş boya uygulanmıştır. Daha sonra 150 elektrota birden 6 saat elektroliz ile 180 μ m kalınlığında bakır kaplanmıştır. Deneysel çalışmada sentetik gaz dielektrik kullanılmıştır. Erken elektrot bozulmalarını önlemek için kontrol sistemi ve püskürtme kullanılarak deney setleri oluşturulmuştur. Çalışmada elektrot üzerine uygulanan bakır kalınlığının işleme performansına etkisi incelenmiştir. Bu inceleme yapılırken daha önceki deney setlerinden elde edilen uygun tezgah ayarları ile 100 μ m ile 300 μ m arasında bakır kaplanan elektrotların işparçası işleme hızları ölçülmüştür. Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlara göre 150 μ m'den az kaplamalı elektrotlar çok kısa sürede bozulmuştur. 175 ile 250 μ m arası bakır kaplanmış elektrotlar malzeme kaldırma hızı açısından önemli bir farklılık göstermemiştir. Bu elektrotlar için tipik malzeme kaldırma hızı 3.85 mm³/dak'dır. Aynı işleme parametreleri ile bakır elektrotların malzeme kaldırma hızı 4.40 mm³/dak'dır. Kaplanan bakır katmanın kalınlığı arttıkça SL elektrotların bakır elektrotların ulaştığı performansa yaklaştığı görülmüştür. Çalışmada stereolitografi ile üretilmiş elektrotların işleme sırasında oluşan sıcaklıkları dağıtma kapasitesinin

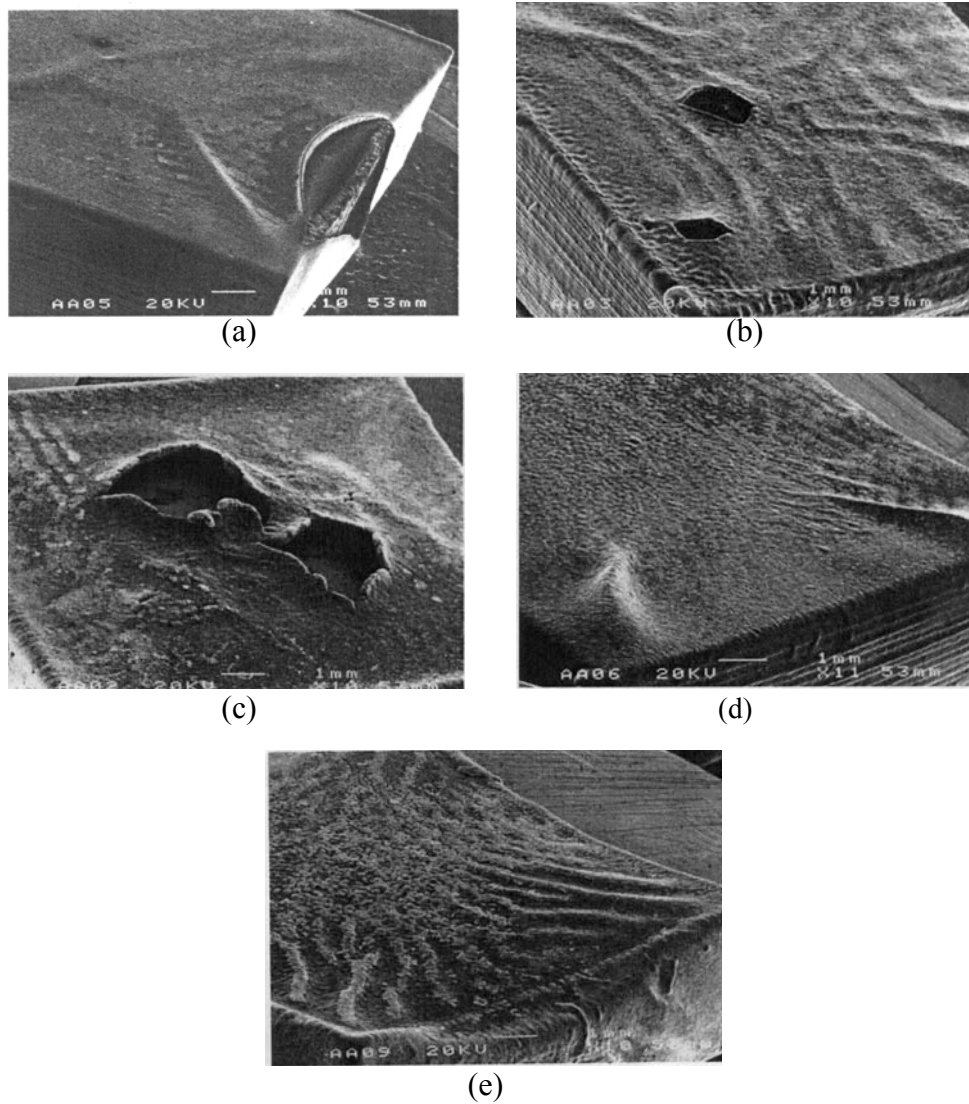
bakır kaplama kalınlığı ile ilişkili olduğu belirtilmiştir. Bakır tabakasının kalınlığı arttıkça emilen enerjinin arttığı görölmektedir. Yazarlar bakır kaplamanın epoksiden ayrılmasını şu şekilde açıklamaktadırlar: Bakır ile kaplanmış SL elektrotlarda ısının yetersiz transferi, bakır ile stereolitografi reçinesinin genleşme katsayılarının farkı nedeniyle genleşme miktarlarındaki değışim birleşme yüzeyinde kesme gerilmeleri meydana getirmektedir. Bu kesme gerilmesi bakır ile stereolitografi reçinesinin ayrılması ve buna bağılı olarak bakır katmanının ve reçinenin deforme olmasına neden olmaktadır. Reçineden ayrılan bakır katman incelererek veya yırtılarak elektrodun bozulmasına sebep olmaktadır. Çalışmada SL elektrotların çalışma sıcaklıklarının tespit edilmesi için gerçek zamanlı sıcaklık ölçümlerinin alınarak çalışmaların sürdürölmesi gerektiğı vurgulanmıştır.

Arthur, ve Dickens'ın başka bir çalışmasında [4] işleme performansını yükseltmek için elektrot üzerinde oluşan sıcaklığın transferi ve neden olduğu bozulma biçimleri incelenmiştir. Çalışmada bakır kaplama kalınlığının işleme ve malzeme kaldırma performansına etkisini görmek için 100-300 µm arasında kaplanmış elektrotlar ile deneyler yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri stereolitografi reçinesi ile bakır kabuğun birleştiğı noktadan kalkanlı ısı çiftleri ile alınmıştır. Birleşme yüzeyinde bitirme ve kaba işlemler için ölçülen sıcaklıklar 65°C ve 90°C'dir. Tek noktadan sabit basınçla püskürtölün dielektriğin sıcaklığı 20°C ile 50°C arasında değışmektedir. Gözlemlenen maksimum sıcaklık bitirme operasyonunda 100°C'dir. Çalışmada elektrotların bozulma biçimleri

- a) Kenar bozulması (edge failure),
- b) küçük noktasal kalkmalar (peppering),
- c) bakırın reçineden soyulması (delamination),
- d) kopma (rapture),
- e) çarpılma (distortion)

şeklinde sınıflandırılmıştır (Resim 1.1).

SL elektrotların kullanılamaz duruma gelmesi aşınarak tükenmesi veya ölçüsel hassasiyetini kaybetmesi ile olmamaktadır. SL elektrodun bozulmasına elektrot ön yüz aşınmasının etkisi olduğu kadar işleme sırasında oluşan ısının atılamaması nedeniyle bakır kaplamanın tamamen aşınmadan elektrot üzerinden soyulması ve kopmasının da etkisi vardır. Elektrotların bozulma biçimleri literatürde [4] beş ana kategoride sınıflandırılmıştır. Tez çalışmasında da benzer bozulma biçimleri ile karşılaşıldığından bu sınıflandırma kullanılmıştır (Resim 1.1).



Resim 1.1. SL elektrotların bozulma biçimleri, a) kenar bozulması, b) küçük noktasal kalkmalar, c) kopma, d) bakırın reçineden soyulması, (e) çarpılma [4]

Leu, Yang, Yao'nun deneysel çalışmasında [5] bakır kaplanmış SL elektrot üzerinde oluşan kraterlerin derinliği kaplanan bakır tabakasının kalınlığından az olduğu sürece elektrotların kaba ve bitirme işlemlerinde bakır elektrotlar gibi kullanılabilceği belirtilmiştir. Bakır kaplanmış ve bakır elektrotların performans tabloları oluşturularak karşılaştırılmıştır. İşleme sırasında oluşan kraterlerin derinliği kritik bakır kaplama kalınlığı olarak isimlendirilmiştir.

Deneylerde SL5170 reçinesinden 19.05x19.05x101.6 mm ölçülerinde dikdörtgenler prizması şeklinde elektrotlar kullanılmıştır. Bu elektrotlar önce elektriksiz (electroless) nikel kaplanarak iletken hale getirilip daha sonra 500 µm bakır kaplanmıştır. Elektro erozyon performansını ölçmek amacıyla, İİH, EAH, elektrot ön yüz aşınması (Δl_F) ve işparçası yüzey pürüzlülüğü (R_a) kullanılmıştır.

Deneylerden elde edilen sonuçlara göre SL elektrotlar ile bakır elektrotların kaba işlemlerde dahi performansları yaklaşık aynıdır. Fakat kaplanan bakırın reçinenin yanmasını engelleyecek kalınlıkta olması gereklidir. Yarı kaba ve kaba işlemlerde SL elektrotlar çalışmaktadır. Fakat yarı kaba ve kaba işlemede elektrot aşınması fazla olduğundan 30-40 dakika sonra bakır tabakası aşınarak reçine yanmaya başlamaktadır. Bitirme operasyonlarında 10 dakika içinde elektrodun ön yüz aşınması çok düşük olduğundan bakır kaplamada önemli bir bozulma görülmemiştir. Deney sonuçlarına göre kaplanan bakır kalınlığının minimum kalınlığı kaba işleme için minimum 0.28 mm olmalıdır. Kritik bakır kalınlığı yarı kaba ve bitirme işlemleri için 0.15 ve 0.1 mm olarak bulunmuştur. SL elektrotlar üzerine kaplanan bakır kaplamanın kalınlığı (T_c) ile işparçası işleme derinliği (W_d) arasında aşağıdaki deneysel ilişki bulunmuştur.

$$T_c = kW_d + C_t \quad (1.1)$$

Burada; k ayarlanan yüzey hassasiyetine bağlı katsayı (yarı kaba işleme ayarına göre k katsayısı 0.04 ile 0.06 arasındadır) ve C_t kritik bakır kalınlığıdır.

Bu kalınlık işleme sırasında oluşacak krater derinliğinden büyük olmalıdır. Yarı kaba işleme için 0.006 inç ile 0.008 inç arasındadır.

Yarlagadda, Christodoulou ve Subramanian çalışmasında [31] SL elektrot üzerine kaplanan 2-3 mm bakır tabakasının daha sonra silikondan ayrılıp, çinko ile desteklenerek (ergitilip bakır kabuk içine dökülerek) elektrot olarak kullanılmasını incelemiştir. Çalışmada elektrodun arkasında tam olarak doldurulmamış kısımlarda çarpılmalar oluşmuştur. Bakır kabuğun doldurulması elektrodun dayanımı artırmıştır. Böylece daha derin işlemler mümkün olmuştur. Daha kalın bakır kabuk oluşturma yerine çinko ile doldurma çok kısa sürede yapılabilmektedir. Çinko ile doldurulmuş 0.6 mm kalınlığındaki bakır kaplamalı elektrot 12 mm derinliğe kadar işlemiştir.

Bocking, Rennie ve Bennett çalışmasında [32] 1 mm kalınlığında bakır elektroform'ların işleme performansları incelemiştir. Deneysel çalışmadaki tüm elektroform'ların x-y düzlemindeki boyutları aynıdır. Sadece boşluk derinlikleri için iki ayrı seri 15 mm ve 7 mm olarak elektrot üretilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılacak altı adet modelin üretimi ThermoJet tekniği ile 3 saat sürmüştür. Fakat üretilen modellerin hassasiyeti stereolitografi tekniği kullanan SLA 250/50 makinalarınınkinden iyi değildir. Üretilen modelin dış kısımları poliüretan malzeme ile maskelendikten sonra mum modelin işleme yüzeyine gümüş karışımı boya püskürtülmüştür. Üretilen elektrottaki çukur kısımlar daha az, çıkıntı kısımlar ise daha fazla bakır kaplanmaktadır. Çukur kısımların ince bakır kaplanmasının nedeni elektrik akım alanının bu bölgelerde zayıflamasıdır. İşleme sırasında en büyük aşınma kenar ve köşelerde olduğu için bozulmaların birinci nedeni bu zayıf kısımlardır. Elektroliz ile kabuk oluşturulduktan sonra ThermoJet mumu ergitilerek bakır kabuk içinden çıkarılır. Bu kabuk tek başına elektrot olarak kullanıldığında erken bozulduğu görülmüştür. Bu problem bakır kabuğun ergime noktası düşük bir malzeme, örneğin kalay-bizmut (ergime sıcaklığı 137⁰C) ile desteklenmesi (doldurulması) ile çözülmüştür. Elektrotlar her 15 dakikada bir kontrol edilerek köşe veya kenarlardaki bozulmalar kaydedilmiştir. Elektrot plakalarının üzerlerinde bulunan üç prizma şeklindeki elektrodun kenar veya köşelerinde başlayan bozulma işleme yüzündeki bakır kabuğun kıvrılarak iç kısımdaki düşük erime noktalı

malzemenin ortaya çıkmasıyla ilerlemekte ve ortaya çıkan bu malzeme işlemeye devam edildikçe hızlı bir şekilde ergiyip buharlaşmaktadır. Çalışmada 6 mm takım çeliğini işleyebilmek için minimum 0.6 mm kalınlığında bakır kabuğun olması gerektiği deneysel olarak bulunmuştur. Yazarlar daha derin boşlukların birden fazla elektroform elektrot ile işlenebileceği sonucuna varmıştır.

Bocking, Rennie ve Bennett'in çalışmasında [33] toplam stereolitografi tekniği ile 8 model üretilmiş olup üzerlerine sırasıyla 0.7, 3, 0.4, 0.5, 1.0, 1.0, 1.0, 1.0 mm kalınlığında bakır kaplanmıştır. İlk denemelerde kaplanan kabuk desteklenmeden işlemede kullanılmış, kabuklar köşe ve kenarlardaki zayıflıklar nedeniyle erken bozulmuştur. Bu nedenle çalışmada iki değişik destekleme maddesi kullanılmıştır. İlk destekleyici malzeme PU369 poliüretanı (fillitre kumu ile 4:1 oranında karıştırılarak vakum altında dökülmüş) ve diğer destekleyici kalay-bismut alaşımı (Fusible 17, ergime sıcaklığı 138 °C) dır. Elektrotlar 12 A ve 6 A akım kullanılarak kaba ve bitirme operasyonlarında denenmiştir. Deneyler sonucunda tüm bozulmaların kenar veya köşelerden başlayarak daha sonra işleme yüzeyinin kıvrılmasıyla oluştuğu görülmüştür. Ayrıca dilimlenen elektrotlar incelendiğinde bakır kabuğun en zayıf bölgelerinin oyuk kısımların kenarları ve köşeleri olduğu tespit edilmiştir. Bu bölgeler en az bakır kaplama almakla beraber işleme sırasında en çok aşınan bölgelerdir. Bu sebeple bozulmanın ilk buralardan başladığı tespit edilmiştir. Uygulanan destek malzemesi bu kısımları güçlendirerek işleme yüzünün kıvrılmasını kısmen önlemiştir. Yapılan bu çalışma sonucunda kaba ve bitirme operasyonları için ardaşık kullanılan elektroformların daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Bocking, Rennie ve Bennett'in diğer çalışmasında [34] ince bakır elektroformlar (≤ 1.5 mm) üretimleri esnasında kullanılan hızlı prototip modelden ayrılarak, arkaları ergime sıcaklığı düşük malzemeler ile desteklendikten sonra elektrot olarak kullanılmaktadır. Çalışmada ergime sıcaklığı düşük olan destekleyici malzeme bakır kabuğun arkasına dökülmeden önce uygun bir aktifleyici (hızlandırıcı) sıvı ile kabuk kaplanmakta, böylece destekleyici malzeme kabuğun her yerini ıslatarak kabuk ile daha iyi mekanik bağ oluşturmaktadır. Çalışmanın bakır kaplama aşamasında

15 veya 20 mA/cm² akım yoğunluğu kullanılmıştır. Bu çalışmada elektroliz metodu ile bakır kaplanacak modellerin üretimi için iki değişik hızlı prototip tekniği kullanılmıştır. Bunlardan ilki stereolitografi tekniğidir. Stereolitografi tekniği ile 8 adet elektrot üretilmiş ve değişik kalınlıkta bakır kaplanarak daha sonra iki değişik tipde malzeme ile arkalarından desteklenip denenmiştir. İkinci hızlı prototip tekniği olarak Thermojet tekniği kullanılmıştır. Thermojet tekniğinin avantajı stereolitografiye göre daha hızlı üretimidir. Deneylerde kullanılacak 6 adet numune toplam 3 saatte üretilmiştir. Elektrolit sıvının değişik noktalara püskürtülmesi, anot ile katot polaritelerinin periyodik olarak değiştirilmesi ve uygulanan elektrolit akımına pulslar verilmesi gibi hususların yüksek elektroliz akım yoğunluklarında bakır kalınlığının homojen olmasına olumlu etki sağlayabileceği öne sürülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda elektrotların çoğunluğu kenar veya köşelerden bozulduğu görülmüş, bir elektrodun köşe kısımlarının bozulmadan yaklaşık ne kadar işparçası malzemesi işleyebileceği ortaya çıkmıştır. Çalışmada kaba ve bitirme operasyonları için arka arkaya kullanılan elektroform'ların daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir.

Dover, Rennie ve Bennett [20] yüksek hızlı seçici elektrolit jeti ile bakırın elektroliz ile biriktirilip enjeksiyon kalıpları ve EEİ elektrotlarının üretiminde kullanılmasını incelemiştir. Bakır kaplaması jetin çarptığı yerde ve hemen çevresinde oluşmaktadır. Sürekli temin edilen taze elektrolit ve hidrodinamik durumdan dolayı oluşan difüzyon tabakası incedir. Buna bağlı olarak metal iyonların kütle transferi geleneksel metotlara göre çok yüksektir. Böylece geleneksel metotdan daha yüksek akım yoğunlukları kullanılarak daha hızlı ve kalın bakır kaplamak mümkündür. Yapılan çalışmada sülfürik asit ve bakır sülfat çözeltisi birleştirilerek kullanılmıştır. Püskürtme kafasını istenilen noktaya taşımak için Roland DXY885 model bir çizici (plotter) kullanılmıştır. Yazılan Qbasic programı ile çizici bilgisayar ile kontrol edilerek istenilen profil çizilmiş ve çizicinin kalem aşağı/yukarı kontrolü püskürtme kafasına uygulanan akımı açıp kapamak için kullanılmıştır. Tüm deneylerde kullanılan elektrolit püskürtme kafasının çapı 820±20 µm'dır. Kafa taban olarak kullanılan bakır plakadan veya bakır baskı devre kartından 1 ile 3 mm arası uzaklıkta tutularak işlem yapılmaktadır. Elektrot deneyleri için yapılan deney elemanları bakır

blok, diğer deneyler için yapılanlar bakır baskı devre kartları üzerine üretilmiştir. Bakır blok üzerine 40 katman kullanarak düğme geometrisi çizilmiş ve bu parça daha sonra elektrot olarak işparçasının işlenmesinde kullanılmıştır. Yüksek hızlı seçici elektrolit jeti ve bakırdan işlenerek yapılan elektrotların her ikisi 5 A işleme akımı kullanılarak çeliğe 1 mm dalmıştır. Yüksek hızlı seçici elektrolit jeti ile üretilen elektrotun özellikle dış kenarlarında aşınma görülmüştür. Bakırdan işlenen elektrot yüksek hızlı seçici elektrolit jeti ile üretilen elektrotla göre daha çok aşınmakla beraber şeklini korumuş, yüksek hızlı seçici elektrolit jeti ile üretilen elektrot dış kenarlarından fazlaca aşınarak geometrisini kaybetmiştir. İşleme denemelerinden elde edilen sonuçlar yüksek hızlı seçici elektrolit jeti ile üretilen elektrotların alışılmış elektrotlara göre daha az aşınmakta olduğunu göstermiştir. Elektrot üretimi denemelerinden alınan sonuçlar 0.5 mm'den daha yüksek elektrotların aktif akım kontrol sistemi veya seviyeleme sistemi olmadan yüksek hızlı seçici elektrolit jeti metodu ile üretilmeyeceğini ortaya koymuştur.

Hızlı prototip tekniklerinin parçayı katman katman oluşturmalarının sağladığı karmaşık geometrileri üretme avantajı çok önemlidir. Hızlı prototip teknikleri ile elektrotlara dielektrik sıvı ile soğutma kanalları veya karmaşık şekilli dielektrik püskürtme delikleri açılabilir, istenilen noktaya ve katmana istenilen malzeme serilerek kompozit elektrotlar üretilebilir. Bu avantajlar bilinen hiçbir alışılmış üretim tekniğinde mevcut değildir. Hızlı prototip teknikleri ile üretilen elektrotlar birçok avantaja sahip olmakla beraber henüz standart tekniklerle üretilen bakır elektrotların yerini alamamıştır. Halen pekçok firma yıllardır bilinen teknikler ile ürettikleri bakır elektrotlar ile işleme yapmaktadır. Çizelge 1.2'de elektrot üretiminde kullanılan hızlı takımlama teknikleri ile ilgili kısa bilgiler sunulmuştur [6].

Çizelge 1.2'den görüldüğü üzere birçok firma elektrot üretememiş veya çalışmaya katılmamıştır. EEİ ile test edilebilecek elektrodu kabul edilebilir fiyat ve zamanda stereolitografi model üzerine elektroliz ile bakır kaplayan teknik sağlayabilmiştir. Çizelge incelendiğinde hızlı takımlama tekniklerinin EEİ elektrotlarını ticari olarak henüz üretmeye hazır olmadığı görülmektedir.

Çizelge 1.2. EEİ elektrodu üretiminde kullanılan hızlı takımlama teknikleri ve bu teknikler hakkında kısa bilgi [6]

Metot / Firma	Hızlı takımlama tekniğinin kısa tanımlaması	Ticari / Araştırma	Üretilen elektrodun elektro erozyon testine girip giremediği	Elektro erozyon testine girememesinin nedenleri
Bakır döküm (mum yöntemi)	Hassas döküm yapmak için hızlı prototip modelini kullanmak	Ticari	Hayır	Döküm bakır elektro erozyon için çok kirli yeterince saf değil
Atirapid tekniği	Bilgi yok	Bilgi yok	Hayır	Test geometrisi gönderildikten sonra haber alınamadı
Elektroliz ile bakır kaplama	Elektroliz ile hızlı prototip modelini bakırla kaplamak	Ticari	Evet	2 hafta sonra İspanya'dan Hollanda'ya teslim edildi
Doğrudan lazer ile sinterleme	Bronz tozlarını lazer ile seçici sinterleme tekniği ile sinterleme	Ticari	Hayır	Elektro erozyon için bronz malzemesi uygun değildir
Abrading (aşındırma)	Grafiti istenilen şekle aşındırma (Hausermann)	Ticari	Hayır	Test geometrisi gönderildikten sonra haber alınamadı
Keltool	Keltool tekniğini elektrot üretimi için kullanmak	Ticari	Hayır, sadece malzeme örnekleri gönderildi	Bazı ufak malzeme örnekleri gönderilmiş, fakat test için gönderilen elektrot üretilenmemiştir.
DMDS Optomec	Ergimiş malzeme tozlarının biriktirilmesi	Araştırma	Hayır	Henüz bu teknik ile elektrot üretimi denenmemiştir
ProMetal RTS300	Metal tozlarını inkjet teknolojisine benzer bir şekilde yapıştırıp daha sonra emprenyelemek	Ticari	Hayır	Üreticiden alınan bilgiye göre henüz bu teknik ile elektrot üretimi mümkün değildir
Lazer ile seçici sinterleme	W-Cu alaşım tozlarını lazer ile seçici sinterleme	Fraunhofer' de araştırma	Hayır	Halen gelişim aşamasında
Lazer ile seçici sinterleme	Harvest-tech	Ticari	Hayır	Teste katılmak için çok meşgul olduklarını belirtmişler
Kinergy	Bilgi yok	Bilgi yok	Hayır	Test geometrisi gönderildikten sonra haber alınamadı
Lazer ile seçici sinterleme	Dipl.-Ing.C Wagner birçok malzemeyi lazer ile seçici sinterlemiştir	Fraunhofer' de araştırma	Hayır	Proje sonlandığı için fiziksel olarak elektrodu üretmek mümkün olmadı

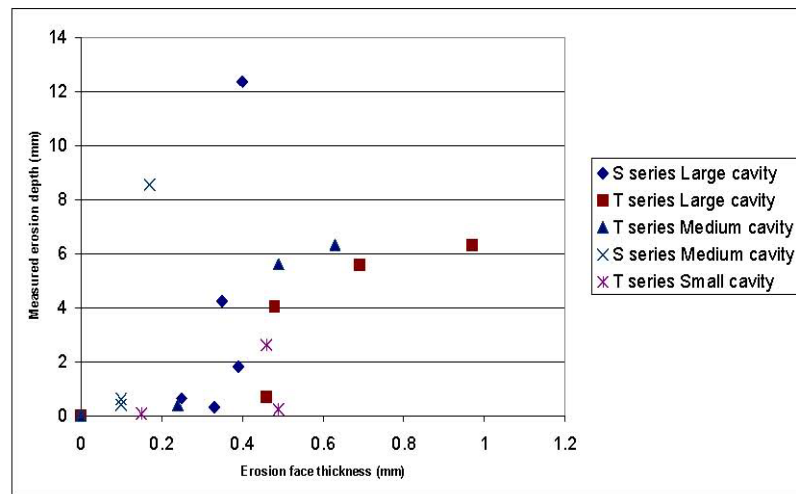
Çizelge 1.2. (Devam) EEİ elektrodu üretiminde kullanılan hızlı takımlama teknikleri ve bu teknikler hakkında kısa bilgi [6]

Metot / Firma	Hızlı takımlama tekniğinin kısa tanımlaması	Ticari / Araştırma	Üretilen elektrodun elektro erozyon testine girip giremediği	Elektro erozyon testine girememesinin nedenleri
Lazer ile seçici sinterleme	Dr.B.Stuckerf Zirkonyum Diborit tozlarını lazer ile seçici sinterlemiştir	Rhode Island Üniversitesi araştırması	Hayır	Proje sonlandığı için fiziksel olarak elektrodu üretmek mümkün olmadı
Strato-conception (kavramı)	Freze ile işlenmiş bakır plakaların üst üste dizilmesi	CIRTES, Fransa araştırması	Hayır	Bakır plakalar ile denemek için projede maddi destek kalmamış
ECOtool	Bakır tozlarını sulu bir bulamaç ile birleştirme	DTI ve TNO'da araştırma	Hayır	Bakır ile üretilenler empenye ile yoğunlukları artırılamamıştır
Yüksek verim ile frezeleme	Yüksek verim ile frezeleme	Ticari	Evet	Karşılaştırma amacıyla eklenmiştir
WIBAtool	Bilgi yok	Ticari	Bilgi yok	
Z-corp	Bilgi yok	Ticari	Bilgi yok	

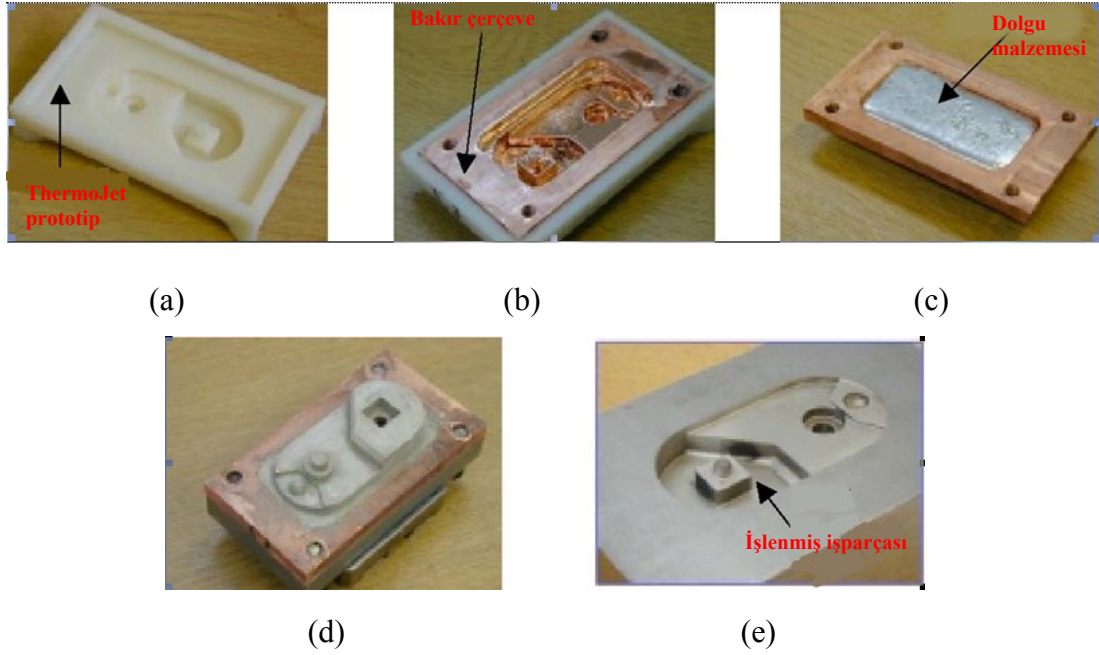
Birçok değişik araştırma grubu stereolitografi ve lazer ile seçici sinterleme hızlı prototip tekniklerini kullanarak elektrot üretim yollarını incelemiştir [15-19]. Stereolitografi tekniği kullanılarak denenen yeni metotlardan biri negatifi üretilen elektrotlar üzerine 3-5 mm kalın kaplama yapıp, kaplanan kabuğun ayrılarak elektroda çevrilmesidir. Bu metotdaki en önemli problem içe doğru çıkıntıları veya açılı bulunan geometrilerden bakır kabuğun çıkartılmasıdır. Kabuğun çıkartılması için stereolitografik prototipin parçalanması gerekmektedir bu işlemde maliyeti artırmaktadır. Ayrıca 3-5 mm gibi kalın bir bakır kabuğun oluşturulması 4-6 gün gibi uzun bir süre almaktadır. Daha önceden denenen diğer bir teknik ise SL elektrodun üzerine 150-200 µm bakır kaplayarak SL elektrot bakır kaplamanın içinde iken işleme yapılmasıdır [1-5]. İnce kaplamanın en büyük problemi işleme sırasında oluşan ısının takım tutucusuna ve tezgaha aktarılamaması ve kaplamaya zarar vermesidir. Buna rağmen bu teknikle üretilen elektrotlar bitirme ve yarı kaba operasyonlarda yeterli malzeme işleme hızlarına ulaşmıştır. Standart stereolitografik reçinenin yumuşama sıcaklığı 65–90°C arasında değişmektedir. Bu sebeple kaba işlemede kullanılan yüksek akım değerlerine ve oluşan yüksek sıcaklıklara ince bakır ile kaplanan elektrotlar dayanmamaktadır. Lazer ile seçici sinterleme tekniği ile

üretileen elektrotlar daha yüksek sıcaklıklara dayanmakla beraber, halen işleme sırasında oluşın sıcaklıklar kadar yüksek sıcaklık değęerlerine ulaşamazlar. Lazer ile seçici sinterleme tekniğinin problem oluşturan diğęer özelliğii ise tüm toz kullanarak sinterleme yapan teknikler gibi yüzey kalitesinin kötü olmasıdır. Bu nedenle lazer ile seçici sinterleme tekniğiiyle üretileen elektrotların kaplanarak yüzey kalitelerinin kabul edilebilir seviyelere çıkartılması gerekmektedir [15, 16, 18].

Elektroliz ile bakır kaplanarak prototiplerin üzerinde kabuk şeklinde üretileen elektrotların başarılı olabilmesi için 3-5 mm kaplama yapılması gerekmektedir. Bu kabukların oluşturulması çok uzun süreler aldığı için daha ince, 1 mm den küçük veya en fazla 1 mm bakır kabuklar ile deneyler yapılmaya başlanmıştır [6-7, 31-35]. Yapılan son çalışmalarda 1 mm'den ince kabukların arkalarından ergime noktası düşük çinko alaşımları ile desteklenerek dayanım sürelerinin uzatılması denetlenmektedir. Bu şekilde üretileen elektrotların üretim aşamaları Resim 1.2'de sunulmuştur. Rennie ve arkadaşlarının yaptığı çalışma [8] 1 mm'lik bir kabuğun 12 mm takım çeliğine işleme ile dalabileceğini göstermiştir (Şekil 1.1). Çalışmanın devamında kabuk 0.6 mm'ye kadar inceltiilmiş ve aynı performans elde edilmiştir. Yapılan bu çalışmada değışik derinliklerde girintiler olan bir elektrot geometrisi kullanılmış ve elektrolizin derin köşelerdeki performansı ve sınırları denetlenmiştir.



Şekil 1.1. Değışik derinliklerdeki girintilerin ulaşabildikleri EEİ derinliğinin erozyon yüzü bakır kaplama kalınlığı ile ilişkisi [8]



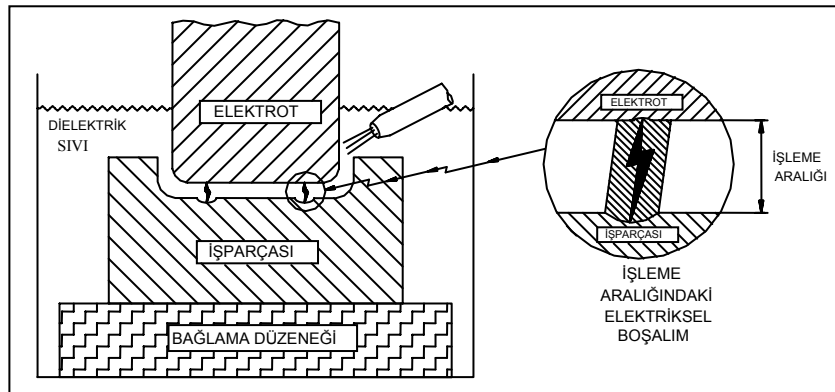
Resim 1.2. ThermoJet model üzerine elektroliz ile kaplanan ince kabuklu elektrot üretim aşamaları (a)Thermojet prototip, (b) üzerine ince bakır kaplanmış ve referans çerçevesi yerleştirilmiş prototip, (c) referans çerçeve ile beraber prototipten ayrılarak arkasına destekleyici malzeme yerleştirilmiş elektrot, (d) EEİ tezgahının takım tutucusuna monte edilmiş elektrot, (e) elektrot ile işlenmiş işparçası [8]

Literatür taraması sonunda konu ile ilgili bulunan sınırlı sayıdaki çalışma incelendiğinde genellikle hızlı prototip tekniklerini kullanarak elektro erozyon elektrodu üretim metotları ve üretilen elektrotların performansları üzerine çalışmalar yapıldığı görülmüştür. Yapılan çalışmalarda önerilen metotlar ile üretilen elektrotlar işlemede denenmiş ve tezgah parametreleri değiştirilerek hızlı prototip teknikleriyle üretilen elektrotların performansları elde edilmeye çalışılmıştır. SL elektrodun kaplanan bakır kabuğun içinde bırakılması ile ilgili çalışmaların literatürde daha fazla yer aldığı ve bu tekniğin daha çok tercih edildiği görülmüştür. Bu tekniğin karmaşık şekilli elektrot üretme yeteneği, stereolitografik modeli elektroformdan çıkartırken parçalamaya gerek olmaması gibi avantajlarıyla beraber sorunları da mevcuttur. Sorunlardan en önemlisi stereolitografi ile üretilen elektrotlara işleme sırasında oluşan ısının hasar vermesidir. Bu konu ile ilgili araştırmaların kısıtlı olması nedeniyle tez çalışmasında sıcaklık ölçümlerinin alınarak, oluşan fazla ısının elektrotdan değişik soğutma metotları ile uzaklaştırılması üzerine deneysel ve

sayısal bir çalışma yürütülmüştür. Çalışmanın deneysel kısmında stereolitografi ile üretilip bakır kaplanan ve bakırdan işlenerek üretilen elektrotların performanslarının karşılaştırılması yapılmaktadır. Her iki tip elektrotdan işleme sırasında sıcaklık ölçümleri alınarak ve işleme sonucunda ulaşılabilen işleme derinliği, elektrot ön yüz aşınması, işparçası yüzey pürüzlülüğü gibi parametrelere bakılarak performans karşılaştırması yapılmıştır. İşlemeyi durdurmadan işleme yüzünden gerçek zamanlı sıcaklık ölçümü yapılabilmesi için topraklanmamış kalkanlı ısıl çiftlerin SL elektrot ile bakır kaplamanın birleştiği noktada kullanılması gereklidir. Ayrıca tez çalışmasında stereolitografi tekniğiyle elektrotlarda üretilmesi mümkün olan soğutma kanallarının içinde dolaştırılan soğutma sıvısı ile elektrot üzerine kaplanan bakır tabakadan işleme sırasında oluşan ısıyı uzaklaştırmak gibi performansı artırıcı yeni bir metot incelenmiştir. Tez çalışmasında soğutma uygulanan SL elektrotların performans artışı deneysel olarak gösterilmiş, hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı Fluent ile ısı transferi analizleri yapılarak deneysel sonuçlar sayısal olarak desteklenmiştir. İşleme sırasında SL elektrodun sıcaklık dağılımı Fluent ile elde edilerek, deneyler sırasında SL elektrodun epoksisinden alınan ölçümler ile karşılaştırılmıştır. SL elektrot içinde açılan soğutma kanalları ile epoksiyi ve bakır kabuğu soğutarak farklı genleşmelerden dolayı oluşan soyulma, kopma, burulma gibi bozulmaları geciktirmek ve böylece elektrodun üzerindeki tüm bakır kaplama aşınana kadar işlemede kullanabilmek hedeflenmiştir.

2. ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEME (EEİ)

Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) yöntemi dielektrik sıvı içerisinde daldırılmış, elektriksel iletkenliğe sahip elektrot ile işparçası arasındaki sabit bir işleme aralığında, vurum jeneratörü tarafından kontrollü bir şekilde oluşturulan elektriksel boşalımların işparçası yüzeyinden küçük bir bölgeyi eritmesi ve buharlaştırması esasına dayanır (Şekil 2.1). Elektriksel boşalım enerjisi nedeniyle ısınan elektrot ile işparçası yüzeylerinin soğutulması ve işleme atıklarının işleme aralığından uzaklaştırılması dielektrik sıvı tarafından sağlanır. İşleme aralığının sabit tutulması ise elektrodun servo kontrollü besleme mekanizması ile işparçasına doğru hareket ettirilmesi sayesinde gerçekleşir.

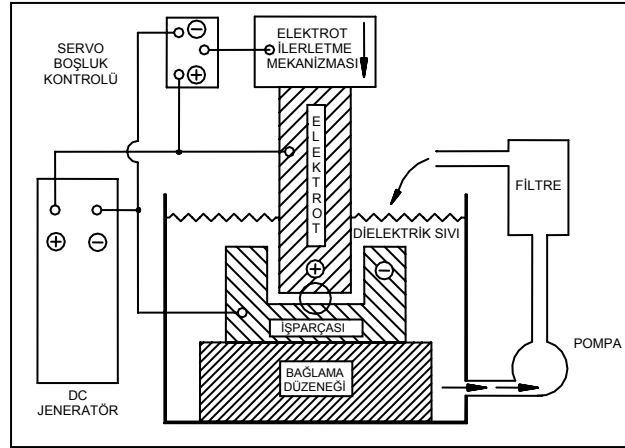


Şekil 2.1. EEİ' nin şematik görünüşü

EEİ tezgahının ana kısımları; vurum jeneratörü, kontrol paneli, servo kontrol mekanizması, elektrot besleme (ilerleme) mekanizması, elektrot bağlama adaptörü, işparçası bağlama düzeneği, dielektrik sıvı tankı, dielektrik sıvı pompası, dielektrik sıvı filtresi ve alt tabladır (Şekil 2.2).

EEİ tekniği 1943 yılında Rus araştırmacılar tarafından keşfedilmiştir [37]. Hangi sertlikte olursa olsun kıvılcım atlaması ile metallerin birbirini aşındırdığı tespit edilmiştir. İşparçası ile elektrot arasında oluşan kıvılcım her iki taraftan bir miktar malzeme koparır ve bu esnada işparçasına hiçbir kesme kuvveti uygulanmaz.

İşparçası ve elektrot arasında işleme sırasında dokunma yoktur (Şekil 2.1). Elektrik ileten tüm metallere bu işlem uygulanabilir.



Şekil 2.2. EEİ tezgahının ana kısımları

1960'ların sonunda elektronik kontrol sistemlerinin gelişmesi ile bu yöntem güvenilir ve hassas bir talaş kaldırma metodu olarak kabul edildi ve EEİ tezgahları üretilmeye başlandı. 1980'li yılların başında yerli firmalar da bu tezgahı üreterek iç piyasanın ihtiyacını karşılamaya başladılar. İmalat sanayinde daha çok kullanılır hale gelen, EEİ tezgahı özellikle kalıp imalatçılarının vazgeçilmez bir tezgahı durumundadır. İşleme için işlenecek geometrinin elektroda aktarılmasına ihtiyaç vardır. Tezgah bu elektrodun negatifini işparçasına işler. EEİ tezgahında, kontrollü elektrik boşalımları ile talaş kaldırılır. Her bir boşalım işparçası üzerinde küçük bir krater meydana getirir. Klasik tezgahların aksine bu teknikle sertleştirilmiş parçalar kolaylıkla işlenebilir. EEİ tezgahının önemli bir avantajı da işparçası ve elektrot arasında kesme kuvvetinin olmamasıdır. EEİ tezgahının en önemli sınırlaması, diğer tezgahlara göre çok yavaş malzeme kaldırmasıdır. Bu dezavantaj tezgah otomatik ve uzun süre çalışılabilir hale getirilerek giderilmeye çalışılmıştır. Tezgahın ikinci bir sınırlaması da elektrot hazırlaması ve elektrot aşınmasıdır. EEİ tezgahı elektrot hazırlanması için diğer tezgahlara muhtaçtır. Fakat diğer tezgahların yardımıyla onların çok zor yapabildiği veya yapamadığı bir çok işi kolaylıkla yapabilir. Örnek olarak, keskin köşeli dörtgen kesitli kör deliği freze ile yekpare işlemek mümkün değildir. Elektrot ise dörtgen prizma geometrisinde olduğundan freze ile kolayca işlenebilir. İşlenen bu

dörtgen prizma elektrot olarak kullanılarak EEİ tezgahında bahsedilen geometri kolaylıkla işlenir.

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

2.1. EEİ ile İşleme Tipleri

EEİ ile işleme tipleri işleme prensipleri göz önünde bulundurularak aşağıdaki üç ana grup altında sınıflandırılabilir.

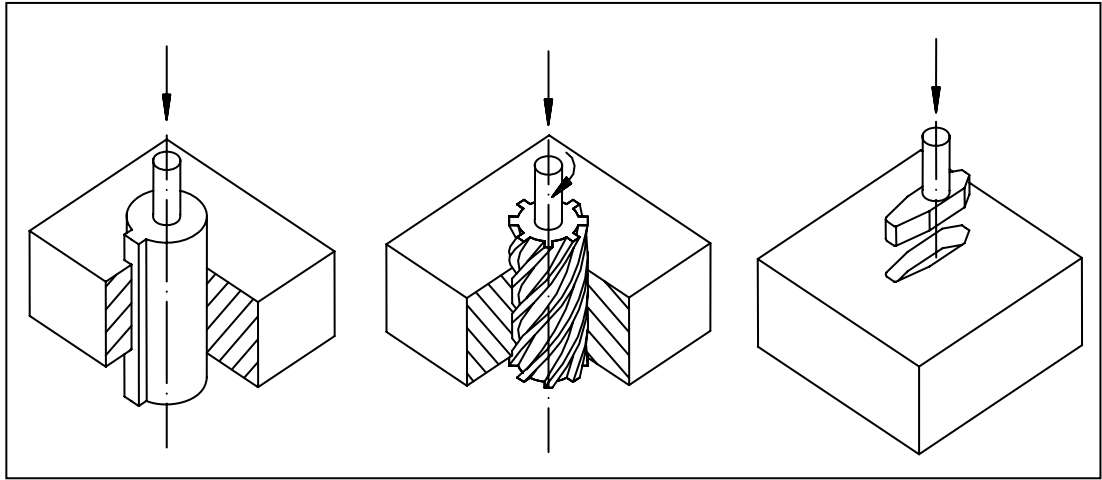
- (i) EEİ ile delme ve oyma
- (ii) EEİ ile kesme

(iii) EEİ ile taşlama;

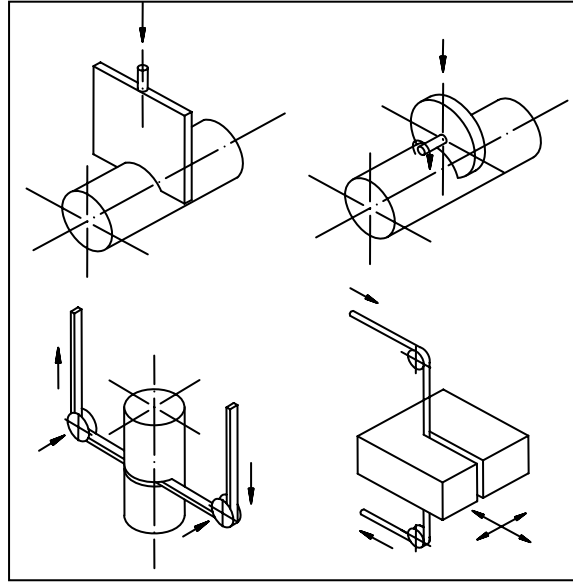
(i) EEİ ile delme ve oyma yöntemi, işparçasının sabit profilli bir elektrot ile boydan boya delinmesi veya elektrodun işparçasına belirli bir işleme derinliğinde batırılması ile yapılan işlemdir (Şekil 2.3).

(ii) EEİ ile kesme yöntemi, işparçasının levha, disk, tel veya şerit şeklindeki elektrotlar ile çeşitli profillerde kesilerek koparıldığı veya belirli bir işleme derinliğinde elektrodun işparçası üzerinde çentik oluşturduğu bütün operasyonları kapsayan yöntemdir (Şekil 2.4).

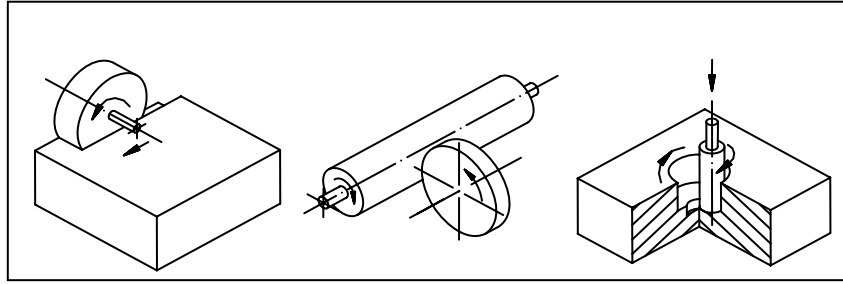
(iii) EEİ ile taşlama yöntemi, işparçasının silindirik veya konik şekillere sahip kendi eksenini etrafında dönen elektrotlar ile dış yüzeylerinin veya iç deliklerinin taşlandığı bir işleme yöntemidir (Şekil 2.5).



Şekil 2.3. EEİ ile delme ve oyma yöntemi



Şekil 2.4. EEİ ile kesme yöntemi

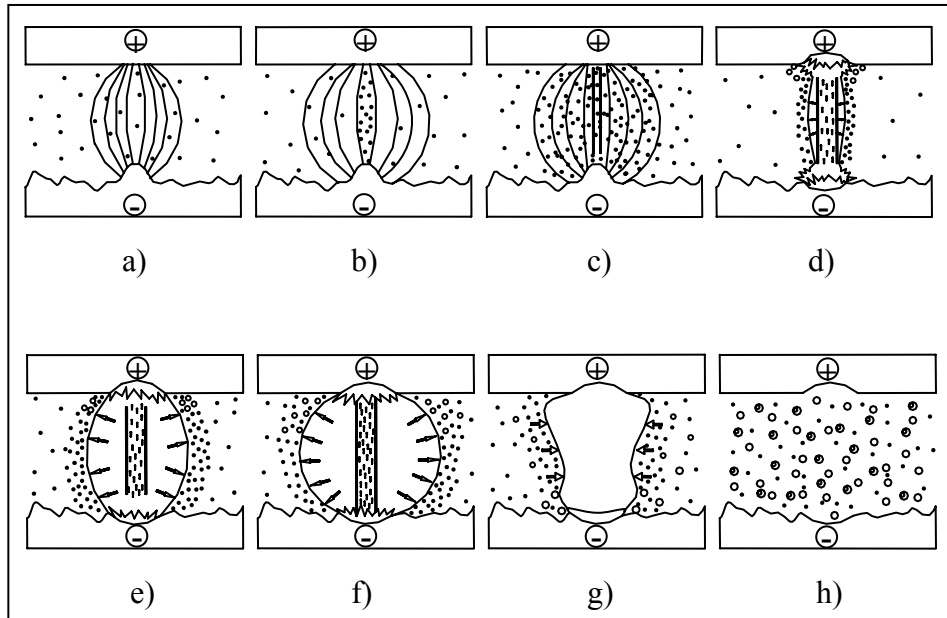


Şekil 2.5. EEİ ile taşlama yöntemi

2.2. EEİ ile İşlemenin Fiziksel Prensibi

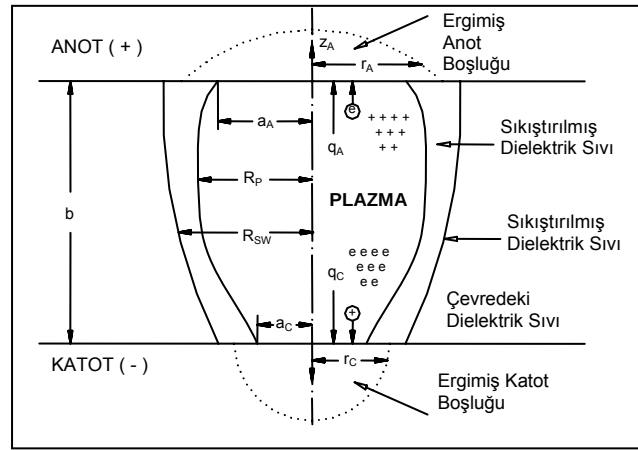
EEİ'nin üç temel elemanı olan elektrot, işparçası ve dielektrik sıvı arasındaki fiziksel olaylar işlem sırasına göre Şekil 2.6'da verilmiştir. EEİ ile işlemede kullanılan dielektrik sıvı çok küçük partiküller içermektedir (Şekil 2.6.a). Operasyon sırasında 10-40 μm 'lik işleme aralığı boyunca uygulanan yaklaşık 80-200 V'luk doğru akım gerilimi işparçası ve elektrot arasında manyetik alan oluşturur. İşlemin başlangıcında hiçbir elektrik akım akışı olmaz. Bunun nedeni dielektrik sıvının elektrodu ve işparçasını yalıtmış olmasıdır. Elektriksel alan dielektrik sıvı içerisindeki partiküllerin elektriksel alan içinde bir hat üzerinde asılı kalmasına ve işleme aralığı boyunca bir köprü oluşturmaya neden olur (Şekil 2.6.b). Dielektrik sıvı oluşan bu

köprü üzerinden kırılır. Dielektrik sıvının kırılması ile işleme aralığındaki gerilim değeri düşer ve akım değeri operatör tarafından ayarlanmış olan sabit değere kadar yükselir (Şekil 2.6.c). Şekil 2.6.c’ de gösterilen plazma kanalı vurum süresi boyunca genişler (Şekil 2.6.d, e). Plazma kanalının etrafında buhar kabarcıkları oluşur. Bu buhar kabarcıkları ile plazma kanalının etrafındaki dielektrik sıvı, plazma kanalının gelişimini sınırlar ve giren enerjiyi çok küçük bir hacimde konsantre halde tutar (Şekil 2.6.f). 3 J/mm^3 ’e kadar olan enerji yoğunlukları, yerel plazma sıcaklığının $40\,000 \text{ }^\circ\text{K}$ ’e kadar ulaşmasına neden olur. Yoğunluk etkileri sebebiyle dinamik plazma basıncı 3 kbar ’a çıkar. Vurum süresi boyunca yüksek plazma enerjisi işparçası ve elektrot çiftini ısıl iletimle ertirir. Fakat yüksek plazma basıncı sebebiyle sınırlı elektrot malzemesi buharlaşması olur. Akım durduğunda plazma kanalı yok olur ve buhar kabarcıkları söner. Bu da elektrot ve işparçası yüzeylerindeki aşırı ısınmış sıvı partiküllerin dielektrik sıvı içinde patlamasına sebep olur (Şekil 2.6.g). Dielektrik sıvı ergimiş malzemeyi soğutup katılaştırarak ortamdan uzaklaştırır da sıvı malzemenin bir kısmı yüzeylerde tekrar katılaşır (Şekil 2.6.h). Bu çevrim işleminin sonuna kadar her boşalım için tekrarlanır.



Şekil 2.6. EEİ ile işlemin fiziksel prensibi [39]

Vurum süresinin başlangıcında hızlı hareket eden elektronların bombardımanı sebebiyle elektrot ilk başta hızla ergir. Fakat plazma yarıçapının artması ile bölgesel ısı transferinde oluşan azalma hızla ergimiş elektrot malzemesinin birkaç mikro saniye içerisinde tekrar katılaşmasına neden olur. Büyük kütleli pozitif iyonların daha düşük hareket kabiliyetleri sebebi ile işparçasının ergimesi daha geç olur. İşparçasında oluşan plazma yarıçapı elektroda göre daha küçüktür (Şekil 2.7). Plazma kanalının bu nedenle işparçasının iç kısımlarına doğru noktasal bir ısı kaynağı oluşturduğu kabul edilir [39, 40].



Şekil 2.7. Plazma kanalı [39, 40]

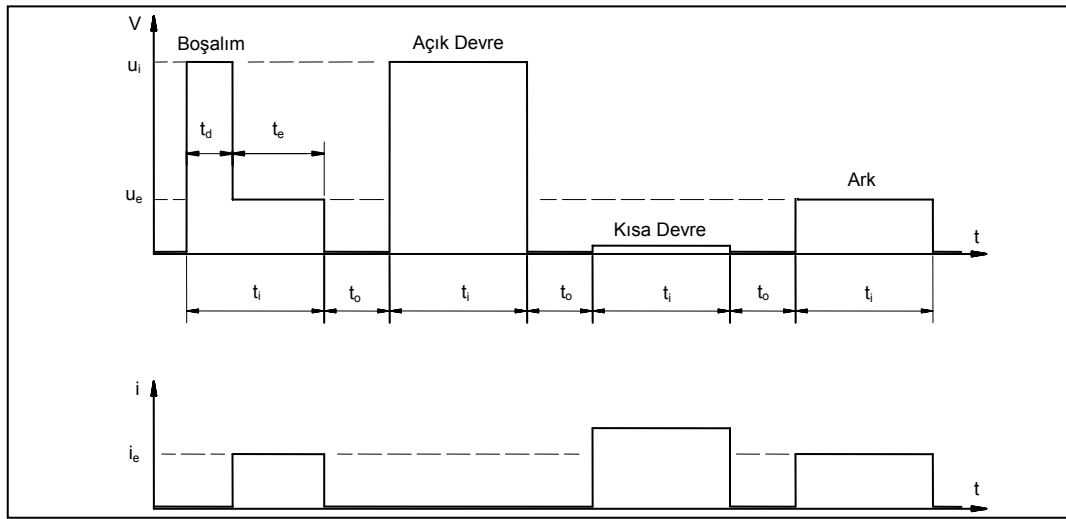
2.3. EEİ ile İşlemenin Temel Parametreleri

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

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

2.3.1. Elektriksel parametreler [41, 42]

İşleme aralığındaki boşalım işleminin tipik gerilim ve akım değişimleri $u(t)$ ve $i(t)$ tarafından karakterize edilirler. Tipik gerilim ve akım değişimleri Şekil 2.8’de gerilim kontrollü bir vurum jeneratörü için gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri [42]

EEİ ile işlemin elektriksel parametreleri aşağıda sunulmuştur;

a) Boşalım (vurum) süresi (t_e): Ateşleme sonrası işleme aralığı boyunca oluşan boşalımın süresi.

b) Gecikme süresi (t_d): Ateşleme öncesinde dielektrik sıvının iyonlaşma (elektrik iletkenleşme) süresi.

c) Vurum süresi (t_i): İşleme aralığına gerilimin ilk uygulanması anı ile boşalımın bitiş anı arasındaki toplam süre.

$$t_i = t_e + t_d \quad (2.1)$$

d) Bekleme süresi (t_o): İki vurum arasında vurum jeneratörü tarafından bırakılan ara süresi.

e) Vurum çevrim süresi (t_p): Jeneratör tarafından uygulanan vurum ve bekleme süresinin toplamı.

$$t_p = t_i + t_o \quad (2.2)$$

f) Vurum frekansı (f_p): Jeneratör tarafından elektrotlar arasına birim zamanda uygulanan gerilim vurumlarının sayısı.

g) Açık devre gerilimi (u_i): Akım boşalımı olmadığı anda işleme aralığında görülen gerilim.

h) Boşalım gerilimi (u_e): Boşalımın devam ettiği sürece ölçülen gerilim.

i) Boşalım akımı (i_e): Boşalım süresince işleme aralığından geçen akım.

j) Boşalım gücü (P_e): Bir boşalım süresince uygulanan güç.

$$P_e = u_e(t) \cdot i_e(t) \quad (2.3)$$

k) Vurum enerjisi (W_e): Boşalım süresince işleme aralığına uygulanan enerji

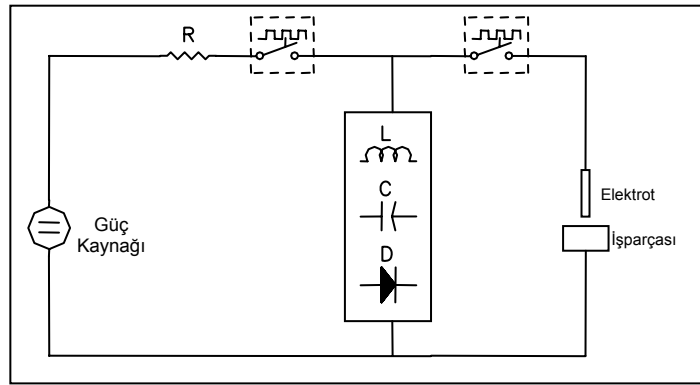
$$W_e = \int_t u_e(t) \cdot i_e(t) \cdot dt \approx u_e \cdot i_e \cdot t_e \quad (2.4)$$

l) Ortalama çalışma gerilimi (U): İşleme süresince işleme aralığında ölçülen gerilimin aritmetik ortalaması.

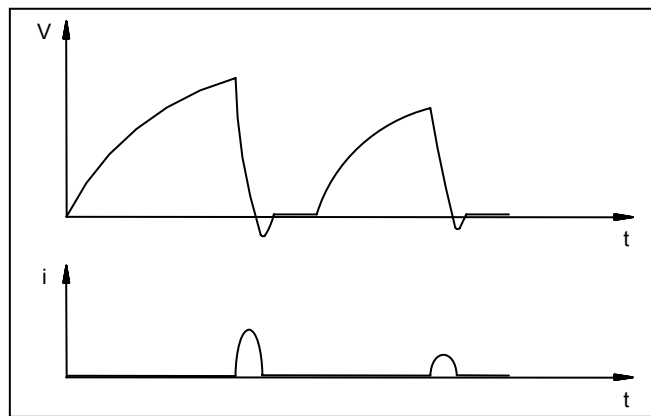
m) Ortalama çalışma akımı (I): İşleme süresi boyunca işleme aralığından geçen akımın aritmetik ortalaması.

2.3.2. Vurum jeneratörü karakteristikleri

i) RC tipi jeneratörler: Doğal ateşlemenin ve çoğunlukla salınımlı boşalımların olduğu, boşalım sonunun enerji depolanması tarafından etkilendiği, boşalım süresi ve sıklığının esasen devre elemanlarına bağlı olduğu kadar işleme aralığındaki şartlara da bağlı olduğu jeneratörlerdir. Bu tipteki jeneratörlerde kullanılan elemanlar kapasitanslar, indüktanslar veya her ikisinin beraber kullanıldığı RC, RLC, RLCD, LC tipindeki elemanlardır [41].

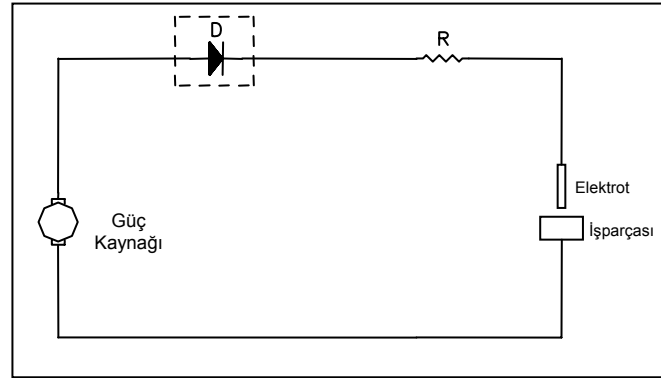


Şekil 2.9. RC jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı [41]

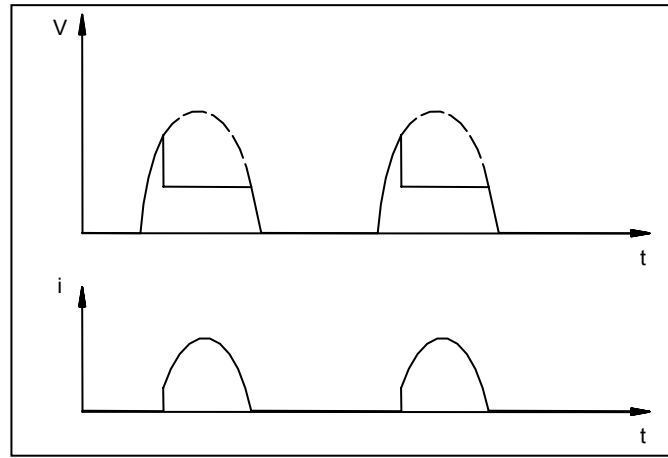


Şekil 2.10. RC jeneratörünün gerilim ve akım dalga tipi [41]

ii) Döner vurum jeneratörleri: Gerilim kaynağının doğrudan bir direnç üzerinden boşalım aralığına bağlı olduğu, boşalım süresi ve sıklığının öncelikle döner jeneratör tarafından belirlendiği jeneratörlerdir. Bu jeneratörler bir kollektör ve bir doğrultucu ile teçhiz edilebilir [41].

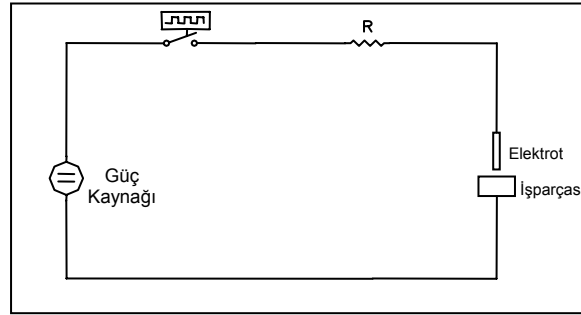


Şekil 2.11. Döner vurum jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı [41]

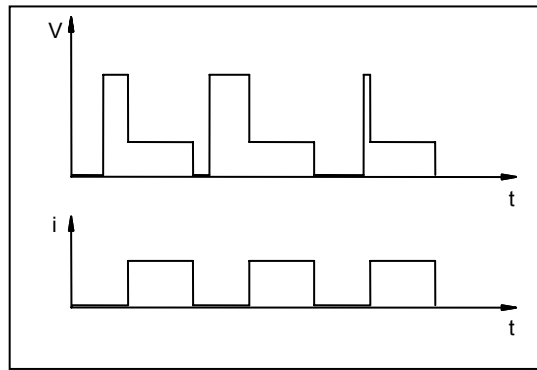


Şekil 2.12. Döner vurum jeneratörünün gerilim ve akım dalga tipi [41]

iii) Isopulse jeneratörler: Gerilimin anahtarlama elemanları kullanımıyla işleme aralığına bağlı olduğu, boşalım sürelerinin ve sıklıklarının özellikle kontrollü anahtarlama proseslerine bağlı olduğu jeneratörlerdir [41].



Şekil 2.13. Isopulse jeneratörünün temel elektrik devre diyagramı [41]



Şekil 2.14. Isopulse jeneratörünün gerilim ve akım dalga tipi [41]

2.3.3. Dielektrik sıvı parametreleri

EEİ ile işlemede kullanılan dielektrik sıvının görevleri aşağıda sıralanmıştır;

i) Fiziksel olarak dielektrik sıvı elektrotlar üzerinde toplanan yükü belirli bir süre tutar. Bu süre işleme aralığı şartları ile belirlenir. İşleme aralığı şartları uygun olduğunda dielektrik sıvı elektrik akımının çok küçük bir dirençle artmasına izin verir.

ii) Dielektrik sıvı, boşalımı dar bir kanalda tutar. Böylece elektrot yüzeyi üzerindeki güç yoğunluğu ve işleme hızı artar.

iii) Boşalım esnasında açığa çıkan ısı hemen atılmalıdır. Çünkü bu ısı erozyona katkıda bulunmaz. Aksine elektrot ve işparçası yüzeyleri üzerinde zarara sebep olur. Dielektrik sıvı ıslığı yüzeylerden boşalım biter bitmez uzaklaştırır.

iv) Boşalım sonrası işleme aralığında oluşan işleme atıkları dielektrik sıvı ile işleme aralığından uzaklaştırılır. Bu işlem kısa devreleri ve elektrot aşınmasını önleme açısından çok önemlidir [43].

EEİ ile işlemede dielektrik sıvıya ait özellikler işlem üzerinde oldukça etkilidir. İşleme üzerinde etkili olan dielektrik sıvı özellikleri aşağıda sunulmuştur.

1) Dielektrik sıvının cinsi: EEİ ile işlemede en çok kullanılan dielektrik sıvı hidrokarbon bileşikleri ve sudur. Bunların yanı sıra organik bileşikler olan glikol ve etilenin farklı hacimsel oranlardaki sulu çözeltileri de kullanılmaktadır [44, 45]. Ayrıca deneysel amaçlı gaz jeti uygulamaları da mevcuttur [46]. Hidrokarbon bileşikleri ham petrolün rafine edilmiş formu olup, bunların arasında en iyi bilinen gaz yağıdır. Suyun kullanımı, tel erozyon tezgahlarında ve karbon ihtiva etmeme ile düşük viskozitenin avantajlı olduğu dalma tipi erozyon tezgahlarında geçerlidir [47].

2) Dielektrik sıvı uygulama yöntemi: EEİ ile işlemede yaygın olarak kullanılan dört tip dielektrik sıvı uygulama yöntemi vardır. Bu teknikler;

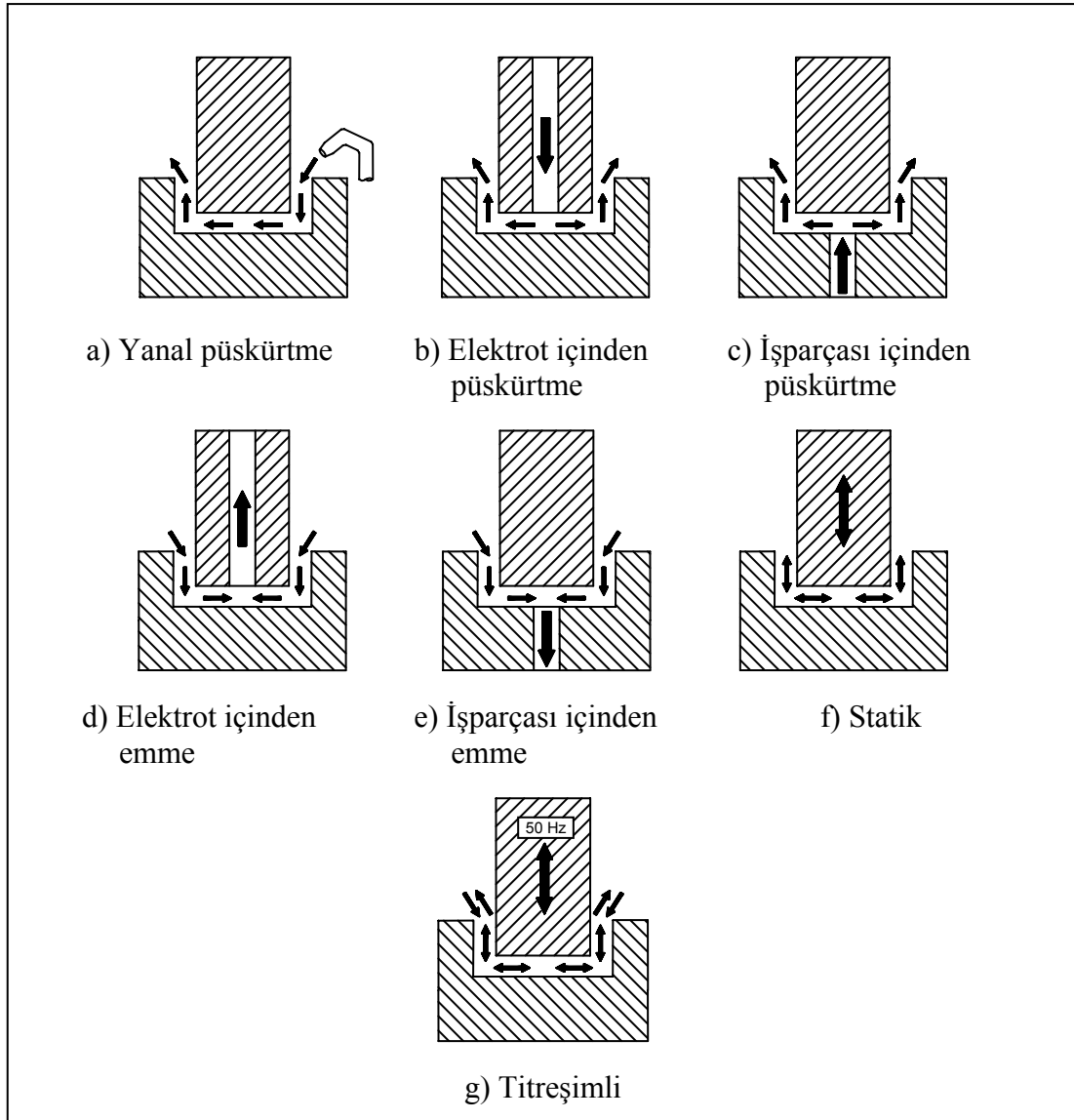
i) Yanal püskürtme: Dielektrik sıvının işleme aralığına yardımcı bir aparat ile yandan uygulandığı yöntemdir (Şekil 2.15.a).

ii) Elektrot veya işparçası içinden püskürtme: Dielektrik sıvının işleme aralığına elektrot veya işparçasına açılan delikle püskürtüldüğü yöntemdir (Şekil 2.15.b, c).

iii) Elektrot veya işparçası içinden emme: Dielektrik sıvının işleme aralığından elektrot veya işparçasına açılan bir delik ile emildiği yöntemdir (Şekil 2.15.d, e).

iv) Statik: Dielektrik sıvının sadece elektrodu aşağı ve yukarı yönde yaptığı hareketler ile oluşan basınç vasıtası ile uygulandığı yöntemdir (Şekil 2.15.f).

v) Titreşimli: Elektrodun aşağı yukarı doğrultuda titreştirilmesi (çoğunlukla 50 Hz frekansta) ile sağlanan pompalamayı kullanan yöntemdir (Şekil 2.15.g) [47-50].



Şekil 2.15. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri

3) Dielektrik sıvı basıncı: Dielektrik sıvının işleme aralığındaki işleme atıklarını ortamdan uzaklaştırması ve yüzeylerdeki aşırı ısınmayı engellemesi için uygulanan farklı yöntemler vardır. Bu yöntemlerden dielektrik sıvının hiçbir basınç uygulanmadan sadece yanal akış yöntemiyle uygulanması durumunda işleme atıkları işleme aralığının iç kenarlarında toplanarak boşalım verimini azaltır. Basıncın uygulanmadığı durumlarda yüzeylerden kaldırılan talaş birikerek kirlilik oluşturur. Basıncın uygulanması bilhassa derin işleme koşullarında daha kritiktir. Çünkü yanal akış derin işleme koşullarında işleme aralığında boşalımın oluşturduğu basınçtan

dolayı yeterli nüfuziyeti gerçekleştiremez ve işleme aralığında biriken işleme atıkları boşalmanın verimini düşürür. Ayrıca basıncın uygulanmaması halinde işleme derinliğinde belirgin oranda azalma gözlenir. Dielektrik sıvının basıncındaki artış İİH ve EAH’ da artışa sebep olurken yüzey pürüzlülüğünün önce artmasına daha sonra yüksek basınç değerlerinde fazla değişmemesine neden olur [49, 51-52]. Bunların yanı sıra dielektrik sıvının basınçlı bir şekilde uygulandığı yöntemlerde elektrodun keskin köşe ve kenarlarındaki yuvarlanma eğilimi basınç uygulanmadığı durumlara göre daha yüksektir. Bunun sebebi ise ergimiş metalin yüzeyde tekrar katılaşmadan basınç yoluyla ortamdan uzaklaştırılmasıdır [51].

4) Dielektrik sıvı akış hızı: Dielektrik sıvının akış hızı uygulama merkezinden uzaklaştıkça azalır. Yüksek hızlardaki dielektrik sıvı akışı kabarcıklara neden olur. Bu kabarcıklar akışın türbülanslı olmasına yol açar. Dielektrik sıvının yüksek akış hızı ve türbülanslı yapısı, bir sonraki boşalmanın aynı noktalarda oluşma yoğunluklarının daha yüksek olma olasılığını artırır [53]. Ayrıca dielektrik sıvı akış hızı işparçası yüzeyindeki tekrar katılaşmış tabaka kalınlığını ve bu tabakadaki mikro çatlakların yoğunluğunu da etkiler. Akış hızının yüksek olması ergimiş işparçası malzemesinin yüzeyden daha çabuk uzaklaştırılmasını sağlayacağı için tekrar katılaşan tabaka kalınlığı hızın artışı ile azalır [47].

5) Dielektrik sıvı viskozitesi: Yüksek viskozite değerine sahip dielektrik sıvılarla yapılan derin işleme koşullarında işleme atıklarının ortamdan uzaklaştırılması zordur. Bunun sebebi ise yüksek viskoziteye sahip dielektrik sıvının işleme aralığı ve kesme genişliği aralıklarında etkin bir sirkülasyon sağlayamamasıdır. Bununla birlikte düşük viskoziteli dielektrik sıvıların ise kırılmaya karşı dirençleri düşüktür.

6) Dielektrik sıvı sıcaklığı: İşleme sırasında dielektrik sıvının soğutma işlemine tabi tutulmaması dielektrik sıvının ısınmasına ve viskozite değerinin düşmesine sebep olur. Bunun neticesinde dielektrik sıvının elektriksel kırılmaya karşı direnci azalarak düzensiz boşalmalara neden olur.

2.4. EEİ ile İşlemede Performans Karakteristikleri

Genel olarak EEİ operasyonunda işleme performansının değerlendirilmesi aşağıdaki performans karakteristiklerine göre yapılır:

$$\text{İşparçası İşleme Hızı [mm}^3\text{/dak]} = \text{İİH} = \frac{\text{İşparçası toplam aşınma hacmi [mm}^3\text{]}}{\text{Toplam işleme süresi [dak]}} \quad (2.5)$$

$$\text{Elektrot aşınma hızı [mm}^3\text{/dak.]} = \text{EAH} = \frac{\text{Elektrot toplam aşınma hacmi [mm}^3\text{]}}{\text{Toplam işleme süresi [dak.]}} \quad (2.6)$$

$$\text{Bağıl aşınma [\%]} = \text{BA} = \frac{\text{Elektrot aşınma hızı (EAH)}}{\text{İşparçası işleme hızı (İİH)}} \times 100 \quad (2.7)$$

İşparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra): Ortalama yüzey pürüzlülüğü değeri işparçası yüzeyinde belirli bir uzunluktaki doğrultu üzerinden ölçülen y eksenindeki değerlerin μm cinsinden aritmetik ortalamasıdır.

Yukarıda sıralanan performans karakteristiklerinin değerleri tamamen işleme parametrelerine bağlıdır. EEİ ile işlemenin optimizasyonu minimum EAH ile maksimum İİH'nı optimum düzeyde sağlayarak, işleme bitiminde olabildiğince düşük işparçası Ra değerini elde etmektir.

3. HIZLI PROTOTİP VE HIZLI TAKIM ÜRETİMİ

3.1. Hızlı Prototip Üretimi (Hızlı Prototipleme)

Hızlı prototipleme 3 boyutlu bilgisayar destekli tasarım programlarından otomatik olarak fiziksel prototip oluşturmak için kullanılan tekniklere verilen genel bir isimdir. Bu teknikler ile 2 boyutlu resimlerin yerine ele alınabilecek 3 boyutlu prototipler üretilebilmektedir. Hızlı prototip teknikleri katman katman malzeme ekleme ve bu katmanları birbirine yapıştırma metodu ile çalışmaktadır. Bu metotlar ayrıca serbest cisim üretimi, katı serbest cisim üretimi ve katmanlı üretim gibi isimlerle tanımlanmaktadır. Bugünün malzeme ekleme teknolojileri geleneksel malzeme işleme tekniklerine göre aşağıdaki avantajlara sahiptir;

- Uzun tezgah ayarlarına ve son montajlara ihtiyaç duyulmadan karmaşık geometrili objeler üretilebilir,
- karmaşık geometrilerin imalatı hızlı ve kolayca yapılabilir.

Hızlı prototipleme teknikleri ile üretilen prototipler,

- birlikte çalışanlar arasında veya müşteriye fikirlerin anlatımı sırasında mükemmel bir görsel araç olarak,
- yapılan tasarımların test edilmesinde,
- ürün bir montajın parçası ise diğer parçalar ile uyumunun kontrol edilmesinde,
- ürünü piyasaya çıkarmadan önce reklam veya kamuoyu araştırmaları sırasında,
- ürünün pilot üretimini yapmak amacıyla kullanılacak takımları hızlı üretmekte (hızlı takımlama),
- ürünün kendini (eğer malzeme ve miktar uygunsa) doğrudan üretmekte (hızlı üretim),

ve benzeri alanlarda kullanılabilir.

Bilgisayar kontrollü tezgahlar ile işleme herkesce bilinen, uygulanan geniş malzeme türü seçme imkanına ve yüksek hassasiyete sahip bir teknolojidir. Fakat orta karmaşıklıkta bir geometriyi hızlı şekilde üretmek gerekiyorsa hızlı prototip teknikleri bazı avantajlara sahiptir. Bu iki teknoloji arasında seçim yapmak uç noktalar hariç her zaman kolay değildir. Hızlı prototip tekniklerinin hassasiyeti bilgisayar kontrollü tezgahlar kadar iyi olmasa da çoğu uygulama için yeterlidir. Hızlı prototip üretim tekniklerinde malzeme türü seçme serbestisi fazla değildir. Seçilen hızlı prototip tekniğine göre kullanılabilecek malzeme türleri sınırlı ve seçilen tekniğe bağlıdır. Buna rağmen çeşitli plastikler, seramikler, çelikten titanyuma kadar değişen metaller ve ahşaba benzer kağıtlar gibi birçok değişik malzeme hızlı prototip teknikleri ile kullanılabilecek malzeme türleri arasındadır.

En az sekiz hızlı prototip üretim tekniği ticari olarak mevcut olup, her birinin güçlü yönleri vardır. Çünkü bu teknikler prototip üretimi dışında takım üretimi veya ürünün kendisinin kısıtlı miktarlarda üretimi gibi alanlarda da kullanılmaktadır. Bu nedenlerle katı serbest geometri üretimi, bilgisayar destekli üretim veya katmanlar halinde üretim olarak da isimlendirilmektedir. Hızlı prototip tekniklerinden sık kullanılanların temel özellikleri Çizelge 3.1’de sunulmuştur. Bütün bu hızlı prototip tekniklerinde geometriyi oluşturmak için aynı temel beş adımı uygulamak gereklidir;

1. Tasarımı 3 boyutlu tasarım programları yardımı ile modellemek.
2. Modellenen 3 boyutlu tasarımı STL (stereolitography) formatına çevirmek.
3. Oluşturulan STL dosyasını ince katmanlara ayırmak.
4. Katmanlara ayrılmış STL dosyasını üst üste üretecek prototip tezgahına göndermek.
5. Üretimi tamamlanmış modeli temizleyip seçilen hızlı prototip tekniğine bağlı olarak değişen ikincil bitirme işlemlerine sokmak.

Çizelge 3.1. Hızlı prototip teknolojilerinin temel özellikleri [29]

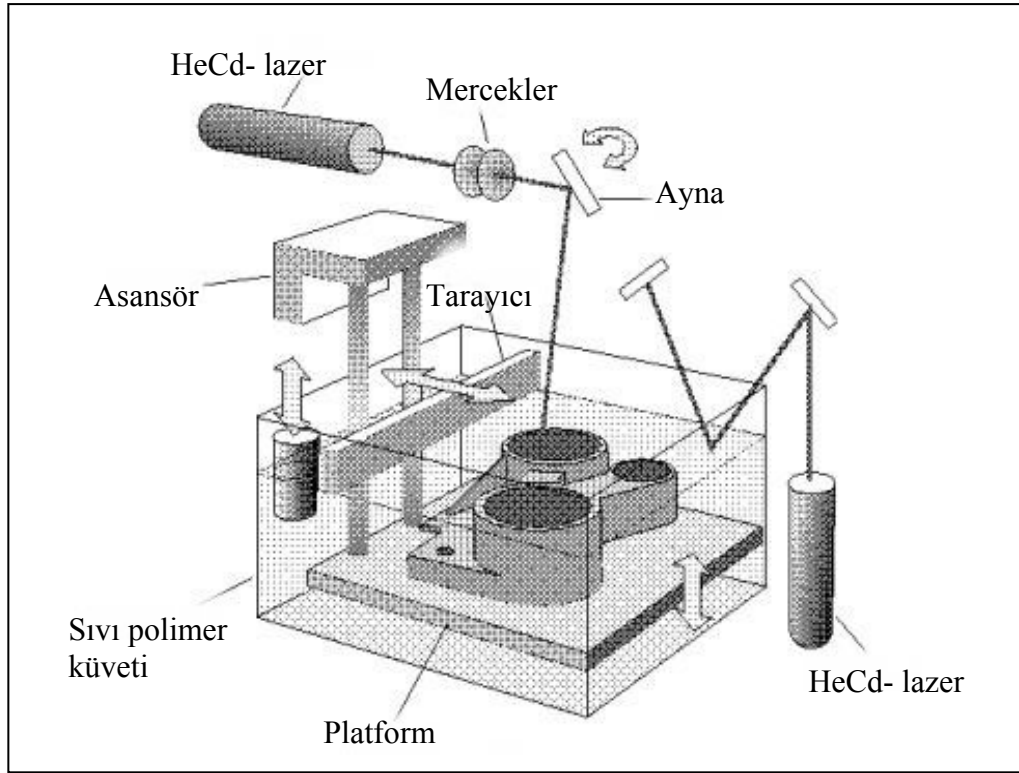
Hızlı Prototip Teknolojisi	Streolitografi	Malzeme Püskürtme	Lazer ile Seçici Sinterleme	Ergiterek Yığma ile Model Üretimi	Tek püskürtme kafasıyla Inkjet	Üç Boyutlu Yazıcılar	Katmanlı Nesne Üretimi
Temsil Eden Tezgah Satıcısı	3D Systems			Stratasys	Solidspace	Z Corp.	Cubic Technologies
GENEL ÖZELLİKLER							
Maksimum Parça Boyutu (in)	20x20x24	10x8x8	15x13x18	24x20x24	12x6x9	20x24x16	32x22x20
Hız	orta	iyi	orta-vasat	kötü	kötü	mükemmel	iyi
Hassasiyet	çok iyi	iyi	iyi	vasat	mükemmel	vasat	vasat
Yüzey kalitesi	çok iyi	vasat	vasat	vasat	mükemmel	vasat	vasat-kötü (uygulamaya bağlı)
Tekniğin Güçlü Noktaları	piyasa lideri, büyük parça boyutları, hassas, geniş ürün seçenekleri	piyasa lideri, ofis kullanımına uygun	piyasa lideri, hassas, geniş malzeme seçeneği	ofis kullanımına uygun, fiyat, geniş malzeme seçeneği	hassas, yüzey kalitesi, ofis kullanımına uygun	hızlı, ofis kullanımına uygun fiyat, renkli çıktı imkanı	büyük parça boyutları, büyük döküm parçaları, ucuz malzeme
Tekniğin Zayıf Noktaları	ikincil operasyon gerekli, kirli bir operasyon	boyut ve ağırlık, kırılma parçalar, sınırlı malzeme seçimi	boyut ve ağırlık, tezgah maliyeti, yüzey hassasiyeti	hız	hız, sınırlı malzeme seçimi, parça boyutu	sınırlı malzeme seçimi, kırılma parçalar, yüzey hassasiyeti	parça dayanımı, duman, yüzey ve parça hassasiyeti
Tezgah Maliyeti	75000\$-800000\$	50000\$	300000\$	30000\$-300000\$	70000\$-80000\$	30000\$-70000\$	120000\$-240000\$
Malzeme Maliyeti (\$/pound)							
Plastik	75 \$-110 \$	100 \$	30 \$-60 \$	115 \$-185 \$	100 \$		9 \$
Metal			25\$-30\$				
Diğer Malzemeler			5 \$ (döküm kumu)			kola: 0.35 (\$/cu in) Sıva: 0.60 (\$/cu in)	5 \$-8 \$ (Kağıt)

3.1.1. Hızlı prototip teknikleri

Stereolitografi [29,30]

Bu teknikte ultraviyole ışığa duyarlı sıvı polimer kullanılmaktadır. Ultraviyole ışığın dokunduğu kısımlar sertleşerek üç boyutlu prototipi oluşturur. Şekil 3.1'den görüldüğü gibi prototip sıvı polimer ile dolu bir küvetin içindeki platform üzerinde yapılmaktadır. Platform, sıvı yüzeyinin hemen altında bir katman derinliğinde durmakta ve katman tamamlandıktan sonra bir katman kalınlığı kadar polimere daldırılmaktadır. Düşük güçlü çok iyi odaklanmış bir UV lazer ilk katmanı tarar ve kesitte katı olması gerekli kısımları katılaştırır. Bu işlem sırasında boşluk olması gereken bölgeler sıvı kalır. Daha sonra platformun bağlı olduğu asansör sistemi platformu bir katman kalınlığı kadar sıvı polimer küvetine daldırır. Bu işlemden sonra bir tarayıcı tüm platformun üzerinden geçerek katılaşmış yüzeylerin üstünün sıvı polimer ile ıslatılmasını sağlar. Kullanılan polimerin akışkanlığının az olması tarayıcı sisteminin kullanılması gerekliliğini ortaya çıkarmıştır. Tüm yüzey polimer ile kaplandıktan sonra lazer birinci katmanın üzerine ikinci katmanı tarayarak sertleştirir. Bu işlemler prototip tamamlanana kadar tekrarlanır. Tamamlanan prototip, sıvı polimer küvetinden çıkartılıp fazla sıvı polimerler boşluklardan süzülükten sonra temizlenir. Fazla polimerden arındırılan prototip, üzerindeki destek yapıları kırılıp ayrıldıktan sonra kürleme işleminin tamamlanması ve prototipin tam mukavemetine ulaşması için UV fırına konulur. Fırında kürlenmesi tamamlanan prototipe gerekli görülürse kumlama veya boyama gibi diğer işlemlerde uygulanabilir.

Stereolitografi en hassas ve en iyi yüzey kalitesine sahip olan prototip tekniğidir. Stereolitografide kullanılan prototip malzemelerinin sayısı gün geçtikçe artmaktadır. Mühendislikte kullanılan termoplastiklerin özelliklerine yakın birçok stereolitografi prototip üretim malzemesi bulunmuş olup, sayıları gün geçtikçe artmaktadır.

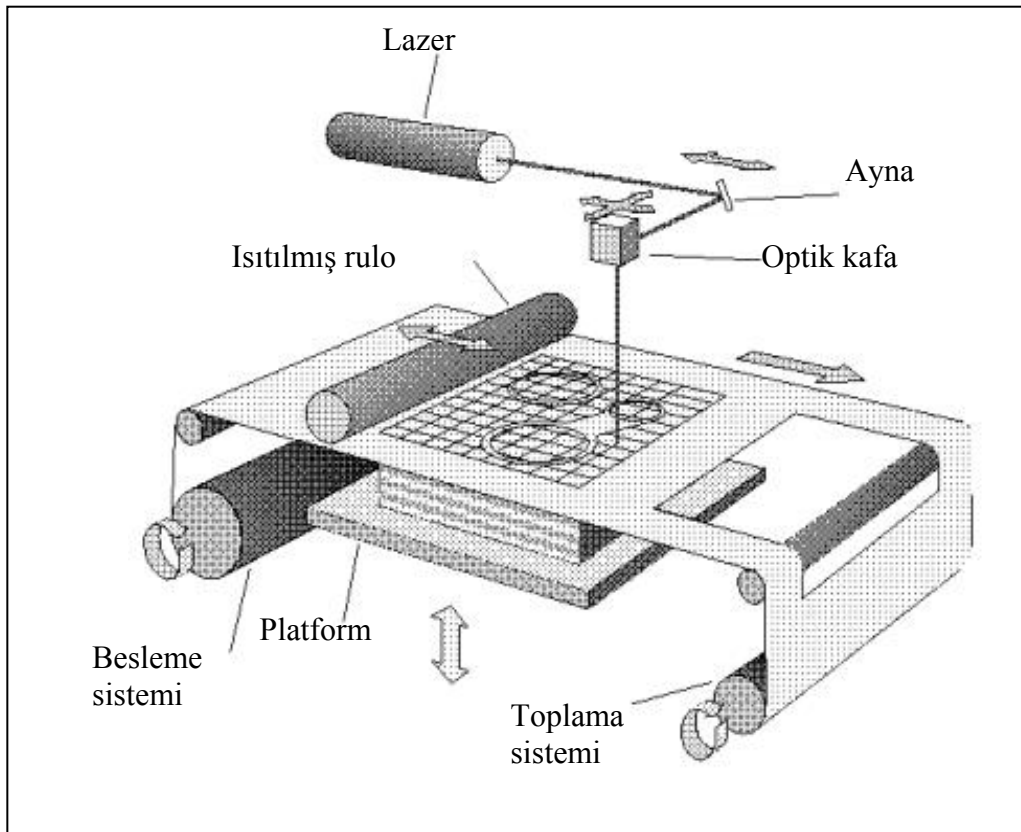


Şekil 3.1. Stereolitografi sisteminin şematik görünümü [30]

Katmanlı nesne üretimi [29,30]

Bu prototip tekniğinde (Şekil 3.2) arkası yapıştırıcı kaplı tabaka malzemeler katman katman yapıştırılarak prototip oluşturulmaktadır. Prototipin her katmanının profili kağıt veya benzer bir malzemeden lazer ile kesilerek oluşturulur. Kağıdın arka yüzü ısıtıldığında aktif hale geçen yapıştırıcı ile kaplıdır. Bu kağıt, makaralara sarılı şekilde toplayıcı ve besleyici sistem tarafından yapım platformuna iletilir. Yapım platformunun tabanı kağıttan veya çift taraflı köpük bantdan oluşturulmuştur. Bu taban üzerine iletilen kağıt ısınan bir rulo vasıtası ile tabana yapıştırılır. Yapıştırılan katman odaklanmış lazer ile kesilerek prototipin dış çevresi oluşturulur. Ayrıca dışarıda kalan fazla kısımlarda lazer ile küçük karelere bölünerek daha sonra kırılması ve çıkarılması kolaylaştırılır. Bu fazla bölümler ince duvarlı ve dışarıya çıkıntı yapan kısımlar için destek görevi görmektedir. Katmanın işi bitince yapım platformu yeni katmanın kesileceği kağıdın beslenebilmesi için bir katman kalınlığı kadar alçaltılır ve yeni kağıt beslenerek diğer kesimden kalan artık çerçeve

şeklindeki kağıt toplanır. Sıcak rulo yeni beslenen kağıdı daha önce biten katmana yapıştırmak için geçer ve lazer ikinci katmanı keser. Bu işlemlere prototip bitene kadar devam edilir. Sonuçta oluşan prototip kağıtdan olduğu için nemden etkilenmemesi amacıyla vernik ile sızdırmaz hale getirilip boyama ile tamamlanmaktadır. Kağıt dışında, su gecirmeyen kağıt, plastik, seramik veya metal tozlu bantlar gibi malzemeler geliştirilmiştir. Seramik veya metal tozlu bantlardan yapılan prototipler daha sonra sinterlenerek maksimum dayanımlarına ulaşmaktadır. Genelde bitmiş kağıt prototiplerin hassasiyeti ve dayanıklılığı diğer hızlı prototip teknikleri ile üretilen prototipler kadar iyi değildir. Fakat malzeme maliyeti çok düşüktür. Bu sebeplerle kum dökümde kullanılan eski tahtadan üretilen modeller yerine sıklıkla kullanılmaktadırlar.



Şekil 3.2. Katmanlı nesne üretim sisteminin şematik görünümü [30]

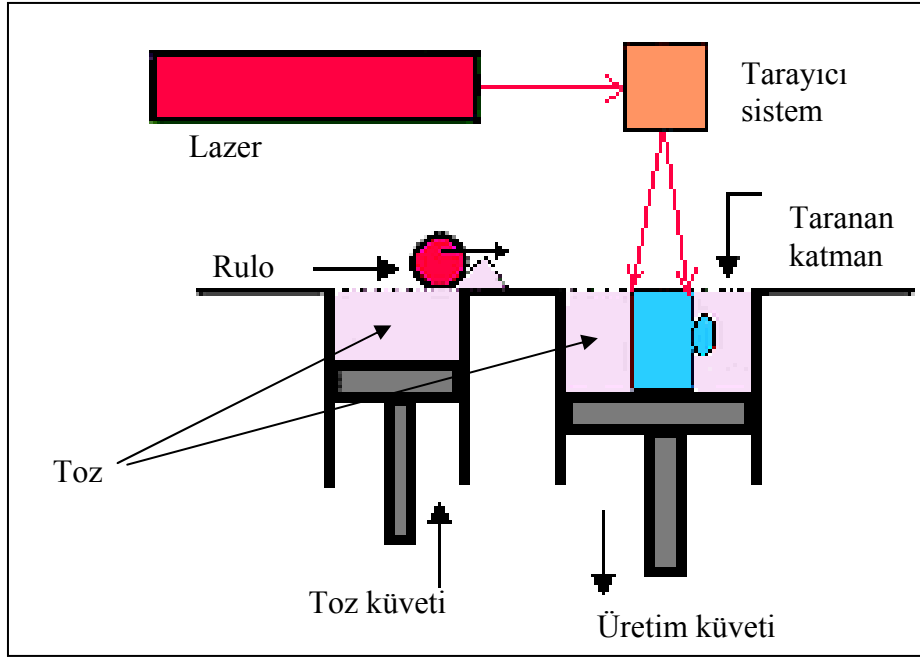
Lazer ile seçici sinterleme [29,30]

Şekil 3.3’de de görüldüğü gibi teknik plastik, metal vb. tozları lazer ile seçici bir şekilde lokal olarak ergiterek birbirine yapıştırıp katı prototipler oluşturmaktadır. Prototipler lazer sıcaklığı ile ergitilebilecek toz ile dolu küvetlerin bir katman kadar içine daldırılmış platformun üzerinde üretilmektedir. Lazer ilk katmanı tarayıp sinterler ve platform bir katman kadar alçaltılıp üzerine yeni toz serilir. Bu işlem prototip tamamlanana kadar uygulanır. Sinterlenmeyen tozlar prototipi destekler.

Termoplastik tozları veya kullanılan diğer tozlar hareketli bir rulo sistemi tarafından toz küvetinden alınıp üretim küvetinin üzerine serilir. Üretim küvetinde bulunan piston bu serilen tozu kabul edebilmek için bir katman kadar alçaltılır. Toz küveti üretim küvetine benzer şekilde bir katmana yetecek tozun rulo tarafından serilebilmesi için bir katman kadar yükseltilir. Toz rulo sistemiyle serildikten ve sıkıştırıldıktan sonra lazer tarafından lokal şekilde ergitilerek katman oluşturulur. Üretim ortamı tozun erime sıcaklığına çok yakın bir seviyeye kadar ısıtılmıştır. Böylece lazer ışını tozun sıcaklığını çok az yükselterek lokal olarak sinterlenmesini ve operasyonun çok hızlanmasını sağlar. Prototip tamamlandıktan sonra üretim küveti tamamen yükseltilerek prototip alınıp fazla tozlar fırça ile temizlenir. Bu teknikte destek geometrilerine ihtiyaç yoktur. Girinti ve çıkıntılar toz küvetindeki fazla tozlar tarafından desteklenmektedir.

Lazer ile seçici sinterleme tekniği orijinal malzemeden işlevsel (gerçek) parçalar üretiminde kullanılma avantajına sahiptir. Fakat lazer ile seçici sinterleme tezgahları stereolitografi ve diğer tekniklerin tezgahlarından mekanik olarak çok daha karmaşıktır. Naylon, cam katkılı naylon, polistren gibi birçok çeşit termoplastik malzeme lazer ile seçici sinterleme tekniğinde kullanılabilir. Yüzey bitirme kalitesi ve hassasiyet stereolitografi kadar iyi olmamakla beraber katı malzeme özelliklerine çok yakın malzeme özelliklerine ulaşılmaktadır. Bu teknik metal ve seramik tozlarından metal ve seramik prototiplerin ve gereçlerin üretimi için de kullanılmaktadır. Prototipler tozların sinterlenmesi ile üretildiği için gözenekli yapıdadır. Özellikle metal parçaların prototip tezgahından alındıktan sonra mekanik

özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla enprenye (impregnation) işlemine sokularak gözeneklerinin başka malzemeler ile doldurulması gerekmektedir.

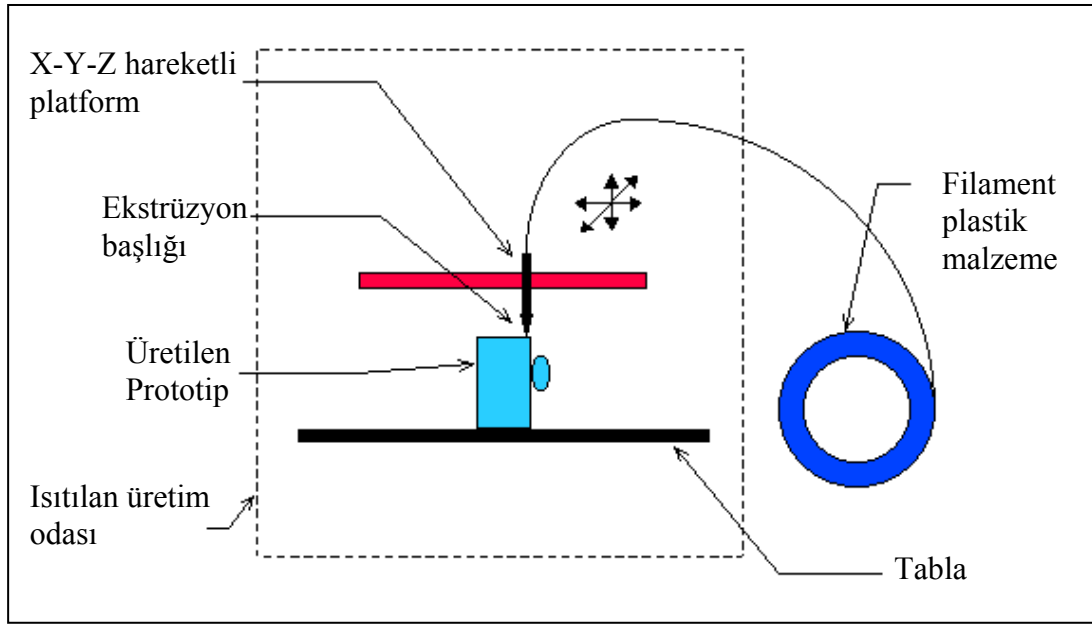


Şekil 3.3. Lazer ile seçici sinterleme sisteminin şematik görünümü [29]

Ergiterek yığma ile model üretimi [29-30]

Ergiterek yığma ile model üretimi stereolitografiden sonra en çok kullanılan prototip tekniğidir. Filament şeklinde ince bir plastik çubuk makaradan açılarak ekstrüzyon başlığının ağzına beslenir (Şekil 3.4). Ekstrüzyon başlığı gelen plastik malzemenin ergitilebilmesi için ısıtılmakta ve plastik akışını açıp kapatmaya yarayan bir mekanizma içermektedir. Ekstrüzyon başlığı hem düzlemde hem de yukarı aşağı hareket eden bir mekanizmaya bağlıdır. Ekstrüzyon başlığı tablanın üzerinde prototipin her katmanını oluşturmak için ince ergimiş plastik damlaları bırakır. Plastik damlaları ekstrüzyon ağzından çıkar çıkmaz katılaşır ve altındaki plastik katmanı ile yapışır. Bütün üretim odası kullanılan plastiğin ergime sıcaklığının hemen altında bir sıcaklıkta tutulmaktadır. ABS, hassas döküm mumu gibi birçok değişik malzeme ergiterek yığma ile model üretimi tekniğinde kullanılmaktadır. ABS iyi dayanıma sahip olmakla beraber polikarbonat (polycarbonate) ve polisülfon

(polysulfone) gibi mekanik ve sıcaklığa karşı daha dayanıklı malzemeler de ergiterek yığma ile model üretimi tekniğinde kullanılmaya başlanmıştır. Yüzey bitirme hassasiyeti yıllar içinde gelişmekle beraber henüz stereolitografi seviyesine ulaşamamıştır. Ergiterek yığma ile model üretimi tekniğinin en yakın rakibi üç boyutlu yazıcı teknikleridir.



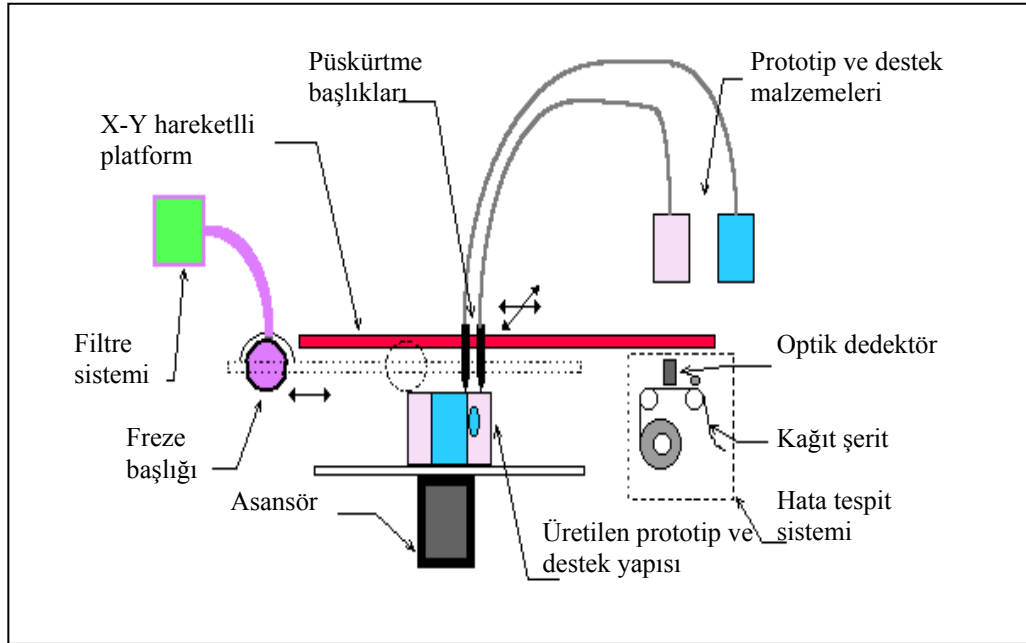
Şekil 3.4. Ergiterek yığma ile modelleme sisteminin şematik görünümü [29]

Malzeme püskürterek 3-B modelleme [29,30]

Birçok firma tarafından mürekkep püskürtmeli yazıcıların çalışma prensiplerine benzeyen metotlarla prototip yapan üç boyutlu yazıcılar üretilmiştir. Prototip yazıcısı ergitilmiş şekilde küvetlerde bekletilen plastik prototip malzemesi ile mum destek malzemesini püskürtmeli yazıcıların başlığına benzeyen başlıklardan püskürterek prototipi oluşturmaktadır (Şekil 3.5). Sıvı şeklindeki malzemeler istenilen şekilde X-Y düzleminde hareket eden püskürtme başlıklarına, beslenip damlacıklar halinde püskürtülerek prototipin katmanları oluşturulmaktadır. Bir katman üretildikten sonra tezgaha bağlı bir freze başlığı üretilen katmanı tarayarak katmanı eşit kalınlığa getirmektedir. Kesilen malzemelerin tozları vakumlanarak emilir ve filtreler tarafından yakalanır. Bu işlemler tüm prototip bitene kadar tekrarlanır. Prototip

tamamlandıktan sonra mum destekler ergitilerek veya değişik sıvılarda çözülerek temizlenir.

Solidscape firmasının malzeme püskürterek prototip üretme tekniğinin [29] diğer bu tekniği kullanan firmalara göre avantajı, bilgisayar kontrollü tezgahlara eşdeğer yüksek çözünürlüğe ve yüzey hassasiyetine sahip olmasıdır. Fakat bu teknik büyük geometriler için çok yavaştır. Diğer üreticiler tamamen farklı teknikler ile püskürterek prototip yapan tezgahlar üretmektedir. Fakat temelde malzemeler ergitilerek kafa veya başlıklardan püskürtülüp tezgah tablasına çarptığında soğuyup setleşmekte ve modeli oluşturmaktadır. Örneğin 3D system firması [29] geniş bir başlıkta sıralanmış bir çok memeden aynı anda malzemeyi püskürterek prototipi üreten ThermoJet Modeler™ isimli bir seri tezgah üretmektedir. Çıkıntı kısımları desteklemek için model bittikten sonra kolayca fırça ile temizlenebilen kıla benzeyen bir destek malzemesi kullanmaktadır.



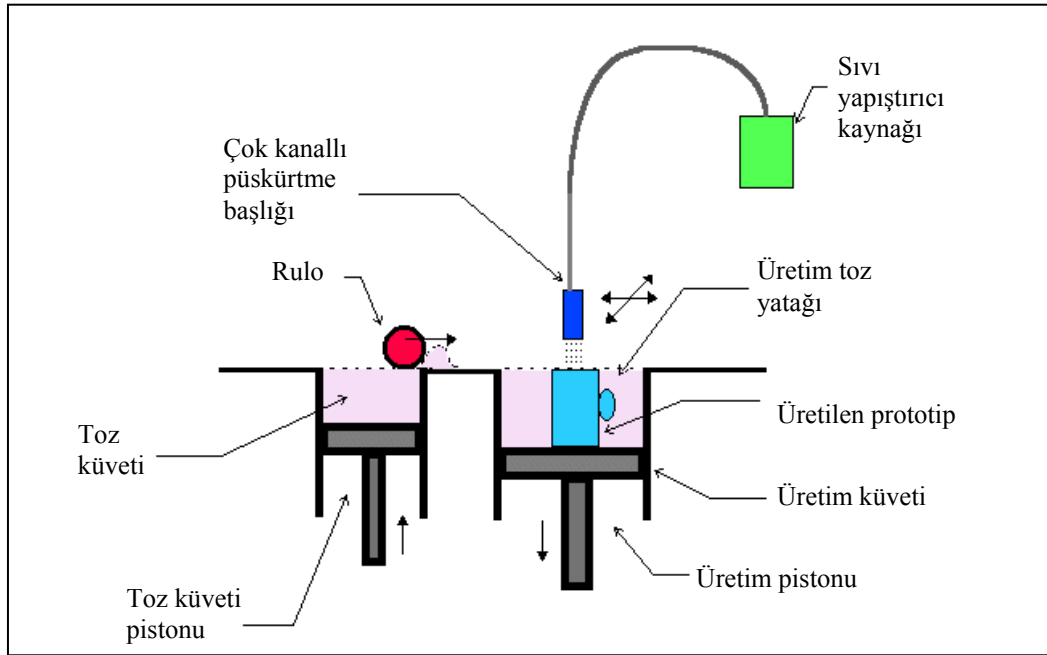
Şekil 3.5. Solidscape firmasının püskürterek üç boyutlu modelleme sisteminin şematik görünümü [29]

Tüm sıcaklık ile ergittikleri malzemeleri püskürterek prototip üreten tezgahların çıktıları kırılıgandır. Bu tezgahların ürettiği prototipler kavramsal modellerden, hassas

döküm maçalarına kadar ve mücevher üretimi gibi sanatsal alanlarda dahi kullanılmaktadır.

Üç boyutlu yazıcıların kullandıkları teknik lazer ile seçici sinterleme prototip tekniğine benzemekte olup, lazer yerine tozları birbirine yapıştırmak amacıyla püskürtülen sıvı yapıştırıcılar kullanılmaktadır [29]. İşlem üretim küveti üzerine bir katman toz sermekle başlar. Bu amaçla ölçülmüş bir miktar toz, toz küveti içindeki pistonun yukarı doğru hareketi ile çıkartılır. Daha sonra hareketli rulo sistemi bu tozu üretim küveti üzerine sıkıştırarak serer. Son olarak birçok püskürtme ucuna sahip kafa iki boyutlu hareket ederek yapıştırıcı püskürtür. Böylece tozun yapıştırıcı alan kısımları birbirine yapışarak prototipin ilk katmanını oluşturmuş olur. İlk katmanı tamamlanmış prototipin bulunduğu üretim küvetindeki piston bir katman kalınlığı kadar aşağı hareket eder. Yukarıda sıralanan adımlar prototip tamamlanana kadar tekrarlanır. Üretim küvetinde toz yatağı içindeki prototip piston yukarı çıkartılarak alınır ve fazla tozlar fırça ile temizlenir. Ham şeklindeki prototip sinterlenerek tamamlanır. Bu teknikte üretim küvetindeki tozlar destek oluşturduğu için dış destek geometrilerine ihtiyaç yoktur (Şekil 3.6).

Üç boyutlu yazıcılar hızlı üretim ve düşük maliyetleri ile önemli avantaja sahiptir. Mevcut en hızlı prototip tekniği üç boyutlu yazıcılardır. Ayrıca renkli prototip üretimi de mümkündür. Fakat hassasiyet, yüzey bitirme kalitesi, üretilen prototiplerin kırılganlığı ve kullanılabilecek malzeme çeşidinin azlığı açısından kısıtlamaları vardır. Bu prototip tekniğinin en yakın rakibi ergiterek yığma ile modellemedir.

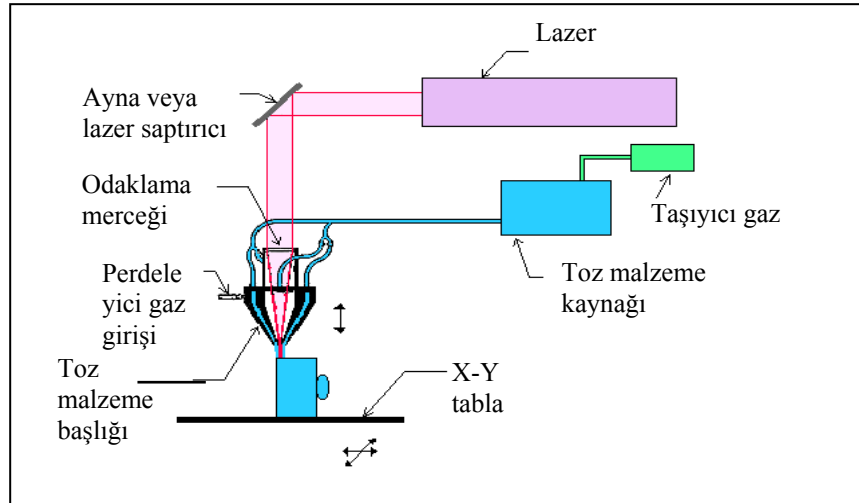


Şekil 3.6. MIT üç boyutlu yazıcı sisteminin şematik görünümü [29]

Lazerle net şekillendirme [29-30]

Lazerle net şekillendirme çok yeni ve önemli bir prototip üretim tekniği olup, geliştirilmesinin daha ilk aşamalarındadır. Yüksek güçlü bir lazerin odak noktasına, lazerin bulunduğu başlığın dışından aktarılan metal tozlarının ergitilerek katman katman prototipin üretildiği bir tekniktir. Başlığın ortasından birkaç mercek ile küçük bir noktaya odaklanan lazer, metal tozlarını ergitmekte kullanılır. Prototip X-Y yönlerinde hareket edebilen bir tabla üzerinde üretilir. Lazerin ve metal tozu besleme sisteminin bulunduğu başlık her katman tamamlandıktan sonra bir katman kalınlığı kadar yukarı kaldırılır. Metal tozları lazer ışınının etrafından kendi ağırlıkları ile veya basınçlı bir gaz ile lazerin odaklandığı noktaya gönderilir. Ortama asal bir gaz verilerek ergimiş metal havuzcuğunun atmosferik oksijen ile teması engellenir (Şekil 3.7). Böylece metalin özellikleri daha iyi kontrol edilir, bir önceki katman ile yapışma ve yüzeyin ergimiş metal ile ıslatılması kolaylaşır. Bu teknikte paslanmaz çelik, inkonel, bakır, alüminyum, titanyum gibi birçok malzeme kullanılabilir. Bu tekniğin en büyük üstünlüğü, tam yoğunlukta, gözeneksiz parçaları kısa sürelerde üretebilmesidir. Üretilen parçalar istenilen ölçülerde olup sonradan çok az işleme

gerektirmektedir. Üretilen parçaların tane yapısı ve malzeme özellikleri, dolu malzemeden işlenerek üretilenlerden daha iyidir. Lazerle net şekillendirme, lazer ile seçici sinterlemeden daha çok malzeme seçeneğine sahiptir. Ayrıca ikincil bir sinterleme operasyonuna ihtiyaç duymaz.

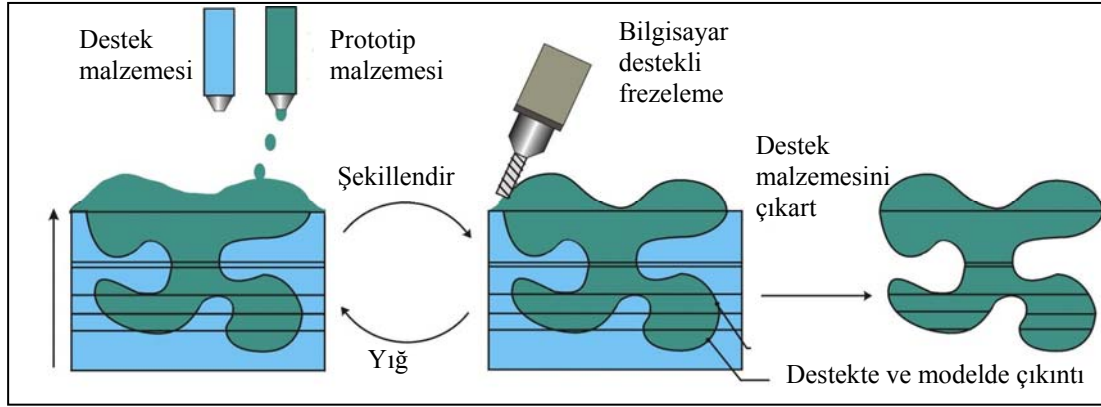


Şekil 3.7. Lazerle net şekillendirme sisteminin şematik görünümü [29]

Şekilleri yığarak üretme [28-30]

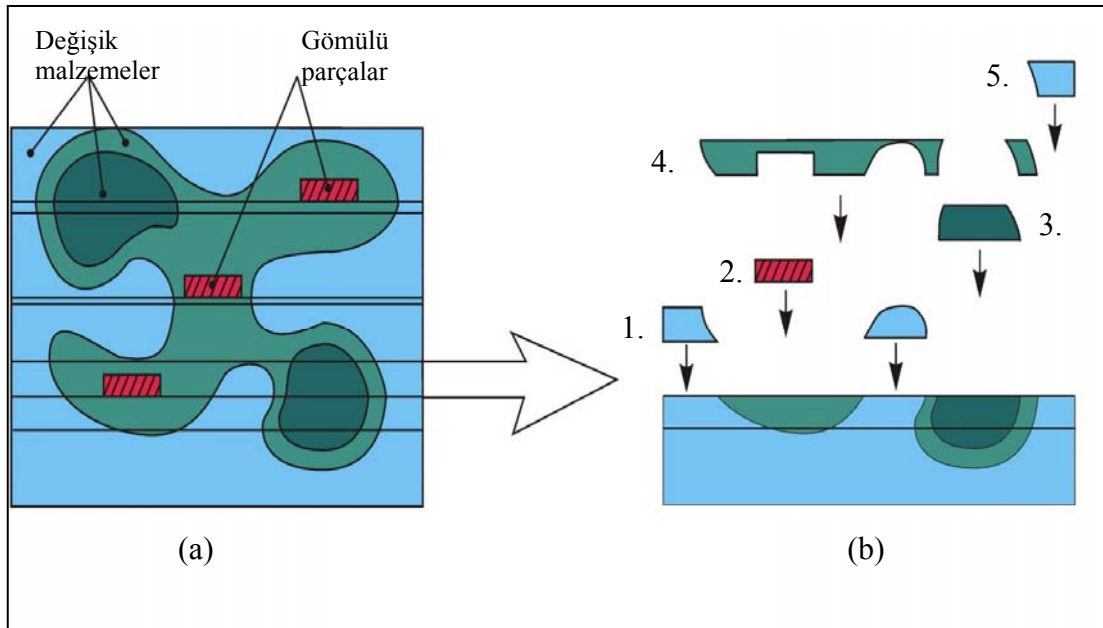
Şekilleri yığarak üretme, karmaşık şekilleri katman katman yığarak ve malzemeleri çıkartarak üretme tekniklerinin avantajlarını birleştirerek üreten bir hızlı prototip tekniğidir. Tek başına malzeme ekleyerek veya çıkartarak üretilmesi mümkün olmayan geometrileri her iki tekniğin avantajlarını kullanarak üretebilen bir tekniktir. Bu tip malzemelere örnek olarak içinde gömülü elektronik bulunan giyilebilir bilgisayar, çelik ve bakır katmanlarından oluşan enjeksiyon kalıbı, minyatür türbin kanatçıkları verilebilir [28-30]. Şekilleri yığma ile üretme tekniğinin amacı malzeme ekleme ve çıkartma tekniklerinin avantajlarını birleştirmektir. Şekilleri yığarak üretme tekniği, modelin ve destek yapısının her katmanını ürettikten sonra diğer katmanı üzerine oluşturmada ilk katmanı işleyerek hassasiyeti ve yüzey kalitesini artırır (Şekil 3.8). Bu teknik çıkıntılı kısımların daha önce üretilip işlenerek istenen şekle getirilen destekleyicilerin üzerine yapılması gibi geometrinin parçalar halinde

hassas bir şekilde oluşturulan yüzeylerin üzerine üretilmesi avantajını kullanır. Tüm model tamamlandıktan sonra özel destek malzemesi modelden temizlenir.



Şekil 3.8. Şekilleri yığarak üretme sisteminin şematik görünümü [28]

Şekilleri yığarak üretme sisteminin karmaşık geometrileri üretebilmesi avantajı ile beraber farklı katmanları değişik malzemelerden yapılmış veya içine gömülü parçaların yerleştirileceği karmaşık ceplerin olduğu heterojen geometrileri üretmesi gibi özellikleri de mevcuttur (Şekil 3.9).



Şekil 3.9. Şekilleri yığarak üretme tekniğinin avantajları a) heterojen geometri örneği, b) geometriyi oluşturan segmentlerin yığılıp şekillendirilme sırası [28]

3.2. Hızlı Takım Üretimi (Hızlı Takımlama) [23-26, 29]

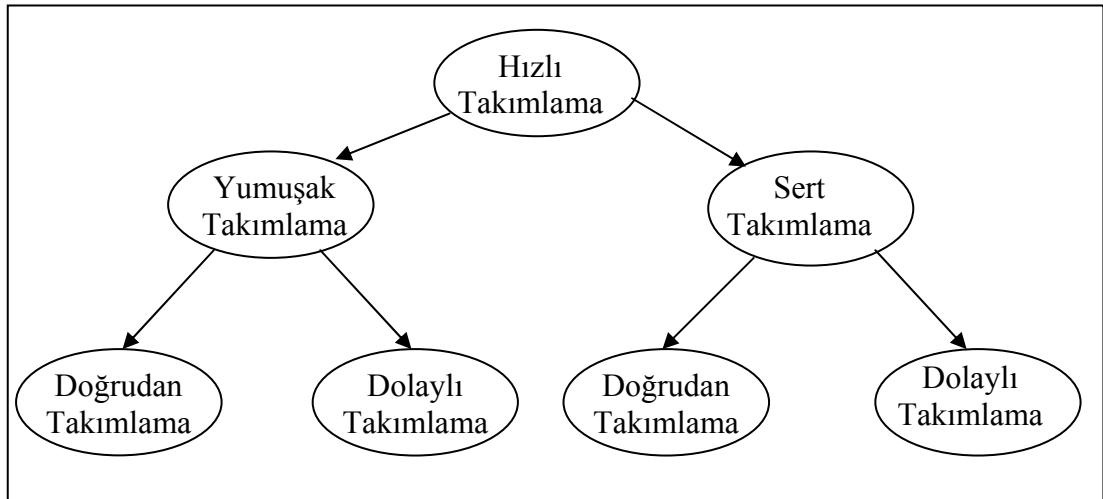
Hızlı takım üretimi hızlı prototip üretme tekniklerini doğrudan veya çeşitli ikincil işlemler ile kuvvetlendirip takım, kalıp ve bunun gibi üretim araçlarının yapımında kullanmak olarak tanımlanabilir. Hızlı takım üretimi gün geçtikçe yaygınlaşmakta, alışılmış teknikler ile takım üretimine önemli bir rakip oluşturmaktadır. Takım üretiminde kullanılan alışılmış teknikler pahalı oldukları ve çok zaman aldıkları için takım üreticileri hızlı prototip tekniklerini kullanarak takım üretim işlemlerini hızlandırmayı amaçlamıştır. Hızlı takımlama, son ürünün üretim gereçlerini (kalıp, elektrot vb.) üretmeden prototip üretim gereçleri ile sınırlı sayıda ürün üreterek, test, reklam, piyasaya arz gibi yerlerde kullanmayı mümkün kılmıştır.

Hızlı prototip tekniklerini kullanarak hızlı bir şekilde prototip üretimi mümkün olmakla birlikte, prototiplerde üretilmek istenen parçanın orijinal malzemesi kullanılamamakta ve seri üretim tekniğinden farklı teknik ile üretim yapılmaktadır. Tasarımcılar seri üretime geçmeden ürünü orijinal malzemesi ve seri üretimde kullanılacak üretim tekniği ile üretilmiş olmak istemektedir. Hızlı takım üretim teknikleri ile seri üretim takımları yapılmadan sınırlı sayıda orijinal malzemeden ürün üretilmesi mümkündür. Hızlı takımlamadaki en önemli zorluk hızlı prototip teknikleri ile üretilen takımların prototip olarak kullanıldıkları durumdan daha yüksek sıcaklık, dayanım, rijitlik ve aşınma dayanımı gibi özellikler göstermek zorunda olmasıdır. Örneğin stereolitografi tekniği ile üretilen enjeksiyon kalıpları stereolitografi reçinesinin malzeme özellikleri nedeniyle yüksek sayılarda enjeksiyon yapılmasına dayanamaz. Bu problemi aşmak için lazer ile seçici sinterleme tekniğinden yararlanarak metal tozları ile enjeksiyon kalıbı üretilir. Fakat yüzey kalitesi ve boyut hassasiyeti stereolitografi kadar başarılı değildir. Başarılı bir takım üretmek için dayanım, hassasiyet, yüzey kalitesi gibi özellikleri beraber sağlamak gereklidir [23-26].

3.2.1. Hızlı takım üretimi tekniklerinin sınıflandırılması

Sınıflandırma amacıyla hızlı takım üretimi sert ve yumuşak, ayrıca doğrudan ve dolaylı olarak isimlendirilebilir (Şekil 3.10).

Küçük üretim partileri için üretilen takımlar yumuşak takım olarak isimlendirilir. Bu takımlar genellikle silikon, epoksi veya erime noktası düşük alaşımlardan veya alüminyum gibi takım çeliğine nazaran işlenilmesi kolay malzemelerden üretilirler. Sert takım isimlendirmesi üretimde daha uzun zaman kullanılacak, büyük partilerin üretiminde yararlanılan takımlar için kullanılmaktadır. Bu takımlar genellikle takım çeliği gibi sert malzemelerden üretilir.



Şekil 3.10. Hızlı takım üretimi tekniklerinin sınıflandırılması

Doğrudan takımlamada hızlı prototip çıktıları direkt takım olarak kullanılır. Örneğin enjeksiyon kalıbında tüm kalıp, maça, ağızlık ve kalıptan parçayı çıkartma sistemi hızlı prototip teknikleri kullanılarak üretilirse takımlama, doğrudan takımlama olarak isimlendirilir. Dolaylı takımlamada ise hızlı prototip çıktıları ikincil işlemler ile kuvvetlendirilerek veya başka malzemeyi takım olarak şekillendirmek için maça olarak kullanılır. Örneğin silikon kalıp yapımı için kalıbı yapılacak malzemenin hızlı prototipi maça olarak silikon içine gömülür. Daha sonra kürlenmiş silikon ikiye kesilip prototip alınarak ortaya çıkan kalıp boşluğuna daha düşük erime sıcaklığına

sahip epoksi veya silikonlar dökülebilir. Bu tip takımlama dolaylı takımlama olarak isimlendirilir. Çizelge 3.2 ve Çizelge 3.3’de firmalar tarafından ticari olarak sunulan dolaylı ve doğrudan takımlama yöntemlerinin isimleri ve genel özellikleri sunulmuştur. Bu metotlar ile enjeksiyon kalıbı, EEİ elektrodu, pres kalıbı vb. gibi bir çok takım üretilebilmektedir.

Çizelge 3.2. Dolaylı takımlama yöntemleri [29]

Yöntem	RTV Silikon kauçuk kalıp	Aluminyum destekli epoksi	Metal püskürtme	Kirksite™	3D Keltool™	Elektroliz ile bakır-nikel kaplama
Tedarik Edilen Firma	bir çok	bir çok	bir çok	bir çok	3D Systems ve lisansörleri	bir çok
Teslim Tarihi	0.5 - 2 hafta	1 - 4 hafta	2 - 4 hafta	3 - 6 hafta	1 - 6 hafta	2 - 3 hafta
Üretililecek Parça Miktarı	10 - 50	100 civarında karmaşık, 1000 civarında basit	50 - 1000	50 - 1000	50 - milyon	10 - 500
Fiyat	\$1000 - \$5000	tipik 3000\$, 2500 \$ ile 10000 \$, karmaşık parçalar için 35000\$	2000\$ - 15000\$	4000\$ - \$15000	2000\$ - 5000\$	1000\$ - \$10000
Baskı Malzemeleri	üretan, epoksi, akrilik	termoplastik	termoplastik	termoplastik	termoplastik	termoplastik
Toleranslar (mm/mm) veya belirtilen ölçüde	±0.127 / 0.508 duvar kalınlığı	±0.051	±0.051	±0.08	±0.025, ±0.025 mm/mm düzlemsellik, 0.04 mm kadar detaylar	±0.127
Sertlik	----	----	----	----	32 Rc, 42 – 46 Rc ısıtıl işlem ile	----
Kalıp Parametreleri	----	----	----	----	maksimum sıcaklık 650°C, 137.9-172.4 MPa	----
Yüzey Hassasiyeti	----	----	----	----	508 - 635 µm	----
Parça Büyüklüğü Sınırları (mm)	----	----	----	----	127x216x127	----
Yöntemin Güçlü Yönleri	en ucuz kalıp, (fakat oldukça pahalı birim parça fiyatı)	gerçek termoplastik malzemeler için en ucuz kalıp	büyük parçalar	karmaşık parçalar	hassasiyet, çok sayıda parça üretimi	karmaşık parçalar
Yöntemin Zayıf Yönleri	takım hayatı, hassasiyet, kolay parçalar için iyi sonuç, sınırlı malzeme türü	uzun parça üretim zamanı, takım hayatı, kolay parçalar için iyi sonuç	takım hayatı, hassasiyet, kolay parçalar için iyi sonuç, dar kanallarda kötü sonuç	hassasiyet	parça büyüklüğü, tek üretici	hassasiyet, keskin köşelerde birikme, ısı transferi

Çizelge 3.2. (Devam) Dolaylı takımlama yöntemleri [29]

Yöntem	Polysteel™	SwifTool™	Rapid Solidification Process (RSP) (Steel and other metals)	RePliFrom™
Tedarik Edilen Firma	Dynamic Tooling	Swift Technologies Ltd.	INEEL tarafından geliştirilen RSP Tooling	RePliForm
Teslim Tarihi	1 - 3 hafta	1 gün - 1 hafta	1 hafta	10 - 30 gün
Üretililecek Parça Miktarı	10000 - 500000	10000 - 50000	10 – 1 milyon	10000 to 50000 (nikel ile tipik), 1000 (bakır ile tipik)
Fiyat	7000\$ - 10000\$	----	----	1.5 ft ² lik kalıbın her iki yarısı için toplam 6500\$
Baskı Malzemeleri	%30 cam katkılı PSS	termoplastik, kauçuk, seramik (planlanmakta)	termoplastik, metal	termoplastik
Toleranslar (mm/mm) veya belrtilen ölçüde	±0.025	----	±0.051	kalıp üretimi için kullanılan modelin toleranslarına bağlıdır
Sertlik	35 Rc – 70 Rc	----	60 Rc ısıt işlem ve temperlemeyle	20 Rc
Kalıp Parametreleri	316 °C	----	tipik enjeksiyon kalıpları ile aynı	204 °C kadar, 103 MPa
Yüzey Hassasiyeti	±0.025, 35 Rc – 70 Rc,	----	mükemmel	model ile aynı, fakat modelin yüzeyi çok pürüzsüz ise modeli kalıptan ayırmak çok zorlaşır
Parça Büyüklüğü Sınırları (mm)	----	254x406	şu anki durumda 152 mm, fakat boyutları artırmak için çalışılıyor	bakır ile 914x1219
Yöntemin Güçlü Yönleri	gömülü soğutma kanalları, %90 çelik, epoksiden 4 kat kuvvetli, ikincil işleme veya insert’de gerek duymaz	çok hızlı, saatler içinde sonuç	%99.5 - %99.8 yoğunluk, orijinal malzemeden daha iyi özellikler, tasarımın erken aşamalarında bile çelik kalıp kullanabilme	büyük parça, model ile aynı yüzey hassasiyeti, karmaşık kalıp ayırım çizgisi mümkün
Yöntemin Zayıf Yönleri	uzun parça üretim zamanı	özel ekipman gerektirir	dar kanallarda kötü sonuç	küçük parçalarda pahalı, kalıbı onarmak veya değiştirmek zor, modellerin hassasiyeti ile sınırlı, seramik ile desteklenmiş kalıplar için uzun parça üretim süresi

Çizelge 3.3. Doğrudan takımlama yöntemleri [29]

Yöntem	Space Puzzle Molding™	Direct Aim™	Copper Polyamide SLS	Direct Metal Laser Sintering (DLMS) (Bronze Alloy)	CNC Aluminum Tooling	RapidTool™ SLS (Steel)	DirectTool™ (Steel)
Tedarik Edilen Firma	Protoform North America	3D Systems and SB's	3D Systems ve SB's (eskiden DTM's Products)	EOS GmbH and SB's	bir çok	3D Systems ve SB's (eskiden DTM's Products)	EOS GmbH ve SB's
Teslim Tarihi	2 - 4 hafta	1 hafta	1 - 5 gün	1 - 4 hafta	4 -16 hafta	3 - 4 gün bitirme işlemsiz, 5 – 10 gün bitirme işlemli, tipik 2 - 5 hafta	1 - 2 hafta
Üretilebilecek Parça Miktarı	100	10 - 50	1 - 500	100 - 1000	50 - 100000	100 Zn, Al, Mg döküm parçalar, 100000 plastik	100 döküm, 100000 plastik parçalar
Fiyat	2000\$ - 10000\$, standart kalıbın %50 fiyatına kadar	2000\$ - 5000\$	----	----	4000\$ - 25000\$	4000\$ - 10000\$	----
Baskı Malzemeleri	termoplastik	düşük erime sıcaklıklı katkısız termoplastik	termoplastik	termoplastik	termoplastik	termoplastik, metal	termoplastik, metal
Toleranslar (mm/mm) veya belirtilen ölçüde	standart enjeksiyon ile aynı, alüminyum kalıplar ile 0.025 - 0.051 mm	± 0.051	----	± 0.051	± 0.025	±0.08 , detaylar 0.127 , çoğu ölçü 0.127 - 0.254 mm	±0.025 - ±0.051
Sertlik	kalıp parçaların malzemelerine bağlıdır	----	Shore D-2240	----	----	Rb 87 D	Brinell 60 - 80
Kalıp Parametreleri	plastikler için normal kalıp parametreleri, 400 ton pres (USA) veya 700 ton-metre pres (avrupa), maks. 141 gr. parça ağırlığı	deneme ve deneyim gerektirir	260 F ⁰	----	----	tipik enjeksiyon makinaları kullanılabilir	----

Çizelge 3.3. (Devam) Doğrudan takımlama yöntemleri [29]

Yöntem	Space Puzzle Molding™	Direct Aim™	Copper Polyamide SLS	Direct Metal Laser Sintering (DLMS) (Bronze Alloy)	CNC Aluminum Tooling	RapidTool™ SLS (Steel)	DirectTool™ (Steel)
Yüzey Hassasiyeti	kalıp parçaların malzemelerine bağlıdır	----	0.0127 mm üretimden hemen sonra, 0.0022 mm bitirme işleminden sonra	----	----	127 µm veya D-3, parlatmadan sonra 25-76 µm veya A-2 ile A-3 arası	Rz=508 µm (çelik bilya ile dövüldükten sonra)
Parça Büyüklüğü Sınırları (mm)	----	----	254x254x152	----	----	203x254x127	254x254x178
Yöntemin Güçlü Yönleri	yüksek hacimli kalıpların üretiminde kullanılabilir, kalıp parçaları istenilen hızlı prototip tekniği kullanılarak üretilebilir	direkt olarak kalıpların üretiminde kullanılabilir	alışılmış kalıplara yakın parça üretim süresi ve sıcaklığı, iç soğutma kanalları, yakma işlemine gerek yok	iç soğutma kanalları, yakma işlemine gerek yok	mükemmel hassasiyet ve yüzey kalitesi, uzun takım hayatı	hassas döküm, tipik enjeksiyon makinaları ve sıcaklıkları kullanılabilir, insana bağlı olmayan bir operasyon	yakma işlemine gerek yok, hassasiyet, yeni malzemeler ile yüzey kalitesi artmakta
Yöntemin Zayıf Yönleri	her parça basımı için kalıbı el ile söküp monte edip yüklemek gerekli, 1000 ile sınırlı parça üretim sayısı, parça başı maliyet alışılmış operasyonlara göre yüksek	malzeme ve operasyon sınırları	sınırlı takım ömrü, düşük baskı basınçları, tozun kopması nedeniyle iç soğutma kanalları sınırlı	sınırlı takım ömrü, düşük baskı basınçları, tozun kopması nedeniyle iç soğutma kanalları sınırlı	karmaşık parçalar için yavaş ve pahalı	yakma işlemine ve emprenye işlemine gerek var, bitirme için işlemeye ihtiyaç var, tozun kopması nedeniyle iç soğutma kanalları sınırlı	bitirme için işlemeye ihtiyaç var, tozun kopması nedeniyle iç soğutma kanalları sınırlı

Çizelge 3.3. (Devam) Doğrudan takımlama yöntemleri [29]

Yöntem	STAT™ (CNC machined composite)	ExpressTool™ (electroplated CNC machined graphite base)	Direct Metal Deposition System DMDS™ (based on Sandia's LENS)	Direct Metal Deposition DMD™	MoldFusion™
Tedarik Edilen Firma	Catalyst PDG	Infinite Group	Optomec ve SB's	POM-Precision Optical Manufacturing	D-M-E ve ProMetal Div. of ExtrudeHone
Teslim Tarihi	küçük parçalar: 6 gün, orta parçalar: 10 gün, büyük parçalar: 15 gün	alışılmış bilgisayar destekli tezgahlar ile aynı	----	2 - 5 hafta (254x254 mm takımla), 12 - 16 hafta büyük takımlar için	1 hafta
Üretilebilecek Parça Miktarı	1500	300000 - 800000	10 - milyon	10 - milyon	100000
Fiyat	küçük parçalar: 3000\$ - 6000\$, orta parçalar: 11000\$ - 18000\$, büyük parçalar: 19000\$ - 28000\$	----	----	alışılmış bilgisayar destekli tezgahlardan %20 fazla	----
Baskı Malzemeleri	Ultem'ler hariç tüm termoplastikler, fenolik ve silikonlar	termoplastik	termoplastik, metal	termoplastik, metal	termoplastik
Toleranslar (mm/mm) veya belirtilen ölçüde	±0.127	----	X-Y: 0.051 mm hassasiyet ve çözünürlük, Z: 0.508 mm hassasiyet ve çözünürlük	±0.127	±0.051
Sertlik	temperleme ile 44 Rc	20 Rc – 40 Rc	45 Rc – 60 Rc	50 Rc	26 Rc – 30 Rc
Kalıp Parametreleri	50 - 500 ton pres	137.9 MPa and 427 °C	tipik enjeksiyon kalıpları ile aynı	tipik enjeksiyon kalıpları ile aynı	206.8 MPa
Yüzey Hassasiyeti	hassas yüzey, fakat aşınmaya açık	----	tipik enjeksiyon kalıpları ile aynı	tipik enjeksiyon kalıpları ile aynı	tipik enjeksiyon kalıpları ile aynı
Parça Büyüklüğü Sınırları (mm)	305x533x584	----	457x457x1067	610x610	305x305x254 (şimdi), 508x1016x254 (gelecekte)
Yöntemin Güçlü Yönleri	sıkı toleranslar, hızlı takım üretimi, reçine ve fiyat seçim imkanı	yüksek ısı transferi %15 ile %30 daha kısa birim üretim zamanı	tam yoğunlukta H-13 takım çeliği, takım onarımı mümkün, çeşitli malzeme kullanımı mümkün, iç soğutma kanalları	soğutma, onarım ve tadilat mümkün, parlatma mümkün	%60 çelik / %40 bronz ısı transferini iyileştiren malzeme, iç soğutma kanalları, geliştirilmiş ısı izolasyonu
Yöntemin Zayıf Yönleri	takım ömrü, fenolik ve silikon reçineler, tek üretici	tek üretici	çıkıntı kısımlarda geometrik kısıtlar, bitirme için işlemeye ihtiyaç var	çıkıntı kısımlarda geometrik kısıtlar, bitirme için işlemeye ihtiyaç var	çok bitirme işlemine ihtiyaç var

4. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ YAZILIMI FLUENT

4.1. Giriş

Fluent karmaşık geometrilerde sıvı akışı ve ısı transferi analizlerini sonlu eleman ağları yardımıyla yapmak için kullanılan bir yazılımdır. Fluent programı tarafından desteklenen sonlu eleman ağları şunlardır: 2B üçgen, 2B dörtgen, 3B dört yüzü eşkenar üçgen olan piramid (tetrahedral), 3B hexahedral, 3B piramit, 3B kama (wedge), karışık (hybrid).

Fluent yazılımı ayrıca akışa göre oluşturulan ağın sıklaştırılması veya seyrekleştirilmesini de destekler. Kendini akışa göre ayarlayan ağ yapısı ile büyük farkların olduğu kesme katmanları veya sınır bölgelerindeki akışın hesaplanması çok daha hassas olarak yapılabilir. Düzenli veya blok yapıdaki ağlar ile karşılaştırıldığında bu özellik iyi bir ağ oluşturmak için gerekli zamanı çok kısaltmaktadır. Çözüme bağlı ağ sıklaştırılması, sıklaştırma analizlerinin yapılmasını kolaylaştırmakta ve daha iyi hassasiyet elde etmek için gerekli hesaplama çabasını çok düşürmektedir. Fluent programı C programlama dili ile yazılmıştır.

4.2. Programın Yapısı

Fluent paket programı aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır;

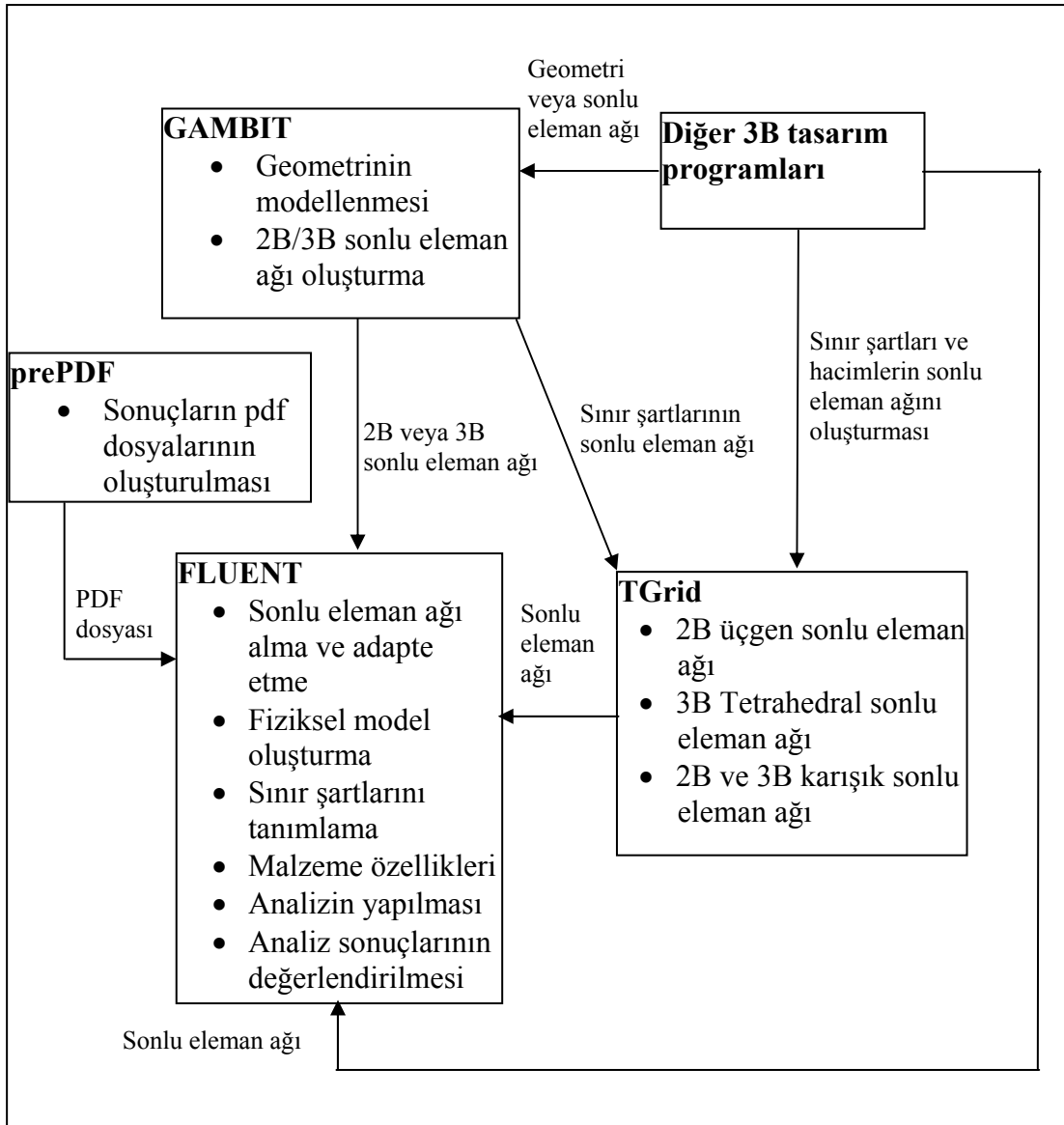
- Fluent, çözücü,
- prePDF, önceden karıştırılmamış yanıcıların modellenmesi için ön işlemci,
- GAMBIT, geometrinin ve ağ yapısının oluşturulduğu ön işlemci,
- TGrid, mevcut sınır bölge ağlarından hacim ağları oluşturabilen ek bir ön işlemci,
- ANSYS, I-DEAS, NASTRAN ve PATRAN gibi bilgisayar destekli tasarım ve analiz programlarından yüzey veya hacim ağlarını alabilmesi için gerekli filtreler ve çevirici programlar.

Bu kısımların temel işlevleri ve ilişkileri Şekil 4.1’de sunulmuştur. GAMBIT kullanılarak geometri ve ağ yapısı hazırlanır. Ayrıca TGrid kullanılarak Gambit veya başka üçüncü parti bir ağ oluşturma programı ile hazırlanmış sınır bölge ağ yapısı üzerine hacim veya istenilen başka tip ağ yapısı eklenebilir. ANSYS, I-DEAS veya MSC Patran/MSC Nastran sonlu eleman programları ile oluşturulan ağlar da Fluent çözücüsü ile çözülebilir. Oluşturulan ağ Fluent tarafından okunduktan sonra diğer tüm işlemler çözücü tarafından yapılır. Fluent çözücüsü tarafından yapılan işlemler; sınır şartların oluşturulması, akışkanın malzeme özelliklerinin ve diğer fiziksel özelliklerinin girilmesi, çözüm işleminin başlatılması, ağın sıklaştırılması ve bulunan sonucun işlenerek grafikler , resimler ile gösterilmesi olarak özetlenebilir.

4.3. Programın Yetenekleri

Fluent çözücüsü aşağıda sıralanan modelleme yeteneklerine sahiptir;

- 2B veya 3B geometrilerin üzerindeki akışların çözüme bağlı olarak kendini ayarlayan düzensiz üçgen/dört yüzü eşkenar üçgen olan piramid (tetrahedral), dörtgen/hexahedral, kama veya piramidler içeren karışık (hybrid) ağların çözümü,
- Sıkışmayan veya sıkışabilen akışkanların modellenmesi,
- Durağan veya geçiş analizlerinin yapılabilmesi,
- Çok akışkan, sürtünmesiz (inviscid), laminar (laminar) ve türbülanslı akışkanların modellenmesi,
- Newton (Newtonian) veya diğer (non-Newtonian) akışların modellenmesi,
- Doğal veya zorlanmış konveksiyon ile ısı transferi analizleri,
- Birleştirilmiş taşıma ve konveksiyon ile ısı transferi analizleri,
- Radyasyon ile ısı transferi analizleri,
- Durağan veya hareketli referans koordinat sistemlerine göre analizler,



Şekil 4.1. Fluent paket programının temel yapısı [54]

- Birden fazla hareket eden koordinat sistemine göre karışan ve kayan ağların etkileşimini dikkate alarak analizler (örneğin helikopterin ana ve kuyruk pallerinin dönerken yapılan analizleri),
- Kimyasal malzemelerin karışması ve reaksiyona girmesi analizleri (örneğin yanma ve yüzeye kimyasal malzemelerin kaplanması),
- Faz değiştirmenin modellenmesi,
- Delikli yapıdaki malzemelerden akışın modellenmesi.

4.4. Fluent ile Analize Genel Bakış

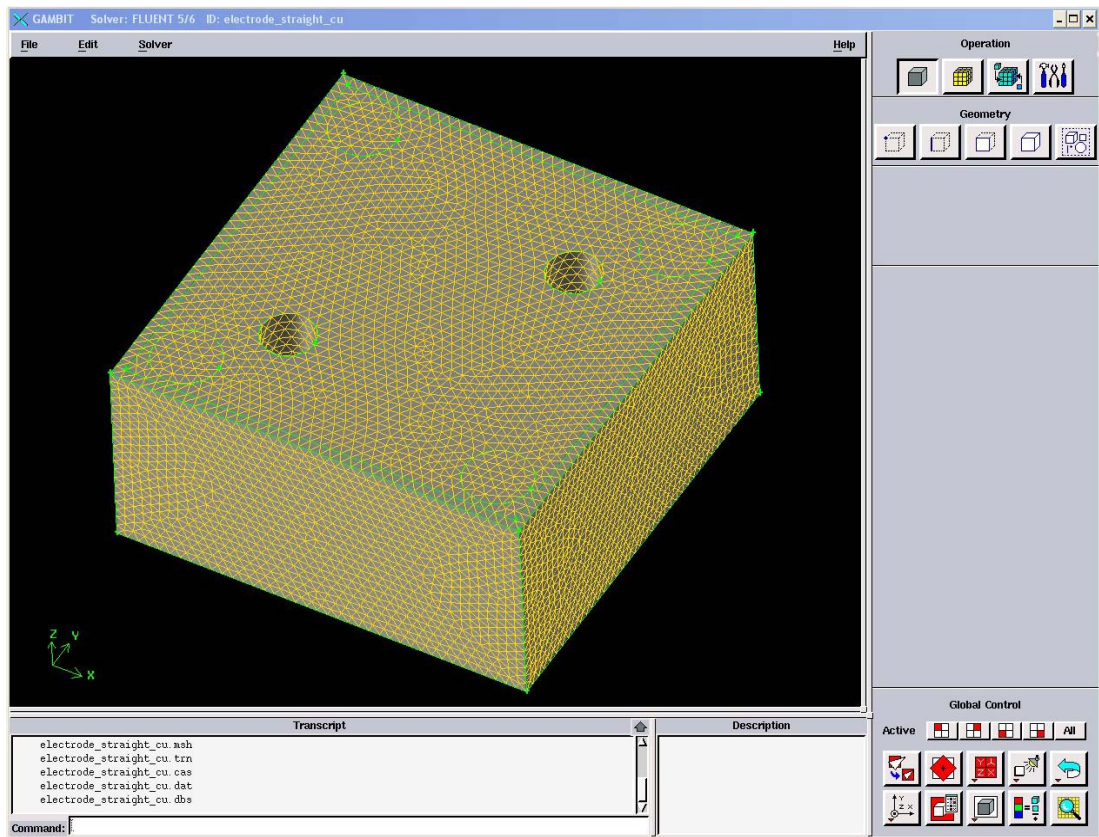
4.4.1. Problem çözüm adımları

Problemin önemli özelliklerini belirleyip, analizi planladıktan sonra aşağıda sıralanan işlemler uygulanır;

1. Geometri ve ağ oluşturulur.
2. 2B veya 3B çözücü çalıştırılır.
3. Oluşturulan ağ ve geometri çözücü tarafından okunur.
4. Ağ kontrol edilir.
5. Çözücü formülasyonu seçilir.
6. Çözülecek temel denklemler seçilir, sürtünmesiz (inviscid), laminar (laminar) veya türbülanslı, kimyasal reaksiyon, ısı transferi modeli vb. gibi. gerekli fan, esanjör, delikli yapı gibi ek modeller belirlenir.
7. Malzeme özellikleri girilir.
8. Sınır şartları girilir.
9. Çözüm kontrol parametreleri ayarlanır.
10. Çözüm alanı başlatılır.
11. Çözüm yapılır.
12. Sonuçlar gözden geçirilir.
13. Sonuçlar kayıt edilir.
14. Gerekli ise ağ yapısı sıklaştırılır, nümerik veya fiziksel model revize edilir.

Çözüm prosedürünün birinci adımında bir geometri modelleyicisi ve ağ üreticisi yazılımı gerekir. Bu amaçla GAMBIT veya farklı bir bilgisayar destekli modelleme yazılımı ve ağ üreticisi kullanılabilir. Ayrıca hacim ağları oluşturmak için TGrid yazılımına GAMBIT'den veya başka bir yazılımdan oluşturulan yüzey ağları da aktarılabilir. GAMBIT programından bir görünüş Şekil 4.2'de sunulmuştur. Çözüm prosedürünün ikinci adımında problemin yapısına göre 2B veya 3B Fluent çözücüsü çalıştırılır. Üçüncü adımda çalıştırılan çözücü tarafından oluşturulan geometri ve ağ yapısı okunur. Dördüncü adımda geometri ve ağ yapısı okunduktan sonra çözücü

tarafından ağ yapısı üzerinde gerekli kontroller yapılır, bozuk veya kötü eleman varsa düzeltilir. Gerekliyse geometri oluşturma sırasında kullanılan birime göre ölçeklendirme yapılır. Daha sonra beşinci adım olarak çözücü formülasyonu seçilir. Fluent çözücüsü birden fazla çözücü formülasyonu desteklemektedir. Bu formülasyonlarla ilgili detaylı bilgi aşağıda sunulmuştur.



Şekil 4.2. Gambit programından bir görünüş

Fluent çözücüsünün kullandığı formülasyonlar

Fluent çözücüsü üç değişik tipde çözücü formülasyonu kullanım imkanı sağlamaktadır. Bunlar;

- ayırık (segregated),
- kapalı birleştirilmiş (implicit coupled),
- açık birleştirilmiş (explicit coupled).

Üç çözücü formülasyonu da çeşitli akışlar için hassas sonuçlar vermekle birlikte, bazı durumlarda belirli formülasyon daha çabuk sonuç vermektedir. Ayrık ve birleşik formülasyonların temel farklılığı süreklilik, momentum, enerji (ısı transferi dikkate alındığında), yanma veya kimyasal reaksiyonlarda tür denklemlerinin sırayla veya beraber çözülmesidir. Ayrık formülasyonda tüm bu denklemler sırayla, birleşik formülasyonda ise beraber çözülür. Her iki tip formülasyonda türbülans veya radyasyon gibi ek hesaplamaları eş zamanlı olarak çözer. Her iki durumda da kontrol hacimine bağlı bir teknik kullanılır. Kullanılan bu teknikte;

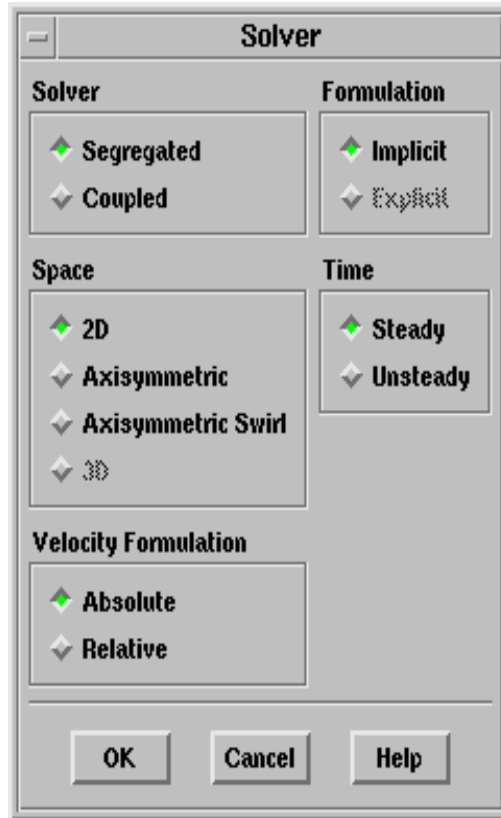
- Kontrol hacimi yapılan hesaplama ağına göre küçük kontrol hacimlerine bölünür,
- Bilinmeyen hız, basınç, sıcaklık vb gibi değişkenlere bağlı matematiksel denklemleri oluşturmak için geçerli denklemlerin kontrol hacimleri içinde integralleri alınır,
- Bu bilinmeyen değerlerin elde edilebilmesi için lineerleştirilen denklemlerin çözümü yapılır.

Her iki nümerik metotda sonlu hacimler tekniğini kullanarak geometrileri parçalara ayırır, fakat denklemleri lineerleştirme ve çözme teknikleri farklıdır. Bu lineerleştirme metoduna göre formülasyon kapalı veya açık olarak isimlendirilebilir.

Kapalı: Bir değişken için ağdaki her eleman komşu elemanlardaki o anda varolan değerler ve bilinmeyenler kullanılarak hesaplanıyorsa bu formülasyon kapalı olarak isimlendirilir. Böylece her bilinmeyen birden fazla denklemde ortaya çıkar ve denklemler bilinmeyenler için eş zamanlı olarak çözülür.

Açık: Bir değişken için ağdaki her eleman komşu elemandaki varolan o anki değerler kullanılarak hesaplanıyorsa bu formülasyon açık olarak isimlendirilir. Böylece her bilinmeyen denklemlerde bir kere ortaya çıkar ve denklemlerin hepsi tek tek çözülebilir.

Fluent programında formülasyon otomatik olarak ayırık seçilidir. Kullanıcı duruma göre formülasyonu kapalı veya açık birleştirilmiş çevirebilir. Yüksek hızlı sıkışabilen akışlarda, kaldırma veya dönme kuvvetleri gibi kuvvetli bünye kuvvetlerinin etkidiği akışlarda veya çok sıklaştırılmış ağ yapısına sahip akışlarda kullanıcı kapalı birleştirilmiş formülasyonu seçebilir. Bu çözücü formülasyonu akış ve ısı transferi denklemlerindeki bilinmeyenleri çok daha hızlı birleştirerek daha çabuk yakınsar. Fakat bu çözücü ayırık formülasyona göre çok daha fazla bilgisayar hafızasına ihtiyaç duyar. Tüm bu avantaj ve dezavantajlara göre çözücü formülasyonları seçilmelidir. Ayrıca her tip formülasyonun desteklediği farklı fiziksel modeller mevcuttur. Ayırık formülasyon birleştirilmiş göre çok daha fazla fiziksel model destekler. Fluent programından Şekil 4.3’de sunulan panel kullanılarak çözücü formülasyonu seçimi yapılır.

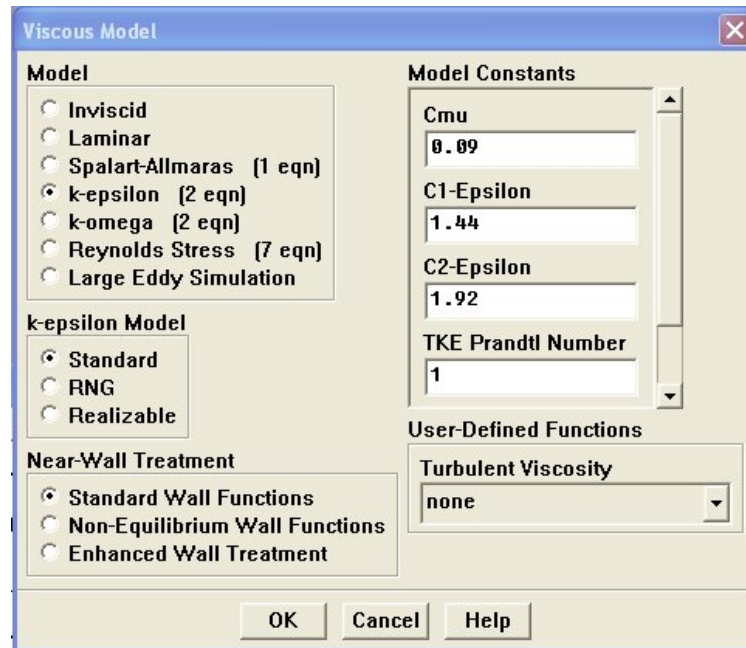


Şekil 4.3. Fluent çözücü formülasyonu seçim paneli [54]

Çözümlenecek temel denklemlerin seçilmesi

Fluent çözüm prosedürü çözücü formülasyonu seçildikten sonra hangi denklemlerin çözüleceğinin tespit edilerek çözücüye girilmesi ile devam eder. Bu amaçla ilk olarak akışın çok akışkan, sürtünmesiz (inviscid), laminar (laminar) veya türbülanslı akış olduğuna göre viskozite modelinin seçilmesi gerekmektedir. Daha sonra eğer ısı transferi hesaplanacaksa enerji denkleminin de hesaplaması gerektiği çözücüye girilir.

Türbülanslı akışlar dalgalanan hız alanı ile belli olur. Bu dalgalanmalar diğer akışla hareket eden momentum, ısı transferi gibi değerlerin de dalgalanmasına neden olur. Bu dalgalanmalar yüksek frekanslı ve düşük genlikli olduklarından bire bir simülasyonlarının yapılması çok fazla hesaplama gücüne ve zamanına ihtiyaç duyar. Bunun yerine denklemler çeşitli şekillerde ayarlanarak düşük genlikli yüksek frekanslı dalgalanmalar ortadan kaldırılır ve yeni denklemler çok daha kısa sürede, kolaylıkla çözülür. Fluent çözücüsü Şekil 4.4 sunulan paneldeki türbülans modellerini desteklemektedir;



Şekil 4.4. Fluent türbülans modeli seçim paneli [54]

Malzeme özelliklerinin ve sınır şartlarının FLUENT'e girilerek analizin başlatılması ve sonuçların görüntülenmesi

Çözülecek denklemlerin belirlenmesinden sonra Fluent çözücüsüne analize hazırlanan modelde kullanılan malzemelerin özelliklerinin girilmesi gereklidir (Şekil 4.5). Malzeme özellikleri girildikten sonra ağ yapısı hazırlanmış geometri üzerinden sınır şartlarının girilmesi gerekmektedir. Fluent programında birçok değişik tipde sınır şartı tanımlanmaktadır (Şekil 4.6). Tanımlanabilen sınır şartlarından giriş sınır şartı kütle girildiği, yani tez çalışmasında da olduğu gibi pompanın su pompaladığı bir giriş olabilir. Sınır şartı olarak giriş seçilip, kütle girişi olarak tanımlandıktan sonra Şekil 4.7'de görülen kütle girişinin kg/s olarak miktarı ve yönü gibi bilgilerin girildiği başka bir giriş paneli daha açılır.

The screenshot shows the 'Materials' panel in FLUENT. The 'Name' field is 'water-liquid'. The 'Material Type' is 'fluid'. The 'Chemical Formula' is 'h2o<1>'. The 'Fluid Materials' dropdown shows 'water-liquid (h2o<1>)'. The 'Order Materials By' section has 'Name' selected. The 'Properties' section shows 'Density (kg/m3)' set to 'constant' with a value of '998.2' and 'Viscosity (kg/m-s)' set to 'constant' with a value of '0.001003'. At the bottom are buttons for 'Change/Create', 'Delete', 'Close', and 'Help'.

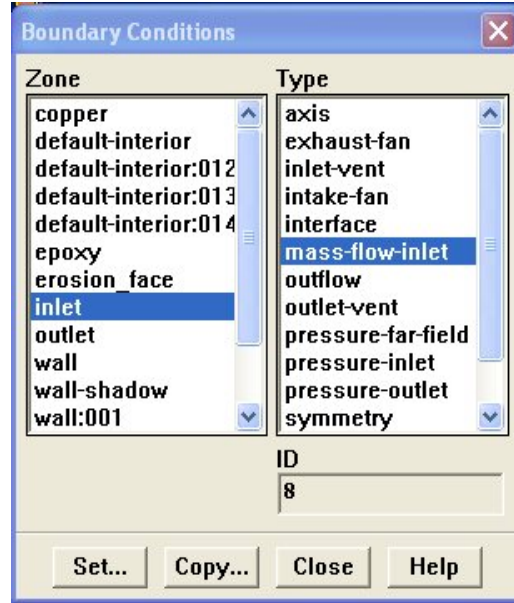
Name	Material Type	Order Materials By
water-liquid	fluid	Name

Chemical Formula	Fluid Materials
h2o<1>	water-liquid (h2o<1>)

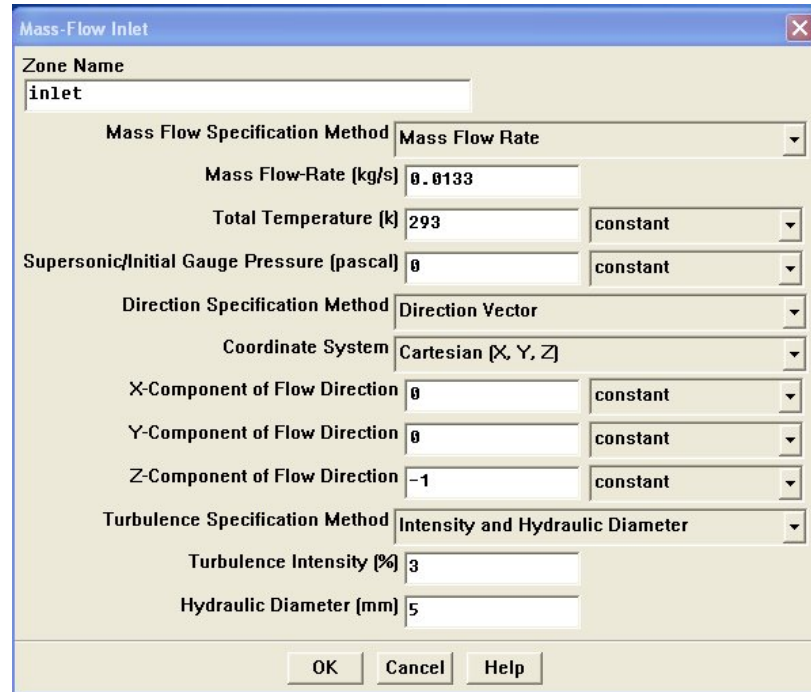
Properties	
Density (kg/m3)	constant 998.2
Viscosity (kg/m-s)	constant 0.001003

Buttons: Change/Create, Delete, Close, Help

Şekil 4.5. Fluent malzeme veri giriş paneli



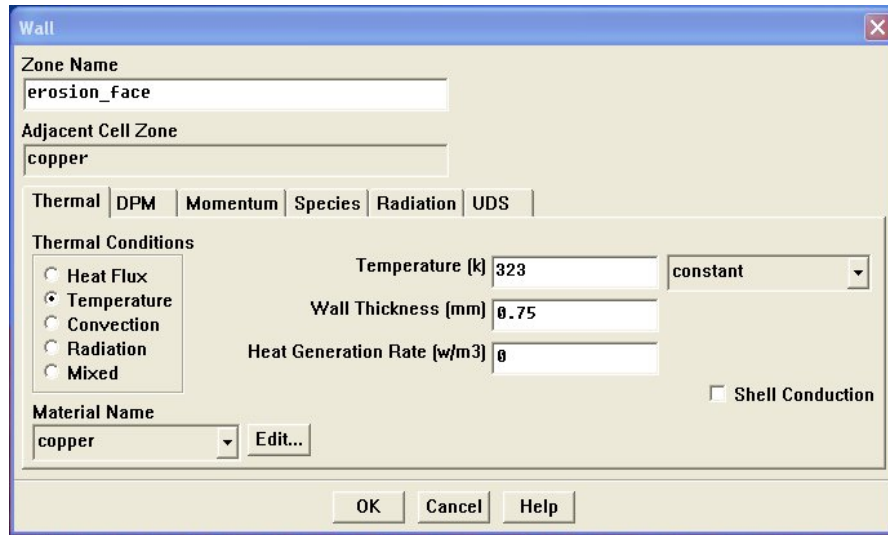
Şekil 4.6. Fluent sınır şartı giriş paneli



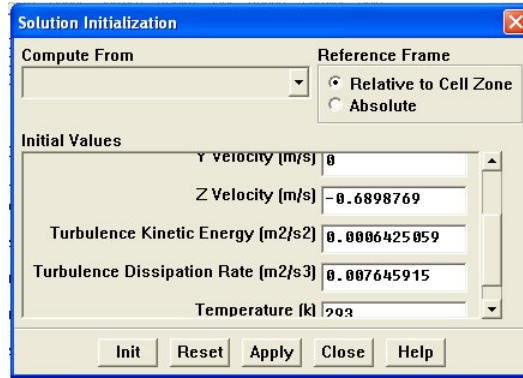
Şekil 4.7. Fluent sınır şartı giriş panelleri (örnek görünüş)

Giriş dışında daha birçok değişik sınır şartı tanımlanmaktadır (örneğin sabit sıcaklıkta bir duvar) (Şekil 4.8). Sınır şartlarının tümü girildikten sonra çözüm

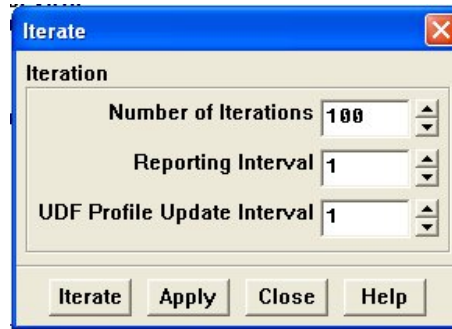
işlemine geçilmeden önce çözümün başlatılması, yani bazı değerlerin otomatik olarak program tarafından hesaplanarak gerekli yerlere girilmesi gereklidir. Bu nedenle Şekil 4.9’da sunulan çözümün başlatılması paneli kullanılmaktadır. Çözüm için gerekli değerler hesaplanarak program tarafından çözüm uzayı başlatıldıktan sonra çözümün iterasyon sayısı girilerek çözüm işlemine geçilir. Bu amaçla Şekil 4.10’da sunulan iterasyon paneli kullanılır. İterasyon düğmesine basıldığında Fluent çözücüsü belirtilen sayı kadar iterasyon yapar ve yakınsanmış bir sonuç elde edemezse durur. Belirtilen iterasyon sayısından önce bir sonuca yakınsanırsa diğer iterasyonlar yapılmaz ve program yakınsamanın elde edildiği iterasyonda durur. Fakat yakınsama elde edilemezse belirtilen sayıya kadar iterasyonlara devam edilir. İterasyonlar yapılırken kullanıcı tarafından belirlenen artık değerleri (residual) ekranda grafiksel olarak gösterilir. Bu grafiklerden de analizin yakınsama durumu takip edilebilir. İterasyonlar tamamlandıktan sonra Şekil 4.11’de sunulan görüntüleme paneli kullanılarak basınç, sıcaklık, hız gibi istenen değişik grafikler çizilerek kullanıcı tarafından incelenebilir.



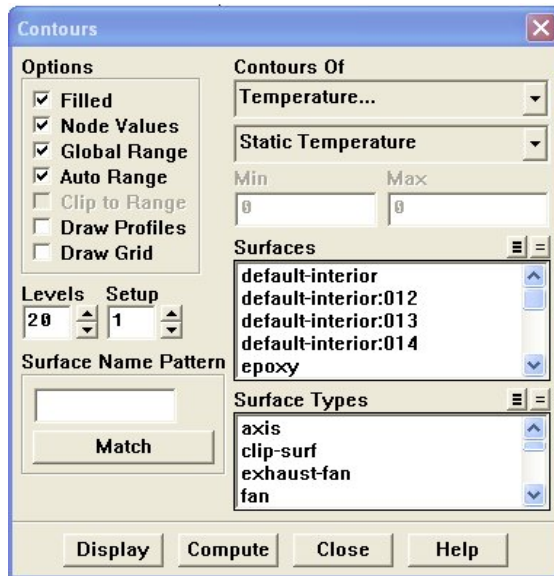
Şekil 4.8. Fluent sınır şartı giriş panelleri (örnek görünüş)



Şekil 4.9. Fluent çözümü başlat paneli



Şekil 4.10. Fluent iterasyon paneli



Şekil 4.11. Fluent kontur grafikler çizme paneli

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Tez çalışmasında yapılan deneylerde, stereolitografik (SL) elektrotlar ile alıılmış bakır elektrotların (bundan sonra “dolü bakır elektrot” kısaca “bakır elektrot” olarak anılacaktır) performansının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Bu karşılaştırma yapılırken işparçası işleme hızı (İİH), elektrot ön yüz aşınması (Δl_F) ve işparçası yüzey pürüzlülüğü (Ra) gibi temel performans kriterleri kullanılmıştır. Bu temel performans kriterlerine ek olarak, SL elektrotların bozulmasının en büyük nedeni olan işleme sırasında oluşan sıcaklıklar da ölçülmüştür.



Resim 5.1. Deney düzeneğinin ana parçaları

Deney düzeneği Resim 5.1’den görüleceği üzere;

- A.....Furkan EDM M25A Elektro erozyon tezgahı
- B.....Veri toplama sisteminin bağlı olduğu bilgisayar
- C.....Veri toplama sistemi
- D.....Soğutma suyu dolaştırma sistemi pompası

gibi kısımlardan oluşmaktadır. Bu ana kısımlar yanında birçok yardımcı parçalar birleştirilerek deney düzeneği oluşturulmuştur.

Tez çalışmasında SL elektrotların üretimi için kullanılan stereolitografi tezgahı SLA 5000 3D Systems tarafından üretilmiş bir tezgahdır (Resim 5.2).



Resim 5.2. 3D Systems SLA5000 stereolitografi tezgahı ve kür fırını (ASELSAN-MGEO)

5.1. Elektro Erozyon Tezgahı

Deneysel çalışmalar, Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Makina Mühendisliği Bölümü, Takım Tezgahları Laboratuvarı'nda bulunan EDM M25A tipi EEİ tezgahında gerçekleştirilmiştir (Resim 5.3). Tezgaha ait teknik özellikler Çizelge 5.1'de verilmiştir.



Resim 5.3. Tez çalışmasında kullanılan EEİ tezgahı Furkan EDM M25A

Çizelge 5.1. EDM tezgahı teknik özellikleri

Jeneratör	
Güç (220 V, 50 Hz, 3f)	3 KVA
Boşalım Akımı Kademeleri	1,5-3-6-12-25 A
Vurum Süresi Kademeleri	3-6-12-25-50-100-200-400-800-1600 μ s
Bekleme Süresi Kademeleri	3-6-12-25-50-100-200-400-800-1600 μ s
Tezgah Gövdesi	
İş Tablası Ölçüleri (XxY)	550 x 250 mm
Tabla Hareket Ölçüleri (XxY)	300 x 200 mm
Tabla Hareket Hassasiyeti (X-Y)	0,02 mm
İşleme Haznesi Ölçüleri (XxYxZ)	860 x 470 x 280 mm
Maksimum İşparçası Ölçüleri (XxYxZ)	660 x 470 x 280 mm
Z - Eksenli Kontrol Mekanizması	Servo Kontrol
Z - Eksenli Hareket Kursu	160 mm
Z - Eksenli Hareket Hassasiyeti	0,01 mm
Dielektrik Sıvı Sistemi	
Depo Ölçüleri (XxYxZ)	950 x 580 x 600 mm
Pompa Kapasitesi	50 lt/dak.

5.2. İşleme Parametreleri

Bütün deneylerde boşalım akımı (i_e), vurum süresi (t_i), dielektrik sıvı uygulama basıncı ve şekli, kutuplama, bekleme süresi (t_o), dielektrik sıvı tipi, işparçası ve işleme derinliği sabit tutulmuştur. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotlar ve bakır elektrotlar için aynı işleme parametreleri kullanılmış ve işlemeye SL elektrotlar bozulana veya ayarlanan işleme derinliğine ulaşılan kadar devam edilmiştir. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde SL elektrotların genelde 4-6 A gibi bitirme işlemi akımlarında test edildiği görülmüştür. Tez çalışmasında, SL elektrotların kaba işlemede de kullanılabileceğini göstermek için 12 A işleme akımı seçilmiştir. Çizelge 5.2’de tez çalışmasında kullanılan işleme parametreleri sunulmuştur.

Çizelge 5.2. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri

Deney Parametreleri	Değerler
Boşalım Akımı (i_e) [A]	12 A
Vurum Süresi (t_i) [μ s]	50
Dielektrik Sıvı Uygulama Şekli	Yanal püskürtme
Püskürtme Basıncı (P) [bar]	0,5
Kutuplama	Elektrot (+), İşparçası (-)
Bekleme Süresi (t_o) [μ s]	25
Dielektrik Sıvı	Gaz Yağı
İşparçası Malzemesi	Çelik
Çalışma-Bekleme	∞
Servo Gerilimi	50-55 V
İşleme Derinliği [mm]	4

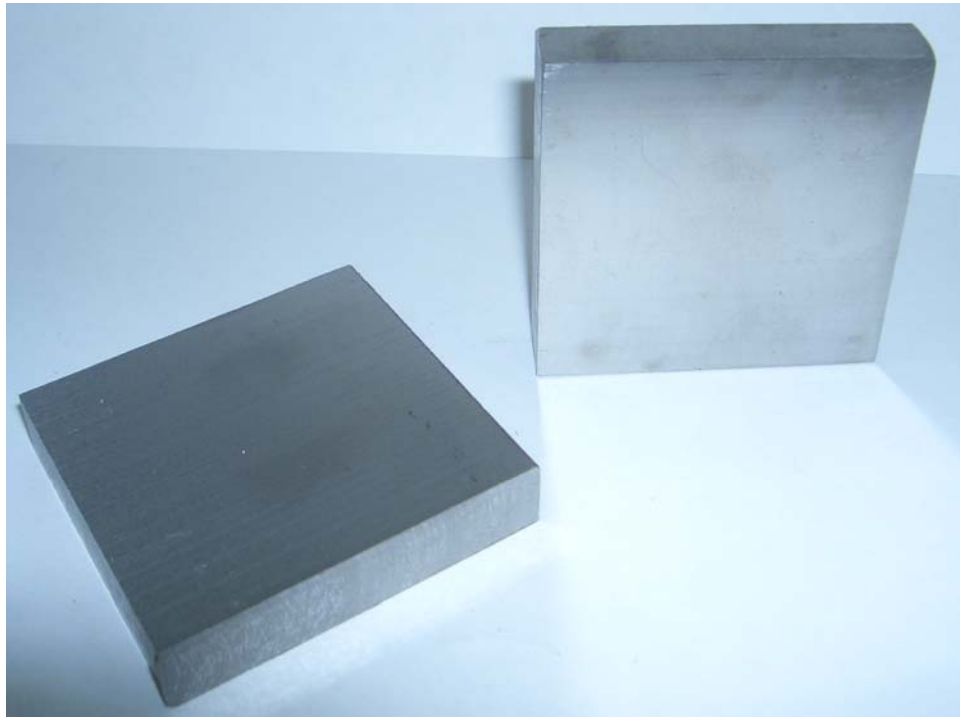
5.3. İşparçası

Tez çalışmasında işparçası olarak SAE 1040 çeliği (189 BS) kullanılmıştır. Bu çeliğin malzeme özellikleri Çizelge 5.3’de sunulmuştur.

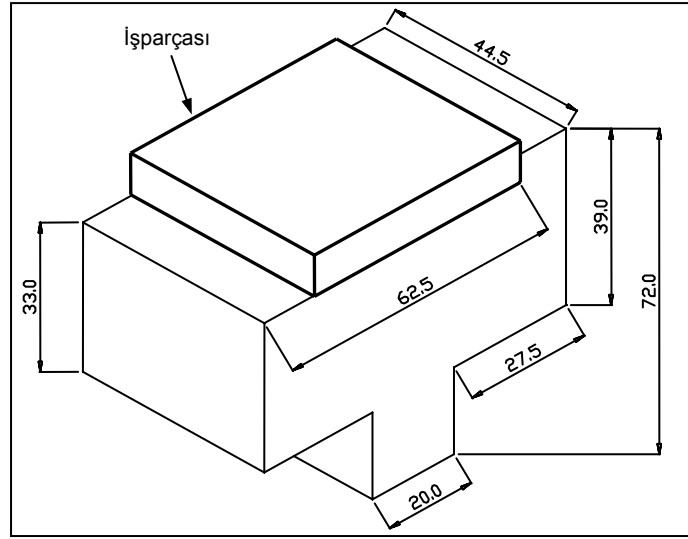
Çizelge 5.3. İşparçası malzeme özellikleri

El.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	Co	Cu	W	Fe
%	0,3754	0,208	0,744	0,0081	0,0269	0,0727	0,0148	0,097	0,0183	0,0243	0,1495	0,0915	98,175

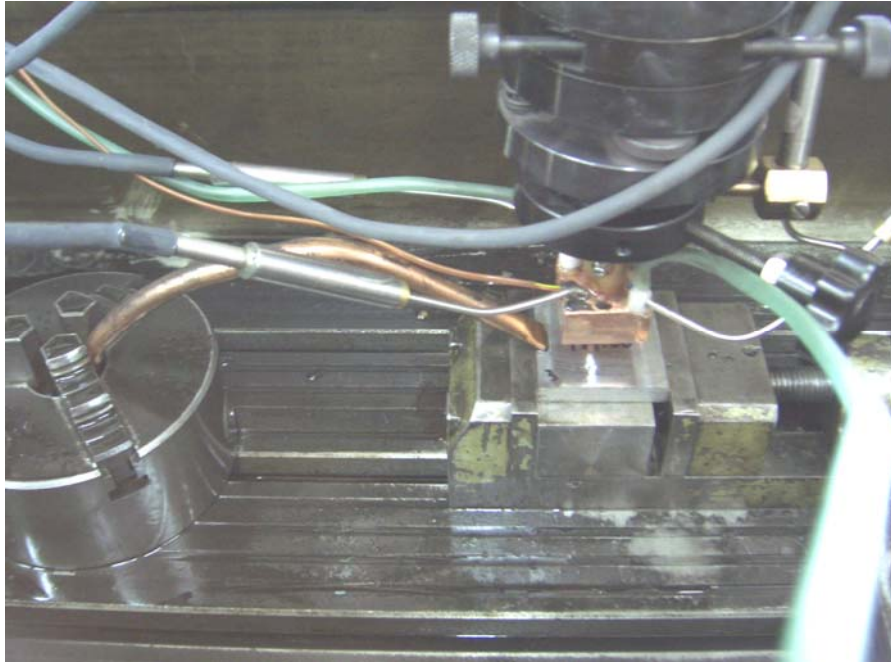
Lama şeklindeki işparçası malzemesi 46×52×10 mm ölçülerinde kesildikten sonra frezelenerek düzeltilmiştir. Daha sonra geniş paralel iki yüzey taşlanarak işparçası son ölçülerine getirilmiştir (Resim 5.4). Deneylerde işparçalarının daima aynı pozisyonda bağlanabilmesi için Resim 5.5’de görülen mengene kanalına kızaklanan işparçası merkezleme aparatı kullanılmıştır (Şekil 5.1).



Resim 5.4. İşparçaları



Şekil 5.1. İşparçası merkezleme aparatı



Resim 5.5. Elektro erozyon tezgahı tablasının deney öncesi görünümü

Elektrotların üretildiği stereolitografi reçinesinin, SL elektrotların üzerine kaplanan bakır katmanın ve soğutma sıvısı olarak kullanılan suyun malzeme özellikleri Çizelge 5.4’de sunulmuştur. Tez çalışmasının analitik kısmında Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yazılımı Fluent ile analizler yapılmıştır. Bu programda soğutma kanallı SL elektrotlar modellenerek, soğutma suyunun elektrotların sıcaklığını ne

kadar düşürebileceği ve reçinedeki sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Bu nedenle Çizelge 5.4’de sunulan malzeme özellikleri yazılıma girilmiştir. Ayrıca stereolitografi reçinesi ile ilgili detaylı malzeme özelliklerini gösteren üretici firmanın veri sayfası EK-1’de sunulmuştur.

Çizelge 5.4. Stereolitografik reçinenin, bakırın ve soğutma sıvısı suyun ısı transferi analizlerinde kullanılan malzeme özellikleri

Malzeme Özelliği	SL 5195 Stereolitografi reçinesi	Elektrolitik bakır	Soğutma sıvısı (su)
Yoğunluk ρ (kg/m ³)	1180	8978	998.2
Özgül ısı sığası C_p (J/kg-K)	1610.12	381	4182
Sıcaklık iletim katsayısı K (W/m-K)	0.182	387.6	0.6
Isı ile deformasyon sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	47 (66 PSI basınçta)	---	---
Cam geçiş sıcaklığı (T_g , $^{\circ}\text{C}$)	67-82	---	---

5.4. Elektrotlar

Deneysel çalışmada kullanılan elektrotların ölçüleri 30x30x15 mm olarak seçilmiştir. Elektrot boyutlarının literatürdeki çalışmalara göre daha büyük seçilmesinin nedeni, ısı çiftlerinin ve soğutma kanallarının rahatlıkla elektrota yerleştirilebilmesidir. Soğutma kanalları yerleşimini göstermek amacıyla elektrotların işleme yüzünün görünüşü ve bazı önemli ölçüleri Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Soğutma kanallarının ve ısı çift deliklerinin çapı, bulunabilecek en küçük çaplı hortum ve ısı çiftlere göre seçilmiştir. Soğutma kanallarının çapı 5 mm, ısı çift deliklerinin çapı ise 4 mm olarak üretilmiştir. Kullanılan hortumun iç çapı 5 mm ve topraklamasız kalkanlı ısı çiftlerinin çapı da 3 mm’dir. Bakır kabuktan soğutma suyuna ısı transferinin kolay olması için kullanılan soğutma kanalları SL elektrodun yüzeyine 0.5 mm mesafede dolaştırılmıştır. Kullanılan tüm elektrotların dış ölçüleri aynıdır. Toplam dört değişik tip elektrot üretilmiştir.

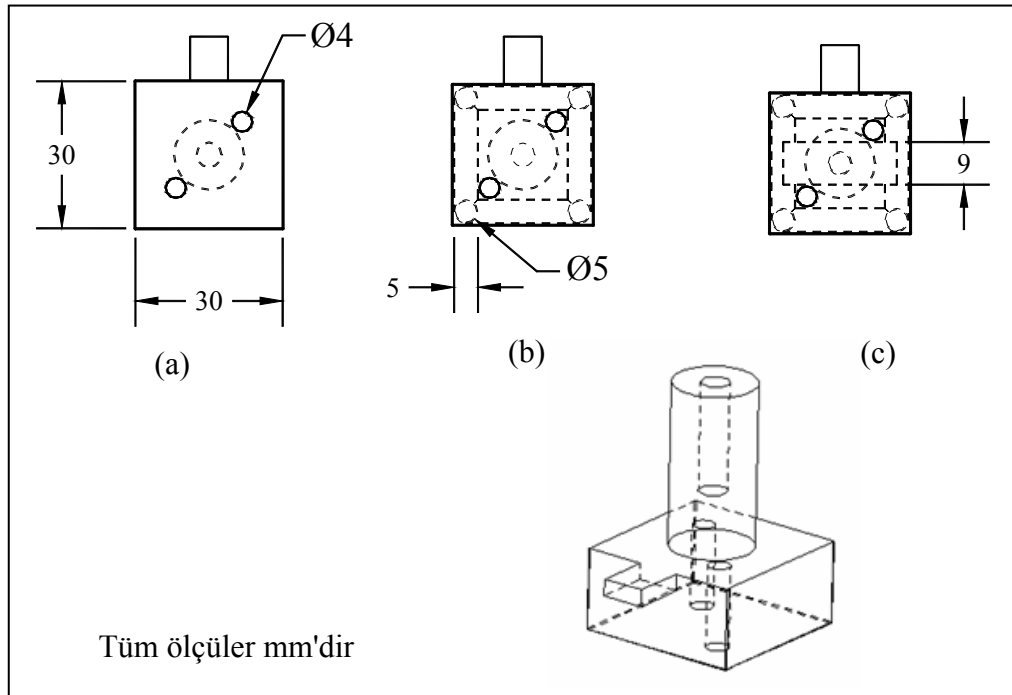
- 1) Bakır elektrot
- 2) Soğutma kanalsız SL elektrot (Şekil 5.2 (a))
- 3) Dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrot (Şekil 5.2 (b))
- 4) Dört kenarı ve işleme yüzünde geniş soğutma kanallı SL elektrot (Şekil 5.2 (c))

Elektrotların diğer geometrik detayları, su kanallarının ve ısıl çiftlerin yerleşimi EK-2'deki teknik resimlerde sunulmuştur.

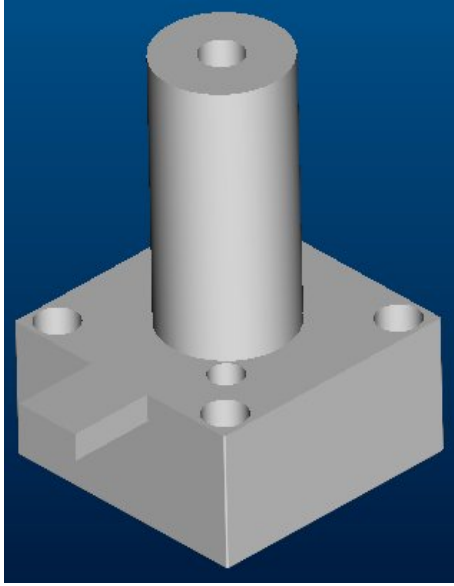
5.4.1. SL elektrotların tasarımı ve üretimi

SL elektrotların tasarım ve üretim adımları aşağıda özetlenmiştir;

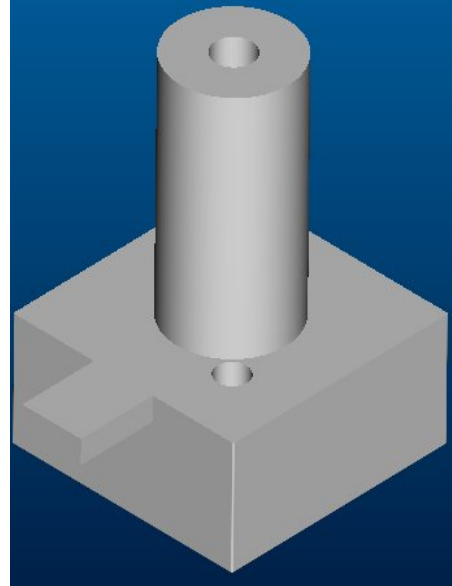
- 1) Soğutma kanallı ve kanalsız SL elektrotlar Pro-Engineer 3-boyutlu tasarım programı kullanılarak tasarlanmıştır. Şekil 5.3, Şekil 5.4. ve Şekil 5.5' de elektrotların tasarım programından alınan görüntüleri sunulmuştur.



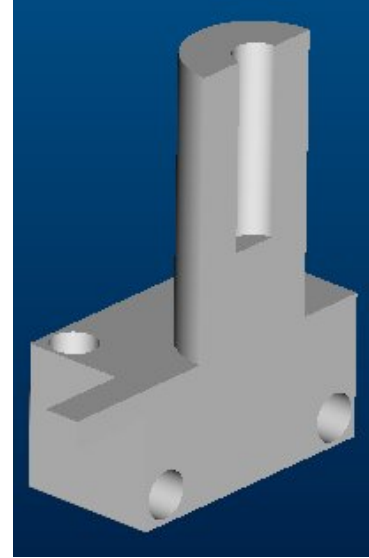
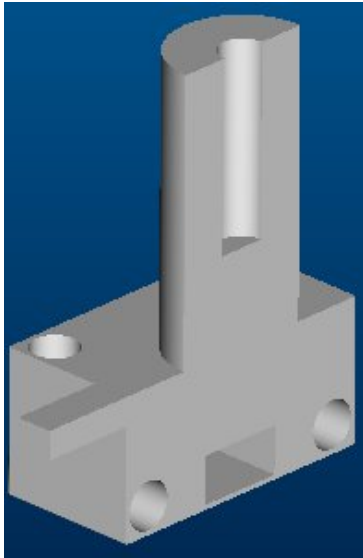
Şekil 5.2. SL elektrotların işleme yüzü görünüşleri



Şekil 5.3. Soğutma kanallı elektrodun Pro-Engineer modeli

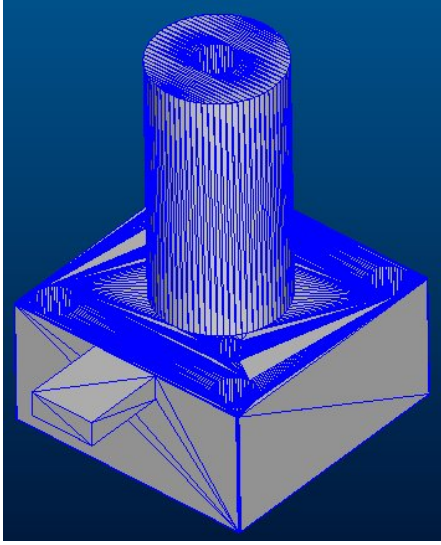


Şekil 5.4. Soğutma kanalsız elektrodun Pro-Engineer modeli

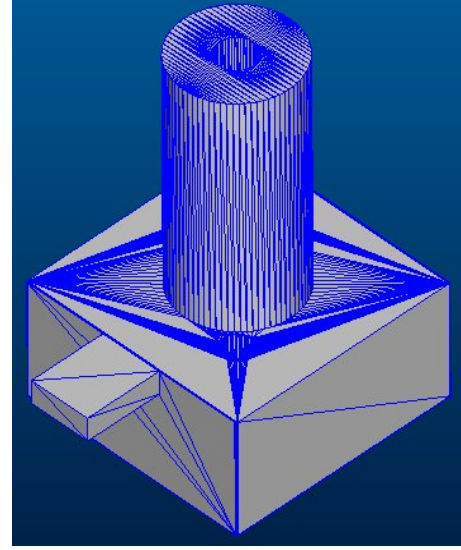


Şekil 5.5. İki değişik tipte soğutma kanallı elektrodun Pro-Engineer programından alınmış kesitleri

2) Elektrodun üç boyutlu modellemesi Pro-Engineer programında tamamlandıktan sonra, aynı programın stereolitografi üretimi için gerekli STL dosyası oluşturma yeteneği kullanılarak STL dosyaları oluşturulmuştur. Şekil 5.6'da soğutmalı ve Şekil 5.7'de soğutmasız elektrotların STL dosyası oluşturma işlemi sonundaki görünüşleri sunulmuştur.



Şekil 5.6. Soğutma kanallı elektrodun STL alınmış görünümü



Şekil 5.7. Soğutma kanalsız elektrodun STL alınmış görünümü

Stereolitografik model üretimi için gerekli STL dosyası bilgisayar destekli tasarım programları ile yapıldığı gibi sadece STL oluşturma için kullanılan yazılımlarda da mevcuttur. Tez çalışmasında kullanılan bilgisayar destekli Pro-Engineer tasarım yazılımında STL kaydetme opsiyonu olduğu için doğrudan STL dosyası oluşturulabilmiştir. STL dosyası katı modelin yüzeylerinin üçgenlere bölünmesi ile meydana getirilir. Eğri yüzeylerin hassas olabilmesi için üçgen sayısının artırılması gereklidir. Tez çalışması için yapılan katı modeller küçük oldukları için STL dosyasının büyüklüğü gözardı edilerek mümkün olan en küçük üçgen boyutları kullanılmıştır.

Aşağıda sunulan parametreler Pro-Engineer yazılımının STL dosyası oluşturma sırasında sorduğu parametrelerdir. Kiriş uzunluğu (chord height) değeri üçgenlerin kenar uzunluğunu ayarlayan bir parametredir. Bu parametre minimum seçilerek yüzeylerin hassasiyeti artırılır. Açı kontrolü (angle control) üçgenlerin kenarları arasında meydana gelebilecek açılarını sınırlandıran bir parametre olup çok sivri (ince) üçgenlerin oluşarak tezgahın üretim sırasında problem yaşamasını engelleyen bir parametredir. Genellikle bu değer 1 olarak kullanılır.

a) Soğutma kanallı elektrotlarda kullanılan değerler;

- Dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrot;

Kiriş uzunluğu: 0.0067, açı kontrolü: 1

Bu parametreler ile toplam oluşan üçgen sayısı; 6218 üçgen

- Dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrot;

Kiriş uzunluğu: 0.0067, açı kontrolü: 1

Bu parametreler ile toplam oluşan üçgen sayısı; 5920 üçgen

b) Soğutma kanalsız elektrotlarda kullanılan değerler;

Kiriş uzunluğu: 0.0067, açı kontrolü: 1

Bu parametreler ile toplam oluşan üçgen sayısı; 3354 üçgen

3) STL dosyası oluşturma işlemi tamamlandıktan sonra elektrotların üretileceği 3D Systems firması stereolitografi makinasının STL hazırlama yazılımı ile bu dosyalara işlemler yapılması gereklidir. 3D Maestro yazılımı STL dosyasını alıp SLA5000 tezgahı tarafından prototipe çevrilmesi için gerekli dosyaları oluşturur. Şekil 5.8'de 3D Maestro programının elektrotların tezgahın tablasına yerleşimini ayarlarken alınmış bir görünümü sunulmuştur. Bu program ile yerleşim işleminin dışında yapılan işlemler aşağıdaki gibidir;

a) STL dosyasının okunması.

b) Tezgahın çalışma zarfına göre prototiplerin yerleştirilmesi.

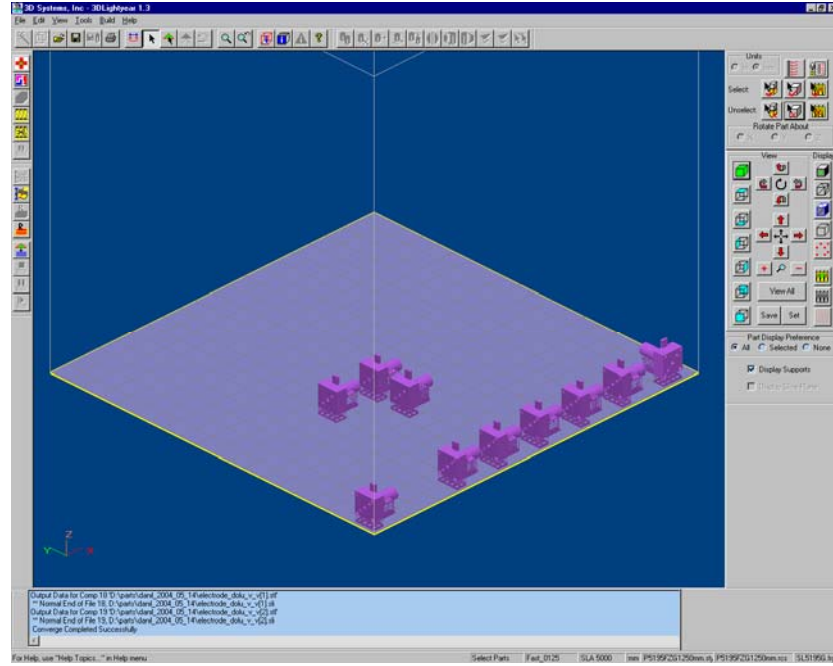
c) Prototiplerin lazerle taranacak katmanlara ayrılması.

d) Prototipin üretimi sırasında çıkıntı kısımların yığılmasını, ada şeklinde ana yapı ile bağlantısı olmayan kısımların yüzüp yer değiştirmesini engellemek için destek yapılarının oluşturulması.

e) Üretim sırasında lazerin takip edeceği yolların oluşturulması.

f) Verilerin kaydedildiği ve tezgahın kullanacağı dilde yazılmış SML dosyasının oluşturulması.

g) Üretim için tezgaha dosyanın gönderilmesi.



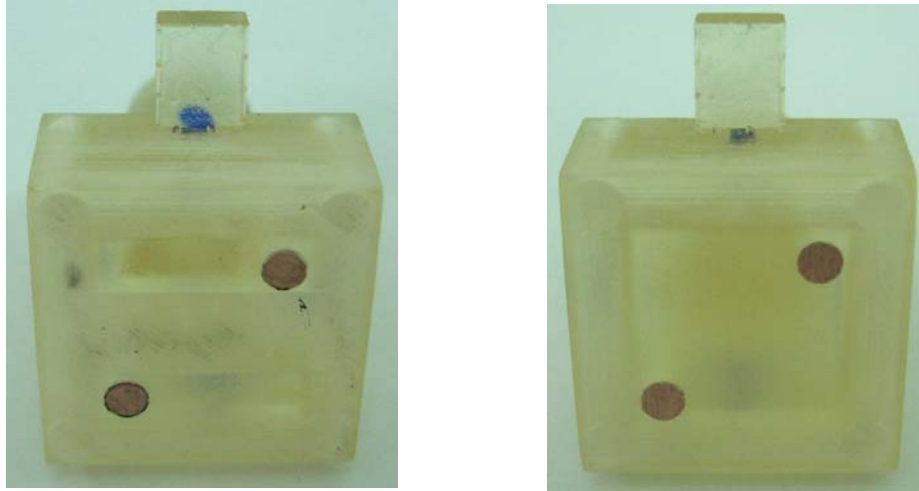
Şekil 5.8. 3D Maestro programından STL dosyası işlenirken bir görünüm

4) Üretilen ilk 10 adet elektrodun SLA5000 tezgahında üretimi için gerekli süre 7 saat 43 dakika olmuştur. Üretim tamamlandıktan sonra elektrotlar tezgahattan alınıp destekleri temizlenmiştir. Daha sonra elektrotların kurlenmesinin tamamlanması için 30 dakika kür fırınında tutulması gerekmektedir. Resim 5.6 de kürü tamamlanmış elektrotlar görülmektedir.

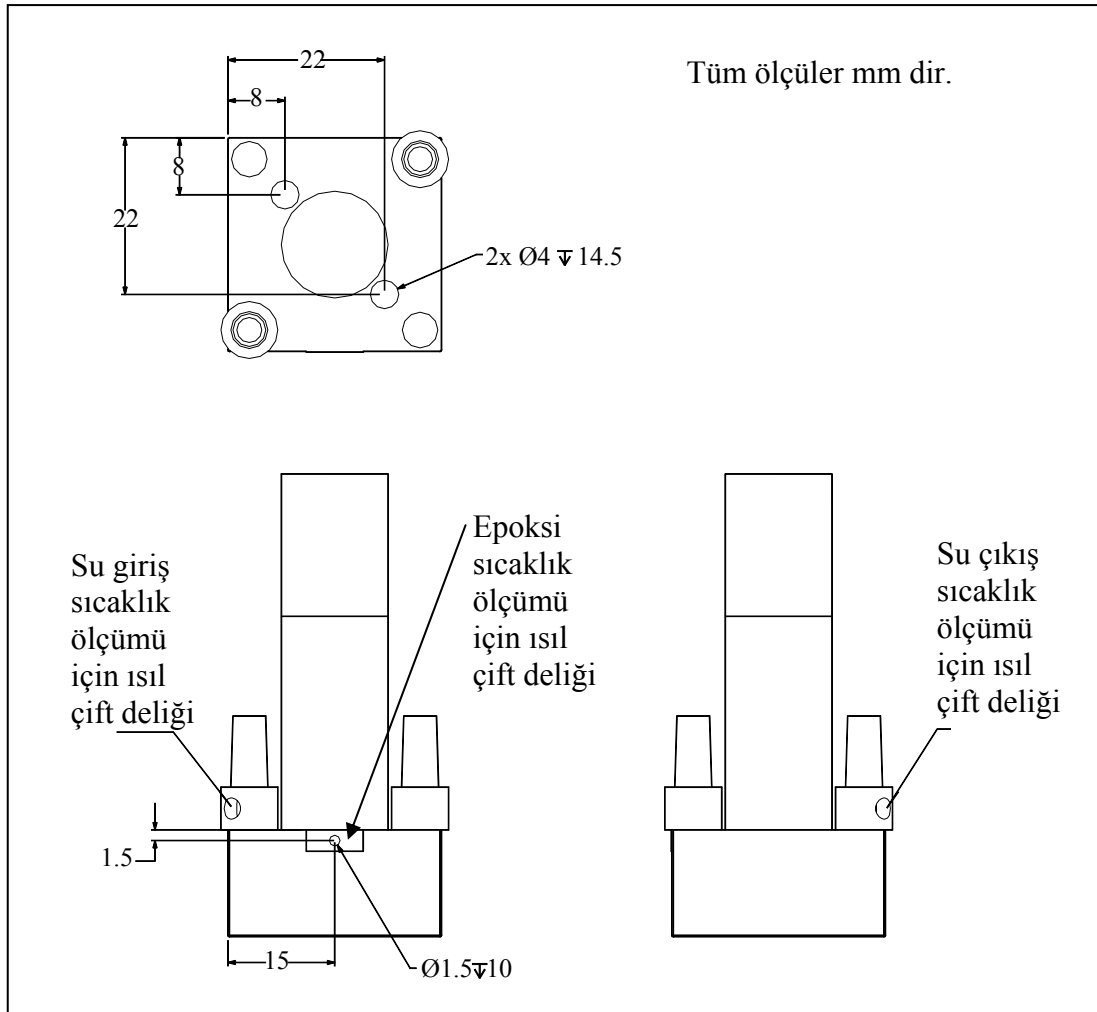


Resim 5.6. Kürü tamamlanmış SL elektrotlar

5) Tüm elektrotlar üzerinden ikisi işleme yüzünden ve biri reçineden olmak üzere toplam üç noktadan ısı çiftleri ile sıcaklık ölçümü yapılmıştır. İşleme yüzünden alınacak ölçümler için elektrot üzerinde boydan boya iki adet delik bırakılmıştır. Bakır kaplama yapılmadan deliklerin işleme yüzüne 0.5 mm kalınlığında bakır tıplar yerleştirilmiştir (Resim 5.7). Kalkanlı ısı çiftleri ile yerleştirilen bakır tıplara dokunarak işleme yüzünün sıcaklığı ölçülmektedir. Aynı ölçümler soğutma kanallı, kanalsız tüm SL elektrotlar ve ayrıca karşılaştırma amacıyla bakır elektrotlar için alınmaktadır. İşleme sırasında oluşan ısı önce bakır kabuğa oradan da bakır tıplar yardımı ile ısı çiftlere kadar ulaşmaktadır. Üçüncü sıcaklık ölçümü, bakır kaplama kalınlığının homojen olup olmadığının anlaşılması için bırakılan prizmatik çıkıntı kesildikten sonra kesilen çıkıntının altına ortalanarak 10 mm derinliğinde bir delik delinip, ısı çifti bu deliğe sokularak alınmıştır. Böylece işleme sırasında reçine içinde sıcaklığın bakır kaplamaya oranla nasıl değiştiği tespit edilmektedir. Soğutmalı SL elektrotlarda bahsedilen üç sıcaklık ölçümüne ilave olarak soğutma suyunun giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçülmüştür. Elektrotlar üzerinde ısı çiftlerinin yerleştirildikleri konumlar Şekil 5.9’da sunulmuştur.



Resim 5.7. İşleme yüzüne bakır tıplar yapıştırılmış soğutma kanallı SL elektrotlar

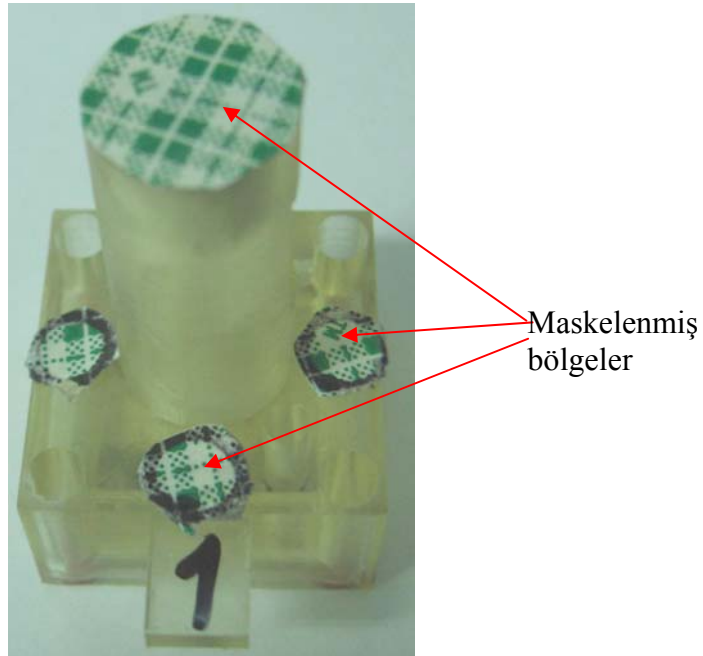


Şekil 5.9. Soğutmalı SL elektrotta ısı çiftlerin yerleşimi

6) Elektroliz ile elektrotların bakır kaplanmasına geçilmeden yapılacak işlem SL elektrotların yüzeylerinin elektrik iletken hale gelmesi için aktivasyon işlemine sokulmasıdır. Bu nedenle elektrolize başlanmadan önce SL elektrotların paladyum oksit kaplanması gerekmektedir. Elektrotlar paladyum oksit banyosuna sokularak tüm maskelenmemiş yüzeyler 50 A⁰ kalınlığında paladyum oksit ile kaplanmıştır. Paladyum oksit kaplama operasyonu 10 adet elektrot için 45 dakika sürmüştür.

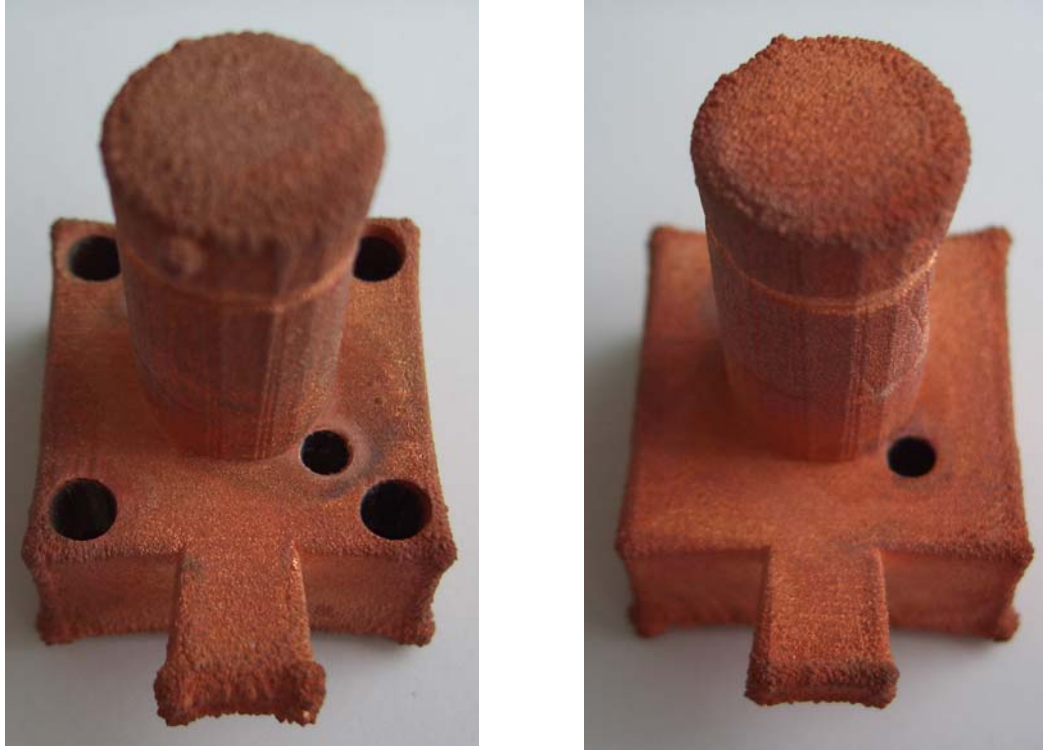
İlk yapılan 10 adet deney elemanında karşılaşılan en önemli problem, elektrotların üzerinde eşit kalınlıkta bakır tabakası oluşturulmasıdır. Elektrotlar 1.0-1.2 mm bakır kaplandıktan sonra işlenerek hem yüzey pürüzlülükleri düzeltilmekte, hem de elektrotlar üzerinde istenen sabit bakır kalınlığına ulaşılmaktadır. Bu işlem sırasında

hassas ölçüm yapılamadığı ve bakır kaplanmamış SL elektrot yüzeyinden referans alınamadığı için tüm elektrotlar üzerinde eşit bakır kalınlığı elde edilememiştir. Bu problemin giderilebilmesi ve elektrotların üzerinden ölçüm alınabilmesi için daha sonra üretilen elektrotlarda kaplanmamış bölgeler bırakmak amacıyla bazı bölgeler paladyum oksit ve daha sonra bakır kaplamaya girmeden maskelenmiştir (Resim 5.8). Böylece bu bölgelerden referans alınarak işleme sırasında işleme yüzünde bakır kalınlığının tüm elektrotlar için birbirine daha yakın olması sağlanabilmektedir.



Resim 5.8. Paladyum oksit banyosuna girmeden önce maskelenmiş elektrot

7) Aktifleme işlemi tamamlandıktan sonra elektrotların hepsi beraber aynı elektroliz banyosuna asılarak 1.0-1.2 mm kalınlığa ulaşana kadar bakır kaplanmıştır. Bu işlem sırasında elektrot başına 1 A akım verilerek kaplama işlemi 48 saat gibi sürede tamamlanmıştır. Elektrotlar kaplamaya başlanmadan önce soğutma kanallarının ve ısı çift deliklerinin ağzı, iç kısımların bakır kaplanmasının önlenmesi amacıyla kauçuk tıplar ile kapatılmaktadır. Resim 5.9'da soğutma kanallı ve soğutma kanalsız SL elektrotların kaplama tamamlandıktan sonra görünüşleri sunulmuştur.



Resim 5.9. Soğutma kanallı ve kanalsız SL elektrodun bakır kaplama tamamlandıktan sonra görünüşü

8) Bakır kaplama işlemi tamamlandıktan sonra elektrotlar doğrudan işlemede kullanılamazlar. Resim 5.9'dan da görüleceği üzere 1-1.2 mm bakır kaplanan elektrotların EEİ'de kullanılmadan önce freze ile işlemeye sokulması gerekmektedir.

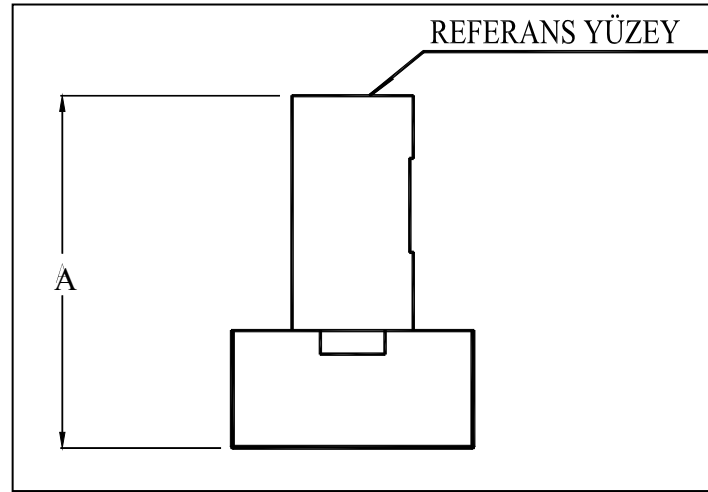
Bu işleme operasyonuna neden ihtiyaç duyulduğu aşağıda özetlenmiştir;

a) SL elektrotların keskin köşelerine 0.5 mm yuvarlatma yapılmasına rağmen bu köşelerde elektroliz sırasında bakır birikmesi daha fazla olmaktadır. Elektroliz operasyonunda dış keskin köşeler etrafında elektro manyetik alanın yoğunlaşması nedeniyle kalın kaplamalarda buralar daha fazla bakır kaplama alır.

b) Elektrolizin oluşumu gereği bakır anotdan kopan bakır iyonları aktiflenmiş SL elektrodun üzerine (katoda) yapışmaktadır. Parçacıkların anotdan koparak katoda yapışması sonucunda oluşan yüzey, kaplama sonunda pürüzlü bir yapıdadır. Frezeleme, işleme yüzeyinin pürüzlülüğünün ve boyutsal doğruluğunun istenilen düzeye ulaşmasını sağlar.

c.) SL elektrotlarda elektrodun işleme performansını ve elektrodun bozulmadan ulaşabileceği işleme derinliğini belirleyen en önemli parametre işleme yüzündeki (ön yüz) bakır kalınlığıdır. Tez çalışmasında en önemli amaç, soğutmanın SL elektrodun bozulmasını ne kadar geciktireceğini tespit etmek olduğundan elektrot ön yüzündeki bakır kalınlığı sabit tutulmaya çalışılmıştır.

Bu nedenlerle SL elektrotların üzerinden referans alınarak (Şekil 5.10) özellikle elektrodun ön yüzünün ve kenarlarının işlenmesi gereklidir. Bu işlem ilk deney setinde bağlama kalıbı kullanılmadan yapıldığında elektrotlar üzerinde istenilen bakır kalınlığının elde edilmesinde problem yaşanmıştır. Bu nedenle 6 numaralı elektrot üretim aşamasında bahsedilen maskelenmiş yüzeylerden aşağıda Şekil 5.10'da işaretlenmiş olan yüzeyi referans alacak bir bağlama kalıbı tasarlanmıştır (Resim 5.10).

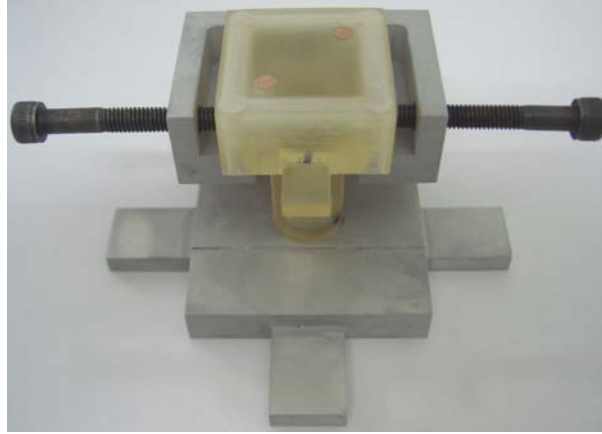


Şekil 5.10. Bağlama kalıbına elektrotlar ölçüm için bağlanırken kullanılan referans yüzey

Elektrotlar bakır kaplanmadan önce, kaplanıp freze ile işlendikten ve elektro erozyon tamamlandıktan sonra aynı bağlama kalıbı üzerinde ölçülmüştür. Ayrıca freze ile işleme sırasında da aynı bağlama kalıbı kullanılmıştır. Tüm ölçümler granit ölçüm yüzeyi üzerinde, dijital Mitutoyo Heightmatic 600 marka yükseklik ölçere ± 0.005 mm hassasiyetli, dokunarak ölçen ölçme ucu (touch signal probe) takılarak yapılmıştır. Bağlama aparatının teknik çizimleri EK-3'de sunulmuştur. Bağlama

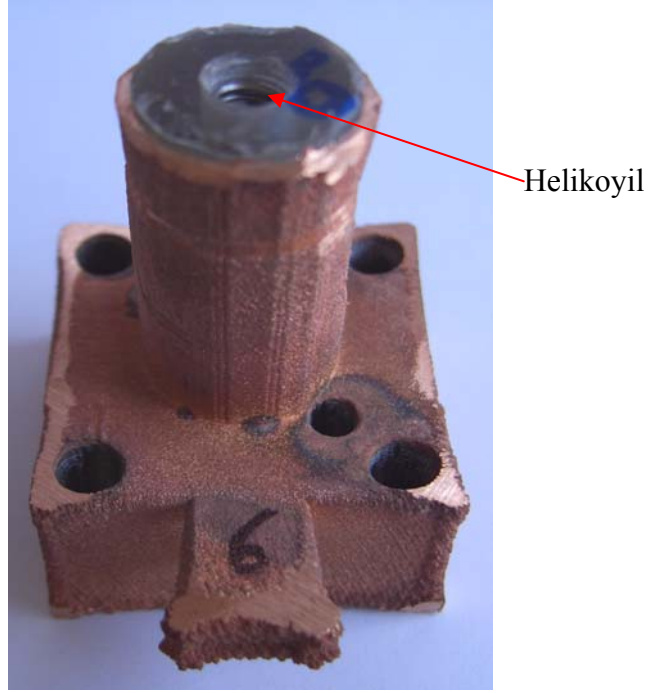
kalıbına bağlanmış soğutma kanallı SL elektrotun bir görünüşü Resim 5.10'de sunulmuştur.

Kaplama yapılmadan önce ve kaplama yapıp gerekli temizlikler yapıldıktan sonra elektrotlar referans yüzeyinden bağlama kalıbına bağlanarak elektrot ön yüzünden ölçümler alınmıştır. Yapılan bu ölçümlere göre elektrotların ön yüzünden kaç mm işlenmesi gerektiği hesaplanmıştır. Daha sonra bağlama kalıbı sayısal denetimli bir freze tezgahına bağlanarak elektrotlar işlenmiş ve ön yüzlerinin hepsinde 750 µm bakır kalınlığı elde edilmeye çalışılmıştır.



Resim 5.10. Bağlama kalıbında ölçüme hazırlanan soğutma kanallı SL elektrot

Bağlama kalıbına SL elektrotların her adımda bağlanabilmesi için elektrotların sapındaki $\phi 5$ mm deliğe helikoyıl (helical coil) çakılmıştır (Resim 5.11). Böylece ölçüm ve freze ile işleme yapılırken elektrotların hareket etmesi önlenmiş ve referans yüzeyinin her zaman bağlama kalıbı ile teması sağlanmıştır. Elektrotlar metrik 5 alyen vida ile bağlama kalıbına sabitlenerek tüm ölçüm ve işlemler gerçekleştirilmiştir. Bağlama işlemi tamamlandıktan sonra tüm elektrotlar alınan ölçümlere göre işlenmiştir. Resim 5.12'de soğutma kanalsız SL elektrodun işlendikten sonraki görünüşü sunulmuştur.



Resim 5.11. Elektrotları bağlama kalıbına sabitlemek için kullanılan helikoyil



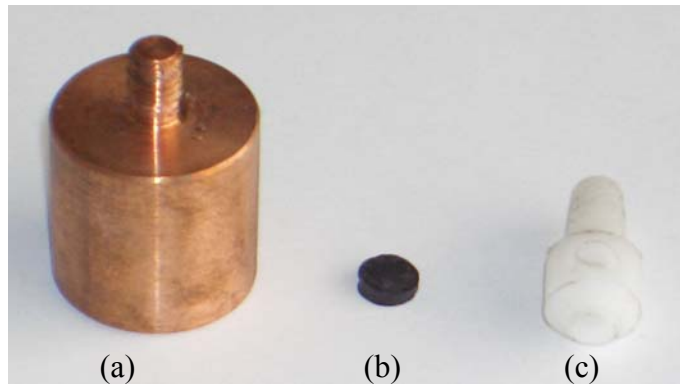
Resim 5.12. Soğutma kanalsız SL elektrodun işlendikten sonraki görünümü

5.4.2. Elektrotların tezgaha bağlanması

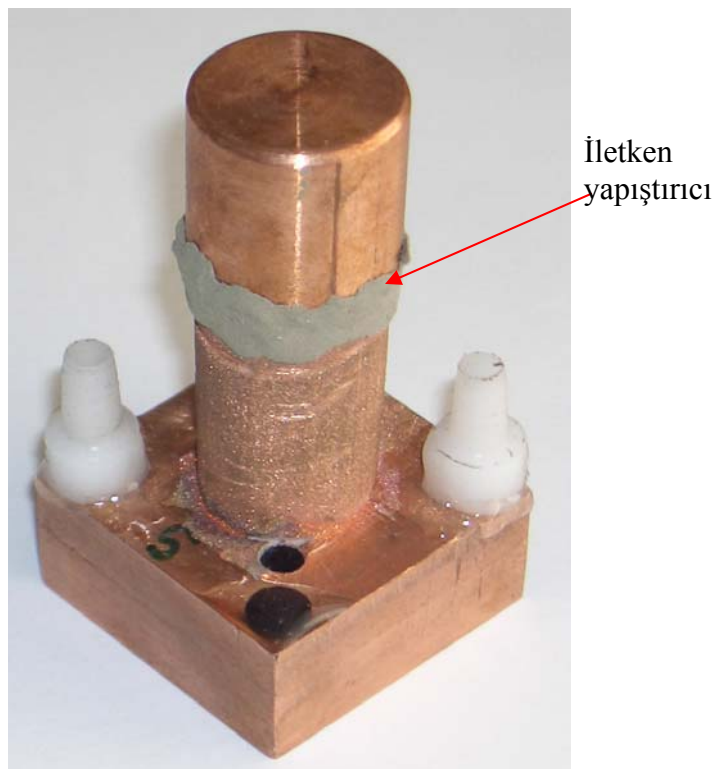
SL elektrodu tezgaha bağlayıp elektro erozyona başlamadan önce elektrodun üzerine Resim 5.13’de sunulan yardımcı malzemelerin yapıştırılması veya bağlanması gereklidir. Bu parçalardan ilki 15 mm çapında elektrodun sapı ile aynı çapta ucuna metrik 5 diş çekilmiş bakır silindirik bir parçadır (bakır sap). Bu parça 8. üretim adımında SL elektrodun bağlama kalıbına sabitlenmesi için çakılan helikoyile vidalanır. Tez çalışmasında kullanılan tezgahın elektrot bağlama sistemi V yatak ve elektrotları bu yatağa doğru sıkacak bir vidadan oluşmaktadır. SL elektrotları V yatağa yaslayıp sıkma vidası ile sabitlendiğinde, elektrotların sapları bakır kaplama işleminden sonra işleme yüzeyi gibi temizlenmediği için problem yaratmaktadır. Pürüzlü olan elektrot sap yüzeyinden yaslanıp sıkılan elektrodun işparçasına olan dikliğini ayarlamak çok uzun zaman aldığından pürüzsüz ve dikliğin çok az ayarlama ile sağlanabileceği bu bakır sap eklentisi elektrotların saplarına vidalanmıştır. Bakır sapdan V yatağa yaslanıp sabitlenen elektrotlar hızlı bir şekilde bağlanıp diklikleri ayarlanabilmiştir. Yapılan bakır sap üzerinden işleme akımının elektroda geçebilmesi için SL elektrodun sapı ile bu parça arasında iletken bir malzemeye ihtiyaç duyulmuştur. Çünkü bakır parça SL elektrodun sapına vidalandığında sadece epoksiye temas ettiğinden işleme akımı ve gerilimi elektroda iletilememektedir. Bu problemi gidermek için öncelikle ilk deney setinde Resim 5.14’de de görülen iletken yapıştırıcı kullanılmıştır. Fakat gaz yağı dielektrik içinde bu yapıştırıcının bir süre sonra bozulması nedeniyle daha sonraki deneylerde bakır sap ile elektrot sapı arasına tel bağlanmıştır.

Elektrotların üzerine takılan diğer yardımcı malzemeler Resim 5.13’den de görüldüğü üzere kauçuk tıpa ve soğutma suyu hortumlarını bağlamak amacıyla üretilmiş derlin bağlama parçalarıdır. Kauçuk tıpalardan hortum bağlanmayacak soğutma kanalı ağızlarını kapamak için yararlanılmıştır. Derlin’den üretilmiş hortum bağlama parçaları soğutma suyu girişi ve çıkışına yapıştırılarak kullanılmıştır. Ayrıca bu parçaların kenarındaki deliklerden soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıklarını ölçmekte faydalanan ısı çiftleri yerleştirilmiştir. Kauçuk tıplar ve hortum bağlama parçaları yerlerine Loctite 401 veya 416 tipi yapıştırıcılar kullanılarak sabitlendikten

sonra Devcon 5 dakikada sertleşen epoksi ile sızdırmazlıkları sağlanmıştır. Deneyler sırasında tüm ısıl çiftler deney boyunca yerlerinde kalabilmeleri ve su sıcaklığını ölçmekte kullanılanlar ise sızdırma yapmamaları amacıyla Devcon epoksi ile sabitlenmiştir. Resim 5.13’de gösterilen tüm yardımcı malzemelerin teknik çizimleri EK-4’de sunulmuştur.



Resim 5.13. Elektrot yardımcı malzemeleri (a) bakır sap, (b) kauçuk tıpa, (c) derlin hortum bağlantı parçası



Resim 5.14. İşlemeye hazır soğutma kanallı SL elektrot

5.5. Dielektrik Sıvı ve Püskürtme Sistemi

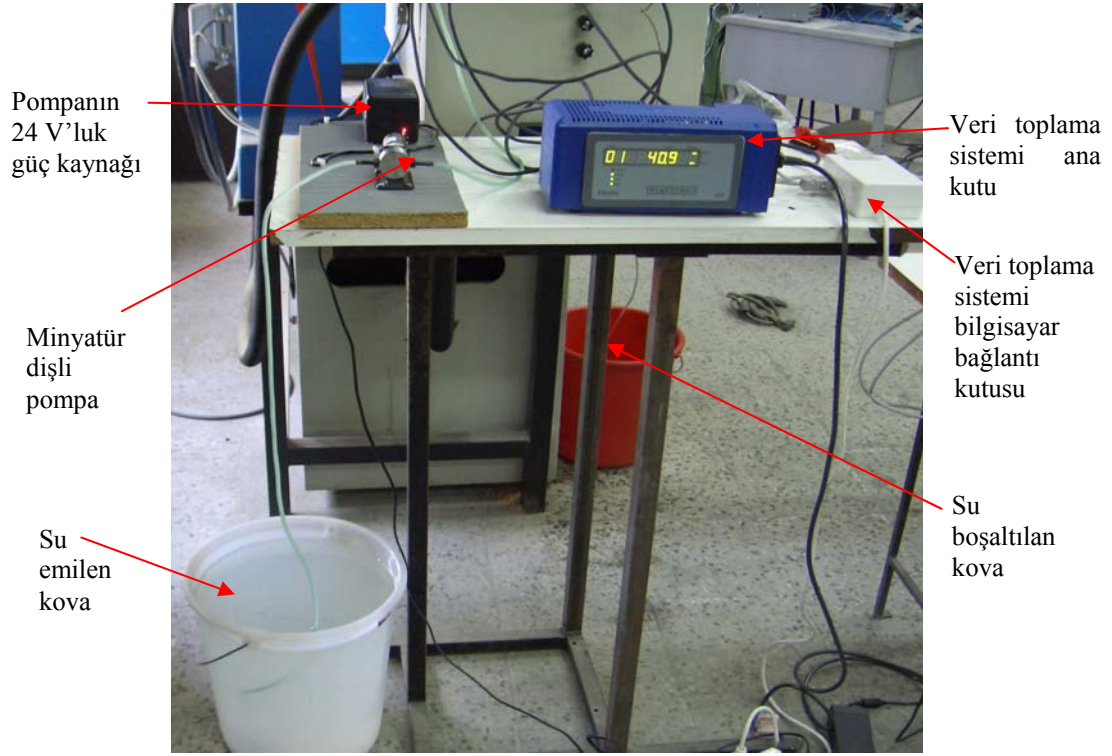
Elektro erozyon tezgahında dielektrik sıvı olarak gaz yağı (kerosene) kullanılmıştır. Tezgahın gaz yağı püskürtme sistemi devamlı, kesikli gibi modlarda çalışabilmektedir. Tez çalışmasında püskürtme sistemine bağlı hortumun ucuna bakır borudan bir parça üretilmiştir. Borunun ağzı inceltilerek yanal püskürtülen dielektriğin yaklaşık tüm elektrot genişliğince olması sağlanmıştır. İşparçası ve yapılan dielektrik püskürtme aparatı tezgahın tablasına mengene ve üç ağızlı torna aynası ile monte edilmiştir (Resim 5.5).

5.6. Elektrot Soğutması

Soğutmalı SL elektrotlarda elektrodu soğutmak için musluk suyu kullanılmıştır. Elektrodun içindeki soğutma kanallarından suyu dolaştırmak için Micropump firmasının 180 serisi 0.8 lt/dak sabit debide su sağlayabilen bir dişli pompası seçilmiştir. Pompanın emiş ucu akvaryum hortumu ile bir kovaya diğer ucu yine akvaryum hortumu ile SL elektrodun su kanalı girişindeki hortum bağlama parçasına bağlanmıştır (Resim 5.15). Elektrodun soğutma kanallarında gezen su, soğutma kanalı çıkışındaki hortum bağlama parçasına bağlı diğer bir hortum ile ayrı bir kovaya atılmaktadır.

5.7. Veri Toplama Sistemi

Tez çalışmasında Elimko firmasının E680 model, 8 kanallı, bilgisayara bağlanabilen veri toplama sistemi kullanılmıştır. Sistem RS485 veri yolu ile bilgiyi dışarı çıkartmakta ve ara çevirici kutu ile RS485'i RS232'ye çevirerek bilgisayara COM portdan beslemektedir. Bilgisayara yüklenen bağlantı ve veri işleme yazılımı ile istenilen sıklıkta 8 kanaldan veri saklanabilmektedir. Tez çalışmasında her 5 saniyede su soğutmalı SL elektrotlarda 6 kanaldan, soğutmasız SL elektrotlarda 4 kanaldan ve bakır elektrotlarda 3 kanaldan sıcaklık ölçümü alınmıştır.



Resim 5.15. Soğutma ve veri toplama sisteminden bir görünüş

Veri toplama sistemi COM portu olmadığı için RS232-USB çevirici kullanılarak Pentium IV 2.6 GHz işlemcili, 512 MB hafızası olan bir diz üstü bilgisayara bağlanmış ve her 5 saniyede alınan veriler sabit diske kaydedilmiştir. Veri toplama sistemi ile ilgili detaylı bilgilerin bulunduğu üretici firmanın broşürü EK-5'te sunulmuştur. Resim 5.15'de veri toplama sisteminin ısı çiftlerinin bağlandığı ana kutusu görülmektedir.

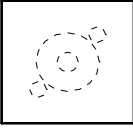
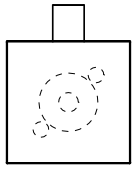
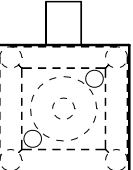
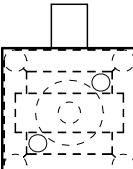
5.8. Deneylerin Yapılması

Tez çalışmasında 3 aşamalı bir deney programı düzenlenmiştir. Deney programının ilk deney setinde 10, ikinci deney setinde 3 ve son deney setinde 11 adet elektrot üretilerek test edilmiştir. Yapılan bu deneylerden ilk deney setinde 7, ikincide 2, ve son deney setinde de 11 olmak üzere toplam 20 deneyin sonuçları değerlendirilmeye alınmıştır. Diğer deney numuneleri işlemenin başında çok erken bozulmaya uğramış veya elektrot ön yüzünden değil kenardan aşınmıştır. Toplam 20 adet deney

numunesinin 4 adedi bakır elektrot, 7 adedi soğutma kanalsız veya soğutma kanallı fakat soğutma sıvısı uygulanmamış SL elektrot ve 9 adedi soğutma kanallı SL elektrotudur. Bu 9 adet soğutma kanallı SL elektrodun 5 adedi dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrot, diğer 4 adedi ise dört kenarı ve işleme yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotudur.

Tüm soğutma kanallı ve kanalsız SL elektrotların ilk 7 elektrot hariç, Resim 5.10'da sunulan bağlama kalıbı üzerine takılarak Şekil 5.10'da gösterilen referans yüzeyden işleme yüzlerinin ölçümleri alınmıştır. Bu ölçüm SL elektrotlar bakır kaplanmadan önce, kaplandıktan sonra ve bağlama kalıbına monte edilerek freze ile işlendikten sonra toplam üç kere tekrar edilmiştir. İlk 7 elektrotta ölçümler bağlama kalıbı kullanılmadan kumpas kullanılarak alınmıştır. Bu ölçümler ile SL elektrotların işleme yüzünde sabit bakır kalınlığı elde edilmeye çalışılmıştır. İşleme tamamlandıktan sonra aşınarak ortaya çıkmış stereolitografik yüzeyden ve aşınmış işleme yüzünden alınan ölçümler ile işleme yüzünde hedeflenen bakır kaplama kalınlığına ulaşıp ulaşamadığı kontrol edilmiştir. SL elektrotların İİH ve ön yüz aşınması gibi deney sonuçlarının hesaplanması için gerekli ilk elektrot boyutları ve kaplanan bakır kalınlıkları Çizelge 5.5'de sunulmuştur. Çizelgede elektrotların deneylerdeki numaraları ve şekilleri de gösterilmiştir. Bu elektrotların performansı ile karşılaştırma yapmak amacıyla ayrıca dört adet bakır elektrot üretilmiştir. Bu elektrotlara da SL elektrotlarda olduğu gibi ısı çiftleri ile sıcaklık ölçümleri alınması için gerekli delikler açılmıştır. Bakır elektrotlarda sadece iki noktadan işleme yüzünün sıcaklığı ölçülmüştür. Bakır elektrotların ısı çifti deliklerinin delindiği 30x30x15 mm'lik işleme ucu ve sap kısmı ayrı ayrı üretilerek birleştirilmiştir. Bu parçaların teknik resimleri EK-2'de sunulmuştur.

Çizelge 5.5. SL elektrotların işleme öncesi boyutları ve kaplanan bakır kalınlıkları

Elektrot numarası	Elektrotların işleme yüzü görünüşü	Elektrot tipi	Elektrot boyutları (mm) (AxB)	Elektrot üzerine kaplanan bakır kalınlığı (μm)
D1		Bakır elektrot	31.53x31.52	-----
D2		Bakır elektrot	31.53x31.55	-----
D3		Bakır elektrot	30.00x29.95	-----
D4		Bakır elektrot	30.00x30.00	-----
1		Soğutmasız (soğutma kanalsız)	31.63x31.58	300
2		Soğutmasız (soğutma kanalsız)	31.52x31.31	320
3		Soğutmasız (soğutma kanalsız)	31.53x31.55	300
4		Soğutmalı (Tip 1*)	31.63x31.60	300
5		Soğutmalı (Tip 1*)	31.5x31.55	300
6		Soğutmasız (soğutma kanallı Tip 1*)	30.97x31.25	640
7		Soğutmalı (Tip 1*)	31.26x31.39	660
8		Soğutmasız (soğutma kanallı Tip 1*)	31.9x31.68	750
9		Soğutmalı (Tip 1*)	32.03x32.11	580
13		Soğutmalı (Tip 2**)	31.74x31.88	736
10		Soğutmalı (Tip 2**)	31.99x32.19	718
11		Soğutmasız (soğutma kanallı Tip 2**)	31.25x31.49	650
12		Soğutmalı (Tip 1*)	32.38x32.19	648
14		Soğutmasız (soğutma kanallı Tip 2**)	31.79x31.81	812
15		Soğutmalı (Tip 2**)	31.93x31.80	790
16		Soğutmalı (Tip 2**)	32.25x31.87	808

* Dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrot

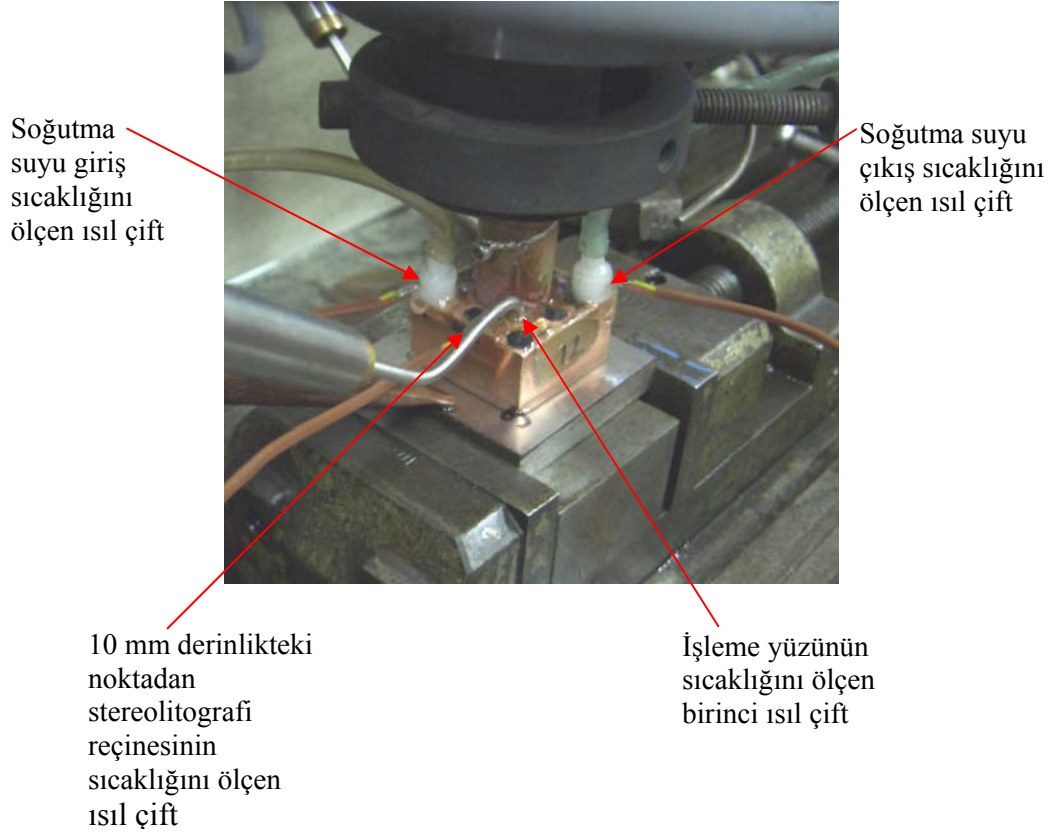
** Dört kenarı ve işleme yüzünde geniş soğutma kanallı SL elektrot

5.8.1. Sıcaklık ölçümlerinin alınması

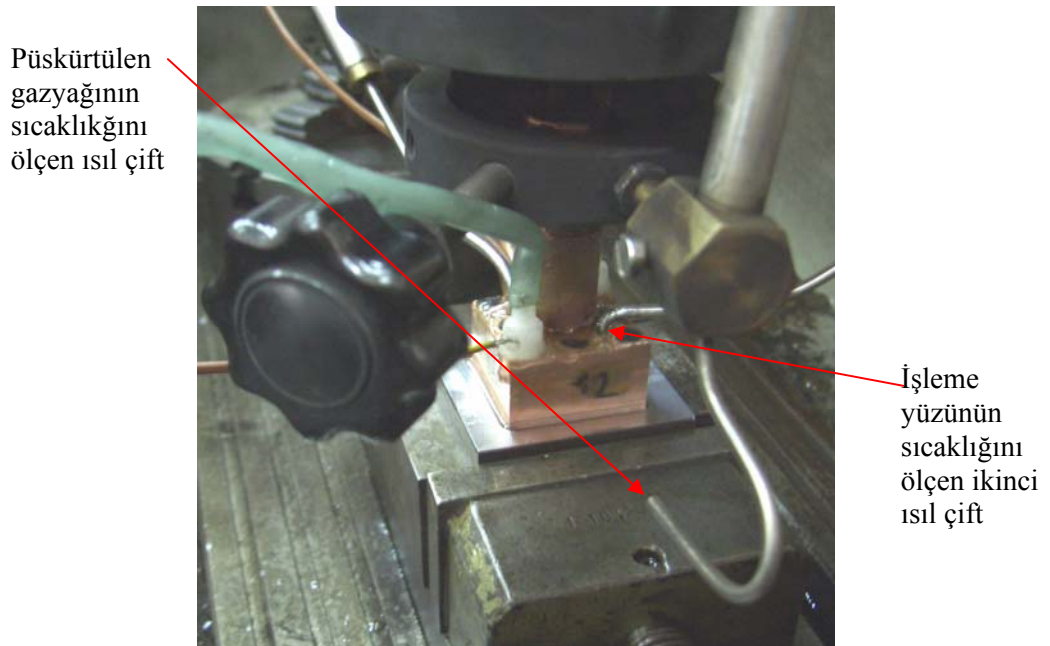
Tez çalışmasında bilgisayara bağlı veri toplama sistemi ile beraber iki değişik tip ısı çifti kullanılmıştır. Yüksek akım ve gerilime yakın olan işleme yüzü ve dielektrik sıcaklığı ölçümü için gaz yağına daldırılmış olan ısı çiftler izoleli tipde seçilmiştir. İzoleli ısı çiftler ince bir metal kılıf içine yerleştirilmiş ve kılıf içinde yüksek saflıkta metal oksit tozları sıkıştırılarak izole edilmişlerdir. Bu şekilde eleman telleri birbirlerinden ve aynı zamanda metal koruyucudan izole edilmiş olur. Metal kılıfın içine, metal oksit tozları ve eleman telleri özel yöntemlerle çok iyi sıkıştırılmış oldukları için ısı çiftler bir kablo gibi bükülebilir, kıvrılabilir. Tez çalışmasında topraksız, dış izolasyon kılıfı ile elektriksel olarak hiç bir ilişkisi olmayan, metal izoleli 3 mm çapında ısı çiftler kullanılmıştır. Böylece işleme yüzünden ölçüm alan ısı çiftler üstünden veri toplama sistemine gelebilecek elektriğin veri toplama sistemine zarar vermesi önlenmiştir. Ayrıca izolasyonla ortamda bulunan yüksek akım ve gerilimin ısı çiftlerin üzerinde oluşan mV mertebesindeki sinyalleri etkileyerek yanlış ölçüm alınması da engellenmiştir.

Tez çalışmasında kullanılan ikinci tip ısı çiftler Stanford Research Institute'den ve Omega firmasından tedarik edilmiştir. Bu ısı çiftler çok ufak çapta olduklarından noktasal sıcaklık ölçümünde kullanılmıştır. Çapları 1 mm'den az olan izolasyonsuz ısı çiftler soğutma suyunun giriş, çıkış sıcaklıkları ile stereolitografik reçineden sıcaklık ölçümü alınmasında kullanılmıştır. Kullanılan tüm izolasyonlu ve izolasyonsuz ısı çiftler K tipi NiCr-Ni tipidir. Nikel (-) ve Nikel-krom (+) bacadan oluşan bu ısı çiftler oksitleyici ortamlarda tercih edilir. 1300°C'ye kadar mV değeri üretebilmelerine rağmen yaygın olarak 1200°C'ye kadar kullanılırlar.

Resim 5.16 ve Resim 5.17'de soğutmalı SL elektrotlarda ısı çiftlerin nasıl yerleştirildiği gösterilmiştir. Soğutmasız SL elektrotlarda Resim 5.16 ve Resim 5.17'de gösterilen ısı çiftler soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklığını ölçenler dışında aynı şekilde yerleştirilmiştir. Bakır elektrotlarda reçineden ısı ölçümü alan ısı çift hariç iki adet işleme yüzünden ve gaz yağının sıcaklığını ölçen ısı çiftler aynı pozisyonlarda kullanılmıştır.



Resim 5.16. Soğutmalı SL elektrotta ısı çiftlerinin yerleşimi (önden)



Resim 5.17. Soğutmalı SL elektrotta ısı çiftlerinin yerleşimi (arkadan)

5.8.2. Ölçümlerin alınması ve değerlendirilmesi

Tez çalışmasında yapılan deneyler öncesinde, sırasında ve sonrasında aşağıdaki ölçümler alınmıştır;

- 1) Elektrotların boyutları (eni ve boyu),
- 2) İşleme sırasında ulaşılan işleme derinliği,
- 3) Deneyin toplam süresi,
- 4) Elektrotların bakır kaplanmadan önce, sonra ve yüzeyleri işlendikten sonra Şekil 5.10'da gösterilen referans yüzeyden işleme yüzüne olan boyut ölçüsü,
- 5) İşleme tamamlandıktan sonra soyularak kalkan SL yüzeyden referans yüzeye ve aşınmış bakır yüzeye olan boyut ölçüleri,
- 6) Soğutmalı SL elektrotlardan 6, soğutmasız SL elektrotlardan 4 ve bakır elektrotlardan 3 kanaldan her 5 saniyede bir sıcaklık değerleri,
- 7) İşleme tamamlandıktan sonra işparçasının yüzey pürüzlülüğü.

Yukarıda sıralanan ölçümler kullanılarak işparçası işleme hızı (İİH), elektrot ön yüzünde oluşan aşınma, işparçası yüzey pürüzlülüğü ve bakır kaplama kalınlığı gibi önemli performans parametreleri hesaplanmaktadır. Yapılan bu ölçümler ile ulaşılan İİH, elektrot ön yüz aşınması ve işparçası yüzey pürüzlülüğü gibi değerler ile SL elektrotların performansı hakkında bilgi edinilmiştir. Ayrıca alınan sıcaklık ölçümleri tez çalışmasının analitik kısmı için sınır şartlarını ve kontrol değerlerini oluşturmuştur. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı Fluent ile yapılacak sonlu eleman analizleri için alınan bu ölçümler sınır şartı olarak kullanılmıştır. Stereolitografi epoksisi üzerinden ölçülen sıcaklık sonlu eleman modeli ile deneyler arasında karşılaştırma yapmak amacıyla alınmıştır.

a) İşparçası (malzeme) işleme hızı (İİH): Elektrotların performansını belirleyen önemli özelliklerden biri İİH'dır. İİH bu çalışmada yapılan deneyler için aşağıda sunulan eşitlik (Eş. 5.1) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\dot{V}_H = (A \cdot B \cdot W_d) / t \quad (5.1)$$

$\dot{V}_H$ (mm³/dak)

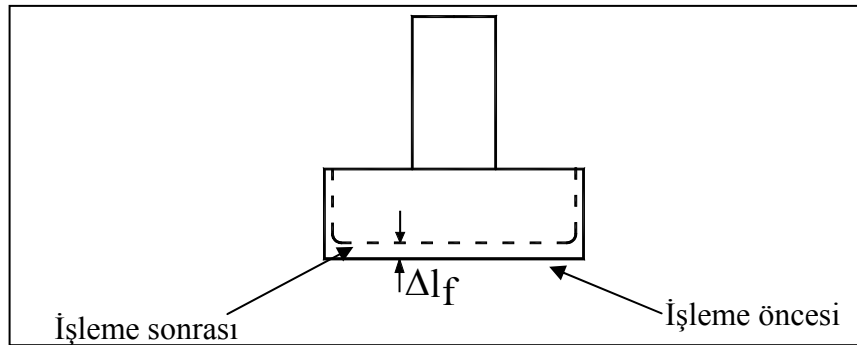
A ve B: Elektrodun eni ve boyu (mm)

W_d : İşleme derinliği (mm)

t: Deneyin toplam süresi (dak)

Tez çalışmasında kullanılan elektrotlar kare şeklinde üretildiklerinden en (A) ve boy (B) için aynı değer kullanılmıştır. Çelik işparçasında oluşan işleme kavitesinin boyutları elektrotdan sadece boşalım aralığı kadar büyüktür. Boşalım aralığı çok küçük olduğu için hesaplamalarda ihmal edilerek işlenen kavitenin eni ve boyu elektrodun boyutlarına eşit alınmıştır. İşleme derinliği olarak da tezgah üzerindeki komparatörden okunan değer kullanılmıştır. Deneyin toplam süresi sıcaklık ölçümleri ile birlikte veri toplama sistemi tarafından kayıt edilmektedir. Bu parametreler kullanılarak tüm bakır, soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotlar için $\dot{V}_H$ hesaplanmıştır.

b) Elektrot ön yüz aşınması (Δl_f): Elektrotlarının performansını belirleyen diğer bir önemli ölçütde elektrotların aşınmasıdır. Elektrotların aşınması; aşınan elektrot hacminin, işlenen malzeme hacmine oranısı bağıl aşınma (BA) veya elektrodun ön yüzünde olan aşınma miktarı ile ifade edilir. Tez çalışmasında elektrotların üzerinden referans alınarak işleme öncesi ve sonrası yapılan ölçümlerle elektrotların ön yüzünün ne kadar aşındığı hesaplanmıştır (Şekil 5.11)



Şekil 5.11. Elektrot ön yüz aşınması (Δl_f)

c) Bakır kaplama kalınlığının işleme öncesi ve sonrası ölçümü: SL elektrotlarda işleme süresini belirleyen en önemli parametre elektrodun üzerindeki bakır kaplamanın kalınlığıdır. Eğer bakır kaplamada bölgesel bir problem yoksa (delik, kaplama almamış yüzey veya yüzeye iyi yapışmamış kaplama gibi) bakır kabuk kalınlaştıkça elektrodun işleme süresi ve buna bağlı olarak işleme derinliği artmaktadır. Tez çalışmasında amaçlanan, soğutmanın işleme performansına, yani elektrot bozulmadan ulaşabileceği işleme derinliğine etkisini görmek olduğundan elektrotlar üzerinde mümkün oldukça eşit bakır kalınlığı elde edilmeye çalışılmıştır. Üretilen ve işlenen elektrotların her adımda bakır kaplama kalınlığının saptanabilmesi için elektrot üzerinden referans alınarak ölçülmüştür. Elektrotlar değişik adımlarda nemli ortamlarda bulunduklarından, ayrıca paladyum oksit banyosu gibi ortamlara daldırılarak aktiflenip daha sonra elektroliz banyosuna daldırılarak bakır kaplandıkları için elektrotlarda ölçüsel sapmalar oluşabilir. Çünkü stereolitografi reçinesi nemden çok etkilenen bir malzemedir. Bu nedenlerle işleme sonrasında elektrotların aşınarak ortaya çıkan reçine bölgelerinden ölçüm alınarak elektrot üzerinde oluşan bakır kalınlığı hassas bir şekilde saptanmaya çalışılmıştır. Böylece işleme sonrası elektrotların üzerinde aşınmadan kalan bakır kaplama kalınlığı da tespit edilmiştir. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotlar arasından soğutma işleminin etkisinin belirlenebilmesi için üzerlerinde eşit kalınlıkta bakır bulunan elektrotlar seçilmiştir.

d) Elektrot soğutma suyu sıcaklık ölçümleri: Soğutmalı soğutmasız tüm SL elektrotlar üzerinden sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Ölçülen sıcaklıkların ortalamaları hesaplanarak karşılaştırmalar için ortalama değerler kullanılmıştır. İşleme yüzünün sıcaklığı, suyun giriş ve çıkış sıcaklık ölçümleri yapılan sonlu eleman modelinde sınır şartı olarak kullanılmıştır. SL elektrotların reçinesinden alınan sıcaklık ölçümü ile sonlu eleman çözümünden elde edilen sıcaklık dağılımında aynı noktadaki sıcaklık karşılaştırılarak sonlu eleman modelinin doğruluğu kontrol edilmiştir.

e.) İşparçası yüzey pürüzlülüğü ölçümü: İşlenmiş işparçası ortalama yüzey pürüzlülüğü (Ra) değerlerinin ölçümleri Mitutoyo Surftest 402 tipi portatif yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı (Resim 5.18) ile yapılmıştır.



Resim 5.18. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı

İşparçasının işlenmiş yüzeyinden iki farklı bölge ve doğrultudan pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Bu iki değer aritmetik ortalaması alınarak kaydedilmiştir. Bu işlem yapılırken işlenen işparçası kavitelerinin derin olması nedeniyle işparçaları kesilmiş (Resim 5.19) ve ölçümler bu şekilde alınmıştır.



Resim 5.19. Yüzey pürüzlülüğü ölçümü için kesilmiş işparçası

SL elektrotlarda oluşan bozulma EEİ tezgahının akım ve servo gerilim göstergelerinden rahatlıkla anlaşılmaktadır. İşleme sırasında bakır kabuktan bir

bölümün kopup stereolitografi reçinesinin ortaya çıkması akım ve servo voltajı göstergelerinde ani yükseliş ve alçalışlar şeklinde kendini göstermektedir. Tezgahın göstergelerinde bu hareketlilik görüldüğü zaman deneye son verilerek işleme derinliği, deney süresi kayıt edilmiş ve sıcaklık ölçümleri sonlandırılmıştır.

6. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Tez çalışmasında yirmi adet deney yapılmıştır. Bu bölümde aşağıda sıralanan dört değişik tipde toplam yirmi adet elektrotla yapılan deneyler ve performans sonuçları hakkında detaylı bilgi sunulacaktır.

- 1) Bakır elektrot (Deney no: 1, 2, 19 ve 20)
- 2) Soğutma kanalsız SL elektrot (Deney no: 3, 4 ve 5)
- 3) Dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrot (Deney no: 6, 7, 8, 9, 10, 11 ve 15), (Tip I)
- 4) Dört kenarı ve işleme yüzünde geniş soğutma kanallı SL elektrot (Deney no: 12, 13, 14, 16, 17 ve 18), (Tip II)

Deneylerin sonunda hesaplanan veya ölçülen malzeme (işparçası) işleme hızı, işleme derinliği, deney süresi, elektrot ön yüz aşınması, işparçası yüzey pürüzlülüğü, maksimum erozyon yüzü sıcaklıkları gibi sonuçlar Çizelge 6.1’de sunulmuştur.

6.1. Deney Sonuçlarının İşparçası İşleme Hızı (İİH) Yönünden İrdelenmesi

Deney sonuçları incelendiğinde ilk iki bakır elektrodun son iki bakır elektroda göre 31.2 ve 33.2 mm³/dak gibi daha yüksek İİH değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Son iki bakır elektrot 25 ve 18.8 mm³/dak gibi bir İİH ile 5 mm işleme derinliğine ulaşmış ve hacim olarak daha fazla malzeme işlemiştir. Fakat 4 mm işleme derinliğine ulaşan ilk iki bakır elektroda göre daha yavaş işleme yapmışlardır. Yavaş işleme nedeni kullanılan dielektriğin (gaz yağı) temizi ile değiştirilmesine bağlı olarak işleme hızının düşmesi olarak değerlendirilmiştir. SL elektrotların malzeme işleme hızlarının 18 ile 34.5 mm³/dakika arasında değiştiği ve bakır elektrotlar ile benzer İİH performansı sergiledikleri görülmüştür (Çizelge 6.1).

Çizelge 6.1. Deney Sonuçları

Deney NO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Deney numunesi tanımı (soğutma kanalı tipi)	BAKIR D1	BAKIR D2	SL SOĞUTMA KANALSIZ	SL SOĞUTMA KANALSIZ	SL SOĞUTMA KANALSIZ	SL SOĞUTMALI (TİP I)	SL SOĞUTMALI (TİP I)	SL SOĞUTMASIZ (TİP I)	SL SOĞUTMALI (TİP I)	SL SOĞUTMASIZ (TİP I)
Elektrot boyutları (mm)	31.53 31.52	31.53 31.55	31.63 31.58	31.52 31.31	31.53 31.55	31.63 31.60	31.50 31.55	30.97 31.25	31.26 31.39	31.90 31.68
Elektrot üzerine kaplanan bakır kalınlığı (μm)	--	--	300	320	300	300	300	640	660	774
İşleme derinliği (mm)	4	4	1.1	1	0.92	1.27	1.62	3.26	3.66	3.91
Deney süresi (dakika)	126	120	51	33	36	31	50	143	120	220
İİH (mm ³ /dak)	31.55	33.16	21.54	30.1	25.42	34.5	32.2	22.06	29.83	17.96
ΔI _F (μm)	300	295	125	70	80	75	155	295	440	470
Elektrot ön yüzünün ortalama sıcaklığı (°C)	46.1	44.4	43.1	43.8	47.7	40.4	39.2	38.8	33.3	56.8
Soğutma suyu ortalama giriş sıcaklığı (°C)	--	--	--	--	--	27.4	28.1	--	21.0	--
Soğutma suyu ortalama çıkış sıcaklığı (°C)	--	--	--	--	--	27.5	28.1	--	22.3	--
Püskürtülen dielektrik ortalama sıcaklığı (°C)	--	--	--	--	--	--	--	21.2	23.5	30.5
Epoksi elektrodun ortalama sıcaklığı (°C)	--	--	--	--	--	--	--	--	--	35
Ra (μm)	5.3	5.4	7.9	8.0	7.8	7.5	7.6	7.4	6.5	7.4

Çizelge 6.1. (Devam) Deney Sonuçları

Deney NO	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Deney numunesi tanımı (soğutma kanalı tipi)	SL SOĞUTMALI (TİP I)	SL SOĞUTMALI (TİP II)	SL SOĞUTMALI (TİP II)	SL SOĞUTMASIZ (TİP II)	SL SOĞUTMALI (TİP I)	SL SOĞUTMASIZ (TİP II)	SL SOĞUTMALI (TİP II)	SL SOĞUTMALI (TİP II)	BAKIR D3	BAKIR D4
Elektrot boyutları (mm)	32.03 32.11	31.74 31.88	31.99 32.19	31.25 31.49	32.38 32.19	31.79 31.81	31.93 31.80	32.25 31.87	30.00 29.95	30.00 30.00
Elektrot üzerine kaplanan bakır kalınlığı (µm)	580	736	718	650	648	812	790	808	--	--
İşleme derinliği (mm)	3.05	3.6	3.65	3.2	3.55	4.35	4.75	4.75	5	5
Deney süresi (dakika)	120	120	120	101	115	177	240	221	180	240
İİH (mm ³ /dak)	26.15	30.36	31.32	31.18	32.18	24.85	20.1	22.1	24.96	18.75
ΔI _F (µm)	360	530	500	420	435	495	540	545	435	410
Elektrot ön yüzünün ortalama sıcaklığı (°C)	45.5	36.3	39.3	43.6	37.9	42.2	36.8	35.7	52.0	49
Soğutma suyu ortalama giriş sıcaklığı (°C)	27.4	23.7	23.8	--	26.6	--	23.7	25.0	--	--
Soğutma suyu ortalama çıkış sıcaklığı (°C)	30.1	24.2	24.8	--	28.3	--	25.5	25.8	--	--
Püskürtülen dielektrik ortalama sıcaklığı (°C)	33.5	28.6	31.8	29.1	32.7	29.7	28.7	29.1	33.3	30
Epoksi elektrodun ortalama sıcaklığı (°C)	36.0	29.1	32.3	32.9	32.2	30.4	29.3	31.8	--	--
Ra (µm)	6.6	6.5	6.6	7.6	6.7	7.4	5.9	6.0	5.2	5.3

Deney süresi uzayıp işleme derinliği arttıkça bakır elektrotlarda olduğu gibi SL elektrotlarında İİH'nın düştüğü görülmüştür. Bunun nedeni işleme derinliği arttıkça püskürtmenin etkisinin azalması ve işleme ortamının sıkı işlemlerde sahip olduğu işleme verimine ulaşamamasıdır. SL elektrotların performansını artırmak için kullanılan soğutmanın elektrotların bozulmalarını geciktirdiği için daha fazla malzeme işlenmesini sağladığı tespit edilmiştir. Deney süresi uzadığından İİH'nda önemli bir değişiklik olmamıştır. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların İİH'nın bakır kalınlığına bağlı değişimini gösteren grafikler Bölüm 6.6.1'de sunulacaktır.

6.2. Deney Sonuçlarının Elektrot Ön Yüz Aşınması (Δl_F) Yönünden İrdelenmesi

Deney serisindeki bakır elektrot deneylerinin sonuçları incelendiğinde 4 mm işleme yapan elektrotların 295 ve 300 μm , 5 mm işleme yapanların ise 435 ve 410 μm ön yüz aşınması yaptığı görülmektedir. Stereolitografik elektrotların elektrot aşınması yönünden bakır elektrotlardan farkı elektrodun üzerinde işleme sırasında oluşan ısının elektrodun bozulmasına olan etkisidir. Stereolitografik elektrotların üzerinde oluşan sıcaklığın elektrot uç aşınmasını nasıl etkilediği ile ilgili detaylı bilgi Bölüm 6.5'de sunulmuştur. Stereolitografik elektrotların kullanılamaz duruma gelmesine elektrot ön yüz aşınması (Δl_F) kadar oluşan ısının bakır kaplama tarafından atılamaması nedeniyle bakır kabuğun tamamen aşınmadan elektrot üzerinden soyulması ve kopmasının da etkisi vardır. Deney sonuçları incelendiğinde SL elektrotların elektrot ön yüzlerinin 70 ile 530 μm arasında aşındıkları görülmektedir. Elektrot ön yüz aşınmasındaki bu değişime stereolitografik elektrotların performansını belirleyen en önemli özellik olan bakır kaplama kalınlığının farklılığı neden olmuştur. Bakır kaplama kalınlığının fazla olması fiziksel olarak aşınacak daha çok bakır sağlamakla beraber kalın bakır kaplama oluşan ısıyı elektrot ön yüzünden daha çabuk uzaklaştırarak Δl_F 'in artmasına neden olmuştur. SL elektrotların ve işparçalarının deneyden sonraki durumlarını gösteren örnek resimler Resim 6.2 ve Resim 6.3'de ve tüm elektrotların bozulma biçimleri Çizelge 6.2'de sunulmuştur. SL elektrotların en çok kopma ve kenardan bozulma

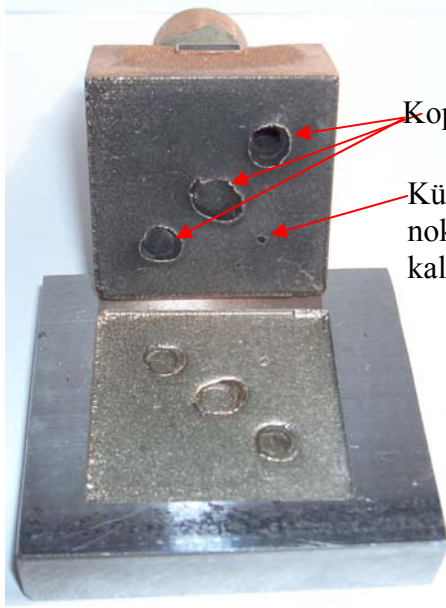
şeklinde kullanılmaz hale geldikleri gözlemlenmiştir. Diğer elektrot ve işparçalarının deneyden sonraki görünüşleri EK-6'da sunulmuştur.

Çizelge 6.2. SL elektrotların bozulma şekilleri

Deney No	Bozulma Şekli	Deney No	Bozulma Şekli
3	Kopma	11	Kenardan bozulma, çarpılma
4	Kenardan bozulma	12	Kopma, kenardan bozulma
5	Kopma, küçük noktasal kalkmalar	13	Kenardan bozulma, küçük noktasal kalkmalar
6	Kopma, bakırın reçineden soyulması	14	Kenardan bozulma
7	Kenardan bozulma, bakırın reçineden soyulması	15	Kenardan bozulma
8	Kenardan bozulma	16	Kenardan bozulma
9	Kopma	17	Kenardan bozulma, küçük noktasal kalkmalar
10	Kenardan bozulma	18	Kenardan bozulma



Resim 6.1. Bir numaralı deney sonrası bakır elektrot (D1) ve işparçası

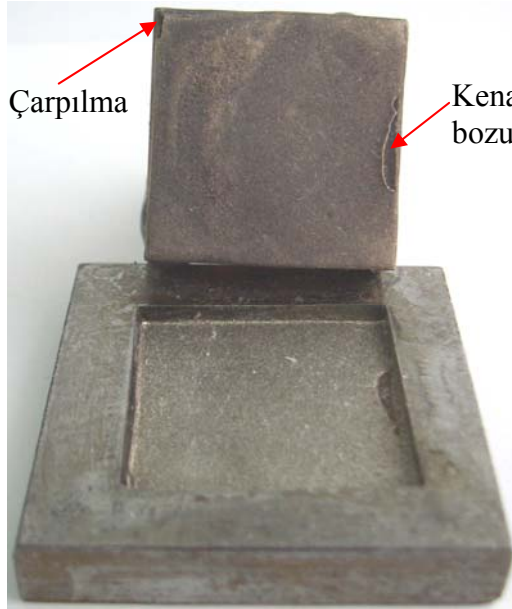


(a)

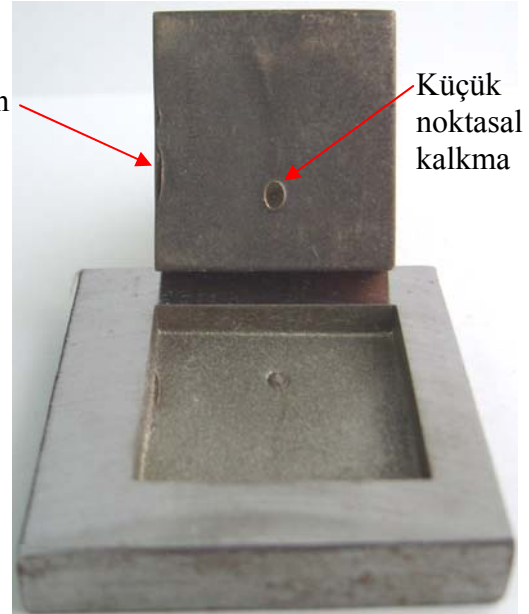


(b)

Resim 6.2. a) 5 numaralı, b) 6 numaralı deney sonrası SL elektrot ve işparçası



(a)



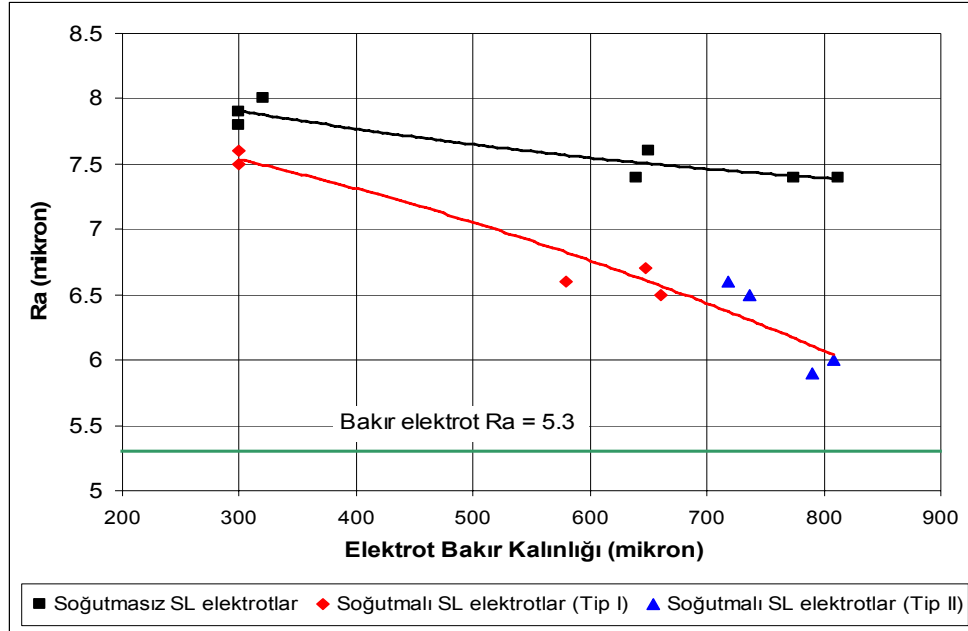
(b)

Resim 6.3. a) 11 numaralı, b) 17 numaralı deney sonrası SL elektrot ve işparçası

6.3. Deney Sonuçlarının İşparçası Yüzey Pürüzlülüğü (Ra) Yönünden İrdelenmesi

Elektrotlar ve işparçaları deney sonrasında incelendiğinde 12 A gibi yüksek bir işleme akımının oluşturduğu yüzeylerin yüksek pürüzlülüğe sahip olduğu görülmektedir. İşparçası ve elektrot yüzeylerinde karbon birikimleri oluşmuş, karbon özellikle elektrodun ön yüzünde toplanmıştır. Bakır elektrotlar ile işlenen işparçalarından alınan yüzey pürüzlülüğü ölçümleri (Ra) 5.2 ile 5.4 μm arasında değişmektedir (Çizelge 6.1). Bu değerler benzer çalışmalarda elde edilen Ra değerleri ile uyum göstermektedir [38]. SL elektrotlar ile işlenen işparçalarından alınan Ra ölçümlerinden elde edilen değerler ise 5.9 ile 8.0 μm arasında değişmektedir. SL elektrodun işleme derinliği ve diğer performans karakteristikleri ($\dot{I}_H$, ΔI_F) bakır elektrotlara yaklaştıkça işparçası Ra değerleri de aynı şekilde bakır elektrotların Ra değerlerine yaklaşmaktadır. Örneğin Çizelge 6.1’de sunulan 13, 17 ve 18 numaralı deneylerin sonuçları incelendiğinde elektrotların işleme derinliği arttıkça işparçası yüzey pürüzlülüğü değerleride düşerek bakır elektrotlara yaklaşmaktadır (Ra: 5.2-5.4). Şekil 6.1’de soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotlar için bakır kalınlığına göre Ra grafikleri sunulmuştur. Soğutma yapılarak işleme performansı bakır elektrotlara yaklaştırılan, 4.75 mm işleme derinliğine ulaşan 17 ve 18 numaralı SL elektrot deneylerinin işparçalarının Ra değerleri 5.9 ve 6.0 μm gibi değerlere sahiptir. Bu değerler 5.0 mm işleme derinliğine kadar işleme yapan bakır elektrotların işparçalarından ölçülen 5.2 ve 5.3 μm değerlerine çok yakındır. Soğutma yapılmayan ve üzerinde yaklaşık aynı bakır kaplama kalınlığına sahip 16 numaralı SL elektrot deneyi 4.35 mm işleme derinliğine ulaşabilmiş ve Ra değeri 7.4 μm olmuştur. Bu değer bakır elektrotların Ra değerinden çok farklı olmamakla beraber, soğutma uygulanan SL elektrotların işparçası Ra değerleri kadar iyi değildir. SL elektrotların üzerine kaplanan bakır kalınlığı azaldıkça buna bağlı olarak işleme performansı ve kararlılığı düşmekte ve işparçası Ra değerleri de yükselmektedir. Üzerinde 300 μm bakır kalınlığı olan soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotlarda işparçası Ra değerleri 7.4 ile 8.0 μm arasındadır (Şekil 6.1). Bakır kalınlığı ince olan

elektrotlar çabuk aşınmakta kalın kaplamalı SL elektrotlarda olduğu gibi kararlı işleme yaparak düşük Ra değerlerine sahip işparçaları üretememektedir.

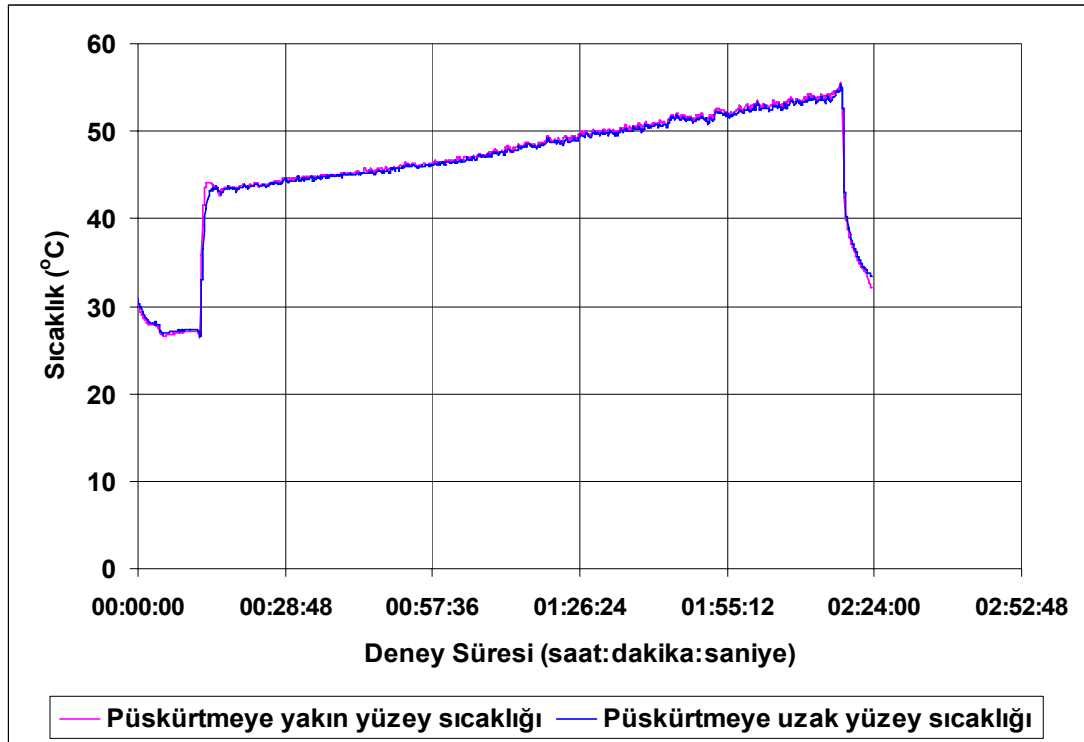


Şekil 6.1. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların bakır kalınlığına göre işparçası Ra değişimi

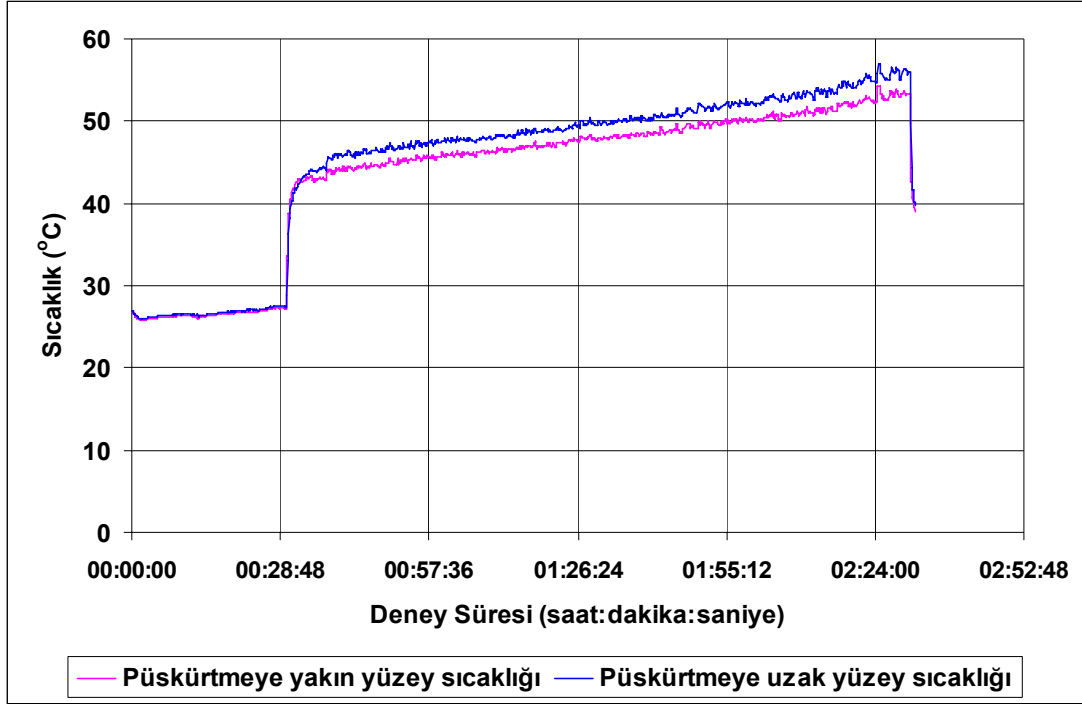
6.4. Deney Sonuçlarının Elektrot Sıcaklıkları Yönünden İrdelenmesi

Tüm bakır elektrot deneylerinde sıcaklık ölçümleri grafiklerden de (Şekil 6.2 - Şekil 6.5) görüldüğü üzere ani bir yükseliş ile başlayıp daha sonra deney süresince yavaş artış göstermiştir. İşlemeye başlanınca ortaya çıkan ısı elektrodu kısa sürede ısıtmış ve ısı kısa sürede tezgahın elektrot tutma aparatına, oradan da tezgaha iletilerek artış yavaşlamıştır. Ayrıca işleme yüzünde dielektrik püskürtmesine uzak ve yakın ölçülen sıcaklıklar birbirine çok yakındır (Şekil 6.2- Şekil 6.5). Bu davranış bakırın ısıyı iyi iletme özelliği ile ilişkilidir. İlk iki deneyden sonra yapılan son iki bakır elektrot deneyinde püskürtülen dielektriğin sıcaklığı da ölçülmüştür (Şekil 6.4, Şekil 6.5). Bu ölçüm işleme bölgesinin hemen dışında dielektriğe daldırılmış bir ısı çifti ile yapılmıştır. Böylece işleme ortamına püskürtülüp işparçasına ve elektroda çarpan dielektriğin ne kadar ısı uzaklaştırdığı hakkında da bilgi sahibi olunmuştur. Şekil 6.2-Şekil 6.5 incelendiğinde bakır elektrotların işleme yüzünde oluşan ortalama

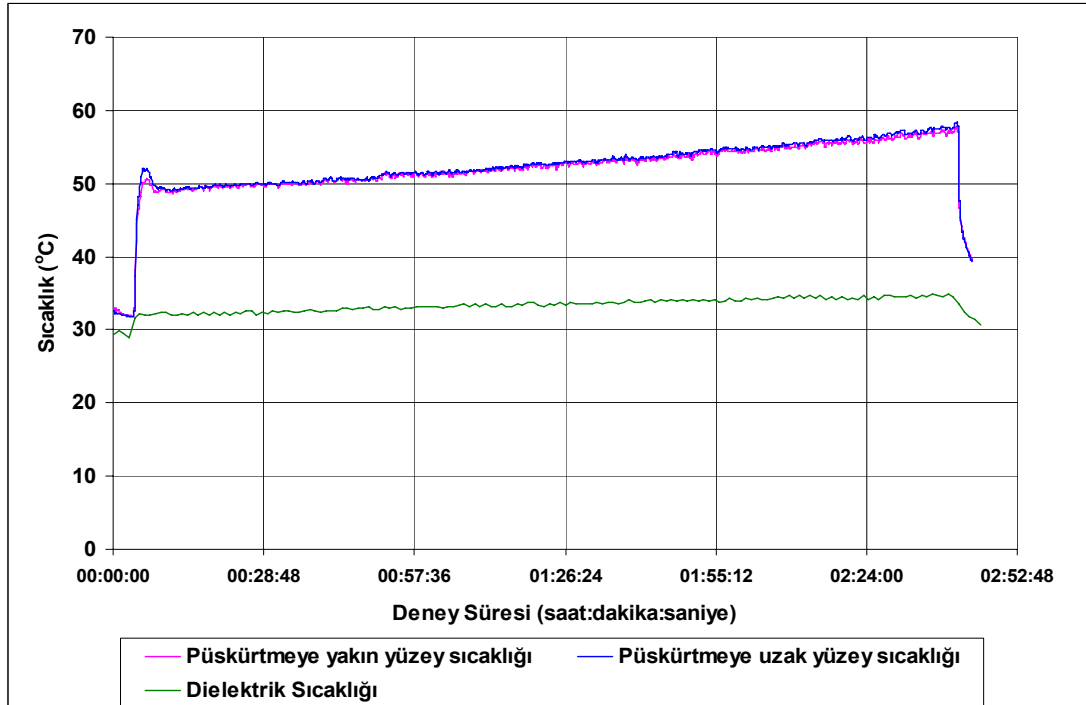
sıcaklıkların 44.4-52.0⁰C arasında olduğu görülmüştür. Daha derin işleme yapan elektrotlardan okunan sıcaklıklar elektrotlar daha çok aşındıkları için ısı kaynağı olan kıvılcımların ısı çiftlere yaklaşması nedeniyle daha büyüktür. Ayrıca sıcaklık artışı ısı kaynağının ısı çiftlere yaklaşması etkisinin haricinde grafiklerden görüldüğü üzere oluşan ısı atılmasıyla ve transferiyle ilgilidir. İşleme derinliği ve buna bağlı olarak işleme süresi arttıkça elektrotların üzerinde oluşan ve uzaklaştırılamayan ısı artmaktadır. Dielektrik püskürtmesi ve basıncı deney süresince sabit tutulduğu için deney süresince ısı transferi ve miktarı değişmemektedir. İkinci set deneylerde alınan dielektrik ölçümlerine bakıldığında 19 ve 20 numaralı deneylerde D3 ve D4 numaralı bakır elektrotların deneyleri sırasında oluşan ortalama dielektrik sıcaklıkları 33.3 ve 30⁰C'dir (Çizelge 6.1). Elektrot işleme yüzü ve dielektrik sıcaklıkları göz önünde bulundurulduğunda işleme sırasında oluşan ısı büyük bir kısmının taşıma ile elektroda küçük bir kısmının da konveksiyon ile dielektriğe aktarıldığı görülmektedir. EK-7'de maksimum ve minimum elektrot ön yüzü ve dielektrik sıcaklıkları sunulmuştur.



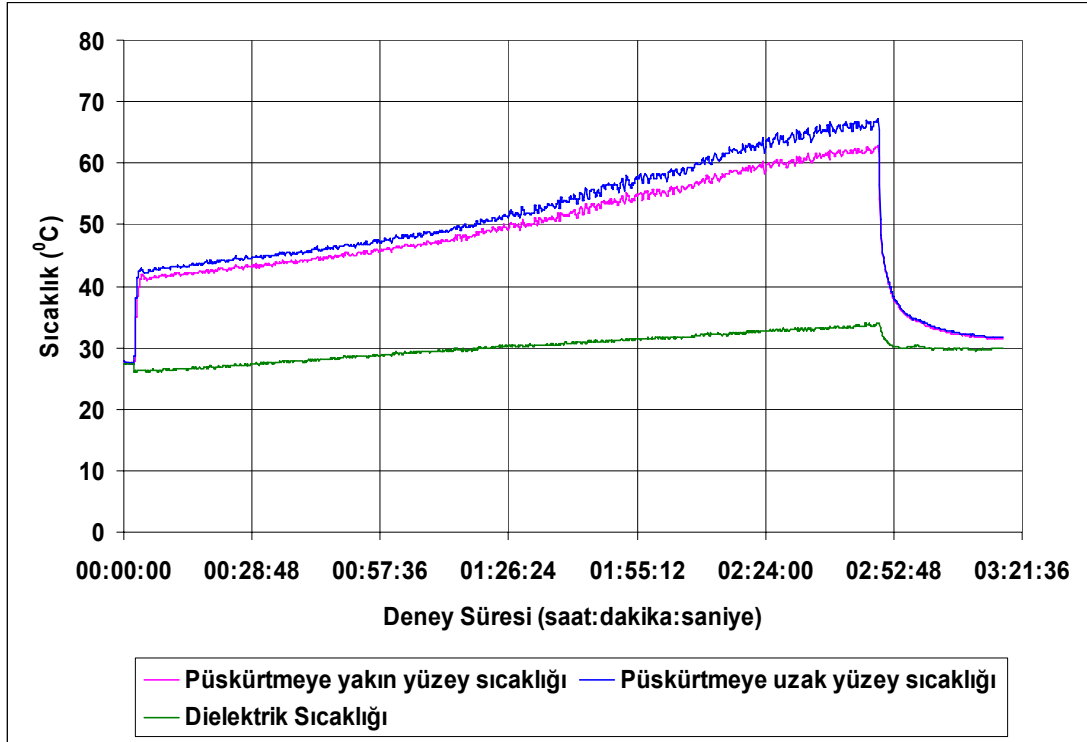
Şekil 6.2. Bir numaralı deneyde bakır elektrottan (D1) alınan sıcaklık ölçümleri



Şekil 6.3. İki numaralı deneyde bakır elektrotan (D2) alınan sıcaklık ölçümleri



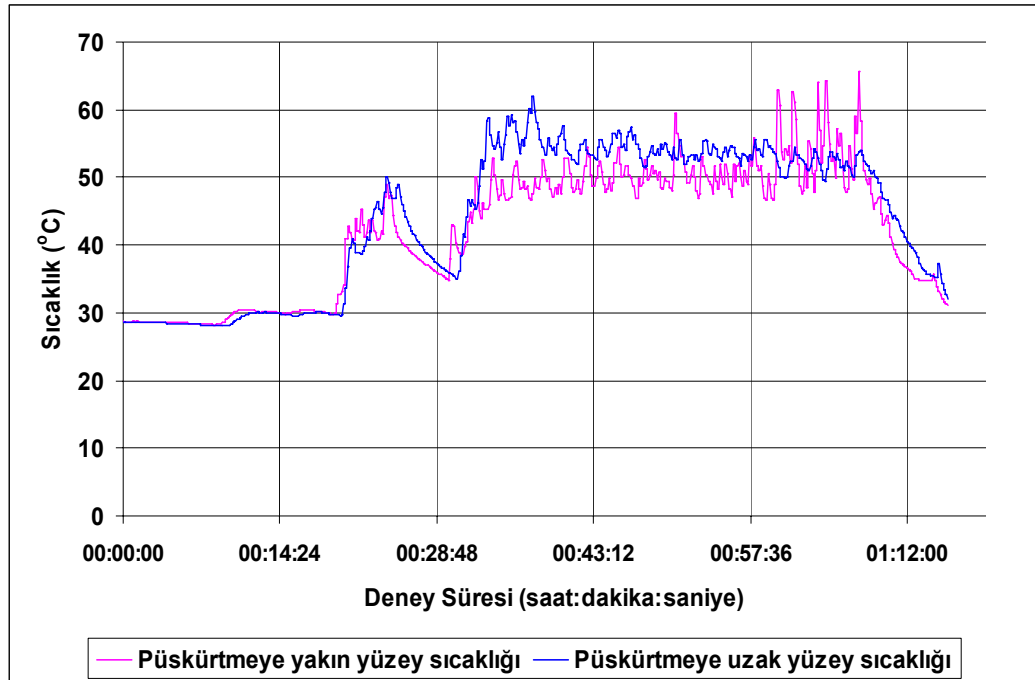
Şekil 6.4. Ondokuz numaralı deneyde bakır elektrotan (D3) alınan sıcaklık ölçümleri



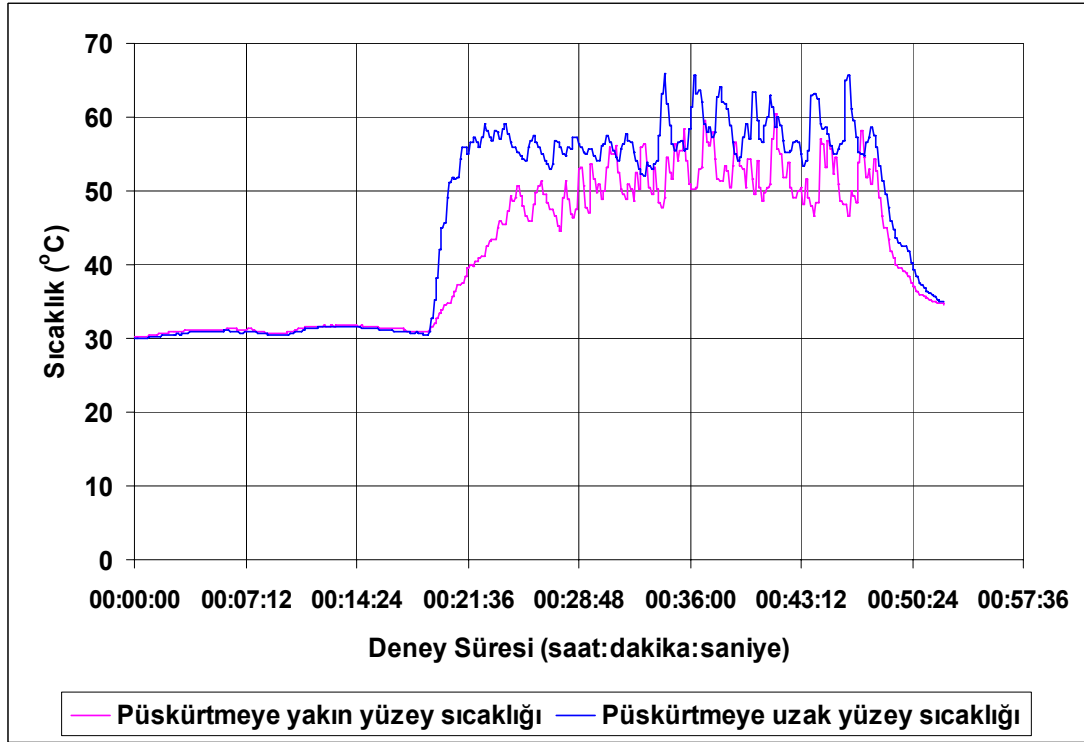
Şekil 6.5. Yirmi numaralı deneyde bakır elektrotndan alınan (D4) sıcaklık ölçümleri

SL elektrotlarda hedeflenen bakır kabuk kalınlığı minimum 500 μm maksimum 750 μm 'dir. Fakat Bölüm 5'de de özetlendiği gibi ilk deney setindeki elektrotlar işlenirken üzerlerinden alınan ölçümlerin referansları farklı noktalardan alındığı için sonuçta ilk deney setindeki elektrotlar üzerinde 300 μm kalınlığında bakır kaplama elde edilebilmiştir. Yapılan deneylerden alınan sıcaklık ölçümleri incelendiğinde işleme yüzü sıcaklıklarının çok dalgalandığı görülmüştür (Şekil 6.6- Şekil 6.10). Bu dalgalanmalar elektrot üstündeki bakır kabuğun ince olmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca ısı çiftlerinin yüzeye ilişkilendirilmesi için kullanılan bakır tıpların bulunduğu bölgelerde kıvılcım yoğunlaştığı zaman bu bölgenin sıcaklığı bölgesel olarak artmaktadır. Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'daki lokal maksimum ve minimumların oluşmasında da kullanılan bakır tıpların bulunduğu bölgelerin kıvılcım yoğunluğunu üstlerine çekmesinin veya araya sıkışan aşınmış partiküllerin kısa devre yaparak kıvılcımların oluşmasını engellemesinin etkili olduğu değerlendirilmektedir. Püskürtmeye yakın ve uzak işleme yüzü sıcaklık ölçümleri incelendiğinde bakır elektrotlarda olduğu gibi aralarında birkaç bölgesel

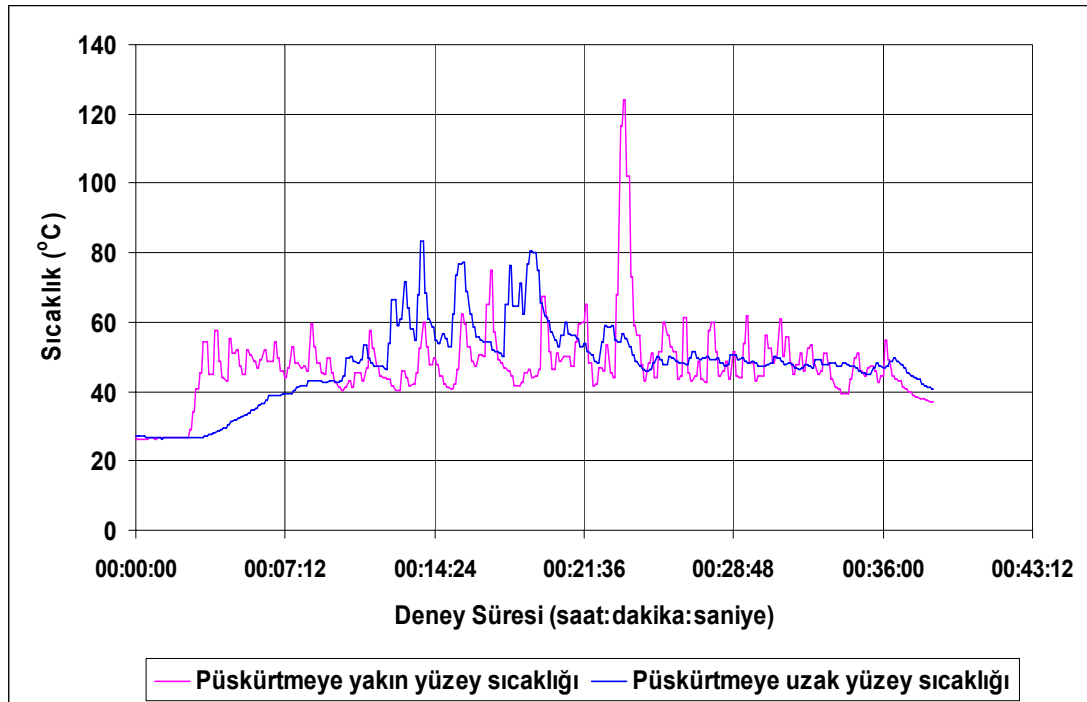
maksimum değer hariç önemli fark olmadığı görülmektedir. İnce bakır kaplamaya sahip SL elektrotlarda işleme sırasında oluşan ısının stereolitografi reçinesine iletimi çok daha hızlı oluşmaktadır. Buna bağlı olarak stereolitografi reçinesi çok daha hızlı ısınıp yumuşama sıcaklığına ulaşmakta ve bakır kabuk ile olan bağlantısını kaybetmektedir. Stereolitografi reçinesinden ayrılan ince bakır kabuk kabarak kopmakta veya kıvılcım yoğunluğunu üstüne çekerek hızlı aşınmaktadır. İnce bakır ile kaplanmış SL elektrotlardaki bu bozulma mekanizmasını geciktirmek için tez çalışmasında elektrotlara soğutma uygulanmıştır. Deney 3, 4, 5, 6 ve 7' nin sonuçları incelendiğinde (Şekil 6.6-Şekil 6.10) SL elektrotlara uygulanan soğutmanın işleme yüzü sıcaklıklarına ve elektrotların performansına olan pozitif etkileri görülmektedir. Bu beş deneyde kullanılan elektrotların hepsi yaklaşık 300 µm bakır kaplama kalınlığına sahiptir. Deney 3, 4 ve 5'de soğutma uygulanmamış olup elektrotların işleme yüzlerinde oluşan sıcaklıklar 43.1 ile 47.7°C arasında değişmektedir (Çizelge 6.1). Soğutma uygulanan 6 ve 7 numaralı deneylerde ise bu sıcaklıklar 40.4°C ve 39.2°C'dir. İşleme yüzü sıcaklıklarındaki azalma elektrodun İİH'nı ve işleme derinliklerini artırmıştır.



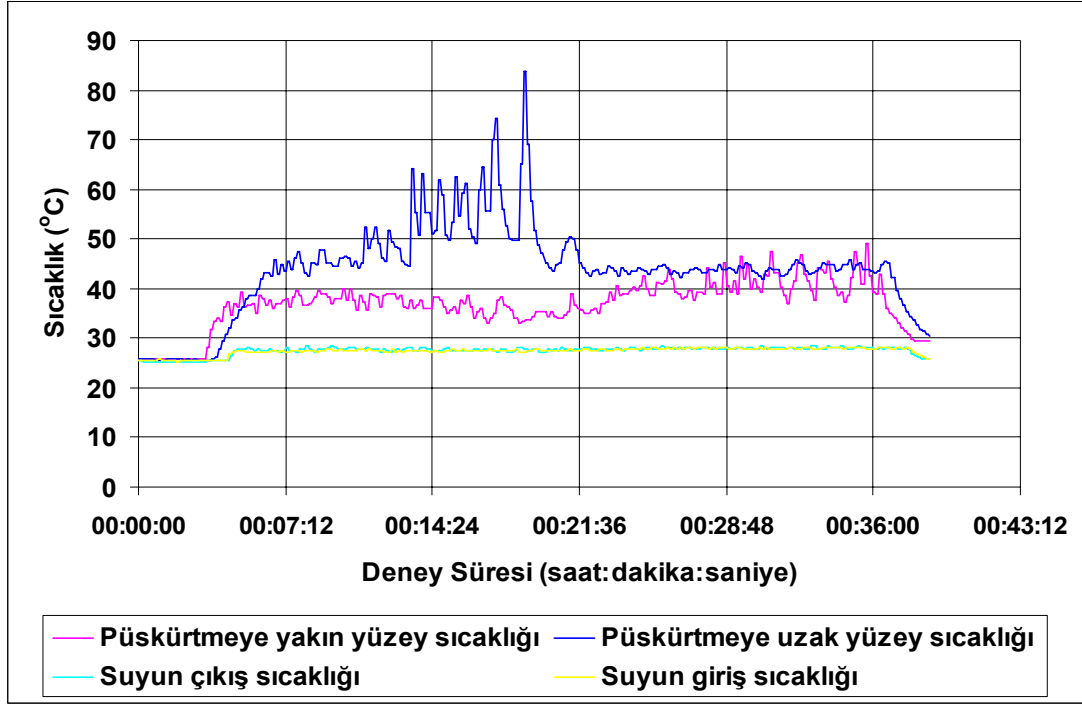
Şekil 6.6. 3 numaralı deneyde soğutma kanalsız SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri



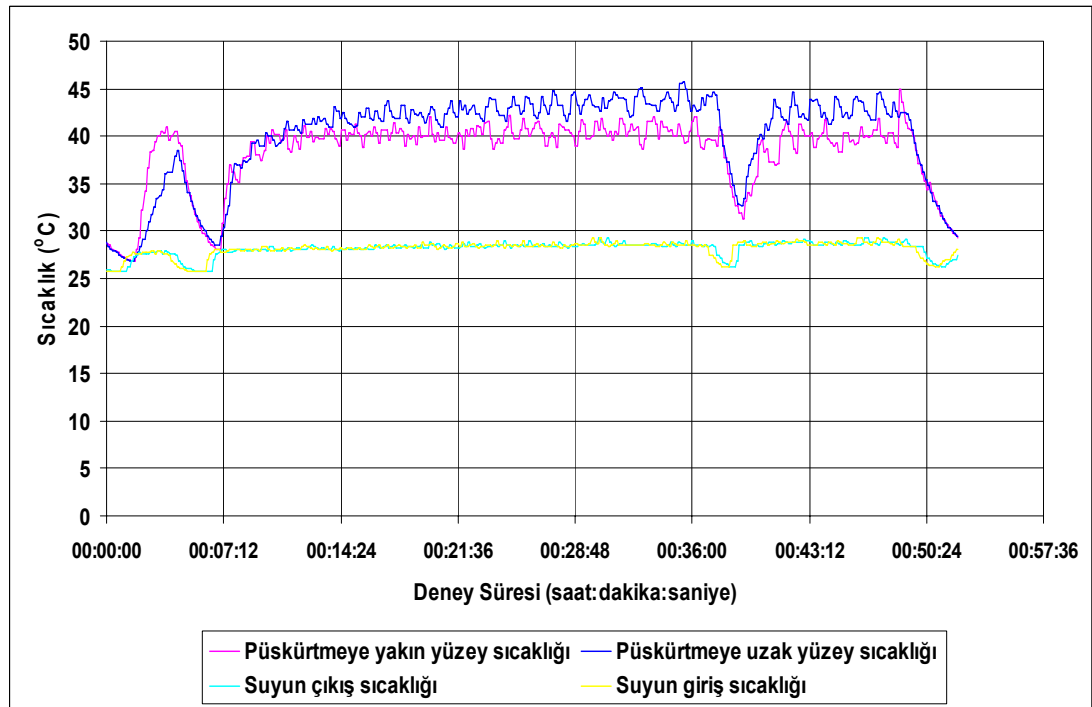
Şekil 6.7. 4 numaralı deneyde soğutma kanalsız SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri



Şekil 6.8. 5 numaralı deneyde soğutma kanalsız SL elektrotndan alınan sıcaklık ölçümleri



Şekil 6.9. 6 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri



Şekil 6.10. 7 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri

SL elektrotların üzerindeki bakır kalınlığı arttıkça SL elektrotların performanslarının bakır elektrotlara yaklaştığı görülmüştür. Yapılan deneylerden alınan sıcaklık ölçümleri de bu sonucu desteklemektedir. Kalın bakır kaplı SL elektrotlarla yapılan deneylerde işleme yüzü sıcaklıklarının dalgalanmadığı, elektrotların düzenli bir işleme karakteristiği sergilediği görülmektedir (Şekil 6.11- Şekil 6.21). Kalın bakır ile kaplanmış (600-800 μm) SL elektrotların bozulma mekanizması ince bakır ile kaplanmış elektrotlara benzemekle beraber aradaki en önemli fark bakır kaplamanın etkilenmesinin daha uzun zaman almasıdır. Soğutma uygulanması deney süresini uzatarak elektrodun daha fazla malzeme işlemesini sağlamaktadır. Yakın bakır kaplama kalınlığına sahip soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotlar arasında bir karşılaştırma yapılırsa elektrotların işleme yüzlerinde oluşan sıcaklıkların soğutmalılarda daha düşük olduğu görülmektedir. Örneğin 8, 9, 14 ve 15 numaralı deneylerde (Şekil 6.11, Şekil 6.12, Şekil 6.18, Şekil 6.15) kullanılan elektrotların bakır kalınlıkları çok yakın (640, 660, 650 ve 648 μm) olduğu için bu elektrotlar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Deney 8 ve 14 soğutmasız, deney 9 ve 15’de ise soğutmalıdır. Deney 8 ve 14’de elektrotların işleme yüzü ortalama sıcaklıkları 38.8 ve 43.6⁰C, deney 9 ve 15’de 33.3 ve 37.9⁰C’dir. Benzer şekilde 10, 16, 17 ve 18 numaralı deneyler karşılaştırılmıştır. Bu deneylerde SL elektrotlar sırasıyla 774, 812, 790 ve 808 μm bakır kalınlıklarına sahiptir. Deney 10 ve 16 soğutmasız, deney 17 ve 18’de soğutmalıdır. Bu deneylerde ulaşılan işleme yüzü sıcaklıklarının ortalama değerleri sırasıyla 56.9, 42.2, 36.8 ve 35.7⁰C’dir. Soğutmalı ve soğutmasız tüm deneyler, soğutulan SL elektrotların işleme yüzü sıcaklıklarının daha düşük olduğu (Şekil 6.11- Şekil 6.21) ve buna bağlı olarak işleme derinliğinin %10 ile %15 arasında arttığını (Çizelge 6.1) göstermektedir.

Soğutmalı SL elektrotlarda iki değişik tipde soğutma kanalı kullanılmıştır. Tip I olarak isimlendirilen soğutma kanalları, elektrotların en çok bozulduğu ve aşınma ve kıvılcımların yoğunlaştığı bölge olan, elektrotların dört kenarı etrafında üretilmiştir. Daha sonra tüm işleme yüzünü soğutarak orta bölgelerde oluşan kopmaları da engellemek amacı ile Tip II olarak isimlendirilen dört kenar etrafında dolaşan soğutma kanallarına ilave olarak elektrodun orta bölgesinde geniş bir soğutma kanalına sahip elektrotlar üretilmiştir. Çizelge 6.3’de Tip I ve Tip II soğutma kanallı

SL elektrotların işleme sırasında soğutma suyu giriş çıkış sıcaklıkları ve stereolitografi epoksisinin ortalama sıcaklıkları sunulmuştur.

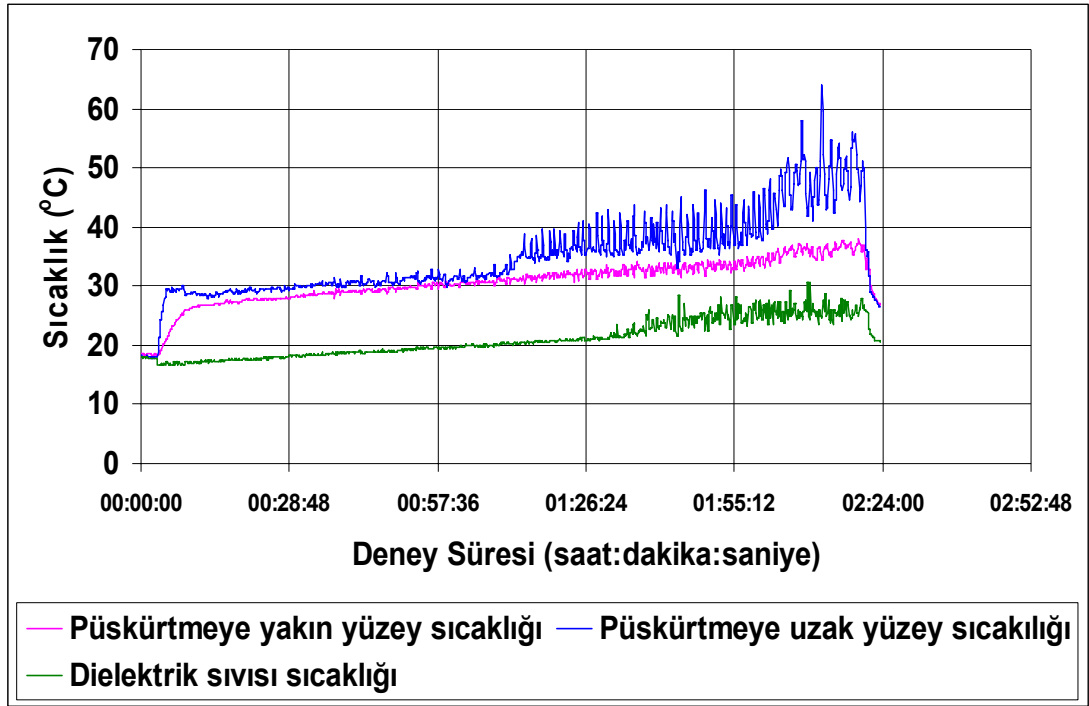
Çizelge 6.3. Soğutmalı SL elektrotlarda epoksinin, soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları ile su giriş çıkışı arasındaki sıcaklık farkı

Deney Numarası	6	7	9	11	12	13	15	17	18
Soğutma kanalı tipi	I	I	I	I	II	II	I	II	II
Suyun ortalama giriş sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	27.4	28.1	21	27.4	23.7	23.8	26.6	23.7	25
Suyun ortalama çıkış sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	27.5	28.1	22.3	30.1	24.2	24.8	28.3	25.5	25.8
Fark ($^{\circ}\text{C}$)	0.1	0	1.3	2.7	0.5	1	1.7	1.8	0.8
Stereolitografi epoksisinin ortalama sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	--	--	--	36	29.1	32.3	32.2	29.3	31.8

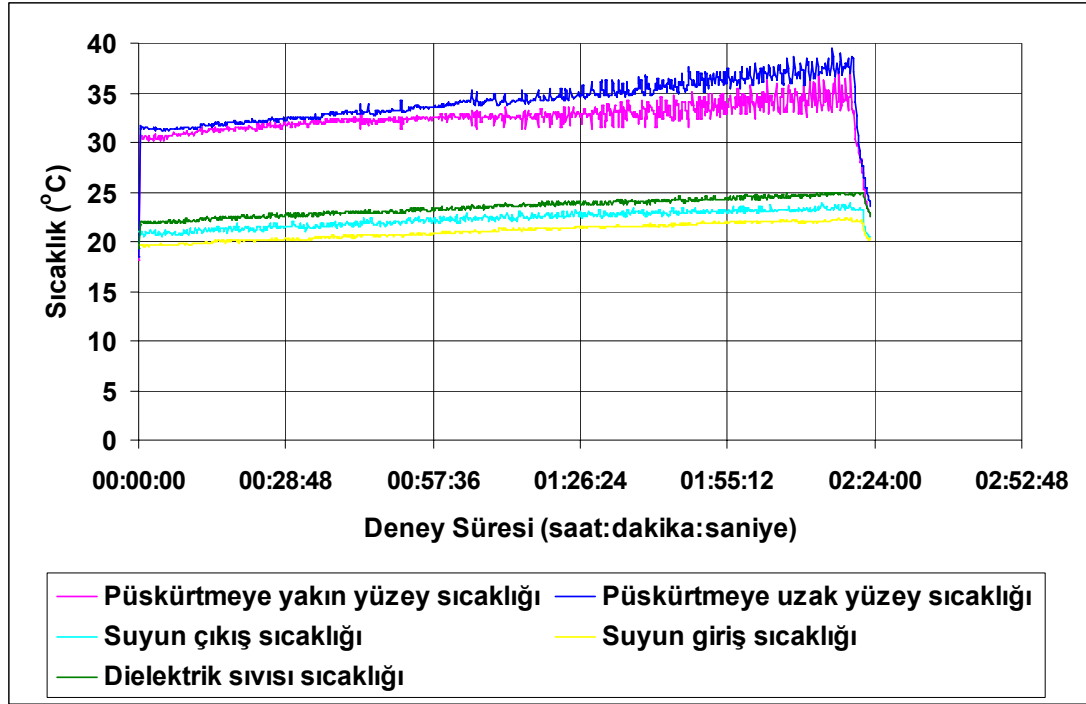
Çizelge 6.3’de sunulan değerler ortalama alınarak hesaplanmıştır. Soğutma suyu sistemi kapalı bir sistem olmadığı için elektrotların giriş suyu tükendikçe sisteme yeni su eklendiğinden, giriş sıcaklıklarında ve buna bağlı olarak çıkış sıcaklıklarında deney sırasında düşme olmaktadır. Suyun giriş ve çıkış sıcaklığının değerinden daha önemli olan iki sıcaklık arasındaki farktır. Çizelge 6.3’den de görüldüğü üzere 6 ve 7 numaralı deneylerin soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında fark yoktur. Bu elektrotların üzerindeki bakır ince olduğundan deneyler sadece 31 ve 50 dakika sürdüğü ve kararlı bir işleme yapılamadığından elektrodun işleme yüzünden soğutma suyuna, soğutma suyu sıcaklığında önemli değişiklikler oluşturacak ısı transferi oluşmamıştır. Tip II soğutma kanallı SL elektrotlarda bakır kaplama kalınlığı arttıkça deney süresi ve buna bağlı olarak soğutma suyu giriş ve çıkışı arasındaki sıcaklık farkı artmıştır. Deney süresi uzadığından elektrodun işleme yüzünden soğutma suyuna sıcaklığı değiştirecek kadar ısı transferi oluşmuş ve bu ısı transferi elektrodun işleme yüzünü soğutarak işleme derinliğini artırmıştır. Bu sonuç Çizelge 6.3’de sunulan işleme yüzü sıcaklıkları ile desteklenmektedir. Deney 9, 11, 12, 13, 15, 17 ve 18’de soğutma suyu giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında fark 0.5 ile 2.7 $^{\circ}\text{C}$ arasında değişmektedir. Soğutma suyuna aktarılan ısı ve oluşan sıcaklık farkı değerleri

incelendiğinde soğutmalı SL elektrotların işleme derinliği gibi performans değerleri bakır kaplama kalınlığı aynı veya yakın olan soğutmasız SL elektrotlardan daha iyidir.

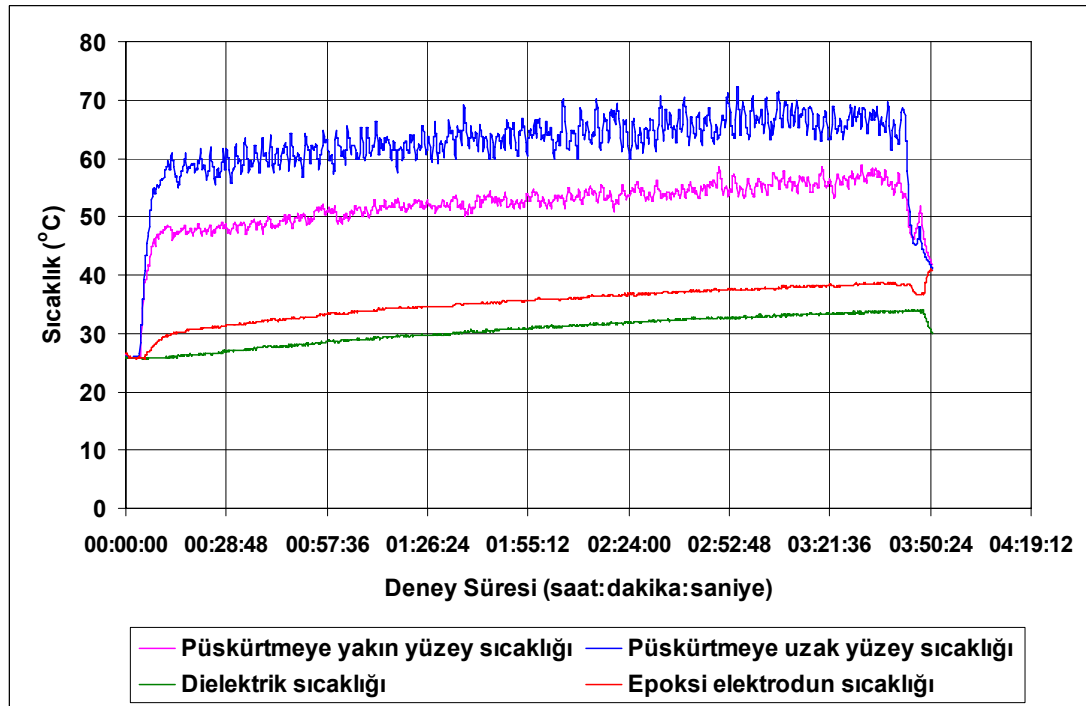
Çizelge 6.3’de sunulan SL elektrotların epoksi sıcaklıkları incelendiğinde Tip II soğutma kanalı geometrisine sahip elektrotların epoksi sıcaklıklarının Tip I soğutma kanalı geometrisine sahip olanlardan düşük olduğu görülmektedir. Epoksi sıcaklığını soğutma kanalı geometrisi yanında elektrot üzerindeki bakır kalınlığı da etkilemektedir. Bakır kaplama kalınlığının epoksi sıcaklığına olan etkisi Bölüm 6.6.5 Şekil 6.28’de sunulmuştur.



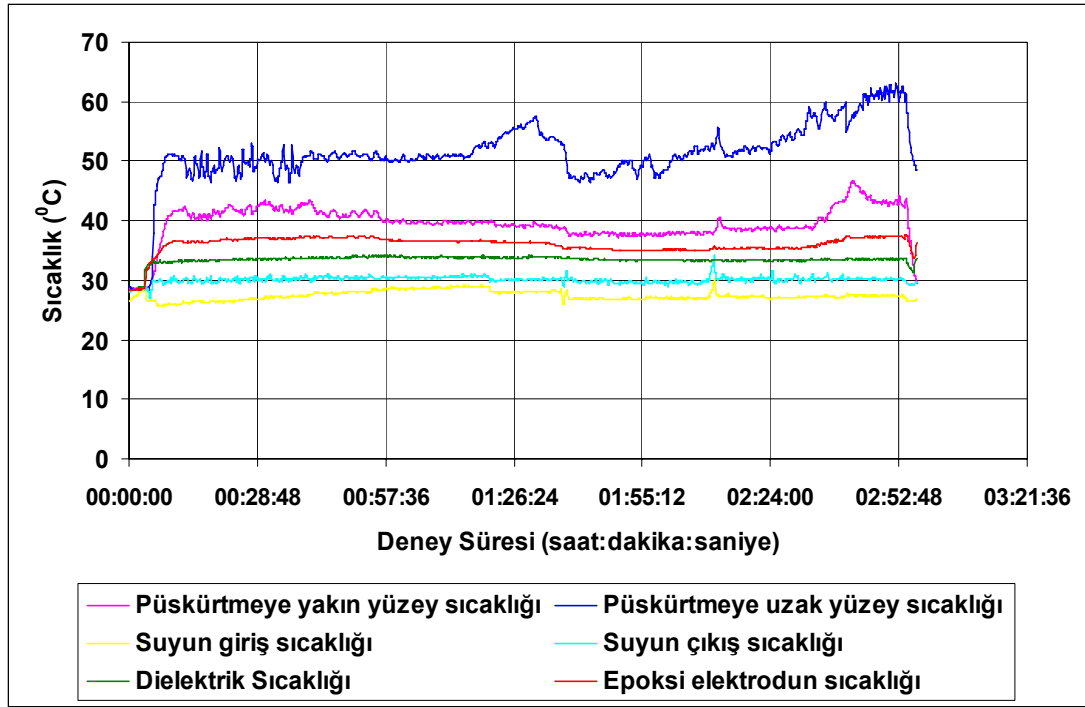
Şekil 6.11. 8 numaralı deneyde soğutmasız, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri



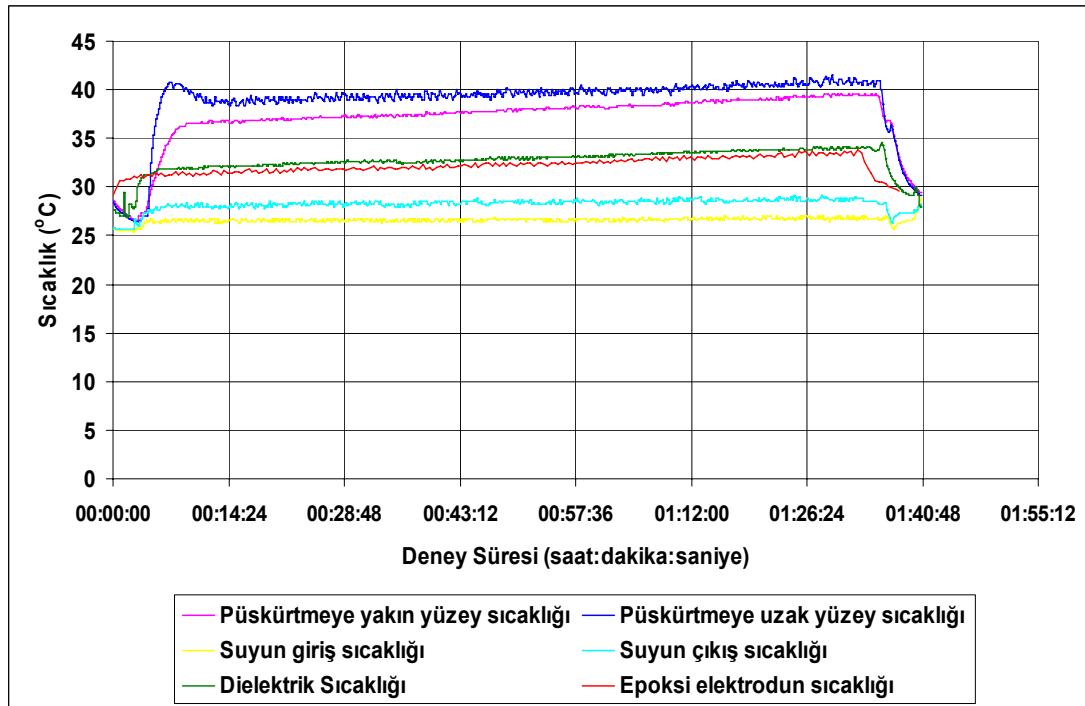
Şekil 6.12. 9 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri



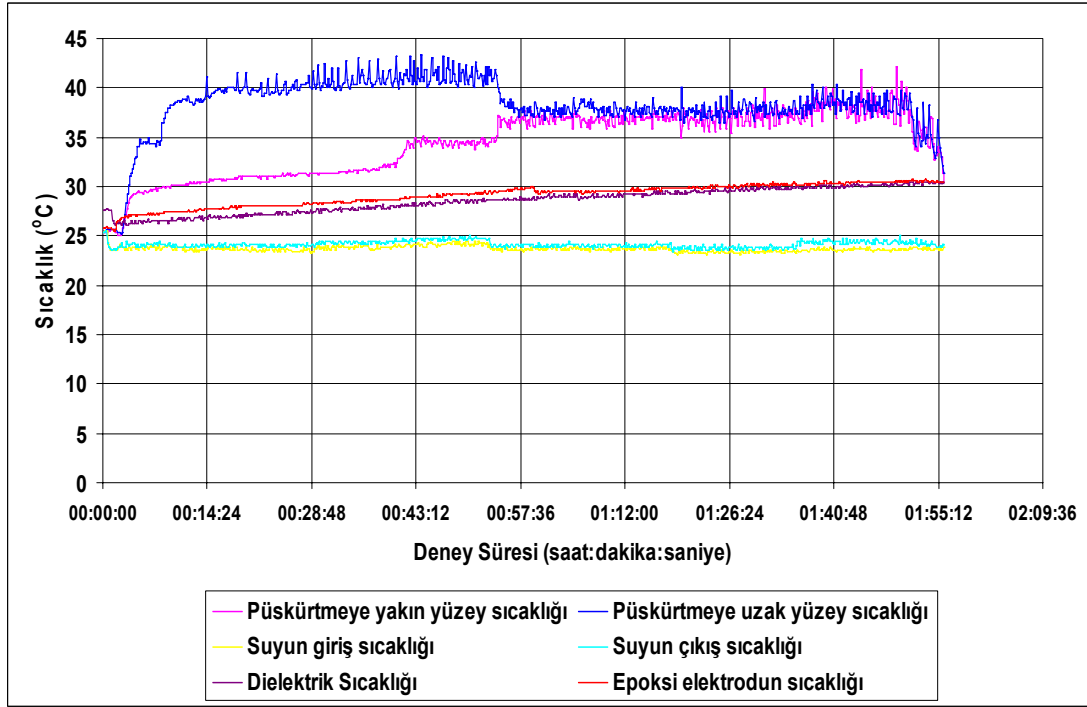
Şekil 6.13. 10 numaralı deneyde soğutmasız, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri



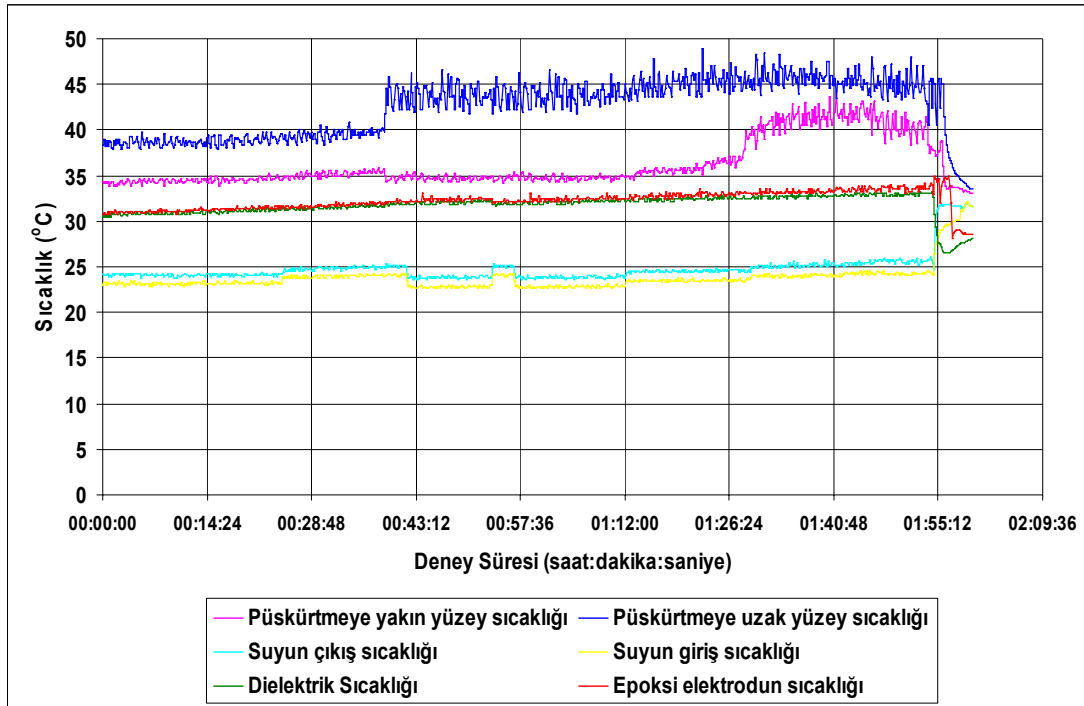
Şekil 6.14. 11 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri



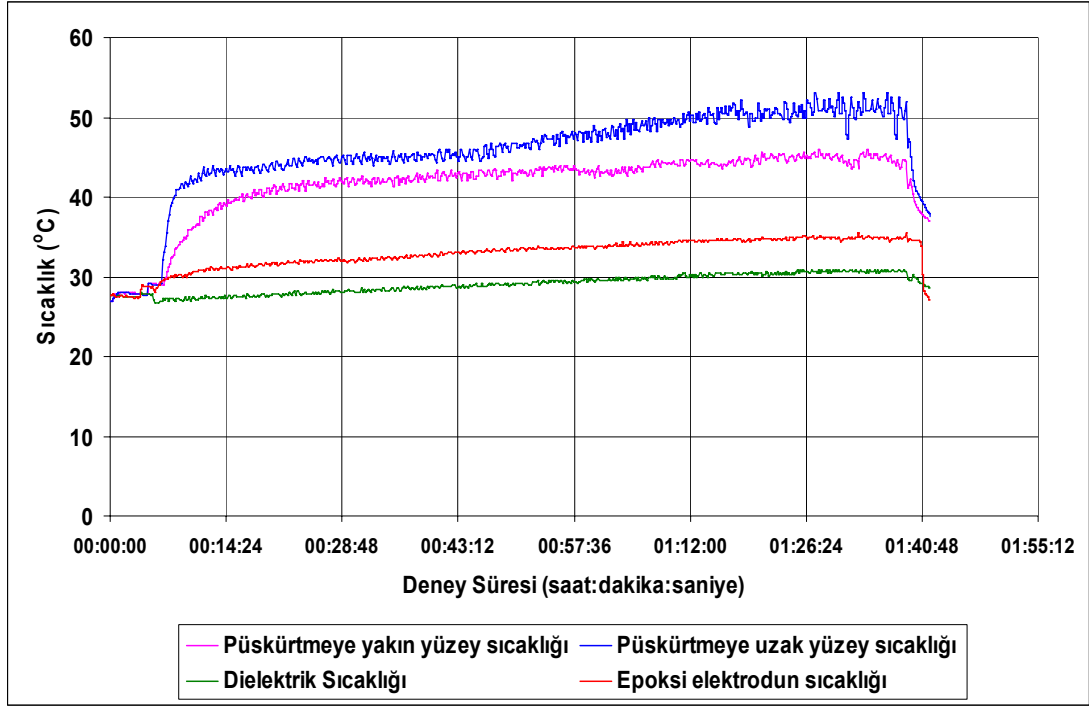
Şekil 6.15. 15 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı boyunca soğutma kanallı SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri



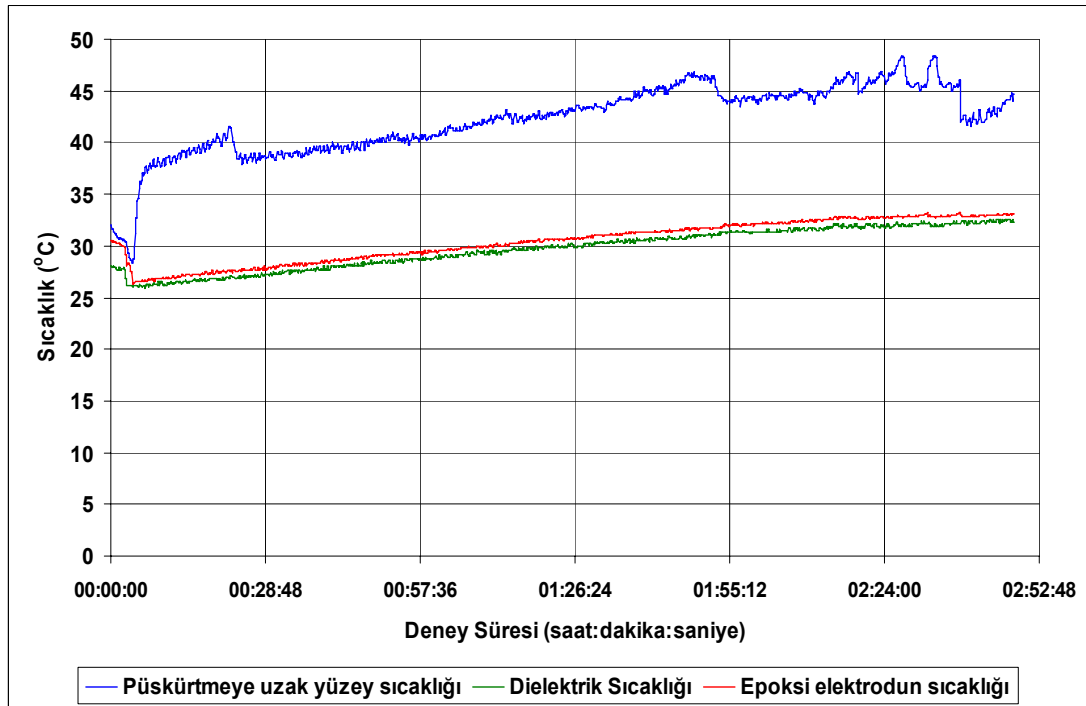
Şekil 6.16. 12 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri



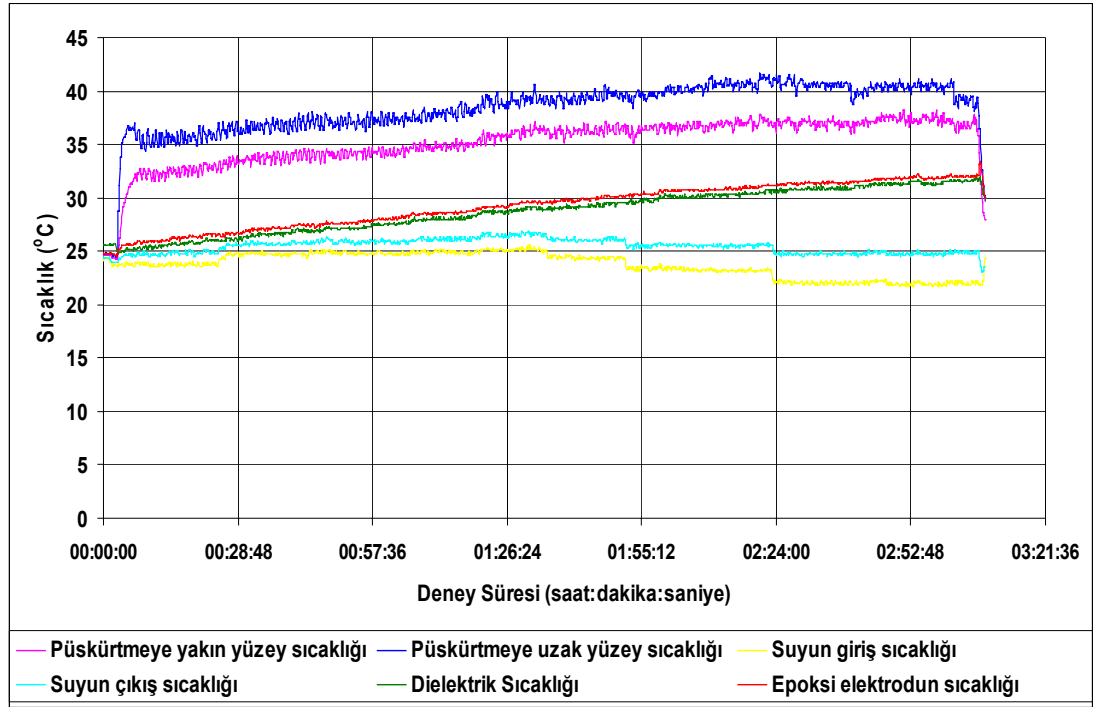
Şekil 6.17. 13 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri



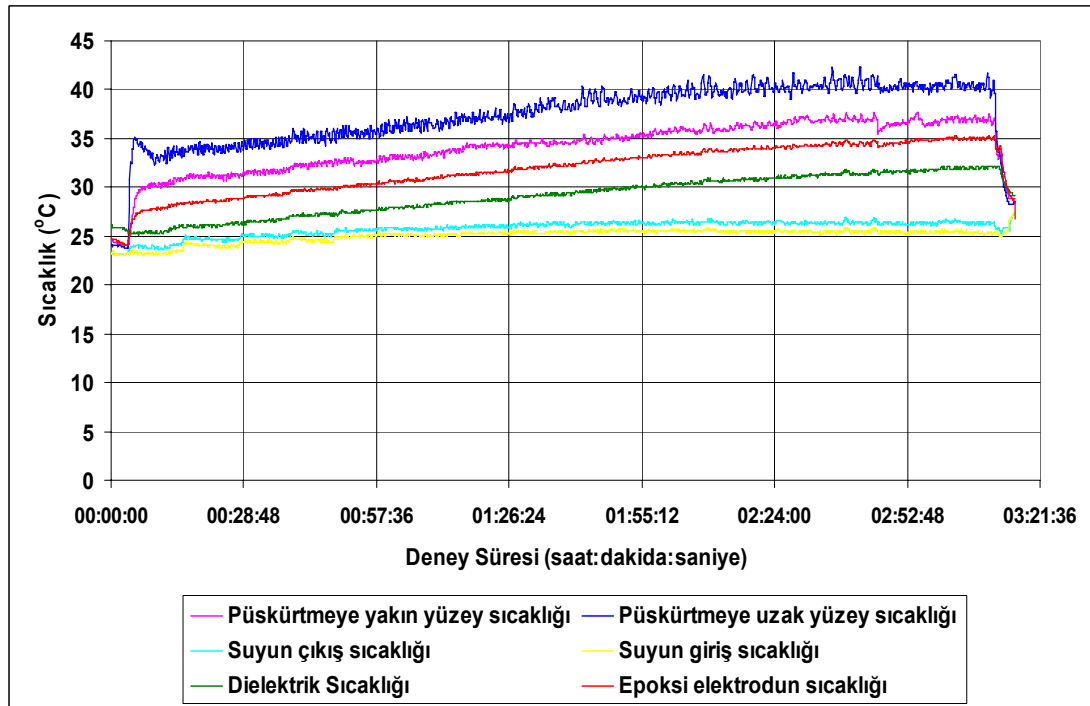
Şekil 6.18. 14 numaralı deneyde soğutmasız, dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotundan alınan sıcaklık ölçümleri



Şekil 6.19. 16 numaralı deneyde soğutmasız, dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotundan alınan sıcaklık ölçümleri



Şekil 6.20. 17 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri



Şekil 6.21. 18 numaralı deneyde soğutmalı, dört kenarı ve erozyon yüzünde kalın geniş soğutma kanallı SL elektrotdan alınan sıcaklık ölçümleri

6.5. Elektrot Sıcaklıklarının Elektrot Ön Yüz Aşınmasına (Δl_F) Etkileri

Literatürde, düşük akım ve vurum süreleri ile SL elektrotların bitirme operasyonlarında veya tek bir kavite için birden fazla elektrot kullanılması gerektiği belirtilmiştir [1-5]. Tez çalışmasında işleme parametreleri yarı kaba ile kaba işleme parametrelerine yakın seçilerek soğutmalı SL elektrot kullanarak maksimum işleme derinliği elde edilmeye çalışılmıştır. Bu hedefe ulaşabilmek için SL elektrodun işleme sırasında oluşan ısıdan minimum etkilenecek şekilde işleme akımından aşınmasını sağlamak gerekmektedir. SL elektrotlar ile derin kaviteler işlemek için soğutma kullanılması elektrodun ve üzerindeki bakır kaplamanın ısı nedeniyle bozulmasını geciktirerek bu hedefe ulaşılmasını sağlamıştır. Bakır elektrotlarda olduğu gibi elektro erozyon ile işlemenin (EEİ) doğal bir sonucu olarak SL elektrotlarda da ön yüz aşınması oluşmaktadır. Aşınma ile elektrot ölçülerinde değişikliğin çok fazla olması işlenen işparçası boyutlarını etkilediği gibi bakır kaplamanın tamamen aşınarak stereolitografi reçinesinin ortaya çıkmasıyla elektrodu bozarak işlemeyi durdurmaktadır. Bu sebeplerle elektrot aşınması mümkün oldukça az tutulmaya çalışılmaktadır.

Çizelge 6.4’de soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotlar bakır kaplama kalınlığına göre gruplandırılmıştır. 300 μm bakır kaplama kalınlığına sahip elektrotlar ile yapılan ilk deneyler incelendiğinde soğutmanın etkisi sadece işleme derinliğinde gözükmemektedir. İnce bakır kaplamalı elektrotlar derin işlemler yapamadığından elektrot ön yüz aşınmaları da az olmuştur. Bakır kalınlığı arttıkça ve buna bağlı olarak deney süresi uzadıkça soğutmanın etkisi görülmekte ve elektrotlar derin işlemler yaparak daha çok Δl_F gerçekleştirmektedir. Deney 8, 9, 14 ve 15 incelendiğinde, soğutmalı 9 ve 15 numaralı deneylerde SL elektrotların 8 ve 14 numaralı elektrotlara göre daha fazla aşınarak daha derin işlemler yaptığı görülmektedir. Benzer sonuçlar deney 10, 16, 17 ve 18 için de geçerlidir. Elektrot soğutuldukça Δl_F artmış ve elektrotlar daha uzun süre işleme yapmışlardır. Soğutma, ısı birikmesi nedeniyle elektrotların bakır kabuğunun erken bozulmasını önleyerek elektrodun hedeflenen şekilde aşınarak bozulmasını sağlamıştır.

Çizelge 6.4. Soğutmalı, soğutmasız SL elektrotların elektrot ön yüz aşınması, sıcaklığı, bakır kaplama kalınlığı ve işleme derinlikleri

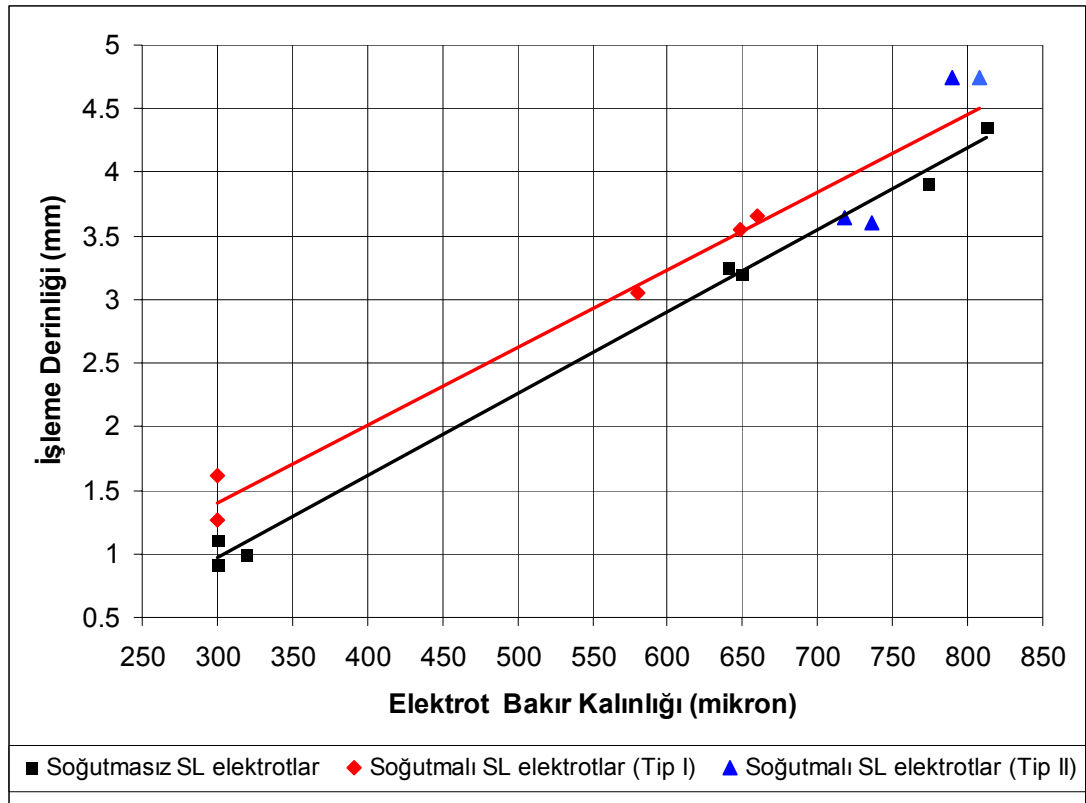
Deney numarası	Soğutmalı / soğutmasız	Soğutma kanalı tipi	Elektrot üzerine kaplanan bakır kalınlığı (μm)	ΔI_F (μm)	Erozyon yüzünün ortalama sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$)	İşleme derinliği (mm)
3	Soğutmasız	-	300	125	43.1	1.1
4	Soğutmasız	-	320	70	43.8	1
5	Soğutmasız	-	300	80	47.7	0.92
6	Soğutmalı	Tip I	300	75	40.4	1.27
7	Soğutmalı	Tip I	300	155	39.2	1.62
11	Soğutmalı	Tip I	580	360	45.5	3.05
8	Soğutmasız	-	640	295	38.8	3.26
9	Soğutmalı	Tip I	660	440	33.3	3.60
14	Soğutmasız	-	650	420	43.6	3.2
15	Soğutmalı	Tip I	648	435	37.9	3.55
13	Soğutmalı	Tip II	718	500	39.3	3.65
12	Soğutmalı	Tip II	736	530	36.3	3.60
10	Soğutmasız	-	774	470	56.8	3.91
16	Soğutmasız	-	812	495	42.2	4.35
17	Soğutmalı	Tip II	790	540	36.8	4.75
18	Soğutmalı	Tip II	808	545	35.7	4.75

6.6. Elektrot Bakır Kalınlığının Elektrot Performansına Etkileri

6.6.1. Elektrot bakır kalınlığının işleme derinliğine etkisi

Şekil 6.22’de sunulan bakır kalınlığına göre işleme derinliğini gösteren grafikler incelendiğinde elektrot üzerindeki bakır kaplama kalınlığı arttıkça işleme derinliğinin arttığı görülmektedir. 300 μm bakır kaplama kalınlığına sahip SL elektrotların çabuk bozuldukları ve ancak 1 mm civarında işleme derinliğine ulaşabildikleri görülmektedir. Soğutma ile bu işleme derinliğinin 1.27 ve 1.62 mm gibi değerlere çıkartılmasına rağmen ince bakır kaplamalı SL elektrotların kararlı işleme rejimini sağlayamadıkları ve işleme sırasında meydana gelen ısının oluşturduğu bozulma mekanizmalarıyla kısa sürede kullanılmaz hale geldikleri görülmüştür. Bakır kaplama kalınlığının 600-700 μm ’ler civarına çıkartılması ile işleme derinlikleri

3 mm'ye ulaşabilmiştir. Bakır kaplama kalınlığının artması ile kararlı işleme rejimi sağlanmış ve SL elektrotların erken bozulmaları engellenmiştir. Ayrıca elektrotlara uygulanan soğutma ile işleme sırasında oluşan ısı işleme yüzünden uzaklaştırılmış ve işleme derinliklerinin 3.6 mm'ye kadar ulaşması sağlanmıştır. 800 μm kaplama kalınlığında 4.5 mm işleme derinliklerine ulaşıldığı görülmüştür. Soğutmalı 800 μm bakır kalınlığına sahip SL elektrotlar 4.75 mm işleme derinliklerine kadar ulaşabilmiştir.

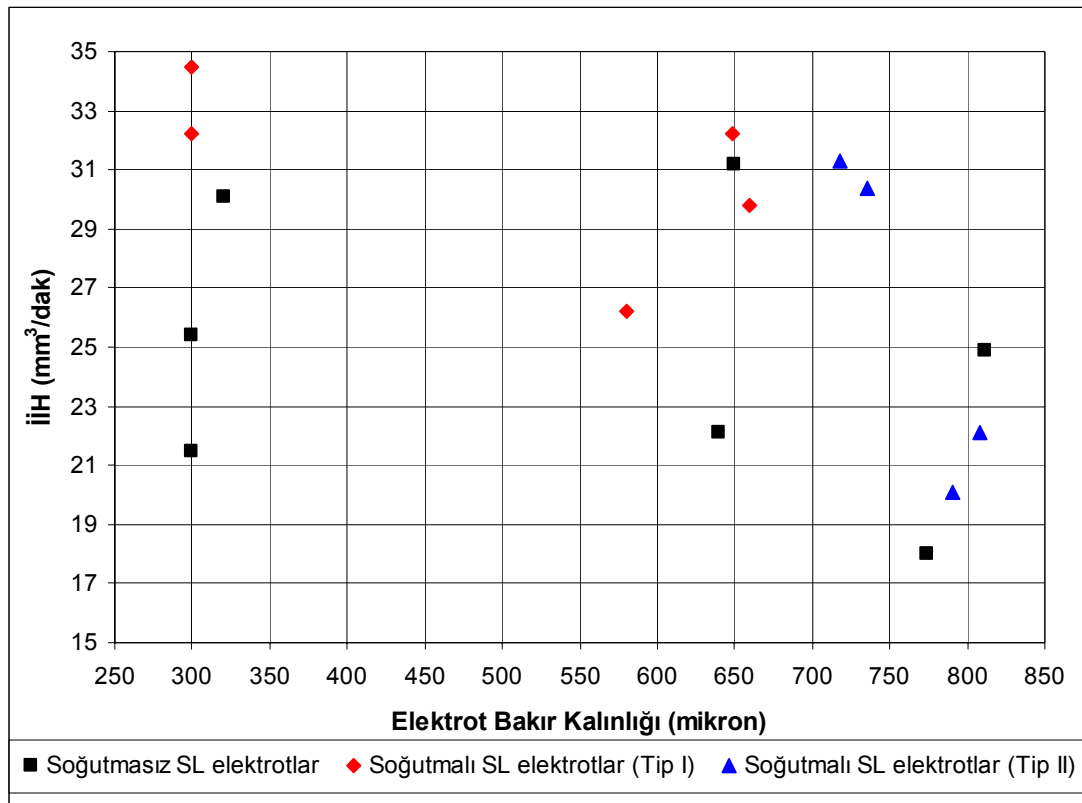


Şekil 6.22. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların işleme derinliklerinin bakır kaplama kalınlığına göre değişimi

Şekil 6.22'den görüldüğü üzere soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotlar arasındaki işleme derinliği farkının ince bakır kaplamalı SL elektrotlarda daha fazla olduğu görülmektedir. Bakır kaplama kalınlığı arttıkça bu farkın azaldığı grafiklerden anlaşılmaktadır.

6.6.2. Elektrot bakır kalınlığının işparçası işleme hızına (İİH) etkisi

Şekil 6.23’de görüldüğü üzere SL elektrotların bakır kaplama kalınlığı ile İİH arasında belirli bir ilişki yoktur. Şekil incelendiğinde ince bakır kaplı soğutmalı elektrotların daha yüksek İİH değerleri verdiği ve bakır kaplama kalınlığı arttıkça soğutmalı ve soğutmasız elektrotlar arasındaki İİH farkının azaldığı görülmektedir.

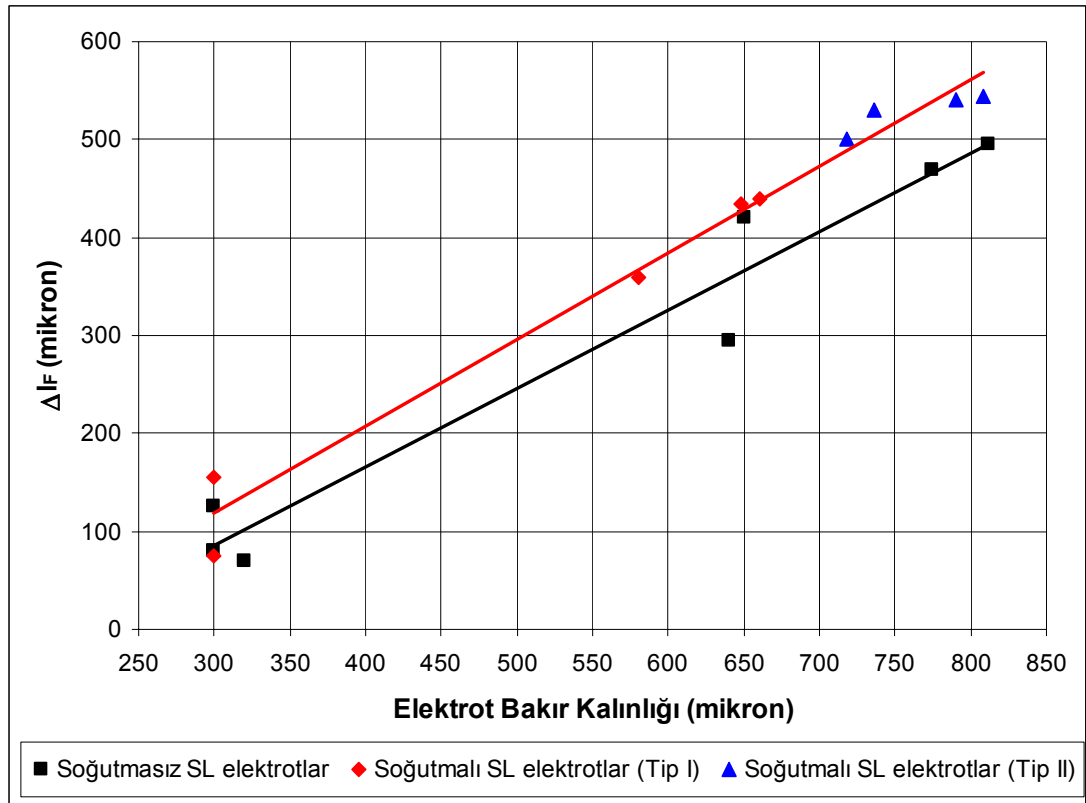


Şekil 6.23. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların İİH değerlerinin bakır kaplama kalınlığına göre değişimi

6.6.3. Elektrot bakır kalınlığının elektrot ön yüz aşınmasına (Δl_F) etkisi

Şekil 6.24’de sunulan grafiklerde elektrotların Δl_F değerlerinin bakır kaplama kalınlığına göre değişimi görülmektedir. Grafikler incelendiğinde bakır kalınlığının artması ile elektrodun daha uzun işlemler yaparak daha fazla aşınabildikleri sonucu belirgindir. Buna bağlı olarak da elektrotların daha derin işlemler yapabildiği sonucu doğaldır. Elektrotların bakır kaplama kalınlığının 300 μm ’lerden 600 ve

800 μm 'lere ulaşması elektrotların dayanabileceği ön yüz aşınmasını önemli oranda artırmıştır. Kalın bakır kaplama kullanılması, SL elektrotlarda ısı transferi problemleri nedeniyle oluşan bozulma mekanizmalarını geciktirdiği ve fiziksel olarak aşınacak daha kalın bakır kaplama olması nedenleriyle elektrodun ulaşabileceği Δl_F değerlerini artırmaktadır. Bakır kaplamanın kalınlaştırılması yanında elektrotlara soğutma uygulandığında Δl_F 'in yüksek değerlere erişebileceği görülmüştür. Grafikler incelendiğinde soğutma uygulanan SL elektrotlarda elektrotların daha fazla aşınabildiği ve buna bağlı olarak daha derin işlemler yapabildikleri görülmektedir.



Şekil 6.24. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotlarda Δl_F 'in bakır kaplama kalınlığına göre değişimi

6.6.4. Elektrotların aşınma sonrası bakır kalınlığı

SL elektrotlar genelde bakır kaplamanın kritik bir seviyeye kadar aşınması ve daha sonra koparak reçinenin ortaya çıkması ile bozulmaktadır. Örneğin üzerinde 500 μm

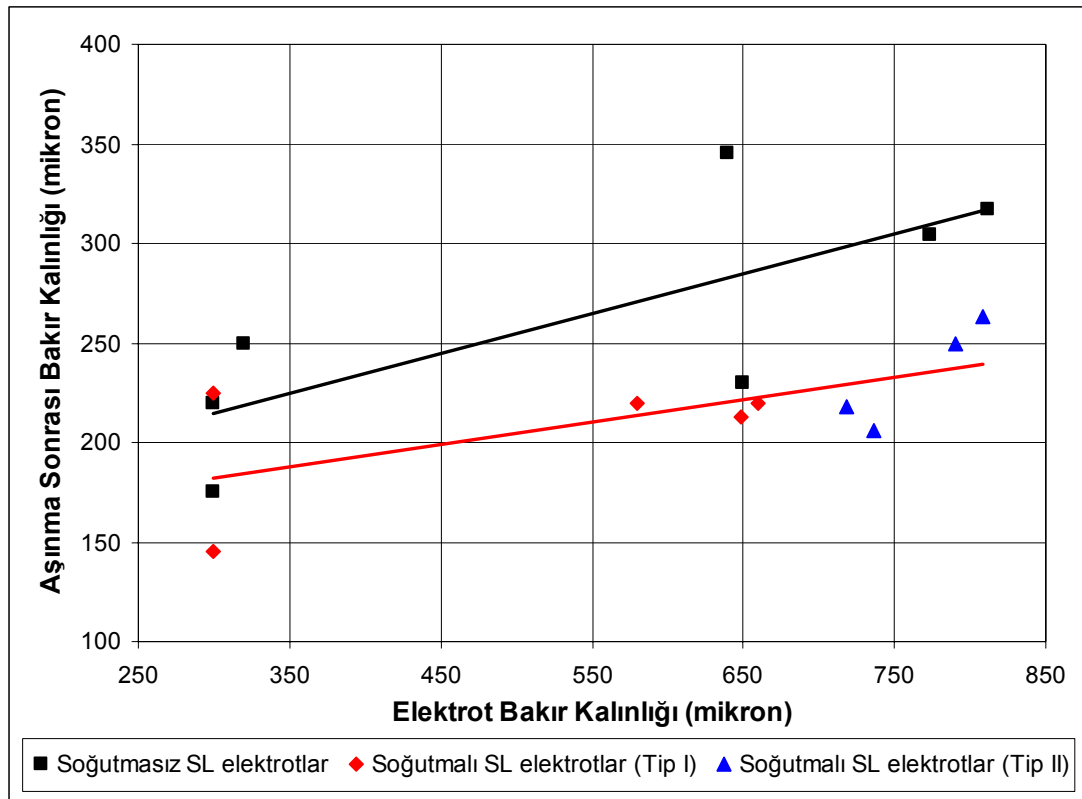
bakır kaplamaya sahip bir SL elektrot bakır kaplama aşınarak elektrot üzerinde sıfır kaplama kalana kadar işleme yapamaz. Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde SL elektrotların işleme yapabilmeleri için minimum bakır kaplama kalınlığının 180 μm 'den büyük olması gerektiği belirtilmiştir. 180 μm 'den küçük bakır kaplama kalınlığına sahip elektrotların işlemenin başlarında erken bir şekilde bozulduğu ve çok düşük işleme derinliklerine ulaşabildikleri belirtilmiştir. Çizelge 6.5'de deneysel çalışmadaki SL elektrotların aşınıp deney sonlandırıldıktan sonra ölçülen elektrot üzerinde kalmış bakır kaplama kalınlıkları sunulmuştur.

Çizelge 6.5. SL elektrotların aşınma sonrası bakır kaplama kalınlıkları

Deney No	Elektrot bakır kalınlığı (μm)	Aşınma sonrası bakır kaplama kalınlığı (μm)
3	300	175
4	320	250
5	300	220
6	300	225
7	300	145
8	640	345
9	660	220
10	774	304
11	580	220
12	736	206
13	718	218
14	650	230
15	648	213
16	812	317
17	790	250
18	808	263

Çizelge 6.5 incelendiğinde elektrotların bozulduktan sonra üzerlerinde kalan bakır kalınlıklarının 145 ile 345 μm arasında değiştiği görülmektedir. Fakat genelde elektrotların bozulduktan sonra üzerlerinde yaklaşık 200 μm bakır kaplama kaldığı ve elektrotların çoğunun 200 μm bakır kaplama kalınlığına kadar aşınıp daha sonra bozuldukları görülmüştür. Elde edilen bu bilgi literatürde sunulan minimum gerekli bakır kaplama kalınlığı ile uyumludur. SL elektrotların işleme yapabilmeleri için üzerlerinde 200 μm 'dan fazla bakır kalınlığına sahip olmaları gereklidir. Bakır

kaplama kalınlığı arttıkça elektrotlar 200 μm 'na aşınana kadar derin işlemler yapabilmektedir. Elektrot üzerindeki bakır kalınlığına göre aşınma sonrası bakır kaplama kalınlığının değişimi soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotlar için Şekil 6.25'de sunulmuştur. Şekil 6.25 incelendiğinde soğutmalı SL elektrotların soğutmasızlara göre daha fazla aşınarak aşınma sonrası bakır kalınlıklarının daha düşük olduğu görülmektedir. Ayrıca bakır kalınlığı arttıkça aşınma sonrası bakır kalınlığının da arttığı ve elektrotların üzerlerinde daha kalın bakır kaplama kalarak bozuldukları görülmüştür. Bunun nedeninin deneyin uzaması ve elektrotların üzerinde biriken ısınnın artarak elektrotların aşınmaya fırsat bulamadan daha çabuk bozulmasına bağlı olduğu değerlendirilmektedir.

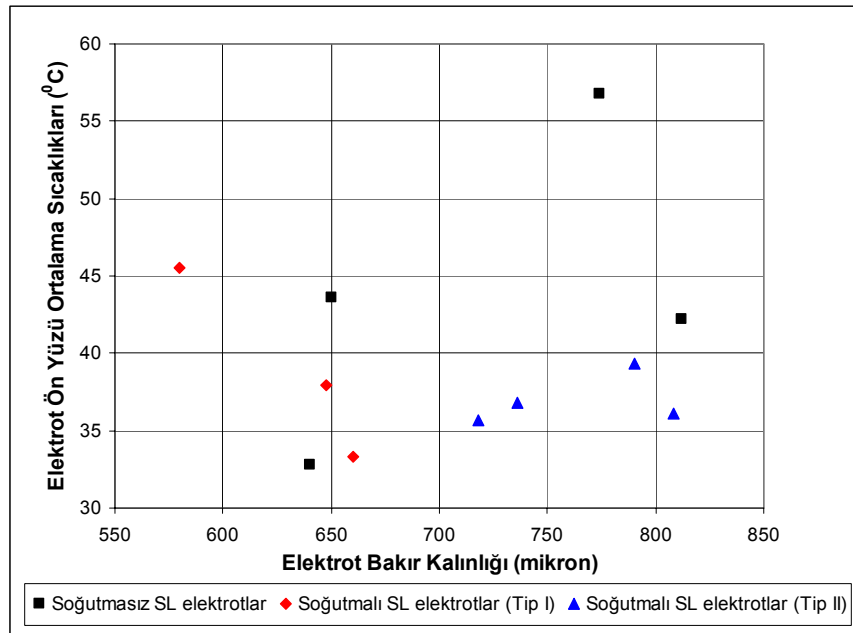


Şekil 6.25. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların aşınma sonrası bakır kaplama kalınlıklarının elektrot bakır kalınlığına göre değişimi

6.6.5. Elektrot bakır kalınlığının elektrot sıcaklıklarına etkisi

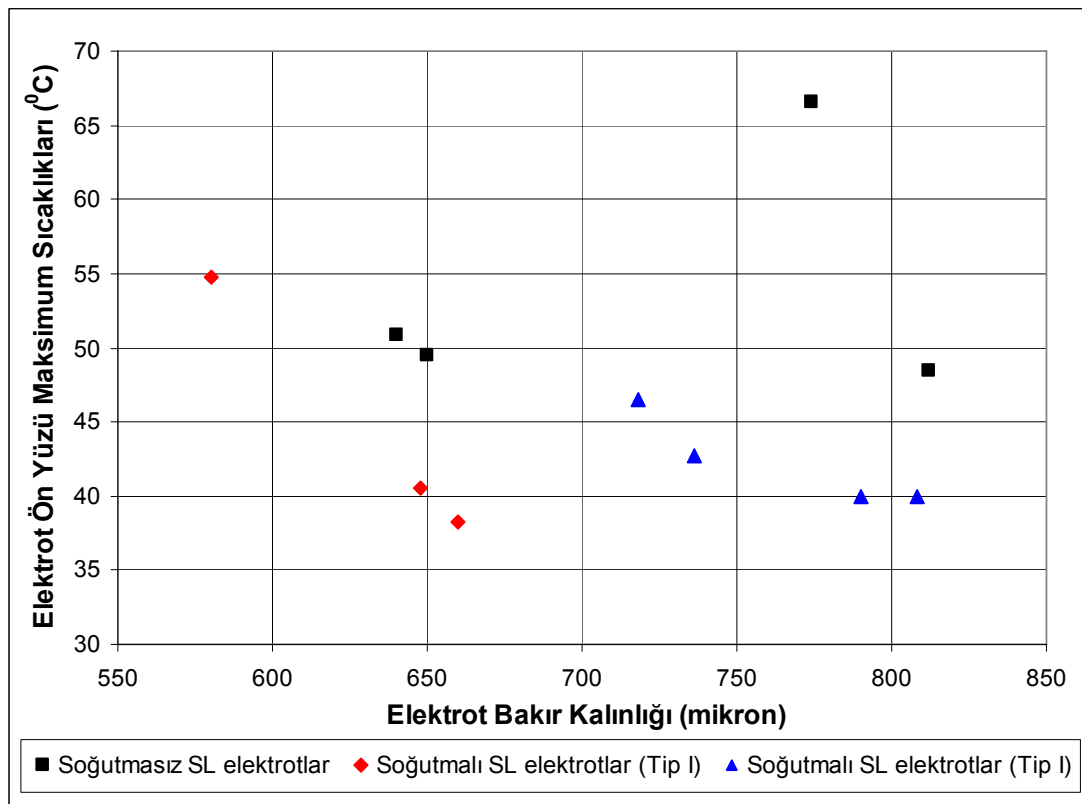
SL elektrotların performansını belirleyen en önemli özellik literatürdeki çalışmalardan da [1-5] belirtildiği üzere kaplanan bakırın kalınlığıdır. Şekil 6.26'da soğutma uygulanan tüm elektrotların elektrot ön yüzü sıcaklıklarının uygulanmayanlara göre daha düşük olduğu görülmektedir. Sıcaklıklar hesaplanırken elektrot ön yüzündeki sadece iki noktadan ölçülen sıcaklıkların ortalaması alındığı için sıcaklık ölçümleri sadece elektrot ön yüzündeki sıcaklıkların ulaşabileceği değerler hakkında bilgi vermektedir.

Şekil 6.26'da 300 µm bakır kaplamalı SL elektrotların elektrot ön yüzü sıcaklıkları gösterilmemiştir. Bu elektrotların bakır kaplama kalınlıkları çok ince olduğu ve ısı çiftleri için kullanılan bakır tıplar kıvılcım yoğunluğunu kendi üzerlerinde yoğunlaştırdığı için elde edilen ortalama değerler olması gereken değerlerden yüksektir. Şekil 6.6- Şekil 6.10'dan da görüldüğü gibi ince bakır kaplı elektrotların sıcaklık ölçüm grafiklerinde elektrot ön yüzü yüzü sıcaklıklarında bölgesel bazı sıcaklık artışları ve inişli çıkışlı bir karakteristik mevcuttur.



Şekil 6.26. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrot ön yüz ortalama sıcaklıklarının bakır kaplama kalınlığına göre değişimi

Şekil 6.26’da sunulan grafiğe benzer bir grafik Şekil 6.27’de elektrot ön yüzünden iki noktadan alınan tüm sıcaklıkların ortalaması alınarak değil okunan sıcaklıkların maksimum değerlerinin ortalaması alınarak çizilmiştir. Şekil 6.27’de sunulan grafik SL elektrotların elektrot ön yüzlerinin ulaşabileceği maksimum sıcaklıkları karşılaştırmak için kullanılmıştır. Grafik incelendiğinde soğutmalı SL elektrotların maksimum elektrot ön yüzü sıcaklıklarının soğutmasızlardan düşük olduğu görülmektedir.

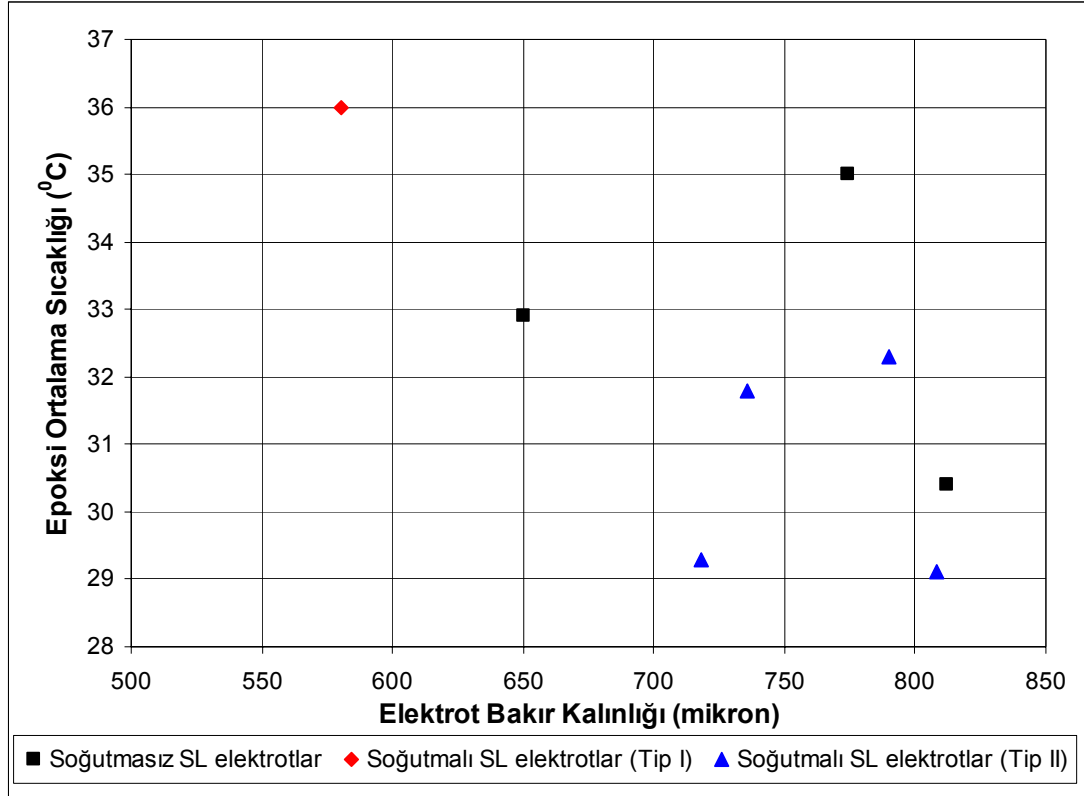


Şekil 6.27. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotön yüzü maksimum sıcaklıklarının bakır kaplama kalınlığına göre değişimi

Şekil 6.26 ve Şekil 6.27 incelendiğinde soğutmalı SL elektrotlarda bakır kaplama kalınlığı arttıkça elektrot ön yüzü sıcaklığının ortalama ve maksimum değerlerinin düştüğü görülmektedir. Bu düşüş bakır kalınlığı 650 μm ’nun üzerine çıktığında durmuş ve bakır kalınlığının artmasının sıcaklıkları daha fazla düşürmediği, hatta artışın başladığı görülmüştür. Bakır kalınlığı arttıkça bakırdan taşıma ile elektrot tutucusuna olan ısı transferi artmaktadır. Ayrıca bakır kalınlığı arttıkça deney süresi

uzamakta elektrot bozulmadan daha çok işleme yapılarak soğutmanın etkisi ile elektrot ön yüzünden uzaklaştırılan ısı, elektrot ön yüzü sıcaklıklarını düşürmektedir. Fakat bakır kalınlığı artırılmaya devam edilirse taşıma ile ısı transferinde büyük değişiklik olmadığı ve su ile uzaklaştırılan sıcaklık sınırlı kaldığından uzayan deney süresi elektrot ön yüzünün sıcaklıklarının yeniden yükselmesine neden olduğu görülmüştür. Soğutmasız SL elektrotlarda bakır kalınlığı arttıkça elektrot ön yüzü ortalama ve maksimum sıcaklığı artış göstermiştir. Bunun nedeninin deney süresinin uzaması ile işleme sırasında oluşan ısının taşıma ile elektrot tutucusuna aktarılmasının yeterli olmaması ve ısının elektrot ön yüzünde birikmesi olduğu düşünülmektedir. Bakır kalınlığı artırılmaya devam edildiğinde sıcaklıkların düştüğü fakat soğutmalı elektrotların seviyesine kadar inemediği gözlemlenmiştir.

Şekil 6.28’de soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotlarda epoksinin ulaştığı ortalama sıcaklıkların bakır kaplama kalınlığına göre değişimi sunulmuştur. Ölçümün alındığı nokta soğutma uygulanan bölgeye uzak olduğundan soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların aralarında önemli bir fark olmamakla beraber soğutmalı elektrotların epoksi sıcaklıklarının soğutmasızlara göre daha düşük olduğu görülmektedir. Stereolitografi reçinesi ısı transferi bakımından kötü bir malzeme olduğu için ısıyı iyi iletememektedir. Bu nedenle soğutmanın etkisi ölçüm noktasından çok iyi izlenememekle beraber alınan bu ölçüm Fluent programında kontrol sıcaklığı olarak kullanılmıştır. Tez çalışmasında bakır ile stereolitografi reçinesi birleşim noktasında bakır kabuğun sıcaklığı ölçülmüş fakat aynı noktada reçineden sıcaklık ölçümü alınamamıştır. Belirtilen bölgenin sıcaklık dağılımının elde edilebilmesi için Fluent programı kullanılarak elektrot modellenmiş ve stereolitografi reçinesinden alınan sıcaklık ölçümü ile hazırlanan model kontrol edilmiştir. Böylece elde edilen sıcaklık dağılımının doğruluğu ve modelin hassasiyeti hakkında stereolitografi reçinesinden alınan bu sıcaklık ölçümü kontrol amaçlı kullanılarak SL elektrotların sıcaklık dağılımı hakkında detaylı bilgi elde edilmiştir.



Şekil 6.28. Soğutmalı ve soğutmasız SL elektrotların epoksi sıcaklıklarının bakır kaplama kalınlığına göre değişimi

6.7. Fluent Analizleri ile SL Elektrotların Performansının İncelenmesi

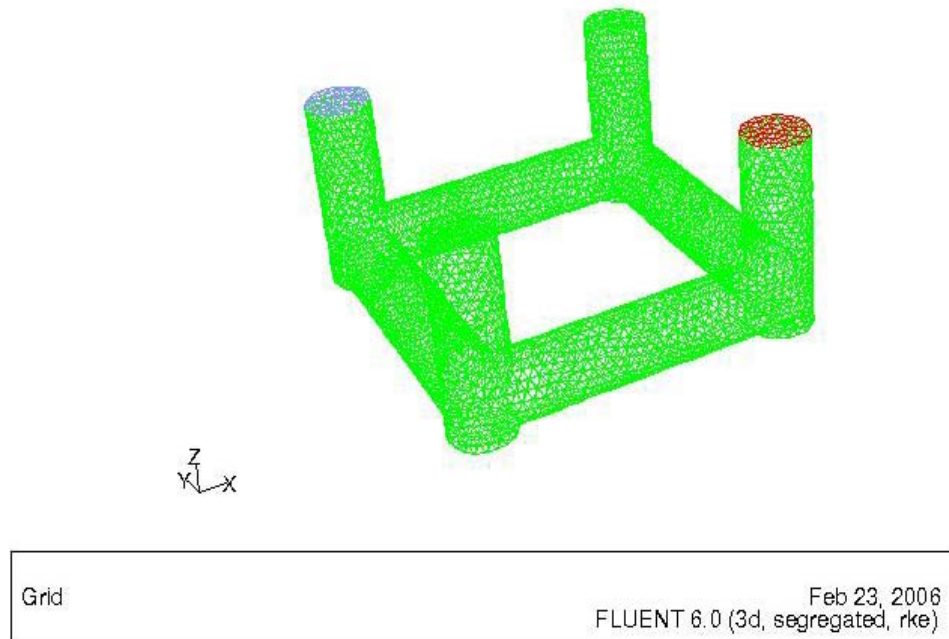
6.7.1. Fluent analizinin çalışmada kullanılması

Deney sonuçları incelendiğinde soğutmalı SL elektrotlar ile 12 A gibi yüksek bir işleme akımı kullanarak 4.75 mm gibi derin işlemler yapılabildiği görülmüştür. 4.75 mm işleme derinliğine ulaşan soğutmalı SL elektroda yakın bakır kaplama kalınlığına sahip, soğutmasız bir SL elektrot 4.35 mm işleme derinliğine ulaşmıştır. Bu sonuçlar ile soğutmanın ortalama %15'e yakın işleme derinliğini artırdığı tespit edilmiştir. Bu deneysel sonucu sayısal olarak desteklemek için soğutmanın elektrot üzerindeki etkileri Fluent hesaplamalı akışkanlar yazılımıyla analiz edilmiştir. Elektrot ve soğutma kanallarının geometrisi incelendiğinde hareket eden bir akışkana ısı transferi problemi olduğu için Fluent gibi ısı transferi ve akış problemlerini beraber çözebilen bir yazılım seçilmiştir. Eldeki bu bilgiler ve deneyler sırasında

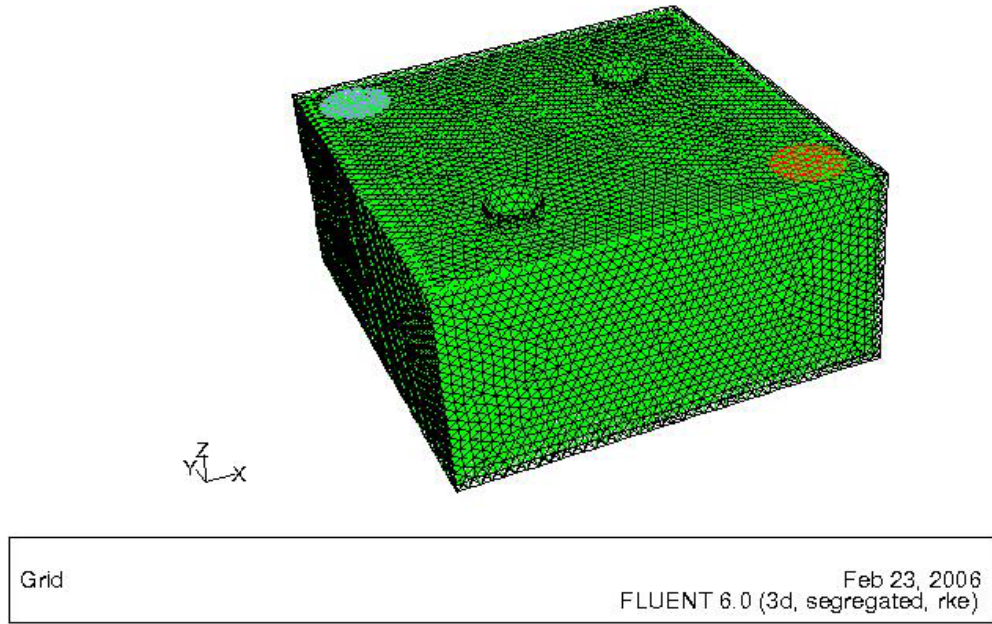
işleme yüzü bakır kaplamasından, su giriş ve çıkışından ve stereolitografi reçinesinden alınan sıcaklık ölçümleri ile Fluent modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin sınır şartları için elektrot işleme yüzü ve su giriş sıcaklığı, modelin doğruluğunu kontrol etmek amacıyla stereolitografi reçinesinden alınan sıcaklık ölçümü kullanılmıştır. Model oluşturulurken yapılan kabuller aşağıda sunulmuştur;

- İşleme yüzü sıcaklığı olarak deneylerde iki noktadan ölçülen değer, elektrodun tüm yüzeyinde sabit olarak kabul edilip, sabit sıcaklık olarak uygulanmıştır. Böylece işleme sırasında oluşan kıvılcımlar ile işleme yüzünün sabit sıcaklıkta tutulduğu kabul edilmiştir.
- İşleme suyunu dolaştıran pompanın debisinin deney süresince değişmeyerek hep aynı miktarda suyu elektrot kanallarına pompaladığı kabul edilmiştir.

Yapılan bu kabuller ile Fluent'in Gambit geometri oluşturma ve ağ yapma modülü kullanılarak ağ yapısı ve geometri oluşturulmuştur. Daha sonra oluşturulan bu ağ yapısı ile geometri Fluent tarafından okunmuştur. Şekil 6.29 ve Şekil 6.30'da Fluent tarafından okunan soğutma suyu ve tüm elektrodun ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 6.29. Soğutma suyu kanallarının geometrisi ve içindeki suyun ağ yapısı (Tip I)



Şekil 6.30. Tüm elektrodun geometrisi ve ağ yapısı

Şekil 6.29’da mavi olarak görülen soğutma suyu kanalı ağzı giriş, kırmızı olarak görülen ise çıkıştır. Hesaplamalar yapılırken soğutma suyu kanalının çapı, suyun malzeme özellikleri ve pompanın sağladığı sabit hacimsel debi kullanılmış olup sayısal değerler aşağıda sunulmuştur.

$$d = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\rho = 997.448 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\mu = 0.9348 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$$

$$A = 1.963 \times 10^{-5} \text{ m}^2$$

Burada, d soğutma kanalı çapını, ρ suyun yoğunluğunu, μ suyun kinematik viskozitesini ve A soğutma kanalı kesit alanını göstermektedir. Pompanın hacimsel debisi 0.8 lt/dakikadır. Bu değer m^3/s ’ye birimine çevrilirse;

$$\dot{V} = 1.33 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$\dot{m} = \dot{v} \times \rho = 0.013 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \quad (7.1)$$

bulunur. Kütlesel debi ($\dot{m}$) hesaplanıp Fluent programına girildikten sonra, aynı değer elektrot soğutma kanallarındaki soğutma suyu akışının türbülanslı veya laminar olduğunu tespit etmek için de kullanılmıştır. Fluent programında kullanılan türbülans, veya laminar akış modellerine göre çözücünün kullandığı denklemler değişmektedir (Bölüm 4). Bu sebeple çözüme başlamadan önce akışın ne tip olduğunu saptamak için Reynolds sayısı hesaplanmıştır. Reynolds sayısının hesaplanması için öncelikle boru merkezindeki maksimum akış hızı Eş. 7.2 kullanılarak hesaplanır. Daha sonra hesaplanan hız ve dinamik veya kinematik viskozite kullanılarak Eş. 7.3 veya Eş. 7.4 ile Reynolds sayısı hesaplanır. Hesaplanan bu değer 2300'den küçük veya eşitse akış laminar, büyük ise türbülanslıdır. Yapılan hesaplamalar sonucunda Reynolds sayısı 3614 bulunmuş olup akış türbülanslı olarak nitelendirilerek Fluent'in fark edilir (Realizable) k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Fluent'in sağladığı Bölüm 4'de bahsedilen diğer türbülans modelleri ile analiz yapılmış sadece program tarafından yapılan iterasyon sayısı değişmiş, fakat sonuç değişmemiştir.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = 9.372 \times 10^{-3} \text{ stokes}$$

$$u_m = \frac{m}{\rho \times A} = 0.677 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (7.2)$$

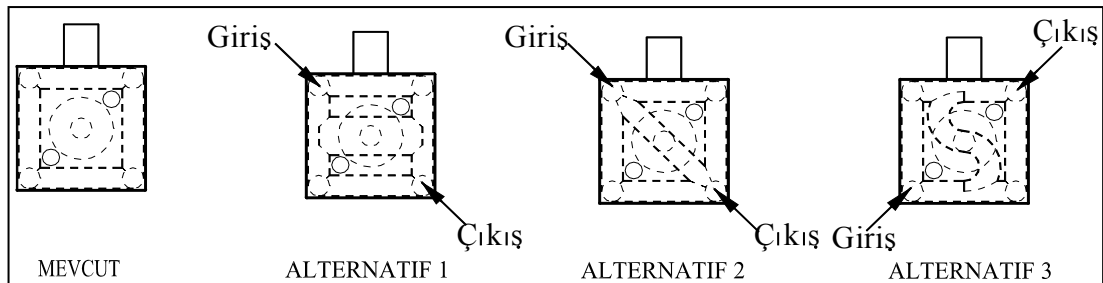
$$\text{Re}_{d2} = \frac{\rho \times u_m \times d}{\mu} = 3.614 \times 10^3 \quad (7.3)$$

$$\text{Re}_{d1} = \frac{u_m \times d}{\nu} = 3.614 \times 10^3 \quad (7.4)$$

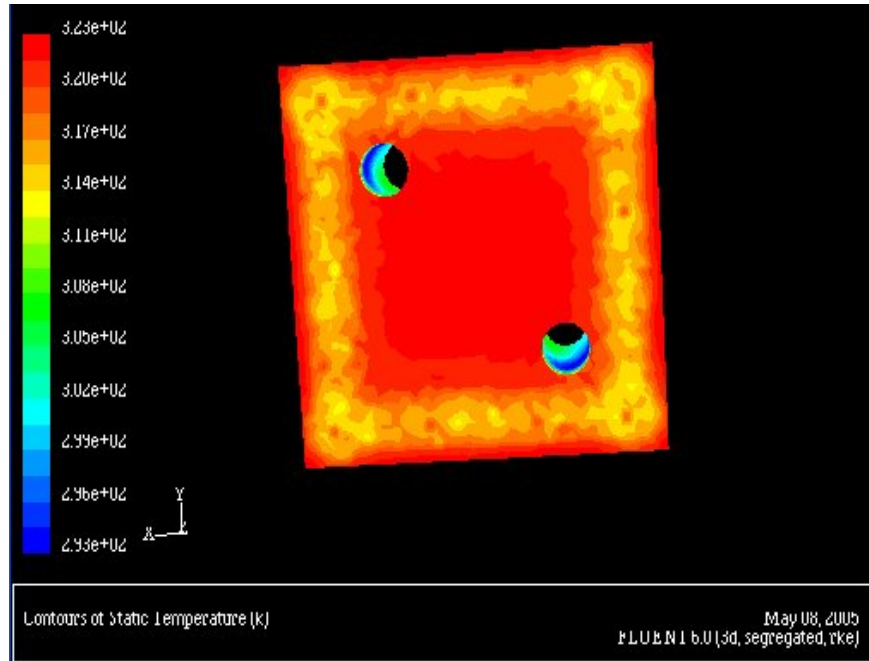
Deneyler sırasında ölçülen sıcaklıklar modele işleme yüzü sıcaklığı ve su giriş sıcaklığı olarak girilmiştir. Böylece tüm sınır şartlarının Fluent'e girilmesi tamamlanmıştır. Program sonuçlarının deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması amacıyla Bölüm 5'de Şekil 5.9'da yeri belirtilen noktadan epoksi reçinesi sıcaklığı

değerlerinin program tarafından kaydedilmesi için bu noktada bir kontrol noktası oluşturulmuştur. Bu noktanın ortalama sıcaklığı programın çözümü boyunca grafiksel olarak takip edilerek, sıcaklık bilgisinin bir dosyada saklanması sağlanmıştır.

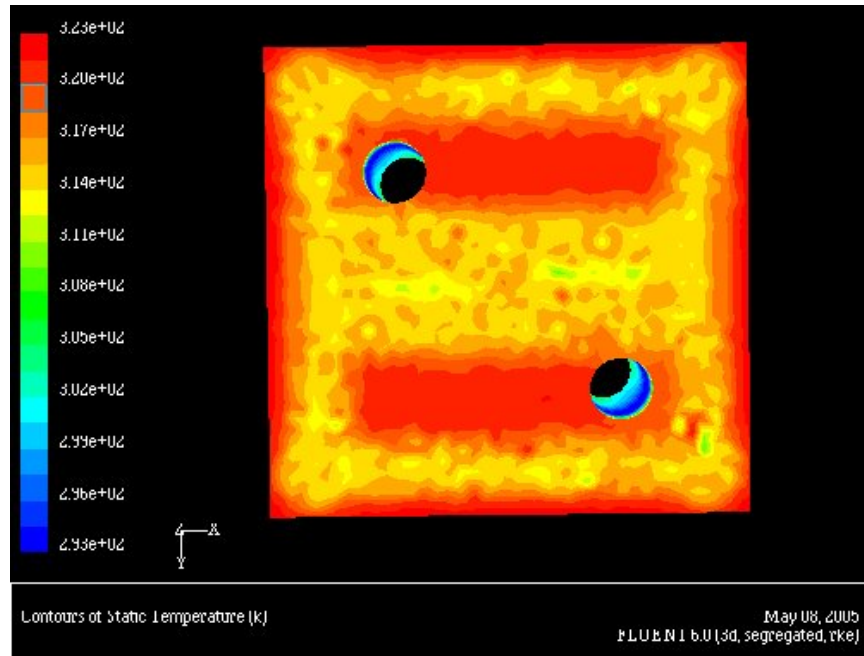
Fluent programı soğutmalı SL elektrotların stereolitografi reçinesinin sıcaklık dağılımının elde edilmesinde kullanılmıştır. Böylece soğutulan reçinenin üzerindeki sıcaklık dağılımı deneysel sonuçlar ile karşılaştırılarak tartışılabilir. Soğutmanın işleme derinliğini artırdığı görüldükten sonra soğutmayı tüm işleme yüzüne yaymak için soğutma kanalı geometrisinde değişiklik yapılmıştır. Bu geometrinin tespitinde de Fluent programından faydalanılmıştır. Mevcut soğutma kanalları ve 3 değişik tipdeki soğutma kanalının (Şekil 6.31) analizleri yapılarak elektrodun işleme yüzeyinden en fazla sıcaklığı hangi geometrideki soğutma kanalının uzaklaştırdığı tespit edilmiştir. Analizler yapılırken tüm konfigürasyonlar için su giriş sıcaklığı 20°C ve işleme yüzü sıcaklığı 50°C alınmıştır. Amaç sıcaklık dağılımının hangi konfigürasyonda daha düşük ve soğutulan bölgenin hangi konfigürasyonda daha büyük olduğunun belirlenmesidir. Fluent programından Şekil 6.31'deki alternatifler için alınan sıcaklık dağılımları Şekil 6.32- Şekil 6.35'de sunulmuştur. Şekillerden alternatif 1'de en büyük bölgede düşük sıcaklık dağılımının elde edildiği görülmektedir. Bu sebeple standart soğutma kanalına sahip soğutmalı elektrotlardan (Tip I) sonra bu kanallara ilave olarak düz ve geniş soğutma kanalı eklenmiş SL elektrotlar (Tip II) imal edilmiş ve denenmiştir.



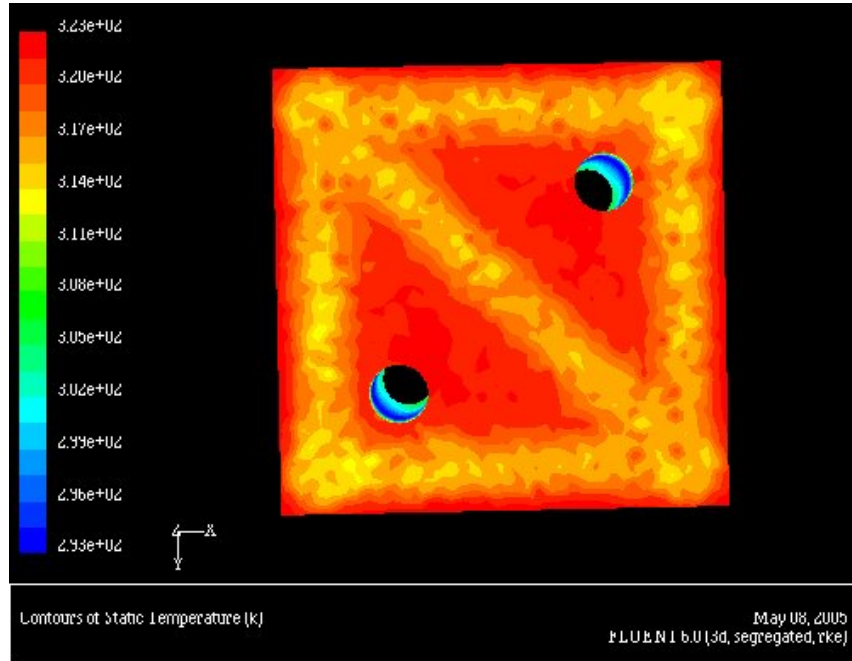
Şekil 6.31. Fluent ile analizi yapılan alternatif soğutma kanalı geometrileri



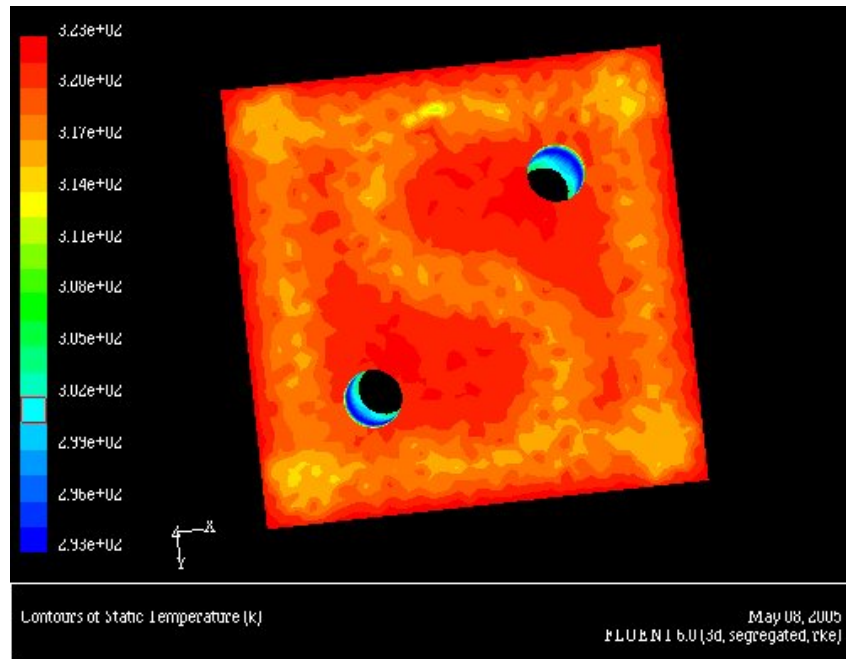
Şekil 6.32. Dört kenarı soğutma kanallı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (mevcut standart soğutma kanalı konfigürasyonu)



Şekil 6.33. Düz geniş soğutma kanalı eklenmiş SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (alternatif 1 soğutma kanalı konfigürasyonu)



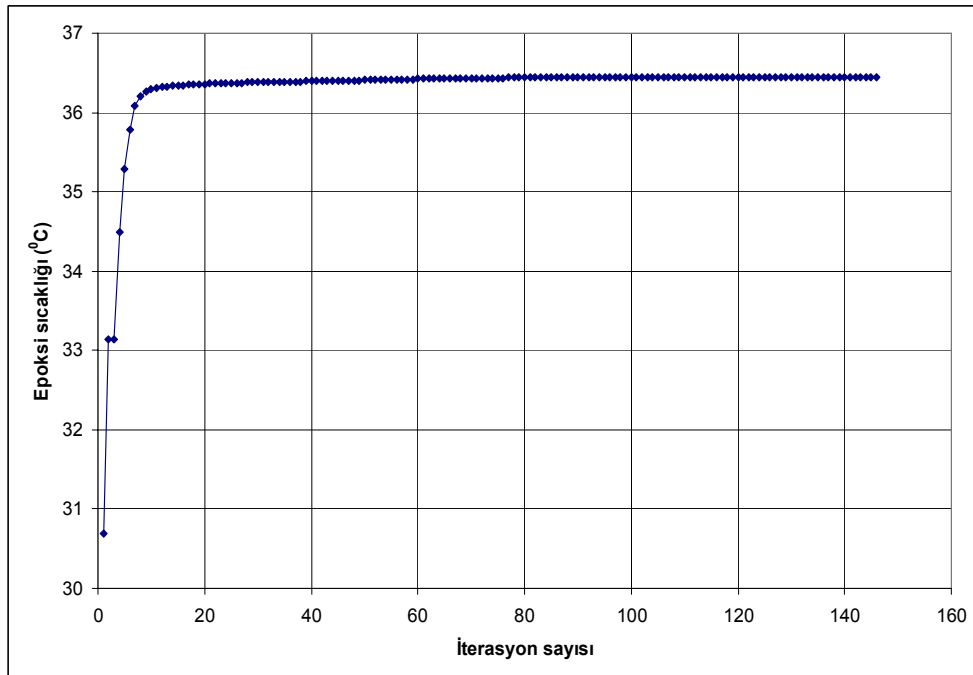
Şekil 6.34. Çapraz şekilde soğutma kanalı eklenmiş SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (alternatif 2 soğutma kanalı konfigürasyonu)



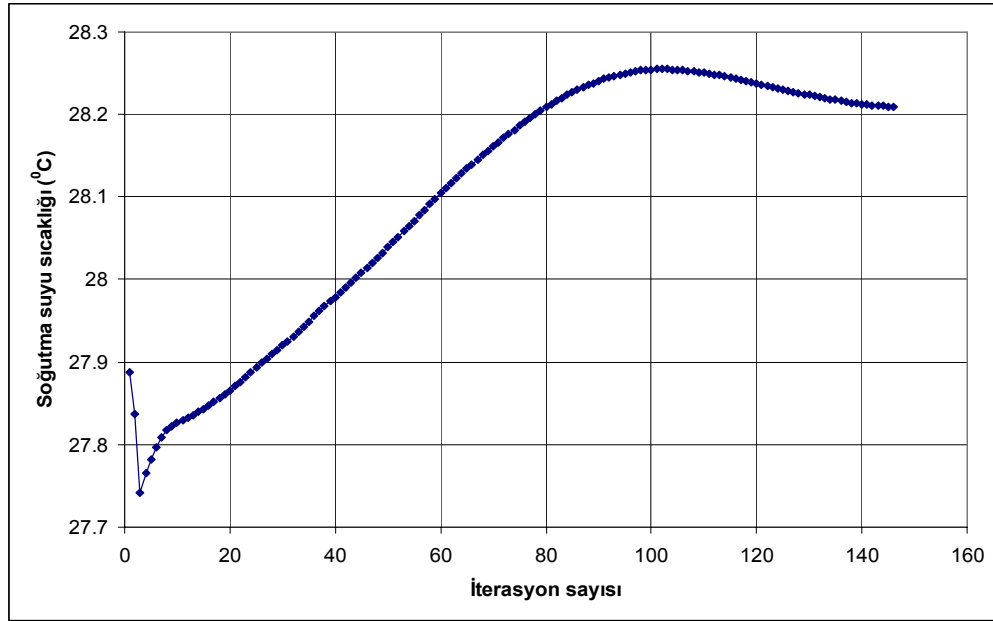
Şekil 6.35. S şeklinde soğutma kanalı eklenmiş SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (alternatif 3 soğutma kanalı konfigürasyonu)

6.7.2. Deneysel ile Fluent analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Fluent modeli oluşturulup, malzeme özellikleri, sınır şartları, türbülans modeli ve diğer parametreler tanımlandıktan sonra, yapılan deneylerden Tip I ve Tip II soğutma kanalı geometrisine sahip ikişer adet SL elektrot analiz için seçilmiştir. Seçilen elektrotların deneysel işleme yüzü sıcaklığı ve soğutma suyu giriş sıcaklıkları hazırlanan modellerde sınır şartı olarak kullanılmıştır. Analizler sırasında stereolitografi reçinesinde tanımlanan kontrol noktasının ve soğutma suyunun sıcaklığı takip edilmiş ve Fluent tarafından veri dosyasında saklanmıştır. Fluent tarafından saklanan bu veriler kullanılarak 11 numaralı SL elektrot için çizilen stereolitografi reçinesi kontrol noktası ve soğutma suyu sıcaklığının iterasyon sayısına göre değişimi Şekil 6.36 ve Şekil 6.37’de sunulmuştur. Bu grafikler Fluent analizi sırasında stereolitografi reçinesinin ve soğutma suyunun sıcaklığının değişimini göstermektedir. Fluent programı belirlenen kritere göre (örneğin artık değer 1×10^{-3} ’den küçük olana kadar) iterasyona devam ederek epoksinin sıcaklığını 36.45°C ve soğutma suyunun çıkış sıcaklığını 28.25°C olarak hesaplamıştır.



Şekil 6.36. Fluent analizi sırasında 11 numaralı elektrodun SL reçinesi sıcaklığının iterasyon sayısına göre değişimi

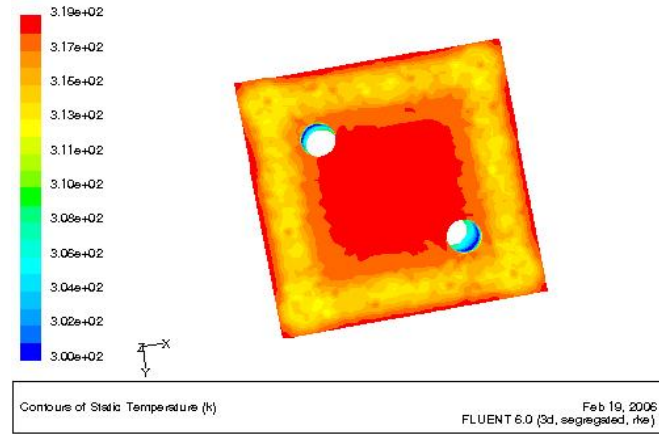


Şekil 6.37. Fluent analizi sırasında 11 numaralı SL elektrodun soğutma suyu sıcaklığının iterasyon sayısına göre değişimi

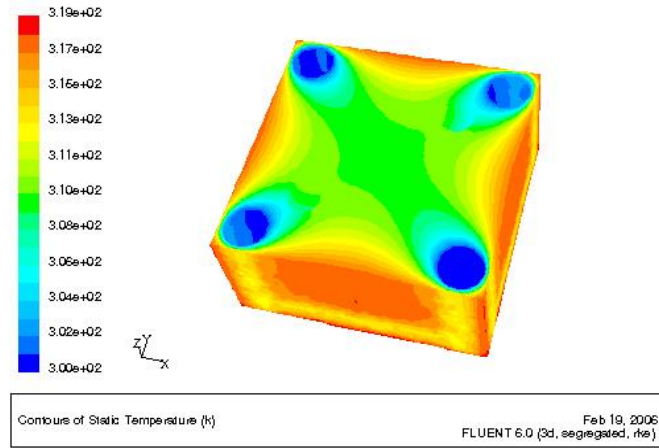
Fluent analizleri 11, 12, 15 ve 18 numaralı SL elektrotlar için tekrarlanmış ve analiz sonuçları ile deney sonuçları karşılaştırılmalı olarak Çizelge 6.6'da sunulmuştur. Çizelge incelendiğinde deney sonuçları ile Fluent analiz sonuçlarının birbirine çok yakın oldukları gözlemlenmiştir. Fluent analizi ile SL elektrotların sıcaklık dağılımı deney 18 dışında %6'dan daha küçük bir hata payı ile bulunabilmektedir. Şekil 6.38-Şekil 6.45'de çizelgede sunulan dört adet elektrodun stereolitografik reçinesinde oluşan sıcaklık dağılımının Fluent programından alınan görünümleri sunulmuştur.

Çizelge 6.6. Fluent analiz ve deney sonuçlarının karşılaştırılması

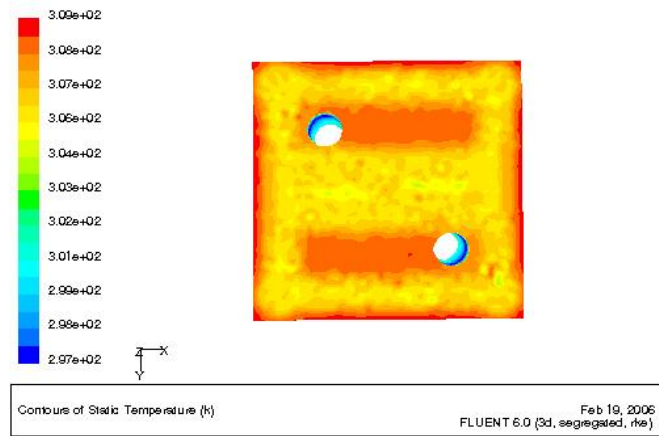
Deney #	Soğutma Kanalı Tipi	Fluent Analiz Sonucu		Deney Sonucu		% Fark	
		Epoksi (°C)	Soğutma Suyu Çıkış Sıcaklığı (°C)	Epoksi (°C)	Soğutma Suyu Çıkış Sıcaklığı (°C)	Epoksi	Soğutma Suyu
11	Tip I	36.45	28.25	36.00	30.10	1.25	6.13
12	Tip II	27.39	24.24	29.10	24.20	5.89	0.15
15	Tip I	32.24	27.13	32.20	28.30	0.14	4.13
18	Tip II	28.13	25.46	31.80	25.80	11.54	1.33



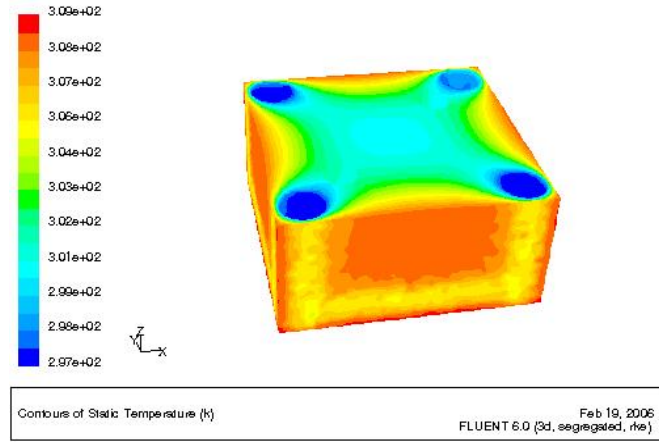
Şekil 6.38. 11 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (alttan görünüş)



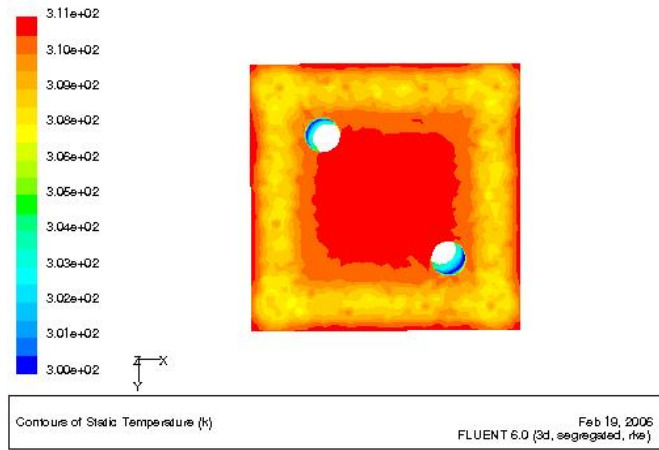
Şekil 6.39. 11 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (ortografik görünüş)



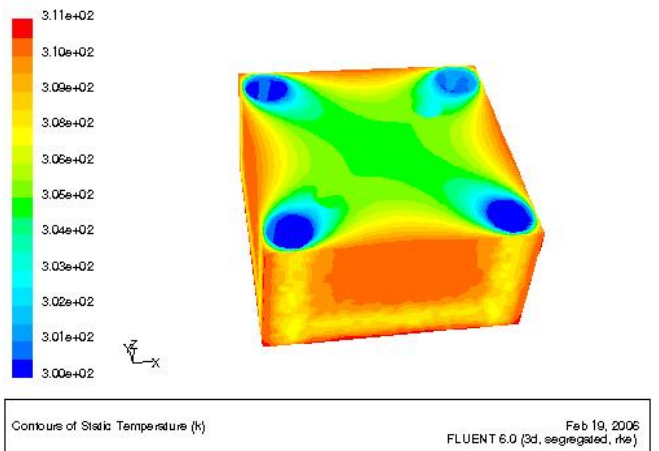
Şekil 6.40. 12 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (alttan görünüş)



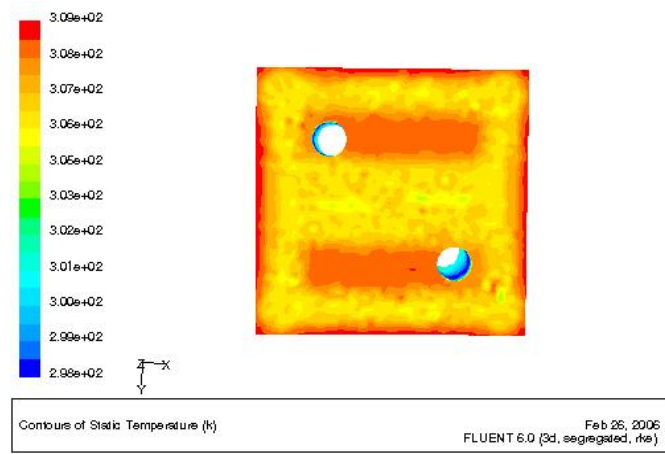
Şekil 6.41 12 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (ortografik görünüş)



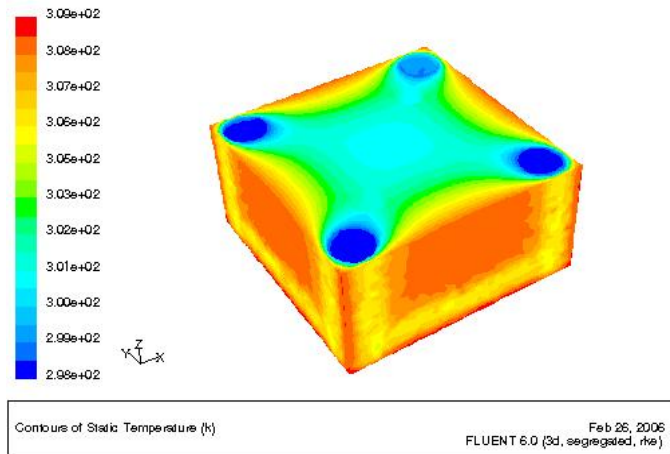
Şekil 6.42. 15 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (altından görünüş)



Şekil 6.43. 15 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (ortografik görünüş)



Şekil 6.44. 18 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (alttan görünüş)



Şekil 6.45. 18 numaralı SL elektrodun reçine sıcaklık dağılımı (ortografik görünüş)

SL elektrodun reçinesindeki sıcaklık dağılımları incelendiğinde soğutmanın etkili olduğu bölgeler görülmektedir. Reçinenin soğutulduğu bu bölgelerdeki bakır kaplamada soğutulmakta böylece bakır ile reçine arasında oluşan sıcaklık farkı nedeniyle meydana gelen bozulmalar bakır kaplama aşınana kadar geciktirilmektedir. Şekil 6.38 - Şekil 6.45’de sunulan sıcaklık dağılımları incelendiğinde elektrotların işleme yüzeyindeki kenar ve köşelerin iyi soğutulmadığı görülmektedir. Deneylerde de elektrotların büyük bölümünün bu bölgelerden bozulduğu bilinmektedir. Elektrodun geometrik yapısı nedeniyle kıvılcım yoğunluğu kenar ve köşelerde artmakta ve iyi soğutulamayan bu bölgeler elektrotların bozulmasını

hızlandırmaktadır. Fluent analizi ile SL elektrotlardaki soğutmanın pozitif etkisini önceden hesaplayabilmek, soğutma kanalı geometrisine, kullanılacak pompanın debisine ve soğutma sıvısının özelliklerine önceden karar vermek ve bu sayede derin işlemler yapabilmek mümkün olacaktır.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. Sonuçlar

Tez çalışmasında hızlı prototip tekniklerinden stereolitografi kullanılarak üretilen elektro erozyon elektrotlarının performansı, bakır elektrotlar ile malzeme işleme hızı, elektrot ön yüz aşınması, işparçası yüzey pürüzlülüğü, işleme sırasında oluşan sıcaklık ve ısı transferi karakteristikleri yönünden karşılaştırılmıştır. Tez çalışmasında stereolitografi reçinesi ile bakır kaplamanın birleşim bölgesini soğutarak elektrodun bozulmasını geciktirmek ve performansını arttırmak amacıyla soğutma kanalları kullanılmıştır. Fluent hesaplamalı akışkanlar dinamiği yazılımı ile soğutmalı stereolitografik elektrotların sonlu eleman modeli oluşturulmuş ve performansa etki eden sıcaklık dağılımı sayısal olarak incelenmiştir.

Stereolitografik elektrotların ulaştığı işleme hızlarının bakır elektrotlara yakın olduğu deney sonuçlarından görülmüştür. İşleme derinliği arttıkça bakır elektrotlarda olduğu gibi stereolitografik elektrotların da işleme hızının düştüğü belirlenmiştir. Bunun nedeni işleme derinliği arttıkça dielektrik püskürtmesinin etkisinin azalmasıdır. Soğutma stereolitografik elektrotlarda bozulmayı geciktirmiş ve daha derin işlemler yapılmıştır. Soğutma kanallı stereolitografik elektrotlarda, soğutmasızlara nazaran malzeme işleme hızlarında önemli bir değişiklik olmamıştır.

Yapılan deneysel çalışmada stereolitografik elektrotların en çok kopma ve kenardan bozulma sonucunda kullanılmaz hale geldikleri gözlemlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde SL elektrotların 70 ile 530 μm arasında ön yüz aşınmasına uğradıkları görülmektedir. Elektrot ön yüz aşınmasındaki bu değişime stereolitografik elektrotların performansını belirleyen en önemli özellik olan bakır kaplama kalınlığının farklılığı neden olmuştur. stereolitografik elektrotların 400 μm ön yüz aşınmasında 4 mm'ye yakın işleme derinliklerine ulaştıkları tespit edilmiştir.

Stereolitografik elektrotlar ile işlenen işparçalarından alınan yüzey pürüzlülük ölçümlerinden elde edilen Ra değerleri 5.9 ile 8.0 μm arasında değişmektedir.

Stereolitografik elektrodun işleme derinliği ve işleme hızı karakteristikleri bakır elektrotlara yaklaştıkça işparçası yüzey pürüzlülüğü değerleri de bakır elektrotların işlediği işparçalarının yüzey pürüzlülüğü değerlerine yaklaşmaktadır. Bakır kaplama kalınlığı arttıkça işparçası yüzey pürüzlülüğü, soğutmalı ve soğutmasız stereolitografik elektrotlar için düşmektedir. Ayrıca, soğutmalı stereolitografik elektrotların tümünde işparçası yüzey pürüzlülüğü soğutmasız elektrotlara göre daha düşük ve bakır elektrotlara daha yakındır.

İnce bakır kaplamalı stereolitografik elektrotların işleme yüzünden alınan sıcaklık ölçümlerinin çok değişim gösterdiği görülmüştür. Kalın bakır kaplamalı elektrotların işleme yüzü sıcaklıklarının değişmeden kararlı bir işleme karakteristiği sergilediği deney sonuçlarından görülmektedir. İnce bakır kaplamalı stereolitografik elektrotlarda işleme sırasında oluşan ısı bakır kaplama tarafından yeterli hızda taşınamamakta ve bunun sonucu olarak stereolitografi reçinesi sıcaklığı yükselmektedir. Buna bağlı olarak stereolitografi reçinesi kalın bakır kaplamalı stereolitografik elektrotlara göre çok daha hızlı ısınıp yumuşama sıcaklığına ulaşmakta ve bakır kabuk ile olan bağlantısını kaybetmektedir. Stereolitografi reçinesinden ayrılan ince bakır kabuk, kabarma yaparak veya kıvılcım yoğunluğunu üstüne çekerek hızlı aşınmaktadır. Bu çalışmada ince bakır ile kaplanmış stereolitografik elektrotlarda bahsedilen bozulma mekanizmasını geciktirmek için elektrotlara soğutma uygulanmıştır. Soğutma sayesinde işleme yüzü sıcaklıklarında elde edilen azalma, malzeme işleme hızı ve işleme derinliklerini olumlu etkilemiştir. Soğutmalı ve soğutmasız stereolitografik elektrotlarla yapılan tüm deneyler, soğutulan stereolitografik elektrotların işleme yüzü sıcaklıklarının daha düşük olduğunu ve buna bağlı olarak işleme derinliklerinin %10 ile %15 arasında arttığını göstermektedir. Kalın bakır kaplanmış (600-800 μm) stereolitografik elektrotlarda kaplamanın etkilenmesi daha uzun zaman almaktadır. Derin işlemler yapabilmek için stereolitografik elektrotların üzerinde minimum 500-600 μm bakır kaplama kalınlığının bulunması gerektiği tespit edilmiştir. Stereolitografik elektrotların bozulduktan sonra üzerlerinde kalan bakır kalınlıklarının 145 ile 345 μm arasında değiştiği ölçümler ile belirlenmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde stereolitografik elektrotların çoğunun 200 μm kaplama kalana

kadar işleme yapabildiği görülmüştür. Soğutmalı stereolitografik elektrotların soğutmasızlara göre daha fazla ön yüz aşınmasına müsaade ettiği işleme sonrasında kalan bakır kalınlıklarının daha düşük olmasından anlaşılmıştır. Ayrıca bakır kalınlığı arttıkça aşınma sonrası kalan bakır kalınlığının da arttığı görülmüştür.

Stereolitografik elektrotların bakır kalınlığı arttıkça deney süresi ve buna bağlı olarak soğutma suyu giriş ve çıkışı arasındaki sıcaklık farkı artmıştır. İnce bakır kaplanmış stereolitografik elektrotlarda ise deney çok kısa sürdüğü için soğutma sıvısına olan ısı transferi giriş ve çıkış sıcaklığı arasında fark oluşturmamış ve elektrotlar az bir ön yüz aşınmasını takiben bozulmuştur.

Stereolitografi reçinesi ve soğutma suyunun deneysel ve Fluent analizi sıcaklık değerleri incelendiğinde deney sonuçları ile analiz sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir. Fluent analizi ile stereolitografik elektrotların yüzey sıcaklık dağılımı %6'dan daha az bir hata payı ile önceden hesaplanabilmiştir. Fluent analizlerinin mevcut stereolitografik elektrot geometrisinin kıvılcım yoğunluğu olan bölgelerinde verimli bir iç soğutma tasarımında kullanılarak elektrodun performansını artırdığı belirlenmiştir. Stereolitografik elektrotların soğutma yolları tasarımında elektrot üretilmeden önce Fluent programından faydalanılarak soğutma sisteminin tasarlanması ve elektrotların optimum soğutma ile en derin işlemleri yapabilmesinin mümkün olduğu görülmüştür.

7.2. Öneriler

Bundan sonraki yapılacak çalışmalarda bakır ile stereolitografi reçinesinin birleştiği bölgelerden stereolitografi reçinesinin sıcaklığının deneysel olarak ölçülmesi faydalı olacaktır. Bakır ve stereolitografi reçinesinin birleşim bölgelerinin istenilen şekilde soğutulması için tez çalışmasında yapıldığı gibi Fluent programı kullanılarak soğutma kanalı geometrileri üzerinde çalışmalara devam edilebilir.

Stereolitografik elektrotlarda soğutmanın elektrot performansına etkilerini görebilmek için farklı geometrilere sahip elektrotlar ile deneylere ve Fluent analizlerine devam edilmelidir.

Eşit bakır kaplama kalınlığına sahip değişik geometrili elektrotlar denenmeli ve sonuçlar karşılaştırılmalıdır.

Soğutmanın etkisini artırmak amacıyla soğuk su veya farklı soğutma sıvıları denenmeli, soğutma sıvısının ilk sıcaklığının soğutmalı stereolitografik elektrotların performanslarındaki etkisi araştırılmalıdır.

KAYNAKLAR

1. Arthur, A., Dickens, P. M., Cobb, R. C., “The potential for Rapid Prototyped EDM Electrodes using Stereolithography Models” , ***Proceedings of First National Conference on Rapid Prototyping and Tooling***, Buckinghamshire College UK, 221-235 (1995).
2. Arthur, A., Dickens, P. M., Cobb, R. C., “Using Rapid Prototyping to Produce Electrical Discharge Machining Electrodes” , ***Rapid Prototyping Journal***, 2 (1): 4-12 (1996).
3. Arthur, A., Dickens, P. M., “Material Removal and Tool Wear Rates in EDM with Stereolithography Electrodes” , ***Proceedings of the 5th European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing***, 157-169 (1996).
4. Arthur, A., Dickens, P.M., “Measurement of heat distribution in stereolithography electrodes during electro-discharge machining” , ***International Journal of Production Research***, 36 (9): 2451-2461 (1998).
5. Leu, Ming C., Yang, B., Yao, W., “ A Feasibility study of EDM tooling using metalized stereolithography models” , ***Proceedings of the 26th North American Manufacturing Research Conference NAMR XXVI***, Atlanta GA USA, 57-62 (1998).
6. Kooijmans, B., Knoppers, R., “Fabrication of EDM electrodes using Rapid Prototyping Techniques” , ***RAPTIA State of the art report, TNO Industry Eindhoven***, 1-11 (2002).
7. Soar, R., “Raptia Workshop ICETEC” , ***Conference Report, Reykjavik Iceland*** , 1-6 (2001).
8. Rennie, A .E. W., Bocking C., “Electroforming for Injection Moulding” , ***State of The Art Report RAPTIA (Rapid Prototyping & Tooling: Industrial Applications)***, Buckinghamshire UK, 1-10 (2002).
9. Dormal, T., “Rapid tools for injection moulding” , ***State of The Art Report, CRIF Belgium***, 1-15 (1999).
10. Mishek, J., “SLA uses in molding for rapid prototyping” , ***Vista Technologies LLC***, 1-16 (1997).
11. Internet: Investment casting using stereolithography: case of complex objects, <http://www-mae.engr.ucf.edu/~rplab/ier.htm> (2002).

12. Kuzman, K., Nardin, B., Kovac, M., Jurkosek, B., “ The integration of rapid prototyping and CAE in mould manufacturing” , *Journal of Materials Processing Technology*, 111: 279-285 (2001).
13. Kamphuis, K., “Robust Rapid tooling for Injection Moulding” , *ME 8501 Report*, 1-22 (1996).
14. Yarlagadda, P. K. D. V., Ilyas, I. P., Christodoulou, P., “Development of rapid tooling for sheet metal drawing using nickel electroforming and stereolithography processes” , *Journal of Materials Processing Technology*, 111: 286-294 (2001).
15. Duerr, H., Pilz, R., Eleser, N. S., “Rapid tooling of EDM electrodes by means of selective laser sintering” , *Computers in Industry*, 39 (1): 35-45 (1999).
16. Tang, Y., Fuh, J.Y.H., Lu, L., Wong, Y.S., Loh, H.T., Gupta, M., “Formation of electrical discharge machining electrode via laser cladding” , *Rapid Prototyping Journal*, 8(5): 315-319 (2002).
17. Tay, F. E. H., Haider, E. A., ”The potential of plating techniques in the development of rapid EDM tooling” , *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 18(12): 892-896 (2001).
18. Zaw, H. M., Fuh, J. Y. H., Nee, A. Y. C., Lu, L., “Formation of a new EDM electrode material using sintering techniques” , *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90: 182-186 (1999).
19. Greul, M., Pintat, T., Greulich, M., “Rapid prototyping of functional metallic parts” , *Computers in Industry*, 28: 23-28 (1998).
20. Dover S. J., Rennie A. E. W., Bennett G. R., “The Wear of High Speed Selective Jet Electrodeposition Electrodes when used as EDM Tools” , *Second National Conference on Developments in Rapid Prototyping and Tooling*, Buckinghamshire College UK, 187-199 (1996).
21. Weiss, L. E., Gursoz, E. L., Prinz, F.B., Fussell, P. S., Mahalingam, S., Patrick, E.P., “Rapid tool manufacturing system based on stereolithography and thermal spraying” , *Manufacturing Review*, 3 (1): 40-48 (1990).
22. Shan, Z., Yan, Y., Qi, F., “Rapid tooling using plasma spraying and rapid prototyping” , *Proc. Instn. Mech. Engrs. Part C: Journal of Mechanical Engineering Science Special Issue Paper*, 217: 97-104 (2003).
23. Chua, C. K., Hong, K. H., Ho, S. L., “Rapid Tooling Technology. Part 1. A Comparative Study” , *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, 15: 604-608 (1990).

24. Radstok, E., "Rapid Tooling" , *Rapid Prototyping Journal*, 5(4): 164-168 (1999).
25. Peres, F., Mofakhani, A., "Validation of Product and Process Design by the use of a new rapid tooling process" , *Transaction of the SPS*, 5(2): 23-37 (2001).
26. Internet: Here Comes Rapid Tooling, <http://www.vistatek.com/pub04.html> (1998).
27. Mueller, T, "Stereolithography-Based Prototyping: Case Histories of Application in Product Development" , *IEEE Technical Applications Conference and Workshops*, 305-309 (1995).
28. Internet: Novel Application and Implementation of Shape Deposition Manufacturing, http://www-2.cs.cmu.edu/afs/cs/usr/lew/www/NRR/nrr_paper.html (2002).
29. Internet: A Brief Tutorial What is Rapid Prototyping, <http://home.att.net/~castleisland/> (2002).
30. Internet: Rapid Prototyping Primer, <http://www.me.psu.edu/lamancusa/rapidpro/primer/chapter2.htm> (2002).
31. Yarlagadda, P. K. D. V., Christodoulou, P., Subramanian, V. S., "Feasibility studies on the production of electro-discharge machining electrodes with rapid prototyping and the electroforming process" , *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90: 231-237 (1999).
32. Bocking C., Rennie A. E. W., Bennett G. R., "Relationships between wall thickness and erosion depth of thin walled electroformed EDM electrodes produced from RP models" , *Proceedings of the 11th Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin TX, 469-477 (2000).
33. Bocking C., Rennie A. E. W., Bennett G. R., "Electroforming of a Stereolithography Master Pattern for use as an Electro-Discharge Machine Electrode" , *33rd International MATADOR Conference, UMIST*, Manchester UK, 301-306 (2000).
34. Rennie, A.E.W.; Bocking C.; Bennett G. R.; "Electroforming of Rapid Prototyping Mandrels for Electro-discharge Machining Electrodes" , *Journal of Materials Processing Technology*, 110: 186-196 (2001).
35. Bocking, C., "Thin Shell Electroforming (TSE) for EDM electrodes" , *Rapid Prototyping & Tooling*, 8: 12-14 (2002).
36. Muller, G., Baudrand D. W., "Plating on Plastics a Practical Handbook 2nd edition" , *Robert Draper LTD*, UK, 15-21,78-87 (1971).

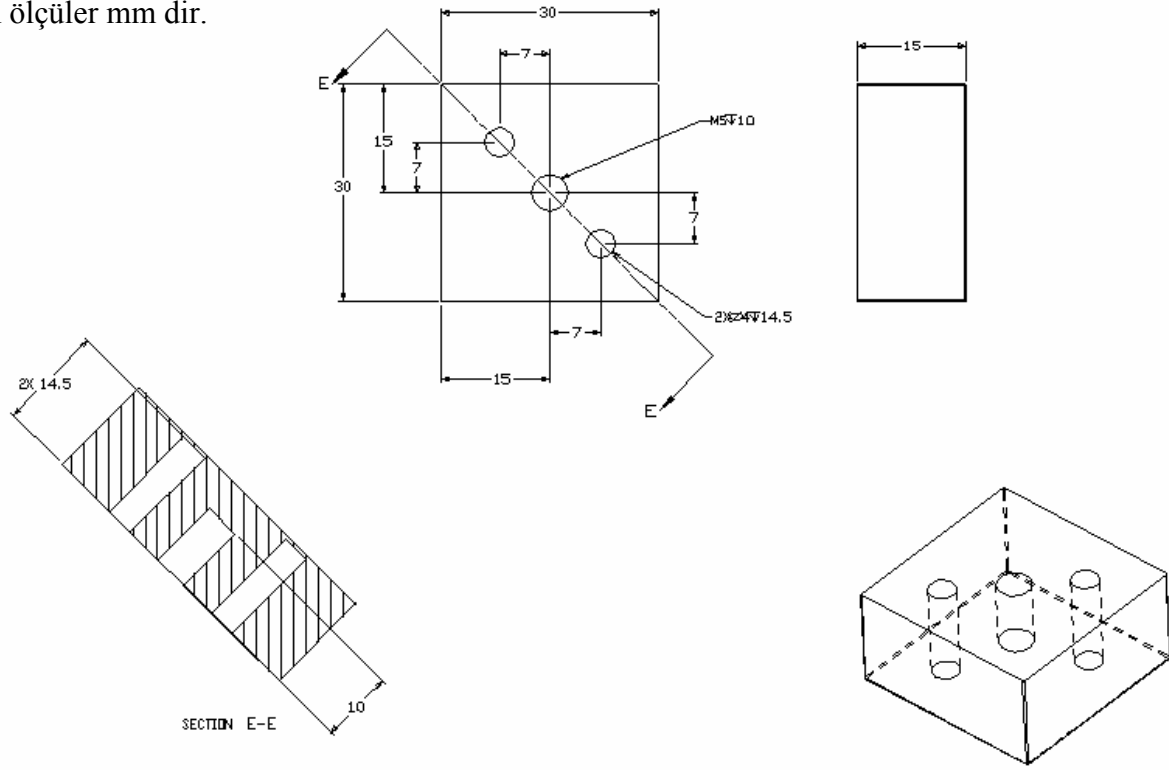
37. Furkan A.Ş., “Furkan Elektro Erozyon Tezgahları Temel Bilgiler Kılavuzu” , Ankara, 1-69 (2000).
38. ÖZGEDİK A., “Dalma Elektro Erozyon ile İşlemede Elektrot Aşınmasının İncelenmesi “ , Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-143 (2002).
39. Petrofes, N.F., Gadalla, A.M., “Processing aspects of shaping advanced materials by electrical discharge machining” , **Advanced Materials & Manufacturing Processes**, 3: 127-153 (1988).
40. DiBitonto, D.D., Eubank, P.T., Barrufet, M.A., “Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model” , **Journal of Applied Physics**, 66 (9): 4095-4103 (1989).
41. “CIRP UNIFIED TERMINOLOGY Edition”, **CIRP**, (1986).
42. Çoğun, C., Erden, A., “Elektro erozyon ile işleme (EDM) performansının bilgisayarlı denetiminin gerçekleştirilmesi” , **2. Ulusal Makina Tasarım ve İmalat Kongresi**, 105-112 (1986).
43. Erden, A., Temel, D., “Investigation on the use of water as a dielectric liquid in E.D.M.” , 437-440 (1978).
44. Tlusty, G., “Manufacturing Processes and Equipment”, 859-862 (2000).
45. König, W., Jörres, L., “Aqueous solutions of organic compounds as dielectrics for EDM sinking” , **Annals of the CIRP**, 36(1): 105-109 (1987).
46. Kunieda, M., Yoshida, M., Taniguchi, N., “Electrical discharge machining in gas” , **Annals of the CIRP**, 46(1): 143-146 (1997).
47. Wong, Y.S., Lim, L.C., Lee, L.C., “Effects of flushing on electro-discharge machined surfaces” , **Journal of Materials Processing Technology**, 48: 299-305 (1995).
48. McGeough, J.A., “Advanced Methods of Machining”, **London New York Chapman and Hall**, 128-147 (1988).
49. Yan, B.H., Wang, C.C., ”The machining characteristics of Al₂O₃/6061Al composite using rotary electro-discharge machining with a tube electrode” , **Journal of Materials Processing Technology**, 95: 107-111 (1999).
50. Benedict, G.F., “Nontraditional Manufacturing Processes”, **New York and Basel Marcel Dekker Inc.**, 207-229 (1987).

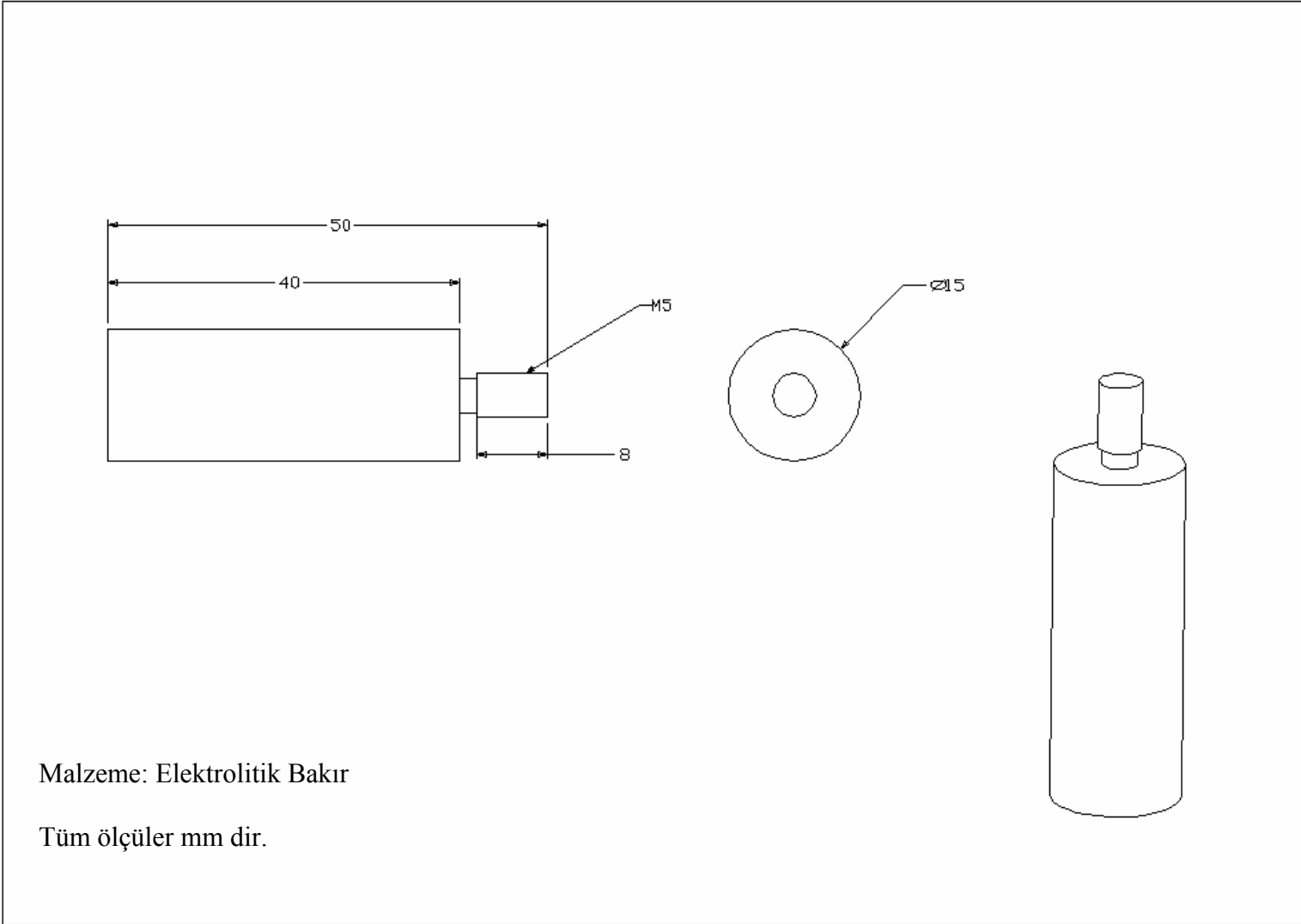
51. Coğun, C., Akaslan, Ş., “The effect of machining parameters on tool electrode wear and machining performance in electric discharge machining” , ***KSME International Journal***, 16 (1): 46-59 (2002).
52. Lonardo, P.M., Bruzzone, A.A., “Effect of flushing and electrode material on die sinking EDM” , ***Annals of the CIRP***, 48(1): 123-126 (1999).
53. Wells, P.W., Willey, P.C.T., “The effects of variation in dielectric flow rate in the gap on wear ratio and surface finish during electro-discharges” , ***Conf. of Elect. Meth. of Mach., IEEE Publ.***, 133: 110-117 (1975).
54. “FLUENT 6.0 User’s Guide”, ***Fluent Inc.***, (2001).

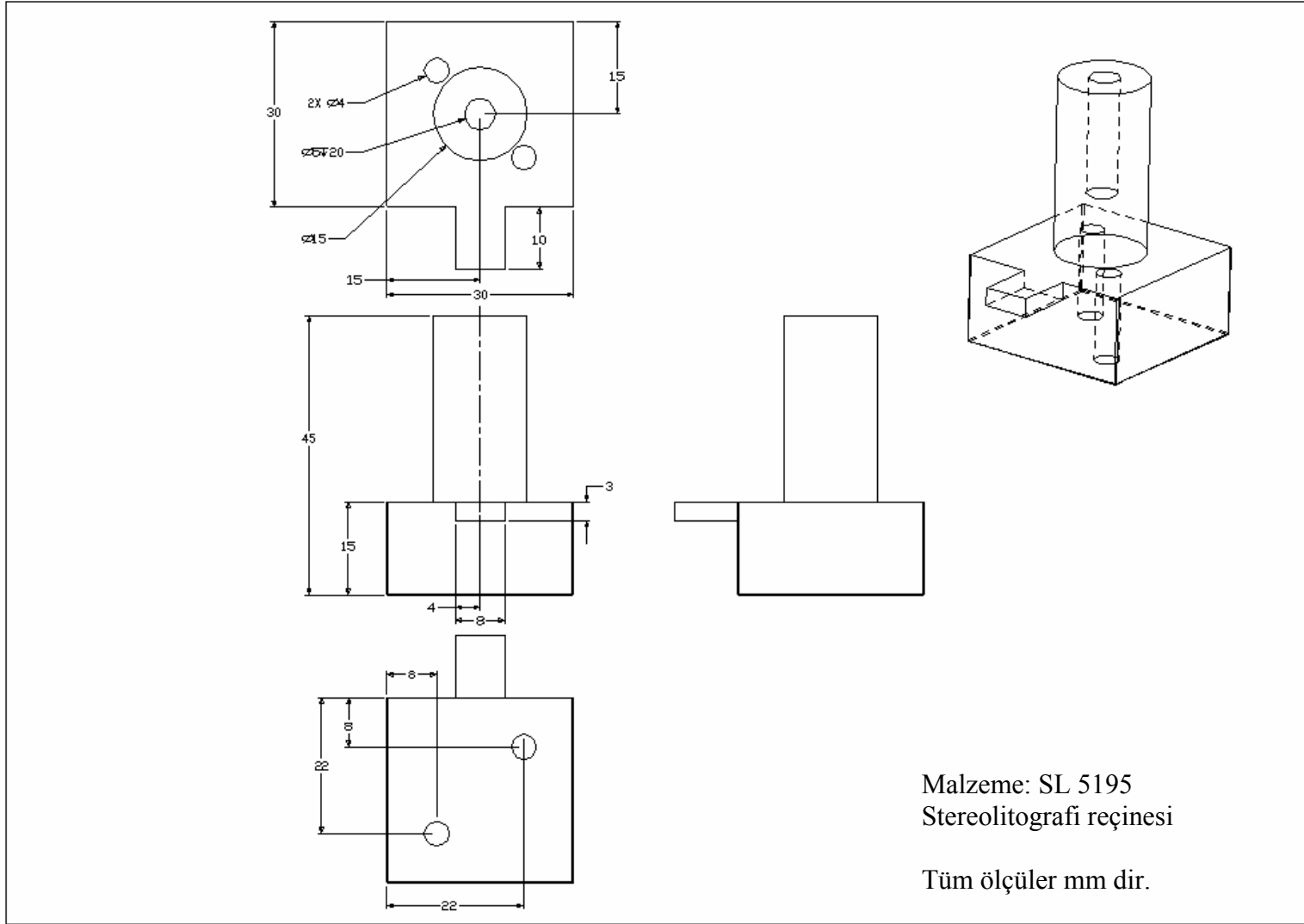
EKLER

Malzeme: Elektrolitik Bakır

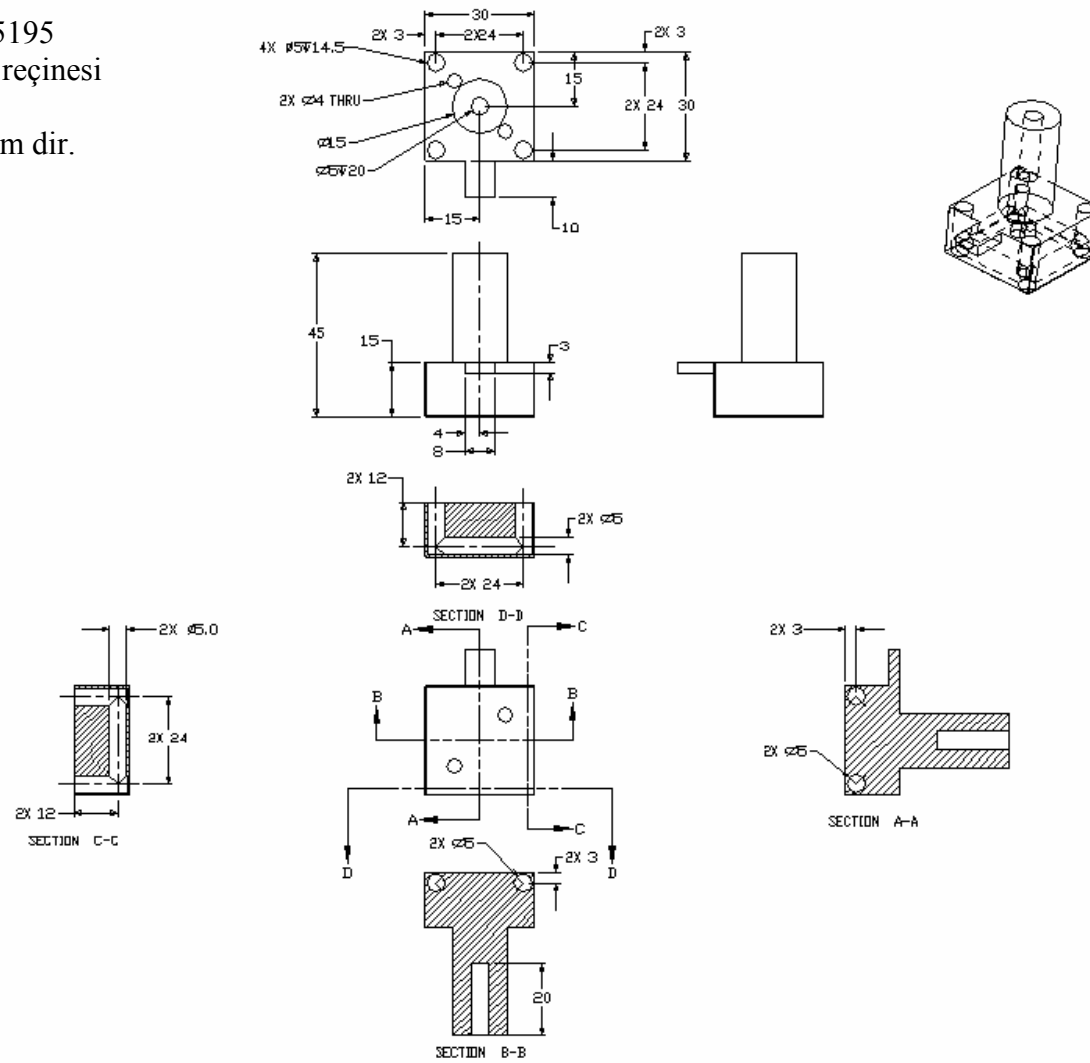
Tüm ölçüler mm dir.



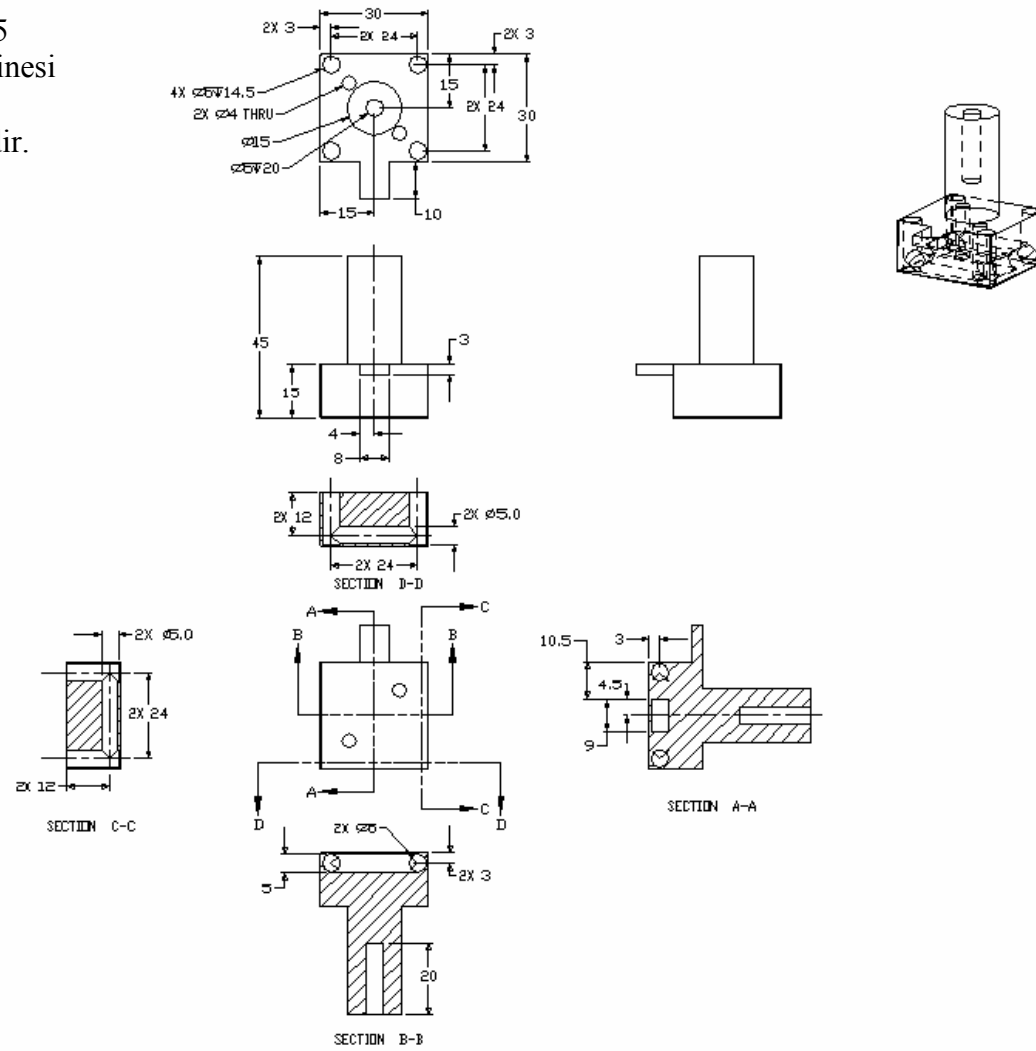




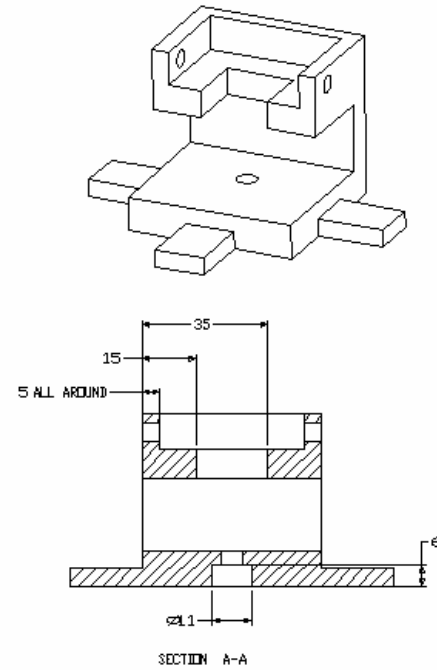
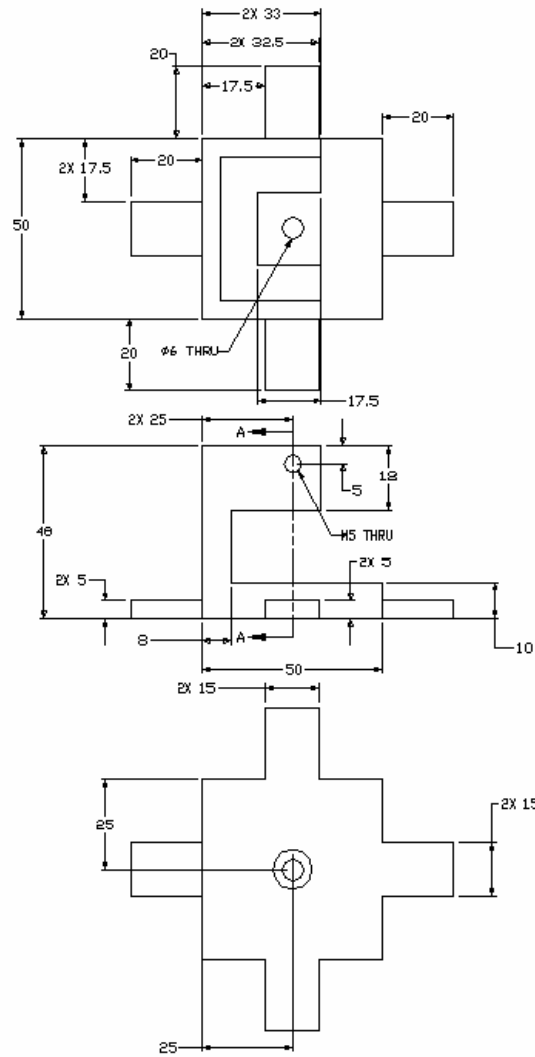
Tüm ölçüler mm dir.



Tüm ölçüler mm dir.



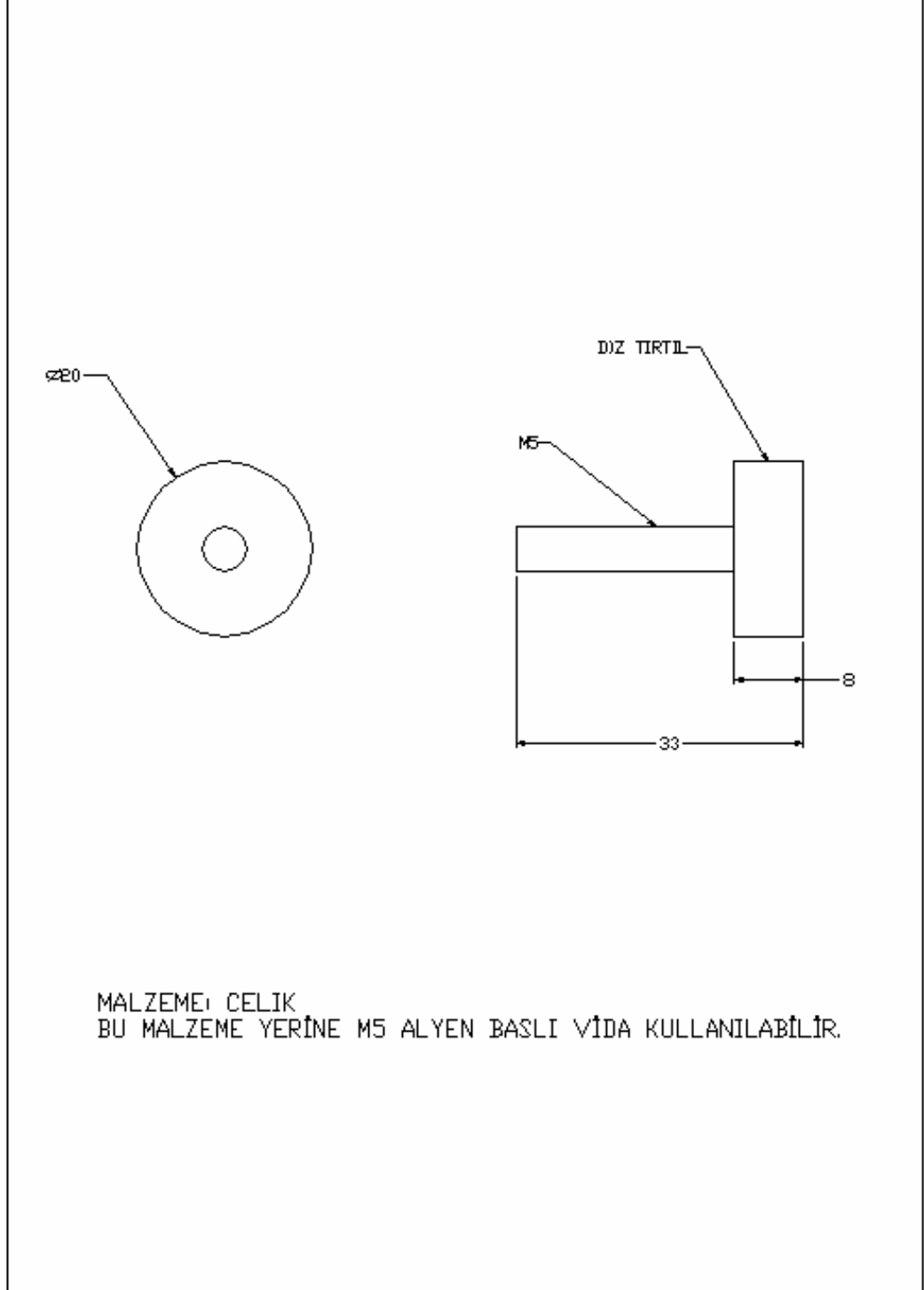
EK-3 Bağlama kalıbı teknik çizimleri



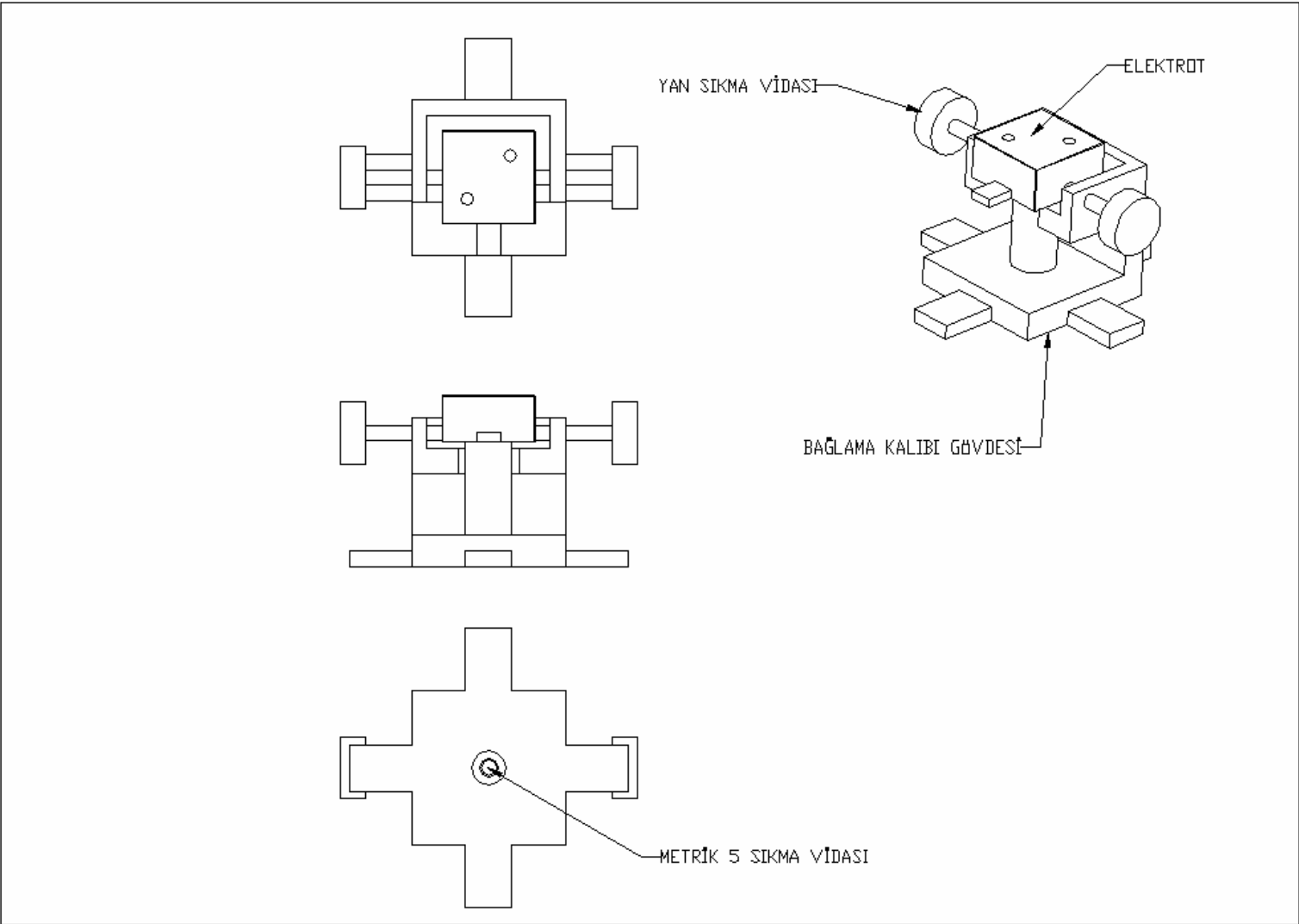
Malzeme: Alüminyum

Tüm ölçüler mm dir.

EK-3 (Devam) Bağlama kalıbı teknik çizimleri



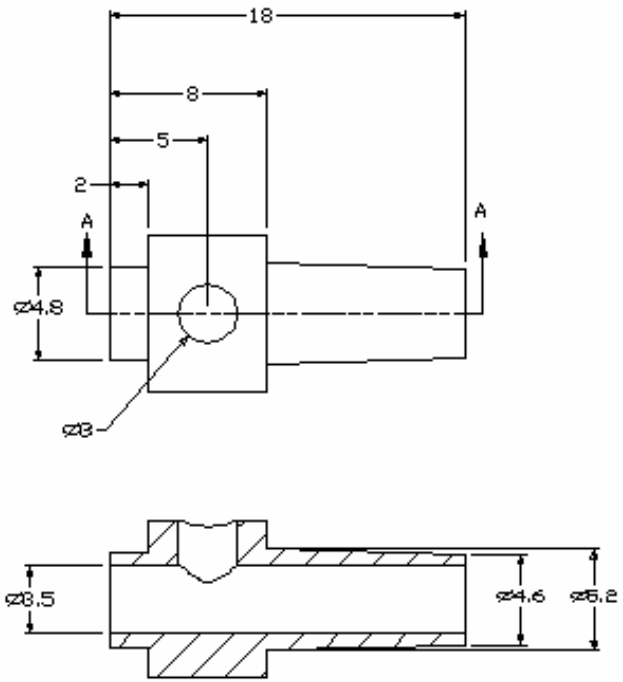
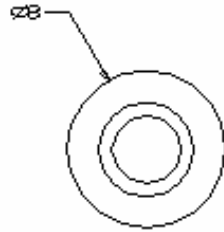
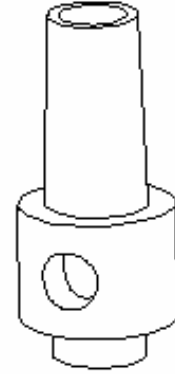
EK-3 (Devam) Bağlama kalıbı teknik ęizimleri



EK-4 Yardımcı malzemelerin teknik çizimleri

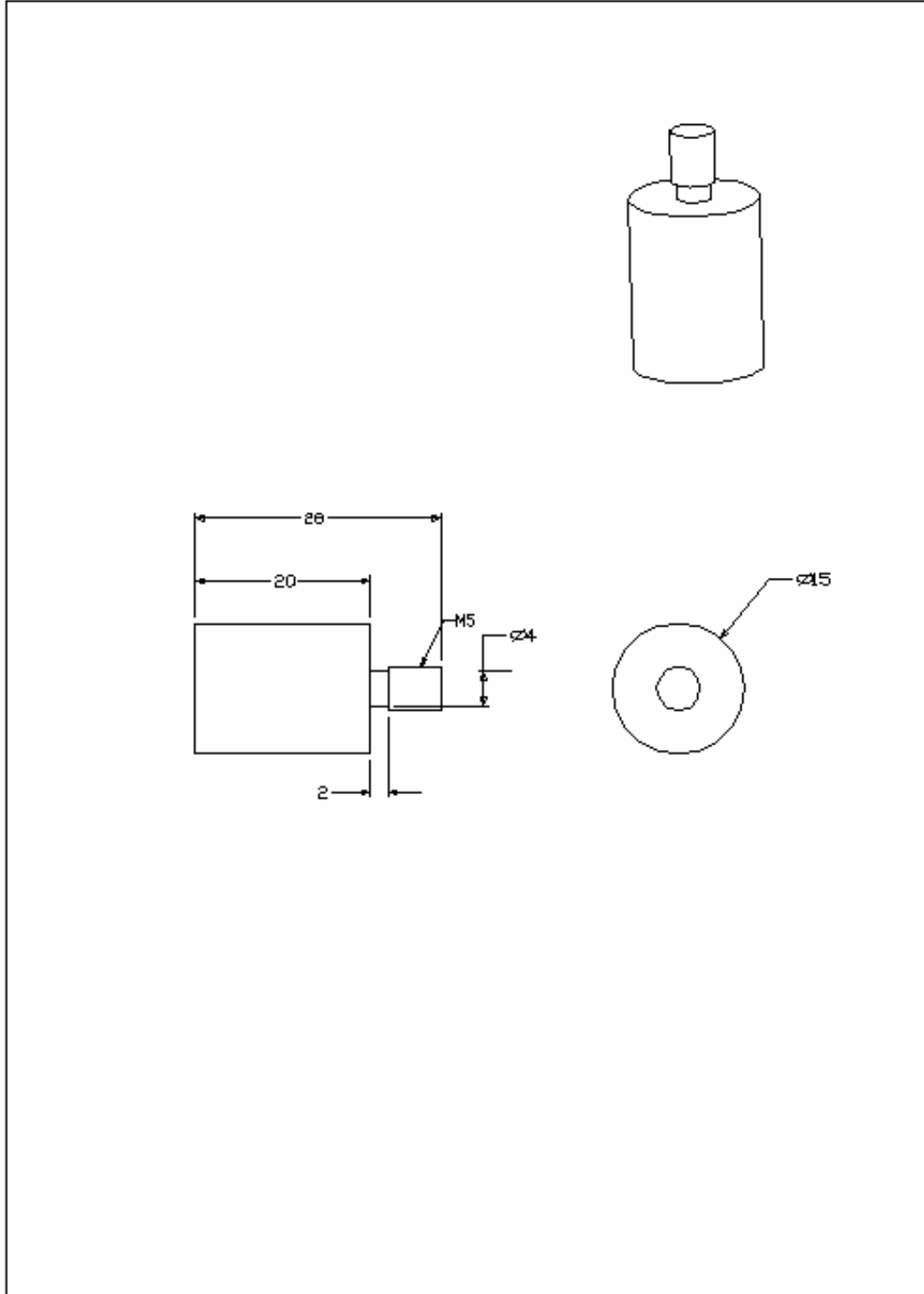
Malzeme: Derlin (beyaz)

Tüm ölçüler mm dir.

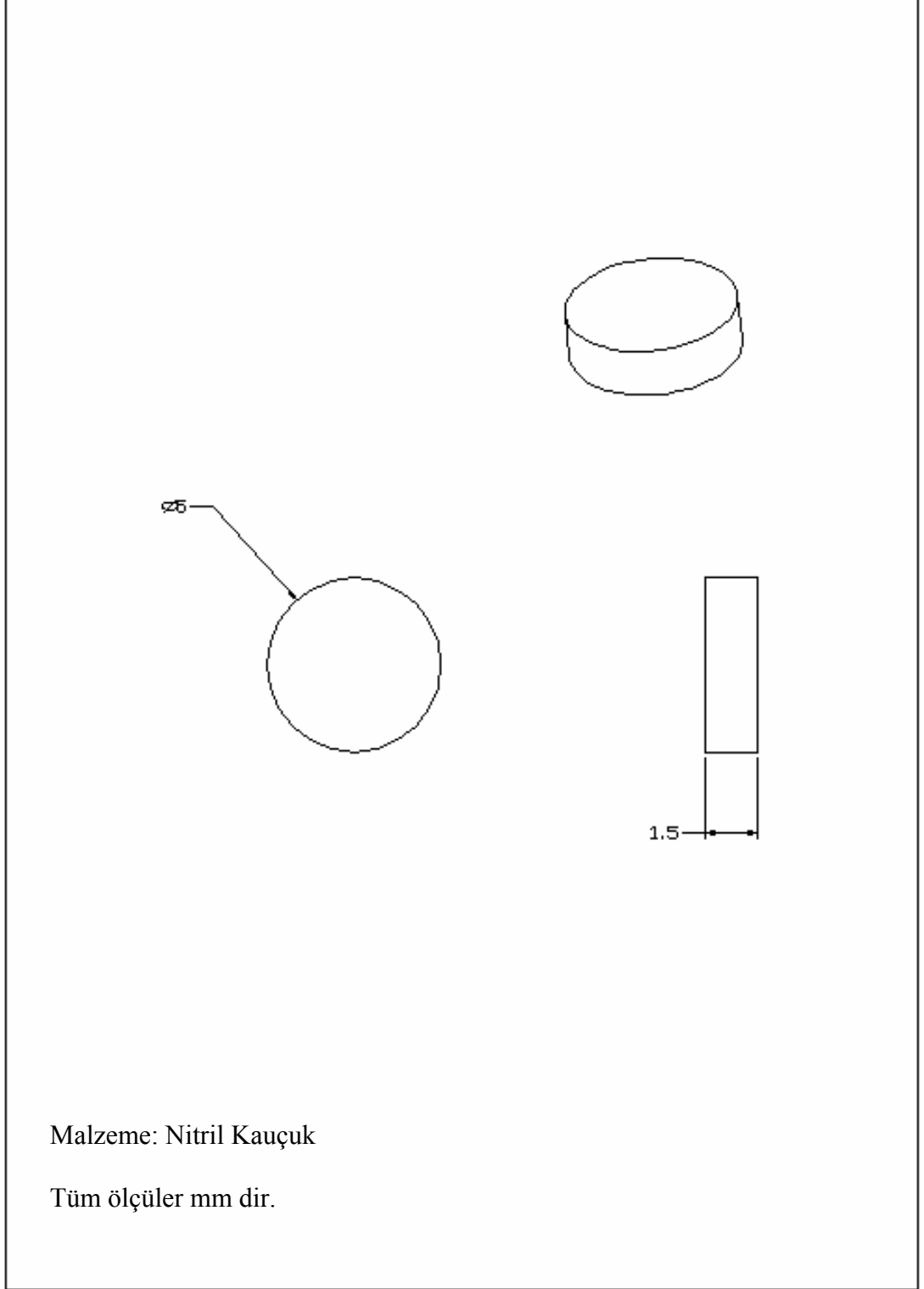


SECTION A-A

EK-4 (Devam) Yardımcı malzemelerin teknik çizimleri



EK-4 (Devam) Yardımcı malzemelerin teknik çizimleri



EK-5 Elimko E-680 veri toplama sistemi broşürü



■ CİHAZIN TANIMI

E-680 Serisi üniversal girişli-gelişmiş tarayıcı ve alarm cihazları, 32 girişe kadar değişik noktalardan alınan bilgilerin gösterimi, her nokta için girilen set değerleri ile karşılaştırılarak ortak alarm rölelerinde alarm alınması, bir bilgisayara bilgilerin aktarımı ve kaydı ile her kanala ait 1 veya 2 bağımsız röle çıkışı alınmasına olanak verir.

E-680 Serisi, yeni nesil mikrokontroler kullanılarak tasarlanmış, 96 x 192 mm ebatlarında, IEC 668 normlarına uygun, üniversal giriş ve çıkışların kullanıcı tarafından kolaylıkla programlanabildiği endüstriyel cihazlardır.

■ ANA ÖZELLİKLER

- 16 bit çözünürlükte yüksek okuma hassasiyeti
- Sonsuz ömürlü zaman ve dış etkenlerle bozulmayan kalibrasyon
- Sonsuz ömürlü ve yüksek izolasyon gerilimine sahip yarı iletken seçme röleleri
- Standart RS485 mod bus iletişim ara yüzü
- Ortak 2 alarm, bağımsız 16 alarm röle çıkışı
- İsteğe bağlı standart akım çıkışı
- Her girişi ayrı programlama olanağı
- Her giriş için 2 adet set noktası girme olanağı
- Her set noktasının alarm tipini tanımlama olanağı
- Her set noktası için ayrı sabit band tanımlama olanağı
- Her set noktası ile ilgili çıkışı ortak röleye veya ayrı bir röle çıkışına yönlendirme olanağı
- Gösterme ve tarama aralıklarını programlama olanağı
- Birden fazla cihazı (31 adet) aynı iletişim hattı üzerinden bilgisayara bağlama olanağı.
- Gerçek anlamda dağıtılmış sistem (distributed) yapısı cihazın temel özellikleridir.

■ TEKNİK ÖZELLİKLERİ

Doğruluk Sınıfı	0.5
Gösterge Ayırımı	1/9999
Gösterge	9 Digit LED (14 mm)
A/S Çevirim	16 bit
S/A Çevirim	12 bit
Giriş Seçme Aralığı	0.2-9.9 Saniye / Kanal
Gösterge Tarama Aralığı	1-99 Saniye / Kanal
Gürültü Bastırması	120 dB 50 Hz'de
Çalışma Ortam Sıcaklığı	-10 ÷ 55°C
T/C Ortam Sıc. Kom.	0-50°C
Set Ayarları	Set değeri limitleri içinde
Kontak Formları	Altı (LO) veya üst (HI)
Sabit Band	0-9999 EU*
Çalışma Gerilimi	85-265 V AC 85-375 V DC 20-60 V AC 20-85 V DC
Güç Sarfı	Max. 10 VA
Kontak Kapasitesi	NA Kontak 250 V AC 5 amp
Giriş İşareti	T/C, R/T, mA, mV, V
Ölçü Elemanı	Termokupl Rezistans termometre Diğerleri = Standart ve özel çıkışlı transmitter ve çeviriciler
Bellek	EEPROM max. 10 ⁶ yazma
Ağırlık	650 gr

* (EU) Termokupl ve Rezistans Termometre girişlerinde C lineer girişlerinde ise kontrol edilen ölçü birimidir.

EK-5 (Devam) Elimko E-680 veri toplama sistemi broşürü



■ STANDART ÇALIŞMA ARALIKLARI

Girişler	Tip	Min.	Max.
Cu-Const	Tip-U*	-200°C	600°C
Cu-Const	Tip-T	-200°C	400°C
Fe-Const	Tip-L*	-200°C	850°C
Fe-Const	Tip-J	-200°C	1300°C
Cr-Al	Tip-K	-200°C	1300°C
NiCr-Ni	Tip-K	-200°C	1300°C
Cr-Const	Tip-E	-200°C	1000°C
Nikrosil-Nisil	Tip-N	-200°C	1200°C

Girişler	Tip	Min.	Max.
Pt%10Rh-Pt	Tip-S	0°C	1760°C
Pt%13Rh-Pt	Tip-R	0°C	1760°C
Pt%18Rh-Pt	Tip-B	60°C	1800°C
Pt-100	$\infty=0.385$	-200°C	840°C
mV	0-1000 mV	-1999 birim	9999 birim
mA	0-20 mA	-1999 birim	9999 birim
V	0-10 V	-1999 birim	9999 birim
CUST	istek üzerine verilir. (R/T)		

■ STANDART TİP CİHAZLAR

E-680 Serisi Üniversal Girişli Gelişmiş Tarayıcı / Alarm Cihazı

E-680 -UU- V - W-XX- Y - Z

Giriş Sayısı

1 giriş 01

32 giriş 32

Ortak Röle Çıktıları

Yok 0

1 röle 1

2 röle 2

Analog Çıkış

Yok 0

Re-transmission çıkışı 1

Bağımsız Röle Çıkışı

Yok 00

16 kanala kadar olan cihazlarda 16

İletişim

Yok 0

RS485 MODBUS 1

Çalışma Gerilimi

85-265 V AC / 85-375 V DC 0

20-60 V AC / 20-85 V DC 1

Örnek

E-680-08-2-0-16-1-0 8 giriş, 2 ortak röle, RS485 Mod Bus iletişimli, 220V ile çalışır, 16 bağımsız röleli.

E-680-16-2-0-16-0-0 16 giriş, 2 ortak röle, 220V ile çalışır, 16 bağımsız röleli.

E-680-32-2-1-00-1-1 32 giriş, 2 ortak röle, 1 Re-transmission çıkışı, RS485 Mod Bus iletişimli, 24 V DC ile çalışır.

■ CİHAZ EBATLARI



Pano kesiti = 90 x 185 mm

* Firmamız daha önce bilgi vermedikseniz, teknolojik gelişmeler paralelinde, üretimlerinde her türlü değişikliği yapma hakkına sahiptir.



EK-6 Elektrot ve işparçalarının deneyden sonraki görünüşleri



(a)



(b)



(c)

Resim 6.1. İki, ondokuz ve yirmi numaralı deneyler tamamlandıktan sonraki bakır elektrotlar ve işparçaları a) D2 , b) D3, c) D4

EK-6 (Devam) Elektrot ve işparçalarının deneyden sonraki görünüşleri



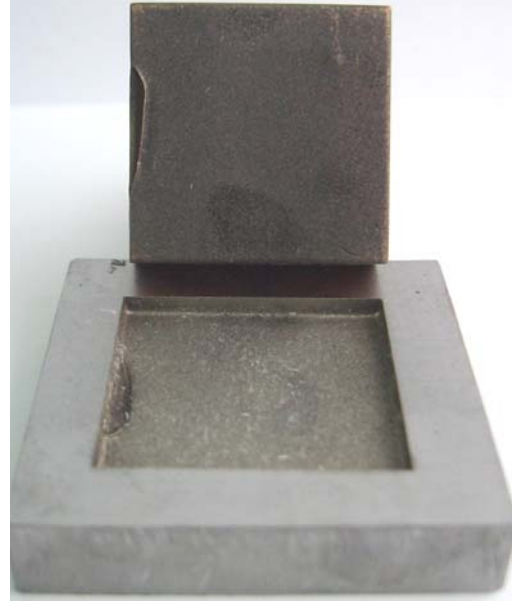
(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 6.2. a) 3 numaralı, b) 4 numaralı, c) 7 numaralı, d) 8 numaralı deney sonrası SL elektrot ve işparçaları

EK-6 (Devam) Elektrot ve işparçalarının deneyden sonraki görünüşleri



(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 6.3. a) 9 numaralı, b) 10 numaralı, c) 15 numaralı, d) 12 numaralı deney sonrası SL elektrot ve işparçaları

EK-6 (Devam) Elektrot ve işparçalarının deneyden sonraki görünüşleri



(a)



(b)



(c)



(d)

Resim 6.4. a) 13 numaralı, b) 14 numaralı, c) 16 numaralı, d) 18 numaralı deney sonrası SL elektrot ve işparçaları

EK-7 Maksimum ve minimum elektrot ön yüzü ve dielektrik sıcaklıkları

Çizelge 7.1. Elektrot ön yüzü ve dielektrik sıcaklıkları

Deney numarası	Deney numunesi no		Elektrot ön yüzü püskürtmeye uzak yüzey sıcaklığı (°C)	Elektrot ön yüzü püskürtmeye yakın yüzey sıcaklığı (°C)	Dielektrik Sıcaklığı (°C)
1	D1	Maksimum	55.3	55.5	-
		Minimum	26.5	26.4	-
		Fark	28.8	29.1	-
2	D2	Maksimum	56.9	54.2	-
		Minimum	25.9	25.8	-
		Fark	31	28.4	-
3	3	Maksimum	62.1	65.7	-
		Minimum	28.1	28.2	-
		Fark	34	37.5	-
4	4	Maksimum	65.9	60.5	-
		Minimum	29.9	30.2	-
		Fark	36	30.3	-
5	5	Maksimum	83.3	124	-
		Minimum	26.4	26.2	-
		Fark	56.9	97.8	-
6	6	Maksimum	83.9	49.1	-
		Minimum	25.6	25.7	-
		Fark	58.3	23.4	-
7	7	Maksimum	45.7	45	-
		Minimum	26.8	26.8	-
		Fark	18.9	18.2	-
8	8	Maksimum	63.9	37.9	30.6
		Minimum	17.9	18.4	16.6
		Fark	46	19.5	14
9	9	Maksimum	39.5	37.1	25
		Minimum	18.5	18.1	19.4
		Fark	21	19	5.6
10	10	Maksimum	72.2	58.9	34
		Minimum	25.7	25.7	25.5
		Fark	46.5	33.2	8.5
11	11	Maksimum	63	46.6	34.2
		Minimum	28.4	28.5	28.3
		Fark	34.6	18.1	5.9
12	12	Maksimum	43.3	42.1	30.5
		Minimum	25.2	25	26.1
		Fark	18.1	17.1	4.4
13	13	Maksimum	48.9	44.2	33.2
		Minimum	33.6	33.1	26.5
		Fark	15.3	11.1	6.7
14	14	Maksimum	53.1	45.9	30.9
		Minimum	26.9	26.9	26.7
		Fark	26.2	19	4.2

EK-7 (Devam) Maksimum ve minimum elektrot ön yüzü ve dielektrik sıcaklıkları

Çizelge 7.1. (Devam) Elektrot ön yüzü ve dielektrik sıcaklıkları

Deney numarası	Deney numunesi no		Elektrot ön yüzü püskürtmeye uzak yüzey sıcaklığı (°C)	Elektrot ön yüzü püskürtmeye yakın yüzey sıcaklığı (°C)	Dielektrik Sıcaklığı (°C)
15	15	Maksimum	41.6	39.6	34.6
		Minimum	26.4	26.6	26.9
		Fark	15.2	13	7.7
16	16	Maksimum	48.4	-	32.5
		Minimum	28.3	-	25.9
		Fark	20.1	-	6.6
17	17	Maksimum	41.7	38.2	31.9
		Minimum	24.5	24.2	24.7
		Fark	17.2	14	7.2
18	18	Maksimum	42.3	37.7	32.2
		Minimum	23.7	23.9	25.1
		Fark	18.6	13.8	7.1
19	D3	Maksimum	57.9	58.4	34.9
		Minimum	31.9	31.8	29
		Fark	26	26.6	5.9
20	D4	Maksimum	67.3	63	34
		Minimum	27.4	27.3	26
		Fark	39.9	35.7	8

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ANIL, Devrim
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 05.02.1975 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 847 53 00/4564
 Faks : 0 (312) 847 53 20
 e-mail : danil@mgeo.aselsan.com.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Orta Doğu Teknik Üniv./ Makina Müh. Bölümü	2000
Lisans	Orta Doğu Teknik Üniv./ Makina Müh. Bölümü	1997
Lise	Bahçelievler Deneme Lisesi	1992

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
1997-Halen	ASELSAN A.Ş	Kıdemli Uzman Mühendis

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Bilgisayar teknolojileri, uzaktan kumandalı modeller, klasik müzik dinlemek

Katıldığı Eğitimler

- Introduction to Zemax (Optik tasarım programı)
- Geometric Dimensioning and Tolerancing
- Mechanical Tolerancing for Six Sigma,
- Infrared Optical System Design (5 day Short Courses) - Max Reidel