



**PLAZMA TABANCASI TASARIMI, ANALİZİ VE PLAZMA
ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE Ti ALAŞIM TOZU ÜRETİMİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Emre YURTKURAN

**DOKTORA TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

AĞUSTOS 2019

Emre YURTKURAN tarafından hazırlanan “PLAZMA TABANCASI TASARIMI, ANALİZİ VE PLAZMA ATOMİZASYON YÖNTEMİ İLE Ti ALAŞIM TOZU ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan: Prof. Dr. Teyfik DEMİR

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, TOBB Ekonomi ve

Teknoloji Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Hasan OKUYUCU

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ankara

Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 01 / 08 / 2019

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

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Emre YURTKURAN

01/08/2019

PLAZMA TABANCASI TASARIMI, ANALİZİ VE PLAZMA ATOMİZASYON
YÖNTEMİ İLE Ti ALAŞIM TOZU ÜRETİMİNİN ARAŞTIRILMASI

(Doktora Tezi)

Emre YURTKURAN

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 2019

ÖZET

Yeni nesil imalat yöntemlerinden olan metal eklemeli imalat sektörü günümüzde hızla gelişmektedir. Bu imalat yönteminin hammaddesi küresel metal tozlarıdır. İhtiyaç duyulan metal tozları gaz atomizasyon veya plazma atomizasyon ile üretilmektedir. Plazma atomizasyon, özellikle biyomedikal ve havacılık endüstrisinde titanyum ve diğer reaktif metal ve alaşımlarından küresel toz üretilmesinde önemli avantajlara sahiptir. Plazma atomizasyon yönteminin en önemli ekipmanı plazma tabancasıdır. Plazma tabancası teknolojisinin araştırılması özgün teknoloji geliştirmek için kaçınılmazdır. Bu çalışmada plazma atomizasyon ile Titanyum alaşım tozu üretebilmek amacıyla özgün argon DC transfer edilmeyen ark plazma tabancası tasarımı ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Tasarım ve geliştirme süreçlerinde elektromanyetik alan ve gaz akışı arasındaki etkileşimi çözebilmek için ANSYS FLUENT ve MHD modülü birlikte kullanılarak 3B sayısal modelleme yapılmıştır. Akım yoğunluğu ve gaz debisi değişkenlerinin tabanca çıkışındaki plazma jeti sıcaklığı ve hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Tabancadan elde edilen plazma jetinin sıcaklık ve hız değerlerinin atomizasyon açısından uygunluğu araştırılmıştır. Bu analizler sonucunda plazma tabancası ve reaktör tasarımı yapılmış ve imal edilmiştir. Oluşturulan deney düzeneğinde Ti alaşım tozu üretim deneyleri yapılmıştır. Plazma tabancası performans deneylerinde, 100 A'den ile 300 A akım değerlerine kadar plazma jeti davranışı incelenerek artan akım ile birlikte sıcaklık ve hız değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Benzer şekilde gazın hacimsel debi değerlerinin artışı ile jet hızının arttığı belirlenmiştir. Üretilen tozların küresel, içi dolu ve uydulaşma olmadığı gözlemlenmiştir. Çalışma neticesinde özgün plazma tabancası geliştirilmiş ve Ti alaşım tozu üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Bilim Kodu : 91437
Anahtar Kelimeler : Plazma atomizasyon, plazma tabancası, metal tozu üretimi
Sayfa Adedi : 215
Danışman : Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

PLASMA GUN DESIGN, ANALYSIS AND INVESTIGATION OF Ti ALLOY
POWDER PRODUCTION BY PLASMA ATOMIZATION METHOD

(Ph. D. Thesis)

Emre YURTKURAN

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

August 2019

ABSTRACT

One of the new generation manufacturing methods, metal additive manufacturing sector is developing rapidly today. The raw material of this manufacturing method is spherical metal powders. The metal powders needed are produced by gas atomization or plasma atomization. Plasma atomization has significant advantages in the production of spherical powder from titanium and other reactive metals and alloys, particularly in the biomedical and aerospace industries. The most important equipment of the plasma atomization method is the plasma gun. Investigation of plasma gun technology is inevitable to develop original technology. In this study, the original argon DC non-transferred arc plasma gun design and development studies were carried out in order to produce Titanium alloy powder by plasma atomization. In order to solve the interaction between electromagnetic field and gas flow in the design and development processes, 3D numerical modeling was performed by using ANSYS FLUENT and MHD modules together. The effects of current density and gas flow rate variables on plasma jet temperature and velocity at the gun outlet were investigated. The suitability of the temperature and velocity of the plasma jet obtained from the gun in terms of atomization was investigated. As a result of these analyzes, plasma gun and reactor were designed and manufactured. Ti alloy powder production tests were performed in the test apparatus. In plasma gun performance experiments, the plasma jet behavior from 100 A to 300 A was examined and it was observed that temperature and velocity values increased with increasing current. Similarly, it was determined that jet velocity increased with increasing volumetric flow values of gas. It was observed that the produced powders were spherical, filled and not satellite. As a result of this study, the original plasma gun was developed and Ti alloy powder production was realized successfully.

Science Code : 91437
Key Words : Plasma atomization, plasma gun, metal powder production
Page Number : 215
Supervisor : Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

TEŞEKKÜR

Prof. Dr. Rahmi ÜNAL'a bu çalışmanın ortaya çıkmasındaki yönlendirmelerinden, her aşamada birlikte çalışma fırsatı verdiğinden ve akademik olgunluğa erişmemde sağladığı katkılardan dolayı,

Merhum Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ ve emeği geçen diğer hocalarıma toz metalürjisi laboratuvarını kurarak bizlere geliştirme fırsatı verdikleri için,

Prof. Dr. Oğuzhan YILMAZ ve Prof. Dr. Teyfik DEMİR'e farklı bir göz ile bu çalışmayı takip ederek her seferinde heyecanla sunduğum dönemsel çalışmalar karşısında verdikleri görüş ve önerileri için,

Arş. Gör Arif BALCI, Arş. Gör Fatih AKTAŞ, Arş. Gör. Dr. Nazım BABACAN ve Arş. Gör. Murat ERBAŞ özelinde tüm Makine Mühendisliği Bölümü asistanlarına göstermiş oldukları arkadaşlıktan öte dostlukları için,

Laboratuvar teknisyeni Yusuf ŞAHİNKAYA'ya deney düzeneğinin kurulmasındaki candan desteği için,

Arş. Gör. Fatih DEMİR ve Waleed Khaled Waleed SUNJUQ'a analiz çalışmalarındaki yardımları için,

MMS Savunma çalışanları Süleyman ŞAHİN ve Erdi MERT'e tabancaların imalatında gösterdikleri hassasiyet için,

TÜBİTAK'a bu tez çalışmasının ortaya çıkmasında 215M295 kodlu projeyi destekleyerek bizlere bu fırsatı sunduğu için,

Bugünlere gelmemdeki en büyük paya sahip olan sevgili aileme gösterdikleri sevgi ve motivasyon kaynağı oldukları için,

Sevgili eşim ve oğluma bu çalışmayı ortaya çıkarmamda gösterdikleri sabır ve anlayış için,

Canı yürekten teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. ATOMİZASYON.....	3
2.1. Atomizasyon Mekanizmaları	5
2.1.1. Birincil atomizasyon	7
2.1.2. İkincil atomizasyon	14
2.1.3. Katılma	21
2.2. Plazma Atomizasyon	22
2.3. Plazma Atomizasyon Tozlarının Karakterizasyonu.....	28
2.3.1. Toz parçacık boyutu, dağılımı ve şekli	28
2.3.2. Tozun iç yapısı.....	32
3. MALZEME BİLİMİNDE PLAZMA ARK TEKNOLOJİSİ	35
3.1. Plazma Durumu	35
3.2. DA Termal Plazma Tabancalar.....	37
3.2.1. Plazma oluşumu ve ark elektrot etkileşimi	38
3.2.2. Arkın dinamik davranışı ve kararsızlığı.....	42
3.2.3. Plazma gazları	46
3.3. Tabanca Tasarım Parametreleri	50
3.3.1. Elektrotlarda ısı transfer şekilleri.....	51

	Sayfa
3.3.2. Elektrotların erozyonu	54
3.3.3. Elektrot erozyonu önleme yöntemleri.....	57
3.3.4. Elektrotların ve diğer elemanların malzemeleri.....	59
3.3.5. Elektrotların şekli.....	62
3.4. Modelleme Çalışmaları.....	63
3.5. Genel Değerlendirme	65
4. SAYISAL MODEL VE DENEYSEL YÖNTEM.....	71
4.1. Problemin Tanımlanması	71
4.2. Sayısal Model - Nozul Tasarımı	73
4.2.1. Kabuller ve modelleme özellikleri.....	74
4.2.2. Geometri, veri alma şekilleri, ağ yapısı ve sınır şartları	79
4.2.3. Sayısal çözüm teorisi, genel ve özelleştirilen denklemler	88
4.2.4. Türbülans modeli ve çözüm yaklaşımı	96
4.2.5. Yakınsama, korunum denklemlerinin kontrolü ve bağımsızlık testleri	97
4.3. Deneysel Yöntem - PA Sisteminin Kurulması	101
4.3.1. Reaktör tasarımı ve imalatı	103
4.3.2. Tabanca tasarım ve imalatı	105
4.3.3. Tel besleme ünitesi ve kontrol sisteminin tasarım ve üretimi.....	106
4.3.4. Diğer ekipmanlar	107
4.4. Deneysel Yöntem - Toz Üretim Deneyleri Ve Tozların Analizi	107
4.4.1. Toz boyut analizi.....	107
4.4.2. Tozların şekil, yüzey morfolojilerinin ve iç yapısının tespiti	108
5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME	109
5.1. Had Sonuçları İle Literatür Verilerinin Karşılaştırılması	110
5.1.1. Nozul içi çalışma; model 1 geometrisi için karşılaştırma.....	110
5.1.2. Zamana bağlı ve kararlı hal çözümlerinin karşılaştırılması.....	112

	Sayfa
5.1.3. Nozul dışı çalışma; model 2 geometrisi için karşılaştırma	115
5.1.4. Nozul dışı çalışma; model 3-ytg geometrisi için karşılaştırma.....	118
5.2. Modelleme Çalışması; Model 1 Geometrisi İçin Nozul İçi Çalışma Bulguları..	119
5.2.1. Sabit akımda farklı hacimsel debiler ile yapılan analizler	119
5.2.2. Sabit hacimsel debide farklı akım değerleri ile yapılan analizler	122
5.2.3. Farklı anot çapı ve boyları için yapılan analizler.....	125
5.2.4. Ara değerlendirme 1	126
5.3. Modelleme Çalışması; Model 2 Geometrisi İçin Nozul Dışı Çalışma Bulguları	128
5.3.1. Sabit akımda farklı hacimsel debiler ile yapılan analizler	128
5.3.2. Sabit hacimsel debide farklı akım değerleri ile yapılan analizler	131
5.3.3. Ara değerlendirme 2	135
5.4. Modelleme Çalışması; YTG, YD Ve DG Geometrileri İçin Nozul Dışı Çalışma Bulguları	136
5.4.1. YTG ve YD geometri karşılaştırması	136
5.4.2. YTG, YD ve DG geometrilerin karşılaştırılması.....	138
5.4.3. Çap değişimlerinin karşılaştırılması	144
5.4.4. Ara değerlendirme 3	147
5.5. Modelleme Çalışması; Tel Ekli Geometri İçin Nozul Dışı Çalışma Bulguları ..	149
5.5.1. Tel üzerinden alınan verilerin karşılaştırılması.....	149
5.5.2. Nozul boğazından kesişim noktasına kadar alınan verilerin karşılaştırılması	151
5.5.3. Deneysel çalışmalara geçiş değerlendirmesi	152
5.6. Deneysel Çalışma; Prototip Tabanca İle Toz Üretim Bulguları	154
5.6.1. Ara değerlendirme 5	156
5.7. Deneysel Çalışma; Plazma Tabancaları İle Yapılan Çalışma Bulguları.....	156
5.7.1. Parametre değişiminin plazma jeti üzerindeki etkisi	157

5.7.2. Elektrotların erezyonu.....	159
5.7.3. Ara değerlendirme 6	162
5.8. Deneysel Çalışma; Toz Üretimi Sonucunda Elde Edilen Bulgular	162
5.8.1. Şekil, boyut ve mikroyapı incelemesi	163
5.8.2. Aynı yöntemle üretilmiş farklı tozların ve diğer yöntemler ile üretilmiş tozların karşılaştırılması.....	169
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	175
6.1. Sonuçlar	175
6.2. Öneriler	176
KAYNAKLAR	177
EKLER.....	201
EK-1. Sabit 170 A akım değerinde 30 SLPM hacimsel debi değeri için dağılımlar	202
EK-2. Sabit 170 A akım değerinde 75 SLPM hacimsel debi değeri için dağılımlar	203
EK-3. Sabit 48 SLPM hacimsel debi değerinde 50 A akım değeri için dağılımlar	204
EK-4. Sabit 48 SLPM hacimsel debi değerinde 250 A akım değeri için dağılımlar	205
EK-5. Sabit 200 A akım değerinde 15 SLPM hacimsel debi değeri için dağılımlar	206
EK-6. Sabit 200 A akım değerinde 70 SLPM hacimsel debi değeri için dağılımlar	207
EK-7. Sabit 37 SLPM hacimsel debi değerinde 100 A akım değeri için dağılımlar	208
EK-8. Sabit 37 SLPM hacimsel debi değerinde 300 A akım değeri dağılımlar	209
EK-9. YTG ve YD geometrileri için dağılımlar	210
EK-10. Farklı anot çapları için dağılımlar	212
ÖZGEÇMİŞ	214

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Al, Cu, Ni ve Ti tel malzemelerinin atomizasyon sonuçları.....	29
Çizelge 2.2. Toz üretiminin boyut analizi.....	30
Çizelge 4.1. Kabuller ve modelleme özellikleri.....	75
Çizelge 4.2. Model 1'e ait sınır şartları.....	81
Çizelge 4.3. Model 2'ye ait sınır şartları.....	83
Çizelge 4.4. Bu çalışmaya ait oluşturulan modele ait sınır şartları.....	85
Çizelge 4.5. Nihai geometriye ait sınır şartları	87
Çizelge 5.1. Referans çalışma sonuçları	112
Çizelge 5.2. Model 1 ile elde edilen sonuçlar	112
Çizelge 5.3. Farklı hacimsel debiler için hesaplanan verim ve güç değerlerinin karşılaştırılması.....	130
Çizelge 5.4. Farklı akım değerleri için hesaplanan verim ve güç değerlerinin karşılaştırılması	134
Çizelge 5.5. Grafiklerde kullanılan verilerin beraber gösterimi	143

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. a) tek akışkanlı atomizasyon (savurma) b) iki akışkanlı gaz atomizasyon örneği	4
Şekil 2.2. Tek tabanca ve 3'lü tabanca sisteminin atomizasyon açısından incelenmesi a) plazma ark tel sprey uygulaması ve asimetrik durum b) plazma atomizasyon uygulaması	5
Şekil 2.3. Atomizasyon işleminde kullanılan nozul sistemleri	6
Şekil 2.4. Sıvı metal tabakasının damlacıklarına ayrılma mekanizması.....	7
Şekil 2.5. Sıyrılma ve damlacık oluşum mekanizması	8
Şekil 2.6. See ve Johnston tarafından önerilen atomizasyon mekanizması, 1. aşama, birincil atomizasyon, 2. aşama, ikincil atomizasyon ve 3. aşama katılaşmadır	10
Şekil 2.7. GA işleminde nozul şekline bağlı olarak birincil atomizasyon şekilleri	11
Şekil 2.8. Geliştirilmiş damlacık oluşum mekanizması a) atomizasyon yöntemi b) içi boş koni biçimli atomizasyonun fiziksel modeli	12
Şekil 2.9. İki temel atomizasyon modelinin birleştirilmesi	13
Şekil 2.10. We sayısına bağlı olarak ikincil atomizasyon şekilleri.....	17
Şekil 2.11. We sayısına bağlı olarak ikincil atomizasyon şekillerinin yüksek hızlı kamera ile çekilmiş gerçek görüntüleri	18
Şekil 2.12. We ve Oh sayılarına bağlı olarak damlacık deformasyon ve parçalanma haritası.....	19
Şekil 2.13. PA yönteminin şematik görünümü ve kesişim noktasının gerçek görüntüsü.....	25
Şekil 2.14. PA işleminde tel hızı ve tabanca gücü arasındaki ilişki	26
Şekil 2.15. PA yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V tozlarının SEM görüntüleri a) 250, b) 500, c) 2000 kat büyütme	31
Şekil 2.16. PA ile üretilmiş Ti-6Al-4V tozunun içyapısının incelenmesi a) tozun genel görünümü [136], b) tozun epoksi içerisine alınıp parlatılmış görünümü c) tozun dağlanmış görünümü d) bir toz parçacığının mikro yapısı.....	33

Şekil	Sayfa
Şekil 2.17. PA ile üretilmiş Ti6Al4V tozunun iç yapısının incelenmesi a) toz parçacıkları içerisindeki gözeneklerin SEM ile alınmış görüntüsü, b) bir toz parçacığının içindeki gözenegin 3 boyutlu mikro CT görüntüsü c) belirli bir hacim içerisindeki tozlar içerisindeki gözeneklerin mikro CT görüntüsü d) Ti-6Al-4V tozunun EDX analizi [133].	34
Şekil 3.1. Şematik gösterim a) gaz, b) plazma durumu	36
Şekil 3.2. a) Transfer edilen ark ve b) transfer edilmeyen ark tabancalarının şematik görüntüsü	37
Şekil 3.3. Termal transfer edilmeyen ark plazma tabancasının şematik gösterimi.....	39
Şekil 3.4. Anot ark eklentisi ile plazma arasındaki bölgenin ayrıntılı ifadesi	41
Şekil 3.5. Voltaj dalgalanma şekilleri	43
Şekil 3.6. Yaygın plazma gazlarının sabit basınçtaki a) Termal iletkenlik, b) elektriksel iletkenlik, c) viskozite, (d) özgül ısı grafikleri.....	48
Şekil 3.7. Argon gazına hidrojen ilavesinin a) entalpi ve b) ses hızı üzerine etkisi	49
Şekil 3.8. Elektrotlar üzerinde etkili olan ısı transfer mekanizmaları.....	53
Şekil 3.9. Toryum katkılı tungstenin a) soğutma suyu kullanılmaması ve kullanılması durumunda b) çalışmaya başlamadan ve 7 saat çalıştıktan sonraki gerçek görüntüsü	56
Şekil 3.10. Bakır malzemeden yapılmış anodun a) farklı akım ve debi değerlerinde 7 saat çalışma sonrasındaki erozyon durumu b) 800A akım ve $2.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ değerinde bilinmeyen çalışma süresi sonucu erozyon durumu c) Tungsten eklentili F4 Sulzer Metco tabanca anodunun 400A akım ve $40\text{Ar}+8\text{H}_2$ debi değerinde bilinmeyen çalışma süresi sonucu erozyon durumu	57
Şekil 3.11. Tabanca elemanlarının şematik gösterimi	60
Şekil 3.12. Elektrotlara ait şematik görünüm a) katotlar b) parçalı anot.....	63
Şekil 4.1. Nozul/tabanca geometrilerinin ifadesi ve hesaplama alanının 2B/3B görünümü.....	73
Şekil 4.2. Bazı ağ elemanı özelliklerinin kalite kontrol ölçeği	80
Şekil 4.3. Temel nozul geometrisi ve ağ yapısı (solda), çıkış kesitindeki ağ yapısı, veri alınan düğüm noktaları ve çizgilerin gösterimi (sağda)	81

Şekil	Sayfa
Şekil 4.4. Model 2'ye ait modelleme geometrisi, sınır şartları ve ağ yapısı.....	82
Şekil 4.5. Dış kısım ve eklenti ilaveli nozul geometrileri ve ağ yapısı.....	84
Şekil 4.6. Veri alınan noktaların tarifi 1. YTG ve YD geometrileri için nozul çıkış verisini 2 ve 3. DG geometriler için sırasıyla boğaz ve nozul çıkış verisini 4. Tüm geometriler için nozul çıkışından belirli mesafelerdeki verileri temsil etmektedir.	85
Şekil 4.7. Ti-6Al-4V tel ile birlikte oluşturulmuş geometri ve ağ yapısı	86
Şekil 4.8. Nihai geometriye ait veri alınan çizgiler ve Şekil 4.7'da ince ağ yapısından dolayı ifade edilemeyen geometrilerin ifadesi.....	87
Şekil 4.9. Argon gazının 30 000 K sıcaklığa kadar termal ve elektriksel özellikleri	88
Şekil 4.10. Ansys Fluent yazılımındaki MHD ile ilgili model tanımlama penceresi	95
Şekil 4.11. Plazma tabancaları için yapılan analizlerde elde edilen örnek bir rezidü grafiği ve ark oluşumunun yakınsama değerlerine etkisi	98
Şekil 4.12. Model 1 geometrisi için sayısal çözümün hücre ve iterasyon sayısından bağımsızlaştırma grafikleri	99
Şekil 4.13. Model 2 geometrisi için sayısal çözümün iterasyon sayısından bağımsızlaştırılması grafikleri	99
Şekil 4.14. Model 2 geometrisi için sayısal çözümün hücre sayısından bağımsızlaştırılması grafikleri	100
Şekil 4.15. PA deney düzeneğinin şematik görünümü	101
Şekil 4.16. PA deney düzeneğinin gerçek görüntüsü, a) Reaktörün genel görünümü, b) reaktör üst kısım görünümü, c) plazma ateşleme ve tel hızı ayar ünitesi, d) ve f) plazma tabancaların kesişim noktasına hedeflenmiş görünümü, e) Reaktör üst kısmı tabanca haznesinin görünümü, g) tel düzeltme ve sürgü mekanizmasının görünümü.....	102
Şekil 4.17. Eski GA reaktörünün PA sistemine uygun hale getirilmesi	104
Şekil 4.18. Reaktör üst kısım tasarımı ve imal ettirilmiş görüntüsü T1, T2, T3 plazma tabancalarını, TY, gerektiğinde ikili çalışma için kullanım amaçlı hazneyi, G, gözetleme penceresini, TH ise tel sürme haznesini ifade etmektedir.	105
Şekil 4.19. Plazma tabancasının genel görünümü a) tasarım aşamaları, b) gerçek görüntüsü ve çalışır durumu, c) nihai tasarım,.....	106

Şekil	Sayfa
Şekil 4.20. Plazma ateşleme ve tel hızı ayar sistemi a) sisteme telin sisteme giriş şekli b) sistemin genel görünümü	107
Şekil 4.21. SEM görüntülerinden boyut ölçümünün nasıl yapıldığının gösterimi	108
Şekil 4.22. Tozların şekil, yüzey morfolojilerinin ve iç yapısının tespiti amacıyla kullanılan a) optik mikroskop, b) taramalı elektron mikroskobu	108
Şekil 5.1. Tez kapsamında gerçekleştirilen analiz değişkenlerinin özetlenmesi	109
Şekil 5.2. Referans çalışma ve Model 1'in sıcaklık ve elektrik potansiyel değerleri açısından kıyaslanması	111
Şekil 5.3. Zamana bağlı ve kararlı hal çözümlerinin kıyaslanması	114
Şekil 5.4. Zamana bağlı ve kararlı hal çözümlerinin kıyaslanması	115
Şekil 5.5. Farklı çalışmalar için karşılaştırma işlemi a) tabanca çıkışındaki ortalama sıcaklık değerleri ve b) hız değerleri için.....	117
Şekil 5.6. Referans çalışma [293] ile Model 3-YTG için nozul çıkışından belirli mesafelerdeki sıcaklık ve hız değerlerinin karşılaştırılması.....	119
Şekil 5.7. Sabit 170 A değerinde farklı hacimsel debiler için sıcaklık, hız değerleri ve ark kökü eklentisinin olduğu mesafelerin karşılaştırılması	120
Şekil 5.8. Sabit 170 A akım değerinde en düşük ve en yüksek hacimsel debiler için örnek sıcaklık, hız, elektrik potansiyeli dağılımları ve ark kökü eklentisinin konumu.....	121
Şekil 5.9. Sabit 48 SLPM değerinde farklı amper değerleri için sıcaklık, hız değerleri ve ark kökü eklentisinin olduğu mesafelerin karşılaştırılması.....	123
Şekil 5.10. Sabit 48 SLPM hacimsel debi değerinde en düşük ve en yüksek amper değerleri için örnek sıcaklık, hız, elektrik potansiyeli dağılımları ve ark kökü eklentisinin konumu.....	124
Şekil 5.11. Farklı nozul çıkış çapları için çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklık ve hız değişimi	125
Şekil 5.12. Farklı nozul boyları için çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklık ve hız değişimi	126
Şekil 5.13. Tabancanın ilk ateşlenmesi ve sonrasında plazma oluşum aşamasından a) gerçek bir görüntü, b) sayısal modelleme çözümü sırasında ark oluşum aşaması.....	127

Şekil	Sayfa
Şekil 5.14. Sabit 200 A değerinde farklı hacimsel debiler için belirli mesafelerden alınan sıcaklık değerleri ve ark kökü eklentisinin olduğu mesafelerin karşılaştırılması	129
Şekil 5.15. Sabit 200 A değerinde farklı hacimsel debiler için belirli mesafelerden alınan hız değerlerinin karşılaştırılması	130
Şekil 5.16. Sabit 200 A akım değerinde en düşük ve en yüksek hacimsel debiler için örnek sıcaklık, hız ve ark kökü eklentisinin konumu	131
Şekil 5.17. Sabit 37 SLPM değerinde farklı akım değerleri için belirli mesafelerden alınan sıcaklık değerleri ve ark kökü eklentisinin olduğu mesafelerin karşılaştırılması	132
Şekil 5.18. Sabit 37 SLPM değerinde farklı akım değerleri için belirli mesafelerden alınan hız değerlerinin karşılaştırılması	133
Şekil 5.19. Sabit 37 SLPM değerinde en düşük ve en yüksek akım değerleri için örnek sıcaklık, hız ve ark kökü eklentisinin konumu	134
Şekil 5.20. Prototip nozul ile test çalışmaları öncesinde b) katot görüntüsü ve çalışma sonrası aşınmış a) anot c) katot görüntüsü	136
Şekil 5.21. Tabanca çıkışından belirli mesafelerde, YTG ve YD geometriler için sıcaklık (sol eksen) ve hız (sağ eksen) değerlerinin karşılaştırılması	137
Şekil 5.22. YTG ve YD geometriler için sıcaklık ve hız dağılımları	138
Şekil 5.23. Tabanca çıkışından belirli mesafelerde, YTG, YD ve DG geometriler için a) sıcaklık ve b) hız değerlerinin karşılaştırılması	139
Şekil 5.24. Tabanca çıkışından belirli mesafelerde, YTG, YD ve DG geometriler için sıcaklık ve Mach sayısı değerlerinin karşılaştırılması	140
Şekil 5.25. Hız dağılım görüntüsü üzerinde boğazdan 4 cm mesafeye dek Mach sayısı değişimlerinin gösterimi a) YTG geometrisi b) DG-2 geometrisi....	141
Şekil 5.26. Tabanca çıkışından belirli mesafelerde, YTG, YD ve DG geometriler için türbülans kinetik enerji değerlerinin karşılaştırılması.....	142
Şekil 5.27. Tabanca çıkışından belirli mesafelerde, YTG, YD ve DG geometriler için We sayısı değerlerinin karşılaştırılması	143
Şekil 5.28. Farklı anot çapları ortalama a) sıcaklık değerleri ile nozul çıkışından eksenel mesafelerdeki sıcaklık değerlerinin b) ve hız değerleri ile nozul çıkışından eksenel mesafelerdeki hız değerlerinin karşılaştırılması..	145
Şekil 5.29. Farklı anot çapları için sıcaklık ve hız dağılımları	146

Şekil	Sayfa
Şekil 5.30. Tabanca çıkışından aksenel a) 3 cm ve b) 4 cm mesafelerdeki 3B hız grafikleri	148
Şekil 5.31. Ara değerlendirme sonucu verilen kararların deneysel görüntüler ile doğrulanması a) karar verilen geometri için, b) önceki geometri için	149
Şekil 5.32. Tel üzerinden alınan veriler ile çizilen a) sıcaklık ve b) hız değerlerinin tel üzerindeki mesafelere göre karşılaştırılması.....	150
Şekil 5.33. Nozul boğazından kesişim noktasına kadar alınan veriler ile sıcaklık ve hız değerlerinin karşılaştırılması	151
Şekil 5.34. 300 A akım değerinde 60, 70 ve 90 SLPM hacimsel debi değerleri için sıcaklık ve hız dağılımları	152
Şekil 5.35. Hızlandırıcı nozul görüntüleri a) aşınmış durum b) çalışma öncesi hali, c) çalışmanın hemen sonrasındaki durum, d) uç kısımlarındaki aşınmalar ile ilk hali karşılaştırması	153
Şekil 5.36. Prototip çalışmasından görüntüler a) su soğutmasız nozul, b) su soğutmalı nozul c) montaj edilmiş hali d) çelik tozu üretimi e) tungsten tozu üretimi	155
Şekil 5.37. Prototip tabanca ile toz üretiminden elde edilen tozlara ait genel değerlendirme görüntüsü	155
Şekil 5.38. Belirli parametrelerde tabancaların bireysel çalışması sonucunda elde edilen gerçek görüntülerin analizden elde edilen sıcaklık dağılımı ile karşılaştırılması.....	158
Şekil 5.39. Katot için a) çalışma öncesinden, b) 2 saat sonrasında ön görünüş, c) 2 saat sonrasında yan görünüş, d) 3 saat sonrasında erezyon görüntüleri.....	160
Şekil 5.40. Anot için belirli parametre ve sürelerde gerçekleşen erezyon görüntüleri..	161
Şekil 5.41. Toz üretim sürecinden görüntüler a) başlamadan önce, b-e) üretim esnasında, f) bittiğinde kaydedilen görüntüler	163
Şekil 5.42. 0-53 µm aralığında parçacık boyutuna sahip tozların SEM görüntüleri ve parçacık boyut analizi	165
Şekil 5.43. 53-125 µm aralığında parçacık boyutuna sahip tozların SEM görüntüleri ve parçacık boyut analizi	166

Şekil	Sayfa
Şekil 5.44. 0-53 µm parçacık büyüklüğüne sahip tozların a) genel, b) dağlanmış, c) 5x büyütme, d) 10x büyütme, e) 20x büyütme, f) 50x büyütme, g) 100x büyütme görüntüsü	167
Şekil 5.45. 0-53 µm parçacık büyüklüğüne sahip tozların a) genel, b) dağlanmış, c) 5x büyütme, d) 10x büyütme, e) 20x büyütme, f) 50x büyütme, g) 100x büyütme görüntüsü	168
Şekil 5.46. Farklı parçacık büyüklüklerine sahip tozlarda gözeneklilik gösterimi.....	169
Şekil 5.47. Aynı yöntemle üretilmiş farklı tozların bu çalışma kapsamında üretilen tozlar ile mikroyapısal karşılaştırılması a) ve b) toz üretimi yapan bir firmaya ait, c) Referansta yapılan incelemeye ait, d), e) ve f) Bu çalışma kapsamında üretilen tozlara ait çeşitli büyütme oranlarında elde edilmiş görüntüler	170
Şekil 5.48. Aynı ve farklı yöntemler ile üretilmiş farklı tozların birikimli yüzdelere açısından karşılaştırılması a) Bu çalışma, b) PA, c) PA, d) EIGA, e) PREP, f) PREP g) Argon atomize toz parçacıklarına ait eğriler	172
Şekil 5.49. Aynı ve farklı yöntemler ile üretilmiş farklı tozların şekil özellikleri açısından karşılaştırılması.....	173

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
2B	İki boyutlu
3B	Üç boyutlu
A	Alan (m^2)
AC	Alternatif akım (A)
B	Manyetik alan (T)
c_p	Sabit basınçta özgül ısı ($kJ/(kg \cdot K)$)
DC	Doğru akım (A)
D_h	Hidrolik çap (m)
E	Elementer yük (C)
G	Kütle akış hızı (kg/s)
G	Manyetik alan birimi
J	Elektrik akım yoğunluğu (A/m^2)
j_x, j_y, j_z	x-, y- ve z- yönündeki akım yoğunluğunun bileşenleri (A/m^2)
k	Isı iletim katsayısı ($W/(m \cdot K)$)
K	Türbülanslı kinetik enerji (J/kg)
k_B	Boltzmann sabiti (J/K)
μm	Mikrometre
M	Molar kütle ($kg/kmol$)
$\emptyset$	Elektrik potansiyeli (V)
P	Statik basınç (kPa)
Pr_t	Türbülanslı Prandtl numarası
Q	Hacimsel akış debisi (m^3/s)
Q_J	Joule ısıtması (W/m^3)
R	Evrensel gaz sabiti ($kJ/(kmol \cdot K)$)
R_{Ar}	Argon özgül gaz sabiti ($kJ/(kg \cdot K)$)
Ra	Ortalama yüzey pürüzlülük değeri

Simgeler**Açıklamalar**

Re	Reynolds sayısı
T	Sıcaklık (K)
T_e	Elektron sıcaklığı (K)
T_h	Ağır parçacıkların sıcaklığı (K)
T_{ion}	İyon sıcaklığı (K)
T_n	Nötron sıcaklığı (K)
μ	Dinamik viskozitesi ((N·s)/m ²)
μ_t	Türbülans vizkozitesi ((N·s)/m ²)
V	Hız (m/s)
E	Türbülanslı dağılımı oranı (J/kg·s)
N	Kinematik viskozite (m ² /s)
P	Yoğunluk (kg/m ³)
Σ	Elektrik iletkenliği (1/Ω·m)

Kısaltmalar**Açıklamalar**

BTD	Bölgesel Termodinamik Denge
DC	Doğru Akım
DG	Daralan Genişleyen
DSS	Doğrudan Sayısal Simülasyon
EIGA	Elektrot İndüksiyon Ergitmeli Gaz Atomizasyon
Eİ	Eklemeli İmalat
GA	Gaz Atomizasyon
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HIP	Sıcak İzostatik Presleme
ing	İngilizcesi
LENS	Lazer Mühendisliği Net Parça
MIM	Metal Enjeksiyon Kalıpcılığı
MHD	Manyetohidrodinamik
OBTD	Bölgesel Termodinamik Denge Olmayan
PA	Plazma Atomizasyon
PDE	Plazma Döner Elektrot Yöntemi

Kısaltmalar**Açıklamalar****SA**

Su Atomizasyon

SAD

Sayısal Akışkanlar Dinamiği

SEBM

Seçici Elektron Işını Ergitme

SLM

Seçici Lazer Ergitme

SLPM

Dakikadaki Standart Litre

TEAT

Transfer Edilmeyen Ark Tabancası

VD

Ve Diğerleri

YD

Yalnızca Daralan

YTG

Yeni Temel Geometri

1. GİRİŞ

Yeni nesil imalat yöntemlerinden olan eklemeli imalat (ing; Additive manufacturing) sektörünün metal malzeme uygulamaları günümüzde hızla gelişmektedir. Dünyada bu teknolojinin metal malzeme uygulamalarının genişletilmesi amacıyla önemli araştırma merkezleri kurulmuş ve büyük bütçeler ayrılmaktadır. Ülkemizde de bu yönde çalışmalar yapılmaktadır. Eklemeli imalat yönteminin hammaddesini küresel metal tozları oluşturmaktadır. İhtiyaç duyulan metal tozları gaz atomizasyon (GA) veya plazma atomizasyon (PA) ile üretilmektedir. Ülkemizde de kullanımı giderek artan bu yöntem için gerekli hammadde tamamen ithal edilmektedir.

PA, özellikle biyomedikal ve havacılık endüstrisinde titanyum ve diğer reaktif metal ve alaşımlarından küresel toz üretilmesinde önemli avantajlara sahiptir. PA yönteminin en önemli ekipmanı plazma tabancasıdır. Plazma tabancası içerisinde plazmanın üretildiği kısım nozuldur. Plazma nozul teknolojisinin araştırılması özgün teknoloji geliştirmek için kaçınılmazdır. Plazma jetinin atomizasyon işleminde kullanılarak metal tozu üretiminin yapılabilmesi için plazma jetinin yapısının ve karakteristiğinin bilinmesi gerekmektedir. Özellikle, verilen enerji miktarına göre plazma jetinin şekli ve uzunluğu, sıcaklık dağılımı, jetin mesafeye göre hız değişiminin bilinmesi önem taşımaktadır. Mevcut literatürde bu soruların cevabına yönelik teorik çalışmalar bulunmakta olup, atomizasyon amacına yönelik olarak yukarıda belirtilen sorulara tam cevap verememektedir. Atomizasyon açısından plazma jetinin sıcaklığı ve hızı oldukça önemli olup, nozul tasarımına göre değişmektedir. Bu nedenle özgün nozul tasarımı ile plazma gazı debisi ve elektrik akımı gibi değişkenler büyük önem taşımaktadır. Diğer taraftan, PA işleminde kullanılan tabanca geometrileri ticari olarak önemli ekipmanlar olduğundan geometrisi detaylı olarak açıkça verilmemektedir.

Plazma tabancaları ile ilgili mevcut literatür tabanca içi ve dışı olmak üzere iki ana başlıkta incelenebilir. Tabanca içi teorik çalışmalar, arkın dinamik davranışının tespiti, ark kökünün ve farklı oranlarda karışım gazlarının plazma jeti sıcaklık ve hız değerleri üzerindeki etkisinin belirlenmesi için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile modelleme çalışmalarını içermektedir [1–10]. Deneysel çalışmalar ise belirli süre sonrasında çıkartılan elektrotların erezyonu ve çeşitli görüntüleme teknikleriyle ark elektrot etkileşiminin belirlenmesi çalışmalarından oluşmaktadır [11–20]. Bu çalışmalarda kullanılan tabancalar hazır olarak temin edilmekte ve belirli değişkenler (akım ve gaz debisi gibi) için modelleme

alışmalarından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalar yapılmaktadır [7, 20, 21]. Bu çalışmalarda geometrik boyutların (nozul çapı ve boyu gibi) değiştirilemeyişi bu boyutların plazma jeti üzerindeki etkisini açıklamada yetersiz kalmaktadır. Tabanca dışında plazma jetinin davranışı ile ilgili HAD alışmaları ise bu tabancaların başlıca kullanım alanı olan sprey kaplama uygulamaları açısından değerlendirilmiştir [22–24] ve nispeten daha azdır. Bu konuda yapılan deneysel çalışmalarda ise kaplama özellikleri açısından değerlendirmeler yapılmıştır. Tabanca dışında plazma jetinin PA işlemine yönelik (tel üzerindeki sıcaklık ve hız değerleri gibi) sayısal modellenmesi üzerine neredeyse hiç kaynak bulunmamaktadır. PA işlemi ile ilgili kaynaklar, üreticiden tozun temin edilerek toz hammaddeli yöntemler ile gerekli imalatların yapılması ve tamamlanmış ürün üzerinde toz özelliklerinin etkisinin incelenmesine yönelik deneysel çalışmalardan oluşmaktadır.

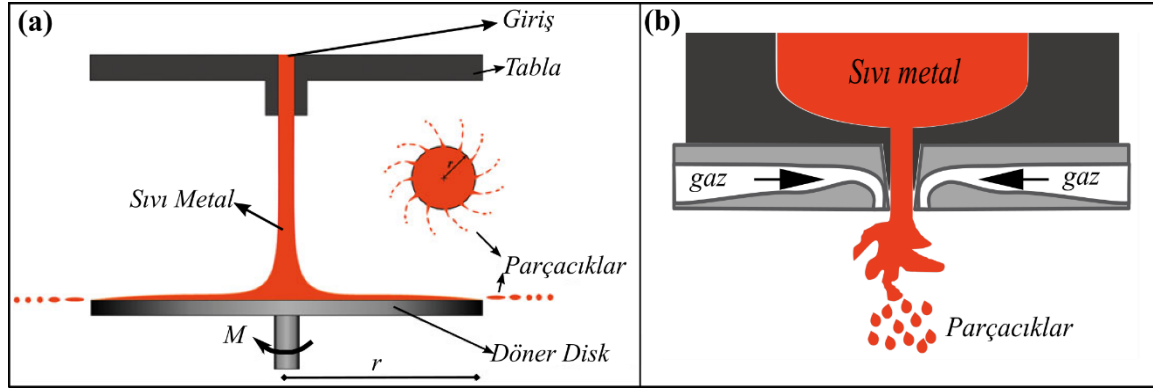
Bu alışma ile iki ana amaca ulaşmak için sayısal analiz ve deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunlardan birincisi detayları paylaşılmayan plazma tabancası geometrisinin metal tozu üretim amacına uygunluğunun sayısal çözümleme ile tespit edilmesidir. Güvenilir sayısal modeller elde ederek, teli ergitebilmek için sıcaklık, atomize edebilmek için ise hız değerlerinin yeterli olup olmadığına karar verilmesi bu kısmının hedefini oluşturmuştur. İkincisi ise, geleneksel malzemelere göre daha yüksek ergime sıcaklıklarına sahip Ti-6Al-4V alaşım tozlarının üretilmesidir. Sayısal modeller ile elde edilen nozul geometrisine göre tabanca tasarımlarını yapmak, güç kaynakları vakum pompası gibi ekipmanları edinerek deney setini inşa etmek ve bunların sonucunda küresel tozların üretilebilirliğini araştırmak, bu kısmının hedefini oluşturmuştur.

Bu çalışmada, argon DC transfer edilmeyen ark plazma tabancası geometrisi tasarlanmıştır. Tasarlanan tabanca içindeki plazma oluşumu hesaplamalı akışkanlar dinamiği yaklaşımı ile analiz edilerek parametrik inceleme yapılmıştır. Plazma tabancası üç boyutlu olarak modellenmiştir. Tabanca içerisindeki elektromanyetik alan ve gaz akışı arasındaki etkileşimi çözebilmek için ANSYS Fluent ve MHD modülü birlikte kullanılmıştır. Akım yoğunluğu ve gaz debisi değişkenlerinin tabanca çıkışındaki plazma jeti sıcaklığı ve hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu tasarıma göre laboratuvarında bulunan mevcut GA ünitesi düzenlenmiş ve alt sistemleri ile birlikte PA reaktörü imal edilmiştir. Toz üretim deneyleri gerçekleştirilerek karakterizasyon işlemlerine tabi tutulmuştur. Böylece sayısal ve deneysel çalışma gerçekleştirilerek uygun toz üretim şartları araştırılmıştır.

2. ATOMİZASYON

Bir tozun nasıl üretildiğinin bilinmesi üretilen tozun karakterizasyonunda neler ile karşılaşılacağı hakkında bilgi sahibi olunmasını sağlar. Toz üretebilmek için yöntem seçimi ise başta maliyet olmak üzere tepkimeler ve karakterizasyon özellikleri gibi faktörlerin birleşimine bağlıdır [25]. Yüksek kaliteli reaktif metal tozlarından istenilen özellikler ise yüksek küreselleşme, yoğunluk, saflık, akışkanlık ve düşük gözeneklilik gibi toz özelliklerinin birleşimidir [26]. Hemen her malzemenin tozunu üretebilmek için çok sayıda yöntem bulunmaktadır [25, 27–29]. Fakat bu yöntemler arasında atomizasyon, özellikle çeşitli alaşımlara uygulanabilirliği, toz boyutunun kontrolü ve bir sıvıyı son damlacıklarına kadar ayırma sürecinin kolaylığı nedeniyle toz üretiminin baskın tarafı haline gelmiştir [30–32]. Metalik tozların üretildiği atomizasyon yöntemlerinin çoğu, bir sıvı metal veya alaşımın ergiyik halinin atomize edilmesi sonucu üretilirler [33].

En temel tanımı ile atomizasyon, bir sıvının ince damlacıklara bölünmesidir. Pratik olarak sıvı hale getirilebilir olan herhangi bir malzeme atomize edilebilir. Yüksek sıcaklıkta ergiyen metalik malzemeler söz konusu olduğunda ise, sonuç donmuş damlacıklar, yani bir toz parçacığı olacaktır [32]. Atomizasyon, tek akışkanlı ve iki akışkanlı olmak üzere iki kısma ayrılmıştır. Sıvı metalin başka bir akışkan kullanılmadan parçacıklarına ayrıldığı yöntem tek akışkanlı atomizasyon olarak tanımlanmaktadır [34]. İki akışkanlı atomizasyon ise sıvı metal akışının yüksek basınçlı su, hava veya gaz jetleriyle püskürtülmesi sonucu soy gaz koruması altındaki bir soğutma kulesinde damlacıklarına ayrıştırılarak soğutulması şeklinde gerçekleşen bir işlemdir [33, 35]. Savurma atomizasyon tek akışkanlı, gaz (GA), su (SA) ve plazma atomizasyon (PA) yöntemleri ise iki akışkanlı atomizasyona örnektir [34, 36, 37]. Burada verilen tanımdan yola çıkılarak son yıllarda kullanımı artan plazma döner elektrot yöntemi (PREP – ing; plasma rotating electrode process) tek, elektrot indüksiyon ergitmeli gaz atomizasyon (EIGA – ing; electrode induction melting gas atomisation) yöntemi ise iki akışkanlı atomizasyona örnek olarak verilebilir. Günümüz atomizasyon teknolojisi, II. Dünya Savaşı sırasında ilk büyük ölçekli atomize demir tozu üretiminden bu yana geçen 75 yıldaki sürekli geliştirmelerin sonucudur ve dünya çapında üretilen tozların %95'i iki akışkanlı atomizasyon ile üretilmektedir [32]. Şekil 2.1'de tek ve iki akışkanlı atomizasyon tiplerine ait birer örnek gösterilmiştir. Ayrıca PA yöntemi iki akışkanlı atomizasyon olduğundan sonraki anlatımlarda iki akışkanlı atomizasyon üzerinde durulacaktır.

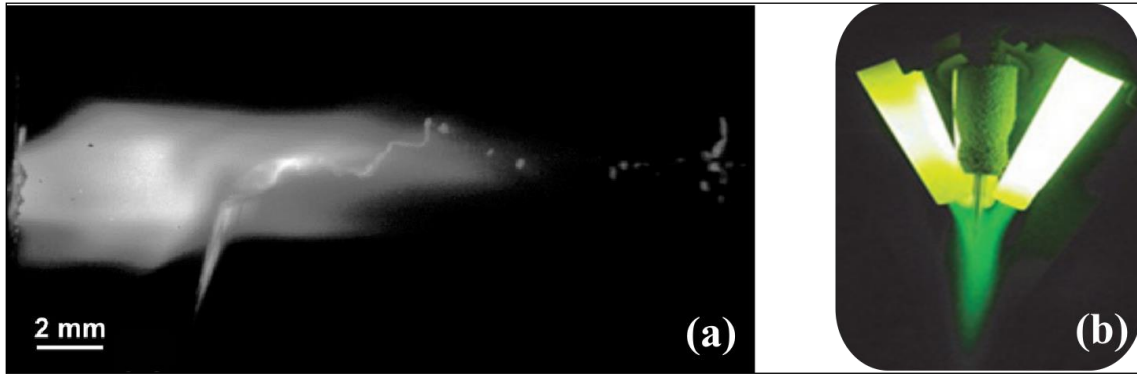


Şekil 2.1. a) tek akışkanlı atomizasyon (savurma) [34] b) iki akışkanlı gaz atomizasyon [38] örneği

Her atomizasyon tekniği arasında farklar bulunmasına rağmen toz üretimi 3 ana aşamada gerçekleşir. Bunlar, ergime, atomizasyon ve katılaşmadır [35, 39, 40]. Ergime işlemi, geleneksel indüksiyonla ertitme veya vakum indüksiyon ertitme, plazma ark ertitme, katı metal çubuğu indüksiyonla damla damla ertitme ve plazma tabanca ile ertitme şeklinde gerçekleştirilebilmektedir [35]. Bu aşamada en önemli kriter metali sıvı hale getirme işleminin bir pota sistemi gerektirip gerektirmediğidir. Çünkü potalar, atomize edilmiş toz parçacıklarının kirliliğindeki kaynaklardan biridir [40-42]. Atomizasyon işleminin yukarıda da bahsedildiği gibi sıvı metalin, soy gaz koruması altındaki bir soğutma odasındaki uçuş sırasında katılan damlacıklara ayrıldığı süreçtir. Atomizasyon işleminin en yaygın kullanımı bir nozul içinden zorlanan yüksek basınçlı bir gaz kullanılarak gerçekleştirilir [35] [39]. Buna alternatif olarak, sıvı metal demetini parçalamak için merkezkaç kuvveti de kullanılır. Yine pozitif basınç altındaki sıvı metal vakuma tabi tutularak atomizasyon gerçekleştirilebilir [43]. Bu 3 ana aşamadan en önemli aşama atomizasyon aşamasıdır ve araştırmacılar tarafından mekanizması teorik ve deneysel olarak çalışılmaktadır. Katılaşma aşamasında ise, soğuma hızı kontrol parametresidir [40]. Tozların şekli ve mikroyapısı büyük oranda soğuma hızları tarafından belirlenir [44, 45]. Damlacık boyutu ile soğuma hızları arasındaki ilişkiden dolayı damlacık boyutu küçüldükçe soğuma hızı artmaktadır [46]. Çoğu atomizasyon işleminde, ölçüm boyutu $\leq 100 \mu\text{m}$ 'dur ve bu boyuta uygun soğuma hızı $\geq 10^5 \text{ K/s}$ olarak belirtilmiştir [47]. Ayrıca soğuma hızı, sıvı metal damlacıklarının tam olarak soğuyarak serbest bir şekilde katılaşmasının istendiği koruyucu ortam olan atomizasyon kulesi geometrik boyutlarının belirlenmesinde de önemli bir etkidir [40].

2.1. Atomizasyon Mekanizmaları

Atomizasyon, birden fazla mekanizmanın bir sonucudur, fakat genel olarak sıvı metal yüzey geriliminin dengeleyici etkisinin yüksek hızlı gaz akışı gibi dış bir kuvvet tarafından bozulduğu bir işlemdir [37]. PA işleminin mekanizması üzerine yapılan bilimsel çalışmalar ise gerek sistemin kurulum maliyetleri gerekse de işlem karmaşıklığı nedeniyle oldukça sınırlıdır ve damlacık oluşumu tam olarak bilinmemektedir. Bu sınırlı literatür özellikle telin hammadde olarak kullanıldığı kaplama işlemleri üzerine genişletilerek bir telin atomize olma mekanizması incelenmiştir. Bir teli atomize ederek karşı malzemenin kaplamasının gerçekleştirildiği yüksek hızlı oksijen yakıt (HVOF - ing; High velocity oxygen fuel) ve plazma ark tel püskürtme (ing; Arc-Plasma wire spraying) gibi kaplama yöntemleri atomizasyon mekanizması açısından değerlendirilmiştir. Fakat bu yöntemler ile ilgili yapılan önceki çalışmalar atomizasyon mekanizması veya parçacık boyutları ile ilgili olmayıp daha çok kaplama özellikleri üzerine yapılmış çalışmaları içermektedir [48–53]. Ayrıca plazma ark tel sprej yönteminde plazma jeti önüne beslenen teli Şekil 2.2-a’da görüldüğü gibi hedef malzemeye püskürtmektedir ve burada görüldüğü gibi telin ergimesi ve damlacıklarına ayrılması asimetriktir [54]. PA işleminde ise 3 tabancalı sistem kullanılarak tel simetrik bir şekilde ertitilmekte ve atomize edilmektedir [55]. Şekil 2.2-b’de bu durumu anlatan gerçek görüntü gösterilmiştir.

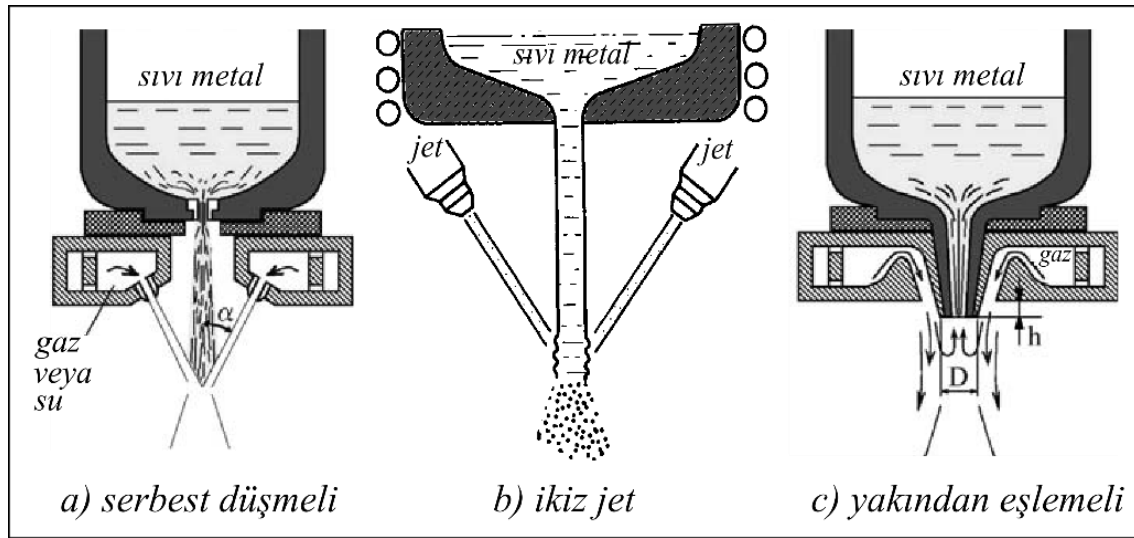


Şekil 2.2. Tek tabanca ve 3’lü tabanca sisteminin atomizasyon açısından incelenmesi a) plazma ark tel sprej uygulaması ve asimetrik durum [54] b) plazma atomizasyon uygulaması [56]

Üçlü tabanca sisteminin kullanılmasının sebeplerinden biri olan bu durum PA yöntemindeki atomizasyon mekanizmasının tel kullanılarak yapılan kaplama yöntemlerindeki mekanizma ile değil GA yöntemindeki mekanizma ile bağdaştırılabileceği sonucunu ortaya çıkartmıştır. Çünkü üç plazma tabancasının bir kesişim noktasına belirli bir açıyla hedeflenmesi durumu

ve bu plazma tabancaları sayesinde ergime işleminin anlık gerçekleşerek sonrasında simetrik bir ergiyik haline gelen telin yüksek hızlı plazma gazı sayesinde damlacıklarına ayrışma mekanizması GA yöntemindeki nozul sistemleriyle benzerlik taşımaktadır. İncelenen sınırlı literatür de geleneksel gaz atomizasyonunda kullanılan gaz akışının, daha yüksek momentumlu plazma jetleri ile değiştirildiğini belirterek bu benzerliği doğrulamaktadır [26, 37].

Şekil 2.3'te üç farklı nozul sistemi gösterilmektedir. Bu sistemlerden serbest düşmeli nozul sisteminde potadan akıtılan sıvı metal yaklaşık 50 – 200 mm aşağıda ile damlacıklarına ayrıştırılırlar. Yakından eşlemeli nozul sisteminde ise potadan akıtılan sıvı metal aktığı kanalın hemen ucunda ince bir tabaka halinde gaz jetleriyle damlacıklarına ayrıştırılır [57]. İkiz jet sistemi ise potadan yerçekimi kuvveti ile akıtılan sıvı metalin ikili tabanca ile atomize edilmesini içermektedir. Tüm sistemlerde nozulun tasarımı değişkenlik gösterebilir. Örneğin gaz jeti birkaç ayrı delikten veya halka şeklinde açıklıktan geçirilebilmektedir [58]. Bu sistemlerin incelenmesi PA işleminin serbest düşmeli veya ikiz jet nozul sistemi ile benzerlik taşıdığını ortaya çıkartmıştır.



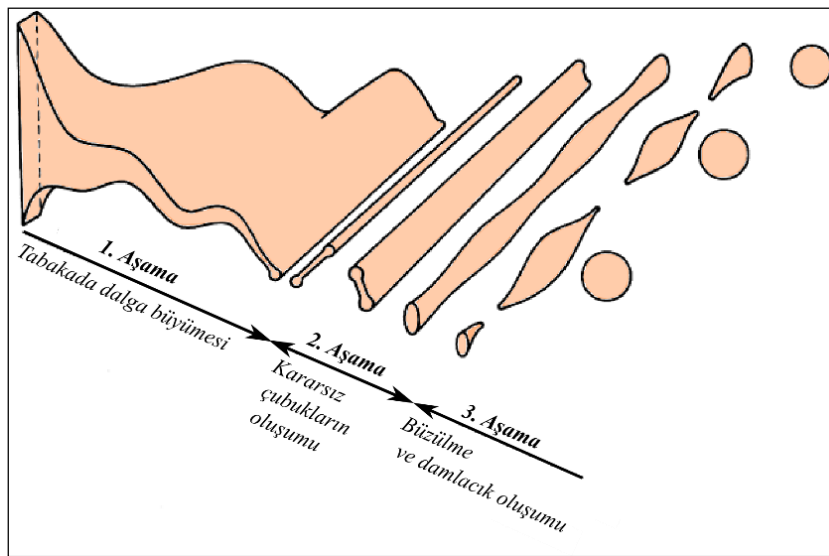
Şekil 2.3. Atomizasyon işleminde kullanılan nozul sistemleri [58] [31]

PA yöntemi ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar tabancalardan elde edilen plazma jetinin sahip olduğu yüksek sıcaklıklar dolayısıyla metal teli erittiğini ve ulaştığı ses hızının 3 ila 4 katı hızlar sayesinde ise erimiş metali oldukça küçük damlacıklarına ayırarak atomize ettiğini belirtmişlerdir [46,59]. GA yöntemindeki gaz akışının yerine plazma tabancalarından elde edilen plazma jetleri darbeli yapıda olduklarından sıvı metal demetini

bir nozul ile püskürtülen gaz ve sıvı akışından daha etkin bir biçimde parçalayacaktır [37]. Atomizasyon işlemi başlıca üç aşamadan oluşur bunlar birincil atomizasyon, ikincil atomizasyon ve katılaşmadır [60, 61]. Bu aşamalar özellikle GA yöntemindeki mekanizmalar ile büyük oranda benzerlik taşıdığından bu yöntemden yola çıkılarak aşağıda başlıklar halinde açıklanmıştır.

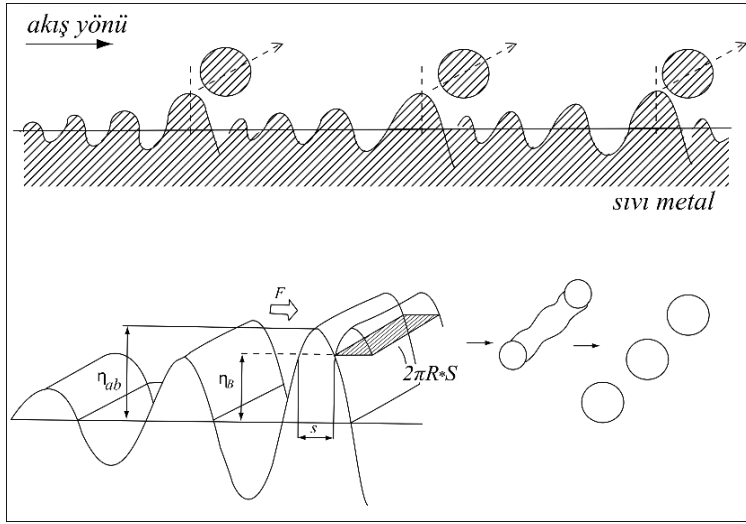
2.1.1. Birincil atomizasyon

Birincil atomizasyon sıvı metal demetinin ortama girdiği andan parçalanıp ilk damlacıkların oluştuğu kısma kadar olan bölümdür. Atomizasyon sırasında damlacık oluşumu karmaşık bir olay kümesidir ve tam olarak bilinmemektedir [55, 62]. Erimiş metal akımının kopuşu ve damlacık oluşum mekanizması ile ilgili çalışmalar 50 yıldan beri çalışılmaktadır [63]. Bu konuda yapılan ilk modelleme çalışması Dombrovski ve Johns tarafından tartışmaya açılmıştır [31]. Araştırmacılar 1963 yılında viskoz sıvı tabakaların aerodinamik dengesizliği ve parçalanması isimli çalışmaları ile Şekil 2.4'te gösterilen modeli tartışmışlardır. Bu modele göre damlacıklarına ayrılma mekanizması 3 aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada sıvı metal dalgası kritik bir genliğe erişinceye kadar uzamaktadır. İkinci aşamada uzayan sıvı metal dalgası tepelerinden ve kanallarından bölünerek kararsız çubuksu yapıları oluşturmakta ve son aşamada ise bu çubuksu parçacıklar yüzey gerilmeleri ve kılcal kararsızlıklardan dolayı damlacık şeklinde ayrışmaktadır [64-66].



Şekil 2.4. Sıvı metal tabakasının damlacıklarına ayrılma mekanizması [64]

Bürger ve arkadaşları [67] iki akışkanlı atomizasyon için Dombrovski ve Johns tarafından bildirilen [64] damlacık oluşum mekanizmasını geliştirerek dalga boylarının ve kararsız çubukların sıvı yüzeyinden sıyrılma mekanizmasını Şekil 2.5'te görüldüğü gibi detaylandırmışlardır. Bu araştırmacılar sıvı metale enjekte edilen yüksek basınçlı gaz akışının tüm dalga hacmini değil diğerlerinden orantısız büyüyen dalgaların tepelerini sıyracağını belirtmişler ve ortalama dalga yüksekliğinin pratikte değişmeden kaldığını gözlemlemişlerdir. Bunu yaparken dalgaların kritik bir yüksekliğe ulaşırken kazandığı kinetik enerjisi ile dalga tepelerinden sıyrılarak oluşan kararsız yapıların yeni yüzey enerjilerini eşitlemişlerdir [67].



Şekil 2.5. Sıyrılma ve damlacık oluşum mekanizması [67]

Aynı çalışmada Şekil 2.5'te de şematik olarak gösterildiği gibi kritik dalga yüksekliği $\Delta h = \eta_{ab} - \eta_B$ olarak ifade edilmiş ve Eş. 2.1 yazılmıştır.

$$\Delta h \geq \frac{4\sigma_l}{c_d \rho_g u_{rel}^2} \quad (2.1)$$

Burada c_d dalga tepesindeki gaz akışı için direnç katsayısı, ρ_g gazın yoğunluğu (kg/m^3), σ sıvı yüzey gerilimini (N/m), u_{rel} ise sıvı metalin akış hızını (m/s) ifade etmektedir [65]. Dombrovski ve Johns tarafından ortaya atılan ve Bürger ve arkadaşları tarafından geliştirilen modellerin başlangıç noktası gaz jetleri tarafından tahrik edilen sıvı jetinin tüm karşı kuvvetlere rağmen büyümeye devam edeceği varsayımdır [68]. Bahsedilen karşı kuvvetler sıvı metal/gaz arayüz enerjisi ve gaz jetinin Mach sayısı ile ilişkilidir [69].

Bradley bu model üzerinde geliştirmeler yaparak şekil 2.6'da verilen modelin ilk iki aşamasını ayrıntılı matematiksel olarak modellemiş üçüncü aşamasında ise Rayleigh dengesizliği olduğunu belirtmiştir. Atomizasyonun ilk aşamasında dalga sayısı k_{max} 'ın en hızlı büyüyen genlikte belirlemek gerektiğini ikinci aşamasında ise kararsız çubuksu yapıların çaplarının (D), dalga boyu λ_{max} ($\lambda_{max}=2\pi/k_{max}$) ile ilişkili olduğunu ve Eş. 2.2'nin yazılabileceğini öne sürmüştür [69,70].

$$D = \epsilon \lambda_{max} = \frac{2\pi\epsilon}{k_{max}} \quad (2.2)$$

Burada ϵ değeri birçok atomizasyonda 0 ile 1 arasında değişen bir değerdir. Örneğin su ve hava atomizasyonu için 0,25 alınır. Üçüncü aşama da ise çapları D olan çubuksu yapılar Rayleigh dengesizliği ile parçalanarak çapları d olan damlacıklarına parçalanırlar [60], [69,70]. Rayleigh dengesizliği araştımacı Rayleigh [71] tarafından geliştirilen viskoz etkiler ihmal edilerek enerjinin korunumunu tanımlayan denklem sistemlerini içerir. Bu dengesizlik sıvının uğradığı sinüzoidal bozulmaları tarif etmektedir [65]. Eş. 2.3'te çaplar arasındaki ilişki belirtilmiştir.

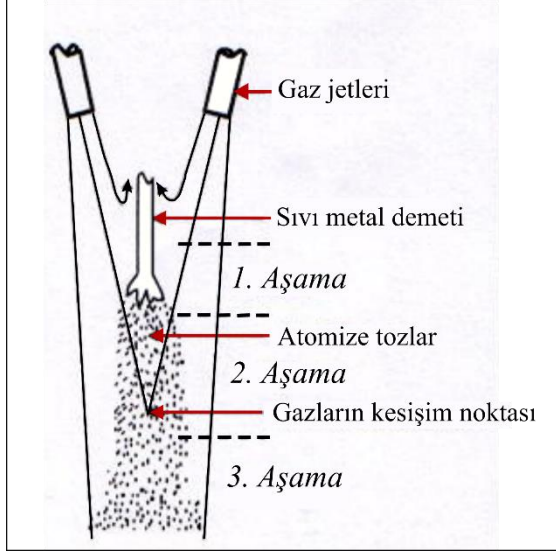
$$d = \frac{D}{0,53} \quad (2.3)$$

Eş. 2.2 ve 2.3 birleştirilerek damlacık boyutunun tespitine yönelik Eş. 2.4 yazılabilir.

$$d = \frac{11,86 \epsilon}{k_{max}} \quad (2.4)$$

Atomizasyon mekanizmaları incelenirken iki temel yaklaşımın olduğu tespit edilmiştir. Bunlardan birincisi yukarıda da gelişiminden bahsedilen Dombrovski ve Johns modelidir. İkincisi ise See ve Johnston tarafından önerilmiştir. şekil 2.6'da şematik olarak gösterilen ikinci modelde araştırmacılar dairesel olarak yerleştirilmiş dört jet ile yaptıkları atomizasyon işleminde gaz jetlerinin kesiştikleri yerde birbirlerini etkileyeceğini ve bu etkinin de negatif yönde basınç ile sonuçlanacağını bildirmişlerdir. Bu basıncın sıvı metali eksen boyunda yukarı itmeye çalışacağını ve içi boş bir koni şekline dönüştüreceğini belirtmişlerdir. Gaz hızlarının yüksek olduğu kesişim noktasına doğru yerçekimi etkisiyle ilerleyen sıvı metalin bu içi boş koniye benzeyen şekli giderek yanlamasına yayılacağı ve damlacıkların koparak sıvı metalden ayrışacağı modelini önermişlerdir. Bunu yaparken bu etkiyi metalin özgül

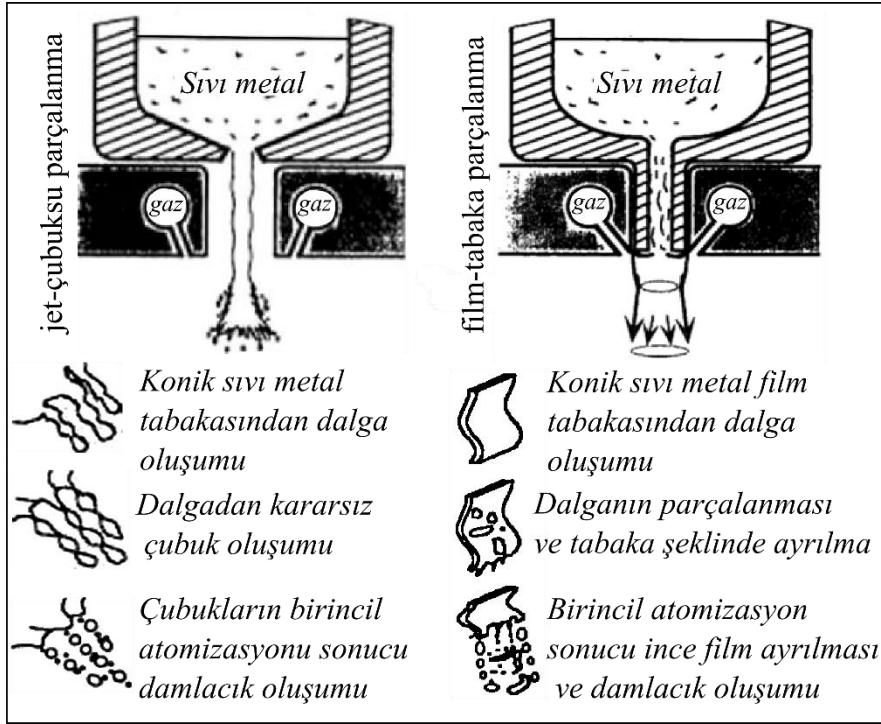
ağırlığı, sıvı metal akış çapı, jetlerin çarpma açısı ve gaz jetinin hızı gibi faktörlerle ilişkilendirmişlerdir [72].



Şekil 2.6. See ve Johnston tarafından önerilen atomizasyon mekanizması, 1. aşama, birincil atomizasyon, 2. aşama, ikincil atomizasyon ve 3. aşama katılaşmadır [72] [62]

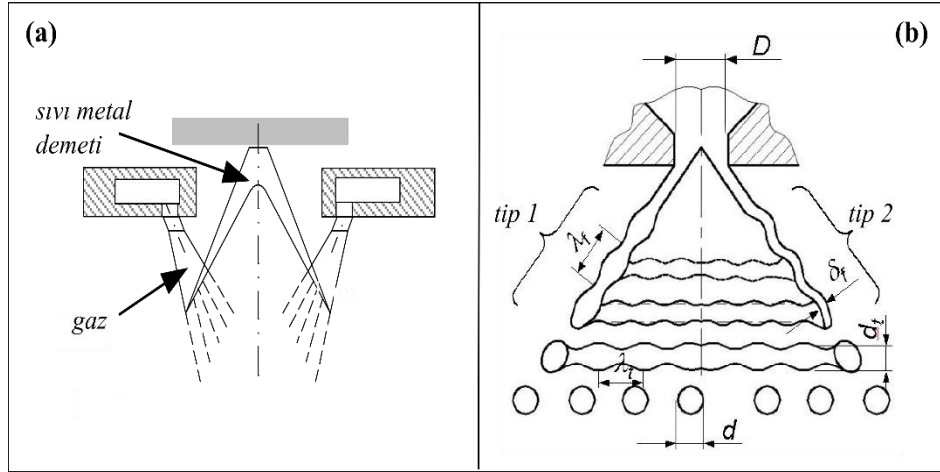
See ve Johnston modeli GA yönteminde kullanılan nozul sistemine (serbest düşmeli ve yakından eşlemeli) bağlı olarak iki şekilde yorumlanmaktadır (Şekil 2.7). Bunlardan birincisi sıvı jet-çubuksu parçalanmadır. Genellikle serbest düşmeli GA sistemlerinde görülen bu parçalanma şekline göre yukarıda bahsedilen içi boş koni şeklinin çevresi, koninin tabanına bağlı çubuksu yapılar şeklindedir. Sıvıdan koni şekli, yüksek gaz hızlarına sahip bölgelerin etkisi altına girmeden önce, sıvının viskoz ve yüzey gerilimi kuvvetleri ile ortamın aerodinamik ve yerçekimi kuvvetleri dengeleninceye kadar yanal olarak yayılır. Dinamik basınçtaki değişiklikler, sıvı yüzeylerindeki bozuklukların büyümesini başlatır ve artırır. Koni inceldikçe, çubuksu yapılar koni çevresinden rastgele bir şekilde yırtılır veya sıyrılır. Sonrasında Rayleigh [71] mekanizmasını takip eder ve damlacıklarına ayrılır. Bu birincil parçalanma aşaması 5×10^{-4} 'den daha küçük bir zaman aralığında gerçekleşir [60] [73]. İkincisi ise sıvı film-tabaka parçalanmasıdır. Genellikle yakından eşlemeli GA sistemlerinde görülen bu parçalanma şekline göre akış borusundan aşağıya akan sıvı metalin, boru çıkışında radyal olarak dışa doğru akış yönü değişir ve etkili olan döngüsel gaz akışından dolayı ince sıvı film şekline dönüşür. Gaz akışının devamı sayesinde bu ince sıvı film, daha sonra borunun taban yüzeyinin kenarlarında konik sıvı tabakaya dönüşür. Basınç kuvvetleri, tabakanın gaz akışı ile hizalanmasına neden olurken, kesme kuvvetleri, tabakanın gaz akış bölgesinden aşağı doğru hızlanmasına neden olur. Metal ergiyiğin yüksek yüzey

gerilmesi nozul yakınlarında oluşan konik tabakadan dolayı nozul eksenini boyunca yol almasını sağlar. Gaz akışı ile tabakanın paralel bir şekilde genişlemesi yüksek düzensizliğe neden olur. Tabaka dışı doğru inceler ve damlacıklara parçalanır [62, 73, 74].



Şekil 2.7. GA işleminde nozul şekline bağlı olarak birincil atomizasyon şekilleri [73]

İlk modelde olduğu gibi See ve Johnston modelinde de geliştirme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalardan birinde içi boş koni şeklindeki yapı Şekil 2.8’da belirtilen şekilde ayrıntılı anlatılmıştır. Şekil 2.8-a atomizasyon şeklini, Şekil 2.8-b ise fiziksel modeli göstermektedir. Çalışmaya göre sıvının ve gazın fiziksel özelliklerine bağlı olarak, iki şema önerilmektedir. Bunlardan birincisi bir sıvı metal filminin dalga boyuna göre kalınlaşmasını (Şekil 2.8, tip 1) ikincisi ise ince olan sıvı metal filminin bükülme eğilimini (Şekil 2.8, tip 2) içermektedir. Sonrasında yana doğru genişleyen koni biçimindeki yapıdan çubuksu şekilde kopmalar ve kopan bu tabakalar üzerinde tepecikler (ing; torus) oluşmaktadır. Çubuksu yapılar kararsız yapısındaki düzensizliklerden (Rayleigh) dolayı damlacıklar şeklinde kopmaktadır [75]. Tip 2’de belirtilen ince film tabakası düşük gaz debisi değerlerinde dar parçacık boyut aralığını elde etmek için kullanılmıştır. Tip 2 ise daha yüksek gaz debilerinin sonucudur [31].



Şekil 2.8. Geliştirilmiş damlacık oluşum mekanizması a) atomizasyon yöntemi b) içi boş koni biçimli atomizasyonun fiziksel modeli [75]

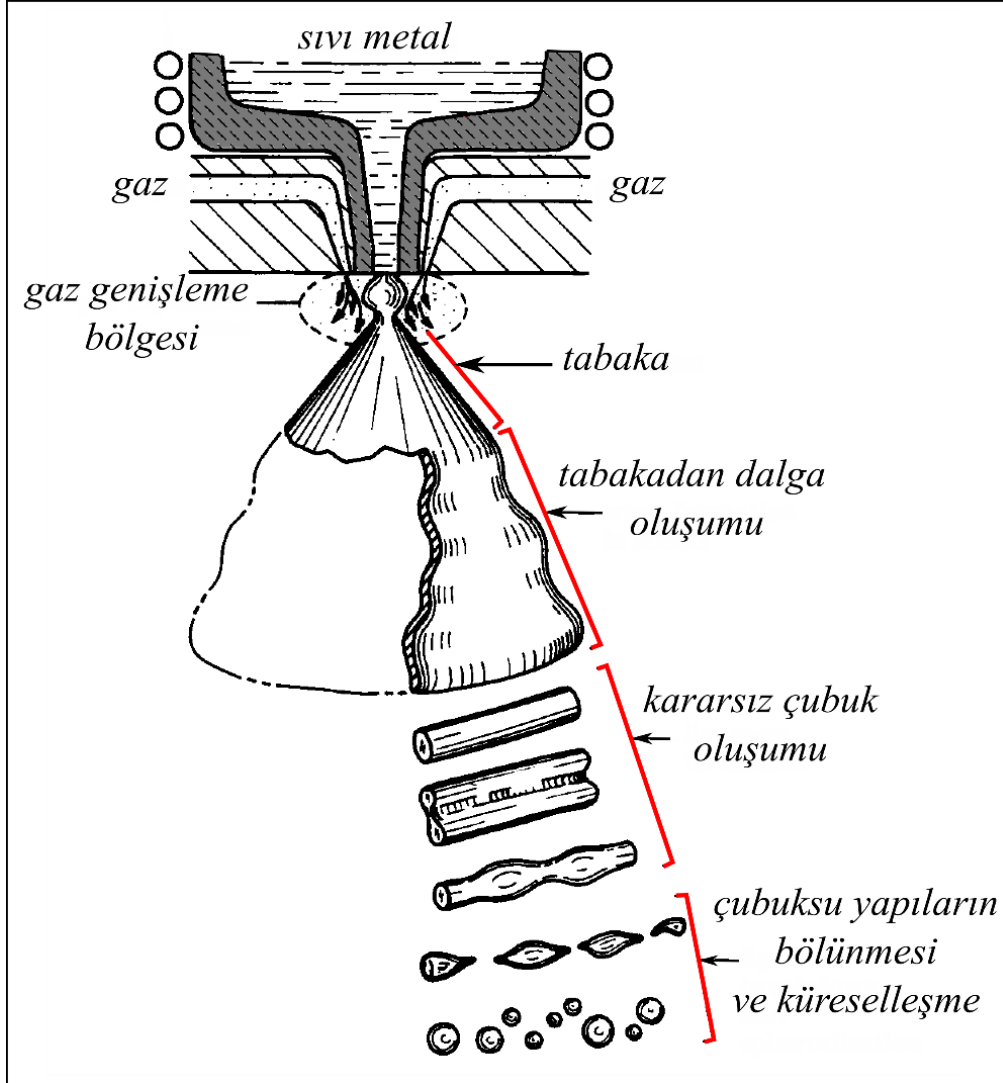
Şekil 2.8-b’de yer alan λ_f tabaka dengesizliğinin dalga boyunu, δ_f film kalınlığını, d_t tepecik çapını, λ_t tepecik dengesizliğinin dalga boyunu, d ise parçacık boyutunu ifade etmektedir. Araştırmacılar bu modele dayanarak damlacık boyutuna yönelik Eş. 2.5’i yazmışlardır. Bu eşitliği deneysel olarak kurşun-kalay alaşım tozunu atomize ederek doğrulamışlardır [75].

$$d = k \cdot \varphi^{0,46} \cdot \frac{v_m^{0,17} \cdot \rho_m^{0,08} \cdot \sigma^{0,38} \cdot d^{0,92}}{R_f^{0,46} \cdot \rho_g^{0,46} \cdot U_g^{0,92}} \quad (2.5)$$

Burada, k nozul geometrisinin katsayısını, φ d çaplı nozul için doldurma katsayısını, v_m sıvı metal kinematik viskozitesini (kg/ms), ρ_m sıvı metalin yoğunluğunu (kg/m³), σ sıvı metalin yüzey gerilimini (N/m), R_f filmin ayrılma noktasındaki yarıçapını, ρ_g gaz jetinin yoğunluğunu (kg/m³) ve U_g ise gaz jetinin hızını (m/s) ifade etmektedir [31, 75].

Geliştirmelere temel olan iki atomizasyon mekanizması (See ve Johnston ile Dombrovski ve Johns) atomizasyon işleminin birkaç aşamada meydana geldiği konusunda hemfikirlerdir. Fakat ikinci model birinci modele göre daha kapsamlı bilgiler vermektedir. Örneğin Dombrovski nozul çıkışındaki sıvı metalin nasıl etkileneceğinden ve ikincil atomizasyon ile nasıl parçalanacağından ziyade, dalgalanma, çubuklarına ayrılma ve kararsız çubuklardan damlacıklarına bölünme aşamaları üzerinde durmuştur. See ve Johnston’un çalışmalarında ise nozul çıkışındaki durum, ikincil atomizasyon ve katılma durumları daha ayrıntılı ele alınmıştır. Bu durum Bradley’in [69, 70] çalışmalarında da görülmektedir. Araştırmacı çalışmasında sıvı metal yayılmasının kökeninde nelerin olduğu konusunda bilgi vermemektedir. Her atomizasyon işleminde bu aşamaların hepsi takip edilemeyebilir. Fakat

sinematografik ve halografik çalışmalar ilk aşamada damlacık oluşumunun metal akış borusunun altında oluşan içi oyuk sıvı metal tabakasından meydana geldiğini ispat etmiştir [43]. İki temel modelin [64,72] üzerinde durduğu kısımlar Şekil 2.9’da birleştirilerek üç boyutlu tasvir edilmiştir. Burada sıvı metalin, gaz genişleme bölgesindeki emme basıncı sebebiyle önce içi boş ince bir konik tabaka şekli, daha sonra da çubuk, elipsoid ve küre şeklini aldığı görülmektedir [62].



Şekil 2.9. İki temel atomizasyon modelinin birleştirilmesi [76]

Atomizasyon sırasında akışkanın dinamik etkilenmesini görüntülemek ve atomizasyon işleminin görselleştirmek amacıyla schlieren tekniği kullanılmaktadır. Bu teknik ile görüntülenen deneyler, nozul ucuna yakın bir bölgede birincil ayrılma aşamasının ardından damlacıkların oluştuğu, sonrasında kaba damlacıkların tekrar parçalandığı ikincil atomizasyon aşamasının varlığını göstermiştir [31].

2.1.2. İkincil atomizasyon

İkincil atomizasyon, birincil atomizasyon sonucu oluşan dağınık haldeki damlacıkların sonrasında girdiği çevre ortamı ile etkileşimi dolayısıyla yeniden parçalanma sürecidir. Sıvı metal eriyiklerinin atomizasyonu prensip olarak normal sıvıların atomizasyonu ile benzerlik göstermektedir. Bununla birlikte, temel sistem/nozul tasarımı ve sıvı/gaz etkileşim performansı gibi normal sıvıların atomizasyonundan elde edilen faydalı bilgiler ve görüşler ikincil atomizasyonun teorik olarak anlaşılması için referans alınmaktadır [73].

İkincil atomizasyon aşamasında baskın olan kuvvetler aerodinamik kuvvetlerdir ve bu kuvvetler damlacığın içsel kohesif kuvvetlerini yenerek onu daha küçük damlacıklarına ayırır [77]. Bu aşama da aerodinamik kuvvetler çok büyükse ve damlacığın iç kuvvetleri tarafından dengelenemez ise dış kuvvetler damlacığı deforme eder ve parçalarlar. Yeni oluşan damlacıkların parçalanması, iç ve dış kuvvetler dengeleninceye kadar devam eder [73]. Bu işlem yüksek hızlı bir gaz akış bölgesinde maruz kalan damlacıkta meydana gelir ve aerodinamik kırılma olarak adlandırılır. Bu aerodinamik kırılma olayının incelenmesi ikincil atomizasyon konusunun teorik ve pratik olarak anlaşılması için önemlidir [78]. Konu, atomizasyon işleminde oluşacak parçacıkların boyutu üzerinde etkili bir parametre olduğundan aerodinamik kuvvetlerin etkisi altında tek bir damlacığın ikincil atomizasyon için geliştirilen çeşitli mekanizmaların bilinmesi gereklidir ve çok sayıda araştırmacı burada gerçekleşen durumların tespitine yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir [60, 72, 77, 79–82].

Aerodinamik parçalanmanın tanımında kullanılan tipik boyutsuz parametreler, Reynold sayısı (Eş. 2.6), Weber (We) sayısı (Eş. 2.7) ve Ohnesorge (Oh) sayısıdır (Eş. 2.8). Literatür araştırmaları Weber sayısı (We) ve Ohnesorge sayısını (Oh) kullanarak ikincil atomizasyonun şeklinin belirlenmesine yönelik temel çalışmanın 1955 yılında Hinze tarafından yapıldığını ortaya çıkarmıştır [81]. Bu parametreler, damlacık deformasyonunun derecesini ve kopuş şeklini belirler [78].

$$Re = \frac{\rho_g U_{rel,0} D_0}{\mu_g} \quad (2.6)$$

$$We = \frac{\rho_g U_{rel,0}^2 D_0}{\sigma} \quad (2.7)$$

$$Oh = \frac{\mu_l}{\sqrt{\rho_l \sigma D_0}} \quad (2.8)$$

Buradaki eşitliklerde yer alan ρ_g gaz yoğunluğunu (kg/m^3) , ρ_l sıvı yoğunluğunu (kg/m^3), $U_{rel,0}$ gaz ile damlacık arasındaki göreceli hızı (m/s), D_0 damlacığın başlangıçtaki çapını (m), σ yüzeyin gerilme katsayısını (N/m) ve μ_l sıvının viskozitesini (kg/ms) ifade etmektedir [82] [80, 83]. Yavaş uygulamalarda göreceli hız ($U_{rel,0}$) değeri yaklaşık 22 m/s 'dir. Bu değer yerçekimi kuvveti altında hızlanan bir düşüş için geçerli olacaktır [37]. Eş. 2.7'de sunulan We aerodinamik kuvvetin yüzey gerilim kuvvetine oranını, Eş. 2.8'de sunulan Oh ise viskoz kuvvetin yüzey gerilim kuvvetine oranını bildirmektedir [84, 85]. Başka bir ifade ile Oh , dış deformasyona yani aerodinamik kuvvetlere karşı damlacığın göstermiş olduğu viskoz direncinin bir ölçüsüdür [86] ve viskoz kuvvetlerin yüzey gerilimi kuvvetlerinin yanında önemli olup olmadığını tayin eder [62]. Bu boyutsuz denklemlere ek olarak Eş. 2.9, Eş. 2.10 ve Eş. 2.11'de belirtilen viskozite oranı (N),yoğunluk oranı (ϵ) ve Mach sayısı denklemleri, diğer etkili parametrelerdir [82] [86].

$$\epsilon = \frac{\rho_l}{\rho_g} \quad (2.9)$$

$$N = \frac{\mu_l}{\mu_g} \quad (2.10)$$

$$M = \frac{U_{rel}}{c} \quad (2.11)$$

Buna göre büyüyen We ile birlikte damlacıkların ikincil parçalanmaları yönünde yüksek bir eğilim gösterirken, büyüyen Oh ile birlikte bu eğilim düşmektedir [79, 85]. Ayrıca Eş. 2.7'ye göre belirli bir sıvı için daha ince parçacıklar üretmenin yolu gaz yoğunluğu ve damlacık hızını artırmaktır [37]. Bununla birlikte damlacıklar eriyik metal çıkışında dengesiz gaz hızı dağılımı nedeniyle ikincil ayrılmadan önce farklı hız değerlerine sahip olacaktır. Bunun sonucunda ise farklı parçalanma eğilimi gösterirler [60]. Yukarıdaki denklemlerden özellikle We , parçalanma şekli ve sonrasında oluşacak parçacıkların boyutu üzerinde etkili olduğundan ikincil atomizasyonu tarif ederken en önemli parametredir [79, 87]. Pilch and Erdman [88] ikincil atomizasyon ile ilgili yaptıkları ayrıntılı çalışmalarında parçacık oluşum durumlarını incelemişler ve diğer birçok araştırmacı tarafından kabul görmüşlerdir [89], [79]. Şekil 2.10'da damlacıkların We sayısına göre ikincil atomizasyon şekillerini ifade eden

şematik gösterimler, Şekil 2.11’de ise bu şematik gösterimlerin yüksek hızlı kamera ile çekilmiş gerçek görüntüleri yer almaktadır.

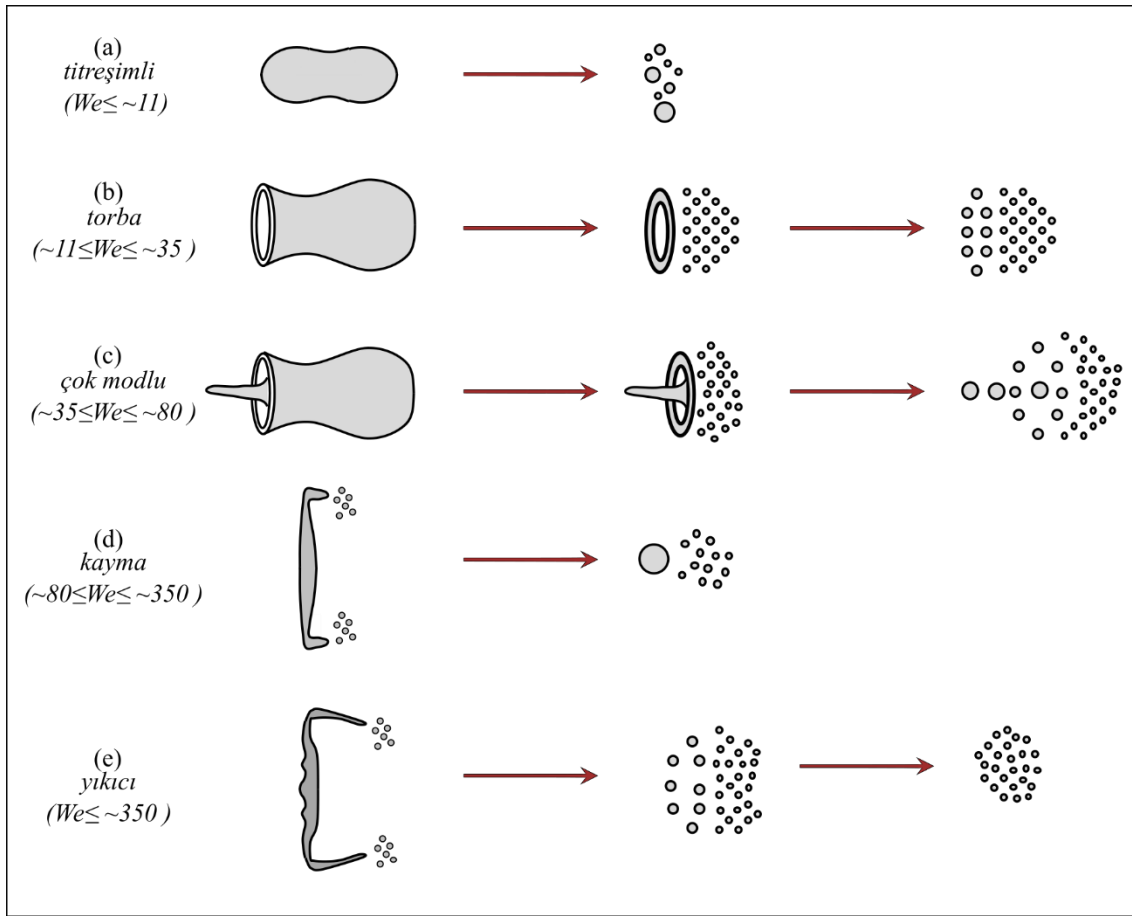
We değeri sıfırdan büyüdükçe oluşan ilk ikincil atomizasyonun oluşma biçimi titreşimli (ing; vibrational breakup) parçalanmadır (Şekil 2.10-a). Aerodinamik kuvvetlerin yetersiz olduğu atomizasyon bölgesindeki damlacık yüzey gerilimi ve akış koşullarına bağlı olarak düşerken doğal frekansta salınım yapabilir. Damlacık dengesizleştğinde birkaç büyük parçaya bölünür ve bu titreşimli parçalanma olarak adlandırılır [79]. Bazı çalışmalar bu parçalanmayı bir çeşit olarak gösterirken [86, 88, 89] bazıları ise damlacığın parçalanması garanti edilemediğinden bir parçalanma biçimi olarak kabul etmemektedir [87, 85, 82, 90]. Pilch ve Erdman [88], bu parçalanma türünün diğer türlerden çok daha yavaş ilerleyeceğini ve küçük damlacık boyutlarına erişilemeyeceğini belirtmişlerdir.

Torba parçalanması(ing; bag breakup) (Şekil 2.10-b), düşük We altında gerçekleşir. Bu tür parçalanma için minimum enerji gereklidir. Atomizasyon işleminde de en az enerji girdisi ile mümkün olan en küçük parçacık boyutlarının oluşturulması hedefi olduğundan torba parçalanması en önemli mekanizmadır. Bu yüzden başlangıcı kritik Weber sayısı (We_c) olarak adlandırılmıştır [77, 91, 87]. Çoğu çalışmada bu değer düşük viskoziteli sıvılar ve $Oh < 0,1$ durumunda $We_c = 11 \pm 2$ olarak bildirilmiştir [37, 88, 79, 92, 93]. Torba parçalanması sırasında damlacık etrafındaki akışın ayrılması pozitif basınç farkına neden olur. Bu durum akışın damlacığın ortasından üfleme eğilimi göstermesine neden olur ve damlacık çok ince torba şeklini, dış kenarı ise torbayı tutan bir halka şeklini alır. Bir süre sonra torba çok sayıda küçük damlacık oluşturacak şekilde, torbayı tutan halka ise birkaç büyük damlacık olacak şekilde parçalanır [77]. Chou ve Faeth yaptıkları çalışmalarında torba parçalanmasındaki damlacık büyüklüklerini bildirmişlerdir. Çalışmaya göre torbayı tutan halka şeklindeki yapı ana damlacık hacminin %60’ını içermektedir. Halkadan oluşan damlacıklar ana damlacık çapının %30’u, torbanın parçalanması sonucu oluşan damlacıkların çapı ise ana damlacık çapının yaklaşık %4’ü kadardır [84].

Çok modlu parçalanma (ing; Multi-mode breakup) (Şekil 2.10-c), torba ve kayma parçalanma We değerleri arasındaki We değerlerinde meydana gelir. Bir çekirdek damlaya eşlik eden bir torba oluşumu, torbanın merkezinde tüy veya ercik (sırasıyla ing; plume ve stamen) şeklinde uzun bir bağ oluşumu ile sonuçlanır [85]. Çok modlu parçalanma birkaç aşamada gerçekleşir ve diğer mekanizmalardan parçalanma bölümlerinin karmasıdır.

Öncelikle torba damlacıklarına ayrılır, sonrasında halka ve en son ercik veya tüy parçalanır. Bu aşamaların hepsinde farklı boyutta damlacıklar oluşurlar [86].

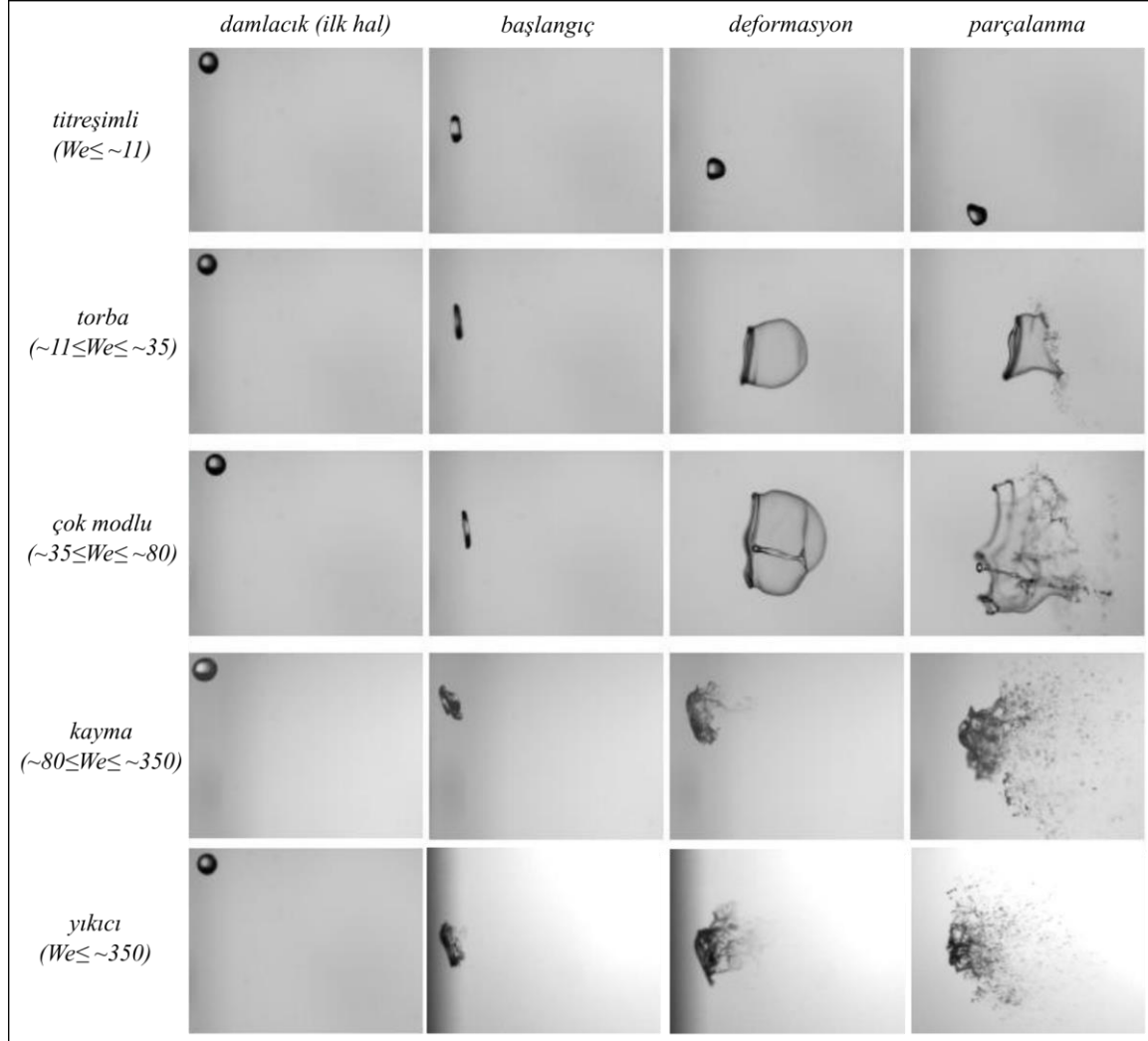
Kayma parçalanması (ing; shear breakup) (Şekil 2.10-d) torba parçalanmasından daha yüksek başlangıç bağıl hızlarında meydana gelir ve belirgin şekilde farklı bir şekilde ilerler. İlk deformasyonun ardından bağlar, damlacıkların çevresinden sıyrılarak damlacığı çok sayıda küçük damlacıklarına ayırır. İşlem, damla tamamen parçalanıncaya veya aerodinamik kuvvetlerin ihmal edilebileceği noktaya kadar devam eder [79].



Şekil 2.10. We sayısına bağlı olarak ikincil atomizasyon şekilleri [86, 88]

Yıkıcı (ing; catastrophic breakup) parçalanma (Şekil 2.10-e), damlacığın neredeyse anında parçalandığı durumdur. Damlacık yüzeyi büyük genliğe ve uzun dalga boylarına sahip dalgalarla girintili çıkıntılıdır. Bu dalgalar damlaların içerisine nüfuz ederek onu aniden çok sayıda küçük damlacığa dönüştürür [86]. Bu tip parçalanma diğerlerinden çok daha kısa bir zaman diliminde gerçekleşir ve yüksek aerodinamik kuvvetlerin ve yüksek başlangıç hızlarının olduğu uygulamalarda görülür. Bu nedenle, bu parçalanma modunun pratik

uygulamaları sınırlıdır [77]. Ayrıca bu parçalanma türü iyi anlaşılmayan ve geleneksel koşullarda elde edilemeyen karmaşık bir işlemdir ve genellikle çok ince ve düzgün tozlar ürettiği düşünülür [60].

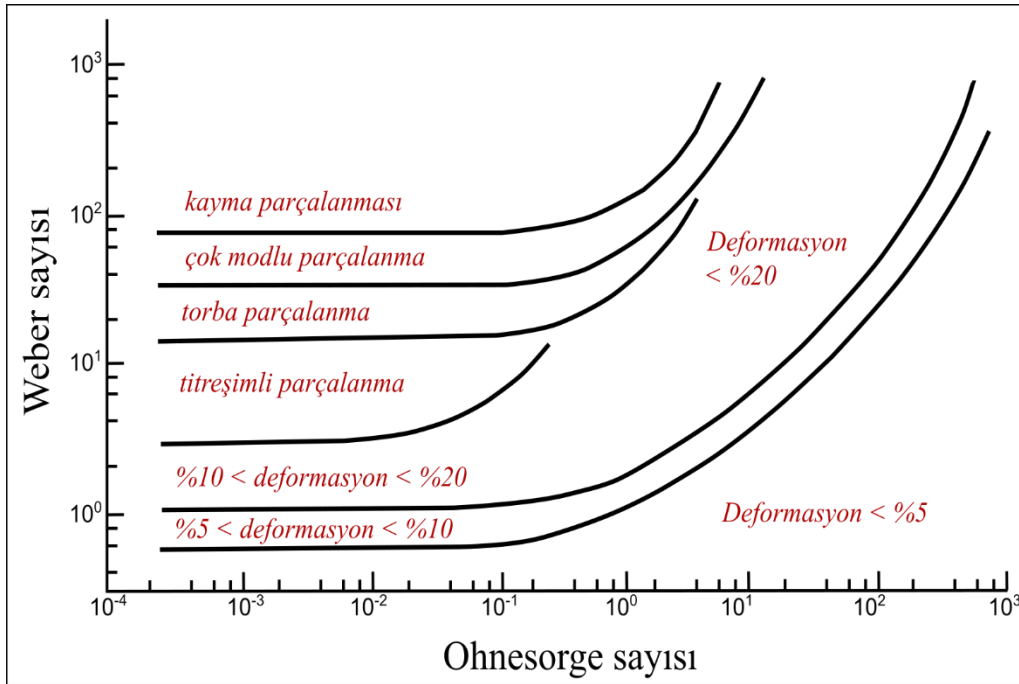


Şekil 2.11. We sayısına bağlı olarak ikincil atomizasyon şekillerinin yüksek hızlı kamera ile çekilmiş gerçek görüntüleri [79]

Yukarıda bahsedilen mekanizmalar We ile ilgilidir. Fakat ikincil atomizasyonun belirlenmesinde bir diğer önemli sayı Oh 'dır ve viskoz kuvvetin yüzey gerilim kuvvetine oranını bildirdiğinden önemlidir. Araştırmacılar daha önemli olduğundan We ile ilgili çalışmalar yapmış bu sayının Oh ile ilişkisini ise çeşitli korelasyonlar ve grafiklerle bildirmişlerdir. Schmehl bildirdiği [91] Eş. 2.12'de yer alan ifade diğer araştırmacılar tarafından kabul görmüş korelasyonlardan birisidir.

$$We = \begin{cases} 12(1+1,077Oh^{1,6}) & \text{Torba Parçalanması} \\ 20(1+1,20h^{1,5}) & \text{Çoklu-Mod Parçalanması} \\ 32(1+1,50h^{1,4}) & \text{Kayma Parçalanması} \end{cases} \quad (2.12)$$

Başka bir çalışma da ise We ve Oh arasındaki ilişki Hsiang ve Faeth tarafından Şekil 2.12'deki grafikte gösterilen şekilde özetlenmiştir. Bu grafik değişik parçalanma durumlarının sınırlarını gösteren bir harita niteliğindedir. Buna göre en dikkat çekici durum $Oh < 0,1$ durumunda gösterilen davranıştır. Oh değeri 0,1'den küçük iken (titreşimli hariç) parçalanma mekanizmasına bir etkisinin olmadığı yüksek değerlerde parçalanmaya karşı artan direnç kuvvetlerinden dolayı devreye girdiği görülmektedir [80]. Örneğin $Oh < 0,1$ ve $We \sim 12$ durumunda ikincil atomizasyon şekli torba parçalanma iken, Oh sayısının artışı aynı We değeri için %20'den az deformasyon parçalanması bölgesine tekabül etmektedir. $Oh > 0,1$ durumunda sınırları kavisli hale getirerek etkili bir parametre haline gelir [61]. Buradan düşük Oh sayıları için ($Oh < 0,1$), parçalanma türlerinin esas olarak We değeri ile kontrol edildiği çıkarımını yapmak mümkündür [82].



Şekil 2.12. We ve Oh sayılarına bağlı olarak damlacık deformasyon ve parçalanma haritası [80]

Bu konu ile ilgili çalışma yapan Schmehl ve arkadaşları $Oh > 0,1$ durumunda farklı parçalanma tiplerinin başlangıcını karakterize edilmesi üzerine çalışmışlar ve We-Oh ilişkisini Eş. 2.13'deki fonksiyonlar ile belirtmişlerdir. Buna göre $Oh > 0,1$ durumunda

viskozite etkilerini de hesaba katarak türettikleri, düzeltilmiş We sayısının ($We_{düz}$) kullanılması gerektiğini bildirmişlerdir [91]. Çünkü viskozitesi yüksek olan sıvılar parçalanmaya karşı daha dirençlidir [37].

$$We_{düz} = \frac{We}{1 + 1,0770h^{1,6}} \quad (2.13)$$

İkincil atomizasyonun detaylı analizi yapılırken ana damlacıktan yeni damlacıklar oluşana geçen süreler üzerine de çalışmalar yapılmıştır. Damlacığın parçalanma süresi iki aşamadan oluşur. Bunlar, ana damlacığın deforme olana kadar geçen süre (t_{def}) ve yeni damlacık oluşana yani parçalanıncaya kadar geçen süre (t_{par})'dir [34, 65, 79, 88–91, 94]. Toplam parçalanma süresi (t_{top}) ise bu iki sürenin toplamı olacaktır. Bu konuda araştırmacılar tarafından farklı ampirik denklemler türetilmiştir. Schmehl ve arkadaşları [91] bu süreler arasındaki ilişkiyi karakteristik parçalanma süresi (t^*) olarak tanımlayarak Eş. 2.14'de yer alan ifadeyi yazmışlardır.

$$t^* = \frac{d_d}{U_{rel}} \sqrt{\frac{\rho_d}{\rho_g}} \quad (2.14)$$

Şekil 2.11 incelendiğinde tüm parçalanma türlerinde damlacığın deforme olmaya başlangıç anı disk şeklindedir. Damlacığın disk şeklinde deforme olma zamanı daha önce yapılmış olan bir çalışmada [80] Eş. 2.15'deki gibi tahmin edilmiştir.

$$t_{def} = 1,6 t^* \quad (2.15)$$

Damlacık disk şeklinde deforme olduktan sonra değişik tiplerde parçalanacaktır. Parçalanma zamanı We sayısının farklı aralıkları için Pilch ve Erdman [88] tarafından Eş. 2.16'daki gibi türetilmiştir.

$$t_{top} = \begin{cases} 6(We - 12)^{-0,25}, & 12 \leq We < 18 \\ 2,45(We - 12)^{0,25}, & 18 \leq We < 45 \\ 14,1(We - 12)^{-0,25}, & 45 \leq We < 351 \\ 0,766(We - 12)^{0,25}, & 351 \leq We < 2670 \\ 5,5, & We \geq 2670 \end{cases} \quad (2.16)$$

Eş. 2.16 parçalanma süreleri üzerinde etkili olan aerodinamik kuvvetlerin, her parçalanma tipi için farklı olduğunu ve ikincil atomizasyon olayının sayısız parçalanma şeklini

desteklediğini bildirmektedir. Burada verilen We sayıları ile Şekil 2.10'da gösterilen durumlar ve We sayıları örtüşmektedir.

İkincil atomizasyon üzerine yapılan literatür çalışması damlacığın aerodinamik kuvvetler etkisi altında parçalanma şekillerinin açıklanması konusunda oldukça faydalı bilgiler vermektedir. Fakat yukarıda bahsedilen mekanizmalar ve hesaplamalar normal sıvılar (su, cıva vs.) ile yapılmış deneylere dayanmaktadır. Burada belirtilen eşitlikler ve parçalanma türleri sıvı metaller için de geçerlidir ve doğrudan kullanılabilir [73]. Neredeyse tüm araştırmacılar ikincil atomizasyon işleminin We sayısının bir fonksiyonu olduğu konusunda hemfikirlerdir ve hemen hemen aynı We sayılarını aynı parçalanma mekanizması (Şekil 2.10 ve 2.11) aralığında sunmuşlardır. Fakat yukarıda belirtilen ilişkilerin ve eşitliklerin çoğu ampiriktir. İlgili deney ile elde edilen aralıklar dışında önerilmemektedir. Bu yüzden ikincil atomizasyon işleminin tam olarak açıklanması için daha fazla deneysel ve sayısal veriye ihtiyaç bulunmaktadır. Ayrıca araştırılan literatüre göre küçük damlacık boyutları yüksek We sayılarının sonucudur. Buna göre We sayısını dikkate alarak sıvı metal atomizasyonu ile küçük parçacık boyutunda tozlar elde edebilmek için birincil atomizasyon sonucunda oluşan damlacığın yüksek We sayılarında elde edilmesi gereklidir. Çünkü ikincil atomizasyon sonucu oluşan damlacığın çapları We sayısı arttıkça belirgin şekilde azalır.

2.1.3. Katılaşma

Atomizasyon işleminin son aşaması ikincil atomizasyon sonucunda oluşan damlacıkların katılaşarak toz toplama kabında biriktirilmesidir. Bu aşama toz parçacık şekillerinin ve mikroyapılarının büyük oranda belirlendiği aşama olduğundan önemlidir [44, 45]. Küresel tozları üretebilmek için sıvı damlacıkların küreselleşme sürelerinin katılaşma sürelerinden daha küçük olması istenilir [95]. Katılaşma zamanı, küreselleşme zamanı ve soğuma hızlarının tespitine yönelik sayısal ve deneysel çalışmalar geliştirilmiştir. Örneğin atomizasyon işleminde D çapında küresel olarak kabul edilen bir parçacığın katılaşma süresi (t_{kat}) Eş. 2.17'deki gibi damlacığı erime sıcaklığına soğutmak ve katılaşmaya karşı kuvvetleri ortadan kaldırmak için ısı dengesine bağlı olarak hesaplanır [66].

$$t_{kat} = \frac{D\rho_m}{6\beta} \left[C_p \ln \left(\frac{T_m - T_0}{T_s - T_0} \right) + \frac{\Delta H_s}{T_s - T_0} \right] \quad (2.17)$$

Burada, D parçacık çapını (m), ρ_m sıvı metalin yoğunluğunu (kg/m^3), β taşınım ısı transfer katsayısını ($\text{W}/(\text{m}^2.\text{K})$), C_p sıvı metalin sabit basınçta ısı kapasitesi ($\text{J}/(\text{kg.K})$), T_m erime sıcaklığını (K), T_s katılaşma sıcaklığını (K), T_0 gazın ortam sıcaklığını (K) ve ΔH_s ise erime ısısını (J/kg) ifade etmektedir. Eş 1.17'deki taşınım ısı transfer katsayısı (β) ise Eş. 2.18'deki gibi hesaplanır.

$$\beta = \frac{k_g}{d_m} (2 + 0,6Re^{0,5}Pr^{0,33}) \quad (2.18)$$

Burada, k_g gazın ısıl iletkenliğini ($\text{W}/(\text{mK})$), Re taneciğin Reynold sayısını, Pr gazın Prandtl sayısını ifade etmektedir. Buna göre taşınım ısı transfer katsayısı gazın ısıl iletkenliği ve sistemin Reynold sayısının artması ile artmaktadır. Eş 2.17'de verilen model katılaşma zamanının belirlenmesinde sadece taşıma ile ısı transferinin (soğutma) önemli olduğunu varsayar [43].

Katılaşma aşamasında damlacığın tam olarak küreselliğini tamamlamış olması istenilir. Bir sıvı metal demetinin atomizasyonu sırasında, damlacıkların yüzey enerjisi, bir küre oluşturarak yüzey alanını en aza indirir. Damlacığı küresel hale getirilmesi için ne kadar zaman gerektiğinin hesaplanması, eriyiğin ilk önce çubuksu yapılara ayrıldığını ve daha sonra büzülerek küresel damlacıklar oluşturmak üzere ayrıştığını varsaymaktadır [66]. Atomizasyonda, parçacık şekli küreselleşme zamanının belirlenmesi ile kontrol edilebilir ve bu küreselleşme zamanı ($t_{\text{küre}}$) Eş. 2.19'da belirtilen eşitlik ile tahmin edilebilir [25].

$$t_s = \frac{12\pi^2\eta}{\gamma V} (D^4 - d^4) \quad (2.19)$$

Bu eşitlik için η sıvı metalin viskozitesini (Pa.s), D küreselleştikten sonraki damlacık çapını (m), d küre oluşturacak olan çubuk çapını (m), V taneciğin hacmini (m^3), γ sıvı metalin yüzey enerjisini (J/m^2) ifade etmektedir. Kısa küreselleşme zamanı, düşük sıvı metal viskozitesi ve yüksek nozul çıkış hızı ile sağlanır. Yüksek yüzey enerjisi ve küçük parçacık boyutu katılaşma öncesi küresel parçacık oluşumuna katkı sağlar [25].

2.2. Plazma Atomizasyon

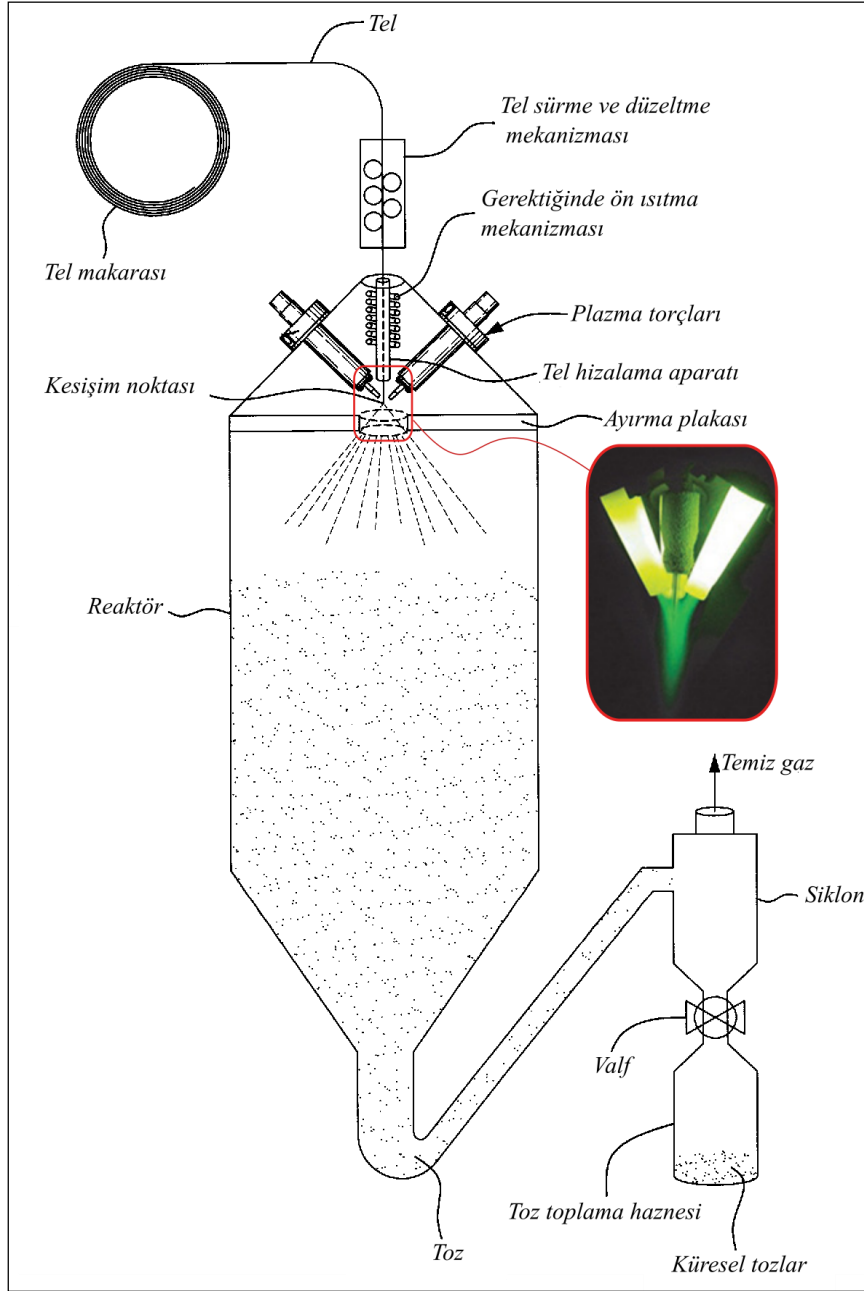
Geleneksel potalı toz üretim tekniklerinden olan gaz, sıvı ve döner disk atomizasyonu gibi yöntemler yüksek ergime sıcaklığına sahip reaktif malzemelerden kaliteli tozları üretmek

oldukça zordur [96]. Örneğin, potada ergitilmiş haldeki titanyum hem potanın iç kısmı hemde nozul ile reaksiyona girer böylece elde edilen tozlar istenilen kalitede değildir. Geleneksel olarak kullanılan potalar refrakter seramik malzemeler ile kaplanır ve bu malzemeler saf titanyum üretmesine engel olacak şekilde reaktiftir [97, 98]. Geliştirilen yeni yöntemlerde, üretilen tozların kirliliğinden sorumlu olan potalı ergitme işlemi tercih edilmemektedir [96].

Eklemeli imalat (Eİ) yöntemi ile üretilen parçaların başarılı bir şekilde üretilmesi hammadde olarak kullanılan tozların kalitesine bağlıdır [96]. İnce ve orta incelikte toz karakteristikleri daha yüksek enerji emilimi ve daha yüksek sinterleme hızına yol açan geniş bir yüzey alanı sağlar. Eklemeli imalat yöntemi için toz üretim metotları arasında, yüksek küresellik, Gauss tipi toz boyut dağılımına sahip, düşük oksijen içeriği, iyi akışkanlık ve paketlenme özelliğine sahip toz üretebilen gaz veya plazma atomizasyonu tercih edilir [96, 99, 100, 101, 102]. 0-106 µm toz boyut aralığı esas alındığında bazı yöntemler bu boyut aralığında % 20-40'ını üretebilirken bazı yöntemler ise % 60-70'in üzerine çıkamamaktadır. Böylece bilinen teknolojiler bu boyut aralığında metal tozu üretiminde sınırlı kalmaktadır veya oldukça fazla enerji gerektirmektedir. Örneğin EIGA işlemi açısından değerlendirme yapılırsa üretilen tozların %70'i 0-106 µm boyut aralığına sahip olması istendiğinde çok büyük miktarda atomize edici gaz gerektirmektedir. Bu durum ise üretim maliyetlerini artırmaktadır [26]. Bu nedenle mevcut teknolojilerin dezavantajlarını en azından kısmen giderecek bir sistem veya yöntem ihtiyacı doğmuştur. Diğer taraftan metal enjeksiyon kalıplama (MIM), sıcak izostatik presleme (HIP) ve eklemeli imalat (AM) gibi toz hammaddeli üretim yöntemlerinin daha yüksek standartlar hedeflemesi yeni toz üretim tekniklerinin geliştirilmesini gerektirmektedir [103].

Plazma atomizasyon (PA), bir reaktif metal tel veya çubuk formuna sahip malzemenin en az bir plazma üreten tabanca ile hizalanmış bir şekilde temas ettirilmesi ve malzemenin atomize edilmesi şeklinde sonuçlanan bir işlemdir [35, 26, 104, 30]. Bu yöntemde özellikle diğer atomizasyon yöntemleri ile ergime sıcaklıklarının yüksekliği, yüksek enerji sarfiyatına karşılık düşük verim veya çeşitli reaksiyonlar gereği üretilmesi elverişli olmayan titanyum, titanyum alaşımları, zirkonyum, zirkonyum alaşımları, magnezyum, magnezyum alaşımları, niyobyum, niyobyum alaşımları, alüminyum, alüminyum alaşımları, molibden, molibden alaşımları tungsten, tungsten alaşımları gibi reaktif metal malzemeler hammadde olarak kullanılmaktadır. PA işleminde genellikle 3 adet tabanca kullanılmaktadır [26]. Bu

tabancalar endüstride plazma püskürtme kaplama alanında da kullanılan transfer edilmeyen ark (ing; Non-transferred arc) yöntemi ile çalışan tabancalardır [30]. Atomizasyon bölgesine gönderilen malzeme uygun şekilde konumlandırılmış bu 3 adet tabanca tarafından üretilen plazma jeti bölgesine girer [105]. Burada bahsedilen uygun şekil 3 tabancanın açılı bir şekilde konumlandığı durumdur ve bir kesişim noktasında (ing; Apex) birleşir. Bu durum Şekil 2.13'te görselleştirilmiştir. Bu kesişim noktasının, plazma tabancasından üretilen plazma jetinin atomize edici kesme kuvvetlerinin en yüksek olduğu tepe noktasına karşılık geldiği gözlenmiştir. Kesişim noktası ile plazma tabanca çıkışı arasında mesafe 15 ila 50 mm arasındadır. Bu mesafe tabanca gücüne [26] ve plazma tabancalarının fiziksel büyüklüklerine [96] göre değişiklik göstermektedir. Ayrıca tabanca yerleşimi dikey eksen etrafında 120 derece eksene göre ise 10 ila 60 derece arasında konumlandırılabilir [26, 98, 27]. Plazma tabancalardan elde edilen plazma jeti sahip olduğu yüksek sıcaklıklar dolayısıyla metal teli ergitir ve ulaştığı ses hızının 3 ila 4 katı hızlar sayesinde ise ergimiş metali oldukça küçük damlacıklarına ayırarak atomize eder [96, 106, 59, 46, 104]. Üç plazma tabancasının birleşimi sonucu uzayan sıcak bölge mükemmel küreler oluşabilmesi için atomize olan malzemenin yeterince uzun süre erimiş halde kalmasını sağlar [59, 46]. Atomize olan damlacıklar genellikle paslanmaz çelik malzemeden yapılan ve boyu 2-10 m arasında değişen kule içerisinde argon atmosferi altında katılarak toz toplama kabında birikir [107, 62]. Oluşan tozlar sadece küçük ortalama boyuta sahip değil aynı zamanda küresel ve tekdüzedir. Bu özelliğinden dolayı yüksek akışkanlık ve iyi paketlenme özelliği gösterirler [106]. Hammaddede olarak eriyik metal kullanmıyor olması en önemli avantajıdır. Ergiyik metalin pota ile temasının sebep olduğu kirliliğin önüne geçilmiş olur, potanın soğutulması gibi maliyetleri de ortadan kaldırır [103]. Bunlara ek olarak atomizasyon işleminin argon atmosferi içerisinde yapılıyor olması, besleme malzemesi olan telin saflığını koruyarak atomize edilmesini sağlar [42]. Bu özelliklerinden dolayı eklemeli imalat işlemlerinde plazma atomize tozların gaz atomize tozlar yerine kullanılması tavsiye edilir [108].

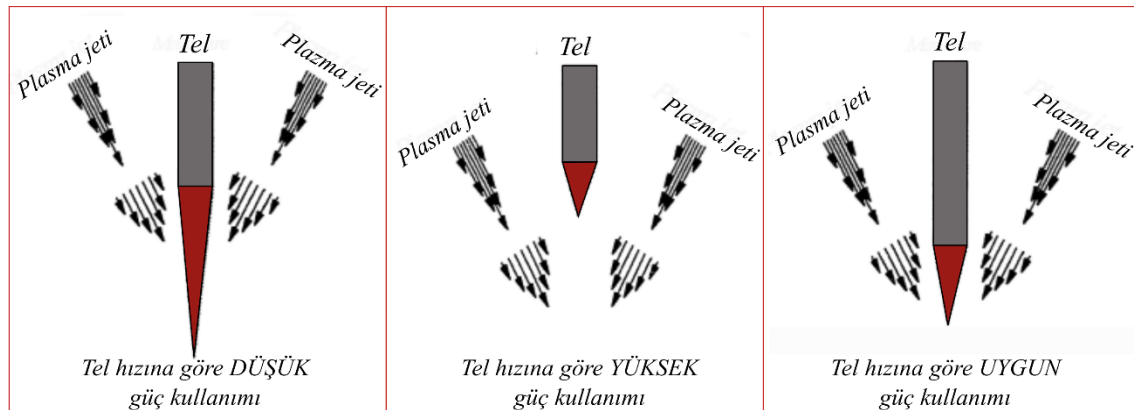


Şekil 2.13. PA yönteminin şematik görünümü [109] ve kesişim noktasının gerçek görüntüsü [56]

PA yönteminin kurulum ve gelişim süreci 1990'ların sonlarında Kanada'nın Québec şehrinde bulunan Hydro-Quebec Araştırma Laboratuvarlarında bir konsept tasarım projesi olarak başlamıştır. Daha sonra PyroGenesis firması tarafından sınırlı bir şekilde ticarileştirilmiştir ve Raymor Industries şirketi ile birlikte iş girişimi haline dönüştürülmüştür [110]. Yöntem başlangıçtaki deney düzeneğinden günümüze, sürekli olarak yüksek saflıkta küresel metal tozu veren büyük kapasiteli üretim ünitelerine dönüşmüşlerdir. Sistem, ürün boyut dengesi ve rekabetçi fiyatlandırmayı sağlamak için

gerekli olan tüm modern kontrollere ve gaz geri dönüşüm cihazlarına sahiptir [103]. Günümüz itibarıyla ise Eİ sektörüne makinalar üreten Arcam, Consept Laser ve toz üreten AP&C firmaları GE Additive adı altında yönetilmektedir.

PA yöntemi ile toz üretimi yapılan ilk deneysel çalışma, en etkili iki deney şartının tel besleme hızı ve tabanca gücü olduğunu ortaya çıkarmıştır. Bu iki etken telin nerede ergiyip nerede atomize olacağını belirleyen hususlardandır ve Şekil 2.14'te görüldüğü gibi sembolize edilmiştir. Daha yüksek tabanca gücünün ve / veya daha yavaş bir tel besleme hızının, telin plazma jetleri kesişim noktasına ulaşmadan erimesine neden olduğu belirtilmiştir. Bu durumda ergimiş metal damlacıkları nozulun ucunda oluşacak ve atomizasyon verimliliğini azaltacaktır. Buna karşılık, yüksek besleme hızı ve düşük tabanca gücü, telin tam olarak ergitilememesi sonucunda küresellik kazanamamış tozların üretilmesi ile sonuçlanacaktır. Deneyin tatmin edici atomizasyon sonuçlarına göre Al malzemesi için ağırlık-güç oranı 19 ila 32 gr / kW-saat arasında tespit edilmiştir [98].



Şekil 2.14. PA işleminde tel hızı ve tabanca gücü arasındaki ilişki [55]

PA yöntemi ile toz üretebilmek için çeşitli yöntemler ve ekipmanlar geliştirilmiştir. Fakat geliştirilen sistemlerle birlikte çözülmesi gereken çok sayıda problem de ortaya çıkmıştır [26, 111]. Önerilen yöntemler ve ekipmanların bazıları yeterince küçük toz boyutu dağılımına sahip küresel tozlar elde edememektedir. Bazı çözümler yüksek üretim maliyetlerine karşın düşük verim ve üretim oranlarını içermektedir. Düşük verimler ise çok fazla atık malzeme anlamına gelmektedir [26]. Örneğin, PA işlemleri oldukça hassastır ve en az üç plazma tabancasını kesişim noktasına hizalamak oldukça zahmetlidir. Diğer yandan bu tabancalar fiziksel büyüklüklerinden dolayı tabanca çıkışı ile kesişim noktası arasında birkaç santimetre mesafe olacak şekilde bağlanmaktadır. Bu mesafe ise plazma

jetinin kesişim noktasına ve dolayısıyla malzemeye çarpmadan önce termal ve kinetik enerjisini kaybetmesine sebep olur [96]. Jet hızı parametresi malzemeyi atomize etmek, toz şekli ve boyutunu etkileyen başlıca parametrelerden bir tanesi olduğundan bu durum bir problem olarak görülmektedir. Çözüm olarak geliştirilen Laval nozul sayesinde plazma jeti çıkış hızı artırılmıştır. Bu nozul tabanca çıkışına monte edilmektedir ve daralan-genişleyen geometri formunda süpersonik nozuldur [98, 103]. Başarılı bir çözüm örneği ise ön ısıtma yapmaktır. Enerji ile gaz sarfiyatını azaltmak ve verimi artırmak için tel malzeme tabancaların kesişim noktasına dirençli ısıtma, ark boşalması veya indüksiyonla ön ısıtma yapılarak ortama sokulabilmektedir. Ön ısıtma sayesinde bu verim artışı, plazma tabancası enerji maliyetlerine kıyasla üretim maliyetlerinde önemli bir artış olmadan elde edilmektedir. Ön ısıtma sıcaklığı malzemenin erime noktasına yakın yaklaşık % 75'i ile % 95'i tercih edilmektedir [26]. Bu sayede tel malzeme atomize edilmeden önce kirlilik en aza indirgenmiş olur. Ayrıca deneysel çalışma ile tel hızları karşılaştırılmış ön ısıtmasız 8 mm/sn iken ön ısıtmalı 30mm/sn olarak tespit edilmiştir [111]. Bunlarla birlikte düşük ortalama toz boyutuna sahip ince tozları yüksek verimle üretebilmek için atomizasyon bölgesine enjekte edilecek düşük miktarda ve yüksek sıcaklıkta gaz akışına ihtiyaç vardır. Enjekte edilen gaz miktarının azaltılması üretim maliyetlerini de önemli ölçüde azaltacaktır. En az bir plazma tabancasından atomizasyon bölgesine transfer edilen malzemeyi (tel, çubuk) ergitip atomize edebilmek için yeterli ısıtma enerjisi ve momentuma ihtiyaç vardır. Saatte 10kg titanyum kütle besleme oranı için 3 adet plazma tabancasından tabanca başına 100 SLM'den daha fazla tercihen ise 150 SLM plazma gaz akışına gereksinim vardır. Tabanca başına 25 KW veya tercihen 30 KW ve daha fazla elektrik gücü kullanılmıştır. Atomizasyon sırasında enjekte edilen gaz miktarının düşürülmesinden elde edilen maliyet tasarrufunun (verim artışı), en az bir plazma tabanca ile daha yüksek elektriksel güç tüketiminden kaynaklanan maliyet artışlarından önemli ölçüde daha fazla olduğu gözlenmiştir [26].

PA yöntemi ile üretilen tozların sahip olduğu yüksek akıcılık, iyi paketlenme özelliği ve küresel yapı birçok üretim yöntemi için oldukça avantajlıdır. Bu özellikler sayesinde tozlar sinterlendiğinde (lazer veya elektron ışını ile) nihai parça yoğunluğu yüksektir. Eklemeli imalat yöntemi ile nihai parça üretiminde gözeneksiz/hatasız parça üretim gereksinimi bu küresel tozlar sayesinde mümkündür [106]. Aksi durumda yani küresel olmayan tozlar kullanıldığında zayıf paketlenme yoğunluğundan dolayı, nihai parça boyunca boşluklara neden olurlar, bu da eklemeli imalat veya geleneksel toz metalürjisi uygulamalarında tam yoğunluğun elde edilmesini önler [97].

2.3. Plazma Atomizasyon Tozlarının Karakterizasyonu

Toz metalürjisi teknolojileri parçacıkların bir araya gelmesiyle oluşan tozlarla başlar. Yoğunlaştırma işleminde önemli bir girdi olması nedeniyle tozun iyi anlaşılması gereklidir. Teknik detaylar oluşturulurken işlem kontrolünün sürdürülmesinde toz özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerin ürün performansını nasıl etkilediğinin bilinmesi önemlidir [25].

2.3.1. Toz parçacık boyutu, dağılımı ve şekli

Parçacık boyutu toz metalürjisinin en önemli özelliklerinden birisidir ve ölçümü, bir parçacığın boyutlarının belirlenmesidir [25]. Toz boyutu, ortalama boyut ve toz boyutu dağılımı ile karakterize edilir [62]. Bir tozun boyutunu ifade etmek için çeşitli ortalama çap ölçüleri kullanılır. Bunlardan en yaygın olanı, boyut dağılımı grafiğindeki kümülatif yüzde eğrisinin % 50 değerine karşılık gelen kütle ortanca çapıdır (d_m veya d_{50}). Ortalama boyut, bir tozu tanımlamak için her zaman yeterli olmayabilir ve logaritmik normal dağılımın standart sapmasına ihtiyaç duyulur. Standart sapmayı veren ifade şu şekilde tanımlanmıştır [112]:

$$\sigma_g = \left(\frac{d_{84,1}}{d_{15,9}} \right)^{1/2} = \left(\frac{d_{84,1}}{d_{50}} \right) = \left(\frac{d_{50}}{d_{15,9}} \right) \quad (2.24)$$

Burada; $d_{84,1}$ tozların ağırlıkça % 84,1'inin kendisinden küçük olduğu toz çapı, $d_{15,9}$ ise % 15,9'unun kendisinden küçük olduğu toz çapıdır.

Parçacık boyut verileri toplandıktan sonra analiz edilir. Parçacık boyut dağılımı, her bir boyut artışındaki parçacıkların sayısı veya miktarını gösteren bir histogram veya frekans çizimi yapılır. Düzgün bir birikimli parçacık dağılımında, ortalama boyut %50 değerine karşılık gelir. Histogram verileri için yaklaşık aritmetik ortalama boyut D_a ve geometrik ortalama boyut D_g aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D_a = \frac{1}{N} \sum_i^N y_i D_i \quad (2.25)$$

$$\log(D_g) = \frac{1}{N} \sum_i^N y_i \log(D_i) \quad (2.26)$$

Burada D_i her bir aralık için orta nokta boyutu, y_i her bir boyut aralığında oluşun frekansı ve N oluşların toplam sayısıdır. Çoğu işlemler, ortalama boyutu D_{50} olarak rapor ederler [25]. PA yöntemi ile ilgili yapılan önceki çalışmalar D_{50} ve diğer toz özelliklerini incelemişlerdir.

PA yöntemi ile ilgili yayınlanan ilk deneysel çalışma olarak değerlendirilebilecek bir çalışmada atomizasyon sürecinin Al, Cu, Ni, Ti ve alaşımları içinde uygulanabilir ve bu açıdan ise çok yönlü bir üretim tekniği olduğu değerlendirilmiştir. Bu malzemelerin tümü için plazma gazı olarak 100 lt/dk'lık bir debide argon gazı ve toplam 83 kW (tabanca başına 110 V ve 250 A) tabanca gücü kullanılarak yapılan atomizasyon deneylerine ait diğer parametreler ve sonuçlar Çizelge 2.1'de gösterilmektedir [98] .

Çizelge 2.1. Al, Cu, Ni ve Ti tel malzemelerinin atomizasyon sonuçları [98]

Malzeme	Yoğunluk (gr/cm ³)	Ergime noktası (°C)	Tel çapı (cm)	Tel besleme hızı (gr/dk)	Ortalama Toz Boyutu (µm)
Al	2,70	660	0,238	30,5	136
Cu	8,92	1083	0,238	90,7	94
Ni	8,9	1453	0,159	29,2	290
Ti	4,5	1660	0,159	14,7	189

Bu çalışma ve elde edilen sonuçları plazma atomizasyon ile ilgili ilk deneysel çalışmaların yapıldığı yıllara dayanmaktadır. Sonrasında günümüze dek geliştirilmiş ve özellikle ortalama toz boyut değerleri oldukça iyileştirilmiştir. Örneğin, daha güncel bir plazma atomizasyon işlemine ait deneylerde hammadde olarak 3,125 mm çaplı bir Ti-6Al-4V (grade 23) tel kullanılmıştır. Hammadde olan tel dikey eksenle 30° açıyla yerleştirilmiş 3 plazma tabanca sayesinde atomize edilmiştir. Her bir plazma tabancası 150 SLM argon gazı ve 30 KW'lık bir güç ile çalıştırılmıştır. Tabanca çıkışı ile tel arasındaki mesafe 2,5cm'den daha az bir konumdadır. Metal damlacığının taşınımının düzgün bir şekilde olmasını sağlamak amacıyla 550 SLM hacimsel akış debisine sahip koruyucu gaz (ing; Sheath gas) kullanılmıştır [26].

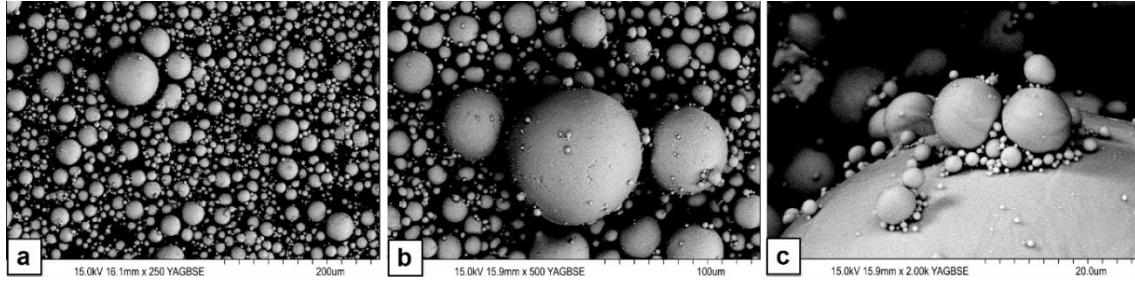
Atomizasyon işleminde metal tel, plazma tabancaların karşısına gelmeden önce ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. Bu işlem için 45 V'luk bir elektrik potansiyelinde 150 A'den 180 A'e değişen bir DC elektrik akımı kullanılmıştır. Bu değerlere karşılık gelen tel hızları ise 8 kg/saat ile 13 kg/saat arasında değişmiştir. Metal tel gaz soğutmalı ve hızı ayarlanabilir bir kılavuz sayesinde plazma jetlerinin kesişim noktasına (ing. Apex) beslenmektedir [26].

Çizelge 2.2'de görüldüğü gibi iki parti olarak gerçekleştirilen üretimin parti büyüklüğü 100 kg'dır. İlk parti üretimde plazma jeti kesişim noktası ile metal tel arasındaki mesafe yaklaşık 2,5 cm ve gaz/metal oranı 8,7'dir. İkinci parti de ise bu oran 12,9 mesafe ise yaklaşık 1,9 mm olarak gerçekleşmiştir [26]. Çizelge 2.2'de de görüldüğü üzere ikinci parti üretimde tozların %90'ının 0-106 μm aralığında %60'ının ise 0-45 μm aralığında olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca tel ile plazma jetleri kesişim noktası arasındaki mesafenin önemli bir faktör olduğu jet hızının mesafe arttıkça hızlı bir düşüş gösterdiği gözlemlenmiştir [26]. Kullanım alanlarına göre toz boyut aralıkları MIM için 0-45 μm , CSC 10-45 μm , SLM 20-45 μm , DED 45-150 μm , EBM 45-106 μm ve HIP için 0-150 μm olarak belirtilmiştir [39] [104, 30]. PA yöntemi bu yöntemlerden özellikle SLM ve EBM için uygun boyutta ve yüksek küresellikte tozlar ürettiği görülmektedir.

Çizelge 2.2. Toz üretiminin boyut analizi [26]

Elek Boyutu (μm)	1. Parti (% ağı.)	2. Parti (% ağı.)
> 180 μm	9,1	3,8
$\leq 180 > 125 \mu\text{m}$	3,8	1,6
$\leq 125 > 106 \mu\text{m}$	3,0	1,1
$\leq 106 > 75 \mu\text{m}$	13,7	6,6
$\leq 75 > 53 \mu\text{m}$	18,8	14,0
$\leq 53 > 45 \mu\text{m}$	11,7	13,3
$\leq 45 > 25 \mu\text{m}$	23,1	31,7
$\leq 25 \mu\text{m}$	16,8	27,9
0-106 μm	84,1	93,5
0-180 μm	90,9	96,2
45-106 μm	44,2	33,9
0-45 μm	39,9	59,6

Üretilen toz çok saf ve küreseldir. Bu özelliği ile eklemeli imalat yöntemi ve toz enjeksiyon kalıplama işlemlerinde kullanılmaya elverişlidir. Plazma atomizasyon yöntemi ile üretilmiş tozların elenmemiş hallerine ait taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri Şekil 2.15'te gösterilmiştir. Şekil 2.15-a 250 kat Şekil 2.15-b 500 kat Şekil 2.15-c ise 2 000 kat büyütme ile elde edilmiş görüntülerdir. Görüntüde yer alan tozların % 80'i 0-106 μm aralığına sahiptir [26].



Şekil 2.15. PA yöntemi ile üretilmiş Ti-6Al-4V tozlarının SEM görüntüleri [26] a) 250, b) 500, c) 2000 kat büyütme

Toz parçacık boyutunun Eİ işlemi üzerine önemli etkileri bulunmaktadır. Örneğin dengeli parçacık büyüklüğü dağılımı, paketleme yoğunluğu üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir [113, 114] ve tozun sıkıştırılabilirliğini [115] iyileştirir. Bu durum sonucunda toz serimi iyileşir/yoğunlaşır, küçük, küresel parçacık büyüklüğü ve dar parçacık büyüklüğü dağılımı (45 μm altı) , eriyik havuzunda homojenliğe yol açar ve daha yüksek parça yoğunluğu ile sonuçlanır [113, 116, 114]. Toz yatağı yoğunluğunun artması ise lazer ışınının vurduğu bölgede ortaya çıkan ısının taşınımını ve dolayısıyla ısı dengesini etkiler [116]. Küçük parçacık boyutlu tozlar lazer enerjisinin emilimi için daha büyük bir yüzey alanı sağlar bu durum çalışma sıcaklığını artırarak sinterleme kinetiği üzerine olumlu etkiler oluşturur [117] [118]. Gürtler ve arkadaşları [119] parçacık boyut dağılımlarının (PSD) toz yatak kalitesine ve eriyik havuzu dinamiğine etkilerini incelemişler ve bitmiş parça gözenekliliği üzerinde etkili olduğunu belirtmişlerdir. Liu ve arkadaşları [120] SLM işleminde iki farklı toz parçacık büyüklüğü dağılımının (1-60 μm ve 15-60 μm) bitmiş parça yoğunluğu, yüzey pürüzlülüğü, mukavemeti ve sertliği üzerinde etkilerini ortaya koyan bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonuçları dar parçacık büyüklüğü dağılımına sahip tozlardan üretilen parçaların daha yüksek sertlik ve mukavemet değerine sahip olduklarını, geniş parçacık dağılımına sahip tozlardan üretilen parçaların ise daha yüksek yoğunluklu ve daha düşük yüzey pürüzlülük değerlerine sahip olduklarını ortaya çıkarmıştır.

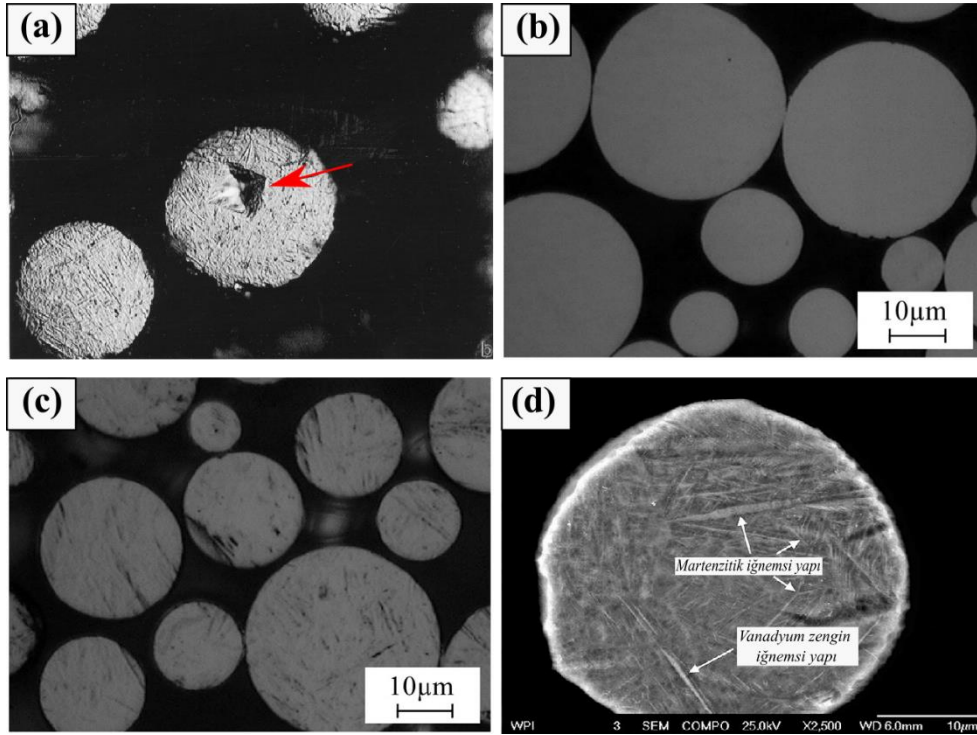
2.3.2. Tozun iç yapısı

Kesit alan boyunca büyütülmüş bir toz görüntüsü olası işlem sorunlarını ortaya çıkartır. Bu tür bir analiz iç gözenekler segregasyon kalıntıları veya diğer hatalar hakkında bilgi verir [25]. Toz parçacıkları küresel görünümde, akışkanlık testleri iyi veya dağılımları istenilen boyutları sağlıyor olabilir. Fakat araştırmalar toz parçacıklarının iç yapısında üretim esnasındaki soğuma hızına bağlı olarak gözeneklerin olduğu bildirilmiştir. Bu gözenekler bitmiş parça özellikleri (yoğunluk ve mekanik özellikler) üzerinde olumsuz etkiye sebep olmaktadır [121-125]. Tozun iç yapısının incelenmesi için geçmişten günümüze yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin en geleneksel ve yaygın olanı metalografik incelemedir. Tüm yöntemler ile gözenek yapısı, büyüklüğü, gaz içermesi ve morfolojisi üzerine ölçümler yapılarak bu durumların hem toz metalürjisi üretim teknikleri hem de Eİ işlemleriyle parça üretimine etkisi incelenmektedir [122, 126-129].

Metalografik incelemede tozun iç yapısını gözlemlemek için toz önce epoksi reçine ile karıştırılır. Parçacıklar epoksinin katılaşması sırasında yerleşir. Daha sonra yapılan parlatma ve dağlama parçacığın iç yapısını ortaya çıkartır [25, 130, 131]. Bu şekilde optik mikroskop veya taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla gözenek boyutları, şekli ve mikro yapısı üzerine yorumlar yapılabilmektedir. Bu geleneksel yöntemler günümüz yeni teknolojilerinin yanında oldukça genel kalmakta özellikle kapalı veya açık gözenegin iç yapısının şeklini, gözenekliliğin oranını belirlemede başarısız olmaktadır. Gelişen tekniklerle birlikte güncel çalışmalar ise toz parçacığı içerisindeki gözeneği 3 boyutlu modelleme üzerine yoğunlaşan bilgisayarlı tomografi (ing; Computed tomography (CT)) görüntüleri [121, 126, 128, 132] ve yüzeyden analiz yaparak malzeme içeriğini veren enerji dağılım spektroskopisi (ing; Energy dispersive x-ray (EDX)) raporlarıdır [133]. Bu şekilde belirli bir toz yığınının gözenekliliği, mikroyapısı ve alaşım oranları üzerine analizler gerçekleştirilebilmektedir. Fakat önceki çalışmalar [126, 132, 134, 135] CT görüntülerinin 5 µm'den küçük gözenekleri görüntülemekte başarısız olduğunu göstermiştir. Fakat bu durumu EBM'de üretilen bir parçaya HIP uygulayarak araştıran Tammas-Williams ve arkadaşları [134] 5 µm'den küçük gözeneklerin gerilme yığılmalarını çok az artıracaklarını ve bir çatlak başlatma olasılığının bulunmadığını ifade etmişlerdir.

PA ile üretilmiş Ti-6Al-4V tozunun iç yapısı üzerine yapılan çalışmalardan alınmış geleneksel yöntemlerle tozun iç yapısının incelendiği görüntüler Şekil 2.16'da gösterilmiştir.

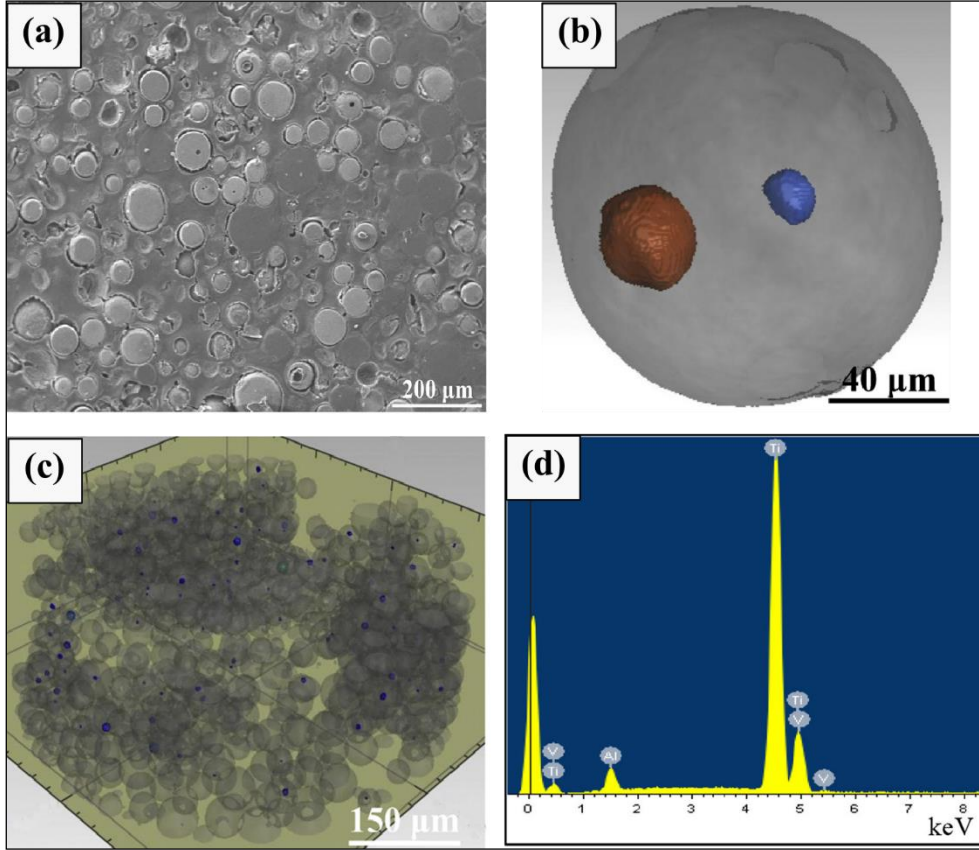
Şekil 2.16-a’da tozun parçacıkların epoksi içerisine alınıp metalografi sonrası mikro sertliği ölçülmesi gösterilmiştir. Toz parçacıkların ortalama Vickers sertliği HV=3,6 GPa olarak bildirilmiştir [136]. Birt ve arkadaşları [130] hazır halde aldıkları 0-45 µm toz boyut aralığına sahip tozların mikroyapılarını incelemişler ve soğuk sprej işlemine tabi tutmuşlardır. PA işlemi sırasındaki yüksek soğuma hızlarından dolayı martenzitik iğnemsî yapıların (α fazı) baskın olduğunu Şekil 2.16-d’deki gibi göstermişlerdir. Tan ve arkadaşları [131] ise PA ile üretilmiş 15-45 µm toz boyut aralığına sahip parlatılmış ve dağlanmış tozları incelemişler, parlatılmış numunelerin mikroyapılarında Şekil 2.16-b’deki gibi neredeyse hiç gözenek bulunmadığını, dağlanmış numunelerde ise Şekil 2.16-c’deki gibi ise yapılarındaki iğnemsî martenzitik fazları göstermişlerdir.



Şekil 2.16. PA ile üretilmiş Ti-6Al-4V tozunun içyapısının incelenmesi a) tozun genel görünümü [136], b) tozun epoksi içerisine alınıp parlatılmış görünümü c) tozun dağlanmış görünümü [131] d) bir toz parçacığının mikro yapısı [130].

PA ile üretilmiş Ti-6Al-4V tozunun iç yapısı üzerine yapılan çalışmalardan alınmış ve yeni yöntemlerle tozun iç yapısının incelendiği görüntüler Şekil 2.17’de gösterilmiştir. Chen ve arkadaşları [121] 45-106 µm boyut aralığında tozların mikro yapılarını incelemişler PA ile üretilmiş tozların içerisindeki gözeneklerin GA ve PREP yöntemi ile üretilen tozlara nispeten daha küçük ve neredeyse küresel olduklarını belirtmişlerdir. Tan ve arkadaşları [133] soğuk sprej uygulamasında kullanacakları PA ile üretilmiş Ti-6Al-4V tozlarını

uygulama öncesinde mikro yapı testlerine tabi tutmuşlar ve EDX analizi gerçekleştirmişlerdir. Tozların mikro yapılarına yönelik çalışma sonuçlarına göre literatür ile benzer sonuçları bulmuşlar farklı olarak yaptıkları EDX analizlerinde ise Şekil 2.17-d’de görüldüğü gibi hiçbir kirliliğin olmadığını belirtmişlerdir.



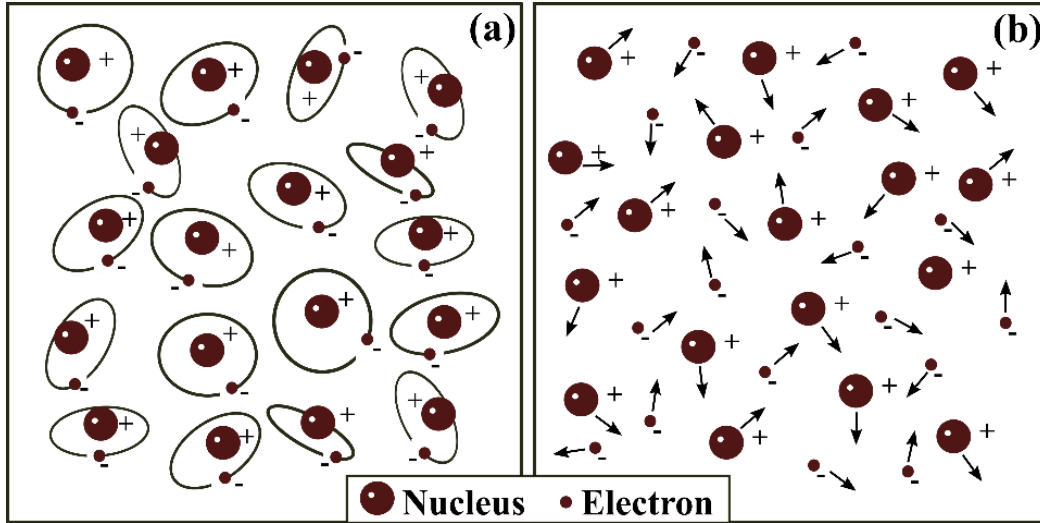
Şekil 2.17. PA ile üretilmiş Ti6Al4V tozunun iç yapısının incelenmesi a) toz parçacıkları içerisindeki gözeneklerin SEM ile alınmış görüntüsü, b) bir toz parçacığının içindeki gözeneğin 3 boyutlu mikro CT görüntüsü c) belirli bir hacim içerisindeki tozlar içerisindeki gözeneklerin mikro CT görüntüsü [121] d) Ti-6Al-4V tozunun EDX analizi [133].

3. MALZEME BİLİMİNDE PLAZMA ARK TEKNOLOJİSİ

Bu bölümde çeşitli malzeme işlmelerinde kullanılan plazma tabancaları hakkında kapsamlı bilgiler verilmeye çalışılmıştır. Plazma durumundan başlayarak, ark ile elektrotlar arasındaki ilişki, elektrotların özellikleri ve tabanca modelleme çalışmaları hakkında ayrıntılı bilgilendirmelerde bulunulmuştur.

3.1. Plazma Durumu

Plazmalar, negatif ve pozitif yüklü parçacıkların birbirlerini dengelediği elektronlar, iyonlar, nötr atomlar ve muhtemelen moleküllerden oluşan kısmen veya tamamen iyonlaşmış gazlardır [1, 137, 138]. Bilimsel bir bakış açısına göre, bilinen evrendeki maddeler genellikle dört durum şeklinde sınıflandırılır: katı, sıvı, gaz ve plazma. Plazma durumu genellikle maddenin dördüncü hali olarak tanımlanır [138–146]. Bu tanım, katı halin, sıcaklık ve özgül entalpi skalasının en düşük ucunda bulunan bir temel durum veya birinci madde hali olduğu kavramından türetilmiştir [140]. Katılar, sıvılar ve gazlar arasındaki temel ayrım, parçacıklarını bir arada tutan bağların mukavemeti arasındaki farktan kaynaklanmaktadır. Bu bağ mukavemeti, katı içinde nispeten kuvvetli, bir sıvı içinde zayıf ve gaz içerisinde ise neredeyse bulunmamaktadır. Belirli bir maddenin bu durumlardan birinde bulunup bulunmadığı, atomlarının veya moleküllerinin rasgele kinetik enerjisine (termal enerji) ve özgül entalpisine yani sıcaklığına bağlıdır [139-141]. Sıcaklık ne kadar yüksek olursa malzemeyi oluşturan parçacıklar o kadar serbesttir [141, 142, 138]. Sıcaklığın sebep olduğu termal enerji ile parçacıkların bağ kuvvetleri arasındaki denge, onun hal durumunu belirler. Ayrıca maddenin özgül entalpisinin artışı, maddenin ikinci durumu olan sıvı durumuna geçtiği erime noktasına ulaşana kadar ve sonrasında artarak gaz haline geçinceye kadar sıcaklığının artmasına neden olur [139, 140]. Bir katı veya sıvı maddeyi ısıtmak suretiyle atomlar veya moleküller, bağlanma potansiyel enerjisinin üstesinden gelene kadar daha fazla termal kinetik enerji elde eder. Sonrasında yeterli enerji sağlanırsa, bu enerji moleküler bağlanma enerjisinin üstesinden gelir ve parçacıkların çarpışmaları sonucu atomik gaz halinde ayrışır. Sıcaklığın daha da artırılması ile en dıştaki orbital elektronların da bağlanma enerjisi aşılabacak ve Şekil 3.1’de gösterilen iyonize gaz veya plazma durumuna dönüşecektir [139].



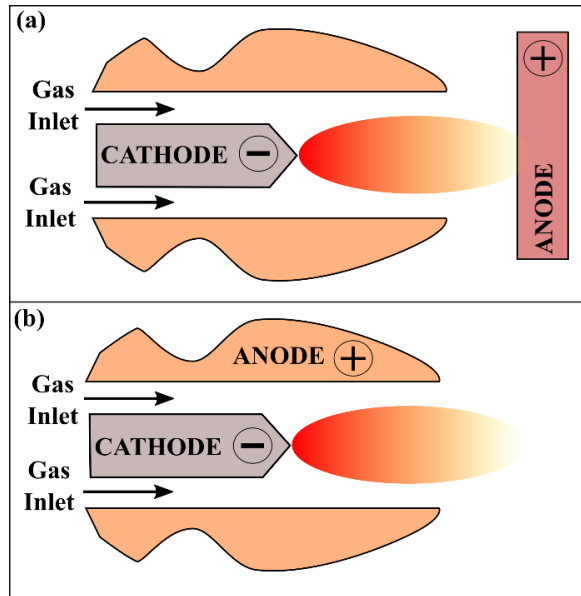
Şekil 3.1. Şematik gösterim a) gaz, b) plazma durumu

Plazmalar iyonlaşmış gazlardır ve elektriksel olarak nötr olan ve rastgele doğrultuda hareket eden elektron, iyon ve nötr parçacıkların bir karışımı olarak karakterize edilir [141, 138, 144-147]. Fakat nötr olarak değerlendirilmesine karşın, yüklü parçacıkların varlığı bir plazmanın elektriği iletebileceğini ve manyetik alanlarla etkileşime girebileceği anlamına gelmektedir ve sadece elektriksel olarak iletken sıradan bir nötr gaz olarak değerlendirilemeyeceğini bilmek önemlidir. Çünkü nötr bir gazdan farklı olarak plazma durumunda yüklü parçacıklar arasındaki kuvvetler uzun menzilli elektromanyetik kuvvetlerdir. Bir yüklü parçacık, diğer yüklü parçacıkla Coulomb kuvveti boyunca etkileşime girer ve hareketli yüklü bir parçacık, diğer yüklü parçacıklara kuvvet uygulayan bir manyetik alan oluşturur. Parçacıklar arası kuvvetlerin uzun menziline bağlı olarak, bir plazma içindeki her yüklü parçacık, çok sayıda başka yüklü parçacık ile etkileşime girerek, plazma davranışına neden olur: bu nedenlerle bir gazdan farklı olduğundan maddenin dördüncü hali olarak adlandırılır [144, 145, 148]. Sonuç olarak, plazmalar elektriksel iletkenliğe sahiptir ve altın ve bakır gibi metallerden daha büyük elektriksel iletkenliklere erişir [141, 142, 138, 144].

Plazma sadece maddenin en enerjik dördüncü hali değil, aynı zamanda bilim insanları için en zorlayıcı olanıdır [138]. Maddenin bir hali olarak bu tanımlama, bilinen evrenin % 99'undan fazlasının plazma durumunda olduğunu ortaya çıkarmaktadır. Tipik bir örnek, iç sıcaklıkları 10^7 K'yi geçen güneştir. Plazmanın katı, sıvı veya normal gazlara kıyasla yüksek enerji içeriği, birçok önemli uygulamada kullanılmasına sebep olmuştur [149].

3.2. DA Termal Plazma Tabancalar

Elektrik arklarından yüksek basınçlarda üretilen plazmalar bileşenleri arasında yüksek çarpışma frekansları ile karakterize edilirler. Bu durum termal plazma olarak adlandırılır [149]. Başka bir deyişle yüksek basınçlı bir gaza (10^5 Pa gibi), yüksek elektriksel güç (10-100 kW) enjekte edildiğinde 15 000K ve üzeri sıcaklıklarda termal plazmalar üretilirler ($T_e=T_{ion}=T_{gaz}$) [147]. Termal plazma oluşumunu sağlayan ekipmanlara tabanca adı verilir (Şekil 3.2). Termal plazma tabancaları, gaz akışının bir elektrik arkından geçirilmesi sonucu plazma durumunu oluşturan ekipmanlardır [137]. Elektrik arkından geçen gaz, normal gazlara kıyasla yüksek sıcaklık, yüksek entalpi ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan bir plazma jetine dönüşür [150, 151]. Eğer oluşan elektrik arkı tabanca dışında bir parçaya bağlıyorsa bu transfer edilen ark tabancası olarak adlandırılır. Bu tabancalar genellikle malzeme kesme ve kaynak işlemlerinde kullanılır ve bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Eğer ark tabanca içerisinde oluşuyorsa bu durumda ise transfer edilmeyen ark tabancası (TEAT) olarak adlandırılmaktadır [151]. Bu tabancalar, diğer yöntem ve ekipmanlarla elde edilemeyen veya ekonomik olarak mümkün olmayan malzeme işlemlerinde, termal, kimyasal ve elektrik ekipmanları olarak tercih edilmektedir [152]. Bu alanların başında plazma sprej kaplama, plazma atomizasyon ve toz sentezlenmesi gibi işlemler gelmektedir [153].



Şekil 3.2. a) Transfer edilen ark ve b) transfer edilmeyen ark tabancalarının şematik görüntüsü

Elektrik arkı kullanılarak tabanca yardımıyla üretilen termal plazmaların aşağıda sunulan avantajları onların birçok endüstri alanında verimli bir şekilde kullanılmalarını sağlar.

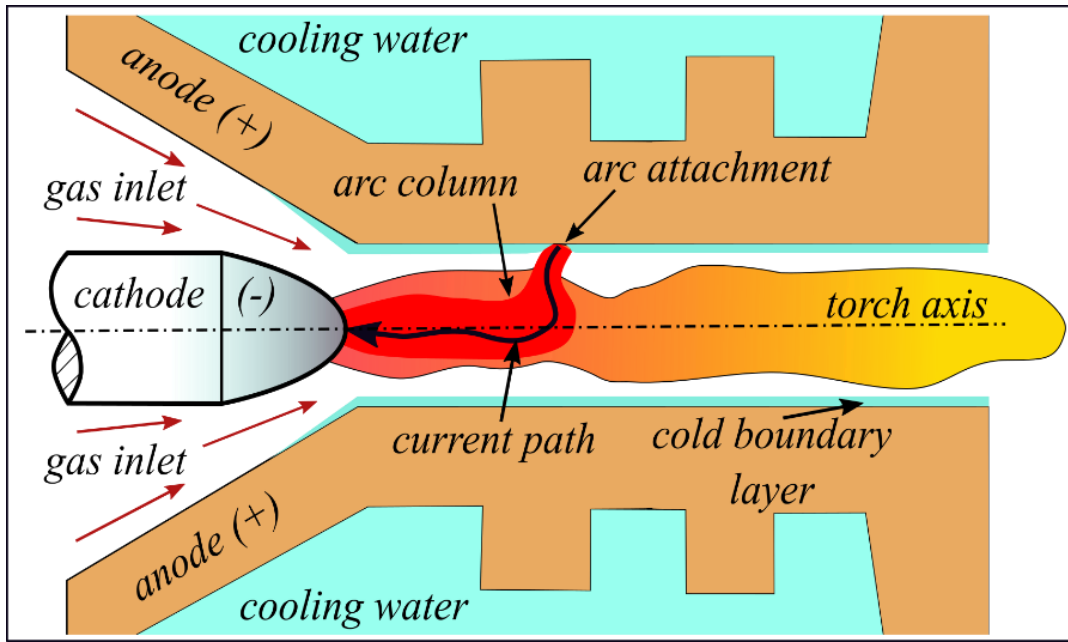
- Gazdan iyonlaşma enerjisinin salınması nedeniyle sahip oldukları yüksek sıcaklık (15 000K - 40 000K) ve enerji yoğunluklarından (10^7 ila 10^9 J-m³) dolayı yüksek sıcaklık gerektiren malzeme işlemlerinde oldukça kullanışlıdır [21, 154–156].
- Plazma tabancasının tipine ve uygulama şekline, elektrik arkının gücüne (akım yoğunluğu) ve çalışma gazının türüne bağlı olarak genellikle uzun elektrot çalışma ömrüne sahiptir (20-1 000 saat) [157].
- Değişik güç değerlerinde çalışma esnekliği sağlar [21], [158], [159]. (örneğin plazma püskürtme ve plazma atomizasyon işleminde bu değer 10-100 kW arasındadır)
- Plazma gazı olarak inert gazlar dahil neredeyse tüm gazlar ve karışımlarını ısıtabiliyor olması dolayısıyla çeşitli endüstriyel alanlarda kullanılabilir [157, 146, 160, 161].
- Basit otomasyon sistemleri kullanılarak elektrik arkının ve gaz sisteminin kontrolü sağlanır [157].

Bunların yanında ise termal plazma tabancaları bazı dezavantajlara sahiptir. Örneğin elektrik pahalı enerji kaynaklarından biri olduğundan sistemin kurulum ve işletme maliyetlerinin fazlalığıdır. Ayrıca işlem verimini düşüren kararsızlıkların var olması nedeniyle verim düşüktür ve elektrot ömürleri uzun olsa da hala yetersizdir. Fakat katma değerli bir ürün elde edildiğinde termal plazma işleminin dezavantajları kabul edilebilir [154, 162, 163]. Endüstriyel olarak kullanılan termal plazma tabancalarının çoğu 10-100 KW arasında değişen elektriksel güç, 250 ile 1 000A arasında değişen ark akımları, 30 ile 100V arasında değişen ark başlatma voltajları ve 20 ile 150 SLPM (standart litre per minute) hacimsel akış debisi tarafından kontrol edilirler.

3.2.1. Plazma oluşumu ve ark elektrot etkileşimi

Elektrik arklarının, özellikle de yüksek yoğunluklu transfer edilemeyen arkların araştırılması, malzeme işleme alanındaki geniş uygulamaları nedeniyle, yıllarca hem deneysel hem de analitik olarak yoğun araştırmalara konu olmuştur [164, 9]. Yoğunlukla doğru akım (DA) ile yönetilen TEAT tabancaları günümüzde çok çeşitli malzeme işlemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bir TEAT'na ait şematik gösterim Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Çoğu DA ark tabancası gaz giriş kısmı, katot ve anot olmak üzere üç ana

bileşene sahiptir. Bu bileşenlerden katot ve anot elektrot olarak adlandırılırlar. Plazma çalışma gazı, katot ve anot arasındaki küçük boşluktan akar (kullanılan gaz, yaygın olarak Ar, He, H₂, N₂, O₂ ve bunların karışımıdır), burada anot arkı daraltıcı etki yapar. Gaz akışı devam ederken plazma, katot ve anot arasında oluşacak elektrik arkının iletken yolunu oluşturan yüksek voltajlı bir darbe ile başlatılır. Ark tarafından üretilen elektrikli ısıtma (Joule heating), gazın çok yüksek sıcaklıklara ulaşmasına ($> 10\,000\text{ K}$) neden olur. Böylece ayrışır ve iyonlaşır. Plazma durumuna geçişte gazın genişlemesi plazma jetinin hızlanması ile sonuçlanır. Ark akımı kendi oluşturduğu indüklenen manyetik alanı ile etkileşime girer ve bu etkileşim sonucu ortaya çıkan Lorentz kuvvetleri gazı hızlandırır. Ayrıca su soğutmalı anot ve anodun daralan kısmı etrafındaki soğuk gaz tabakasının (ing; Cold boundary layer) oluşmasına sebep olur. Bu tabaka elektriksel olarak iletken değildir ve plazmayı daraltarak sıcaklığını ve hızını yükseltir. Böylece plazma tabanca içerisine giren gaz, plazma jetine dönüştürülmüş olarak tabancadan çıkar. [3, 12, 24, 140, 152, 165–167].



Şekil 3.3. Termal transfer edilmeyen ark plazma tabancasının şematik gösterimi

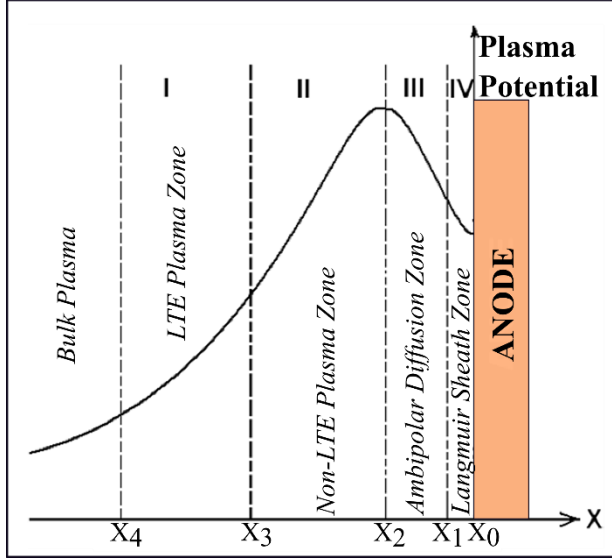
Elektrik arklarının kullanılması termal plazmayı oluşturmak ve sürdürmek için en yaygın yollardan birisidir [138, 157]. Ark, tabanca elektrotları arasında yüksek voltaj sonucu oluşan iletken bir yoldur. Ark doğal olarak en kısa yolu tercih eder. Mümkün olduğunca kısa uzunlukta olma ve düşük voltaj kullanma eğilimi vardır [24, 167, 168]. Özellikle anot üzerindeki ark eklentisinin iyi anlaşılması tabanca ömrü ile ilişkili olduğundan önemlidir. Elektrik arklarından 10 kPa ve daha yüksek basınçlarda üretilen plazmaların bileşenleri

arasında yüksek çarpışma frekansları bulunmaktadır ve bu yüksek çarpışma frekansları termal plazmanın bölgesel termodinamik dengeye (BTD) ulaşmasını sağlar [1]. Bu durumda elektron sıcaklığı (T_e), ve ağır parçacıkların sıcaklığı (T_h) birbirine eşit veya yakın olarak değerlendirilirler. Çarpışma frekansı basınca (p) bağlı olduğundan, yüksek basınç çarpışma frekansını arttıracak ve elektronun çarpışmalar arasındaki ortalama serbest yolu azalacaktır. Bu durum Boulos ve arkadaşları tarafından Eş. 3.1'deki gibi ifade edilmiştir.

$$\frac{T_e - T_h}{T_e} = \frac{\Delta T}{T_e} \sim \left(\frac{E}{p}\right)^2 \quad (3.1)$$

Bu denklem, ağır parçacıklar ve elektronlar arasındaki sıcaklık farkının bir elektronun elektrik alanından aldığı enerjinin (E), basınca bölümünün karesiyle orantılı olduğunu göstermektedir. Sadece küçük E / p değerleri durumunda, elektronların ve ağır parçacıkların sıcaklıkları birbirine yaklaşır. Bu ise termal plazmanın BTD olarak değerlendirilmesinde temel bir gereksinimdir [138, 140, 149, 142]. BTD bir kural değil termal plazmalar içerisindeki olayların teorik olarak incelenmesi üzerine bir varsayımdır [140]. Bu varsayım anot üzerindeki ark kökü eklentisi ile plazma bölgesi arasında gerçekleşen olayların genel değerlendirilmesinin yapılmasında sıkça kullanılmaktadır. Bu bölgenin daha iyi anlaşılmasına yönelik çalışan araştırmacılar Şekil 3.4'teki gibi bölgeyi dörde ayırmışlardır. 1. bölge anot duvarından en uzak bölgedir. Bu bölgede elektronlar ve ağır parçacıklar arasındaki enerji değişimi, T_e ve T_h 'in yakın olması için yeterince yoğundur ve plazma tek sıcaklıklı bir plazma $T_e=T_h$ olarak varsayılır. Bunun sonucu olarak elektronlar ve ağır parçacıklar termal olarak dengededir. İyonlaşma ve yeniden oluşum dengeleri korunur. Ohmik ısıtmadan dolayı oluşan aşırı ısı anot duvarına doğru iletilir. Anot duvarına yaklaştıkça (2. Bölge) sıcaklık T_e ve T_h dengesi anodun etkin bir şekilde soğutulduğundan dolayı değişir. T_h anot sıcaklığına yaklaşırken, T_e elektron yoğunluğunu önemli bir seviyede tutmak için nispeten yüksek kalır. Bu bölgede iki sıcaklıklı durum olduğundan termal denge başarısız olur fakat iyonlaşma dengesi devam eder. Çünkü iyonlaşma dengesini sağlayan elektronların sıcaklığıdır. Ağır parçacıklar sıcaklığının tek rolü parçacıkların toplam basınca katılımını belirlemesidir. İyonlaşma dengesi 3. bölgeye kadar korunur. Bu bölge anoda çok yakın bir bölgedir ($\sim 0,01$ mm) ve toplam iyonların önemli bir kısmı plazmanın kendisinde ziyade duvar ile etkileşime girdiğinden iyonlaşma dengesini de bozar. Bu üç bölgede de plazma elektriksel olarak nötr kalır. Son olarak anoda aşırı yakın ($\sim 1\mu\text{m}$)

4. bölgede ise bu nötrlükte bozular Langmuir örtüsü diye adlandırılan bir bölge yer alır [11, 169–171].



Şekil 3.4. Anot ark eklentisi ile plazma arasındaki bölgenin ayrıntılı ifadesi [170, 169]

Ark tarafından ısıtma, birçok durumda önemli olan elektrot malzemesinin buharlaşmasına neden olur. Örneğin katot elektrotu üzerindeki ark eklentisi için Langmuir ifadesi, plazma içerisindeki elektrotlardan buharlaşmış malzemenin akı yoğunluğunu (eJ_{buhar}) yayılan akım yoğunluğu (J_{yay}) ile ilişkilendirerek tanımlamaktadır. Buna göre tüm sıcaklıklar için $eJ_{\text{buhar}}/J_{\text{yay}} \gg 1$ durumunda (örn. Ag, Cu ve Fe gibi) elektrotlar erime ile bağlantılı olarak güçlü bir şekilde buharlaşma özelliği gösterir ve sadece 3000K altındaki sıcaklıklarda çalışabilir. Bu ifadenin tersi durumunda ise (örn. W ve Zr gibi) elektrotlar dikkate değer erime ve buharlaşma olmadan güçlü termiyonik yayılımı devam ettirebilir ve 3000K üzerindeki sıcaklıklarda uzun süre çalışabilir [171,172].

Şekil 3.3’de gösterilen bir DC TEAT tabancasının yapısındaki sadelik ile işlem sırasında oluşan ve Şekil 3.4’te bir kısmına değinilen elektriksel, kimyasal ve termal olayların karmaşıklığı çelişki oluşturmaktadır. Yapılan deneysel ve sayısal çalışmalar ile bu çelişki giderilmeye çalışılmaktadır. Çünkü, plazmaya etkiyen dış etkiler önemli olsa da, özellikle elektronların yakınlarında ve arkın soğuk akışla etkileşime girdiği bölgelerde, artan karmaşık fiziksel durumlar ve hesaplama maliyetleri nedeniyle şimdiye kadar BTM ve varsayımına dayanan modeller ile kolaylaştırılmıştır [173]. BTM varsayımı yapılarak oluşturulan teorik çalışmalar sonrasında deneysel çalışılarak teorik sonuçlar ile uyum içerisinde olduğu

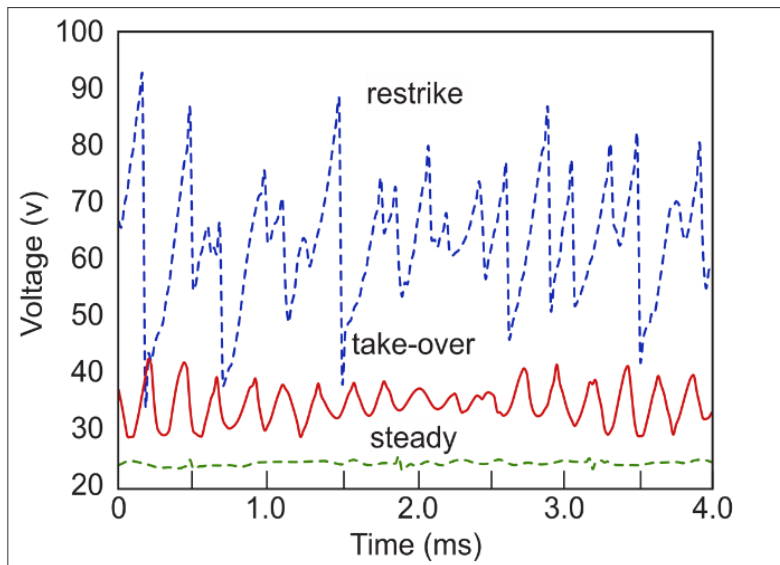
belirtilmiştir [7,21,24,174]. Başka varsayımlardan olan O-BTD durumu ile ilgili bilgi ise Bölüm 3.4. Modelleme Çalışmaları başlığı altında sunulmuştur.

3.2.2. Arkın dinamik davranışı ve kararsızlığı

Tabanca içerisindeki ark dinamikleri, akış sürüklenme kuvvetleri ile elektromanyetik (veya Lorentz) kuvvetler arasındaki dengesizliğin bir sonucudur [175]. Eklendiği elektrodun ortam koşullarına (debi ve akım yoğunluğu gibi) bağlı olarak anot ve katotta farklı özellik gösterir. Bir plazma tabancasında katot genellikle ucu yuvarlatılmış koni şekline sahiptir. Katodun ark eklentisi, nozul eksenine paralel bir şekilde eklendiğinden kararlı bir durumdadır. Fakat anotta yer alan ark eklentisi gaz akış eksenine ve anodun simetri eksenine paralel değildir. Dolayısıyla soğuk gaz akışından etkilenir, güçlü ve dinamik bir sürüklenme kuvvetine maruz kalır. Bu kuvvete karşı gelen kuvvetler elektromanyetik (Lorentz) kuvvetlerdir. Bu kuvvetler arasındaki dengesizlik ise anot üzerindeki ark eklentisinin küçük bir alanda sürekli yer değiştirmesine sebep olur. Bu durum ark kararsızlığı olarak adlandırılmıştır [5, 19, 162, 174–177]. Trelles ise bu durumu yeniden eklenme (ing; Reattachment) olarak tanımlamıştır [152, 178–180]. Trelles'e göre ise kuvvet dengesizliği, anot ekinin sürüklenmesine, arkın uzamasına ve ark anot üzerindeki başka bir yere yakın olana kadar ark eğrilikliğin artmasına neden olur. Arkın bir kısmı, mevcut anot ekine göre katoda daha yakın olan anodun yakınında bir konuma ulaşırsa, ark yeniden bağlanma eğilimindedir, dolayısıyla yeni bir kök oluşturur. Ark kararsızlığı doğrudan plazma jetinin karakteristiği, uygulama sonrası malzeme özellikleri ve tabanca ömrü üzerinde etkili olduğundan dikkate alınması önemlidir [181, 182]. Moreau ve arkadaşlarının [159] yaptıkları modelleme çalışmasında da bu duruma ait modelleme çalışmaları yer almaktadır.

Arkın kararsızlığını ve dinamik davranışını belirlemek oldukça zordur. Araştırmacılar voltaj dalgalanmalarından yola çıkarak ark hareketlerini belirlemeye çalışmışlardır. Voltaj dalgalanmaları ile ark boyu arasında doğrudan ilişki kurarak ark boylarını ve arkın hareketini tahmin etmişlerdir [151, 168, 176, 183, 184]. Voltaj dalgalanmalarının şekline göre Wutzke ve arkadaşları [185] diğer araştırmacılar tarafından da kabul gören üç temel çalışma modu önermişlerdir. Duan ve Heberlein ise üç temel çalışma modunu aşağıdaki gibi açıklamaktadır [19]. Bu çalışma modları Şekil 3.5'te gösterilmiştir.

1. Kararlı mod (steady mode)'a göre anot ark kökü eklentisinin hemen hemen sabit bir konumu vardır ve buna bağlı olarak voltaj dalgalanmaları ihmal edilebilir düzeydedir. Bu durum çok yüksek bir akım ve laminar bir gaz akışı ile yapılan çalışmalarda gözlemlenir. 900 A akım ve 60 SLM saf argon parametrelerinde elde edilmiştir. Düşük ortalama voltaj nedeniyle tabanca verimi çok düşüktür [19]. Ayrıca tek noktaya sabitlenen ark anodun hızla erozyona uğramasına sebep olarak tabanca ömrünü kısıtlar [173, 176, 186]. Wutzke ve arkadaşları [187] arkın sabit modda çalışabilmesi için gaz dinamik sürüklenme kuvvetleri ile elektromanyetik kuvvetlerin birbirine eşit olması gerektiği bildirmiştir.
2. Periyodik mod (takeover mode)'a göre voltaj dalgalanmaları periyodik veya yarı periyodik davranış sergiler. 500 A akım ve 40/20 SLM argon/helyum karışımı kullanılarak elde edilmiştir [19]. Bu mod özellikle malzeme işlemlerinde tercih edilir. Anot üzerinde ark hareket ederek ısı yükünün dağılmasını sağlar ve tabanca ömrünü uzatır [173, 186]. Genellikle girdaplı gaz girişi kullanılarak elde edilir. Argon-hidrojen gaz karışımı kullanılarak yapılan plazma işleminde diğer modlardan bu moda geçiş oldukça zordur [188].
3. Kararsız mod (restrike mode), 'a göre ise son derece kararsız tahmin edilemeyen voltaj dalgalanmaları görülür. Büyük bir ortalama voltaj değeri ve ani düşüşler ile karakterize edilir. 100 A akım 120/40 SLM Argon/Helyum karışımı kullanılarak elde edilmiştir [19]. Her voltaj düşüşü, kısa devre ve nozul duvarında yeni bir ark bağlantısı başlatır. Önceki ark bağlantı kolonu birkaç mikrosaniyede söner [182, 189]. Spray kaplama uygulamalarında en çok bu modla karşılaşılır [188].



Şekil 3.5. Voltaj dalgalanma şekilleri [19]

DC TEAT içerisinde oluşan ark olayı, çalışma koşullarına ve akış alanlarına güçlü bir şekilde bağlıdır. Fakat tabanca içerisindeki ölçümler oldukça sınırlı olduğundan çoğu teori, modellerden elde edilmiştir [190]. Nümerik çalışmalar genellikle ark kökünün konumunu BTM varsayımına göre Steenbeck'in minimumluk ilkesini kullanarak belirlemeye yönelik yapılan çalışmalardan oluşmaktadır. Bu ilkeye göre ark kökünün sabit konumu minimum voltaj değerine karşılık gelmelidir. Yani arkın her zaman tabanca işlemi sırasında arkını korumak için en düşük voltaj gerektiren minimum entropi üretiminin olduğu pozisyonu arayacağı anlamına gelir [174, 7]. Li ve diğer araştırmacılar [24,191,192, 164] bu ilkeyi kullanılarak yaptıkları kararlı hal (ing; Steady-state) analizleri ile artan ark akımların manyetik gövde kuvvetlerini artıracığından ark kökü eklentisini nozul girişine doğru kaydırdığını, artan debi değerlerinin ise gaz dinamik sürüklenme kuvvetlerini artıracığından ark kökü eklentisini nozul çıkışına doğru kaydırdığını vurgulamışlardır. Fakat ark kökü eklentisinin Steenbeck ilkesi ile belirlenmesi olayına bazı eleştiriler vardır. Benilov ve Naidis [193] ark kökü eklentisinin konumunun belirlenmesinde Steenbeck'in minimum voltaj ilkesinin varsayılanın aksine minimum entropi üretiminin bir sonucu olmadığını belirterek tartışma başlatmıştır. Christen [194] ise Benilov ve Naidis'in ortaya attığı tartışmanın hatalı ve yanıltıcı olduğunu gösterir bir çalışma yayınlamıştır. Ayrıca Rat ve arkadaşları [20] bu ilke ile ark bağlama bölgesine uygulanan kuvvetlerin belirlenmediğini ve soğuk sınır tabakasını geçen ark ucu boyunca gerilim düşmesinin ihmal edildiğini bildirmektedir. Bu eleştirilere rağmen araştırmacılar tahmin ettikleri ark mesafesini deneysel çalışmalar ile doğrulamışlardır. Guo ve arkadaşları [7] ark kökü eklentisinin konumunu belirlemek için anot duvarı boyunca asgari toplam ısı transfer hızının en düşük enerji kaybı için kriter olarak kabul edildiği yeni bir yöntem önermişlerdir. Kararlı durum analizleri ark kökünü bir noktada sabitleyen analizlerdir. Kararsız (ing. restrike) modda ark davranışı modelleme çalışmaları ise zamana bağlı analizler ile yapılmıştır. Moreau [159] ve arkadaşları geliştirdikleri model yardımıyla kararsız modda ark davranışını modellemişlerdir. Bu model deneysel çalışmalarla doğrulanmış gelişmiş modellerden bir tanesi olmasına rağmen ark kökü boyutlarını tam tahmin edememiştir. Bu durumu BTM varsayımı kısıtlamıştır. Ark oluşum dinamiği hakkında gelişmiş modelleme çalışmalarından diğeri ise Trelles ve arkadaşları [5, 152, 173, 178–180] tarafından yapılan çalışmalardır. Özellikle BTM ($T_e=T_h$) ve BTM olmayan plazma durumunu ($T_h>T_e$) dikkate alarak arkı modellemişler yeniden eklenme (Reattachment) olayını deneysel çalışmalar ile ispatlamışlardır. Bu modelleme çalışmalarına rağmen uygulama alanında süreç optimizasyonu sağlamak veya gerçek zamanlı izleme ve kontrol gerçekleştirmek için

sadeleştirilmiş modeller daha uygundur . Bu tür bir sadeleştirme örneği tabanca içerisindeki basınç dalgalanmalarını elde edilen eğrinin voltaj dalgalanmalarıyla ilişkilendirilmesi için kullanılan Helmholtz rezonatör kavramıdır [190]. Coudert ve arkadaşları ark kararsızlığını Helmholtz modu olarak tanımlanmışlar ve rezonans frekansını (f_h) Eş. 3.2'deki gibi belirlemişlerdir [195, 196].

$$f_h = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\gamma_g \frac{P_g S}{\rho_p L V_g}} \quad (3.2)$$

Bu eşitliğe göre, γ_g soğuk gazın izantropik katsayısını, P_g katot boşluğundaki basıncı, ρ_p plazmanın yoğunluğunu, S anot nozulunun kesit alanını, V_g katot boşluğunun hacmini, L nozul kanalının uzunluğunu ifade etmektedir. Bu denkleme göre ark kararsızlıklarının tahmininde tabanca geometrisi ve özellikle katot boşluğunun hacminin önemli olduğunu göstermektedir.

Araştırmacılar için zorlayıcı bir durum ark kökünün deneysel olarak görüntülenmesidir. Çünkü plazma oldukça parlaktır ve çalışma esnasında tabanca içi ark kökünü gözlemleyebilmek mekanik kısıtlamalardan dolayı oldukça zordur. Deneysel çalışmalardan Janisson ve arkadaşları [185] Ar/He/H₂ gaz karışımının kullanarak yaptıkları deneysel çalışma da 3 farklı modda voltaj dalgalanmaları elde etmişler ve bu farklılığı ark kolonunu çevreleyen soğuk gaz sınır tabakasının kalınlığı ve kararlılığına bağlamışlardır. Duan ve Heberlein [19], yüksek hızlı kamera yardımıyla ark kökü eklentisinin konumu ve soğuk gaz sınır tabakasının kalınlığını görüntülemişlerdir. Artan akım ve azalan gaz akış hızı ile, ortalama ark voltajı azaldığını ve dalga formunun nispeten düşük genlikli sinüzoidal bir karakteristik özelliği gösterdiğini belirtmişlerdir. Ayrıca çalışma sonuçları, ark kararsızlıklarının, plazma jetini kararsızlaştırdığı ve soğuk gaz sürüklenmesini artırdığını bildirmektedir. Nogues ve arkadaşları [197] soğuk gaz sınır tabakası kalınlığının en fazla ark akım değerinden etkilendiğini debi değerinden ise daha az etkilendiğini tespit etmişlerdir. Nümerik çalışmalardan farklı olarak Dorier ve arkadaşları [18] çok kısa süreliğine de olsa (1µs) çoklu ark kökü eklentilerinin varlığını bildirmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre gaz akışının artırılması, bağlanma sayısını artırma eğilimindeyken, akımı arttırmak, dağınık bağlantıyı destekleyen daha ince ve daha sıcak bir gaz sınır tabakasına yol açar. Ayrıca diğer çalışmalara paralel bir şekilde arkın, anot erezyonun olduğu bölgeyi tercih ettiğini göstermişlerdir. Ghorui ve arkadaşları [151], anot çıkışının iç kısmını kısmen yansıtıcı ayna

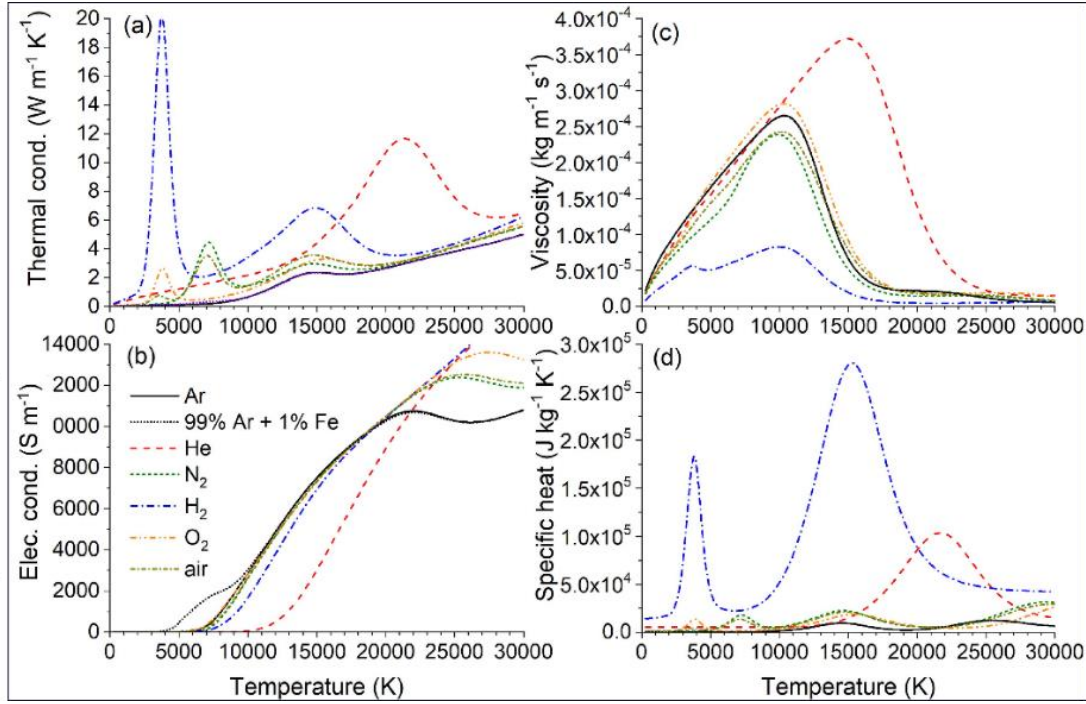
ve yüksek hızlı kamera ile görüntülemişler ve ark kökünün geçici dinamikleri ile voltaj dalgalanmalarını eş zamanlı olarak ilişkilendirmişlerdir. Ayrıca kısıdan uzun arka geçişte birden fazla ark kökünün oluştuğunu belirtmişlerdir. Fakat bu durum anlıktır, geçicidir ve oldukça dengesizdir. Çoklu ark oluşumunun sebebi olarak anot duvarının erozyonu gösterilmiştir. Çoklu ark köklerinin kısa süreliğine oluştuğunu kanıtlar bir çalışma Guo ve arkadaşları [7] tarafından sunulan gerçek anot görüntüsünden de (Şekil 3.4) anlaşılmaktadır. Pan ve arkadaşları [198] ark kolonundan ve katottan yayılan aşırı radyasyonu absorbe etmek için merkezi bölgelerinde bir bor nitrür kaplamalı özel bir bakır ayna tasarlayarak ark kökünü görüntülemişlerdir. Tiwari ve arkadaşları [186] geliştirdikleri yeni görüntüleme tekniği yardımıyla ark kolonunun dış jet bölgesine yayılabileceğini ve teknolojik açıdan en önemli kaygılardan biri olan jet dengesini etkileyeceğini bildirmişlerdir. Goyal ve arkadaşları [199] ark kökünün kararsızlık davranışını belirleyebilmek için anodun etrafına yerleştirdikleri çok sayıda manyetik sensör kullanmışlardır. Bu yöntem ilk kez denenmiştir. Sensörler sayesinde sıcaklık değişimleri anlık kontrol edilerek plazma sürecinin kontrolü sağlanmıştır. Araştırmacılar bu yöntem sayesinde ark kökü dinamiğinin manyetik tomografisinin çıkartılabileceğini iddia etmektedirler. Deneysel sonuçlar, anot kök davranışlarının temelde ark kolonu ve anot duvarı arasındaki soğuk gaz sınır tabakasının kalınlığı, anodun erozyonu, plazma oluşturuucu gazın termo-fiziksel özellikleri gibi faktörlere bağlı olduğunu göstermektedir.

3.2.3. Plazma gazları

Bir plazma tabancasının çalışması ve özellikleri, plazmanın üretilmesinde kullanılan gaz türüne büyük ölçüde bağlıdır. Plazma tabancasında kullanılan tek atomlu (argon ve helyum gibi) ve iki atomlu (nitrojen, oksijen ve hidrojen gibi) gazların kullanımına bağlı olarak termal ve akış dinamikleri gibi özelliklerde farklılıklar bulunur [9, 186]. Bu farklılığın sebeplerinden biri sıcaklıktaki yükselmeyeyle doğrusal olmayan özgül ısıdır (Şekil 3.6-d) [9]. Plazma üretiminde en çok kullanılan gazlar argon, helyum, azot, hava, hidrojen ve bunların karışımıdır. Plazma gazı seçimi, gaz entalpi, reaktivite, maliyet, termal ve elektriksel iletkenlik gibi gaz özellikleri ile tasarım, elektrot malzemesi gibi tabanca özelliklerine dayanır. Örneğin Helyum maliyetinden dolayı tercih edilmez. Tungsten katot kullanımında ise gaz seçimi inert ve oksitleyici olmayan gazlarla sınırlıdır [200, 201, 146]. Örneğin hava veya oksijen, tungsten ile temas halinde plazma gazı olarak uygun değildir, çünkü tungsten oksitler, 1800 K'nin üzerinde oldukça uçucudur [140]. Tipik olarak içerisinde tungsten

katodun kullanıldığı plazma jetleri kullanılan malzeme işlemine bağlı olarak argona başka bir gaz ilave edilerek kullanılırlar. Yalnızca argon plazmaları, iyonizasyon potansiyeli ve termal ısı kapasitesi ile ilişkili olarak (Şekil 3.6) nispeten düşük enerjili bir plazma oluştururlar [36]. Fakat malzeme özelliklerine etkisiz bir atmosfer gerekli ise (Örneğin plazma atomizasyon) genellikle argon tercih edilir [200, 103, 202]. Karışım gazlarının başlıcaları helyum, hidrojen ve nitrojendir ve belirli oranda [203] karıştırılarak kullanılırlar. Argon ve %20 ila % 50 helyum karışımları plazma akışının termal iletkenliğini ve ısıtma kapasitesini artırır [36]. Fakat helyum, gaz maliyetinin önemli olduğu uygulamalarda yüksek maliyetinden dolayı daha az tercih edilir [165]. Diğer gazlar olan iki atomlu nitrojen ve hidrojenin enerji içeriği, argon veya helyumdan oldukça yüksektir. Bu, iyonlaşmadan önce nitrojen ve hidrojen durumunda iken ayrışma reaksiyonundan kaynaklanmaktadır. Isı transfer katsayısı da daha yüksektir ve verimli plazma parçacık ısı transferi sağlar [200, 201]. Nitrojenin maliyetinin ucuz olması ve en sıcak plazma gazlarından bir tanesi olması onun tercih edilebilir olmasını sağlasa da reaktif bir gaz olmasından dolayı (nitrür oluşumu) malzeme işlemlerinde kullanımı sınırlıdır [36]. Hidrojen özellikle plazma sprey kaplama işlemlerinde argona ilave edilerek ayrışma ve iyonlaşmanın meydana geldiği sıcaklıklarda, plazma akışının hem özgül entalpisi hem de termal iletkenliği arttırılarak sıkça kullanılır [152]. Sıkça kullanılmasının bir başka sebebi ise hakkında çok sayıda araştırma yapılmış olmasıdır [184].

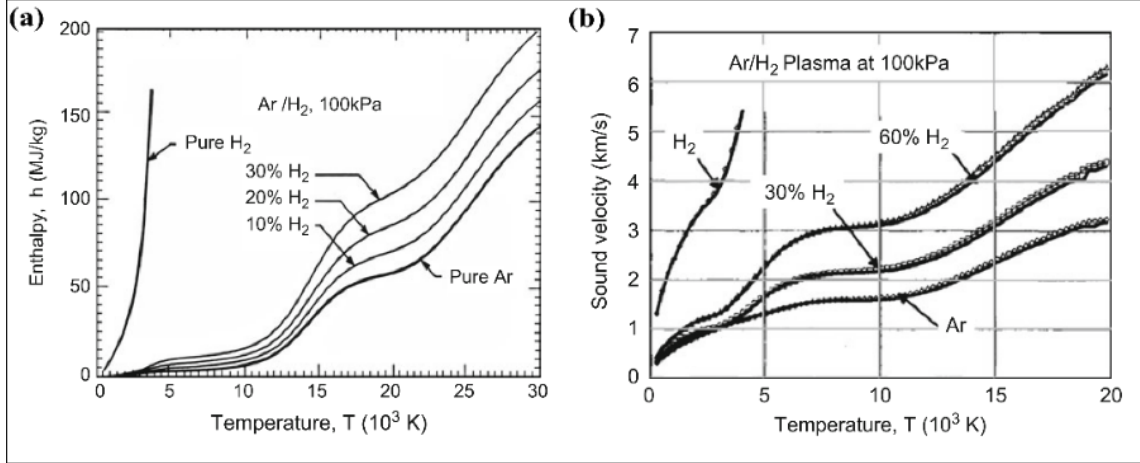
Plazma modelleme çalışmalarının güvenilirliği büyük ölçüde kullanılan saf gaz veya karışım gazlarının yüksek sıcaklıklardaki termodinamik ve taşınım özelliklerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. İki temel yaklaşım olan BTD ve OBTD ile plazma modellenmesinde bu gaz özellikleri farklılık gösterir. BTD varsayımına göre gaz özellikleri Murphy tarafından araştırılmış [204, 205] ve derlenmiştir [171]. Şekil 3.6’da plazma modelleme işlemlerinde kullanılan çeşitli gazların özelliklerine ait bir derleme sunulmuştur. Yalnızca argon ve hidrojen kullanımına yönelik çalışmalardan Paik ve arkadaşları [164] hidrojenin argona göre daha yüksek olan termal iletkenliği nedeniyle, ark kolonunun çapını azaltacağını ve argona göre daha yüksek hızlar elde edileceğini bildirmişlerdir.



Şekil 3.6. Yaygın plazma gazlarının sabit basınçtaki a) Termal iletkenlik, b)elektriksel iletkenlik, c) vizkosite, (d) özgül ısı grafikleri [171]

Farklı karışım gazları kullanarak yapılan modelleme çalışmalarından Pateyron ve arkadaşları [206, 207] argona hidrojen ilavesi ile ilgili olarak Şekil 3.7'deki sonuçları paylaşmışlardır. Araştırmacı, argona belirli oranda (% 10-20-30) hidrojen ilavesinin karışımın entalpi değerlerini artırdığı katkı oranına bağlı olarak yaklaşık 4 000 K sıcaklıktan itibaren ayrışmanın gerçekleştiğini bildirmişlerdir (Şekil 3.7-a). Ayrıca Şekil 3.7-b'de hidrojen ilavesinin ses hızına etkisini göstermişler bu hız değerlerinin tabanca ucuna Laval nozul ilave edilerek daha da arttırılabileceğini belirtmişlerdir. Bu yayını referans alan Trelles de [152] hidrojen katkı oranına bağlı olarak ayrışma ve iyonlaşma sıcaklıklarının olduğunu belirtmiştir. Ghorui ve Das [9]sırasıyla 80:20 ve 20:80 nitrojen:oksijen karışım gazı kullanarak yaptıkları çalışmada, oksijen konsantrasyonu arttıkça ark voltajının azaldığını, çıkış kesitindeki hız ve sıcaklık profillerinin tepe noktalarının düştüğünü bildirmişlerdir. Araştırmacılara göre eğer iki diatomik gaz kullanılırsa ve oranları değiştirilirse, plazma özelliklerinde meydana gelen değişiklik önemlidir, ancak çok sert değildir. Aynısı iki monatomik gaz plazma gazı olarak kullanılırsa ve oranları değiştirilirse de geçerlidir. Selvan ve arkadaşları [208] argon gazına (20, 25, 30 SLPM) nitrojen gazı (3 SLPM) ilavesinin etkilerini önceki çalışmaları [209, 210] ile birlikte incelemişlerdir. Buna göre azot içeriğinin tabanca gücü ve verim üzerindeki etkisinin argon gaz akış hızından daha güçlü olduğunu bildirmişlerdir. Ayrıca araştırmacılara göre her durumda (Argon akış hızı 20, 25, 30 SLPM)

azot gazı akış hızı 3 SLPM'ye sabitlendiğinden, argon gazı akış hızındaki bir artış plazma gazı karışımındaki azot içeriğini azaltmıştır. Argon gazı akış hızındaki bir artış, tabanca gücünü ve verimliliğini artırabilse de, plazma gazındaki azot içeriğindeki bir azalma, tabanca gücünü ve verimliliğini düşürücü etkiye sebep olmuştur.



Şekil 3.7. Argon gazına hidrojen ilavesinin a) entalpi ve b) ses hızı üzerine etkisi

Deneysel çalışmalardan Nogues ve arkadaşları [197] argon-hidrojen ve hidrojen-nitrojen karışım gazları kullanarak iki farklı plazma tabancası üzerinde araştırma yapmışlardır. Buna göre voltaj dalgalanmaları hidrojen-nitrojen plazmalarında daha fazladır ve hidrojen yüzdesiyle artmasıyla değişmektedir. Bu etki argon-hidrojen karışım gazlarındaki hidrojen yüzdesinin artırılması veya elektrot geometrisinin değiştirilmesi durumunda aynı özellikleri göstermez. Tiwari ve arkadaşları [186] argon, nitrojen ve oksijen gazı kullanımında plazma durumun kararlılığı üzerine çalışmışlardır. Modelleme çalışmalarında en yüksek kararsızlık (türbülans yoğunluğu) havada en düşük ise argon plazmasında ortaya çıkmıştır. Jet mesafelerinde ise en kısa mesafe argon gazında elde edilmiştir. Farklılıklar, plazma gazlarının iç termodinamik ve taşıma özelliklerinden kaynaklandığını belirtmişler ve sonuçları deneysel olarak karşılaştırmışlardır. Pan ve arkadaşları [198] argon, argon-hidrojen, ve argon-nitrojen karışım gazları kullanarak yaptıkları araştırmada düşük basınçta çalışma gazının dağılık ya da daralmış ark köklerinin oluşumunda önemli bir rolü olduğunu bildirmişlerdir. Buna göre sadece argon gazı kullanımında ark kökü yayılmış, az miktarda bile olsa hidrojen ilavesi arkı keskin ve daralmış hale getirmiş, nitrojen ilavesi ise ara davranış sergilemiştir. Ghorui ve arkadaşları [211] argon gazına farklı oranlarda (1-5 SLM) hidrojen ilavesinin ark kararsızlığı üzerine etkilerini voltaj dalgalanmalarından yola çıkarak belirlemeye çalışmışlardır. Farklı ark akımlarında (300, 500, 700 A) az miktarda hidrojen

ilavesinin bile ark kararsızlığını artırdığını deneysel olarak tespit etmişlerdir. Zhou ve Heberlein [17] argon gazına farklı oranlarda (% 2 ve % 28) hidrojen ilave etmişler hidrojen yüzdesindeki artışın ark kolonunda daha yüksek elektrot yoğunluğu ve sıcaklıklara sahip daraltılmış bir ark oluşumuna sebep olduğunu bildirmişlerdir.

3.3. Tabanca Tasarım Parametreleri

DC TEAT tabancalarının malzeme alanında mevcut ve potansiyel geniş bir kullanım alanına sahip olması, her alana uyan evrensel bir plazma tabancasının olmadığını ortaya çıkartmıştır. Örneğin plazma kesme ve kaynak işlemlerinde kullanılan tabancalar (transferred) ile sprey kaplama da kullanılan tabancalar (non-transferred) birbirinden farklıdır. DC TEAT tabancalar olarak aynı kategoride sınıflandırılan tabancalar da uygulama alanına göre farklılıklar göstermektedir [146, 147, 156]. Bu farklılıklara rağmen bir plazma tabancasından aşağıdaki şartları sağlaması beklenir [140, 157, 212].

- Yüksek enerji verimliliğine sahip olmalı, verilen elektrik enerjisini en yüksek enerji düzeyinde termal enerjiye dönüştürebilmeli
- Çok çeşitli inert (Ar, He vb.) ve kimyasal olarak aktif (N_2 , H_2 , O_2 , Hava, CH_4 , CO_2 vb.) gazları ısıtabilmesi
- Proses güvenilirliği ve doğrudan ürün maliyetine etki eden uzun elektrot ömrüne sahip olması
- Teknolojinin laboratuvar şartları haricinde endüstriyel ölçekte kullanılabilir olması için güvenilir ve emniyetli olması
- Oluşan yüksek sıcaklık ve hız dağılımlarını eksenel simetrik olarak eşit dağıtabilmesi
- Farklı endüstriyel uygulamalarda kullanılabilmesi için geniş aralıkta ölçeklendirilebilmesi

Bu şartları sağlayan yüksek verimli ve uzun ömürlü tabanca tasarımı yapabilmek için aşağıda başlıklar halinde verilen çok sayıda etkili parametre bulunmaktadır. Öncesinde bu parametreler bilinip tasarıma başlanmalıdır. Örneğin tabanca içerisindeki ısı transfer mekanizmalarının bilinip ona uygun geometri ve malzeme seçimi yapılmalıdır. Veya kaçınılmaz olan erozyon sürecinin bilinip kontrol altına alabilmek için gaz yönlendirici, manyetik alan oluşturma gibi mekanizmalarla tasarım genişletilmelidir.

3.3.1. Elektrotlarda ısı transfer şekilleri

Plazma tabancasını oluşturan başlıca elemanlardan olan elektrotların çalışma esnasında yüksek sıcaklıklara maruz kalmaları ısı transfer mekanizmalarının bilinmesini gerektirmektedir. Katot için ısı transfer mekanizmaları joule ısıtma, iyon bombardımanı, taşınım, iletim, radyasyon ve elektron emisyonudur [213]. Şekil 3.8’de şematik olarak gösterilen bu mekanizmalar eş zamanlı olarak katoda veya plazma kolonuna bölgesel ısı akısı sağlar. Katot için başlıca ısıtma mekanizması sırasıyla akım yoğunluğu ve elektrik alanın $(\vec{j} \cdot \vec{E})$. bir fonksiyonu olarak Joule ısıtmadır [13]. En yüksek akım yoğunluğunun olduğu katodun yakınındaki bölgede gaz iyonizasyonu ve elektrik iletkenliğindeki artış Joule ısıtmayı artırarak ısı yüküne (yaklaşık 25 000 K) sebep olur [214]. Diğer ısı transfer mekanizmalarının da varlığı nedeniyle katot üzerindeki durum anoda göre daha karmaşıktır. Çünkü termiyonik emisyon ve diğer ikincil mekanizmalar (taşınım, iletim, radyasyon) katot üzerinde soğutma etkisi oluşturlar [9]. Emisyon için yeterli katot sıcaklığının korunması önemli olduğundan, katodun başka bir mekanizma tarafından ısıtılması gereklidir [215]. Bu mekanizma iyon bombardımanıdır. Pozitif iyonlar, katottaki voltaj düşmesi ve bombardıman nedeniyle hızlandırılır, etrafındaki elektronlarla birleşir böylece iyonların kinetik ve nötrleşme enerjileri katot üzerinde ısı akısına dönüşür ve Joule ısıtmaya katkıda bulunur [216]. Modelleme çalışmalarında oda sıcaklığından tabanca içerisine giren gazın joule ısıtma etkisiyle ani olarak ısınması söz konusudur. Bu ani ısınma ise modelleme çalışmalarında enerji ve elektrik potansiyel denklemlerinin ıraksamasına sebep olmaktadır. Bu durumun engellenebilmesi için gaz giriş sıcaklığı 3 500 K olarak alınmıştır [217]. Benzer şekilde Paik ve arkadaşları ise 1 000 K olarak kabul etmişlerdir [164].

Katodun temel görevi elektron yaymaktır. Bunu termiyonik ve alan emisyonları (*ing*; thermionic and field emission) şeklinde yapar [218]. Termiyonik emisyon, yüksek sıcaklıklardan, alan emisyonları ise manyetik alandan dolayı katot malzemesinden elektron emisyonudur. Bu yüzden termiyonik emisyon yüzey sıcaklığına, T_c (K), alan emisyonları ise elektrik alanına, E_c (V/m) bağlıdır [142]. Katot üzerindeki elektron akım yoğunluğu, J_{em} (A/m²) Richardson-Dushman eşitliği ile tahmin edilir.

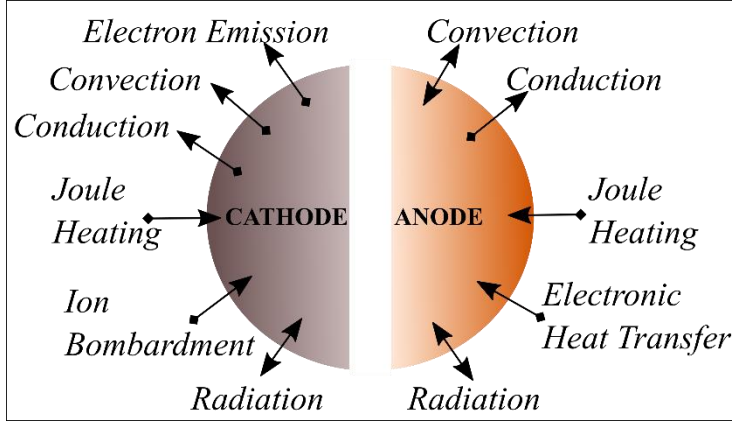
$$J_{em} = A_g T_k^2 \exp \left[-\frac{e}{k_B T_k} (\phi_c - \nabla \phi) \right] \quad (3.3)$$

Burada, A_g sabit değer (toryumlu tungsten için $3,2 \times 10^4 \text{ A/(m}^2\text{K}^2)$ [219]), ϕ_c katodun iş fonksiyonu (toryumlu tungsten için 2,6 eV [220], saf tungsten için 4,2 eV [182]), k_b Boltzmann sabiti ($1,38 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$), e elektron yüküdür (C). Çalışma esnasında iş fonksiyonundaki düşüş $\nabla\phi$ Schottky etkisi olarak bilinen alan emisyonlarının Eş. 3.3'teki denkleme ilavesini gerektirir. Benilov ve arkadaşları [221] Schottky etkisiyle güçlendirilen termiyonik emisyonun elektrik arklarından dolayı oluşan katot emisyonu üzerinde etkili bir mekanizma olduğunu bildirmişlerdir. Bu etki Eş. 3.4'te ifade edildiği gibidir.

$$\nabla\phi = \sqrt{\frac{e^3 E_c}{4\pi\epsilon_0}} \quad (3.4)$$

Burada ϵ_0 boş alanın geçirgenliğidir (C^2/N^2). Eş. 3.3 ve Eş. 3.4 denklemlerine aynı denkleme birleştirilebilir. Buna göre sıcaklık ve elektrik alanın yükselmesi ile birlikte elektron akım yoğunluğu artmaktadır. Bununla birlikte aşırı ısıtma elektrotun erimesine neden olur. Araştırmacılar tarafından bu problem göz önünde bulundurularak katot tasarımı su ile soğutma yapılacak şekilde güncellenmiştir.

Taşıyım ve iletim katodun soğutulması üzerinde etkili diğer mekanizmalardandır [222]. Plazma tabancalarında gaz, yönlendiriciden ortama sokularak katot üzerinden arkın olduğu bölgeye sokulmaktadır. Bu yüzden oda sıcaklığındaki gaz katot üzerinden geçerek plazma bölgesine ulaşınca ani bir şekilde yüksek sıcaklıklara ulaşmaktadır. Bu işlem sırasında oda sıcaklığındaki gaz katodun taşıyım yoluyla soğutma gerçekleştirir. İletim yoluyla ısı transferi ise katodun temas halinde bulunduğu tabanca elemanları üzerinden gerçekleşir. Plazma tabancalarında katot genellikle bir metal veya yalıtkan bir malzeme ile merkezlenir. Böylece katodun temas ettiği herhangi bir eleman ısı emicisi olarak işlev görür ve iletim yoluyla katodun soğutulmasına katkıda bulunur. Radyasyon katodun ısı transferi üzerinde hem soğutma hem ısıtma olarak katkıda bulunur. Plazma ve iyon bombardımanından kaynaklanan radyasyon katoda ısıtma olarak katkıda bulunurken, katodu çevreleyen soğuk gaz ile etkileşimi soğutma olarak katkıda bulunur [221]. Bu diğer ısı transfer mekanizmaları ana mekanizma olan Joule ısıtma ile gerçekleşen mekanizmaya göre oldukça küçüktür.



Şekil 3.8. Elektrotlar üzerinde etkili olan ısı transfer mekanizmaları

Anot için geçerli ısı transfer mekanizmaları ise katoda benzer bir şekilde Joule ısıtma, taşınım, iletim, radyasyon ve elektronik ısı transferidir (Şekil 3.8). Fakat bunların katkı biçimleri katodan farklıdır. Anot için başlıca ısı transfer mekanizması taşınımdır. Oda sıcaklığındaki plazma gazı elektrik arkının olduğu yüksek sıcaklıklara sahip bölgeye girer genişler, iyonlaşır ve plazmayı oluşturur. Genleşmiş aşırı sıcak plazma gazı duvarla birlikte taşınır ve ısı transferine sebep olur. Duvar ile plazma arasında kalan soğuk sınır tabakası anoda aktarılan ısıyı sınırlandırır [9]. Burada katodun yanlış hizalanması plazma jetinin anot kanalı boyunca değil de doğrudan anot üzerinde belirli bir noktaya akmasına sebep olacak ve taşınım ile ısı transferini ciddi oranda yükseltecektir. Ayrıca anot kanalının çapı da önemlidir. Anot kanalı çapının artması plazma jet eksenine ile anot duvarı arasındaki mesafeyi artırarak ısı transferini azaltabilir. Fakat anot kanal çapı ile birlikte gaz debisinin artışı soğuk sınır tabakasının arkı engellemesine sebep olabilir [137]. Trelles ve Heberlein [179] anot çapının benzer bir şekilde arkın yeniden eklenme süreci üzerinde de etkili olduğunu ve anot çapı arttıkça yeniden bağlanma sıklığının azaldığını bildirmişlerdir. Bu çalışmaya göre anot çapı arttıkça tabanca çıkışındaki ortalama plazma jeti sıcaklığı da azalmıştır. Joule ısıtma etkisi, anodun katoda göre daha büyük bir kütleye sahip olmasından dolayı katoda nispeten daha etkisiz bir ısı transfer mekanizmasıdır. Anot duvarında en yüksek sıcaklıkların olduğu ark kökü eklenti bölgesindeki sıcaklık artışına katkıda bulunur [210]. Fakat anodun büyük kütlesi ve daha etkin bir şekilde soğutulması daha düşük bir elektrik direncine ve Joule ısıtmadan kaynaklanan ısıyı daha rahat dağıtmasına sebep olur [9]. Plazma tabanca ile yapılan işlemlerde arkın dinamik davranışı (voltaj dalgalanmaları) soğuk sınır tabaka ile olan ilişkisine bağlıdır. Moreau ve arkadaşları [159] Joule ısıtma mekanizmasının plazma gazının genişlemesine etki ederek soğuk sınır tabaka kalınlığında hafif bir azalmaya neden olduğunu

bildirmişlerdir. Bu durumun ise arkın kararsız (ing; Restrike mode) modda çalışabilmesi için minimum soğuk sınır tabaka kalınlığını sağlayacağını belirtmişlerdir.

Bu mekanizmaların yanı sıra elektronik ısı transferi de ark kökü eklentisinin olduğu noktada önemli bir mekanizmadır. Çünkü anoda ısı en yoğun olarak ark kökü eklentisinin olduğu bölgeden transfer edilir. Ark kökü eklentisinin olduğu bölgedeki ısı transferini konunun ilk çalışmalarından Shih [223] Eş. 3.5'deki denklem ile ifade etmiştir.

$$q_{el} = J \frac{5k_B T_e}{2e} + JV + J\phi \quad (3.5)$$

Burada V ark voltajı, ϕ anot malzemesinin iş fonksiyonu, J ise akım yoğunluğudur. Denklemde ilk terim elektronların termal enerjisini, ikinci terim elektrik alanından elde edilen enerjiyi ve son terim ise bir elektron duvarda emildiğinde serbest kalan enerjiyi ifade etmektedir. Burada en etkili parametre her bir terimin çarpıldığı akım yoğunluğudur. Akım yoğunluğu arttıkça ısı transferi artmaktadır.

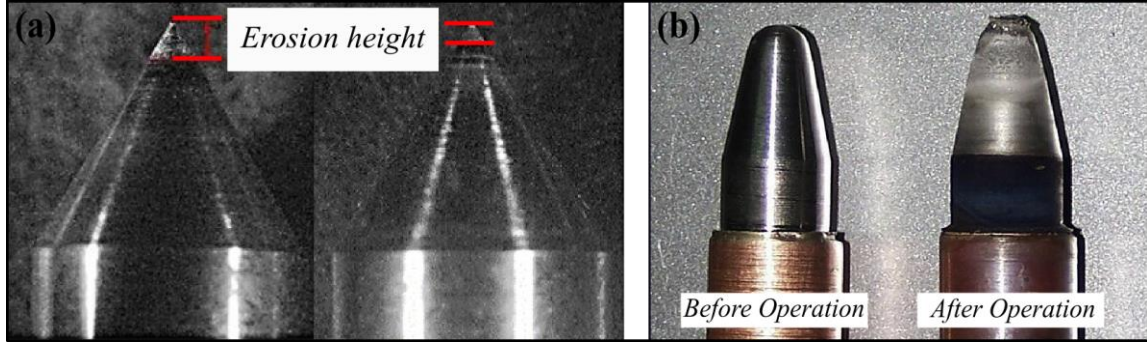
Katoda benzer bir şekilde anotta iletim yoğunluğuyla soğuma etkisi altındadır [214]. Çoğu tabanca tasarımında anot paslanmaz çelik malzeme ile kaplıdır ve merkezlendiği bölgede diğer tabanca elemanları ile temas halindedir. Böylece temas ettiği tabanca elemanlarına ısı yayarak iletim yoluyla soğuma gerçekleştirilir. Radyasyon ise diğer bir ısı transfer mekanizmasıdır. Katoda benzer bir şekilde ısıtma ve soğutma etkisine sahiptir. Plazma kolununun aşırı yüksek sıcaklığı nedeniyle, anot duvarı radyasyondan dolayı önemli miktarda ısı alır. Fakat bu ısıнын bir kısmı anot duvarı tarafından plazma durumuna bir kısmı anodun atmosfer ile temas ettiği dış kısmı tarafından çevreye bir kısmı ise soğutma suyuna transfer edilir. Bu nedenlerden dolayı radyasyonun anot üzerindeki net etkisi diğer ısı transfer mekanizmalarına nispeten oldukça küçüktür. Li ve arkadaşları [192] tarafından yapılan modelleme çalışmasına göre anod üzerine radyasyon ve elektron entalpisinin etkisinin yaklaşık %8 olduğunu bildirmişlerdir. Araştırmacılar bu sonucu düşük verimle (yaklaşık %40) çalışan plazma tabancaları için tahmin etmektedirler.

3.3.2. Elektrotların erozyonu

Bir DC TEAT tabancasının ömrü genellikle elektrotların erozyonuna bağlı olduğundan bilinmesi önemlidir. Örneğin spreyci kaplama işleminde uzun çalışma süreleri (55 saat)

sonucunda aşınan elektrotlar tabanca gücünü düşürür bu ise doğrudan kaplamanın termomekanik özelliklerine etki eder [224]. Katotun erozyonuna sebep olan birçok mekanizma bulunmasına rağmen bunların başında difüzyon ve buharlaşma gelmektedir [157, 225]. Katot, tungstenin içerisindeki toryum ilavesinin buharlaşması ve difüzyona uğraması nedeniyle aşınır [15] ve bu erozyon daha düşük bir plazma akış hızına yol açar [187]. Elektrik arkı dolayısıyla oluşan yüksek sıcaklıklar katot malzemesinin yüzey morfolojisini bozarak erozyonuna sebep olmaktadır. Buna ek olarak çoğu durumda eriyen katot malzemesinin yüksek gaz akışı tarafından uzaklaştırılması da katotun erozyonuna sebep olmaktadır [157, 225]. Ayrıca ilk ateşleme esnasında yüksek voltajlar yüzey gerilim kuvvetleri ile dengelenemeyen yüksek iyon-akış ve elektromanyetik basınçlara yol açarak erozyona sebep olmaktadır [15]. Çünkü katodun aşınması büyük oranda ilk ateşleme esnasında gelişmektedir [140]. Araştırmacılar bu ve bunun gibi birçok elektrot aşınma mekanizmasını tartışmalarına rağmen cevaplanması gereken oldukça fazla soru olduğu konusunda hemfikirlerdir [14, 16, 225–230].

Katotta meydana gelen erozyonun önlenmesi veya azaltılmasına yönelik çalışmalar etkin bir soğutma suyu kullanımını tavsiye etmektedir. Selvan ve arkadaşları toryum katkılı tungsten katot malzemesi ve 40 kW'lık tabanca kullanılarak testler gerçekleştirmişler ve katotta meydana gelen erozyonu Şekil 3.9-b'deki gibi göstermişlerdir. Katodun bu kadar kısa sürede gerçekleşen belirgin erozyonunu yetersiz soğutulmasına bağlamışlardır [21]. Liu ve arkadaşları [231] 3 farklı katot malzemesi için soğutma yapılan ve yapılmayan durumunu kıyaslamışlardır (Şekil 3.9-a). Çalışma sonuçlarına göre su soğutmalı üç tip tungsten erozyon yüksekliği, soğutma modunda olmayandan daha küçük gerçekleşmiştir. Katotta meydana gelen aşınmanın tespit edilmesinde genellikle ağırlık kaybı metodu uygulanır. Katot çalışma sonunda tartılarak aşınmanın büyüklüğü tespit edilmeye çalışılır [225, 226, 232, 233]. Tanaka ve arkadaşları [226] ağırlık ölçümleri sonucunda katottaki aşınmayı 10mg/dk olarak tespit etmişlerdir. Bu değeri hesapladıkları buharlaşma ve yüksek hızlı kamera ile görüntüledikleri difüzyon yoluyla malzeme kayıplarını belirleyerek doğrulamışlardır. Fakat Zhou ve arkadaşları [17] ağırlık kaybı ölçümünün ark bağlantısından uzak bölgelerde difüzyon ve yeniden konumlanma olaylarının varlığının bilinmesinden dolayı erozyonun sağlıklı bir şekilde tespit edilmesi için yetersiz olduğu bildirmişlerdir. Ağırlık kaybı verileri makro ve mikro düzeyde incelenerek desteklenmelidir.



Şekil 3.9. Toryum katkılı tungstenin a) soğutma suyu kullanılmaması ve kullanılması durumunda [231] b) çalışmaya başlamadan ve 7 saat çalıştıktan sonraki gerçek görüntüsü [21]

Katoda benzer bir şekilde buharlaşma yoluyla erozyona uğrayan diğer önemli tabanca bileşeni ise anottur. Fakat anodun erozyon mekanizması katoda göre daha karmaşıktır. Bu karmaşıklık anodun doğrudan voltaj dalgalanmalarına ve ark kökü eklentisine maruz kaldığından kaynaklanmaktadır. Bu eklentinin olduğu bölgede yüksek sıcaklık bölgesi geliştirir [234]. Uzun çalışma sürelerinde voltaj düşüşleri keskinleşir ve eriyen anot malzemesi gaz akış hızının da etkisiyle buharlaşmadan tabanca dışına atılır [157, 225]. Bu durum özellikle spreycaplama işleminde kaplamanın özellikleri üzerinde olumsuz etki oluşturur. Bu yüzden anot genellikle tam olarak erozyona uğramadan çok öncesinde değiştirilir [140]. Deneysel çalışmalar ark kökünün bir noktada sabitlendiğini ve o bölgeden çok uzaklaşmayarak erozyona sebep olduğunu bildirmişlerdir. Bu durum sayısal çalışmalarda da belirtilmiştir [7, 19, 176, 234, 235]. Tipik olarak transfer edilmemiş bir ark plazma tabancasında, elektrik giriş gücünün yaklaşık yarısı tabanca bileşenlerine termal ısı yükü olarak gider. Katot bu ısı yükünün sadece % 1-5'ine maruz kalırken, anot, kalan ısı yükünün büyük bir bölümünü paylaşır [9]. Dolayısıyla anot katottan daha erken aşınmaktadır ve erozyonun önlenmesi veya azaltılmasına yönelik çalışmalar anot üzerine yoğunlaşmaktadır. Şekil 3.10'da bakır anodun erozyona uğramış halinin gerçek görüntüsüne ait fotoğraflar verilmiştir. Ayrıca anot erozyonunu en aza indirmek ve tabanca ömrünü uzatmak amacıyla Şekil 3.10.c 'de görülen F4 Sulzer-Metco tabancasına ait farklı (tungsten-bakır) malzeme kombinasyonları da mevcuttur [236]. Guo ve arkadaşları bu tabanca ile yaptıkları deneysel çalışma sonucunda erozyon bölgesinin kesit görüntüsünü paylaşmışlardır. Fakat ilgili çalışmada kaç saat çalışma sonrasında bu erozyonun meydana geldiği belirtilmemiştir [7].



Şekil 3.10. Bakır malzemeden yapılmış anodun a) farklı akım ve debi değerlerinde 7 saat çalışma sonrasındaki erozyon durumu [21] b) 800A akım ve $2.1 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ değerinde değerinde bilinmeyen çalışma süresi sonucu erozyon durumu [174] c) Tungsten eklentili F4 Sulzer Metco tabanca anodunun 400A akım ve $40\text{Ar}+8\text{H}_2$ debi değerinde bilinmeyen çalışma süresi sonucu erozyon durumu [7]

3.3.3. Elektrot erozyonu önleme yöntemleri

Tipik olarak erozyonun tam olarak önlenmesi oldukça zordur fakat azaltılması veya kontrol altına alınması mümkündür. Bu azaltma ve kontrol altına alma yöntemleri doğrudan tasarım değişiklikleri gerektireceğinden başlangıçta bilinmesi önemlidir. Bunlardan bazıları elektrot malzemesi değişiklikleri [197, 7], manyetik alan ile arkın yönlendirilmesi [237–239] ve gazın girdap etkisinden [219, 240] faydalanılması ve koruyucu gaz [163] ve etkin bir soğutma suyu [241] kullanmaktır. Geometri ve malzeme değiştirilmesinin amacı yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemeler kullanılarak erozyonun azaltılması ve tabanca ömrünün uzatılmasıdır. Manyetik alan oluşturmadaki amaç akış kuvvetlerine göre lorentz kuvvetlerin etkinliği arttırmak ve arkın kontrolünü sağlamaktır. Gazın girdap etkilerinden faydalanılmasındaki amaç akış kuvvetlerinin etkisi ile arkın bir noktada sabitlenmesinin engelleyerek ve o bölgeyi erozyona uğratmasının önüne geçmektir. Koruyucu veya örtü gazı kullanılmasındaki amaç ise ark kök eklentisini aşağı doğru iterek plazma kolonunu sıkıştırmaktır. Bu sayede düşük elektrik akımlarında bile yüksek güç elde edilmesi ve anot erozyonunun azaltılması sağlanır [163]. Yukarıda sayılan bu erozyon önleme yöntemlerinden koruyucu gaz kullanımı hariç yaygın bir şekilde uygulanmaktadır. Lawton [242], Hu ve arkadaşları [177] ve Goyal ve arkadaşları [243] anot dışında manyetik alan oluşturarak tabanca içerisindeki ark kökü eklentisi hareketleri üzerine etkisini incelemişlerdir. Ölçülen voltaj dalgalanmaları, ark kökü eklentisinin harici bir manyetik alan tarafından kontrol edilebileceğini göstermiştir. Çünkü ark kökü üzerinde etkili olan Lorentz kuvvetleri dış manyetik alan kuvvetlerine bağlı olacaktır. Bu sayede ark kökü eklentisinin bir noktaya sabitlenip oluşturduğu erozyonun önüne geçilmiş olur. Park ve arkadaşları [239] manyetik alanın etkilerini yaptıkları modelleme çalışması ile incelemişlerdir. Buna göre

manyetik alanın tahrikiyle dönen ark kökü eklentisi, tabanca içerisinde helisel sıcaklık dağılımlarına sebep olmaktadır. Ark kökünün dönme hızı, dış manyetik alan kuvvetinin kareköküyle orantılı olarak artmıştır. Giriş akımının artması da dönme hızını arttırırken, debi artışı ile azalmıştır. Wang ve arkadaşları [237, 238] manyetik alan gücünün katot ve anottaki ark kökü eklentilerinin şekli üzerinde etkili bir parametre olduğunu vurgulamışlardır. Düşük manyetik alan kuvvetleri anot üzerinde sıkışmış bir ark köküne sebep olurken katot üzerinde noktasal (ing, spot mode) şeklidedir. Manyetik alan gücünün arttırılmasıyla anot ve katot ark kök eklentileri yayılmış şekilde (ing, diffuse mode) eğilim oluşturmaktadır. Öte yandan Bobzin ve arkadaşları [244] harici manyetik alan ile yönlendirdikleri ark kökü eklentisini içeren tabanca ile kaplama yapmış, kaplamanın gözenekliliği, sertliği ve faz bileşimi gibi özellikleri üzerinde belirgin bir etkisinin olmadığını tespit etmiştir.

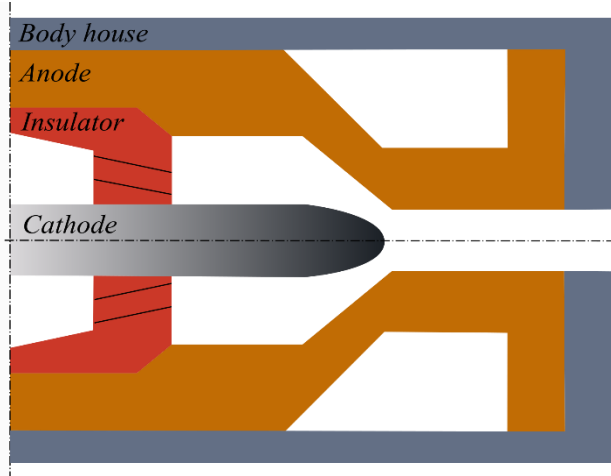
Toplam gaz akış hızı ark kökü eklentisinin kararsızlığı üzerinde en etkili parametre olmasına rağmen gaz enjeksiyon yöntemi de önemlidir. Çünkü gazın girdaplı bir şekilde plazma bölgesine girmesi eksenel şekilde girmesinden daha yüksek ortalama gerilime neden olur. Bu ise voltaj dalgalanmalarının genliğini düşürerek erozyon azaltımına yardımcı olur. Burada girdap etkisi, tekrarlı bir şekilde yeni bir ark kök eklentisine sebep olarak voltaj dalgalanmalarını periyodik moda (ing. Takeover mode) geçirir. Düz akışlar ise kararsız modlara (ing. Restrike mode) sebep olmaktadır [20, 19]. Girdap etkisi altında voltaj dalgalanmaları Liang ve Groll [219] tarafından gaz giriş kısmına girdap sınır şartı tanımlanarak yapılan modelleme çalışmasında Helmholtz rezonatör yasasını izleyen ark kararsızlığı olarak adlandırılmıştır. Cao ve arkadaşları [240], nitrojen gazı ile çalışan bir plazma tabancasına farklı enjeksiyon açısına sahip (0-15-30-45-60 derece) bir yönlendirici ekleyerek plazma jetinin özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Gaz enjeksiyon açısı ve akış hızı arttıkça tabanca ark voltajının ve ısı veriminin arttığını bildirmiştir. Plazma jet uzunluğunu da ölçen araştırmacılar 0-30 derece gaz enjeksiyon açılarında enjeksiyon açısı arttıkça jet uzunluğunun da arttığını, 45-60 derecelerde ise gaz akış hızı ile birlikte azaldığını tespit etmişlerdir. Vadikkeetil ve arkadaşları [163, 150] plazma bölgesine örtü gazı enjekte ettikleri tabanca ile çalışmalar yapmışlardır. Araştırmacılar eksenel olarak nitrojen gazı enjekte edilen bir tabanca sistemine üç farklı geometri konfigürasyonuna sahip gaz yönlendiricisi ile örtü gazı enjekte etmişlerdir. Buna göre düşük eksenel gaz akış hızlarında (15SLM) örtü gazı kullanmanın plazma tabancasının elektro-termal verimi üzerinde güçlü bir etki oluşturduğu fakat yüksek gaz akış hızlarında çok etkili olmadığını deneysel olarak tespit etmişlerdir. Gazın girdap şeklinde plazma oluşum bölgesine sokulması ile ilgili olarak

sayısal çalışmalar da yapılmıştır. Bu çalışmalardan Felipini ve arkadaşları [214] atmosfer basıncında, 9,83 ve 13,83 l/dak gaz akış hızında argon gazı kullanarak farklı girdap sayılarının (0-7) plazma jeti özelliklerine etkisini modellemişlerdir. Buna göre radyal mesafede ölçtükleri sıcaklık ve hız değerlerinin girdap sayısı üçten fazla olduğu durumda düşme eğiliminde olduklarını bildirmişlerdir.

Plazma tabancalarında ark işlemi elektrotlar üzerinde iletim, taşınım ve radyasyona bağlı olarak yüksek ısı akıları oluşturur [9]. Dahası kök eklentilerindeki akım yoğunlukları katot için 10^{10} - 10^{12} A/m² seviyelerine anot için ise 10^8 - 10^9 A/m² seviyelerine ulaşabilmektedir. Bu ise ısı yayılımı ile birlikte yoğun ohmik kayıplara yol açmaktadır. Yüksek ısı akıları ve ohmik kayıplar elektrotların ömrü ve malzeme uygulamalarında çözülmesi gerek bir problemdir. Mevcut malzemeler ile bu zorlu koşulları karşılamak oldukça kısa ömürlü ve verimsiz bir tabanca anlamına gelecektir [140]. Bu sebeple çoğu durumda etkin bir soğutma suyu kullanılarak elektrot yüzeylerinden verimli bir ısı transferinin yapılması gereklidir [245, 246]. Plazma tabancaları ile literatür çalışmaları daha önemli olduğu düşünülen ark kararsızlıkları gibi tabanca özellikleri üzerine yoğunlaşmış olduğundan doğrudan elektrotların soğutulmasına yönelik çalışmalar konu ile ilgili deneysel çalışmaların zorluğu ve maliyeti nedeniyle oldukça sınırlıdır. Bu sınırlı çalışmalardan Ashakov ve arkadaşları [247] etkin soğutma sağlamak amacıyla farklı bir tabanca tasarımı yaparak sayısal çalışmalar ile karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar tabancanın 150-200 A aralığında 250-300 saat çalışma ömrünü olacağını iddia etmektedirler. Liu ve arkadaşları [241] 30 dakika boyunca iki farklı sıcaklıkta (25 ve 60 °C) soğutma suyu kullanarak plazma tabancasını soğutmuşlardır. Yazarlara göre elektrotları soğutmak için sıcak su kullanılması voltaj dalgalanmalarını azaltarak elektrot aşınmasını büyük ölçüde azaltır.

3.3.4. Elektrotların ve diğer elemanların malzemeleri

Bir termal DC TEAT plazma tabancasını oluşturan ana bileşenler Şekil 3.11’de gösterilen katot, anot, yalıtım malzemesi ve bunları bir arada tutan dış kaplamadır. Bu bileşenlerin malzemelerinin seçiminde başlıca malzeme özellikleri elektriksel iletkenlik, ısı transferi ve aşınma davranışlarıdır. Malzeme seçimi endüstriyel uygulamalarda tabancanın ömrünü belirlediğinden önemlidir. Tabanca ömrünü belirleyen ana etken ise elektrotların (anot, katot) erezyonudur.



Şekil 3.11. Tabanca elemanlarının şematik gösterimi

Termal plazma tabancalarında elektronlar genellikle katot malzemesinden termiyonik emisyon ile sağlanır [140, 9]. Yani yüksek sıcaklıkların bir sonucudur [152]. Başarılı ve uzun ömürlü bir termal plazma işlemi için katot malzemesinden arkı kolay başlatması (düşük voltaj), yüksek elektron yayması (high electron emissivity), yüksek elektrik ve ısı iletkenlik, ark sürekliliğini sağlamak için daha düşük malzeme tüketimi (buharlaşma) ve elektrik gücündeki değişikliklerden etkilenmemesi gibi başlıca özellikleri sağlaması istenilir [225], [213]. Seçilecek malzemenin bu özelliklerin hepsini sağlaması oldukça zordur. Fakat en azından elektrot erezyonunu geciktirerek veya yavaşlatarak tabancanın ömrünü uzatacak malzeme seçimi yapmak gereklidir.

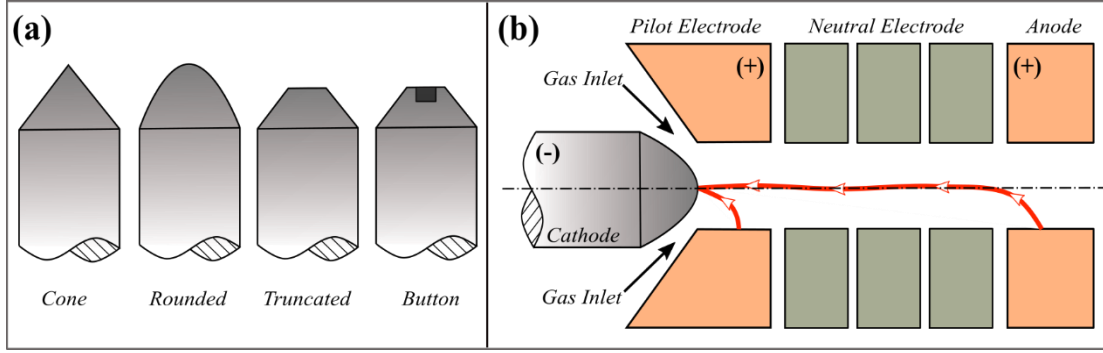
Katot malzemesi olarak yüksek erime sıcaklığı ve sertliği, geniş bir sıcaklık aralığında iyi elektriksel iletkenlik ve iyi korozyon direnci gibi malzeme özellikleri karışımına sahip olduğundan genellikle tungsten tercih edilir [248]. Saf tungsten, nispeten yüksek çalışma fonksiyonu (4.5 eV) nedeniyle katot malzemesi olarak nadiren kullanılır [140]. Çünkü elektronların termal enerjisi, malzemenin çalışma fonksiyonunu aşmaya yeterli olduğundan termiyonik emisyon belirginleşir. Saf tungsten yerine katkı maddeleri ile çalışma fonksiyonu düşürülmüş (Örn. Toryumlu tungsten 2.6 eV) katkılı tungstenler tercih edilir. Katot malzemesi, çoğu durumda (%98) ağırlıkça % 1-2 toryum katkılı ThO_2 [21, 150, 158, 163, 166, 219, 249], % 2 lantanit katkılı La_2O_3 [230], Y_2O_3 , CeO_2 , ZrO_2 , MgO veya ağırlıkça % 1 lantanit katkılı LaB_6 malzemeleri kullanılır [140], [162], [225]. Bu malzemelerden ThO_2 malzemesi en genel katot malzemesidir. Mükemmel ateşleme (düşük voltaj), elektronlarını kolayca serbest bıraktığından iyi termionik yayılım kabiliyeti ve yüksek ergime sıcaklığı gibi özelliklerinden dolayı tercih sebebidir [21, 36, 230]. Katkılı

tungsten katotlar genellikle ergime sıcaklıkları ($T \sim 3\,900\text{ K}$) yakınlarında çalışırlar. Bu yüzden etkin bir şekilde su soğutmalı olarak kullanılırlar [36]. Toryum katkılı tungsten kullanımı çok yaygın olmakla birlikte bu malzeme radyoaktiftir ve çevre dostu değildir. Heißl ve arkadaşları tarafından ThO_2 ve La_2O_3 malzemelerinden yapılmış katotlar ile yapılan deneysel karşılaştırma testleri La_2O_3 'ün daha yüksek elektron yayını ve arkın sürekliliğinde daha düşük sıcaklık gereksinimi nedeniyle ThO_2 yerine kullanılabileceğini göstermiştir [230]. Zhou ve Heberlein [17] saf tungsten ve %2 toryum katkılı tungsten ile yaptıkları testlerde malzeme değişiminin elektron yoğunluğu dağılımı üzerinde çok az bir etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Benzer etki erozyon davranışında da mevcuttur. Liu ve arkadaşları [231] 3 farklı katot malzemesi için soğutma yapılan ve yapılmayan durumunu kıyaslamışlardır. Çalışma sonuçlarına göre su soğutmalı üç tip tungsten erozyon yüksekliği, soğutma modunda olmayandan daha küçüktür. Bunların arasında, WL20 (Lantanyum ilaveli) performansı optimumdur, WT20 (toryum ilaveli) ve WY20 (itriyum ilaveli) erozyonu ciddi olarak artmaktadır. Ark oluşumunun kolaylığı ve sürekliliğinin sağlanması için anot malzemesinin de elektrik iletkenliğinin iyi olması ve oluşan çok yüksek sıcaklıklarda deforme olmaması amaçlanır. En iyi iletken malzemelerden bir tanesi bakırdır fakat ergime sıcaklığı düşüktür. Bunun için DC TEAT tabancalarının neredeyse tamamında su soğutmalı bakır malzeme tercih edilmektedir [21, 150, 151, 167, 169, 173, 219, 243, 250]. Ayrıca anot geometrisi katot geometrisine göre daha karmaşık olduğundan işlenebilirliğinin kolay olması ve maliyet açısından da ucuz olması istenilir. Bu özellikler anot malzemesi olarak bakırın kullanımını öne plana çıkartmıştır.

Tabancayı oluşturan diğer bileşenler ise yalıtım elemanları ve tüm bileşenleri bir arada tutan dış kaplamadır. Yalıtım elemanları anot ve katot arasında elektrik izolasyonu sağlayan ve gazın plazma bölgesine enjekte edilme şeklini belirleyen elemanlardır [157, 163, 213]. Bu elemanların yüksek sıcaklara karşı dayanıklı olması ve yalıtım işlevi gördüğünden elektriği iletmemesi istenilir. Termal plazma tabancalarında yalıtım malzemesi olarak fluoroplastik (Teflon[®], Vespel[®]), yüksek saflıkta bor nitrür (*ing.* Boron nitride) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) tercih edilirler [142, 157, 213, 248]. Tüm tabanca elemanlarını bir arada tutan dış kaplama malzemesi olarak ise paslanmaz çelik tercih edilir [251, 156].

3.3.5. Elektrotların şekli

Geleneksel tabanca, su soğutmalı çubuk şeklinde bir katot ve su soğutmalı eş merkezli (*ing. concentric*) bir anot içeren basit bir tasarıma sahiptir [159]. Katot malzemesi olarak genellikle katkılı tungsten elektrotların kullanıldığı bir önceki başlık altında ifade edilmiştir. Katkı malzemeleri tungstene göre daha düşük buharlaşma sıcaklıklarına sahip olduklarından ilk bir saatlik çalışma sonucunda buharlaşmaktadır ve sonrasında saf tungsten gibi davranmaktadır. Bu nedenle erozyon azaltımı katot şekline güçlü bir şekilde bağlıdır [140]. Katot şekli olarak koni [159, 17], radyüslü [21, 179], ucu kesik koni [17, 252, 15] ve bakır katot ucuna tungstenin gömülü olarak kullanıldığı buton tip [162, 253, 254] geometrilerde elektrotlar kullanılmaktadır. Bu geometrilere ait şematik görünüm Şekil 3.12-a'da gösterilmiştir. Koni şeklindeki katot ucu daha yüksek akım yoğunluğu ve elektron sıcaklıklarını koni tepesinde sabitleyerek düz ve ucu kesik koni şekilli katotlara göre en hızlı aşınan katot olarak bilinmektedir [140, 246]. Ucu kesik koni şeklindeki katot ise kararlı bir ark ve kolay ark oluşumunun (düşük voltaj) istenildiğinde tercih edilmektedir [246]. Bununla birlikte, katot üzerindeki ark bağlantı noktasının hareketini azaltmak için düz yüzeyin büyüklüğü sınırlandırılmalıdır [140]. Zhou ve arkadaşları [17, 252] koni ve ucu kesik koni şeklindeki katotlar deneysel çalışmalar yapmışlardır. Çalışma, her iki katot şeklinde elektronların sayı yoğunluklarının ark akım değeri, gaz ve basıncın aynı olmasından dolayı hemen hemen aynı olduğunu göstermiştir. Fakat elektron sıcaklıkları koni şeklindeki katotta daha dik katot sıcaklık dağılımı daha yüksek elektrik alanı oluşturduğundan kesik konik şeklindeki katota göre daha yüksektir. Venkatramani [200] düşük güç çıkışlı tabancalarda koni şeklinin, yüksek güç çıkışlı tabancalarda ise ucu kesik şekilli katotların kullanımının uygun olacağını bildirmiştir. Uzun elektrot ömrü ve iyi soğutulma özelliğinden dolayı bazı durumlarda buton tip katot geometrileri de tercih edilmektedir. Bu tür katotlarda ana malzeme bakır olarak kullanılmakta ucundaki düz kısma ise katkılı tungsten gömülmektedir [253, 254]. Radyüslü katot geometrisi ise ark üzerinde kararsızlıklara sebep olur [179, 246]. Bu durumda radyüslü şekilde katot, kararlı bir ark isteniliyorsa tercih edilmez. Fakat plazma tabancalarının malzeme işlemlerinde (spray kaplama, toz işlemleri gibi) uzun ve kesintisiz çalışması beklendiğinden tabancaların mümkün olduğunca geç erozyona uğraması istenilir. Ark kararsızlıkları ise elektrotların erozyonu üzerindeki olumlu etki oluşturduğu bilindiğinden genellikle radyüslü katot tercih sebebidir [255].



Şekil 3.12. Elektrotlara ait şematik görünüm a) katotlar b) parçalı anot

Geleneksel plazma tabancalarda anot şekli olarak gaz girişi için açılı ve plazma jetinin oluştuğu bölge için eş merkezli bir yapıya sahip yekpare geometridir [20, 171, 240]. Bu tabancanın bazı dezavantajlarından dolayı (ark ve plazma jet kararsızlıkları gibi) parçalı geometriye sahip anotlar (ing, cascade veya segmented gun) geliştirilmiştir. İki geometri arasındaki en temel fark, anot kanalı boyunca yerleştirilmiş pilot ve nötr elektrotlardır. Bu tabancanın temel çalışma prensibi arkın önce en kısa mesafe ve en düşük voltaj değerinde pilot elektrotlar vasıtasıyla başlatılmasını ve sonrasında anoda kaydırılmasını içermektedir [246, 212]. Yekpare anot önceki başlıklar altında gösterilen anot şeklidir, parçalı anot şekline ait şematik görünüm ise Şekil 3.12-b’de gösterilmiştir. Konu ile ilgili mevcut çalışmalar parçalı tip anotların daha kararlı bir ark oluşturarak voltaj dalgalanmalarını en aza indirdiğini ve sonucunda daha kararlı bir plazma jeti oluşturulduğunu iddia etmektedir [212, 246, 256]. Fakat daha uzun ark boyları yüksek voltaj, voltaj dalgalanmalarının en aza indirgenmesi ise (steady mode) anodun kısa sürede erozyonu ile sonuçlanacağı çıkarımında bulunulabilir. Mevcut literatür farklı işlem parametrelerinde arkın nasıl davranış sergilediğine ve anot erozyonunun boyutlarına ilişkin soruları cevapsız bırakmaktadır [244].

3.4. Modelleme Çalışmaları

Termal plazma tabancaları ile ilgili yapılan çalışmalar deneysel [18, 19, 21, 168, 175, 183, 187, 222, 250, 257–259] ve modelleme [2, 4, 8, 152, 173, 179, 180, 210, 260–264] çalışmaları olarak iki ana başlıkta yürütülmektedir. Fakat deneysel çalışmalar yüksek maliyetler, plazma tabanca içerisindeki durumların görüntülenme ve veri alma zorlukları nedeniyle sınırlanmaktadır. Ayrıca elde edilen veriler çok sayıda etki eden parametre olduğundan karmaşıktır ve disiplinler arası bilgi gerektirmektedir. Bunun yanında sayısal modelleme ise tabanca içindeki arkın davranışını ve ısı transfer durumlarını incelemek için

en iyi yöntemlerden bir tanesidir [209, 3]. DC TEAT modellenmesi son derece zordur, çünkü plazma akışı doğrusal değildir, güçlü özellik gradyanları sunar ve genellikle kendi sınırlarının yakınında kimyasal ve termodinamik denge dışı etkiler içerir [152]. Tabancaların çeşitli malzeme işlemlerinde (sprey kaplama, toz küreselleştirme gibi) kullanımı da, fazladan malzeme ve toz özelliklerinin modellenmesini gerektirmekte ve işi daha da karmaşık hale getirmektedir. Fakat bu durum deneysel çalışma zorluklarının yanında gelişmiş bilgisayar teknolojilerinden dolayı daha makuldür.

DC TEAT ile ilgili modelleme çalışmaları ark-anot etkileşimi ve ark dalgalanmalarının ayrıntılı bir şekilde modellenmesine odaklanmışlardır. Ark ile anot etkileşimi Bölüm 3.2.1’de anlatılmıştır. Bu etkileşim temel olarak iki varsayıma göre hareket etmektedir. Bunlar BTM ve OBTM’dir. BTM yaklaşımında elektron ve ağır parçacıkların sıcaklıkları eşit kabul edilerek modelleme yapılmaktadır [21, 174, 234, 265]. OBTM yaklaşımında ise araştırmacılar arkın anot duvarına yaklaştıkça sıcaklık dengesinin bozulduğunu ve sıcaklıkların eşit kabul edilerek modelleme yapılamayacağını savunmaktadırlar [5, 180, 266, 267]. Plazma durumundaki elektronların ağır parçacıklara göre düşük kütle oranı (Örneğin Argon için 10^{-5}), elektronlar ve ağır parçacıklar arasında yetersiz elastik enerji alışverişine yol açar. Böylece plazma durumu (plazma yoğunluğu da yeterince yüksek değilse) OBTM durumunda olacaktır [268]. BTM yaklaşımı plazma tanımını basitleştirerek dengenin bozulduğu (iyonlaşma ve sıcaklık dengesi) bölgelerdeki ark kökü ve elektrot etkileşimini etkisiz kabul eder. Bu yaklaşımın ortaya atıldığı ilk çalışmalarda [220, 269, 270] ark kolunu iki boyutta modelleme yapılmıştır. Dengenin bozulduğu katman tek boyutlu örtü model (ing; one-dimensional sheath model) ile tanımlanmıştır. Buna göre örtü tabakasındaki elektron sayı yoğunluğu ambipolar difüzyon etkileri ve iyonlaşma dengesizliği dikkate alınarak türetilen bir süreklilik denklemi ile hesaplamışlardır. Sonraki çalışmalardan özellikle Huang ve arkadaşları [3, 255, 265] BTM yaklaşımı ile modelleme çalışmaları yaparak parametre değişikliklerinin tabanca çıkışındaki sıcaklık ve hız değerleri üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Yazarlar voltaj dalgalanmalarını da belirlemişler ve voltaj değerlerindeki düşüşün deneysel olarak ölçülenden daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir. Bu durum BTM yaklaşımının denge hipotezinden kaynaklanmıştır.

OBTM yaklaşım ise iki farklı sıcaklık değerini dikkate aldığından daha karmaşıktır. Örneğin her iki sıcaklığa göre (T_e ve T_h) enerjinin korunumu denklemleri ayrı ayrı oluşturulmalıdır ve neredeyse tüm denklemlerde değişiklikler yapılmalıdır [140]. İki sıcaklıklı plazmalar

olarakta bilinen bu yaklaşım ile ilgili temel çalışma Chen ve arkadaşları [271] tarafından sunulmuştur. Buna göre soğuk gazın ark kolonunu daralttığı, akım yoğunluğunun ve elektrik alan kuvvetlerinin bu daralmaya tepki olarak arttığı bildirilmiştir. Bu durumun sonucunda ise T_e ve T_h sıcaklıklarının arttığı ve dengesinin bozulduğu ifade edilmiştir. Sonrasındaki çalışmalarda da [268, 272, 171] araştırmacılar BTM yaklaşımının elektrot duvarlarından uzaktaki plazma yığnında (ing; bulk plasma) geçerli olacağını, duvar diplerinde ark hareketini ayrıntılı modelleme konusunda sınırlı kalacağını bildirmişlerdir. Bu çalışmalar iki boyutta OBTM yaklaşımını esas alarak yapılmış çalışmalardır. Üç boyutlu çalışmalar oldukça sınırlıdır. Üç boyutlu modellerde OBTM yaklaşımı ile kapsamlı araştırmaları bulunan Trelles ve arkadaşlarına [180, 178] göre BTM yaklaşımı uygulama ve kullanım maliyetleri açısından elverişli olsalar da ark dinamiklerinden kaynaklanan dengesizlikleri tam olarak tanımlayamamaktadır.

Trelles ve arkadaşları [180] OBTM yaklaşımıyla elde ettikleri voltaj dalgalanması eğrilerini deneysel çalışmalarla kıyaslayarak birbiri ile uyumlu olduğunu bildirmektedir. Yazarlar, ark dinamiklerinin daha kesin bir şekilde tanımlanmasında ve plazma jet kararsızlıklarının belirlenmesinde OBTM yaklaşımının daha üstün olduğunu iddia etmektedirler. Diğer yandan Huang ve arkadaşları [3, 255, 265] ise yaptıkları çalışmalarda OBTM yaklaşımının iki sıcaklıklı kimyasal denge durumunun da hesaba katılması gerektiğinden çözülmesi oldukça zor bir yaklaşım olduğunu savunmaktadırlar. Yazarlar OBTM yerine BTM yaklaşımı üzerinde basit değişiklikler yapılarak da deneysel çalışmalarla uyumlu sonuçların alınabileceğini iddia etmektedirler. Yaptıkları çalışma ile de voltaj dalgalanma eğrilerini kıyaslayarak bu iddialarını desteklemişlerdir. Ayrıca BTM modeli hızlı sonuç alınan ve daha maliyetsiz bir yaklaşım olduğundan birçok araştırmacı tarafından tercih sebebidir.

3.5. Genel Değerlendirme

Plazma teknolojisi sonucunda geliştirilen uygulamaların kalitesi plazma tabancasına bağlıdır ve tabanca içinde ve dışında ısı ve elektriksel durumların tespiti için özellikle ark kök eklentisinin bilinmesi önem arz etmektedir. Fakat bu konuda yapılan deneysel çalışmalar yüksek maliyetler ve tabanca içerisindeki verilerin elde edilme zorluğu nedeniyle oldukça sınırlıdır. Deneysel çalışmaların yerine tabanca içerisindeki fiziksel ve termal durumların tespiti için en etkin yol olarak modelleme çalışmalarıdır. Mevcut literatür oldukça fazla modelleme çalışması ve sonrasında kısıtlı sayıda deneysel çalışma içermektedir. Tabanca

içerisindeki arkın dinamik davranışı ve bu davranışın tabanca içi ve dışında plazma jeti üzerindeki etkisini anlayabilmek için yapılan modelleme çalışmaları başlangıçta iki boyutlu (2B) ve eksenel simetrik olarak varsayılmıştır. Çözüm için geliştirilen teknikler sayesinde sonrasında üç boyutlu (3B) zamana bağlı ve kararlı durum çalışmaları olarak genişletilmiştir. Bu çalışmanın önceki başlıkları altında o başlıkla ilgili deneysel ve modelleme ile deneysel sonuçların karşılaştırıldığı çalışmalara değinilmiştir. Burada ise modelleme çalışmalarına genel bir değerlendirme yapılması amaçlanmaktadır.

2B çalışmalardan Paik ve arkadaşları [164] verilen ark akımı ve çalışma gaz debisi değerleri için Steenbeck'in minimum ilkesini kullanarak anotun iç yüzeyinde ark kökünün konumunu belirlemişlerdir. Buna göre artan ark akımı ile birlikte ark kolonunun manyetik gövde kuvveti artmış ve ark kökü eklentisi en kısa mesafede oluşmuştur. Gaz debisinin artırılması ise gaz dinamik sürüklenme kuvvetini artırmış ve ark kökü eklentisi tabanca çıkışına doğru kaymıştır. Bu sonuç genel bir durum olarak sonraki çalışmalarda da kanıtlanmıştır [260,273]. Westhoff ve Szekely [167] tabanca içerisindeki ısı üretimini ve elektromanyetik kuvvetleri modelleyerek arkın dinamik davranışının belirlenmesine zemin hazırlamışlardır. Buna göre türbülansın arkın davranışında önemli etkilere sahip olduğu ve gaz akışının bu durumdan etkilendiğini göstermişlerdir. Ayrıca elektromanyetik kuvvetler hız profillerini belirgin bir şekilde değiştirebilir ve tabancadan çıkan plazma gazının türbülansını önemli ölçüde etkileyebilir. Bu durum da sonrasında genel bir değerlendirme olarak kanıtlanmıştır. Fakat 2B modellemelerin bazı sınırlamaları vardır. Bu sınırlamalardan en önemlisi modelin eksenel simetrik olarak değerlendirilmesidir. Bu yaklaşımı Gonzales ve arkadaşları [274] 2B ve 3B modelleri karşılaştırarak tabanca çıkışında sıcaklık ve hız dağılımlarını karşılaştırmışlar ve dağılımların simetrik olmadığını bildirmişlerdir. Ark kökünün olduğu bölge akış koşullarını eksenel simetrik durumdan uzaklaştırmaktadır. Bir diğer sınırlama ise anot üzerindeki ark kökü eklentisinin halka şeklinde varsayılmasıdır [167, 275]. Bu şekilde yapılan kabul de anot üzerinden geçen ark, akım geçişini küçük bir alanda sınırlandığından gerçekçi olmayan sınır koşuludur. Ayrıca Li ve Pfender [24] 2B modeller ile öngörülen voltaj değerlerinin çok yüksek olduğunu ve tespit edilen ark kökü eklenti noktasının eksenel mesafedeki konumu ile deneysel çalışmalardaki konumunun farklı olduğunu bildirmişlerdir. Gelişen bilgisayar teknolojileri ile birlikte 2B modellerin sınırlılıklarını ortadan kaldıracak yeni 3B modellere geçiş yapılmıştır.

Zamana bağılı olarak yapılan 3B modellerdeki temel amaç arkın ilk oluşma mekanizmasının tespiti, sonrasında parametrelere bağılı olarak geçirdiği evrimin anlaşılması ve ark hareketliliğinin tabanca çıkışındaki plazma jetine etkisinin incelenmesidir. Moreau ve arkadaşları [159] zamana bağılı 3B BTM yaklaşımı ile kararsız mod voltaj dalgalanmalarını gerçeğe yakın bir şekilde modellemişlerdir. Bu sayede soğuk gaz sınır tabakası kalınlığı, ark voltajı, gaz sıcaklığı ve tabancanın termal verimini deneysel değerlere yakın bir şekilde elde etmişlerdir. Fakat yaptıkları modelleme çalışması anot üzerindeki ark kökü eklentisinin boyutlarını abartılı bir şekilde göstermiştir. Daha gerçekçi modellenmesi için OBTD yaklaşımını tavsiye etmişlerdir. Trelles ve arkadaşları [180] deneysel verilerden elde ettikleri değerleri BTM yaklaşımı ile karşılaştırmışlar ve deneyselle göre daha büyük olduğunu tespit etmişlerdir. Sonrasında OBTD yaklaşımı ile elde ettikleri eğrilerin deneysel sonuçlara daha yakın olduğunu bildirmişlerdir. Alaya ve arkadaşları [189] ark ile katot etkileşimini modellemişlerdir. Öncelikle katot ucu tarafından alınan ısı akışını hesaplamak için etkisini sonrasında ise ark akım yoğunluğunun plazma kolon oluşumu ve arkın zamana bağılı davranışı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Buna göre katot ucunda 300-600 A ark akımı değerlerinde 33 000-36 000 K aralığında sıcaklık değerleri elde etmişlerdir. Mariaux ve Vardelle [276] kararsız mod durumunu modellemişler bu durumun sonucunda tabancanın dış kısmındaki jette anlık değişimlerin yaşandığını bildirmişlerdir. Buna göre deneysel çalışmalara kıyasla $k-\epsilon$ türbülans modeli plazma jetinin çok hızlı bir şekilde soğuduğunu öngörmektedir. Park ve arkadaşları [239], dönen bir manyetik alan tarafından yönlendirilen arkın hareketini modellemişlerdir. Elektrot aşınmasına neden olan ark kökü eklentisini dağıtarak tabanca ömrünü uzatmayı hedeflemişlerdir. Selvan ve arkadaşları [21] geliştirdikleri yöntem ile entropi üretiminin termodinamik prensiplerini kullanarak farklı ark boyutları tahmin etmiştir. Meillot ve arkadaşları [277] 3B zamana bağılı bir model ile termal verimlilik kriterini kullanarak ark uzunluğunu tespit etmişlerdir. Modelleme elde ettikleri plazma çekirdeğindeki ve tabanca çıkışındaki değerler ile deneysel değerlerin uyumunu göstermişlerdir. Öncesinde deneysel sonuçların bilinmesini gerektirdiğinden sınırlı düzeyde kalmıştır.

Kararlı durum olarak yapılan 3B modellemelerde temel amaç bir süre sonra belirli bir noktaya sabitlendiği düşünülen arkın konumunun ve uzunluğunun tespitine yönelik hızlı ve kabul edilebilir çözümler üretebilmektedir. Ayrıca malzeme işlemlerinde tabancanın kullanımına yönelik çalışmalar çeşitli varsayımlar ile kesinleştirilmeye (örn. OBTD) çalışılan ayrıntılı ve karmaşık tabanca içi durumlar ile değil tabanca dışındaki jetin belirli

mesafelerdeki sıcaklık ve hız değerlerinin sağlayıp sağlamadığına yöneliktir. Kararlı durum modellemeleri gerçekleştiren araştırmacılar deneysel çalışmalardan gözlemledikleri anot erozyonunun belirli bir noktaya sabitlendiğini ve voltaj düşüşlerinden dolayı kök eklentisinin o noktadan çok uzaklaşmadığını bunun sonucunda ise kararlı durum modellemelerinin de geçerli ve kabul edilebilir sonuçlar vereceğini savunmaktadırlar. Bu çalışmalardan Guo ve arkadaşları [7] ark kökü eklentisinin konumunu belirlemek için yeni bir yöntem olan anot duvarı boyunca minimum toplam ısı transfer hızı en düşük enerji kaybı için kriter olarak düşünülmüştür. Bu kritere dayanarak, gerçek ark çekirdek yarıçapı ve uzunluğu tahmin edilmektedir. Ayrıca plazma ark özellikleri üzerine akım ve hacimsel akış hızının etkileri de incelenmiştir. Ramachandran ve arkadaşları [217] arkın fiziksel boyutunu belirleyebilmek için minimum entropi üretimi ilkesini kullanmışlardır. Modeli ıraksatan etkilerden kaçınmak için giriş sınır şartlarını değiştirmişler bu amaçla gaz giriş sıcaklığını 3500K olarak almışlardır. Radyasyon ve iyon yeniden birleşme katkıları anot toplam ısı akışının sadece yaklaşık % 5 olduğu için ihmal edilebileceğini belirtmişlerdir. Yurtkuran ve arkadaşları [260] iç kısım ile ilgili yaptıkları çalışmalarında akım yoğunluğu ve gaz debisi değişkenlerinin tabanca çıkışındaki plazma jeti sıcaklığı ve hızı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Artan akım yoğunluğu ve hacimsel debiyle tabanca çıkışındaki sıcaklık ve hızın artma eğiliminde olduğu, fakat artışın düzenli olmadığı görülmüştür. Tabanca içinde ve çıkış kesitinde sıcaklık ve hızın radyal mesafeye göre değişiminin simetrik olmadığı tespit edilmiş olup, bunun nedeninin ark kökünün anot duvarına temas ettiği nokta ile ilgili olduğu belirlenmiştir.

Tabanca içi çalışmalar bu şekilde iken plazma tabancalarının kullanıldığı malzeme işlemlerinde tabancanın dışındaki sıcaklık ve hız değerlerine ihtiyaç vardır. Bu işlemlerin başında spreyl kaplama uygulamaları gelmektedir. Dalir ve arkadaşları [22] argon hidrojen karışım gazı kullanarak voltaj dalgalanmalarına bağlı olarak tabanca dışındaki plazma jetinin özelliklerini araştırmışlardır. Wen ve arkadaşları [23] tabanca içerisindeki arkın dinamik davranışının tabanca dışındaki plazma jetinin sıcaklık ve hız dağılımları üzerindeki etkisini araştırmak için BTM varsayımına dayanan 3B zamana bağlı modelleme gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonuçları diğer araştırmacılar [180], [209], [208] tarafından da tespit edilen tabanca çıkışındaki jetin asimetric davranışını göstermişlerdir. Pourang ve arkadaşları [278] tabanca çıkışında belirli bir mesafeye düz ve silindirik bir sınır şartı tanımlaması yaparak plazma jetinin hız ve sıcaklık dağılımlarının değişimini göstermişlerdir. Parçacıkların da enjekte edildiği çalışma sonuçlarına göre sabit bir zaman

aralığında parçacıkların düz yüzeye, silindirik yüzeye gözlenenden 2,2 kat daha fazla çarptığı tespit edilmiştir. Yurtkuran ve arkadaşları [273] plazma atomizasyon işlemine yönelik yaptıkları çalışmalarında geometri değişimlerinin tabanca dışındaki plazma jetinin sıcaklık ve hız değerlerindeki değişimlerini incelemişlerdir. Sırasıyla düz ve çıkışa doğru daralan nozullar kullanmışlardır. Çalışma sonuçları nozuldaki daralmanın hız değerleri üzerinde olumlu, sıcaklık değerleri üzerinde olumsuz etki oluşturmuştur. Fakat bu olumsuz etki yüksek ergime sıcaklıklarına sahip malzemelerin (örn. Ti alaşımları) bile üzerinde sıcaklık değerleri elde edildiğinden hız değerlerine nispeten önemsiz bulunmuştur. Yurtkuran ve arkadaşlarının değindikleri plazma atomizasyon işleminde üç tabanca bir kesişim noktasına açılı şekilde hedeflenmekte ve bu bölgeye bir reaktif metal tel veya çubuk formuna sahip malzeme enjekte edilmektedir [26, 30, 35, 104]. Plazma tabancalarının fiziksel büyüklüklerinden dolayı bu mesafe genellikle en az 2 cm olduğu bilinmektedir.

4. SAYISAL MODEL VE DENEYSEL YÖNTEM

Metal Eİ yöntemi dünyada ve ülkemizde son yıllarda hızla gelişmekte olan bir yöntemdir ve yeni nesil üretim yöntemi olduğundan oldukça önemlidir. Bu yöntemin hammaddesi ise 10-100 mikron boyutlu küresel metal tozlardır. Özellikle medikal amaçlı malzemelerin Eİ yöntemi ile üretimi yüksek ergime sıcaklıklarına sahip Ti ve alaşım tozlarının üretilmesini gerektirmektedir. PA yönteminde plazma tabancalarından elde edilen yüksek hız ve sıcaklık parametreleri sayesinde bu tür malzemelerin tozları oldukça küresel ve küçük ortalama toz boyutlarında üretilmektedir.

Bu çalışmanın kapsamını, sayısal modelleme ile belirlenen geometrilerin/parametrelerin reaktör tasarımında dikkate alınması ve tasarımın imal edilerek deneysel olarak toz üretiminin araştırılması oluşturmaktadır. Bu kapsamı gerçekleştirebilmek için aşağıdaki beş aşamalı yöntem belirlenmiştir. Bunlardan ilk ikisi sayısal modelleme aşamalarını diğerleri ise deneysel yöntemi içermektedir.

- Plazma nozul/tabanca sayısal modelleme kriterlerinin belirlenmesi
- Plazma nozul/tabanca tasarım ve hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizi
- Özgün plazma tabanca tasarımı ve imalatı
- Plazma atomizasyon sisteminin kurulması
- Toz üretim deneyleri ve tozların analizi

Bu tez çalışması TUBITAK 215M895 nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Öncesinde tamamlanan yüksek lisans çalışmaları [279,280] ile nozul içerisinde gerçekleşen olayların tespiti ve bu olayların çıkış sıcaklığı ile hız değerleri üzerindeki etkileri çalışılmış ve deneyim kazanılmıştır. Bu çalışmalar ile elde edilen tabanca içi deneyimler, tabanca dışındaki modelleme çalışmalarına ve toz üretimi için gerekli şartların sağlanmasına yönelik yapılan çalışmalara rehberlik etmiştir.

4.1. Problemin Tanımlanması

Gerçekleştirilen çalışma iki ana problemin çözülmesine odaklanmıştır. Bunlardan birincisi plazma tabancalarının içerisinde meydana gelen olayların sayısal olarak modellenmesidir. Plazma teknolojisinin malzeme işlemlerinde (sprey kaplama, atomizasyon gibi) sıcaklık ve yüksek hız kaynağı olarak kullanımı oldukça başarılıdır. Fakat plazma konusunun

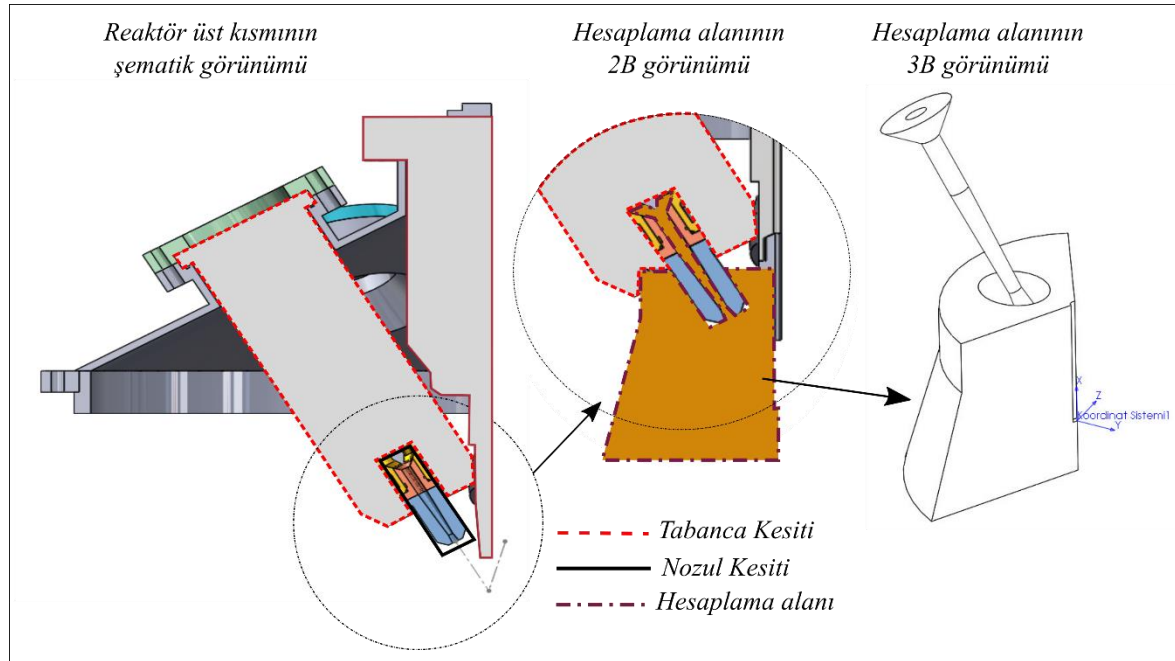
anlaşılması ve sayısal olarak modellenmesi en temelinde elektrik arkı ile akışkanlar mekaniği arasındaki ilişkinin çözülmesini gerektirdiğinden oldukça karmaşıktır. Özellikle arkın ilk oluşumunda görülen dinamik davranışı, akışı dengesiz hale getirmekte ve daha başlangıçta iterasyonları ıraksamasına sebep olmaktadır. Bu problemin başarılı bir şekilde çözülmesi uygun koşulların (geometri/sınır şartları/denklem) tespit edilmesine bağlıdır. Güvenilir sayısal modeller elde ederek, teli ergitebilmek için sıcaklık, atomize edebilmek için ise hız değerlerinin yeterli olup olmadığına karar verilmesi problemin bu kısmının hedefidir.

İkinci problem ise geleneksel malzemelere nispeten daha yüksek ergime sıcaklıklarına sahip Ti-6Al-4V malzemesinin tozlarının üretilmesidir. Bu malzemenin tozunu yüksek küresellik ve küçük ortalama toz boyutlarında (10-100 mikron) üretebilmek diğer potalı ergitme sistemini kullanan yöntemlerle (örn. GA) üretilmesi yüksek enerji sarfiyatına ve maliyet artışlarına sebep olduğundan tercih edilmemektedir. Önceki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde incelenen PA yöntemi ile potalı ergitme sistemi devre dışıdır ve hammadde olarak ergiyik metal değil tel formunda malzeme kullanılmaktadır. Üç adet plazma tabancasından elde edilen yüksek sıcaklık ve hız değerleri sayesinde tel formuna sahip malzeme ergitilip atomize edilmesi eşzamanlı gerçekleşmektedir. Bu problemin başarılı bir şekilde çözülmesi uygun ekipmanların (nozul/tabanca/reaktör) tasarımı ve üretimine bağlıdır. Problemin bu kısmının ve tez çalışmasının temel hedefi ise küresel ve 10-100 mikron aralığında kirlilik içermeyen tozlar üretebilmektir.

PA işleminin kurulum ve işletme maliyetleri oldukça yüksektir. Her bir tabanca için gereken yüksek gücü (20-80 KW) sağlamak için güç kaynakları ve oldukça hassas üretilmesi gereken termal plazma tabancaları, sistemin kurulum maliyetlerini artıran en önemli sebeplerdir. İşletme maliyetlerini artıran sebepler ise hızlı aşınan elektrotlar, elektrik giderleri ve yüksek gaz sarfiyatıdır. Bu maliyetli işlemler birinci problemin çözümünü ön plana çıkartmaktadır. Sayısal modelleme, tabanca içindeki arkın davranışını, ısı transfer durumlarını incelemek ve geometrilerin belirlenerek uygun sistem tasarımının kurulabilmesi için rehberlik eden en iyi yöntemlerden bir tanesidir.

4.2. Sayısal Model - Nozul Tasarımı

PA işleminin en önemli ekipmanı termal plazma tabancalarıdır. Bu tabancalar gaz akışının bir elektrik arkından geçirilmesi sonucu plazma durumunu oluşturan ekipmanlardır [137]. Başka bir tanımlama ile içerisinden geçen yüksek basınçlı bir gaza (10^5 Pa gibi), elektrotlar vasıtasıyla yüksek elektriksel güç (10-100 kW) enjekte edilerek sonrasında 15 000 K ve üzeri sıcaklıklarda plazma üreten ekipmanlara tabanca adı verilir [147]. Elektrik arkından geçen gaz, normal gazlara kıyasla yüksek sıcaklık, yüksek entalpi ve yüksek enerji yoğunluğuna sahip olan bir plazma jetine dönüşür [150], [151]. Tabanca içerisinde plazma oluşan kısım ise nozul olarak adlandırılır ve PA işleminin başarısını etkileyen başlıca geometri bu kısımdır. Bu yüzden nozulun sayısal olarak modellenmesi maliyetli bir işlem olan PA işleminin tek seferde başarılı sonuçlar verecek şekilde inşa edilebilmesi için büyük önem arz etmektedir. Şekil 4.1’de nozul ve tabanca geometrisinin tanımlanması adına gerçek tasarımından bir görüntü yer almaktadır. Ayrıca sayısal modelleme yapılan hesaplama alanı da Şekli 4.1’de 2B ve 3B olarak sunulmuştur. Artan ağ elemanı sayısı nedeniyle hesaplama alanı 120° ’lik bir kesitten oluşmaktadır.



Şekil 4.1. Nozul/tabanca geometrilerinin ifadesi ve hesaplama alanının 2B/3B görünümü

Nozul, hesaplama alanı ve diğer tasarımların geometrileri tamamen özgün bir 3B tasarım olarak Solidworks yazılımı ile oluşturulmuştur. Sayısal modelleme yazılımı olarak Ansys Fluent yazılımı Manyetohidrodinamik (MHD) eklentisi ile birlikte kullanılmıştır. Öncelikle

kullanılacak denklemler ve sonuca etki edecek parametreler belirlenmiştir. İncelenen literatür ve önceki modelleme çalışmalarından elde edilen tecrübe gereğince bazı kabullerde bulunulmuştur. Modelleme özellikleri (örn; steady, transient ve ya kullanılacak gaz gibi) belirlenerek konu netleştirilmiştir. Belirlenen bu özellikler ve sınır şartları hesaplama alanı üzerine tanımlanarak, plazma tabancalarının Ti-6Al-4V teli atomize edip edemeyeceğinin tespiti hedeflenmiştir.

4.2.1. Kabuller ve modelleme özellikleri

Plazma işleminin hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile modellenmesi, içerdiği karmaşık olaylar ve sıcaklığın ark oluşumu nedeniyle aniden yükselmesi nedeniyle oldukça zordur. Başlangıçta ani gelişen olaylar çözümü kolaylıkla ıraksatmaktadır. Bu durumun önlenmesi, belirlenen problemlerin sağlıklı bir şekilde çözülebilmesi, fazla ayrıntıya girmeden işlemlerin basitleştirilmesi ve sayısal modelin kurgulanmasına Çizelge 4.1’de sebepleri ile birlikte verilen kabuller ve modelleme özelliklerine karar verilerek başlanmıştır. Bu kabuller, incelenen literatürden öğrenilen bilgiler ve analizler sırasında elde edilen tecrübeler ile belirlenmiştir. Ayrıca, Çizelge 4.1’de yer alan kabuller ve modelleme özelliklerini destekleyen literatür kaynakları da belirtilmiştir. Sonrasında sınır şartları ile bütünleştirilen kabuller sayesinde doğru olduğu çeşitli doğrulama teknikleri ile ispatlanmış çözümler elde edilebilmiştir.

Çizelge 4.1. Kabuller ve modelleme özellikleri

Varsayım / Özellik	Sebebi	Destekleyen Referanslar
Yerçekimi etkisi ve viskoz dağılması ihmal edilir.	Plazma durumunda oluşan kinetik etkiler dikkate alındığında yerçekimi etkisi ve viskoz dağılması oldukça küçük olduğundan ihmal edilmiştir. Plazma modelleme işlemlerinde atalet kuvvetlerin viskoz kuvvetlerine oranını belirleyen Reynold sayısı oldukça yüksektir. Reynolds sayısı arttıkça atalet kuvvetlerinin akım alanının geneli üzerindeki etkisinin daha da artacağını ve viskoz kuvvetlerin hakim olduğu sınır tabaka bölgesinin daha inceleyeceğini çıkarımını yapmak mümkündür. Murphy ve arkadaşları [275] , Froude sayısının yaklaşık 3×10^6 olduğunu ve yerçekimi etkisinin ihmal edilmesinin haklı olduğunu belirtmiştir. Lowke [281] kullanılan akım değeri 30 A'in üzerinde ise yerçekimi ivmesinin ihmal edilebileceğini belirtmiştir.	[7, 23, 150, 158, 161, 164, 167, 191, 214, 234, 249, 260, 264, 271, 273–275, 282–286]
Plazma akışı sıkıştırılamaz akış olarak kabul edilir.	Akışın sıkıştırılabilir veya sıkıştırılamaz kabul edilmesindeki temel parametre Mach sayısıdır (Ma). Nozul girişindeki Mach sayıları genellikle 0,3 veya daha altı olduğundan akış sıkıştırılamaz olarak kabul edilmiştir. Fakat tabanca çıkışında akışın kesinlikle ses altı hızla akış ($0,3 < Ma < 0,8$) veya ses üstü hızla akış ($1,2 < Ma < 3$) olduğu bilinmektedir.	[7, 182, 158, 5, 21, 159, 209, 260, 273]

Çizelge 4.1. (devam) Kabuller ve modelleme özellikleri

Plazma akışı kararlı (steady state) durumdadır.	Konu ile ilgili yapılan deneysel çalışmalar uzun çalışma süreleri boyunca ark kökü eklentisinin bir noktaya sabitlendiğini ve o bölgeyi erozyona uğrattığını ortaya çıkartmıştır. Buna göre dış kısımdaki sıcaklık ve hız dağılımlarının, ark uzunluğunun ve ark çekirdek çapının belirlenmesinde kararlı durum varsayımı uygulanabilir olarak değerlendirilmiştir. Diğer yandan, zamana bağlı modelleme ile araştırmacılar, arkın nasıl oluştuğunu, tabanca içerisinde zamana bağlı olarak konumunun değişip değişmediğini ve ark dinamiklerinin akış kararsızlıkları üzerindeki etkisi gerçeğe yakın modelleyebilmek için kullanmışlardır. Örneğin [173], [158], [186] gibi referanslarda da görülebileceği gibi zamana bağlı kontur grafikleri arkın ilk oluşum sürecini ifade edebilmek için oldukça kısa milisaniye görüntüleridir. Bu tez çalışmasının amacı ark kökünün dinamik davranışından ziyade plazma jetinin tel üzerindeki etkilerini incelemek olduğundan ve ilk prototip üretim sırasında da ark kökünün bir noktaya sabitlendiğini tespit ettiğimizden bu deneyim gereğince de kararlı durum analizlerinin geçerli olacağı varsayımında bulunulmuştur. Ayrıca bu tez çalışması öncesinde gerçekleştirilen plazma tabancaları ile ilgili bir çalışmada [280] kararlı hal ve zamana bağlı analizler karşılaştırılmış ve 100 ms'den sonra plazma jetinin kararlı hale geçtiği tespit edilmiştir..	[7, 21, 164, 274, 24, 209, 260, 273]
--	---	---

Çizelge 4.1. (devam) Kabuller ve modelleme özellikleri

Plazma akışı türbülanslıdır.	Tabanca içindeki plazma akışının çok ölçekli yapısından dolayı, türbülans modellerinin kullanımını (k-ε gibi) gerektirmektedir. Ayrıca ark etrafındaki hızlı ısınma, gazın ani genişlemesine sebep olduğu, ivmesini artırarak akışı türbülanslı hale getirdiği bilinmektedir [7]. Akışın türbülanslı veya laminar olup olmadığının bir diğer temel belirleyici unsuru atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını belirleyen reynold sayısıdır. $Re = \frac{\rho v D_h}{\mu}$ Burada, ρ, akışkanın yoğunluğunu (kg/m^3), v, akışın hızını (m/s), D_h, nozulun hidrolik çapını (m), μ, dinamik viskoziteyi (kg/m.s) ifade etmektedir. Argon gazının sıcaklığa göre değişen yoğunluk ve dinamik viskozite değerleri referans [36] ve [37] 'den alınmıştır. Buna göre ortalama plazma jet hızı 1 500 m/s alınarak yapılan tüm sıcaklıklardaki (0-15 000K) Re hesabına göre tüm sonuçlar $Re > 4000$ olduğunu gösterdiğinden akış türbülanslıdır.	[5, 7, 21, 24, 152, 173, 174, 186, 180, 184, 234, 260, 273]
------------------------------	--	---

Çizelge 4.1. (devam) Kabuller ve modelleme özellikleri

BTD yaklaşımı geçerlidir.	BTD yaklaşımında elektron ve ağır parçacıkların sıcaklıkları eşit kabul edilerek (tek sıcaklık) modelleme yapılmaktadır. Bu sayede işlem kolaylığı sağlanarak hızlı ve daha az maliyetli çözümler elde edilebilmektedir. Nozul içerisinde ark dinamiklerinin araştırılması veya ark elektrot etkileşimi ile ilgili olmayan çalışmalarda bu avantajlarından dolayı tercih sebebidir.	7, 21, 23, 24, 158, 159, 161, 164, 173, 174, 180, 182, 184, 186, 188, 189, 209, 234, 260, 273, 274]
Plazma optik olarak incedir.	Tüm dalga boylarında toplam radyasyon kaybı ile karşılaştırıldığında radyasyonun yeniden emiliminin önemsiz olduğundan plazma optik olarak ince kabul edilmiştir.	[5, 6, 7, 21, 23, 24, 27, 159, 164, 173, 174, 184, 186, 188, 189, 209, 234, 260, 273]
Çözüm 3B olarak modellenmiştir.	2B modelleme ile eksenel simetrik olarak yapılan tanımlamaların plazma modellemelerinde ark kökü eklentisinden dolayı yanılığa sebep olacağının bilinmesinden sonra 3B modeller gerçeğe yakın modelleme işlemlerinde tercih edilmiştir.	[5, 7, 21, 23, 158, 159, 173, 180, 182, 184, 188, 234, 219, 260, 273, 286]

Çizelge 4.1. (devam) Kabuller ve modelleme özellikleri

Gaz kullanımı (Ar)	Basit kimyasal özelliklerinden dolayı tercih sebebidir. Modelleme çalışmalarında sadelik sağlar. Malzeme işlemlerinde ürünün özellikleri üzerinde etkisiz bir koruyucu ortam oluşturur. PA işleminde kullanıldığında sıvı metal ile reaksiyon oluşturmaz, kirlilik olmaksızın üretim gerçekleştirilmesi sağlanır. Diğer gazlardan Helyum, maliyetleri, azot nitrür oluşumu, hava ise tungsten katot ile etkileşimi nedeniyle tercih edilmemektedir.	[5, 6, 24, 152, 159, 164, 173, 174, 186, 180, 184, 219, 260, 273, 274, 286]
-----------------------	--	---

4.2.2. Geometri, veri alma şekilleri, ağ yapısı ve sınır şartları

Ansyes Fluent, bir problemi çözmek için sonlu hacimler metodunu kullanır. Çözüm alanını kontrol hacmine bölerek sayısal ağ yapılarını oluşturur. Çözüm alanında sayısal ağ yapısı oluşturulmasıyla diferansiyel denklem olarak ifade edilen matematiksel fonksiyonlar cebirsel olarak ifade edilen denklemlere dönüştürülerek sayısal çözüm mümkün hale getirilir. Teorik olarak her bir çözüm alanı için cebirsel denklemler yazılması mümkündür ama bu durumda sonsuz sayıda cebirsel denklem türetilmiş olur. Sonsuz sayıda cebirsel denklemlerin çözümü mümkün olmadığından belli noktalar için cebirsel denklem yazılır ve çözüm gerçekleştirilir. Bu noktalar hücre (ing; mesh) olarak adlandırılır. Bu çalışmadaki tüm geometrilerde düzgün dört yüzlü (tetrahedral) ağ elemanı kullanılmıştır. Çözüm alanı farklı sayıda elemanlara bölünerek ağ yapısından bağımsızlık testlerine tabi tutulmuştur. Ağ yapısının kalitesinin belirlenmesinde kullanılan belli başlı parametreler vardır. Bunlardan başlıcası ve en çok dikkat edileni ağ elemanlarının çarpıklık değerleri (ing; skewness) ve dikey kaliteleridir (ing; orthogonal quality). Çözümü yapılacak modelin formuna göre bu değerler değişiklik göstermektedir. Bu değerlerin kalitelerinin kontrolü için belirlenen ölçek görüntüsü Şekil 4.2’de gösterilmiştir.

Ağ elemanlarının çarpıklık kontrolü					
<i>Mükemmel</i>	<i>Çok iyi</i>	<i>İyi</i>	<i>Kabul edilebilir</i>	<i>Kötü</i>	<i>Kabul edilemez</i>
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00
Ağ elemanlarının dikey kalite kontrolü					
<i>Kabul edilemez</i>	<i>Kötü</i>	<i>Kabul edilebilir</i>	<i>İyi</i>	<i>Çok iyi</i>	<i>Mükemmel</i>
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

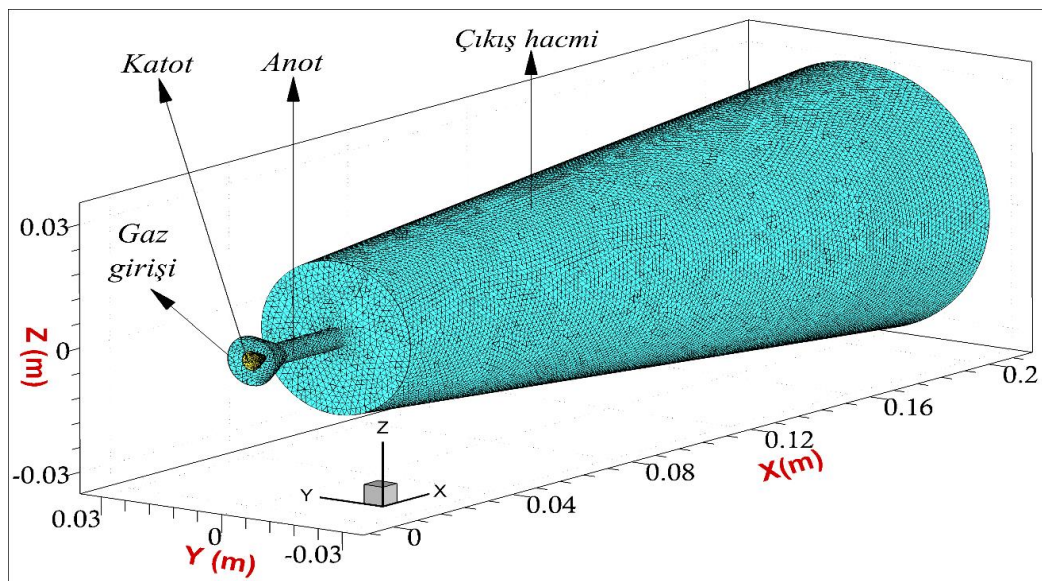
Şekil 4.2. Bazı ağ elemanı özelliklerinin kalite kontrol ölçeği

Amaca uygun tabanca tasarımını yapabilmek için her aşamasında yapılan değerlendirmeler sonucunda toplamda 4 adet nozul geometrisi farklı çalışma parametrelerinde çalışılmıştır. Bu geometrilerden ilki Şekil 4.3’de ağ yapısı ile birlikte belirtilen ve nozul içinde gerçekleşen olayların tespitine yönelik çalışmaları içeren geometridir. Geometriyi oluşturan ağ elemanlarının en yüksek çarpıklık değeri 0,77 en düşük dikey kalite değeri ise 0,29’dur. Şekil 4.2’ye göre iyi kalite sınıfındadır. İlgili literatür ile karşılaştırma yapabilmek için veri alma şekilleri literatüre göre yapılmıştır. Buna göre Şekil 4.3-sağ’da belirtilen çıkış kesitindeki Y-0 ve Z-0 düzlemlerinden veriler alınarak literatürle doğrulama işlemi yapılmıştır.

Şekil 4.3’te belirtilen geometrinin çözümü ile nozul içerisinde gerçekleşen termal ve fiziksel olayların tespit edilmesi ve sayısal modelleme yetkinliğinin kazanılması amaçlanmıştır. Anot çapı, anot boyu, hacimsel debi ve akım değerlerinde değişiklikler yapılarak bu değişikliklerin anot duvarında oluşan ark kökü eklentisi ve çıkış kesitindeki sıcaklık ile hız değerleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Model 1 geometrisi ile ilgili analizler proje kapsamında bir yüksek lisans tezi olarak sunulmuştur. Tez çalışması ile gerçekleştirilen çalışmalar konunun temelini oluşturduğundan ve bu çalışmalara başından beri katkı sağlandığından burada belirtme ihtiyacı duyulmuştur. Özellikle Bulgular ve Değerlendirme başlığı altında tabanca içi çalışmalardan bahsedilirken temel çalışmalardan elde edilen genel sonuçlara atıfta bulunulmuştur. Bu model ile yapılan analizler sonucunda plazma jetinin nozul dışındaki davranışının tespit edilmesi için dış kısımla birlikte analizlerinin yapılmasına, farklı hacimsel debi ve farklı akım değerlerinin jet üzerindeki etkisinin incelenmesine karar verilmiştir.

Şekil 4.4'te ağ yapısı ile birlikte gösterilen ikinci geometri (Model 2) ile tez çalışmasına giriş yapılmıştır. Bu geometrinin çözümü ile plazma jetinin tabanca dışındaki davranışının görülmesi ve mesafeye göre sıcaklık ile hız değerlerinin nasıl değiştiğinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca belirlenen farklı hacimsel debi ve akım değerlerinin nozulun çıkış sıcaklığı ve hızı üzerindeki etkisinin görülmesi de amaçlanan başka bir düşüncedir. Geometriyi oluşturan ağ elemanlarının en yüksek çarpıklık değeri 0,79, en düşük dikey kalite değeri ise 0,21'dir. Şekil 4.2'ye göre iyi kalite sınıfındadır. Bu modelin Model 1'den farkı plazma jetini görebilmek ve veri alabilmek için dış hacim içermesidir. Anot çapı 3,2 mm anot boyu ise 12 mm olarak modellenmiştir. Çözümün güvenilirliğinin artırılması amacıyla yapılan karşılaştırma işlemleri Şekil 4.3'te bahsedildiği gibi nozul çıkışındaki (Y-0 ve Z-0 eksenlerinde veri alınarak yapılmıştır.



Şekil 4.4. Model 2'ye ait modelleme geometrisi, sınır şartları ve ağ yapısı

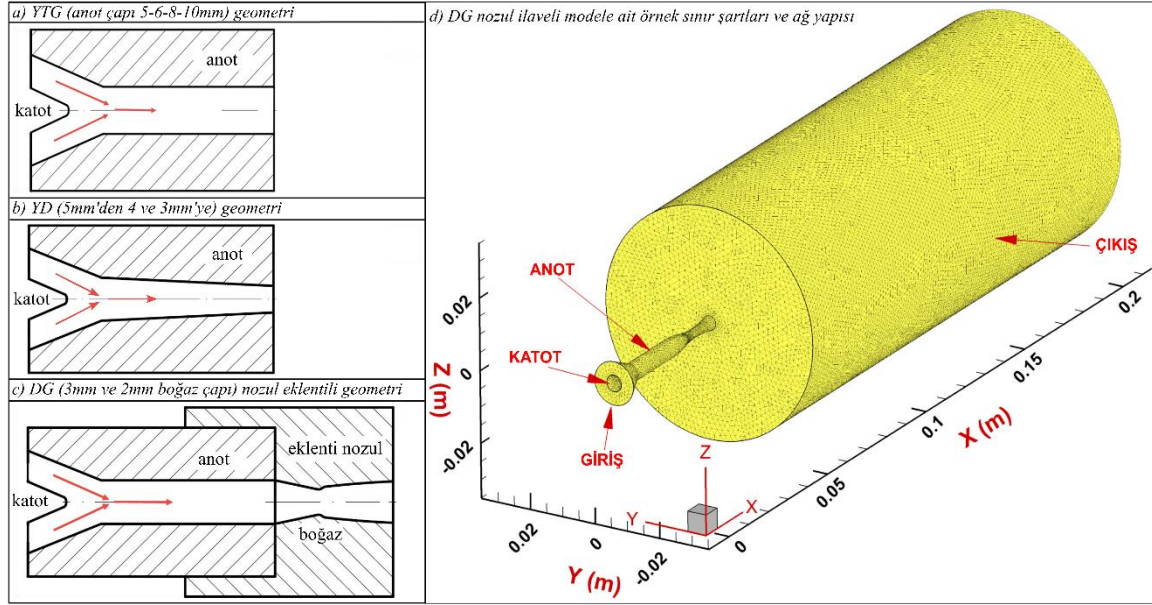
Bu çalışmanın Bulgular ve Değerlendirme başlığı altında “Model 2” diye adlandırılan analiz sonuçlarına ait başlangıç sınır şartları Çizelge 4.3’de gösterilmiştir. Çizelge 4.3’deki sınır şartlarından öncelikle 200A sabit tutulmuş ve hacimsel debi değerleri değiştirilmiştir. Sonrasında ortalama sonucu veren 37 SLPM hacimsel debi değeri sabit tutularak elektrik akım değerleri değiştirilmiştir. Belirlenen bu sınır şartları ile Model 1’de belirtilen sınır şartları çeşitlendirilmiş değerlendirme yapabilmek için daha fazla analiz sonucu elde edilmiştir. Örneğin Model 1’den farklı olarak düşük hacimsel debi, yüksek akım değeri ve ara parametreler çalışılmıştır. Yapılan analizler sonucunda anot çapı 5 mm ve boyu 20mm olacak şekilde nozul geometrisinin değiştirilmesine, yeni analizlerin sabit 250A ve 70SLPM değerlerinde çalıştırılmasına ve plazma jeti ile tel arasındaki mesafeden dolayı jeti hızlandırabilecek geometri değişikliklerinin de analiz edilmesine karar verilmiştir.

Çizelge 4.3. Model 2’ye ait sınır şartları

		Giriş					Katot					Anot	Çıkış
P	Basınç (Bar)	3					$\partial P/\partial n=0$					$\partial P/\partial n=0$	101325
T	Sıcaklık (K)	300					3500					1000	$\partial T/\partial n=0$
V	Hacimsel Debi (SLPM)	15	25	37	50	70	0					0	$\partial V/\partial n=0$
I	Elektrik Akımı (A)	0					100	150	200	250	300	0	0
Anot Çapı 3,2 mm							Anot Boyu 12 mm						

Şekil 4.5’te ağ yapısı ile birlikte gösterilen model ise üzerinde geometri değişikliklerinin yapıldığı Model 3’tür. Bu model, 3 adet geometri değişikliği içermektedir. Şekil 4.5-a yeni temel geometriyi (YTG), Şekil 4.5-b sırasıyla 5 mm’den 4 mm’ye ve 3mm’ye yalnızca daralan (YD) geometriyi, Şekil 4.5-c ise daralan genişleyen (DG) nozul ilaveli geometriyi ifade etmektedir. Bu geometrilerin çözümü ile plazma jetinin sıcaklık ve hız değerlerinin ne kadar uzağa ötelenebileceğinin tespit edilmesi ve çap değişimlerinin etkisinin görülmesi amaçlanmıştır. Geometri değişiklikleri yapılmasının önemi, tabancaların fiziki büyüklüklerinden dolayı kesişim noktasına yanaştırma problemi olduğundan (Şekil 4.1) ileri gelmektedir. Termal plazma tabancalarında elektrotların soğutulması önemli bir görevdir. Etkin bir şekilde sağlanan soğutma işlemi tabancanın ömrünü uzatmaktadır. Özellikle anodun soğutulması tabanca çapını arttırmaktadır. Bu çalışma kapsamında tasarladığımız tabancanın çapı 70 mm’dir ve yatayla 30 derece dikey eksen etrafında 120 derece olacak şekilde 3 adet konumlandırılmıştır. Bu şartlar altında kesişim noktası ile tabanca arasında mesafe kalmaktadır. Plazma jetinin hız değerlerinde kayıp yaşamamak aksine süpersonik hızlara çıkıp atomizasyon verimini artırabilmek için Şekil 4.5-b ve Şekil 4.5-c’deki geometri

değişiklikleri yapılarak Şekil 4.5-a geometrisi ile kıyaslanmıştır. Ayrıca Şekil 4.5-a'da gösterilen YTG farklı anot çapı değerlerinde analiz edilerek çap büyümesinin etkisi incelenmiştir. Sınır şartları ve ağ yapısına ait bir görüntü ise Şekil 4.5-d'de gösterilmiştir. Geometriyi oluşturan ağ elemanlarının en yüksek çarpıklık değeri 0,77 en düşük dikey kalite değeri ise 0,23'dür. Şekil 4.2'ye göre iyi kalite sınıfındadır.



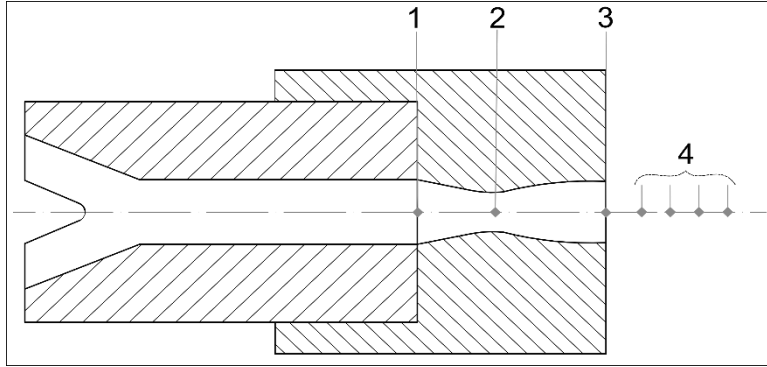
Şekil 4.5. Dış kısım ve eklenti ilaveli nozul geometrileri ve ağ yapısı

Geometri değişiklikleri Şekil 4.5'te belirtilen geometrilere ait sınır şartları ise Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Burada elektrik akım değeri ve hacimsel debi değeri önceki çalışmalardan elde edilen sonuçlara göre belirlenmiştir. Önceki geometrilerden farklı olarak DG nozul eklentisinin malzemesi de anotta olduğu gibi soğutma suyu ile soğutulması düşünüldüğünden bakır olarak belirlenmiştir. Fakat sonrasında yapılan temel tasarımlar soğutma sağlamanın fazlasıyla çap artışına neden olacağından bakır malzemesinden vazgeçilerek yüksek sıcaklıklara dayanabilen malzeme arayışına girilmiştir. Çeşitli seramiklerin kullanımı yüksek maliyetleri nedeniyle tercih dışı tutulmuştur. Bunların yerine maliyeti nispeten daha ucuz ve işlenmesi kolay olan grafit malzemesi tercih edilmiştir.

Çizelge 4.4. Bu çalışmaya ait oluşturulan modele ait sınır şartları

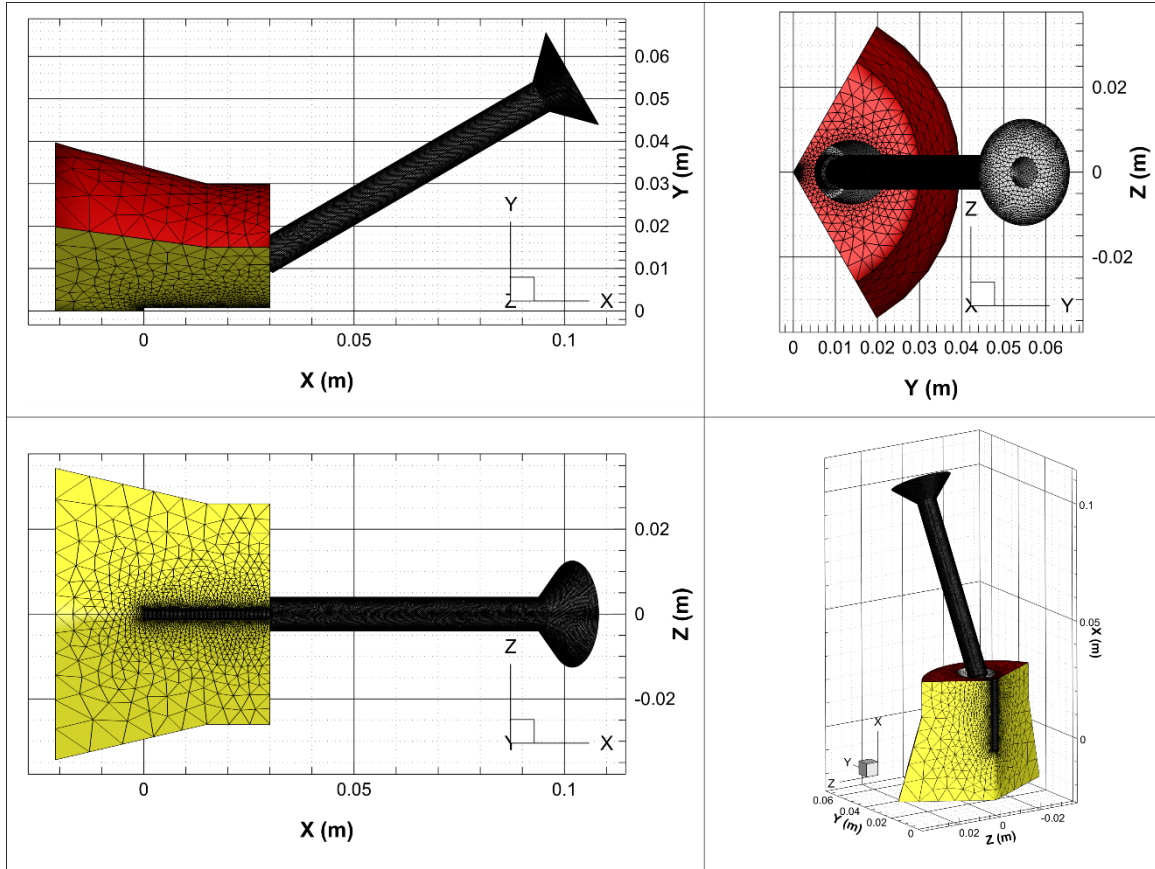
		Giriş	Katot	Anot	Çıkış
P	Basınç (Bar)	3	$\partial P/\partial n=0$	$\partial P/\partial n=0$	101325
T	Sıcaklık (K)	300	3500	1000	$\partial T/\partial n=0$
V	Hacimsel Debi (SLPM)	70	0	0	$\partial V/\partial n=0$
I	Elektrik Akımı (A)	0	250	0	0
Anot Çapı 5 mm			Anot Boyu 20 mm		

Ayrıca anot çapı ve boyunun etkisinin görülebilmesi için Şekil 4.4-a’da belirtilen geometri üzerinde farklı çap ve boy parametrelerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde öncelikle 20mm anot boyu sabit tutularak sırasıyla 5-6-7-8 mm çap değerlerine göre analizler gerçekleştirilmiş ve anot çapı değişiminin plazma jeti sıcaklık ile hız değerleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Model 1’den sonra geometri dış kısım ile modellendiğinden veri alma biçimi Şekil 4.6’da gösterildiği gibi düzenlenmiştir.



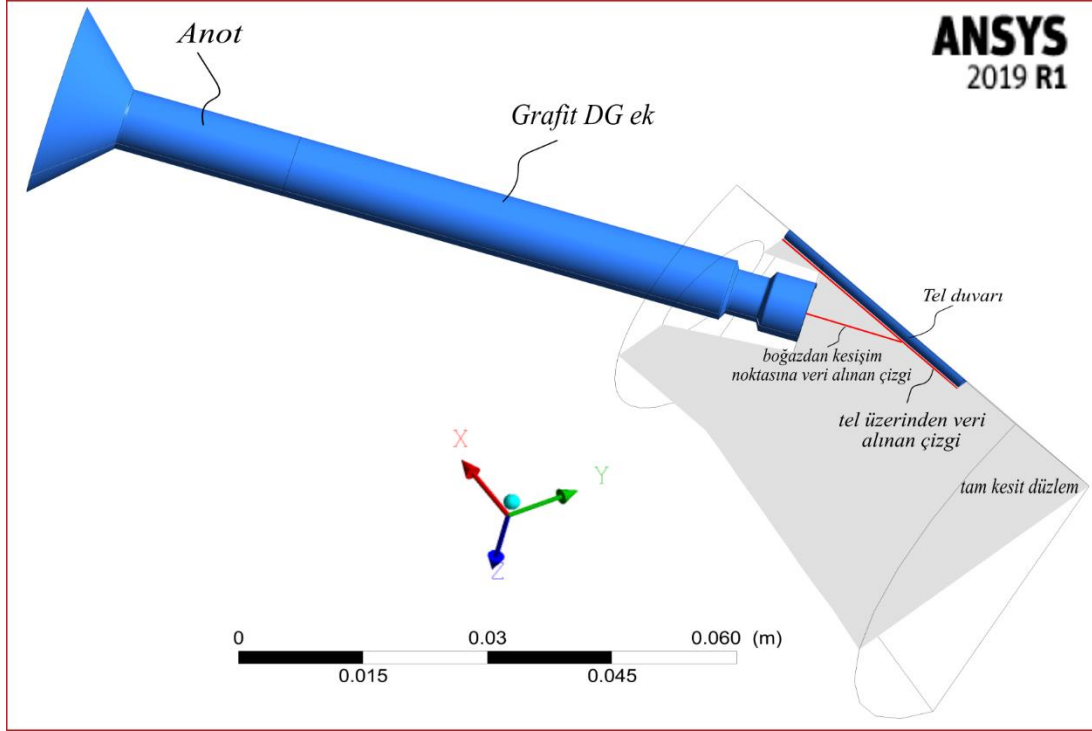
Şekil 4.6. Veri alınan noktaların tarifi 1. YTG ve YD geometrileri için nozul çıkış verisini 2 ve 3. DG geometriler için sırasıyla boğaz ve nozul çıkış verisini 4. Tüm geometriler için nozul çıkışından belirli mesafelerdeki verileri temsil etmektedir.

Şekil 4.7’de ağ yapısı ile birlikte gösterilen üçüncü geometri, önceki geometrilerin çözümü ve tabanca yerleşiminin fiziki durumu sonucu karar verilen son geometridir. Tabanca tasarımı bu geometri temelinde yapılmıştır. Yerleşim yerine uygun bir açı ile malzeme özellikleri Ti-6Al-4V olarak girilen yüzeye hedeflenen nozul ile birlikte modellenmiştir. Bu geometrinin çözümü ile tel üzerine gelen sıcaklık ve hız değerlerinin tespiti ve ne zaman eriyeceğinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Geometriyi oluşturan ağ elemanlarının en yüksek çarpıklık değeri 0,77 en düşük dikey kalite değeri ise 0,23’dür. Şekil 4.2’ye göre iyi kalite sınıfındadır.



Şekil 4.7. Ti-6Al-4V tel ile birlikte oluşturulmuş geometri ve ağ yapısı

Şekil 4.7’de yer alan nihai modelden veri alma şekli, tel üzerindeki sıcaklık ve hız değerlerinin okunması amacıyla Şekil 4.8’deki gibi güncellenmiştir. Burada tel duvarına herhangi bir hız tanımlanmadığından doğrudan tel üzerinden alınan veriler her zaman sıfıra eşitleneceğinden Şekil 4.8’deki veri alma çizgisi tel duvarından 0,5 mm ötelenerek oluşturulmuştur.



Şekil 4.8. Nihai geometriye ait veri alınan çizgiler ve Şekil 4.7’da ince ağ yapısından dolayı ifade edilemeyen geometrilerin ifadesi

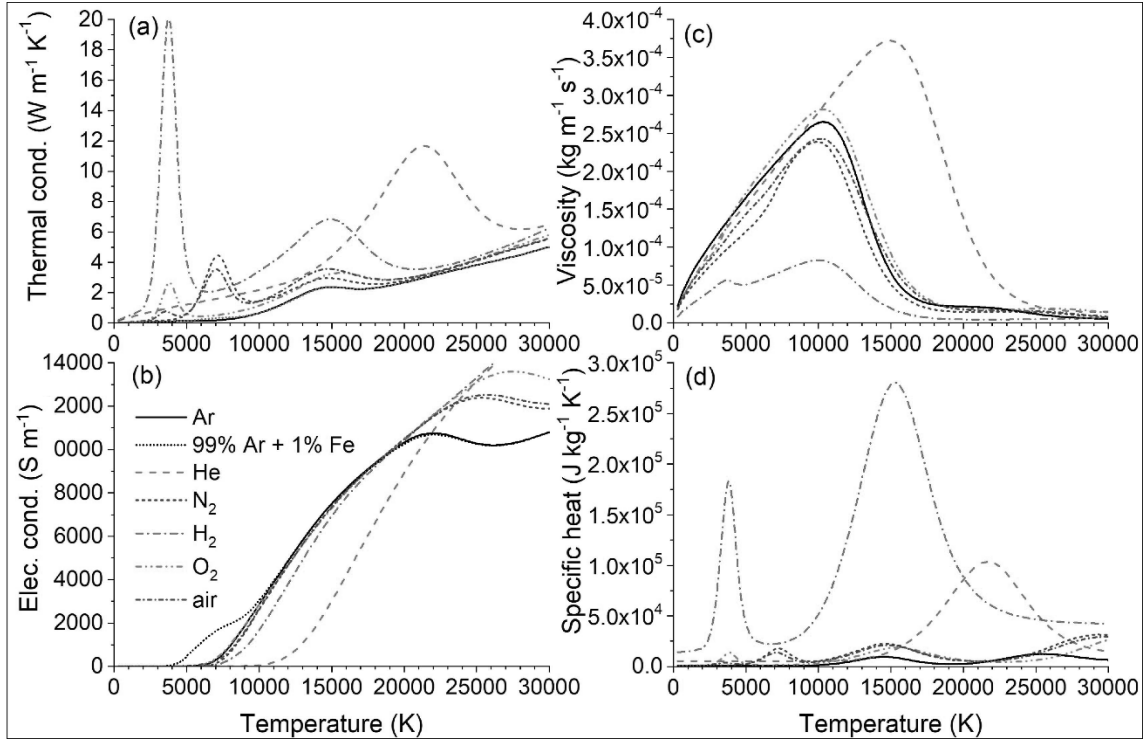
Üçüncü geometri için sınır şartları Çizelge 4.5’te gösterilmiştir. Burada gösterilen sınır şartları ile daha önce diğer özelliklere göre etkisi düşük olduğundan dikkate alınmayan bazı özellikler de dikkate alınarak birebir çalışma şartlarına uygun sayısal modelleme gerçekleştirilmiştir. Örneğin gaz giriş ve katot sıcaklığı 300 K olarak belirlenmiştir. Anot kalınlığı girilerek soğutma suyu sıcaklığı 300 K olarak tanımlanmıştır. Anot malzemesi bakır, DG nozulun malzemesi grafit, katodun malzemesi ise %2 toryum alaşımlı tungsten olarak belirlenmiş ve özellikleri yazılıma girilmiştir. Grafit ve katkılı tungsten malzemesinin özellikleri [287] numaralı referanstan alınmıştır.

Çizelge 4.5. Nihai geometriye ait sınır şartları

		Giriş			Katot	Anot	DG Eki	Tel	Çıkış
P	Basınç (Bar)	3			$\partial P/\partial n=0$	$\partial P/\partial n=0$	$\partial P/\partial n=0$	$\partial P/\partial n=0$	101325
T	Sıcaklık (K)	300			300	$\partial T/\partial n=h$	$\partial T/\partial n=h$	$\partial T/\partial n=h$	$\partial T/\partial n=h$
V	Hacimsel Debi (SLPM)	60	70	90	0	0	0	0	$\partial V/\partial n=0$
I	Elektrik Akımı (A)	0			300	0	0	0	0

Çalışma gazı olarak belirlenen argon gazının yüksek sıcaklıklarda değişen termal ve elektriksel özellikleri Ansys Fluent yazılımına kullanıcı tanımlı fonksiyon olarak 30 000K

sıcaklıklara kadar tanımlanmıştır. Argon gazının bu özellikleri Şekil 4.9'daki grafiklerden [171] ve [149],[180] numaralı referanslardan derlenmiştir. Tel malzemesi olan Ti-6Al-4V malzemesinin özellikleri ise [288–290] numaralı referanslardan derlenerek yazılıma tanımlanmıştır.



Şekil 4.9. Argon gazının 30 000 K sıcaklığa kadar termal ve elektriksel özellikleri [171]

Bu aşamada tek bir hacimsel debi parametresi için üç farklı elektrik akım değeriyle analizler gerçekleştirilmiş böylece 9 adet analiz yapılmıştır. Sonrasında her bir hacimsel debi parametresinin en iyileri seçilerek bu sayı 3'e düşürülmüştür. Bu parametreler ise deneysel parametreleri oluşturmuştur.

4.2.3. Sayısal çözüm teorisi, genel ve özelleştirilen denklemler

Hesaplamalı akışlar dinamiğinde temel ilke oluşturulan modelin çözüm alanının alt bölgelere (sonlu sayıda hücre) ayrıklaştırılmasıdır. Bu yöntemde ağ yapısı oluşturularak ilgili diferansiyel formdaki korunum denklemlerinin bu çözüm ağı boyunca ayrıklaştırılıp lineer denklem sistemlerine dönüştürülmesi sağlanarak çözüm yapılır. Böylece tüm hesaplama alanı içindeki son çözümün elde edilmesiyle sonuçların fiziksel anlam taşıyıp taşımadığı kontrol edilerek sonuçların değerlendirilmesi yapılır [280]. Plazma gibi

türbülanslı akışın HAD ile modellenmesi laminar akış simülasyonlarından çok daha zordur. Bunun nedeni, türbülanslı akış alanının daha ince özelliklerinin sürekli olarak daimi olmaması ve üç-boyutlu olmasıdır. Bir türbülanslı akışta tüm yönlerde türbülans girdapları adı verilen gelişigüzel, girdaplı ve çevrintili yapılar ortaya çıkar [62].

Ansys Fluent yazılımı ile plazma modellenmesinde temel olarak Navier-Stokes denklemleri ve Manyetohidrodinamik (MHD) denklemleri beraber kullanılırlar. Navier-Stokes denklemleri temel korunum yasalarından türetilmiş kısmi diferansiyel denklem takımlarından oluşan denklemlerdir. Günümüzde bu denklemlerin bilinen bir analitik çözümü olmadığından bu denklemler ayrıklaştırılarak sayısal çözüm elde edilir. Bu denklemler matematiksel olarak akışkan içerisinde birim kütleyle etki eden momentum değişimlerinin, basınç değişimleri ve sürtünme kayıplarına neden olan viskoz kuvvetlerin toplamının eşit olduğunun doğruluğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca kontrol hacmi yaklaşımı akışkanlar mekaniği denklemlerinin çıkartılmasında izlenen genel bir yöntemdir. Kontrol hacmi akışkanın hareketli olduğu kontrol yüzeyleri ile sınırlanmış bir çözüm alanını ifade eder ve bu hacim içerisinde kütle ve enerji korunur. Momentumun x, y ve z bileşenlerinin zamana bağlı olarak değişimi hacimsel kuvvetler ile cisme etkiyen yüzey kuvvetlerinin toplamına eşittir. Süreklilik denklemi tek bir denklemle ifade edilirken momentum denklemi x, y ve z bileşenleri için ayrı-ayrı ifade edilen vektörel formda bir denklemdir. Enerji denklemi ise skaler formda ifade edilir

Süreklilik denklemi

Süreklilik denklemi kütle korunumu prensibi gereğince Eş. 4.1.'deki integral formu ile ifade edilebilir.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV = - \iint_S \rho \vec{V} \cdot \vec{n} dS \quad (4.1)$$

Burada $\vec{V}$, akış hız alanını, ρ , yoğunluğu, $\vec{n}$, kontrol sınırına dik birim vektörü ifade etmektedir. Ayrıca Eş. 4.1. akış alanı içinde seçilmiş sonsuz küçük bir kontrol hacmi V, kontrol hacminin sınırları S olmak üzere kütle korunumu, kontrol hacminin sınırlarından giren ve çıkan net kütle akısının kütle değişim hızına eşit olduğunu belirtmektedir. Bu

denklemin hacim integrali alınır Eş. 4.2’de yer alan diferansiyel formdaki denklem elde edilecektir. Kararlı hal çözümü yapıldığından zamana bağlı terim çıkartılmıştır.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0 \quad (4.2)$$

Eş. 4.2’nin kartezyen koordinatlarda ifadesi ise Eş.4.3’te gösterilmiştir. Bu eşitlikte S_m , kaynak terim olarak adlandırılır. Fluent yazılımına kullanıcı tarafından tanımlanır.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V}) = \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = S_m \quad (4.3)$$

Denklem 3.11’de kütle korunum denkleminin genel formudur ve sıkıştırılabilir akışlarda olduğu kadar sıkıştırılamaz akışlarda da geçerlidir. Bu denklemde u, x yönü hız bileşenini, v, y yönü hız bileşenini, w, z yönü hız bileşenini ifade etmektedir.

Momentumun korunumu denklemi

Hareketin korunumu prensibinden yola çıkılarak, dış kuvvetler toplamının atalet kuvvetine eşitliğinden faydalanılır. Momentumun korunum denkleminin integral formu Eş. 4.4.’de ifade edildiği gibidir.

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V (\rho \cdot dv) \cdot \vec{V} + \iint_S (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dS) \cdot \vec{V} = - \iint_S p \cdot \vec{n} dS + \overrightarrow{F_{visc}} + \iiint_V p \cdot \vec{f} \cdot dv \quad (4.4)$$

Burada eşitliğin sol tarafı momentum değişimini sağ tarafı ise bünyesel (yerçekimi kuvveti, elektromanyetik kuvvet vs.) ve yüzeysel kuvvetler (basınç kuvvetleri, teğetsel kuvvetler vs.) gibi dış kuvvetleri ifade etmektedir. Soldan birinci terim kontrol yüzeyindeki kütle miktarının değişiminden kaynaklanan momentum değişimini, ikinci terim kontrol yüzeyinden çıkan ve giren kütlelerin taşıdıkları momentumlar arasındaki farkı ifade etmektedir. Eşitliğin sağ tarafındaki ilk terim basınç kuvvetlerini, ikinci terim teğetsel kuvvetleri, üçüncü terim ise yerçekimsel kuvvetleri ifade etmektedir. Son terimde yer alan $\vec{f}$, birim kütleye etkiyen bünyesel kuvvettir.

İntegral formu verilen denklemin genel kapalı formu Eş 4.5’te ifade edilmiştir.

$$\nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (4.5)$$

Burada $\vec{\tau}$ gerilme tensörüdür. $\vec{F}$ Fluent yazılımına tanımlanan kaynak terimidir. Bizim çalışmamızda elektromanyetik kuvvet terimi olarak eklenecektir. Ayrıca Eş. 4.4.'te yer alan basınç ile ilgili yüzey integrali hacim integraline dönüştürülerek, hız vektörü, teğetsel kuvvet vektörü ve bünyesel kuvvet vektörü kartezyen koordinat sisteminde ifade edilir. Böylece denklemin integral formu 3 bileşene ayrılmış olur. Kontrol hacmi sonsuz küçük yapılar momentumun korunumu denkleminin Eş. 4.6-4.8'te verilen kartezyen koordinat sisteminde diferansiyel formları elde edilir. Kararlı hal çözümü yapıldığından zamana bağlı terim çıkartılmıştır.

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \rho f_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (4.6)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \rho f_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (4.7)$$

$$\rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \rho f_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (4.8)$$

Bu çalışmadaki model de olduğu gibi türbülansın modellenmesi sırasında Ansys Fluent tarafından kullanılan Navier-Stokes momentumun korunum denklemleri Eş. 4.9-4.11 arasında verilmiştir.

$$\rho u \frac{\partial u}{\partial x} + \rho v \frac{\partial u}{\partial y} + \rho w \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{1}{Re} - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \quad (4.9)$$

$$\rho u \frac{\partial v}{\partial x} + \rho v \frac{\partial v}{\partial y} + \rho w \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{1}{Re} - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \quad (4.10)$$

$$\rho u \frac{\partial w}{\partial x} + \rho v \frac{\partial w}{\partial y} + \rho w \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{1}{Re} - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (4.11)$$

Enerjinin korunumu denklemi

Temodinamiğin 1. Kanunu gereğince oluşturulan enerjinin korunumu denkleminin integral formu Eş. 4.12’de gösterilmiştir.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} \iiint_v \rho \cdot \left(e + \frac{1}{2} V^2 \right) \cdot dv + \iint_S (\rho \cdot \vec{V} \cdot \vec{n} dS) \cdot \left(e + \frac{1}{2} V^2 \right) \\
 & = - \iint_S (p \cdot \vec{n} dS) \cdot \vec{V} + \iiint_v (\vec{f} \cdot \rho \cdot dv) \cdot \vec{V} + \dot{W}_{visc} + \iiint_v \dot{q} \cdot \rho \cdot dv \\
 & + \dot{Q}_{visc}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Burada soldan 1. terim kontrol hacmindeki kütle miktarının değişiminden kaynaklanan enerji değişimini, 2. terim kontrol yüzeyinden çıkan ve giren kütlelerin taşıdıkları enerjiler arasındaki farkı ifade etmektedir. Eşitliğin sağ tarafındaki 1. terim basınç kuvvetlerinin yaptığı işi, 2. terim bünyesel kuvvetlerin yaptığı işi, 3. terim viskoz kuvvetlerin yaptığı işi, 4. terim radyasyon ve yanma yoluyla birim zamanda sokulan ısıyı, 5. terim ise viskoz kaynaklı sokulan ısıyı ifade etmektedir. Ayrıca diğer denklemlerde verilmeyen e , iç enerjiyi, $(\frac{1}{2})V^2$ kinetik enerjiyi, $\dot{q}$, birim kütle başına sokulan enerjiyi belirtmektedir.

Eş. 4.12’de yer alan ifadenin yüzey integralleri hacim integrallerine dönüştürülerek ve kontrol hacmi sonsuz küçültülerek enerji denkleminin diferansiyel formu Eş. 4.13’deki gibi oluşturulur.

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \cdot \left(e + \frac{1}{2} V^2 \right) \right] + \nabla \cdot \left[\rho \left(e + \frac{1}{2} V^2 \right) \vec{V} \right] \\
 & = -\nabla(p\vec{V}) + \rho \cdot \vec{f} \cdot \vec{V} + \dot{w}_{visc} + \rho \dot{q} + \dot{q}_{visc}
 \end{aligned} \tag{4.13}$$

Burada, kararlı hal çözümleri için Eş. 4.14’deki, bünyesel kuvvet ihmal edildiğinde Eş. 4.15’deki, viskoz etkiler ihmal edildiğinde Eş. 4.16’deki, sisteme dışardan ısı ilavesi olmadığında Eş. 4.17’deki gibi kabuller yapıldığında enerji denkleminin son hali Eş. 4.18’deki son halini alacaktır.

$$\frac{\partial}{\partial t} \equiv 0 \tag{4.14}$$

$$\vec{f} \equiv 0 \quad (4.15)$$

$$\dot{w}_{visc} \equiv 0, \quad \dot{q}_{visc} \equiv 0 \quad (4.16)$$

$$\dot{q} \equiv 0 \quad (4.17)$$

$$\nabla \left[\rho \left(e + \frac{1}{2} V^2 \right) \vec{V} \right] = -\nabla(p\vec{V}) \quad (4.18)$$

Manyetohidrodinamik (MHD) Denklemleri

MHD, uygulanan bir elektromanyetik alan ile elektriksel olarak iletken bir akışkan arasındaki etkileşimi açıklayan bir alandır. Akışkan akış alanı ve manyetik alan arasındaki bağlantı iki temel etki temelinde anlaşılabilir. Birincisi, iletken malzemenin bir manyetik alandaki hareketi nedeniyle elektrik akımının indüksiyonu, ikincisi ise elektrik akımı ve manyetik alan etkileşiminin sonucu olarak Lorentz kuvvetinin etkisidir. Genel olarak, indüklenen elektrik akımı ve Lorentz kuvveti, akış kuvvetlerine karşı çıkma eğilimindedir. Akışkanlar mekaniği ve elektromanyetik alan teorisinin birleşiminden oluşan MHD'yi açıklayan denklemler Navier-Stokes sıvı dinamikleri denklemlerinin ve Maxwell'in elektromanyetizma denklemlerinin bir birleşimidir.

Elektromanyetik alan Eş. 4.19-4.22 arasında verilen Maxwell eşitlikleri ile tanımlanır.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (4.19)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (4.20)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = q \quad (4.21)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4.22)$$

Burada, $\vec{B}$, manyetik alanı (Tesla), $\vec{E}$, elektrik alanı (V/m), $\vec{H}$, manyetik alan için indüksiyon alanını, $\vec{D}$, elektrik alanı için indüksiyon alanını, q , elektrik şarj yoğunluğunu (C/m^3) ve $\vec{j}$,

elektrik akım yoğunluğunu (A/m^2) ifade etmektedir. Ayrıca buradaki indüksiyon alanı $\vec{H}$ ve $\vec{D}$ Eş. 4.23 ve 4.24'deki gibi tanımlanır [291].

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} \vec{B} \quad (4.23)$$

$$\vec{D} = \varepsilon \vec{E} \quad (4.24)$$

Burada, μ , manyetik geçirgenliği, ε , elektrik geçirgenliği ifade etmektedir. Akış alanı ve elektromanyetik alan arasındaki etkileşimi incelerken, indüksiyon nedeniyle akım yoğunluğunu bilmek önemlidir. Genellikle mevcut akım yoğunluğunu değerlendirmek için iki yaklaşım kullanılabilir. Biri, manyetik indüksiyon denkleminin çözümü; diğeri ise elektrik potansiyel denklemini çözmektir. Bu tez çalışmasındaki sayısal modelin çözümünde elektrik potansiyel denklemi kullanılmıştır.

Elektrik potansiyel denklemini çözmek ve akım yoğunluğunu hesaplamak için Ohm kanununa ait eşitliklerden (Eş. 4.25 ve Eş. 4.26) faydalanılır.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (4.25)$$

Burada σ elektrik iletkenliğidir. Akışkanlar için manyetik alan ($\vec{B}$) içerisinde akış hızı ($\vec{V}$) Ohm kanunu ile birlikte ifade edilirse;

$$\vec{j} = \sigma (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B}) \quad (4.26)$$

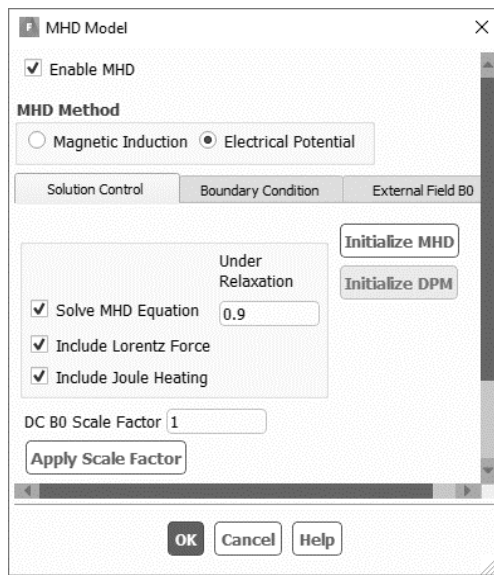
eşitliği elde edilir. $\vec{E}$ elektrik alanı Eş. 4.27'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\vec{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (4.27)$$

Burada φ , skaler potansiyel, $\vec{A}$ vektörel potansiyeldir. Statik alan ve $\vec{b} \ll \vec{B}_0$ varsayımında bulunularak Eş. 4.28'deki Ohm kanunu eşitliği;

$$\vec{j} = \sigma \left(-\nabla\varphi + (\vec{V} \times \vec{B}_0) \right) \quad (4.28)$$

şeklinde yazılabilir. Ansys Fluent yazılımındaki MHD düzenlemesi ile ilgili ekran penceresi Şekil 4.10'da gösterilmektedir. Bu görselde MHD etkinleştirme kutucuğu işaretlendiğinde MHD eşitlikleri çözülmektedir. Plazma modelleme işlemlerinde ark kökünün oluştuğu noktanın belirlenmesinde Lorentz kuvvetler ve elektrotların ısı transfer mekanizmaları arasında yer alan Joule ısıtma olayları önemli olduğundan işaretlenmelidir. Lorentz kuvvetler kutucuğunun işaretlenmesi ($j \times B$) teriminin momentum denklemine eklenmesini, Joule ısıtma kutucuğunun işaretlenmesi ise ($j \cdot E$) teriminin enerji denklemine eklenmesini sağlayacaktır.



Şekil 4.10. Ansys Fluent yazılımındaki MHD ile ilgili model tanımlama penceresi

Özelleştirilmiş denklemler

Yukarıda açıklanan denklemlerin bu çalışmadaki sayısal modele uygulanması ile aşağıdaki denklemler elde edilebilir. Süreklilik denklemi Eş. 4.29'daki gibi yazılır.

$$\nabla \cdot \rho V = 0 \quad (4.29)$$

Momentumun korunumu denklemine Lorentz kuvvet ($j \times B$) terimi ilavesiyle Eş. 4.30 yazılır.

$$\nabla \cdot (\rho V V) = -\nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau} + j \times B \quad (4.30)$$

Enerjinin korunumu denklemine Joule ısıtma ($j \cdot E$), hacimsel radyasyon kayıpları ($4\pi\epsilon_r$), elektron entalpisinin difüzyonu ($j \cdot \nabla T$) terimi eklenerek Eş. 4.31 yazılır. Ayrıca burada K,

termal iletkenliği (W/m K), k_B , Boltzmann sabitini (J/K), e , elementer yükü (C) ifade etmektedir.

$$\nabla \cdot (\rho V h) = \nabla \cdot (K \nabla T) + j \cdot (E + u \times B) - 4\pi \epsilon_r + \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} j \cdot \nabla T \quad (4.31)$$

Korunum denklemleriyle hesaplama yapmak için ek denklemler Eş.4.32 ile 4.35 arasında verilmiştir.

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (4.32)$$

$$\nabla \times A = B \quad (4.33)$$

$$E = -\nabla \phi \quad (4.34)$$

$$j = \sigma E \quad (4.35)$$

4.2.4. Türbülans modeli ve çözüm yaklaşımı

Plazma tabanca modelleme çalışmalarında yaygın olarak kullanılan türbülans modelleri k - ϵ ve k - ω türbülans modelleridir. Bu yaklaşımlar ile plazma türbülansı yaklaşık olarak hesaplanabilmektedir [171]. Bugün için türbülanslı akış problemlerinin birçoğunu doğrudan çözmek mümkün değildir. Doğrudan çözümünün yokluğunda türbülanslı akışı karakterize edebilmek için türbülans modelleri geliştirilmiştir. Bu çalışmada pek çok akış olayında kabul edilebilir doğrulukta sonuçlar veren ve oldukça yaygın olarak kullanılan standart k - ϵ modeli kullanılmıştır. Bu model türbülans kinetik enerjisi (k) ve yitim hızı (ϵ) için yazılan (Eş. 4.36-4.37) iki adet transport denkleminin çözümünü ve türbülans viskozitesinin hesabını içerir.

$$\nabla \cdot (\rho k V) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4.36)$$

$$\nabla \cdot (\rho \epsilon V) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_k - \rho \epsilon C_{2\epsilon}) \quad (4.37)$$

Burada G_k türbülans kinetik enerji üretiminin ve μ_t türbülans viskozitesinin ifadesidir. Sırasıyla Eş. 4.38 ve Eş. 4.39'de gösterildiği gibi hesaplanabilir.

$$G_k = -\rho \overline{v'_i v'_j} \nabla_v \quad (4.38)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4.39)$$

Ansyes Fluent yazılımında kullanıcı tarafından girilen ve ilk değeri deneysel sonuçlara göre düzenlenmiş olan bazı model sabitleri vardır. Bunların başlıcaları k ve ε için Prandtl sayıları olan sırasıyla σ_k ve σ_ε 'dir. Diğerleri ise $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve C_μ sabitleridir. Çalışmada bu değeri aşğıdaki gibi tanımlanmıştır [292].

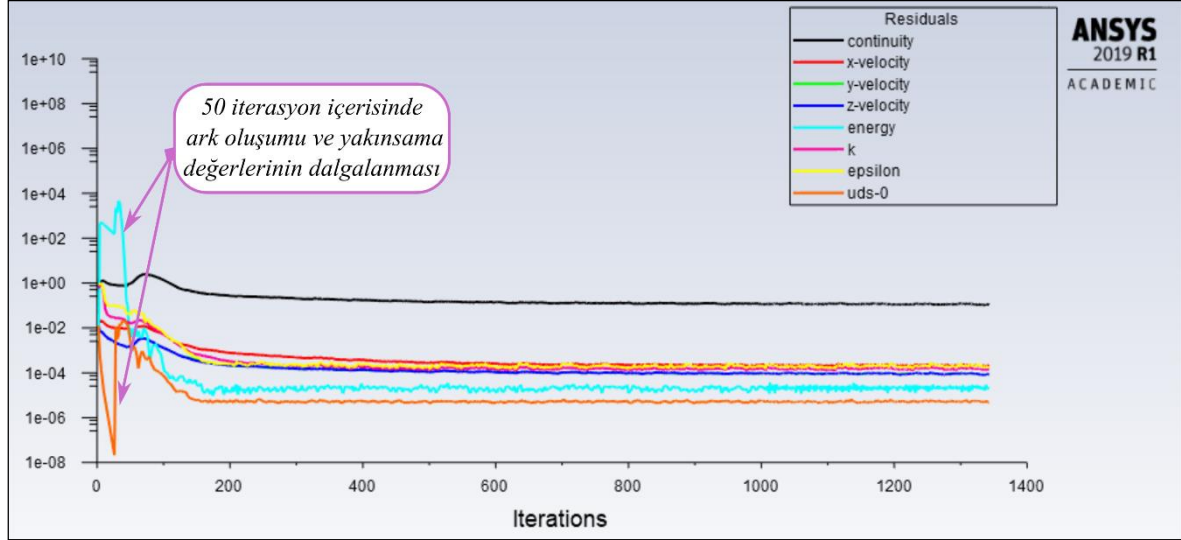
$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

Fluent temel denklemlerin çözümünde bütünleşik (*ing; coupled*) ve ayırık (*segreated*) çözüm algoritması olmak üzere iki ayrı çözüm algoritması bulunmaktadır. Her iki yaklaşımda sonlu hacim metodunu kullanarak çözüme ulaşılır. Bu çalışmada belirlenen sayısal modelin çözümünde basınç tabanlı bütünleşik algoritma kullanılmıştır. Bu yöntem momentum denklemlerini ve basınca dayalı süreklilik denklemini içeren denklemlerin birleştirilmiş sistemini çözer. Benzer şekilde momentum ve süreklilik denklemleri yakından bağlantılı bir şekilde çözüldüğünden, çözüm yakınsama oranı ayırık çözüm algoritmasına göre oldukça iyileşir.

4.2.5. Yakınsama, korunum denklemlerinin kontrolü ve bağımsızlık testleri

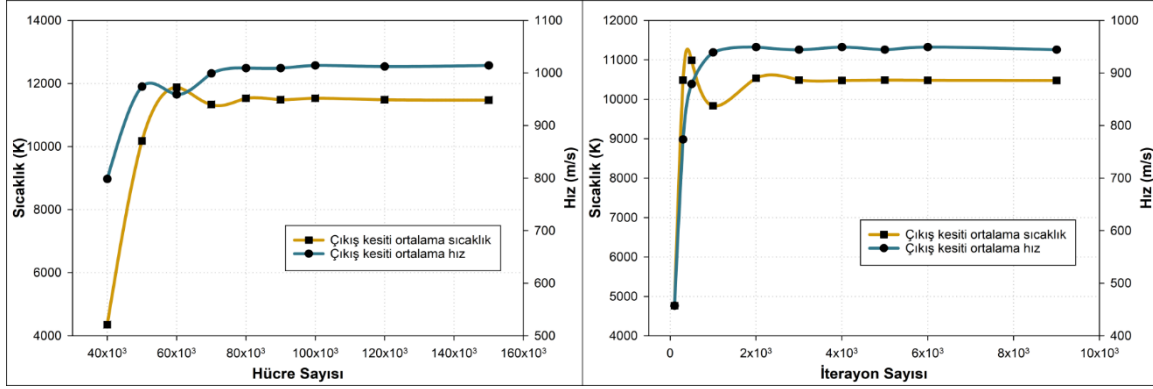
Sayısal modelin çözümünde sonuçların yakınsaması, kullanılan her bir nokta için tüm korunum denklemlerinin çözüm alanındaki her bir noktada dengeye geldiğinde gerçekleşir. Sayısal çözümün sonuca yakınsadığı bütün değişken rezidülerinin doğrudan veya değişken bir azalma göstermesi ile anlaşılmaktadır. Rezidü miktarları sayısal çözümde oluşan hata oranı hakkında bize bilgi vermektedir. Örneğin çoğu sayısal modelleme uygulamalarında enerji denklemlerinin yakınsadığına kanaat getirmek için hata oranı 10^{-6} mertebesinde. Plazma tabancaları için örnek bir rezidü grafiği Şekil 4.11'de gösterilmiştir. Bu grafikte, ark oluşumunun yakınsama değeri etki de görülmektedir. Oda sıcaklığında gönderilen gaz ani bir şekilde yaklaşık 15 000 K mertebesine çıkmakta ve çözümü ıraksatmaktadır. Çoğu çözüm ark oluşum sırasında ıraksamaktadır. Bu çalışmada ıraksamadan kaçınmak amacıyla

mesh kalitesinin iyileştirilmesi, uygun çözücü ayarlarının yapılması ve sınır şartlarının geometriye uygun şekilde seçilmesi gibi yöntemler geliştirilmiştir.



Şekil 4.11. Plazma tabancaları için yapılan analizlerde elde edilen örnek bir rezidü grafiği ve ark oluşumunun yakınsama değerlerine etkisi

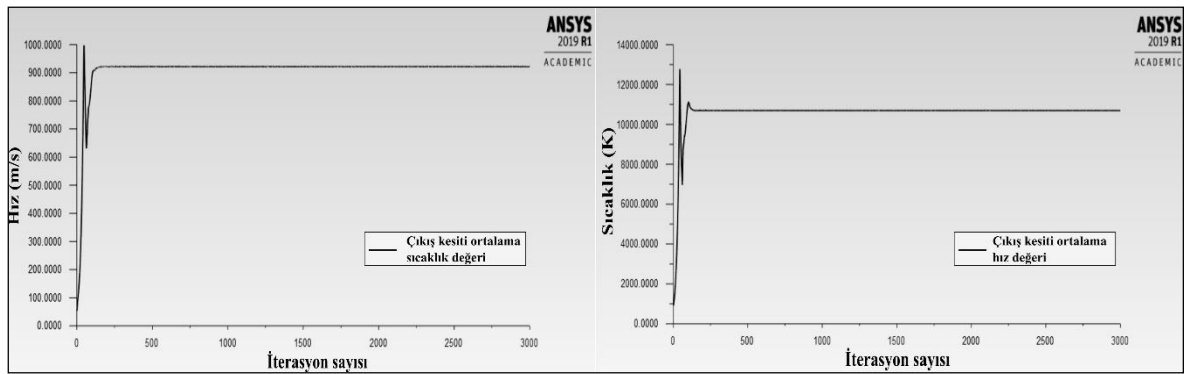
Şekil 4.12’de ağ yapısı kalite değerleri Başlık 4.2.2 altında verilen Model 1 geometrisi için sayısal çözümün hücre ve iterasyon sayısından bağımsızlaştırılması grafikleri yer almaktadır. Bu işlem için sayısal model üzerindeki referans değeri, nozul çıkış kesitinde bulunan ağ yapısı düğüm noktalarından alınan sıcaklık ve hız değerlerinin ortalamasıdır. Şekil 4.12’ye göre ortalama sıcaklık ve hız değerlerinin yaklaşık 2 000 iterasyon sayısından sonra değişmediği görülmüştür [280]. Hücre sayısından bağımsızlaştırma işlemi için ise 40 000 ile 150 000 arasında değişen hücre sayıları kullanılmıştır. Şekil 4.12’ye göre ortalama sıcaklık ve hız değerlerinin yaklaşık 80 000 hücre sayısından sonra değişmediği görülmüş ve Model 1 ile sayısal modelleme işlemleri için 80 000 ile 130 000 arasında değişen hücre sayısı kullanılmıştır.



Şekil 4.12. Model 1 geometrisi için sayısal çözümün hücre ve iterasyon sayısından bağımsızlaştırma grafikleri

Korunum denklemlerinin kontrolü için giriş ve çıkış sınır şartları arasında debi kontrolü yapılmıştır. Buna göre giriş ve çıkış debileri arasındaki net fark $-7,152 \times 10^{-8}$ olarak elde edilmiştir [280]. Bu değer sisteme giren gazın neredeyse hiç kayıp yaşamadan sistemde çıktığını göstermiştir.

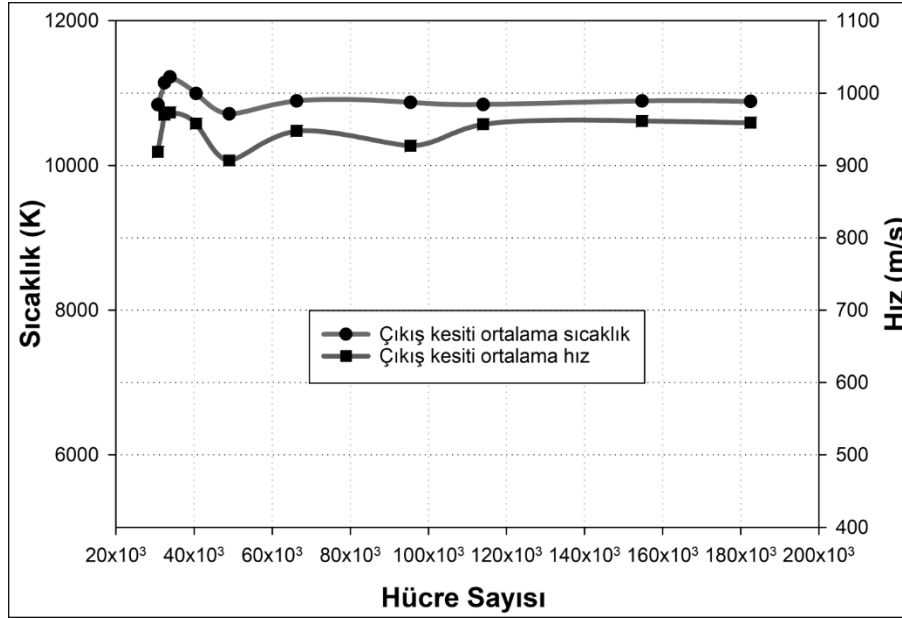
Şekil 4.13’de Model 2 geometrisi için 200 A – 37 SLPM çalışma parametresinde sayısal çözümün iterasyon sayısından bağımsızlaştırılması grafikleri yer almaktadır. Bu işlem için sayısal model üzerindeki referans değeri Model 1’deki ile aynıdır. Şekil 4.13’e göre ortalama sıcaklık ve hız değerlerinin yaklaşık 150 iterasyon sayısından sonra 3 000 iterasyon boyunca dikkate değer şekilde değişmediği görülmüştür. Bu durum referans alınarak 1 000 iterasyon yapılmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.13. Model 2 geometrisi için sayısal çözümün iterasyon sayısından bağımsızlaştırılması grafikleri

Şekil 4.14’te iterasyon sayısından bağımsızlaştırılan model için hücre sayısından bağımsızlık testleri yapılmıştır. Bu testler için Fluent yazılımının başlangıç hücre sayısı değeri 30 686’dan başlanılarak 182 513 adet hücre sayısına kadar analizler tekrar edilmiştir.

Buna göre çözümün yaklaşık 120 000 adet hücre sayısından sonra dikkate değer bir şekilde değişiklik göstermediği tespit edilmiştir. Ayrıca korunum denklemlerinin kontrolü için giriş ve çıkış sınır şartları arasında debi kontrolü yapılmıştır. Buna göre giriş ve çıkış debileri arasındaki net fark $3,433234 \times 10^{-8}$ olarak elde edilmiştir.



Şekil 4.14. Model 2 geometrisi için sayısal çözümün hücre sayısından bağımsızlaştırılması grafikleri

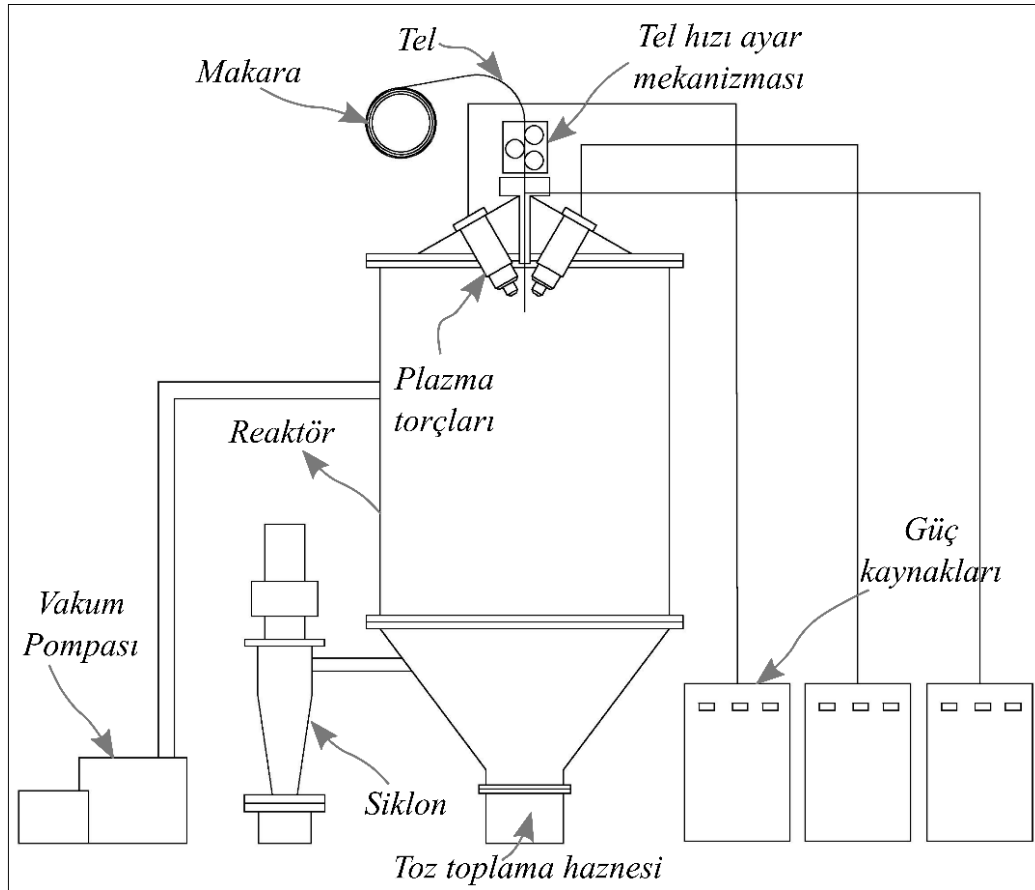
Bu işlemler Model 3 geometrileri ve tel ekli çalışmaların her birisinde tekrarlanmıştır. Böylece güvenilir çözüme ulaşılmaya çalışılmıştır. Her bir model için aşağıdaki kontroller yapılmıştır.

1. Ağ yapısı kalite değerleri (çarpıklık ve dikey kalite gibi)
2. Çözümün hücre ve iterasyon sayısından bağımsızlık testleri
3. Önemli görülen bir noktadan sıcaklık, hız veya bir düzlemden ortalama sıcaklık ve hız gibi değerlerin çözüm esnasında kontrolü ve dikkate değer değişimin olmadığı görülmesi
4. Yakınsama grafiği
5. Korunum denklemlerinin kontrolü
6. Sıcaklık ve hız dağılımlarının incelenmesi

4.3. Deneysel Yöntem - PA Sisteminin Kurulması

Çalışmanın bu kısmında “Problemin Tanımlanması” başlığı altında bahsedilen ikinci ana problemin çözümü için deneysel yöntem anlatılacaktır. Geleneksel malzemelere nispeten daha yüksek ergime sıcaklıklarına sahip Ti-6Al-4V malzemesinin tozlarının istenilen boyutlarda üretilmesi, yüksek sıcaklıklar ve hız değerleri gerektirdiğinden problemidir. Bu problemin çözümü PA yöntemi ile diğer potalı ergitme yöntemlerine kıyasla daha az maliyetli olarak üretilmektedir.

Plazma atomizasyon yönteminde sistemin ana bileşenleri plazma güç kaynakları (her bir tabanca için ayrı) ve tabancaları, tel besleme ve hızı ayar ünitesi, toz üretim reaktörü, vakum pompası ve toz toplama kısımlarıdır. Toz üretim deneylerini gerçekleştirebilmek için kurulan PA deney düzeneğinin şematik görünümü Şekil 4.15’te gösterilmiştir.



Şekil 4.15. PA deney düzeneğinin şematik görünümü

PA deney düzeneğinin tasarım ve yapım aşamalarından önce sistemin özeti niteliğindeki gerçek görünüm Şekil 4.16’da gösterilmiştir. Şekil 4.16-a’da görüldüğü gibi düzeneğimiz

üst kısım ile birlikte yaklaşık 4,5m yüksekliğindedir. Vakum pompası yardımıyla reaktörün iç kısmındaki oksijen boşaltılır ve sisteme argon gazı gönderilir. Bu işlem birkaç kez tekrarlanır. Tabancalara uygun deney parametresine göre gaz akışı başlatılır. Şekil 4.16-b’de görülen kule üst kısımda bulunan plazma ateşleme ve tel hızı kontrol ünitesi üzerinden plazma tabancası ateşlenerek başlatılır. Üretim takip edilerek tel hızı ayarlaması yapılır. İşlem durdurularak toz toplama haznesindeki tozlar alınır.

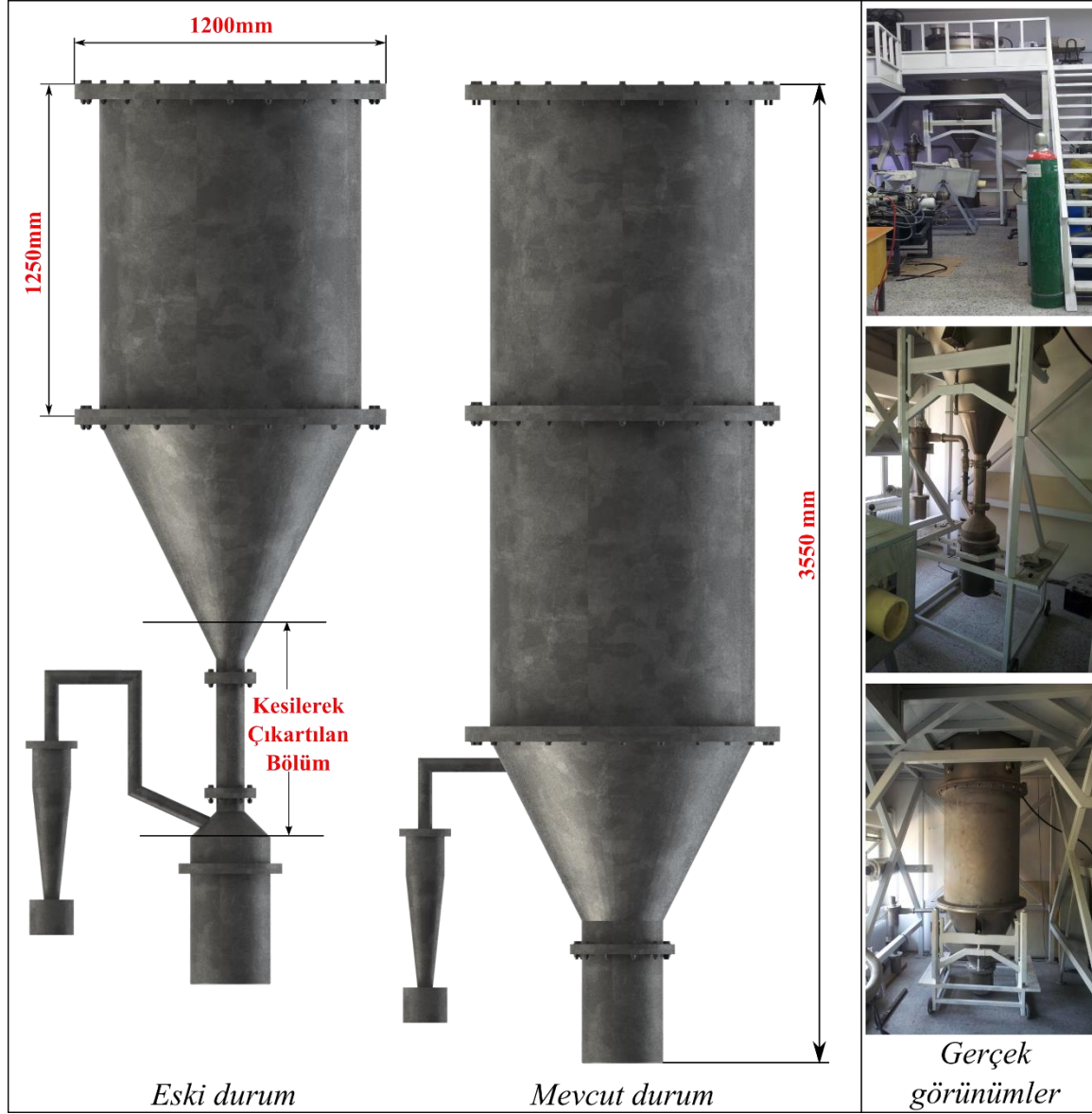


Şekil 4.16. PA deney düzeneğinin gerçek görüntüsü, a) Reaktörün genel görünümü, b) reaktör üst kısım görünümü, c) plazma ateşleme ve tel hızı ayar ünitesi, d) ve f) plazma tabancaların kesişim noktasına hedeflenmiş görünümü, e) Reaktör üst kısmı tabanca haznesinin görünümü, g) tel düzeltme ve sürgü mekanizmasının görünümü

4.3.1. Reaktör tasarımı ve imalatı

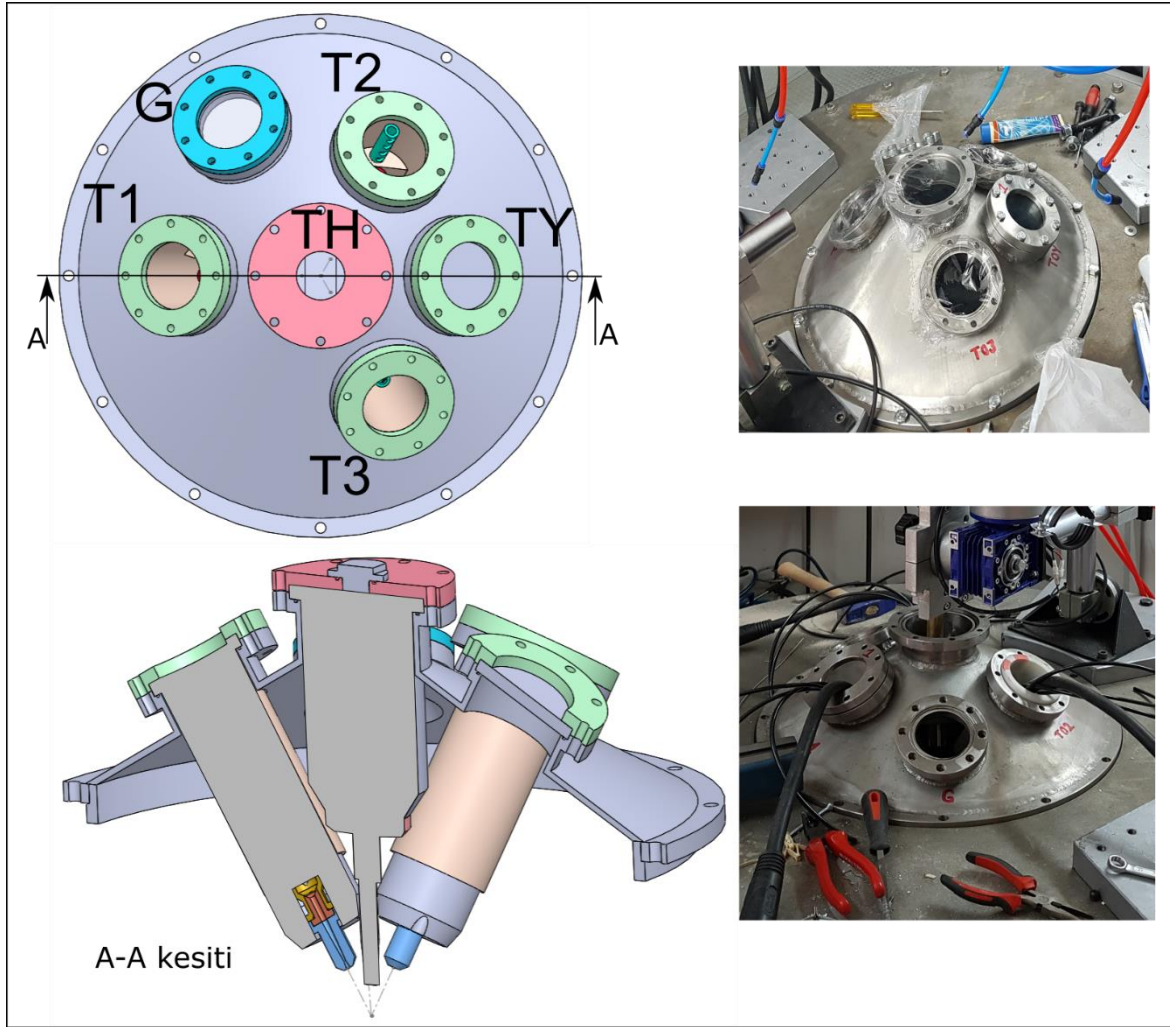
Toz üretebilmek amacıyla Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Süleyman SARITAŞ Toz Metalurjisi Laboratuvarında bulunan GA ünitesi üzerinde düzenlemeler yapılmıştır. Solidworks yazılımında çizimi gerçekleştirilen eski ve yeni reaktöre ait görsel tasarım Şekil 4.17’de gösterilmiştir. Mevcut GA reaktörü 5mm 304 L paslanmaz çelik malzemeden üretilmiş ve dış kısmı kumlanmıştır. Şekil 4.13’te de görüldüğü gibi gövde altında bulunan flanşlı bağlantı kısmından sonraki altta kalan bölüm çıkarılarak reaktörün gövdesi flanşlar ile birlikte 1250 mm uzatılmıştır. Ayrıca toz toplama kabı da 170 mm kısaltılarak kazanım sağlanmıştır. Bu sayede PA işlemi için elverişli bir ortam sağlanmıştır. Reaktör tasarımı gerektiğinde GA yöntemi ile toz üretebilecek şekilde yapılmış ve üretilmiştir.

Kule boyunun uzatılmasındaki temel amaç PA işlemindeki soğuma hızları dolayısıyla üretilen tozların katılaşma öncesi reaktör duvarına çarpmasını önlemektir. Benzer şekilde 3 tabanca kullanımının sebeplerinden bir tanesi de budur. Üretilen tozlar reaktörün orta kısmından aşağıya doğru yönlendirilir. Üç plazma tabancasının birleşimi sonucu uzayan sıcak bölge mükemmel küreler oluşabilmesi için atomize olan malzemenin yeterince uzun süre erimiş halde kalmasını sağlar [46, 59].



Şekil 4. 17. Eski GA reaktörünün PA sistemine uygun hale getirilmesi

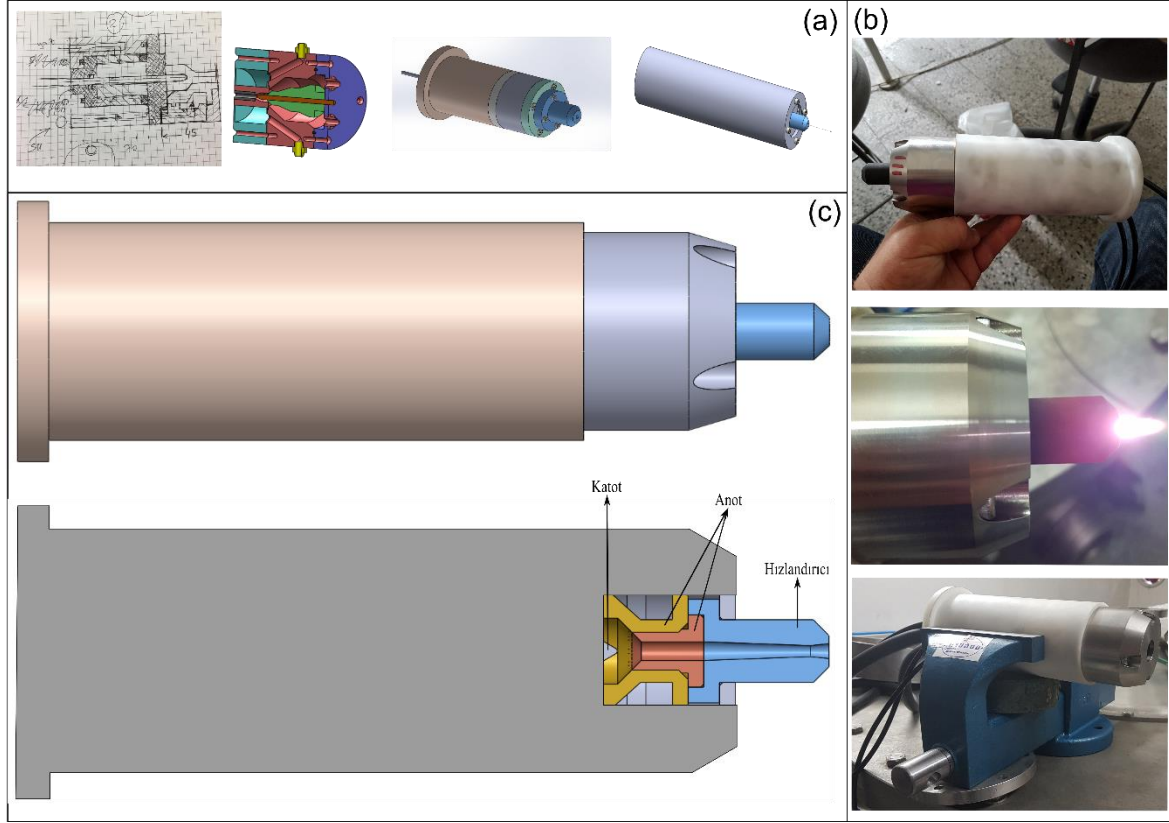
PA yönteminde önceki bölümlerde sebepleri bahsedilen 3'lü tabanca sistemi kullanılmaktadır. Deney düzeneğinde 3 tabancayı tek merkeze hedefleyebilmek için Şekil 4.18'de tasarımı ve gerçek görünümü verilen bir bileşen tasarlanmış ve imal ettirilmiştir. Kurulan sistem bir deney düzeneği olduğundan hem üçlü hem de ikili tabanca sistemi ile çalışmaya elverişlidir. Gözetleme pencereleri sayesinde üretim süreçleri kontrol altında tutulmuştur. Burada tabancalar dikey eksen etrafında 120, yatay eksen ile ise 30 derece açı yapacak şekilde yerleştirilmiştir.



Şekil 4.18. Reaktör üst kısım tasarımı ve imal ettirilmiş görüntüsü T1, T2, T3 plazma tabancalarını, TY, gerektiğinde ikili çalışma için kullanım amaçlı hazneyi, G, gözetleme penceresini, TH ise tel sürme haznesini ifade etmektedir.

4.3.2. Tabanca tasarım ve imalatı

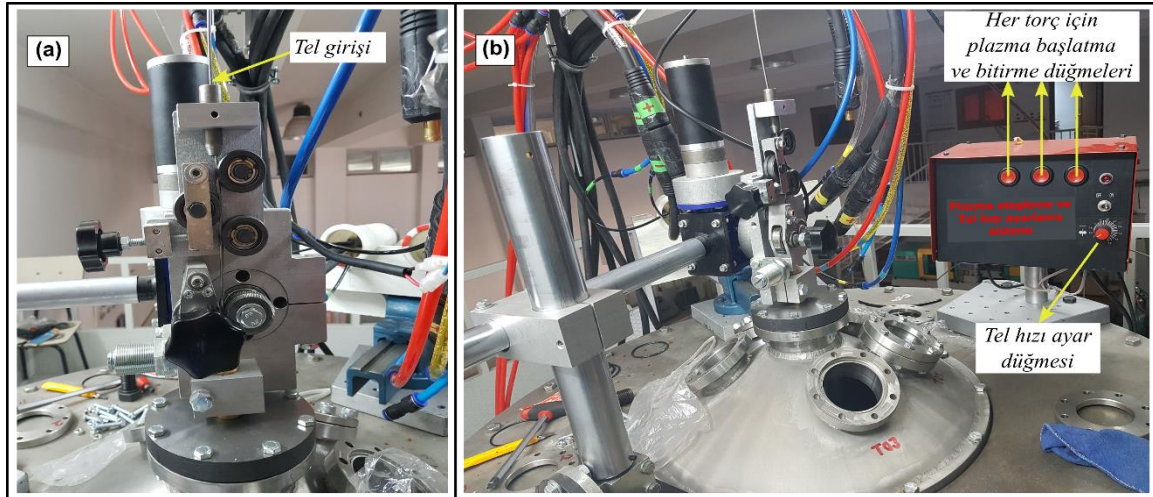
Plazma tabancaları, içerisinde plazma üretilen PA bileşenleridir. Nozul geometrisi oldukça basit olmasına rağmen tabanca geometrisi oldukça hassas işlenmiş ve neredeyse her tarafında sızdırmazlıkların sağlanmasını gerektiren elemanlardan oluşmaktadır. Bu çalışmadaki deney düzeneğinde kullanılan tabancalar tamamen özgün tasarım olarak tasarlanmış ve oldukça hassas toleranslarda üretilmiştir. Tüm bağlantılar (elektrik, soğutma suyu ve gaz) tabancanın arkasından yapılmaktadır. Deney düzeneği olduğundan plazma jetine veya diğer durumlara etkisi çalışılmak istendiğinde (anot, katot gibi) kolaylıkla ölçü değişikliğine gidilebilmektedir. 10 adet parçadan oluşmaktadır ve 4 adet cıvata sayesinde bir araya getirilebilmektedir. Yapılan çalışmaları özetleyen, tasarım aşamalarından gerçek görüntüsüne kadar evreler Şekil 4.19’da gösterilmiştir.



Şekil 4.19. Plazma tabancasının genel görünümü a) tasarım aşamaları, b) gerçek görüntüsü ve çalışır durumu, c) nihai tasarım,

4.3.3. Tel besleme ünitesi ve kontrol sisteminin tasarım ve üretimi

Tel hızının ayarlanması PA işleminin verimliliği ve istenilen boyutta toz üretebilmek için önemli bir parametredir. PA deney düzeneğinde tel hızı parametreleri en az 0,4 m/dk en yüksek ise 8 m/dk'dır. Buna uygun redüktör ve makara sistemi seçilmiştir. Bu hız parametrelerine göre kesintisiz üretim gerçekleşmesi durumunda en yüksek hız parametresinde sistemimiz 15 kg/saat üretim kapasitesine sahiptir. Fakat plazma tabancaları içerisindeki ark dinamikleri ve yüksek sıcaklıklar dikkate alınırsa kesintisiz üretim şartların oldukça zorlanması ile sonuçlanacaktır. Sistemin gerçek görünümü Şekil 4.20'de gösterilmiştir. Şekil 4.20-b'de görülen tel hızı ayarlama sistemine her bir toçtaki plazma işleminin başlatılabilmesi için yüksek frekans düğmeleri yerleştirilmiştir. Böylece bu sistem aynı zamanda plazma başlatma görevi de yapmaktadır.



Şekil 4.20. Plazma ateşleme ve tel hızı ayar sistemi a) sisteme telin sisteme giriş şekli b) sistemin genel görünümü

4.3.4. Diğer ekipmanlar

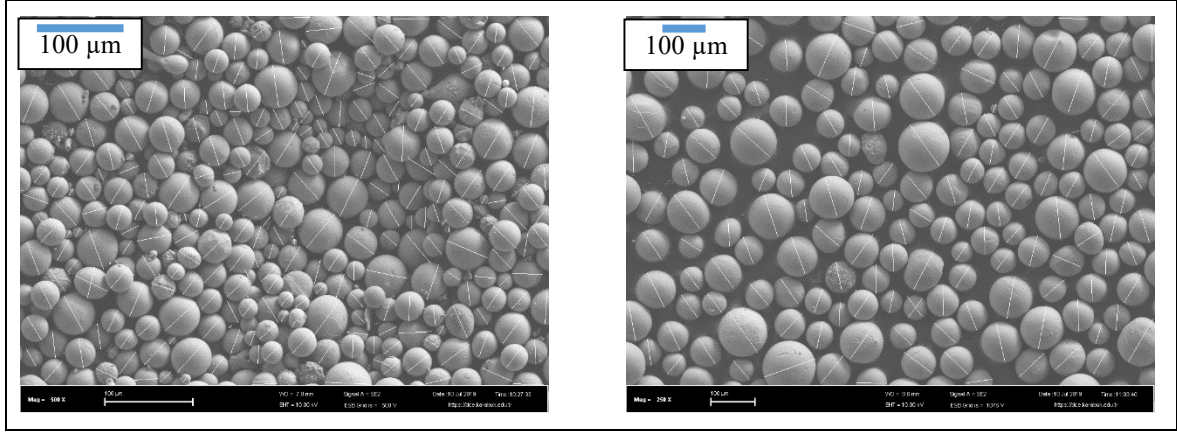
PA deney düzeneğini oluşturan diğer ekipmanlar vakum pompası, güç kaynakları ve toz tahliye sistemidir. Bunlardan güç kaynakları her bir tabancaya ayrı ayrı bağlandığından oldukça maliyetlidir. Literatür bilgisi 20-80 kW güç kullanıldığını bildirmektedir.

4.4. Deneyisel Yöntem - Toz üretim deneyleri ve tozların analizi

Toz üretim deneyleri analizlerden elde edilen 300 A akım 90 SLPM hacimsel debi değerinde tasarlanan, imal edilen ve kurulan PA reaktöründe gerçekleştirilmiştir.

4.4.1. Toz boyut analizi

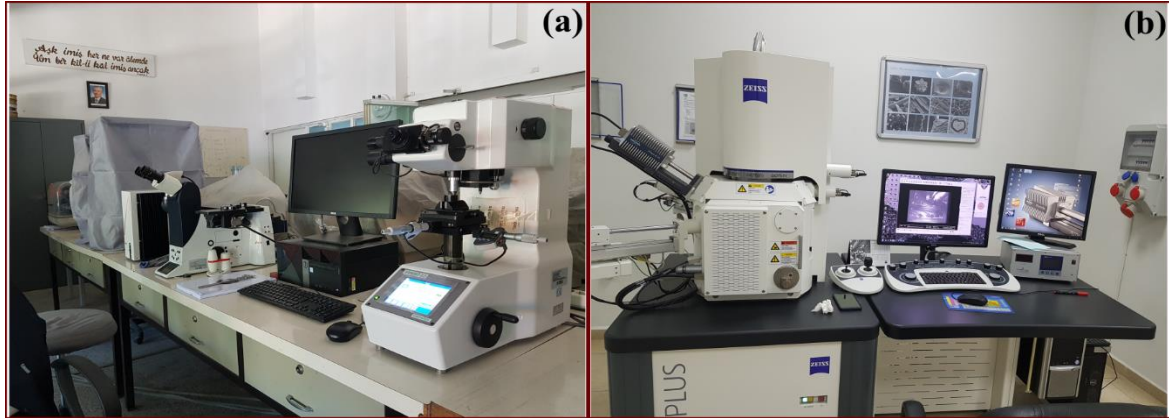
Atomize edilmiş tozların boyut ölçümleri, SEM görüntülerinden boyut ölçümü şeklinde gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 2000 parçacıktan elde edilen çap değerleri histograma dönüştürülmüş ve parçacık dağılımı belirlenmiştir. Benzer şekilde küçüklerin birikimli yüzdesi eğrisi oluşturularak ortalama parçacık boyutu (d_{50}) ve literatür ile karşılaştırma işlemi yapılmıştır. Şekil 4.21’de üretilen tozlara ait iki farklı SEM görüntülemesi ve yapılan boyut ölçümlerine ait çizgiler yer almaktadır.



Şekil 4.21. SEM görüntülerinden boyut ölçümünün nasıl yapıldığının gösterimi

4.4.2. Tozların şekil, yüzey morfolojilerinin ve iç yapısının tespiti

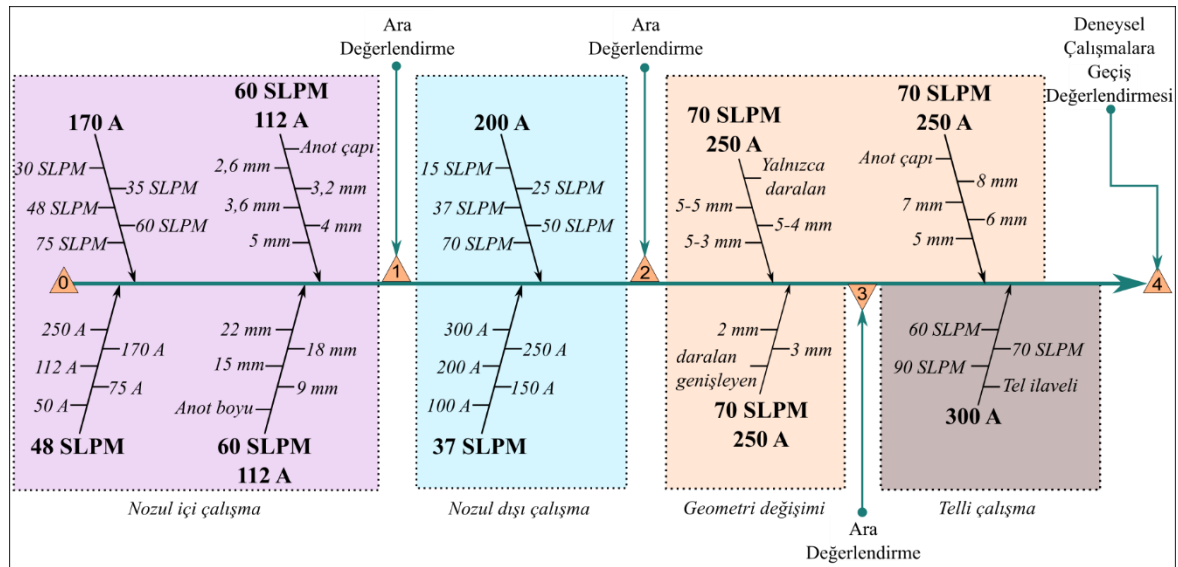
Tozların şekil ve yüzey morfolojilerinin tespiti Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü bünyesindeki SEM cihazı ile yapılmıştır. Tozların metalografi işlemi ve iç yapısındaki gözenekliliklerin tespiti ise Gazi Üniversitesi Prof. Dr. Süleyman Sarıtaş toz metalürjisi laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Kullanılan mikroskoplara ait görüntüler Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Tozların şekil, yüzey morfolojilerinin ve iç yapısının tespiti amacıyla kullanılan
a) optik mikroskop, b) taramalı elektron mikroskobu

5. BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

Tez kapsamında gerçekleştirilen ve Bölüm 4'te sınır şartları verilmiş olan tüm analizlerin özet tablosu Şekil 5.1'de gösterilmiştir. Bu şekle göre sayısal modelleme çalışmaları nozul içi, nozul dışı, geometri değişimleri ve telli analizler olarak 4 kısma ayrılmaktadır. Bu kısımlar (Basamak 0) analizlerin güvenilirliklerinin artırılması ve parametre belirlenmesi ile başlamakta her kısım arasında ara değerlendirmelerin yapılması (Basamak 1-2-3) ile devam etmektedir. Ara değerlendirmeler yapılan analizlerden elde edilen bulgulara göre bir sonraki analizlerin değişkenlerinin belirlenmesini içermektedir. Ayrıca bu basamaklar tez çalışması bölümleri arasındaki bağlantıların sebepleri ile anlatıldığı başlıklardır. Sayısal modelleme çalışmaları deneysel değişkenlerin belirlendiği son aşama (4) ile sonlandırılmaktadır. Bu başlık altında analizlerin genel değerlendirmesi yapılarak deneysel çalışmalar için referans değişkenin tespiti yapılmıştır.



Şekil 5.1. Tez kapsamında gerçekleştirilen analiz değişkenlerinin özetlenmesi

Deneysel çalışmalar ile ilgili kısımda üretilen tozların şekil, boyut, mikroyapı ve toz içi gözeneklilik açısından değerlendirilmesi yer almaktadır. Sonrasında yapılan karşılaştırma işlemleri ile aynı yöntemle üretilen farklı tozların ve diğer yöntemler ile (EIGA, GA, PREP gibi) üretilen Ti-6Al-4V tozlarının şekil, boyut ve mikroyapı özellikleri açısından karşılaştırması yapılarak değerlendirilmiştir.

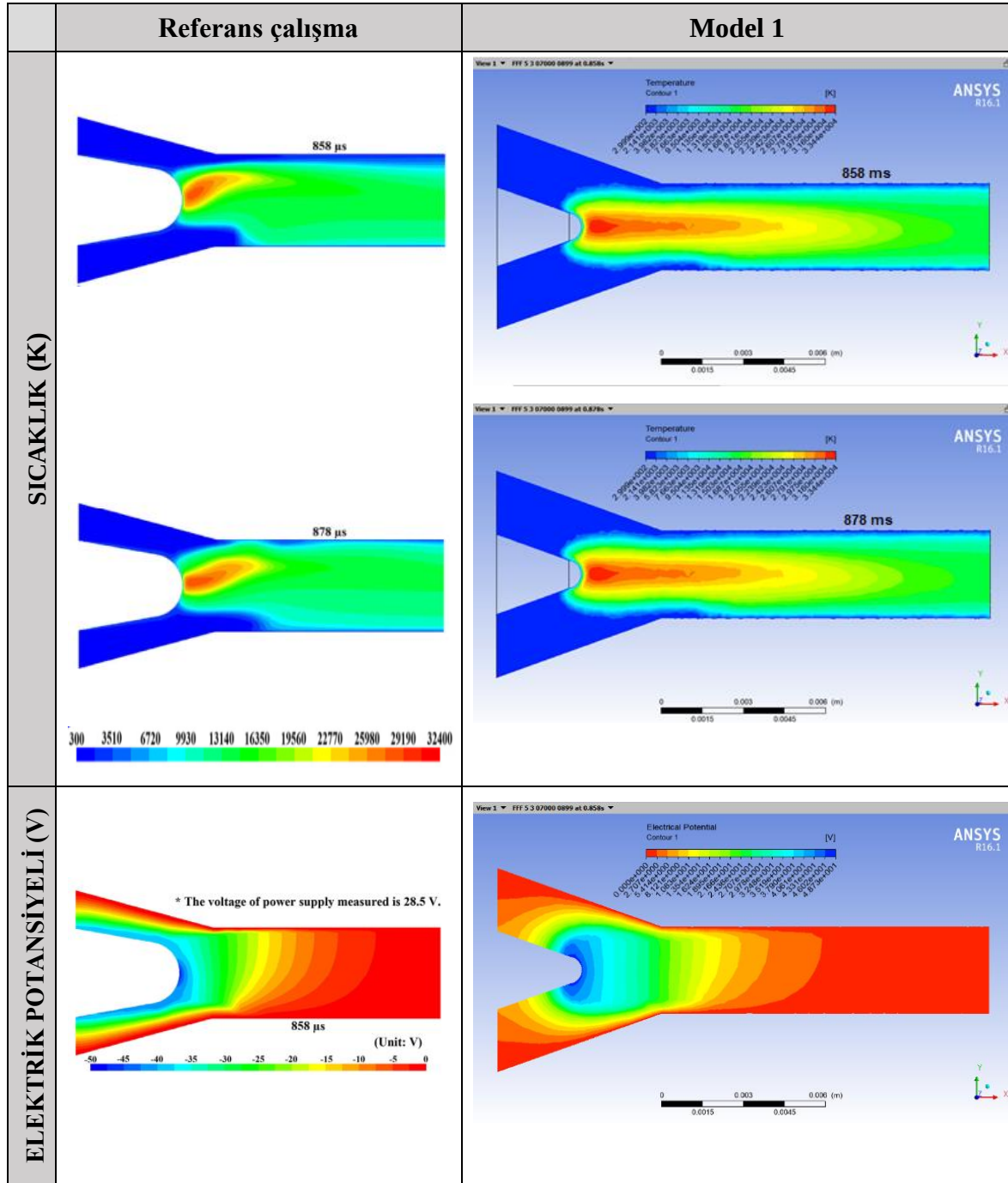
5.1. HAD Sonuçları ile Literatür Verilerinin Karşılaştırılması

Plazma tabancalarından elde edilen sıcaklık ve hız değerlerinin ölçümü veya sayısal modelleme ile gerçekleştirilen çalışmaların deneysel çalışmalar ile doğrulanması veri alma gücünü nedeniyle oldukça kısıtlıdır. Bu çalışmadaki doğrulama işlemi daha önce gerçekleştirilen çalışmaların sonuçları ile karşılaştırılarak güvenilirlik düzeyleri belirlenmiştir.

5.1.1. Nozul içi çalışma; model 1 geometrisi için karşılaştırma

Model 1'in karşılaştırma işlemi çalışma gazı olarak Argon gazı kullanıldığından literatürdeki tek gazlı çalışmalar [3], [192] ile kıyaslama yapılmıştır. Çalışma parametreleri birbirinden farklı olduğundan [3] numaralı referans ile karşılaştırma yapabilmek için Model 1 geometrisine referans çalışmanın sınır şartları ile çözüm yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. İlgili çalışmada araştırmacılar 50 SLM gaz debisi, 300 K giriş sıcaklığı, 500 A ($2,08 \times 10^8$ A/m²) akım değeri, katot sıcaklığı 3 000 K, anot duvar sıcaklığını taşınım olarak belirlemişler ve taşınım katsayısını 10^5 W/m².K, soğutma suyunun sıcaklığını 500 K olarak almışlardır. Yalnızca argonun kullanıldığı diğer referans çalışma [192] ile parametre değişimlerinin oluşturduğu etki açısından kıyaslama yapılmıştır.

Referans çalışma ve Model 1'e ait sıcaklık ve elektrik potansiyel dağılımları Şekil 5.2'de gösterilmiştir. Şekil 5.2'de görüldüğü gibi maksimum plazma sıcaklıklarının ve plazma tabancası içerisindeki plazma sıcaklık dağılımının birbirlerine yakın oldukları görülmektedir. Referans çalışmada plazmanın en yüksek sıcaklığını 32 400 K olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada ise en yüksek plazma sıcaklığı 33 440 K olarak elde edilmiştir. Benzer şekildeki durum elektrik potansiyel dağılımlarında da geçerlidir. Referans çalışmada plazmanın maksimum elektrik potansiyelini 50 V olarak belirlemişlerdir. Bu çalışmada ise maksimum elektrik potansiyelini 48,7 V olarak elde edilmiştir. Her iki çalışmada da elektrik potansiyelinin plazma tabancası çıkış kesitine doğru sıfır olduğu görülmektedir.



Şekil 5.2. Referans çalışma [3] ve Model 1'in sıcaklık ve elektrik potansiyel değerleri açısından kıyaslanması [280]

Ayrıca Model 1 sonuçları yalnızca argon gazının kullanıldığı bir diğer referans çalışma ile kıyaslanmış ve etkileri incelenmiştir. He-Ping Li ve arkadaşları. [192], 3B olarak modelledikleri nozul geometrisi için Çizelge 5.1'de verilen sonuçları elde etmişlerdir. Gaz debisi sabit tutularak, akım değerinin artırılmasıyla ark boyunun kısaldığını, çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığı, ortalama plazma hızı ve ark voltajının arttığını tespit etmişlerdir. Akım değerinin sabit tutularak gaz debisinin artırılmasıyla çıkış kesitindeki ortalama plazma

sıcaklığı, ortalama plazma çıkış hızı ve ark voltajının arttığını ve ark boyunun uzadığını bildirmişlerdir. Model 1 için elde edilen sonuçlar ise Çizelge 5.2’de gösterilmiştir. Parametre değişiminden elde edilen etkiler benzerdir. Akım değerlerinin artması Lorentz kuvvetlerin baskınlığını artırarak ark boyunu kısaltmış voltaj değerlerinin düşmesine sebep olmuştur. Akım değeri sabit tutulup debi değerindeki artış ise akışkanın Lorentz kuvvetler üzerindeki baskınlığını artırmasına ve arkin daha ileride oluşmasına sebep olmuştur. Böylece ark boyu uzamış voltaj değeri ise artmıştır.

Çizelge 5.1. Referans çalışma sonuçları [192]

I (A)	Q (STP m ³ h ⁻¹)	$\bar{T}_{m, \text{çıkış}}$ (K)	$\bar{U}_{m, \text{çıkış}}$ (m s ⁻¹)	l_{ark} (mm)	V_{ark} (V)
400	2,0	12 650	426	5,9	35,2
600	2,0	13 030	453	4,5	36,5
600	2,1	13 630	577	5,9	37,9
800	2,1	13 840	656	3,3	36,6

Çizelge 5.2. Model 1 ile elde edilen sonuçlar [280]

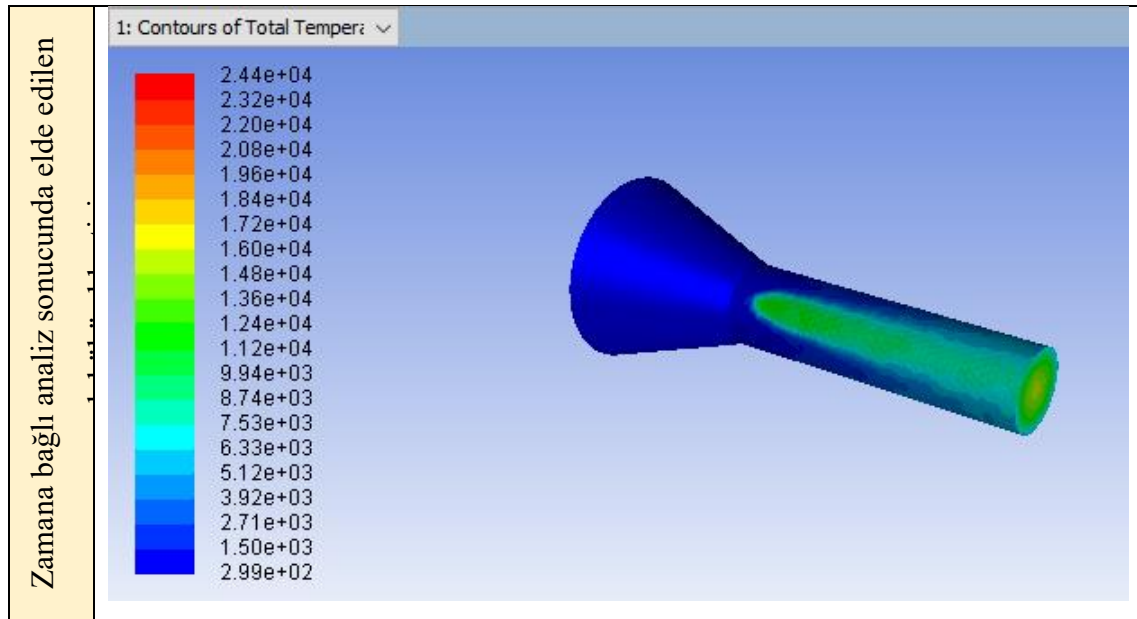
I (A)	Q (SLPM)	$\bar{T}_{m, \text{çıkış}}$ (K)	$\bar{U}_{m, \text{çıkış}}$ (m s ⁻¹)	L_{ark} (mm)	V_{ark} (V)
170	30	10 622	931	8,6	49,1
170	48	10 871	1 352	10,5	61,5
250	48	12 031	2 250	7,8	64,3

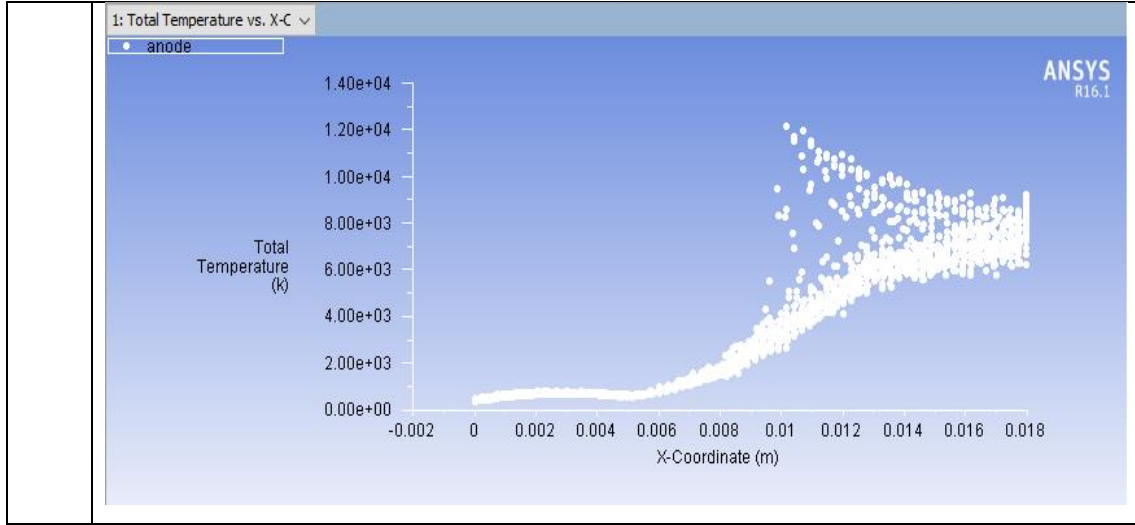
5.1.2. Zamana bağlı ve kararlı hal çözümlerinin karşılaştırılması

Önceki çalışmaların incelenmesi sayısal modelleme çalışmalarının zamana bağlı (*ing.* transient) [182], [173], [5], [158], [188], [186], [219], [180] ve kararlı hal (*ing.* steady state) [7], [21], [164], [274], [24], [209], [260,273] çözümlemesi olarak iki gruba ayrıldığını göstermiştir. Bu durumu kesinleştirip sonraki modellemeleri bu karara göre devam ettirebilmek için zamana bağlı ve kararlı hal çözümleri ark uzunluğu, ortalama nozul çıkış sıcaklığı ve hızı açısından kıyaslanmıştır.

Şekil 5.3, 30 SLPM 170 A çalışma şartlarında zamana bağlı çözüm sonucunda elde edilen ark bölgesi ve ağ yapısının düğüm noktalarından elde edilen sıcaklık dağılımını göstermektedir. Şekil 5.4 ise aynı çalışma şartlarında kararlı hal çözüm sonucunda elde

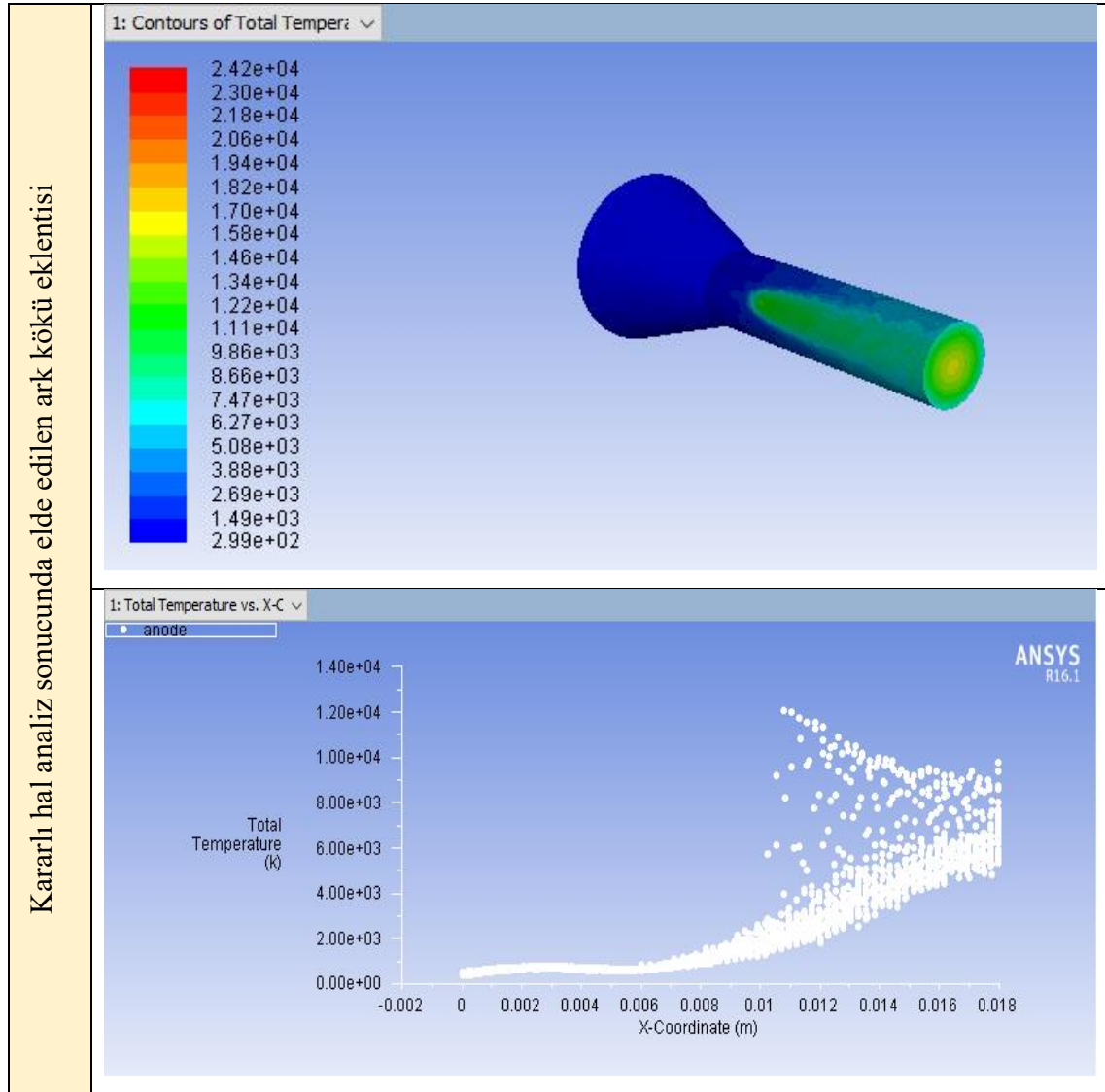
edilen ark bölgesi ve ağ yapısının düğüm noktalarından elde edilen sıcaklık dağılımını göstermektedir. Bölüm 4'te belirtilen Model 1 sınır şartları kullanılarak gerçekleştirilen analiz çalışmalarında zamana bağlı çalışmalarda 100 ms sonra çözümün kararlı hale geldiği analiz sonuçlarından elde edilmiştir. Bu sebeple Şekil 5.3'te yer alan zamana bağlı sonuç görüntüleri 100 ms'deki görüntüsü ve grafiğidir. Buna göre her iki çözüm yönteminde de (Şekil 5.3 ve Şekil 5.4) en yüksek düğüm noktası sıcaklıkları yaklaşık 13 000 K olarak gerçekleşmiştir. Anot duvarındaki en yüksek sıcaklık değerleri zamana bağlı çözümde ark kökü eklentisinin 10,1 mm uzaklıkta kararlı hal çözümünde ise 10,6 mm uzaklıkta oluştuğunu göstermiştir [298]. Her iki mesafe birbirine oldukça yakındır. Ayrıca nozul çıkışından alınan ortalama sıcaklık ve hız değerleri de biribiri ile örtüşmektedir. 30 SLPM'de zamana bağlı çözümde ortalama sıcaklık 10 670 K kararlı hal çözümde 10 770 K, 75 SLPM'de ise sırasıyla 11 200 K ve 11 100 K olarak çözüm sonucu elde edilmiştir. Hız değerleri de benzer şekilde birbirine yakındır.





Şekil 5.3. Zamana bağlı ve kararlı hal çözümlerinin kıyaslanması [298]

Gerçekleştirilen bu analizler kullanılan sınır şartlarında ve ilk 100 ms içerisinde arkın dinamik davranış sergilemekte olduğunu ve akış kuvvetleri ile Lorentz kuvvetlerin dengeye gelmeye çalıştığını göstermiştir. Şayet bu çalışmanın konusu arkın dinamik davranışının tespit edilmesine yönelik olsaydı bu durumda zamana bağlı çözümler kaçınılmaz olacaktı. Fakat bu çalışmada odaklanılan nokta nozulun dışındaki sıcaklık ve hız dağılımları olduğundan diğer birçok çalışmada da geçerli olduğu kabul edilen kararlı hal çözümleri ile diğer analizlerin gerçekleştirilmesine karar verilmiştir.



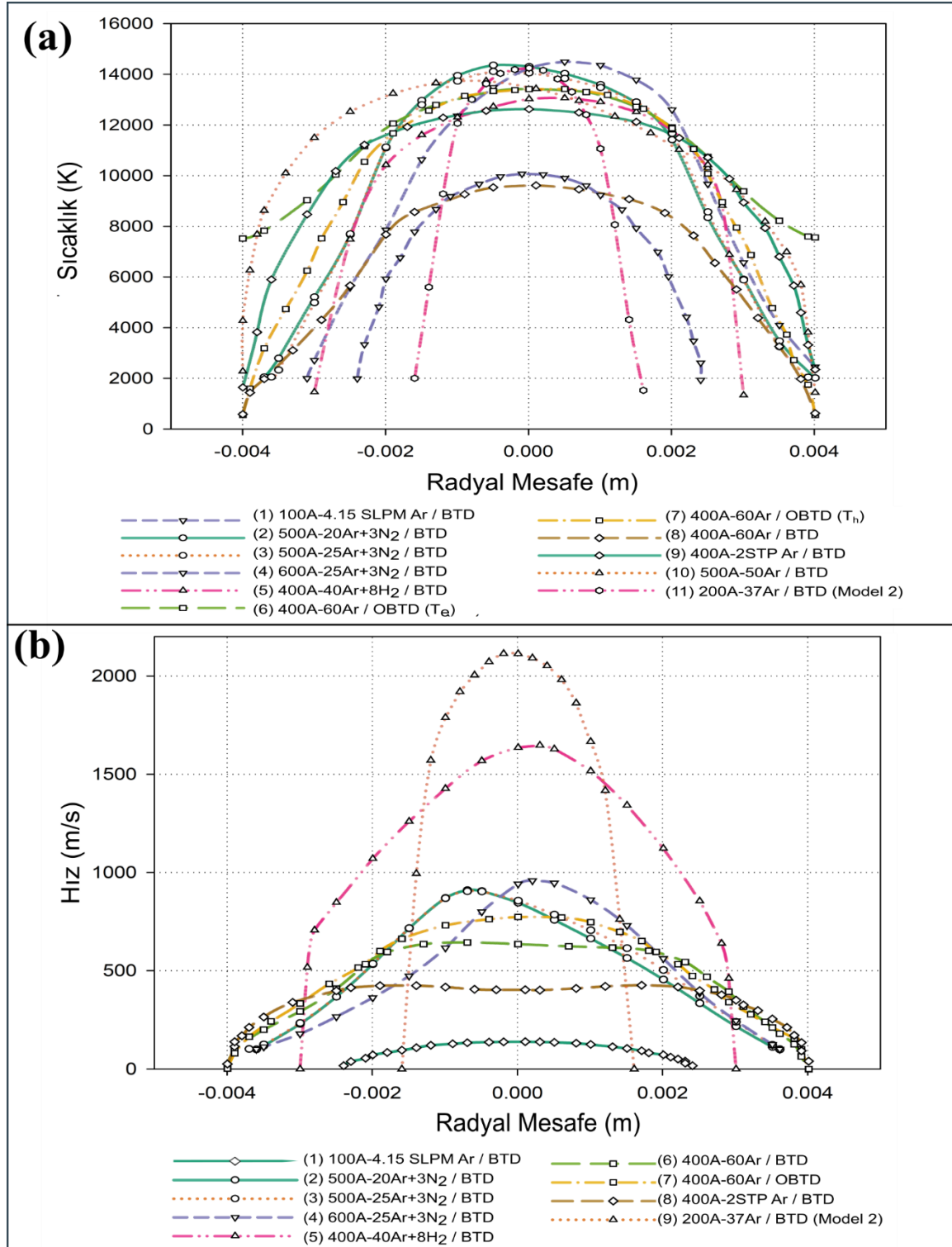
Şekil 5.4. Zamana bağlı ve kararlı hal çözümlerinin kıyaslanması [298]

5.1.3. Nozul dışı çalışma; Model 2 geometrisi için karşılaştırma

Model 2 karşılaştırması için daha fazla araştırma sonucu kullanılmıştır. Şekil 5.5'te yapılan karşılaştırma işlemine ait nozul çıkışındaki radyal mesafelerden alınmış sıcaklık ve hız değerlerinden oluşan grafikler yer almaktadır. Karşılaştırma için seçim sırasında Model 1'deki gibi yalnızca argon gazı kullanılmış olmasına dikkat edilmeksizin farklı çalışmalardan da alınan sonuçları göstermektedir. Bu sayede geniş bir derleme yapılması, karşılaştırma yaparken aynı zamanda sonraki çalışmalarda değişken ve geometri değişimlerinin nasıl sonuçlanacağını da görülmesi amaçlanmıştır.

Şekil 5.4'e göre, tabanca çıkışındaki radyal mesafe merkezi etrafında plazmanın ortalama sıcaklık değerleri 12 000 K ile 15 000 K arasında, hız değerleri ise 8mm çapında tabanca çıkışına sahip geometrilerde 40 ile 1 000 m/s aralığında değişmektedir. Guo ve arkadaşlarının [7] tabanca çapı 6 mm, Model 2 tabanca çapı ise 3,2 mm'dir. Çap azaldıkça hızın artması beklenen bir durumdur. Tek atomlu olan argon gazına iki atomlu azot ve hidrojen ilaveleri sıcaklık ve hız artırımı üzerine olumlu etkiler göstermiştir. Grafikte bazı eğrilerin neredeyse eksenel simetrik bazılarının ise simetrik olmadığı görülmektedir. Bu tamamen araştırmacıların veri alma şekilleri ile ilgilidir (x-0 ve y-0). Sağ veya sola yatık eğriler ark kökü eklentisinin olduğu bölgelerdeki sıcaklık artışından kaynaklanmaktadır. Bu durum ark kökü eklentisinin çıkışa yakın bir bölgede oluştuğunun da göstergesidir. Eksenel simetriğe yakın eğrilerde ise bu eklentinin katota yakın bir bölgede oluştuğu değerlendirilmektedir.

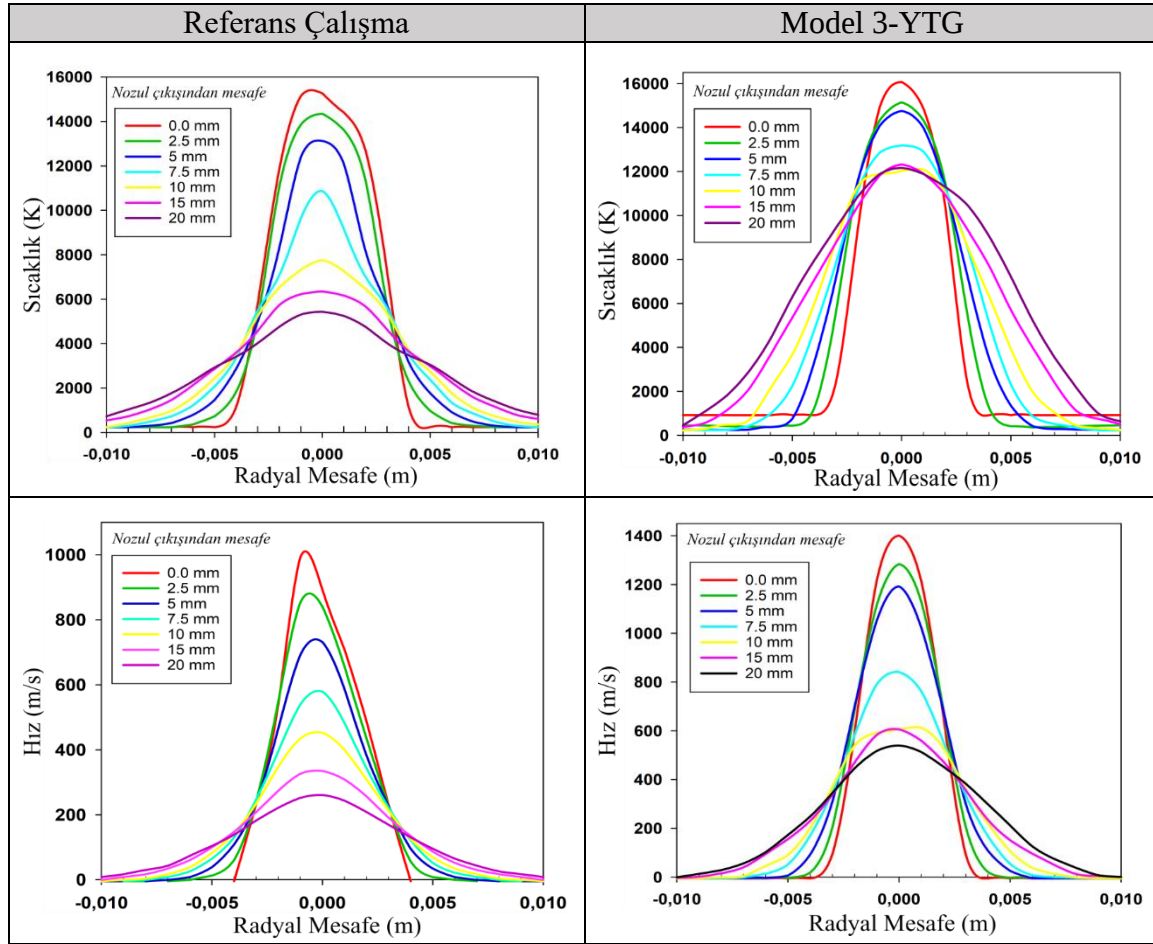
Şekil 5.4'teki başka bir durum ise BTM ve OBTM (Bkn. Bölüm 3.) kıyaslamasıdır. İki grafik incelendiğinde hız değerlerinin BTM modeller ile birbirine yakın olduğu görülmektedir. İki atomlu gaz ilave edilen BTM modelleriyle edilmeyen OBTM modellerinin sıcaklık değerleri birbirine yakındır. Trelles ve arkadaşları [180] OBTM yaklaşımıyla elde ettikleri voltaj dalgalanması eğrilerini deneysel çalışmalarla kıyaslayarak birbiri ile uyumlu olduğunu bildirmektedir. Yazarlar, ark dinamiklerinin daha kesin bir şekilde tanımlanmasında OBTM yaklaşımının daha üstün olduğunu iddia etmektedirler. Diğer yandan Huang ve arkadaşları [3,255,265] ise yaptıkları çalışmalarda OBTM yaklaşımının iki sıcaklıklı kimyasal denge durumunun da hesaba katılması gerektiğinden çözülmesi oldukça zor bir yaklaşım olduğunu savunmaktadırlar. Yazarlar OBTM yerine BTM yaklaşımı üzerinde basit değişiklikler yapılarak da deneysel çalışmalarla uyumlu sonuçların alınabileceğini iddia etmektedirler. Yaptıkları çalışma ile de voltaj dalgalanma eğrilerini kıyaslayarak bu iddialarını desteklemişlerdir. Ayrıca BTM modeli hızlı sonuç alınan ve daha maliyetsiz bir yaklaşım olduğundan birçok araştırmacı tarafından tercih sebebidir. Bu tür çalışmalar nozul içerisindeki ark kökünün anot duvarı ile olan etkileşimine odaklandığından önemlidir fakat bu çalışmada atomizasyon açısından dış kısımdaki plazma jeti davranışı incelendiğinden BTM yaklaşımı ile çözümler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.5. Farklı çalışmalar için karşılaştırma işlemi a) tabanca çıkışındaki ortalama sıcaklık değerleri (1 için [274], 2, 3 ve 4 için [21], 5 için [7], 6, 7 ve 8 için [180], 9 için [174], 10 için [3], 11 için [260] 'dır) ve b) hız değerleri için (Huang ve arkadaşlarının makalesinde hız değerleri adı altında sıcaklık değerleri verildiğinden ve Trelles ve arkadaşlarının OBTD çalışması hız için bir eğri olduğundan sıralama (7)'den sonra farklıdır. 8 için [174] ve 9 için [260]'dır)

5.1.4. Nozul dışı çalışma; Model 3-YTG geometrisi için karşılaştırma

Model 3 için karşılaştırma plazma tabancasından çıkan plazma jeti üzerine gerçekleştirilen bir araştırma sonucuna göre yapılmıştır. Literatür incelendiğinde plazma jeti çalışmaları oldukça sınırlıdır. Plazma tabancaları genellikle kaplama işlemlerinde kullanıldığından dolayı araştırmacılar daha çok değişkenlerin kaplama kalitesi üzerine etkileri üzerine odaklanmışlardır. Referans çalışma [293] tabanca dışındaki plazma jeti davranışını içeren sınırlı araştırmadan bir tanesidir. Karşılaştırma yapabilmek için seçilen referans çalışma nozul çıkışından 20 mm mesafeye kadar radyal mesafelerde alınan sıcaklık ve hız verilerini içermektedir. Referans çalışmada 7 mm anot çapı ve 500 A akım değerinde 20 SLPM argon ile 3 SLPM azot karışım gazı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Model 3-TYG’de ise 5 mm anot çapı 250 A akım değerinde 70 SLPM argon gazı kullanılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.6’da gösterilen karşılaştırma işleminde eğriler üst üste çizdirilmek yerine ayrı ayrı grafiklerde gösterilmiştir. Yapılan karşılaştırma işlemlerinde eğrilerin biribiri ile uyumlu olduğu fakat bazı farklılıkların bulunduğunu göstermektedir. Bu farklılıkların oluşmasındaki başlıca etken geometri ve değişkenlerin farklı olmasıdır. Diğer etken ise ark kökü eklentisinin konumudur. Referans çalışma debisi oldukça düşük ve akım değeri de oldukça yüksektir. Bu değişkenler ark kökü eklentisini çıkıştan geriye doğru taşımıştır. Çünkü ark, tabanca elektrotları arasında yüksek voltaj sonucu oluşan iletken bir yoldur ve doğal olarak en kısa yolu tercih eder. Mümkün olduğunca kısa uzunlukta olma ve düşük voltaj kullanma eğilimi vardır [24], [167], [168]. Bu çalışma da ise hacimsel debi değeri oldukça yüksek olduğundan Lorentz kuvvetler karşısında daha baskındır ve ark kökünü çıkışa doğru taşımıştır. Özellikle hız değerlerinde elde edilen farklılıklar ise Model 3-YTG’nin anot çapının daha küçük olmasından kaynaklanmaktadır. Referans geometri kesit alanı Model 3-YTG’den yaklaşık 2 kat büyüktür.



Şekil 5.6. Referans çalışma [293] ile Model 3-YTG için nozul çıkışından belirli mesafelerdeki sıcaklık ve hız değerlerinin karşılaştırılması

5.2. Modelleme Çalışması; Model 1 Geometrisi İçin Nozul İçi Çalışma Bulguları

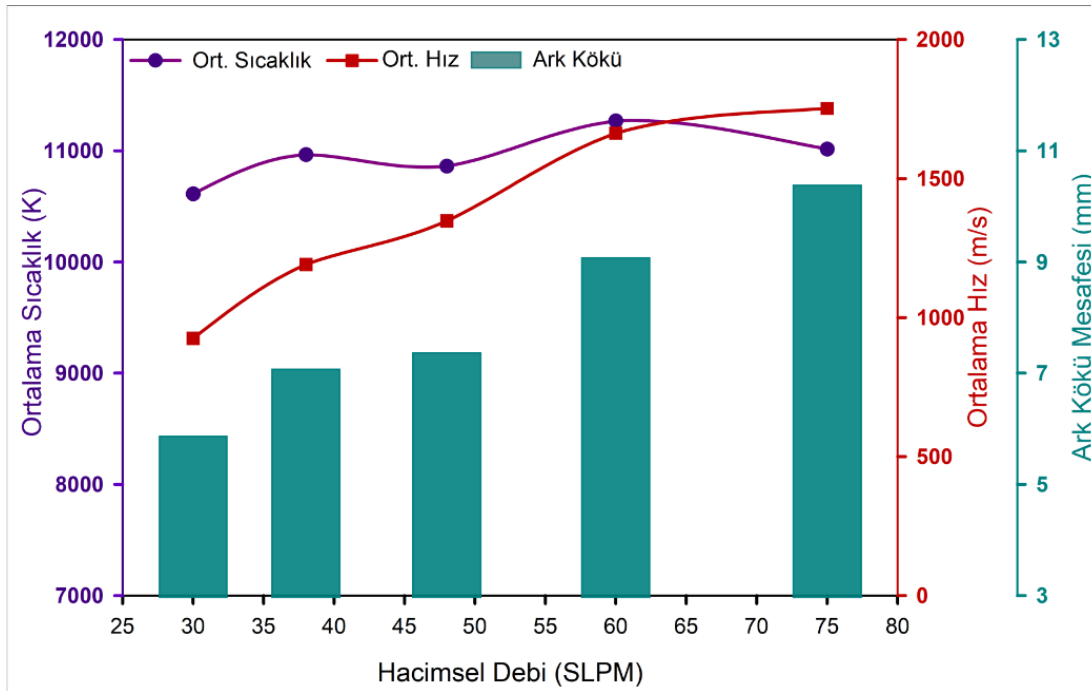
Nozul içerisinde gerçekleşen olayların tespitine yönelik olarak iki temel parametre olan hacimsel debi ve amper değerlerinin değişimleri önce sabit akımda farklı hacimsel debiler için sonrasında ise sabit hacimsel debide farklı amper değerleri için analizler gerçekleştirilerek değerlendirilmiştir. Parametre değişimleri ile sıcaklık, hız ve ark kökü eklentisinin nasıl etkilendiğinin cevabı aranmıştır.

5.2.1. Sabit akımda farklı hacimsel debiler ile yapılan analizler

Sınır şartları Bölüm 4 - Sayısal Model ve Deneysel Yöntem başlığı altında verilen Model 1 geometrisi için 170 A değeri sabit tutularak sırasıyla 30, 38, 48, 60, 75 SLPM hacimsel debi değerlerinde yapılan analiz sonuçları, Şekil 5.7’de toplu şekilde gösterilmiştir. Grafiğin çiziminde kullanılan sıcaklık ve hız değerleri nozul çıkış kesitindeki ağ yapısı düğüm

noktalarından (107 nokta) alınan verilerin ortalamasıdır. Ark kökü eklentisinin belirlenmesinde ise anot duvarında en yüksek sıcaklığın olduğu yer esas alınmıştır.

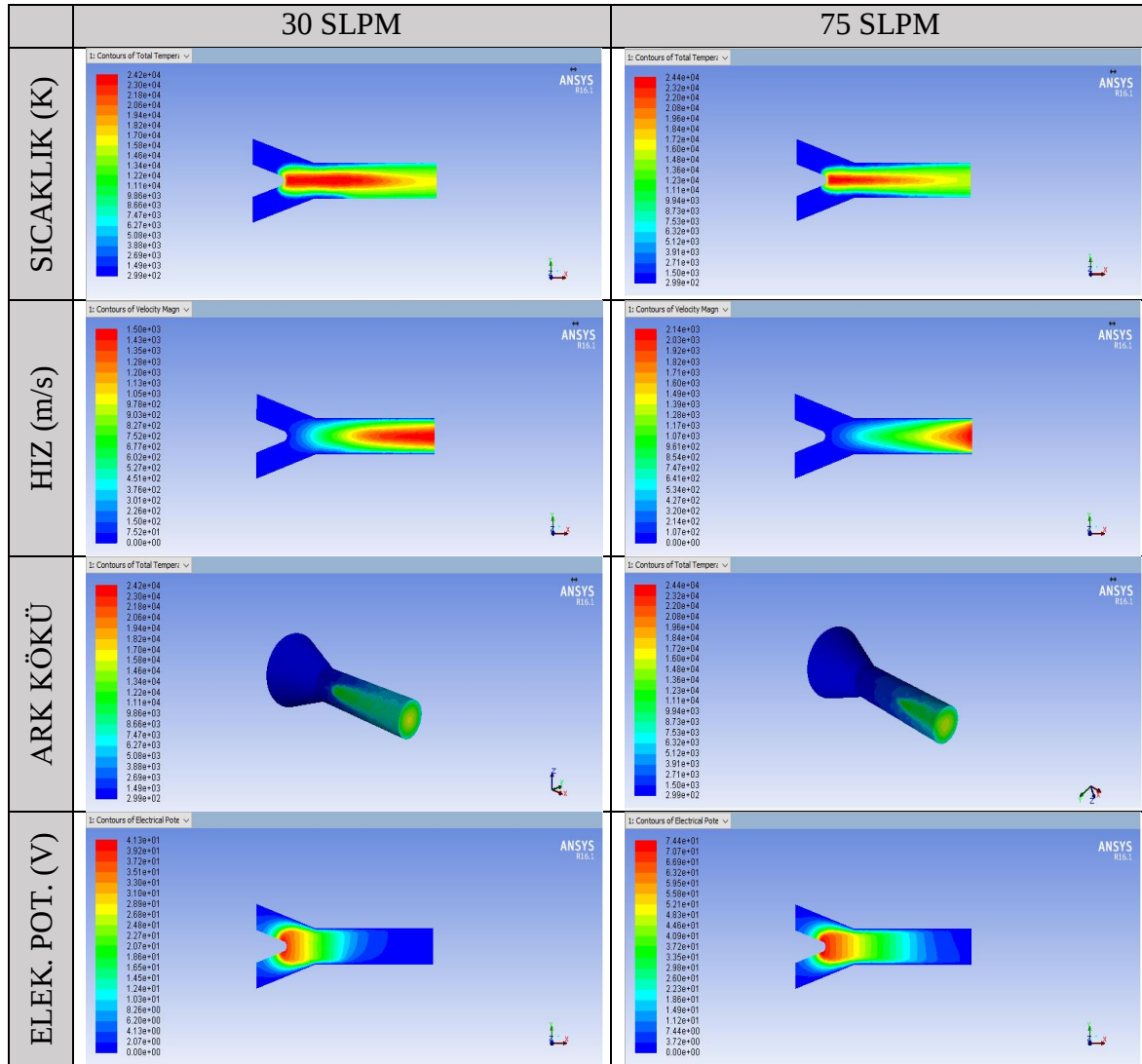
Şekil 5.7’de verilen grafikteki çıkış kesitinden alınan ortalama sıcaklık değerlerine göre, hacimsel debi değişimi ile dikkate değer bir sıcaklık artışı gerçekleşmemiştir. 30 SLPM için 10 622 K sıcaklık elde edilirken 75 SLPM için 11 023 K ortalama sıcaklık elde edilmiştir. Nozul çıkışı ortalama hız değerlerinin oluşan yüksek sıcaklıklar ve debi artışı ile arttığı gözlemlenmiştir. 30 SLPM değerinde elde edilen ortalama hız değeri 75 SLPM değerinde yaklaşık 2 kat artış göstermiştir. Ayrıca debi arttıkça ark kökü eklenti mesafesinin artması, akış kuvvetlerinin Lorentz kuvvetlere daha baskın geldiğinden dolayı olağan bir durumdur. Tüm hacimsel debiler için anot duvarında oluşan en yüksek noktasal sıcaklıklar yaklaşık 13 000 K olarak tespit edilmiştir. Debi değişimine bağlı olarak ark kökü eklenti mesafeleri sırasıyla 5,9; 7,1; 7,4; 9,1; 10,4 mm olarak ölçülmüştür [280].



Şekil 5.7. Sabit 170 A değerinde farklı hacimsel debiler için sıcaklık, hız değerleri ve ark kökü eklentisinin oluştuğu mesafelerin karşılaştırılması

Şekil 5.8’de en düşük ve en yüksek hacimsel debi değerleri için sıcaklık, hız, elektrik potansiyel dağılımları ve ark kökü eklentisinin oluştuğu bölge gösterilmiştir. Şekil 5.8 incelendiğinde sıcaklığın katot ile ark kökü arasında en yüksek değerlere ulaştığı, mesafenin artışı ile sıcaklıklarda düşme olduğu ve çıkış kesitinde nispeten daha düşük değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Ayrıca artan gaz akış debisi ile ark kökü mesafesinin çıkışa doğru kaydığı

ve düşük debilere nispeten hız değerini artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca Şekil 5.8’de dağılımı verilen ve ark uzunluğu ile ilgili bir başka önemli değişken ise elektrik potansiyeli değeridir. Ark uzunluğu arttıkça nozul içerisindeki elektrik potansiyel değeri de artmaktadır [167]. Elektrik potansiyel değerinin artması ise doğrudan tabanca gücünü ($P=V.I$) artırmaktadır [23] , [255]. Bu olay daha fazla gazı iyonlaştırmak için gerekli olan enerjinin artması şeklinde açıklanabilir [7]. En yüksek elektrik potansiyel değeri katot ucuna yakın bölgede oluşmakta olup anot duvarı üzerinde ise sıfır olmaktadır.



Şekil 5.8. Sabit 170 A akım değerinde en düşük ve en yüksek hacimsel debiler için örnek sıcaklık, hız, elektrik potansiyeli dağılımları ve ark kökü eklentisinin konumu

Şekil 5.7 ve 5.8 birlikte değerlendirildiğinde hacimsel debi değişiminin ark kökü eklentisini çıkışa doğru kaydırıldığı, çıkış sıcaklık değerlerinden ziyade hız değerleri üzerinde daha baskın bir değişken olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek hız ihtiyacının yüksek debiler

sonucunda mümkün olduğu tespit edilmiştir. Bu durum fiziki büyüklüklerinden dolayı yerleşme sorununun olduğu PA tabancaları için analizlerden elde edilmiş önemli bir sonuçtur. Ayrıca Şekil 5.8’de verilen dağılım örneklerinin büyütülmüş hali Ek-1’de gösterilmiştir.

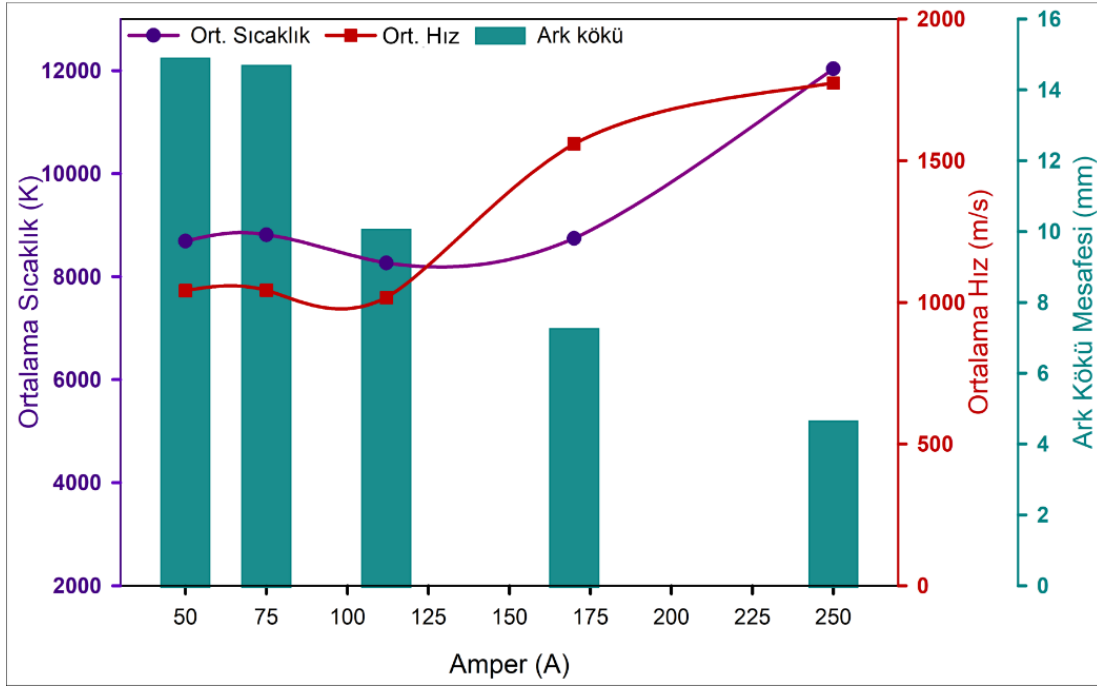
5.2.2. Sabit hacimsel debide farklı akım değerleri ile yapılan analizler

Sınır şartları Bölüm 4 - Sayısal Model ve Deneysel Yöntem başlığı altında verilen Model 1 geometrisi için 48 SLPM hacimsel debi değeri sabit tutularak sırasıyla 50, 75, 112, 170, 250 A akım değerlerinde yapılan analiz sonuçları, Şekil 5.8’de toplu şekilde gösterilmiştir. 48 SLPM değeri ortalama bir değer olduğundan tercih edilmiştir. Veri alma şekilleri sabit akım ile yapılan analizler ile aynıdır.

Şekil 5.9’da gösterilen çıkış kesitinden alınan ortalama sıcaklık değerlerine göre 120 A değerinden sonra daha büyük değerlerde artışın olduğu görülmektedir. Genel bir eğilim olarak amper değerlerindeki artışlar sıcaklık artışı üzerinde olumlu etkiler göstermiştir. Çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığı 8 688 K ile 12 032 K arasında değişmiştir ve en yüksek değer 250 A’de elde edilmiştir. Benzer şekilde hız değerlerini de yorumlamak mümkündür. Çıkış kesitindeki ortalama plazma hızı 1 042 m/s ile 1 774 m/s arasında değişmiştir. Ark kökü eklenti mesafesi ise artan akımla birlikte azalmıştır. Ark en kısa ve en düşük voltajı tercih etmektedir. Amper değişimine bağlı olarak ark kökü eklenti mesafeleri sırasıyla 14,9; 14,7; 10,1; 7,3; 4,7 mm olarak ölçülmüştür [280]. Elektrik arkları üzerine yapılan deneysel araştırma sonuçlarından [175] alınan Eş. 5.1’e göre de bu sonuç beklenen bir durumdur.

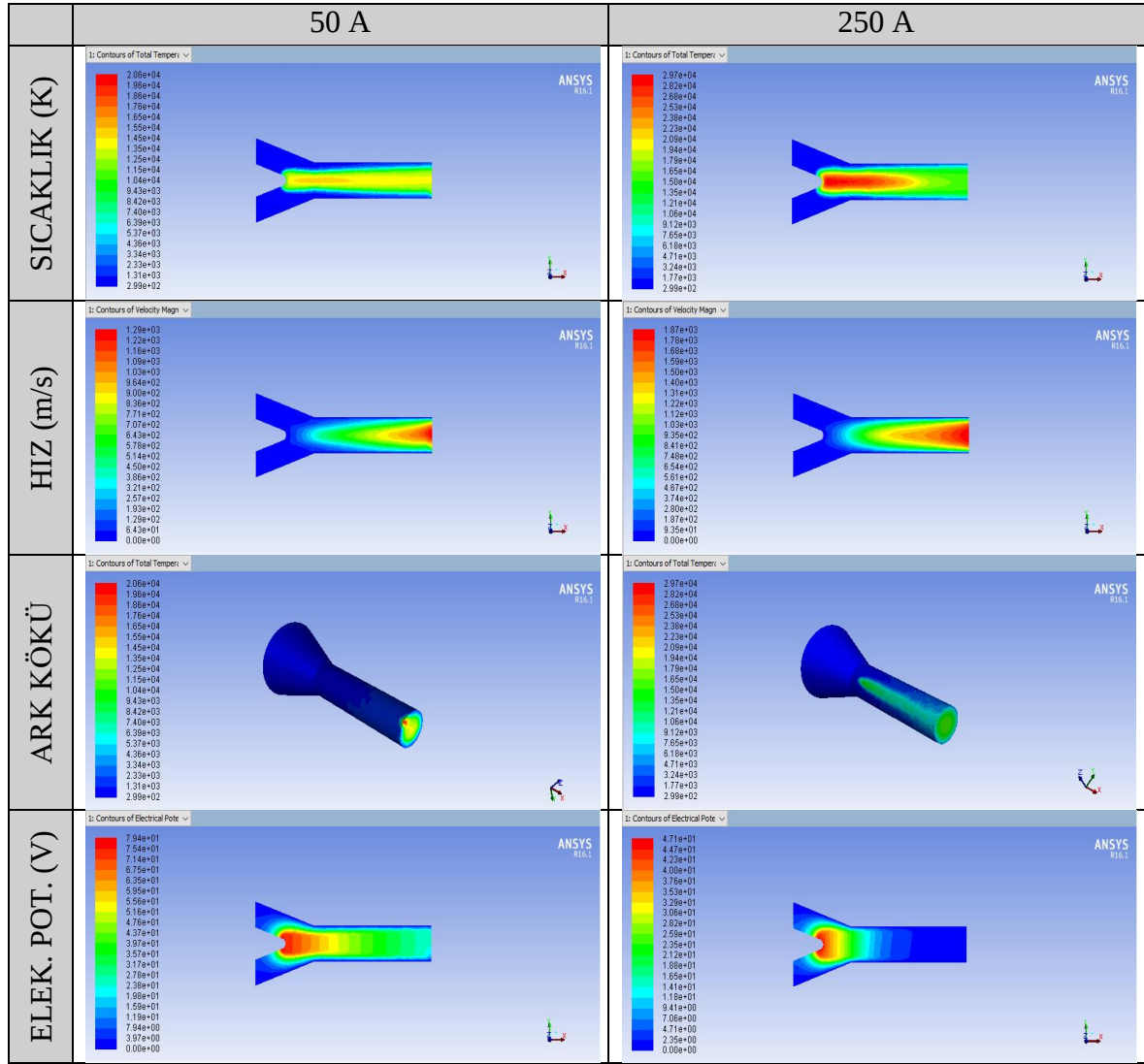
$$L \sim \rho^{\frac{5}{4}} \frac{V}{I} \quad (5.1)$$

Burada, L , ark uzunluğunu; ρ , yoğunluğu; V , potansiyel farkı; I ise akım değerini ifade etmektedir.



Şekil 5.9. Sabit 48 SLPM değerinde farklı amper değerleri için sıcaklık, hız değerleri ve ark kökü eklentisinin oluştuğu mesafelerin karşılaştırılması

Şekil 5.10’da en düşük ve en yüksek hacimsel debi değerleri için sıcaklık, hız, elektrik potansiyel dağılımları ve ark kökü eklentisinin oluştuğu bölge gösterilmiştir. Şekil 5.10 incelendiğinde sıcaklık ve hız değerlerinin amper değişimi ile birlikte artış gösterdiği ark kökü eklentisinin ise katot tarafına kaydığı görülmektedir. Elektrik arkı nedeniyle oluşan elektromanyetik alanlar özellikle katot elektrodu yakınında sıcaklık dereceleri çok yüksek gradyanların oluşumuna yol açmıştır [283]. Elektrik potansiyeli açısından değerlendirildiğinde ise ark kökü eklentisinin konumuna bağlı olarak katoda yaklaşmıştır. Ayrıca deneysel çalışmalar ile de kanıtlanan [19] ve anot etrafındaki soğutma suyunun etkisinden kaynaklanan soğuk sınır tabaka kalınlığı da artan akım değeri ile birlikte azalmıştır [168]. Plazma tabanca modelleme işlemlerinde görülen soğuk sınır tabaka kalınlığının da artan amper değeri ile birlikte azaldığı görülmektedir.

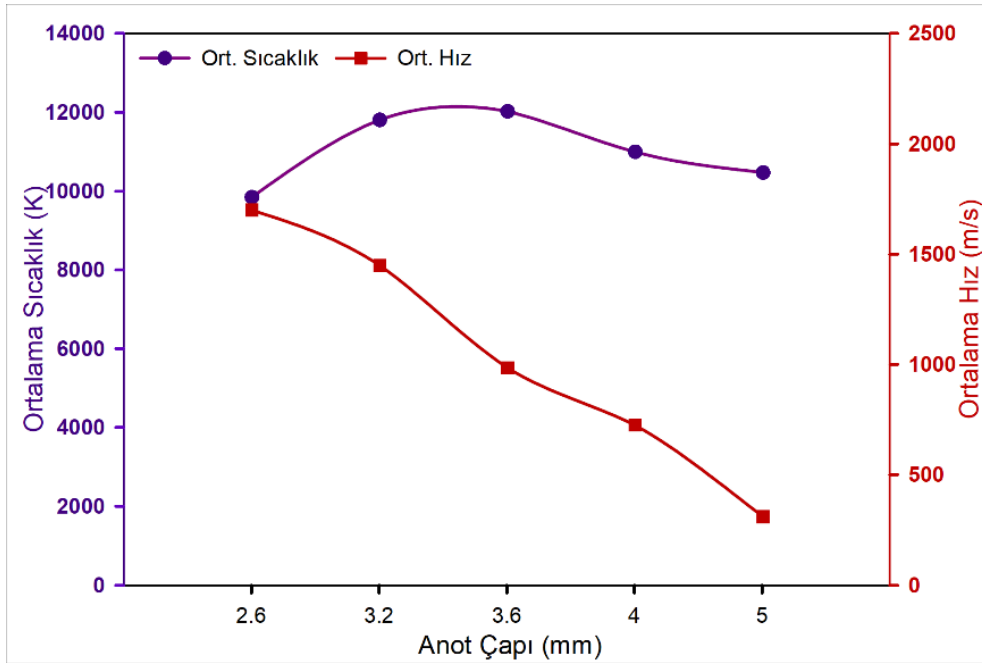


Şekil 5.10. Sabit 48 SLPM hacimsel debi değerinde en düşük ve en yüksek amper değerleri için örnek sıcaklık, hız, elektrik potansiyeli dağılımları ve ark kökü eklentisinin konumu

Şekil 5.9 ve 5.10 birlikte değerlendirildiğinde amper değerlerinin değişimi ile sıcaklık ve hız değerlerinde dikkate değer değişimlerin olduğu, amper değerinin 50 A'den 250 A'e çıkartılması ile sıcaklık ve hız değerlerinde sırasıyla yaklaşık 1,5 ve 1,7 kat fark olduğu tespit edilmiştir. Amper değerinin debi değerine nispeten daha baskın bir parametre olduğu belirlenmiştir. Elektrik arkındaki akım, gazı ısıtan ve iyonlaştıran Joule ısınmasına neden olur. Plazma durumuna geçişte hızlı bir genişleme, sıcaklık değerlerinin aniden yükselmesi ve plazma hızında büyük bir artış meydana gelmektedir [280]. Ayrıca Şekil 5.10'da verilen dağılım örneklerinin büyütülmüş hali Ek-2'de gösterilmiştir.

5.2.3. Farklı anot çapı ve boyları için yapılan analizler

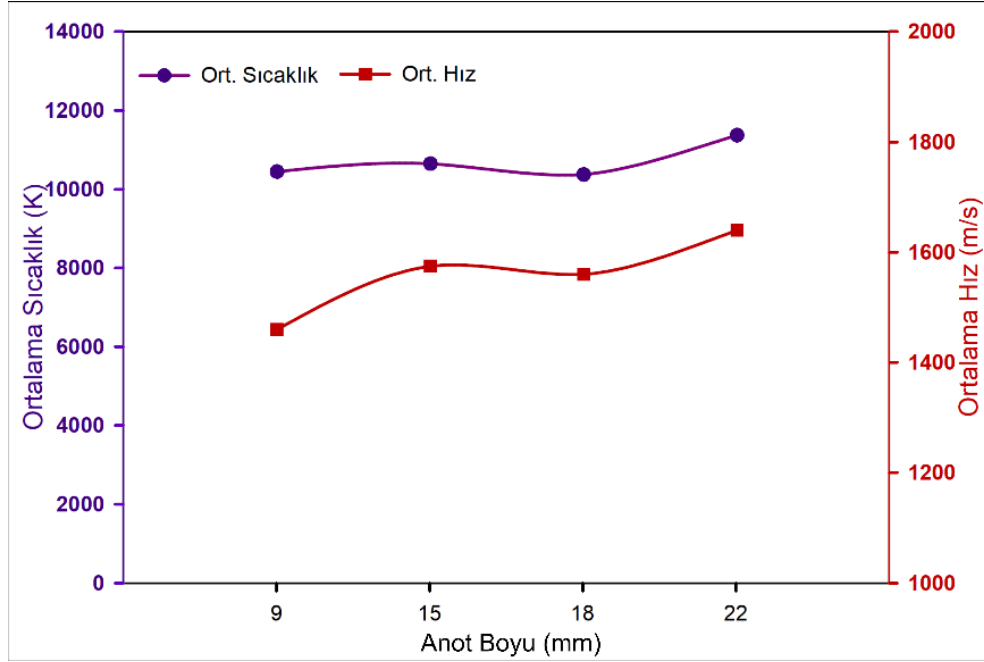
Geometri değişimlerinin çıkış kesitindeki ortalama sıcaklık ve hız değerleri üzerine etkisini görülebilmesi amacıyla sabit hacimsel debi (60 SLPM) ve akım değerinde (112 A) anot çapı ve boyunda değişiklik yapılmıştır. Anot düz kısım uzunluğu 12 mm olarak alınmıştır. Çap değişimi incelenirken anot duvarının açılı kısmı aynı kalacak şekilde 2,6; 3,2; 3,6; 4,0; 5,0 mm çap değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Bu değerlere bağlı olarak gerçekleşen çıkış kesiti ortalama sıcaklık ve hız değerlerine ait grafik Şekil 5.11’de gösterilmiştir. Buna göre çap değerleri arttıkça ortalama hız değerleri düşmektedir. Bu sonuç beklenen bir durumdur. Ortalama plazma sıcaklığı değerleri ise 3,6 mm’ye kadar artmış sonrasında düşüş göstermiştir.



Şekil 5.11. Farklı nozul çıkış çapları için çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklık ve hız değişimi

Yapılan bir diğer geometri değişimi ise anot düz kısım boyunu değiştirmektir. Nozul çıkış çapı 3,2 mm değeri sabit tutularak sırasıyla 9 mm, 15 mm, 18 mm, 22 mm boy değerleri için analizler gerçekleştirilmiştir. Bu değerlere bağlı olarak gerçekleşen çıkış kesiti ortalama sıcaklık ve hız değerlerine ait grafik Şekil 5.12’de gösterilmiştir. Buna göre anot düz kısım boy değerlerinin artması ile sıcaklık ve hız değerlerinin artma eğiliminde oldukları söylenebilir. Fakat bu durum çok dikkate değer değildir. Ortalama sıcaklık değerleri 10 000

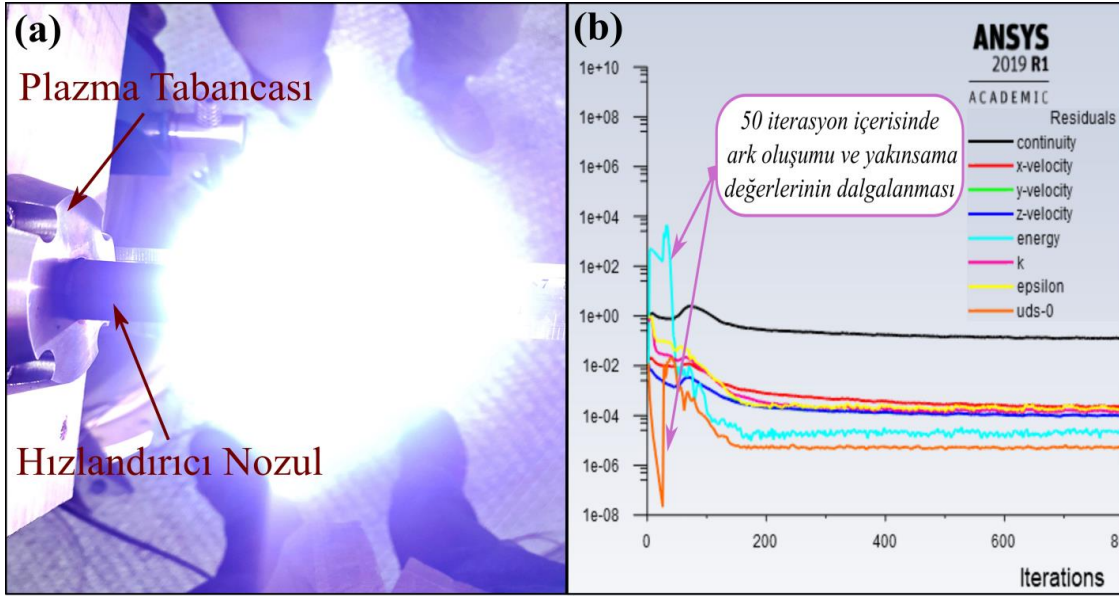
K ila 11 000 K arasında değişirken hız değerleri 1 475 m/s ila 1 600 m/s arasında değişmektedir.



Şekil 5.12. Farklı nozul boyları için çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklık ve hız değişimi

5.2.4. Ara değerlendirme 1

Plazma tabancalarının sayısal modellenmesi elektriksel olaylar ve akışkanlar dinamiği konularının beraber değerlendirilmesi ve modele uygulanmasını gerektirdiğinden oldukça zordur. Oda sıcaklığında ortama gönderilen gaz aniden yaklaşık 15 000 K sıcaklıklara ulaşmakta ve bu olay çözümün ıraksamasına sebep olmaktadır. Nitekim üretilen tabancalar ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar tabancanın ateşlenmesi ve plazma oluşum aşamasındaki termal durumu bu durumu ispatlamaktadır. Şekil 5.13'te tabancanın ilk ateşlenmesi ve plazma oluşum aşamasının görüntüsü ve yakınsama grafiği yer almaktadır. Buna göre çoğu sayısal modelleme çalışması bu aşamadan sonra ıraksamaktadır. Bu yüzden modelleme yetkinliğinin kazanılması çözümün sağlığı açısından önem arz etmektedir.



Şekil 5.13. Tabancanın ilk ateşlenmesi ve sonrasında plazma oluşum aşamasından a) gerçek bir görüntü, b) sayısal modelleme çözümü sırasında ark oluşum aşaması

Model 1 parametreleri seçilirken çözümü ıraksatmayacak ve modelleme yetkinliği kazandıracak parametreler belirlenmiştir. Başlık 5.2.1 ve 5.2.3 arasında verilen tüm grafikler ve analiz görüntüleri aşağıdaki değerlendirmelerin yapılması ile sonuçlanmıştır.

- Anot çıkış kesitindeki ortalama sıcaklık değerleri üzerinde akım değerleri hacimsel debi değerlerine nispeten daha baskın bir parametredir.
- Anot çıkış kesitindeki ortalama hız değerleri üzerinde hacimsel debi değerleri akım değerlerine nispeten daha etkilidir. Yüksek hız değerleri yüksek debiler sonucunda gerçekleşmiştir.
- Akım değerlerinin artması, ark boyunu kısaltmakta, voltajı düşürmekte ve kök eklentisinin katot yakınında oluşmasını sağlamaktadır. Hacimsel debinin artması ise bu durumun tam tersi bir etkiye sahiptir.
- Anot çapının değişimi boy değişimine nispeten daha önemli sonuçlara sebep olmuştur. Özellikle hız değerleri çap değişiminden oldukça fazla etkilenmiştir.
- Özellikle yüksek debiler sonucunda çıkış kesitine doğru kayan ark kökü eklentisi olduğu bölgeye doğru yüksek sıcaklıkları kaydırarak plazma jetini kararsız hale getirmektedir.

Bu değerlendirmeler temelinde ara değer hacimsel debi ve akım değerlerinin etkisinin de görülmesine karar verilmiştir. Ayrıca asıl odak noktası olan tabanca dışındaki sıcaklık ve hız

değerlerinin görülebilmesi amacıyla sayısal modelleme işleminin plazma tabancası dışında plazma jeti ile birlikte yapılmasına karar verilmiştir.

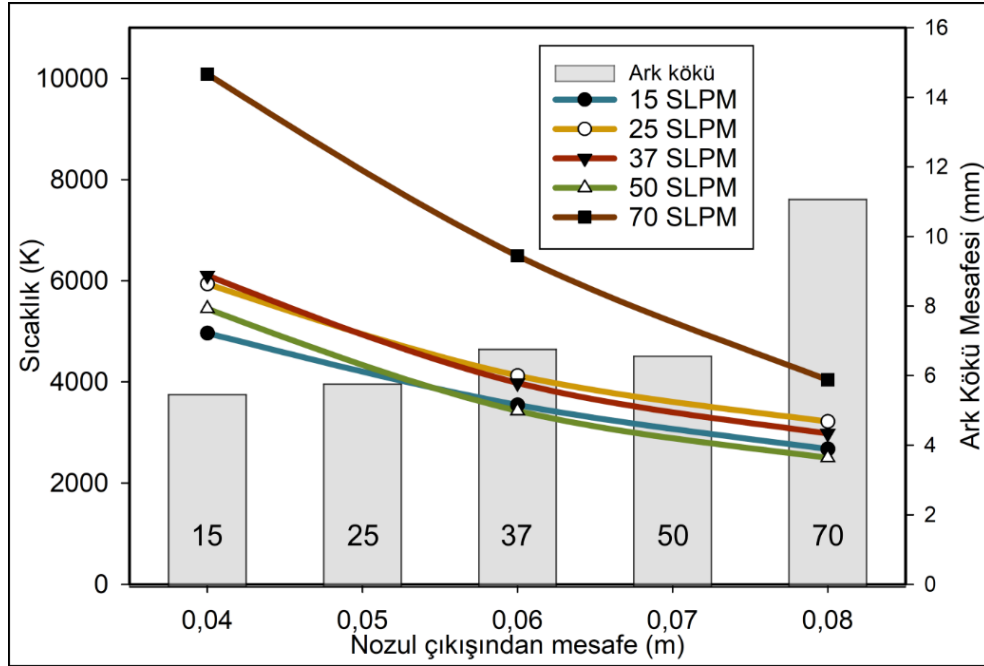
5.3. Modelleme Çalışması; Model 2 Geometrisi İçin Nozul Dışı Çalışma Bulguları

Nozul dışındaki analizlere ait sınır şartları Bölüm 4'te verilmiştir. Özetle başlangıçta 200 A değeri sabit tutularak 15, 25, 37, 50, 70 SLPM değerlerinde sonrasında ortalama sonuçlar veren 37 SLPM değeri sabit tutularak 100, 150, 200, 250, 300 A akım değerlerinde analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar grafikler halinde sunulmuştur.

5.3.1. Sabit akımda farklı hacimsel debiler ile yapılan analizler

Tabancaların fiziki büyüklüklerinden dolayı açılı bir şekilde yerleştirilen 3 tabancanın çıkış kesiti ile kesişim noktası arasında mesafe oluşmaktadır. Bu mesafe 15 ila 50 mm arasındadır. Tabanca gücüne [26] ve plazma tabancalarının fiziksel büyüklüklerine [96] göre değişiklik göstermektedir. Şekil 5.14'te tabanca ekseninde plazma jet çıkışından itibaren 4, 6 ve 8 cm mesafelerde sıcaklık değerlerinin ve anot duvarı üzerindeki ark kökü eklentisinin olduğu mesafelerin karşılaştırması gösterilmiştir. 15-50 SLPM hacimsel debi değerlerinde mesafelere bağlı sıcaklık değerleri birbirine yakın elde edilmiştir. 70 SLPM değerinde ise ana sıcaklık kaynağı olan ark kökünün nozul çıkışına doğru kayması sıcaklığı dikkat çekici bir şekilde artırmıştır. Örneğin 15 SLPM'ye göre debi değerinin 4,6 kat (70 SLPM) artırılması ark kökü eklentisini 5,5mm'den 11,1mm'ye ötelemiştir. Fakat ark kökü eklenti mesafesi ile sıcaklık değerleri arasında lineer bir ilişki bulunmamaktadır.

Şekil 5.15'te farklı hacimsel debiler için mesafelere göre hız değerlerinin karşılaştırılması yer almaktadır. Genel bir eğilim olarak debi değerlerinin artırılması ile hız değerlerinde artış görülmüştür. Artan debi değerleri ile birlikte iyonlaşan gaz miktarındaki artış çıkış kesiti ve uzağındaki hız değerlerinde artışa sebep olmuştur. Nozul çıkışından 4 cm mesafede ve 15 SLPM'de gerçekleşen hız değerleri ile 70 SLPM'de gerçekleşen değerler arasında yaklaşık 7 kat fark bulunmaktadır.

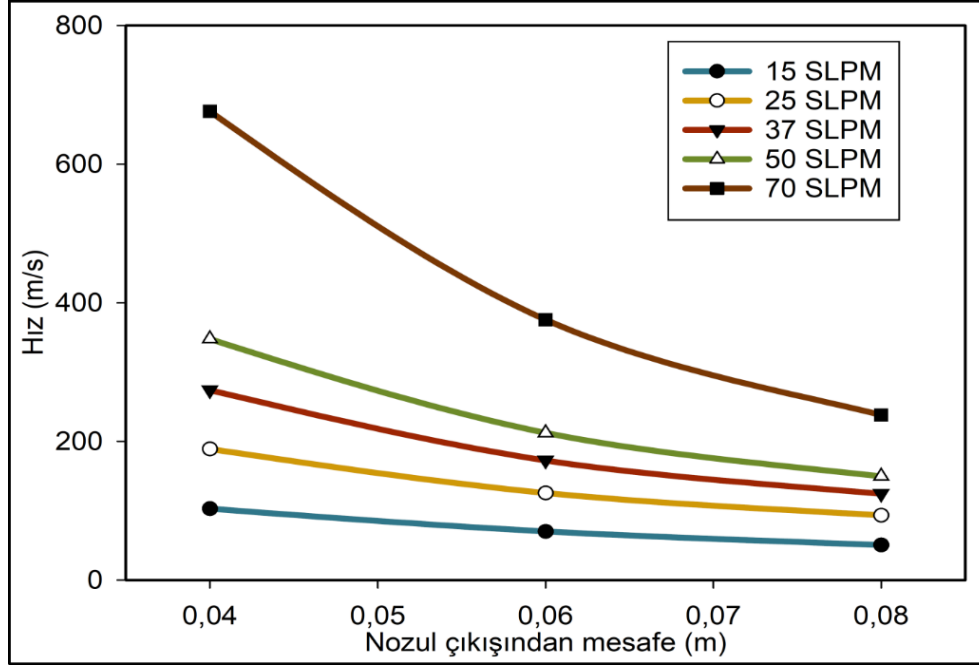


Şekil 5.14. Sabit 200 A değerinde farklı hacimsel debiler için belirli mesafelerden alınan sıcaklık değerleri ve ark kökü eklentisinin olduğu mesafelerin karşılaştırılması

Çizelge 5.3'te analizlere göre her bir hacimsel debi değeri için hesaplanan güç ve tabancanın termal verim tablosu yer almaktadır. Plazma tabancasının termal verimi Eş. 5.2'de verilen denkleme göre hesap edilmiştir [21].

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{V_{\text{ark}} \cdot I} \quad (5.2)$$

Burada, $P_{\text{çıkış}}$ (W), plazma jetine iletilen toplam termal güçtür. I (A), katottan tanımlanan akım ve V_{ark} (V), toplam ark voltajıdır. Toplam ark voltajı (V_{arc}), katot düşme bölgesi (V_c), ön nozul bölgesi (V_{cn}), nozul bölgesi, nozul sonrası bölge (V_{an}) ve anot düşme bölgesi (V_n) gibi farklı bölgelerdeki tek tek gerilim düşüşlerinin toplamıdır. Katot ve anot düşme voltajları toplam ark voltajının sadece küçük bir bölümünü oluşturur. Tungsten katot ile katot düşme bölgesinde ve bakır anot düşme bölgesinde 5-8 V arasında voltaj düşüşü görülür. Plazma ark voltajı, nozul boyutlarına (çap, uzunluk, katot mesafesi, vb.), ark akımına, gaz bileşimine, akış hızına ve nozulun çalışma parçasına olan mesafesine bağlıdır [200].



Şekil 5.15. Sabit 200 A değerinde farklı hacimsel debiler için belirli mesafelerden alınan hız değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 5.3'teki değerler değerlendirildiğinde artan hacimsel debi ile birlikte plazma tabancasının termal güç ve veriminin arttığı görülmektedir. Debi değerlerinin artırılması ile birlikte iyonlaşan gaz miktarı artmış bu durum çıkış bölgesine taşınan enerjinin artması ile sonuçlanmıştır.

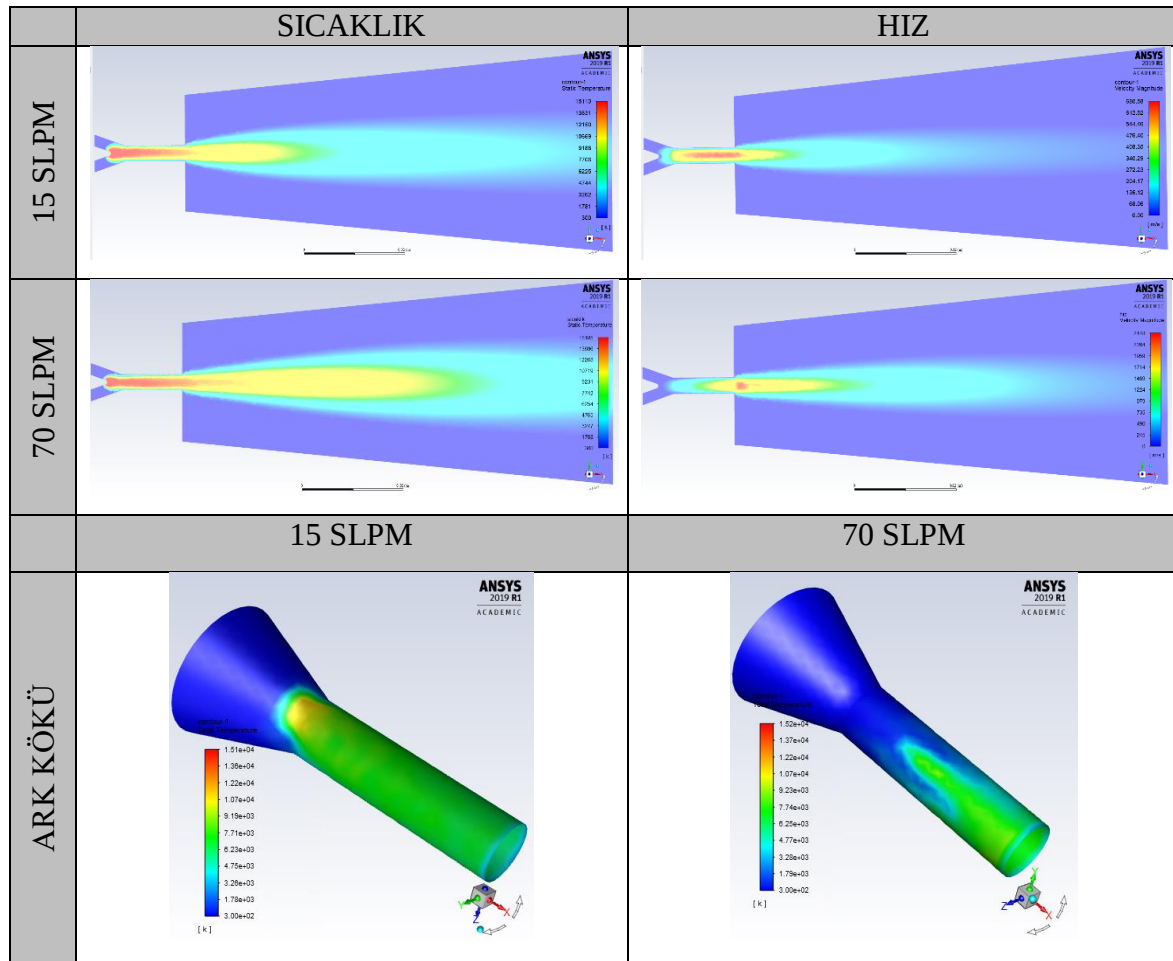
Çizelge 5.3. Farklı hacimsel debiler için hesaplanan verim ve güç değerlerinin karşılaştırılması

Hacimsel Debi (SLPM)	Çıkış bölgesinden ısı geçişi (W)	$V_{ark} \cdot I$ (W)	Plazma tabancası verimi (%)
15	1784,45	9177,1	19
25	3784,324	11264,2	34
37	4789,2	13222,3	36
50	5423,846	14600,1	37
70	9183,764	22162,9	41

Şekil 5.15 en düşük ve en yüksek hacimsel debi değerleri için sıcaklık, hız dağılımı ve ark kökü eklentisi konumunu göstermektedir. Dağılımlar incelendiğinde 15 SLPM debi değeri için çıkış kesitindeki sıcaklık değeri yaklaşık 11 000 K iken 70 SLPM debi değeri için bu

değer 13 000 K değerinde elde edilmiştir. Benzer bir durum hız değerleri için de geçerlidir. Ark kökü eklenti mesafesi ise artan hacimsel debi ile birlikte çıkış kesitine doğru kaymıştır.

Şekil 5.14-15-16 ve Çizelge 5.3 birlikte değerlendirildiğinde hacimsel debi değişiminin özellikle hız değerleri üzerinde etkili bir parametre olduğu görülmektedir. PA işleminde teli ergitebilmek için sıcaklığa atomize edebilmek için ise yüksek hız değerlerine ihtiyaç bulunmaktadır. Diğer atomizasyon yöntemleri ile kıyaslandığında elde edilen hız değerleri oldukça yüksektir. Burada anot çapının 3,2 mm olmasının da etkisi bulunmaktadır. Ayrıca Şekil 5.16’da verilen dağılım örneklerinin büyütülmüş hali Ek-3’te gösterilmiştir.

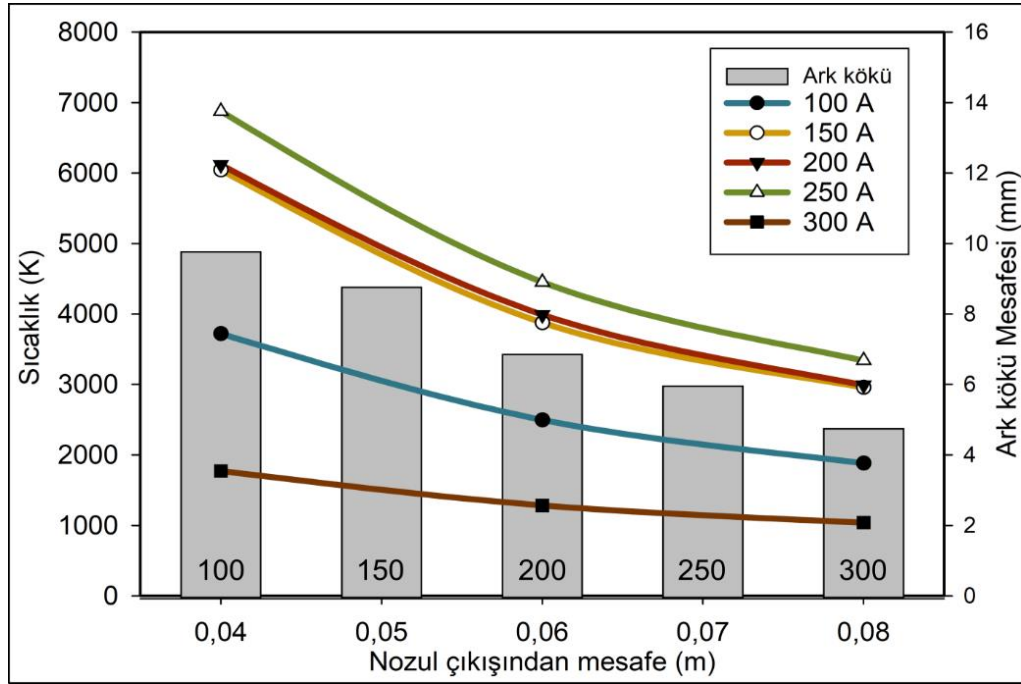


Şekil 5.16. Sabit 200 A akım değerinde en düşük ve en yüksek hacimsel debiler için örnek sıcaklık, hız ve ark kökü eklentisinin konumu

5.3.2. Sabit hacimsel debide farklı akım değerleri ile yapılan analizler

Başlık 5.3.1’de elde edilen sonuçlara göre ortalama sonuçlar veren 37 SLPM değeri sabit tutularak 5 farklı akım değerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.17’de tabanca

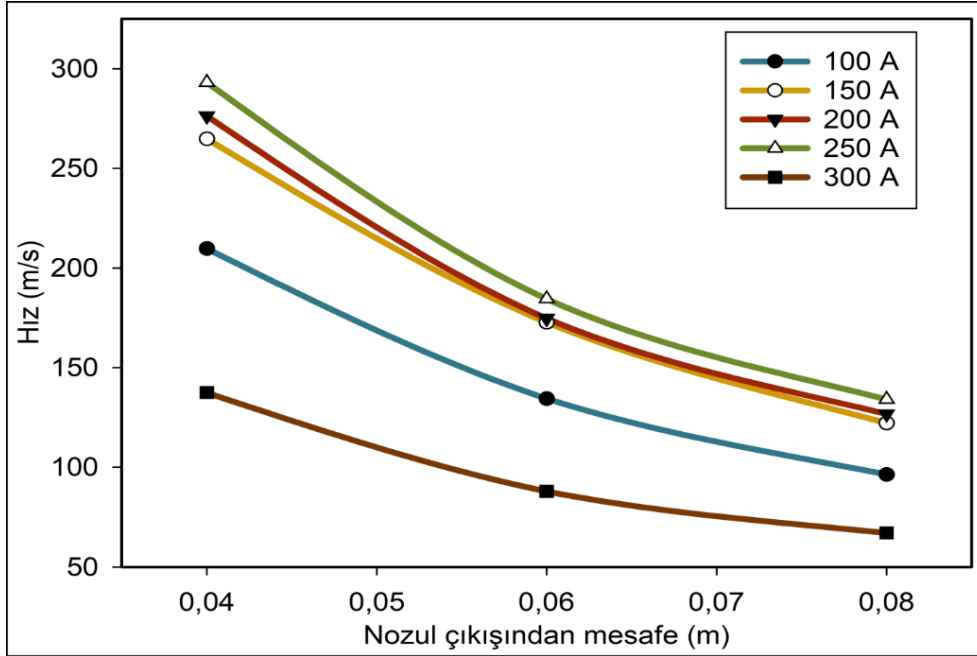
ekseninde plazma jet çıkışından itibaren 4, 6 ve 8 cm mesafelerde sıcaklık değerlerinin ve anot duvarı üzerindeki ark kökü eklentisinin olduğu mesafelerin karşılaştırması gösterilmiştir. Buna göre akım değerlerinin artırılması tabanca dışında plazma jetinin sıcaklığı üzerinde olumlu etkiler göstermiştir. Ark kökü eklentisi mesafeleri ise azalmıştır. Fakat 300 A değeri akım değeri arttıkça sıcaklığın artacağı yargısına bir istisna oluşturmuştur. Analizler incelendiğinde ark kökü eklentisinin anot kanalına ulaşmadan açılı kanalda olduğu gözlemlenmiştir (Şekil 5.19). Bu durum sıcaklık değerlerinin çıkış kesitine ve dışarısına yeterince taşınamamasına sebep olmuştur. Ayrıca ark oluşum eğiliminin en kısa yol ve en düşük voltaj değerini tercih ettiği bilinmektedir. Lorentz kuvvetler akış kuvvetlerine daha baskın geldiğinden ark kökü açılı kısımda oluşmuştur.



Şekil 5.17. Sabit 37 SLPM değerinde farklı akım değerleri için belirli mesafelerden alınan sıcaklık değerleri ve ark kökü eklentisinin olduğu mesafelerin karşılaştırılması

Şekil 5.18’de farklı akım değerleri için tabanca dışındaki mesafelere göre hız değerlerinin karşılaştırılması yer almaktadır. Akım değerinin artırılması hız değerlerinin de artmasına sebep olmuştur. Sıcaklık değerlerindeki genel yargıyı bozan 300 A akım değerindeki durum benzer şekilde hız değerlerinin de düşüşüne sebep olmuştur. Her iki grafikte de 150 ve 200 A akım değerleri için sıcaklık ve hız değerleri birbirine yakın elde edilmiştir. Bu durum plazma jetinin kararsızlığına ve ark kökü eklentisinin olduğu tarafta daha fazla sıcaklığın oluşmasına bağlanmıştır. Veri alınan noktalar tabanca orta eksenindedir (Şekil 4.6). Buna

göre tabanca ekseninden radyal mesafelerde sıcaklık ve hız değişimlerinin yaşanması muhtemeldir.



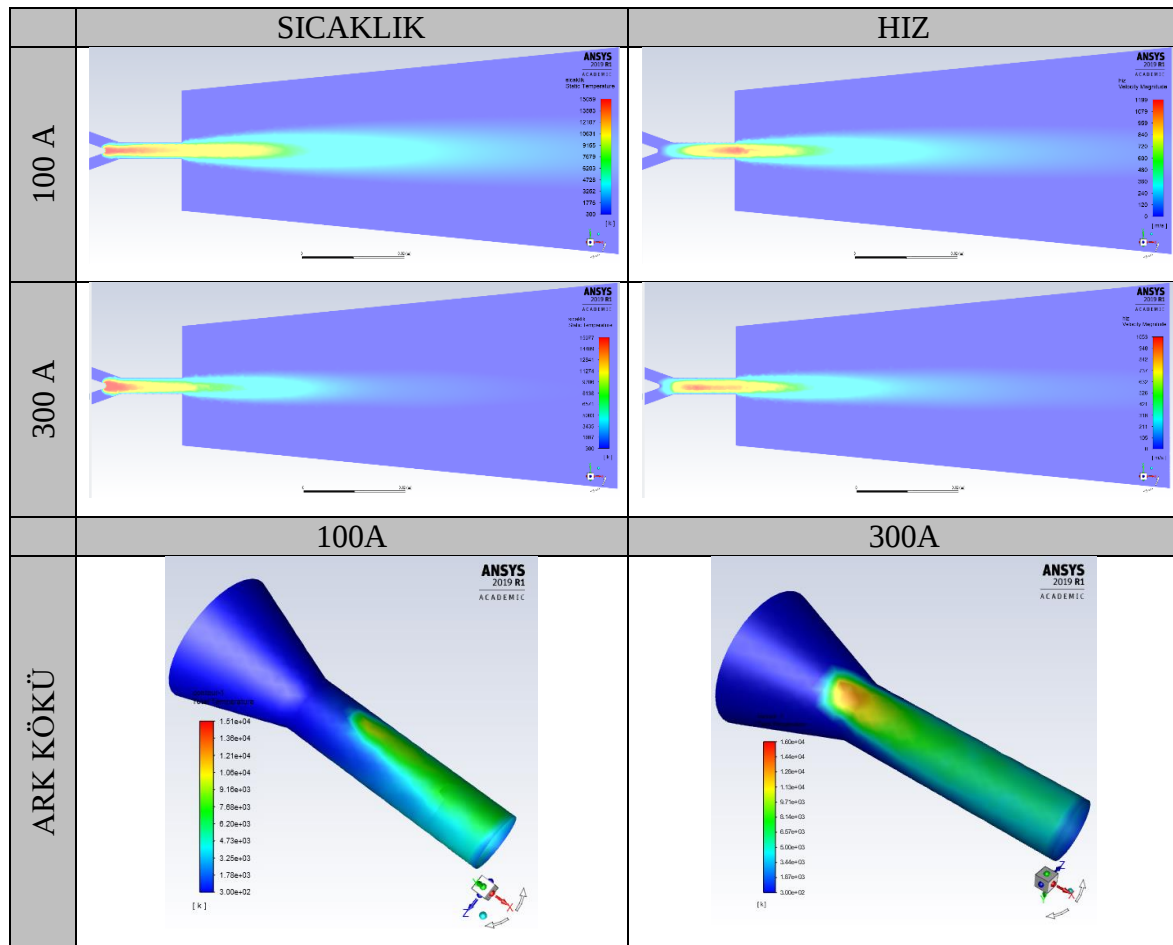
Şekil 5.18. Sabit 37 SLPM değerinde farklı akım değerleri için belirli mesafelerden alınan hız değerlerinin karşılaştırılması

Çizelge 5.4’te analizlere göre her bir akım değeri için hesaplanan güç ve tabancanın termal verim tablosu yer almaktadır. Akım değeri arttıkça ark kök eklentisinin boyu kısalmıştır. Bu durum daha düşük voltajlar anlamına gelmektedir. Buna bağlı olarak tabanca gücünde düşüş beklenir. Fakat burada ark voltajı düşmesine rağmen akım değerinin artırılması tabanca gücünü artırmıştır. Artan akım değeri ile birlikte çıkış bölgesi ısı geçişi ark kökü eklentisi geriye kaydığından yeterince artış gösterememiştir. Çizelgedeki değerler incelendiğinde akım değerlerindeki artış oranları ile ısı geçişleri, güç ve verim değerlerinin artış veya düşüş oranlarının aynı olmadığı görülmektedir. Bu duruma 300 A değerindeki termal verimin %10’a kadar düşmesi örnek olarak verilebilir. İlgili literatür incelendiğinde yazarlar bu sonuçlara benzer şekilde artış veya azalmanın lineer olmadığını vurgulamışlardır [208, 210, 274].

Çizelge 5.4. Farklı akım değerleri için hesaplanan verim ve güç değerlerinin karşılaştırılması

Akım (A)	Çıkış bölgesinden ısı geçişi (W)	$V_{ark} \cdot I$ (W)	Plazma tabanca verimi (%)
100	3229,4	7663,3	42
150	4825,7	12014,6	40
200	4789,2	13222,3	36
250	5219,9	15616,4	33
300	1910,7	19879,2	10

Şekil 5.19’da 37 SLPM hacimsel debi değeri için 100 ve 300 A akım değerlerinde elde edilen sıcaklık ve hız dağılımları yer almaktadır. Genel eğilimin bozulmasına sebep olan arkın anot kanalına giremeden oluşması durumu burada görülmektedir. Ayrıca Şekil 5.19’da verilen dağılım örneklerinin büyütülmüş hali Ek-4’te gösterilmiştir.



Şekil 5.19. Sabit 37 SLPM değerinde en düşük ve en yüksek akım değerleri için örnek sıcaklık, hız ve ark kökü eklentisinin konumu

5.3.3. Ara Değerlendirme 2

Model 1'den farklı olarak ara değer hacimsel debi, akım değerlerinin etkisinin ve tabanca dışında plazma jetinin sıcaklık ve hız açısından nasıl etkilendiğinin görülmesi amacıyla yapılan analizler sonucunda aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

- Hacimsel debi ve akım değerlerindeki artış mesafelere göre sıcaklık ve hız değerlerinin artması ile sonuçlanmıştır.
- 200 A akım değerinde tabanca çıkışından 4-6-8 cm mesafelerden alınan noktasal sıcaklık ve hız değerleri, hacimsel debi değişiminin akım değerlerine nispeten daha etkili olduğunu göstermiştir.
- Model 2 geometrisi esas alındığında çok yüksek akım değerlerinin arkı, katoda yakın bir bölge olan anodun açılı yüzeyinde oluşturarak tabanca çıkışındaki sıcaklık ve hız değerlerinin düşmesine sebep olabileceği görülmüştür.
- Hacimsel debi değerlerinin artışı ile tabancanın termal verimi artarken akım değerlerinin artışı ile düşmüştür.

Ara değerlendirme 1 ve 2 ile birlikte hacimsel debi ve akım değerlerinin değişimi ile tabanca içinde ve dışında plazma jetinin özelliklerini nasıl etkilediği görülmüştür. Buna göre yüksek sıcaklık ve hız değerleri için yüksek akım ve debi değerlerinin seçilmesi gerektiği ancak akım değerinin yüksek seçilirken geometriye dikkat edilmesi gerektiği aşıkardır. Ayrıca bundan sonrasına bu geometri ile devam edilmesinin bazı kısıtlamalarının olacağı varsayılmıştır. Örneğin 3,2 mm çapındaki bir anot kanalı içerisinde arkın oluşturulabilmesi için katot çapının 1-5 mm olması muhtemeldir. Bu durumda anot soğutması etkin bir şekilde sağlansa da katot soğutması yeterli olmayacak ve katot hızlı bir şekilde aşınarak etkinliğini kaybedecektir. Nitekim bu varsayım üretilen prototip modeller ile de ispatlanmıştır. Oldukça kısa süre (10 dk) çalışma sonunda katot ucu aşınmış ve ark kararsızlıklarına sebep olacak şekilde deforme olmuştur. Aşınma durumlarına ait gerçek görüntüler Şekil 5.20'de gösterilmiştir. Prototip çalışmalarından elde edilen bulgular Deneysel Çalışma Bulguları başlığı altında incelenmiştir.



Şekil 5.20. Prototip nozul ile test çalışmaları öncesinde b) katot görüntüsü ve çalışma sonrası aşınmış a) anot c) katot görüntüsü

Yukarıdaki değerlendirmeler doğrultusunda sonraki analizlere değişken olarak hacimsel debi değerlerinden en iyi sonuçları veren 70 SLPM değeri ve akım değerlerinden en iyi sonucu veren 250 A değerinin kullanılmasına, anot kanalı için 5 mm çap ile 20 mm boy olacak şekilde devam edilmesine (YTG – yeni temel geometri) ve çaptaki artış ile meydana gelebilecek hız değerlerindeki kayıpları gidermek için çeşitli geometri değişimlerinin (YD-yalnızca daralan)/eklentilerinin (DG-daralan genişleyen) yapılmasına karar verilmiştir.

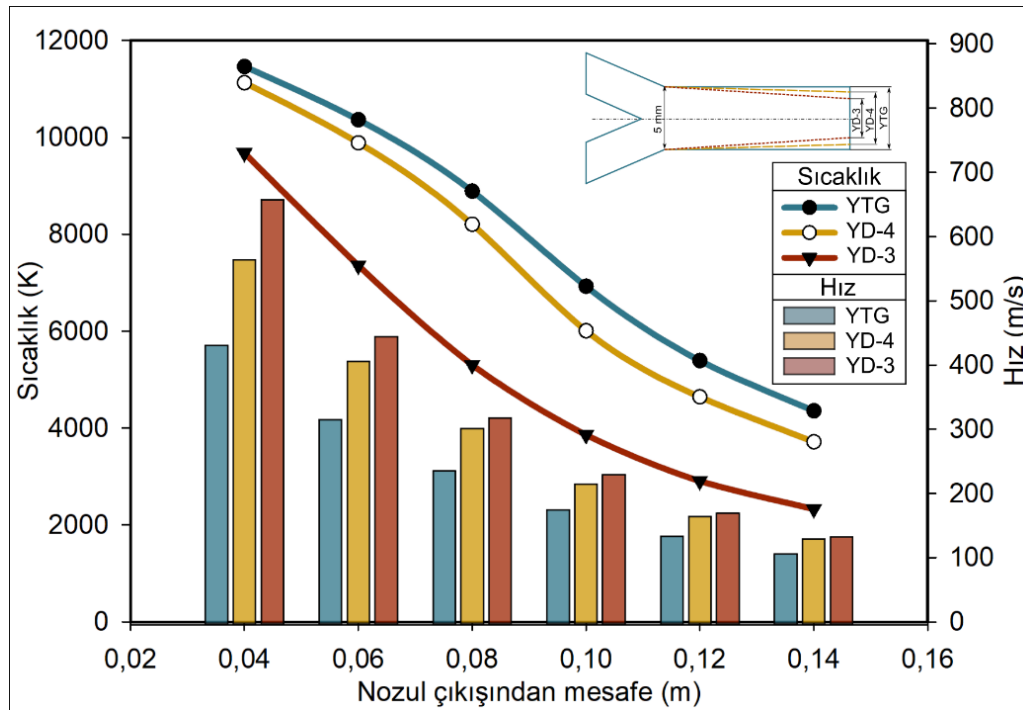
5.4. Modelleme Çalışması; YTG, YD ve DG Geometrileri İçin Nozul Dışı Çalışma Bulguları

Geometri değişiminde kullanılan modeller Bölüm 4’te verilmiştir. Özetle başlangıçta nozul çapında daralma etkisinin incelenmesi için anot düz kısım giriş çapı sabit tutularak çıkış çapı 4 ve 3 mm’ye daraltılmıştır. Sonrasında süpersonik nozul olarak bilinen daralan genişleyen nozul eklentisi uygulanmış ve bu eklentinin boğaz çapı değiştirilerek tüm geometriler karşılaştırılmıştır. Ayrıca 5 mm’ye kadar çalışılan çap değişimlerinin etkisi 10 mm’ye genişletilmiştir.

5.4.1. Yeni temel geometri ve yalnızca daralan geometri karşılaştırması

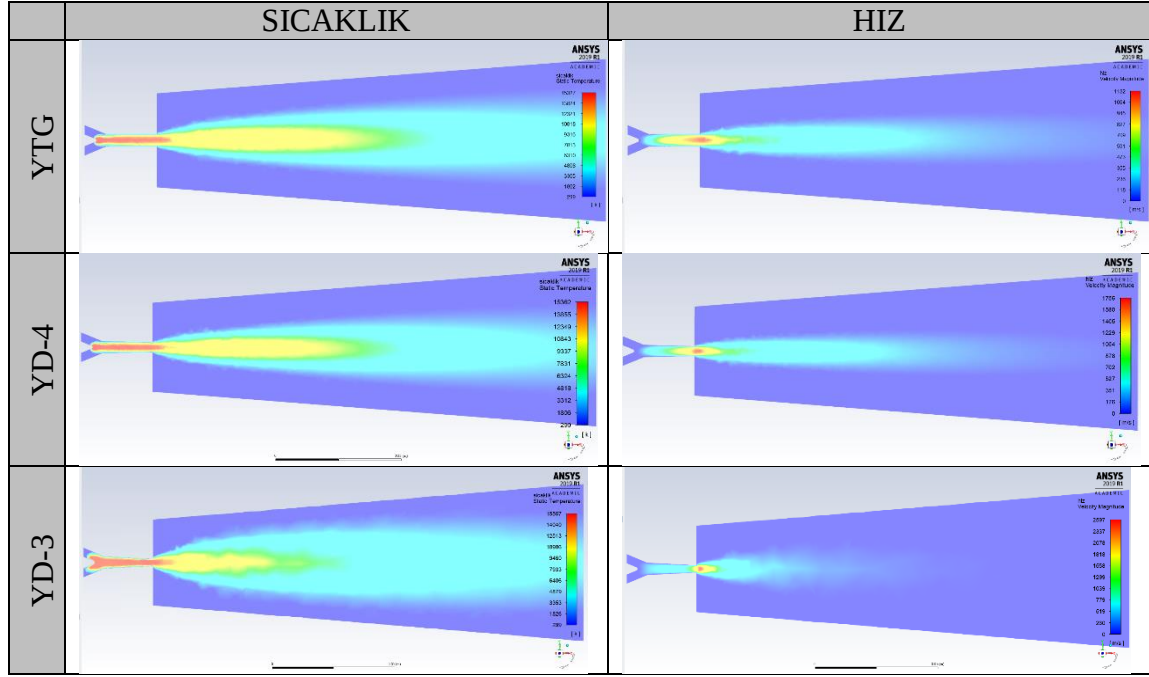
Şekil 5.21’de tabanca çıkışından belirli mesafelerde, YTG ve YD geometrileri için sıcaklık ve hız değerlerinin karşılaştırılması yer almaktadır. Bu grafiğin sol tarafı sıcaklık verileri için çizgi grafiğinin ölçeğini, sağ tarafı ise hız verileri için çubuk grafiğinin ölçeğidir. Grafik incelendiğinde çıkış çapı daraltıldıkça mesafelere göre hız değerleri de artmıştır. YTG, YD-4 ve YD-3 geometrileri için 4 cm mesafedeki hız değerleri sırasıyla 659, 566 ve 433 m/s

olarak gerçekleştirilmiştir. Hız değerlerinden farklı olarak sıcaklık değerleri çap azaldıkça azalmıştır. Ti-6Al-4V malzemesinin ergime sıcaklığı (1 930 K) esas alındığında tüm geometriler nozul dışından 14 cm mesafeye kadar teli ergitebilme gücüne sahiptir. Fakat atomizasyon için hız değerlerinin mümkün olduğunca yüksek olması istenilen bir durum olduğundan tabanca ile tel arasındaki mesafe mümkün olduğunca küçük seçilmelidir. Ayrıca Model 1 geometrisi ile sonuçlar karşılaştırıldığında çaptaki artışın mesafelere bağlı olarak ölçülen sıcaklık değerlerini artırmış, hız değerlerini düşürmüştür. Çap artırıldıkça mesafelere bağlı sıcaklığın arttığı bilgisi analiz sonuçlarına göre tasarım ve imalatı gerçekleştirilecek olan tabancalar için önemli bir kazanımdır.



Şekil 5.21. Tabanca çıkışından belirli mesafelerde, YTG ve YD geometriler için sıcaklık (sol eksen) ve hız (sağ eksen) değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.22’de 3 geometriye ait analiz sonucunda elde edilen sıcaklık ve hız dağılımları yer almaktadır. Dağılımlar incelendiğinde en yüksek sıcaklık değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Elde edilen en yüksek hız değerleri karşılaştırıldığında YTG’ye göre çıkış çapında 7,065 mm²’lik bir daralma 1,48 kat hız artışına, 12,56 mm²’lik bir daralma 2,19 kat hız artışına sebep olmuştur. Ayrıca Şekil 5.22’de verilen dağılım örneklerinin büyütülmüş hali Ek-5’te gösterilmiştir.



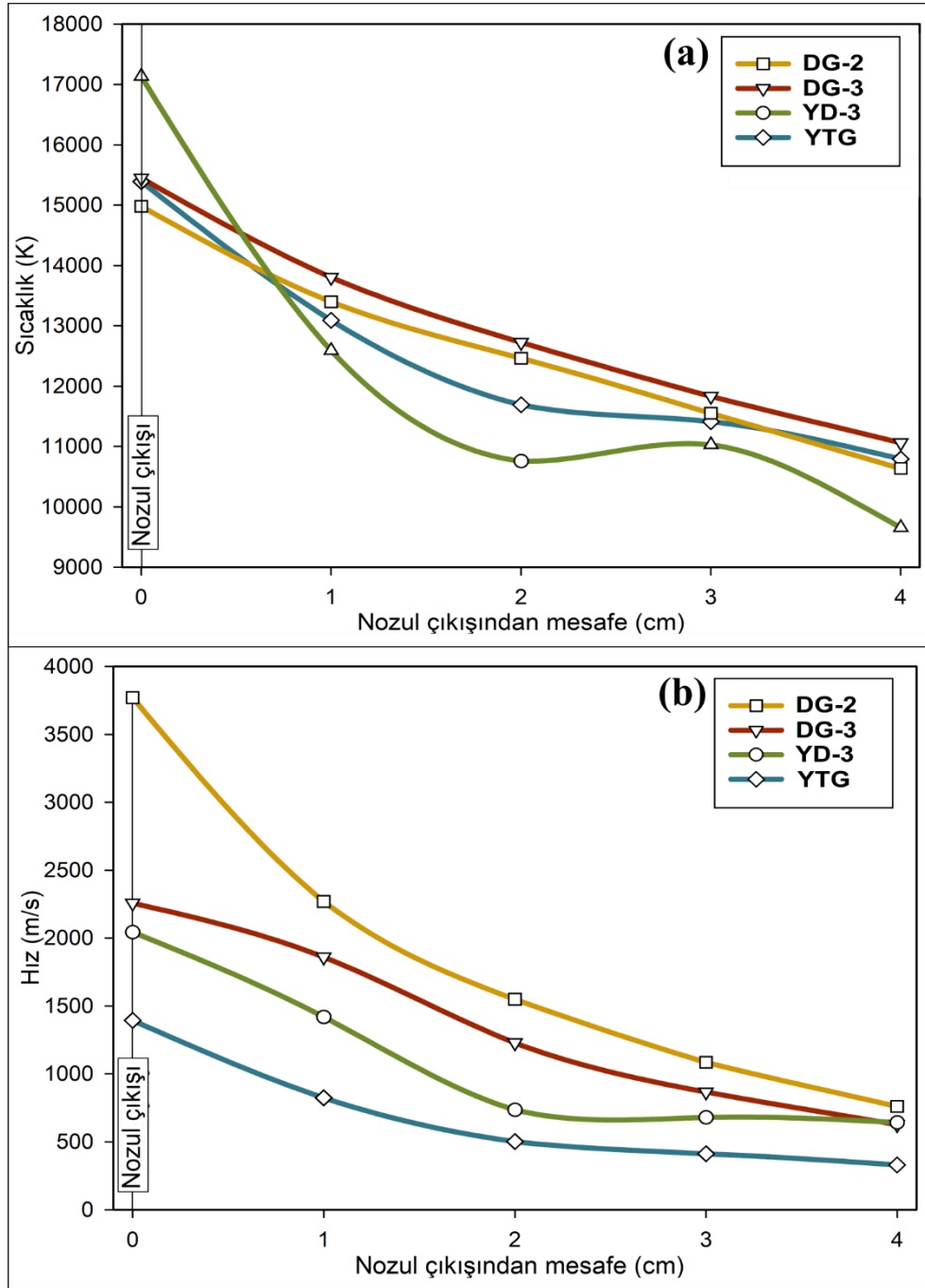
Şekil 5.22. YTG ve YD geometriler için sıcaklık ve hız dağılımları

5.4.2. Yeni temel geometri, yalnızca daralan ve daralan genişleyen geometrilerin karşılaştırılması

Nozul dışındaki hız değerlerini artırmak amacıyla yapılan geometri değişiklikleri sesüstü nozullar olarak da bilinen daralan genişleyen şekle sahip geometri eklentisi ile devam etmiştir. Gaz atomizasyon yöntemi ile toz üretiminde ve havacılıkta sıklıkla kullanılan bu geometrilerin plazma tabancalarına uygulanabileceği değerlendirilerek geometri çalışması yapılmıştır. Çalışma sonucunda belirlenen geometri için iki farklı boğaz çapında (“DG-3”; 3 mm ve “DG-2”; 2 mm) analizler gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.23’te tüm geometri değişikliklerine ait bir karşılaştırma bulunmaktadır. Bu grafikte YD geometri için en iyi sonucu veren 5 mm’den 3mm’ye düşen anot çapına sahip geometri verileri kullanılmıştır. Ayrıca diğer grafiklerden farklı olarak sıcaklık ve hız değerlerinin yüksek düzeyde olduğu ve ani düşüşlerin olmadığı 0-4 cm mesafeye odaklanılmıştır.

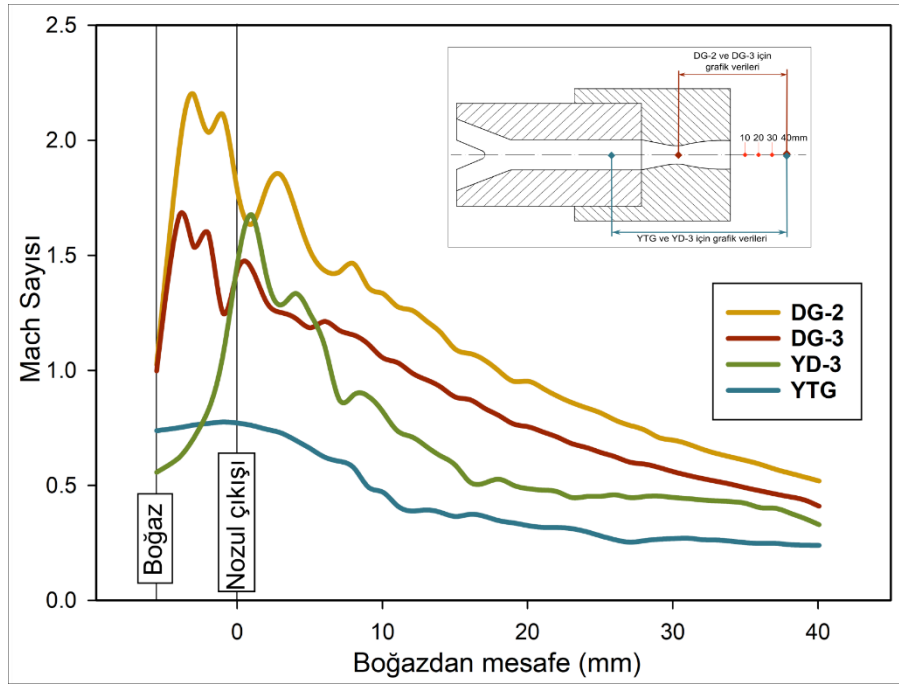
Şekil 5.23’te verilen grafikler incelendiğinde 4 cm mesafede DG-2 geometrisi 775,9 m/s ile YTG geometrisine nispeten 2,23 kat daha yüksek hız değerine, YD-3 geometrisinden ise %17 daha yüksek hız değerine sahiptir. DG geometrisinde boğaz çapının 3 mm’den 2 mm’ye düşürülmesi 4 cm mesafedeki hız değeri üzerinde % 20’lik bir artış ile sonuçlanmıştır. Fakat ilişki diğer mesafeler için doğrusal değildir. Bu durumun arkin kararsız davranışından ve akışın türbülanslı olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Sıcaklık değerleri açısından

boğaz çapının 3 mm'den 2 mm'ye düşürülmesi olumsuz etki oluşturmuştur. 4 cm mesafedeki sıcaklık değerleri karşılaştırıldığında aradaki fark 426 K olarak gerçekleşmiştir. Bu fark plazma tabancalarından elde edilen sıcaklıklar dikkate alındığında önemli bir fark değildir. YD-3 geometrisi için nozul çıkış sıcaklığı 17 145 K iken 4 cm mesafede bu sıcaklık değerinin yaklaşık % 50'sini kaybetmiştir.



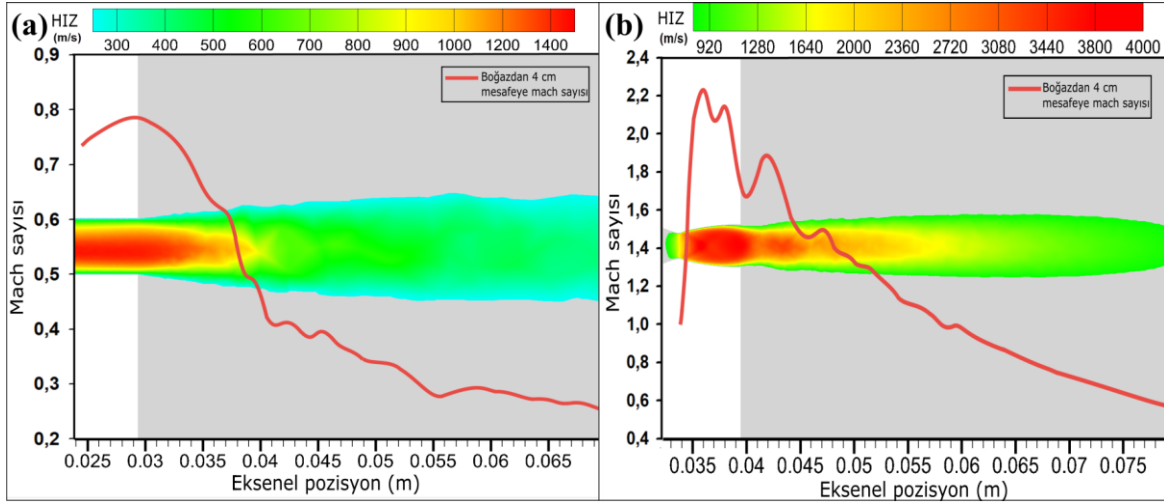
Şekil 5.23. Tabanca çıkışından belirli mesafelerde, YTG, YD ve DG geometriler için a) sıcaklık ve b) hız değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.24'te nozul boğazından 4 cm mesafeye kadar eksenel mesafede 1000 noktadan alınmış verilerle oluşturulan Mach sayısı (M) değişim grafikleri verilmiştir. Buna göre DG-2 geometrisi 4 cm mesafede en iyi sonucu veren geometridir. YD-3 geometrisi Mach değeri çıkışta yaklaşık 1,7'ye ulaşmış sonrasında hızlı bir düşüş göstermiştir. Daralan geometri etkisiyle hızlandırılan gaz atmosfere çıkınca ani genişlemiş ve kazandığı enerjiyi hızlı bir şekilde yitirmiştir. Çıkıştan 4 cm mesafede Mach değeri YTG geometrisi için 0,24, DG-2 geometrisi için 0,52 olarak gerçekleşmiştir.



Şekil 5.24. Tabanca çıkışından belirli mesafelerde, YTG, YD ve DG geometrileri için sıcaklık ve Mach sayısı değerlerinin karşılaştırılması

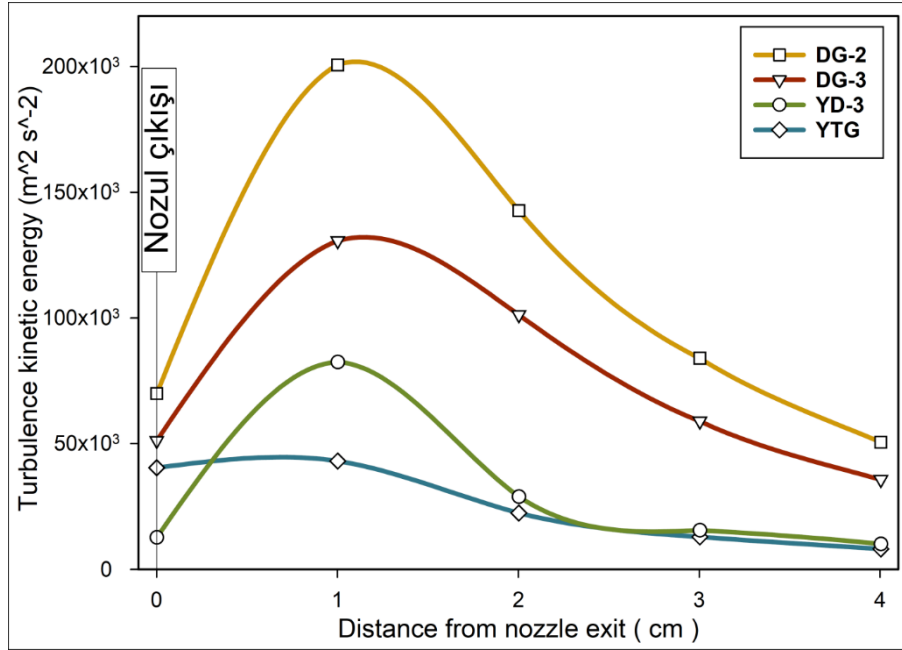
Şekil 5.25'te en yüksek ve en düşük sonuçların elde edildiği YTG ve DG-2 geometrileri için M değerlerinin değişimi ile hız değerlerinin dağılımının nasıl etkilendiği ile ilgili grafik yer almaktadır. Özellikle DG-2 geometrisi için M değerleri eğrisi incelendiğinde dalgalanmalara bağlı olarak süpersonik nozullarda karşılaşılan bir durum olan Mach diskleri görülmektedir. PA işlemi için DG-2 geometrisinin YTG geometrisine nispeten oldukça elverişli olduğu görülmüştür.



Şekil 5. 25. Hız dağılım görüntüsü üzerinde boğazdan 4 cm mesafeye dek Mach sayısı değişimlerinin gösterimi a) YTG geometrisi b) DG-2 geometrisi

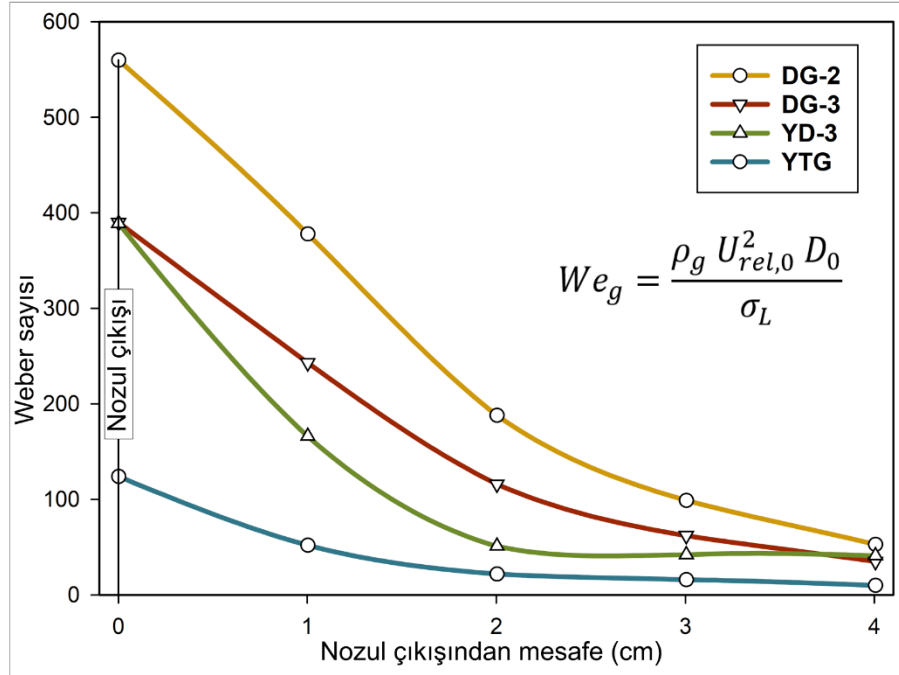
Şekil 5.26'da nozul çıkışından 4 cm mesafeye kadar türbülans kinetik enerji değişimleri görülmektedir. Türbülans kinetik enerji YTG geometrisi hariç çıkıştan 1,2 cm mesafede en yüksek değerini almaktadır ve DG-2 geometrisi diğer geometrilere nispeten en iyi sonuçları veren geometridir. YTG geometrisi değerlerinde diğer geometrilere nispeten hızlı artış görülmemiş ve 0-1 cm mesafede türbülans kinetik enerji değerlerinden neredeyse aynı sonuçlar elde edilmiştir. 2 cm mesafeden sonra YTG ve YD-3 geometriler için türbülans kinetik enerji değerleri neredeyse aynı gelişmiştir. DG-2 geometrisi için 4 cm mesafedeki değerler DG-3 geometrisine göre % 41 daha fazladır. YTG ve YD-3 geometrilerine göre ise yaklaşık 6 kat fark bulunmaktadır.

Weber sayısı (We) damlacık deformasyonunun şeklini belirleyen bir atomizasyon değişkenidir [78]. Aerodinamik kuvvetler altında ikincil atomizasyon ile damlacık çaplarını belirlemek için etkili bir parametredir. İkincil atomizasyonda, aerodinamik kuvvetler bir damlacığı deforme eder, bu kuvvetlere karşı kuvvetler ise damlacığın yüzey gerilmesidir [79,85]. Sonuç olarak aerodinamik kuvvetlerin yüzey gerilimine oranı olarak tanımlanan $Eş. 1.7$ 'ye göre hesaplanan değerlerden oluşan karşılaştırma grafiği Şekil 5.27'de gösterilmiştir. We değerinin yüksekliği daha ince parçacık boyutuna sahip toz anlamına gelmektedir. Grafikte verilen formülden We değerini artırmanın yolu hız değerlerinin artırılması ile mümkün olacaktır.



Şekil 5.26. Tabanca çıkışından belirli mesafelerde, YTG, YD ve DG geometriler için türbülans kinetik enerji değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.27 incelendiğinde mesafeye göre hızların düşmesi ile birlikte We sayısı düşmektedir. YTG geometrisi için 4 cm mesafede We sayısı 10 olarak elde edilmiştir. Bu değer YTG için 4 cm mesafede torba parçalanma modeline uygun olmayabileceği sonucunu ortaya çıkartmıştır. Torba (ing; bag breakup) parçalanması (Bölüm 2, Şekil 10-b), düşük We altında gerçekleşir. Bu tür parçalanma için minimum enerji gereklidir. Atomizasyon işleminde de en az enerji girdisi ile mümkün olan en küçük parçacık boyutlarının oluşturulması hedefi olduğundan torba parçalanması en önemli mekanizmadır. Bu yüzden başlangıcı kritik Weber sayısı (We_c) olarak adlandırılmıştır [77, 87, 91]. Çoğu çalışmada bu değer $We_c = 11 \pm 2$ olarak bildirilmiştir [37, 79, 88, 92, 93]. Öte yandan diğer geometriler kritik We'nin oldukça üzerindedir. DG-2, DG-3 ve YD-3 geometriler için 4 cm mesafedeki We sayısı sırasıyla, 53, 35 ve 41 olarak gerçekleşmiştir. Bu değerler parçalanma şeklinin çok modlu parçalanma modeline uygun olduğunu göstermektedir (Bölüm 2, Şekil 10-c).



Şekil 5.27. Tabanca çıkışından belirli mesafelerde, YTG, YD ve DG geometriler için We sayısı değerlerinin karşılaştırılması

Mach sayısı grafiği hariç Şekil 5.23 – Şekil 5.27 arasında gösterilen grafiklerin tüm değerleri Çizelge 5.5’te görüldüğü gibi özetlenmiştir.

Çizelge 5.5. Grafiklerde kullanılan verilerin beraber gösterimi

	SICAKLIK (K)				HIZ (m/s)			
(cm)	DG-2	DG-3	YD-3	YTG	DG-2	DG-3	YD-3	YTG
0	14 998	15 465	17 145	15 407	3 775	2 269	2 055	1 407
1	13 420	13 828	12 616	13 115	2 280	1 871	1 432	839
2	12 488	12 751	10 793	11 721	1 562	1 242	752	519
3	11 581	11 861	11 061	11 442	1 100	882	696	429
4	10 669	11 096	9 696	10 828	776	643	659	348
	TÜRBÜLANS KİNETİK ENERJİ (m ² /s ²)				MACH SAYISI			
(cm)	DG-2	DG-3	YD-3	YTG	DG-2	DG-3	YD-3	YTG
0	69 882	51 169	12 667	40 376	1.78	1.44	1.47	0.77
1	200 616	130 669	82 427	43 081	1.33	1.06	0.82	0.47
2	142 687	101 233	28 919	22 405	0.95	0.76	0.49	0.33
3	83 896	58 868	15 536	12 911	0.70	0.56	0.45	0.27
4	50 541	35 653	10 103	8 110	0.52	0.41	0.33	0.24

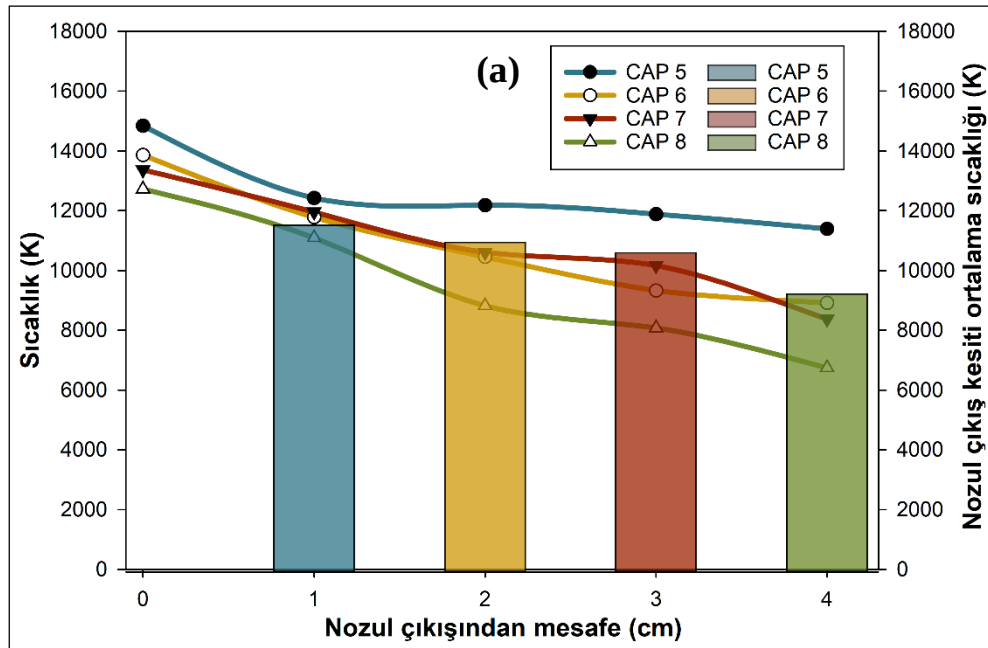
5.4.3. Çap değişimlerinin karşılaştırılması

Başlık 5.4 altındaki grafikler ve yorumlar incelendiğinde DG geometri oldukça olumlu sonuçlar vermiş bundan sonraki nozul geliştirme çalışmalarında bu geometri eklentisi ile devam edilmesi gereklilik haline gelmiştir. Fakat nozul geliştirme çalışmalarının bu aşamasında ara bir değerlendirme yapmadan, daha önce 5 mm'ye kadar çalışılan ve katot çapını büyütürken tabanca ömrünü artırmak amacıyla 5mm'de karar kılınan anot çap değerlerinin 6-7 ve 8 mm değerlerinde çalışılarak sıcaklık ve hız değerleri üzerindeki etkisinin araştırılmasına karar verilmiştir. Neden böyle bir yargıya varıldığının sebepleri/amaçları aşağıda belirtildiği gibidir.

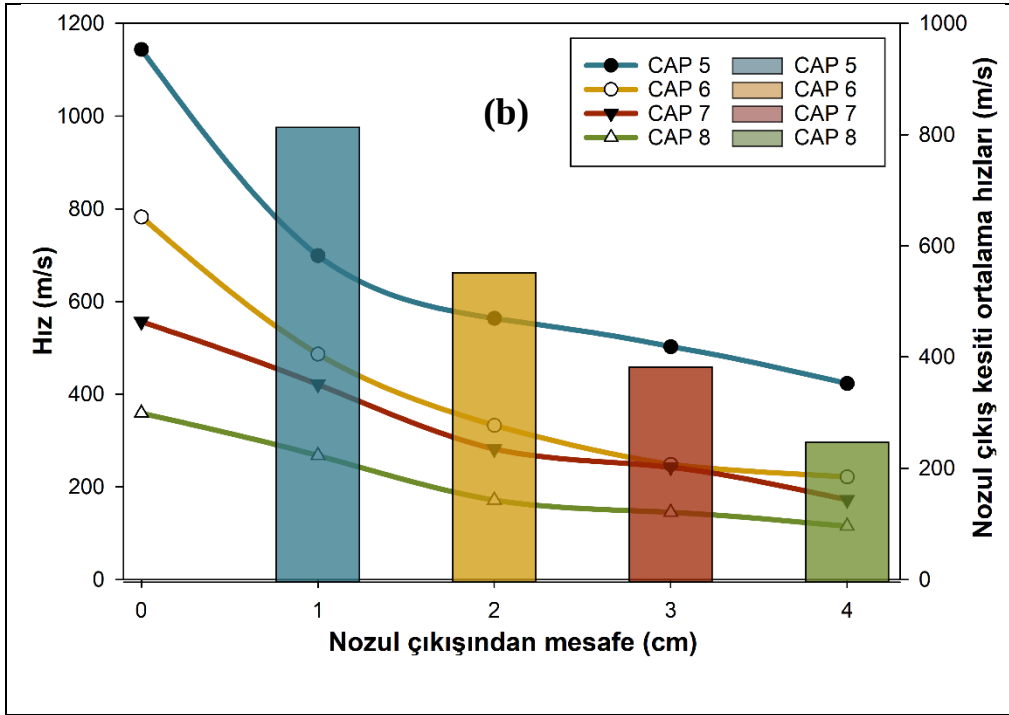
- DG nozul eklentisi ile oldukça yüksek hızlara çıkılabilmektedir. Böylece çap değerlerinde artış sonucunda hız değerlerinde yaşanan kayıplar DG nozul eklentisi ile telafi edilebilecektir.
- PA işlemi ile toz üretiminin ana ekipmanları tabancalardır. Tabancaların ömrünü ise elektrotların ömrü belirlemektedir. Anot çapının artırılması ile katot çapı da artırılarak tabanca ömrüne katkı sağlanacaktır.
- İncelenen sıcaklık dağılım görüntülerinden çap arttıkça jet çapının da arttığı tespit edilmiştir. Bu durum 3 tabancanın kullanıldığı sistemde daha yoğun sıcak bölge anlamına gelmektedir. Böylece telin maruz kaldığı sıcak bölge alanı artacak ve ergimesine katkıda bulunulacaktır.
- 5 mm anot çapına sahip bir tabancaya DG nozul eklentisi yapılması boğaz çapının 5 mm'den küçük bir çapta olacağı anlamına gelmektedir. Bu durum hıza katkı sağlamakla birlikte jet çapını ve boyunu kısaltacak PA işlemi üzerine olumsuz etkiler oluşturacaktır. Bunun için anot çapı ve boğaz çapı mümkün olduğunca büyük tutulacaktır.
- Anot çapı artırılması uygun bulunursa katot çapı da artmış olacak ve Başlık 5.3.3 Ara Değerlendirme 2 altında gösterilen katot aşınması daha da azaltılmış olacaktır. Katotun erozyonuna sebep olan birçok mekanizma bulunmasına rağmen bunların başında difüzyon ve buharlaşma gelmektedir [157], [225]. Katot, tungstenin içerisindeki toryum ilavesinin buharlaşması ve difüzyona uğraması nedeniyle aşınır [15] ve bu erozyon daha düşük bir plazma akış hızına yol açar [187] . Elektrik arkı dolayısıyla oluşan yüksek sıcaklıklar katot malzemesinin yüzey morfolojisini bozarak erozyonuna sebep olmaktadır. Buna ek olarak çoğu durumda eriyen katot malzemesinin yüksek gaz akışı tarafından uzaklaştırılması da katotun erozyonuna sebep olmaktadır [157], [225]. Katot

çapının büyütülmesi ve ucunun yuvarlatılması tabanca ömrü ve erezyonu geciktirme açısından faydalıdır.

Şekil 5.28’de farklı anot çapları için yapılan analizler sonucunda elde edilen verilerden oluşan grafikler yer almaktadır. Grafiklerin sol taraf ölçeği çizgi grafiklerinin değerlerini, sağ taraf ölçeği ise çubuk grafiklerinin değerlerini göstermektedir. Buna göre hız değerlerindeki düşüş çap artışı ile birlikte olmaktadır. Nozul çıkışı ortalama hız değerlerinde 5 mm ile 8 mm çap arasında 3,25 kat fark bulunmaktadır. Nozul çıkışından 3 mm mesafeye göre değerlendirildiğinde de benzer bir fark bulunmaktadır. Bu durum 5 mm’den büyük çapta karar kılınırsa DG nozul eklentisi ile telafi edilmelidir. Nozul çıkış kesiti ortalama sıcaklık değerleri plazma durumundan elde edilen sıcaklıklar dikkate alındığında birbirine yakın sonuçlar ortaya çıkarmıştır. Önceki sonuçlar akım değerinin artmasıyla sıcaklık değerlerinin de arttığı şeklinde sonuçlanmıştır. Burada meydana gelen sıcaklık düşüşlerinin sebebi katot çapının artması dolayısıyla azalan akım yoğunluğu değeridir (A/m^2). Akım yoğunluğundaki azalma ile sıcaklık değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. Mesafelere göre değerlendirildiğinde ise 3 cm mesafe de 5mm çapındaki nozul ile 11 919 K, 8 mm çapındaki nozulda 8 131 K sıcaklık elde edilmiştir. Bu fark Ti-6Al-4V telin ergime sıcaklığı ve 3 adet tabanca kullanılacak olması dolayısıyla önemsiz gözükmemektedir.

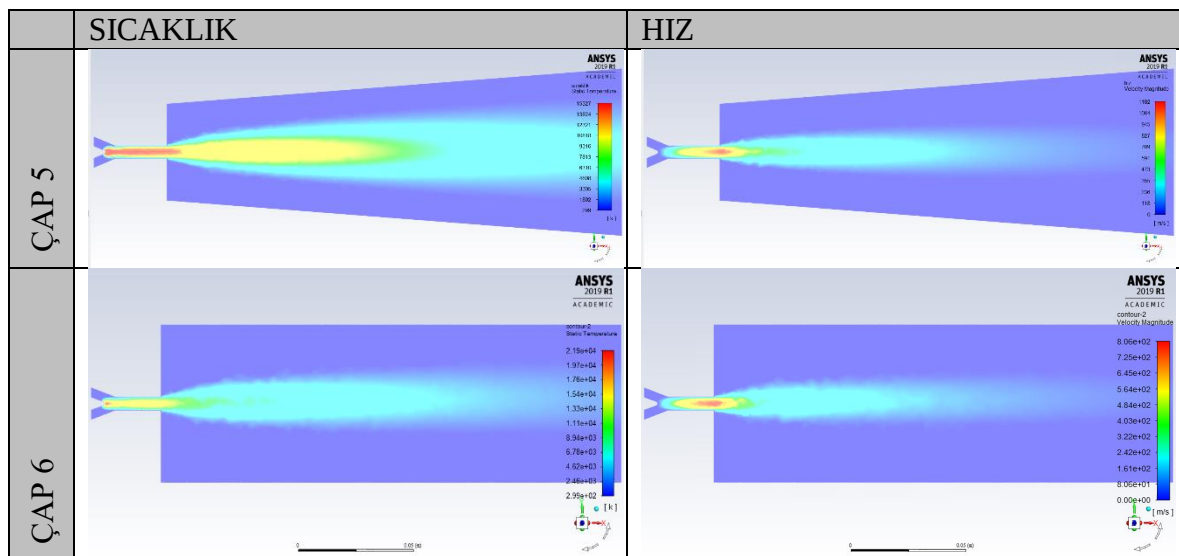


Şekil 5.28. Farklı anot çapları ortalama a) sıcaklık değerleri ile nozul çıkışından eksenel mesafelerdeki sıcaklık değerlerinin b) ve hız değerleri ile nozul çıkışından eksenel mesafelerdeki hız değerlerinin karşılaştırılması

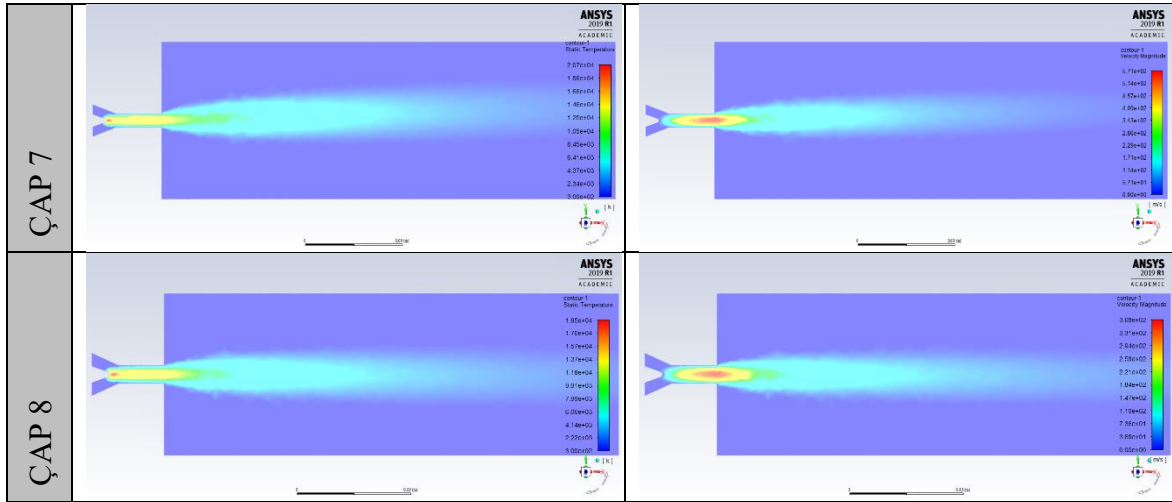


Şekil 5.28. (devam) Farklı anot çapları ortalama a) sıcaklık değerleri ile nozul çıkışından aksel mesafelerdeki sıcaklık değerlerinin b) ve hız değerleri ile nozul çıkışından aksel mesafelerdeki hız değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.29’da farklı anot çapları için sıcaklık ve hız dağılımları yer almaktadır. Sıcaklık dağılımları incelendiğinde çap değerlerinde meydana gelen artış ile jet çapının arttığı görülmektedir. Çap 5 mm için kırmızı bölge farkı ölçek farklılığından kaynaklanmıştır. Ayrıca Şekil 5.29’da verilen dağılım örneklerinin büyütülmüş hali Ek-6’da gösterilmiştir.



Şekil 5. 29. Farklı anot çapları için sıcaklık ve hız dağılımları

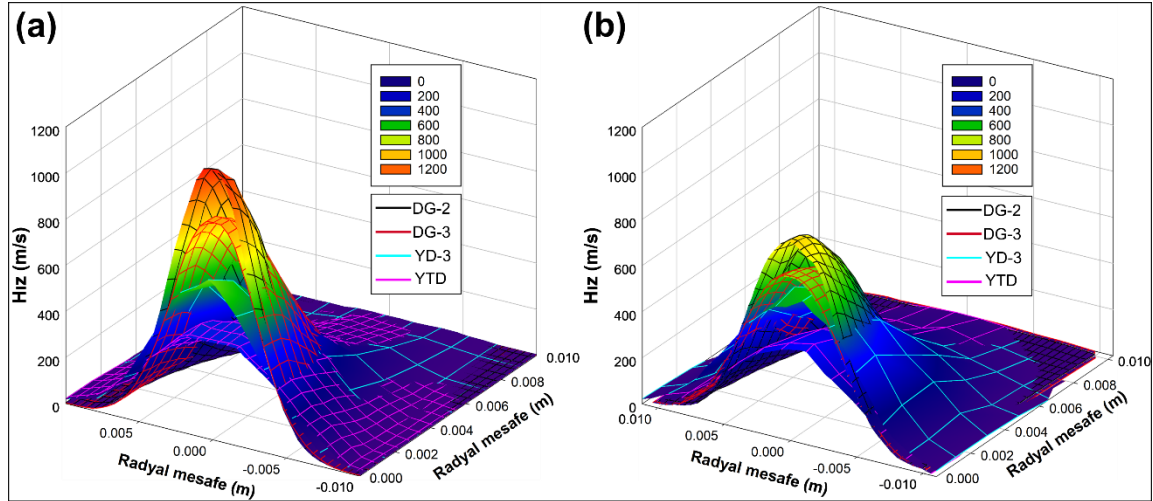


Şekil 5.29. (devam) Farklı anot çapları için sıcaklık ve hız dağılımları

5.4.4. Ara değerlendirme 3

Model 2'den farklı olarak geometri değişimleri etkisinin tabanca dışında plazma jetinin sıcaklık ve hız değerleri açısından nasıl etkilendiğinin görülmesi amacıyla yapılan analizler sonucunda aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

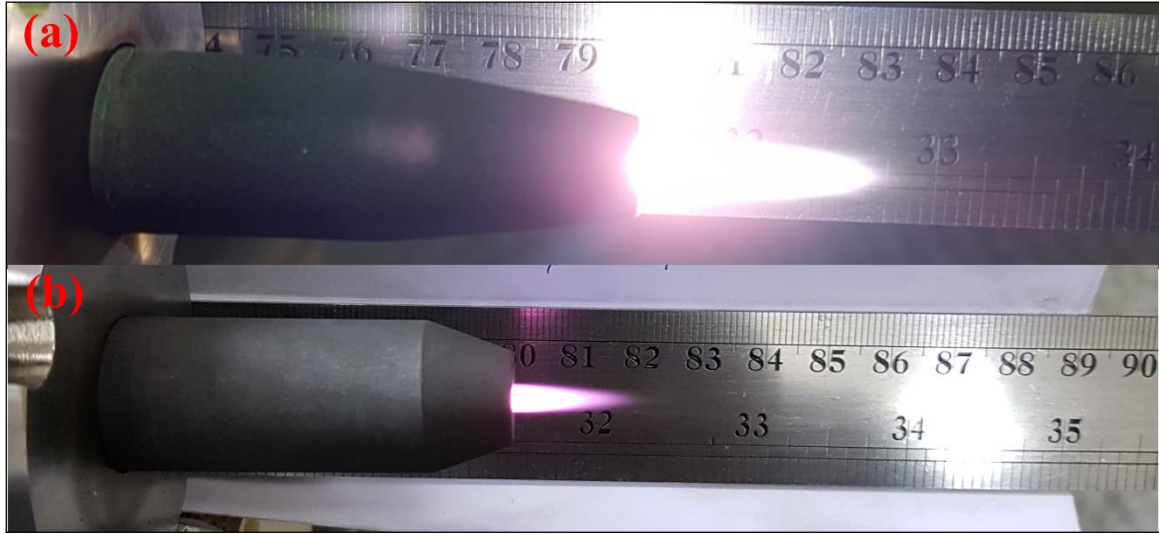
- PA işleminde tabancaların kesişim noktası ile tabanca çıkışı arasında, tabancaların fiziki büyüklüklerinden dolayı belirli bir mesafe bulunması gerekmektedir. Buna göre YTG ve DG-3 geometriler için etkin toz üretiminin gerçekleştirilebilmesi amacıyla bu mesafe en çok 2 cm, DG-2 ve DG-3 geometrileri için ise 3cm olabilir ve ne kadar kısa olursa toz üretim işleminin kolaylaşacağı düşünülmektedir. Şekil 5.30'da DG nozul eklentisinin hız değerleri üzerindeki etkisinin görülebilmesi için tabanca çıkışından 3 cm ve 4 cm mesafelerdeki radyal mesafelerdeki hız değerleri yardımıyla çizilen 3B grafik yer almaktadır. Buna göre hız profillerinin genişliği açısından değerlendirildiğinde DG-2 geometrisi en keskin, YTG geometrisi ise en yaygın olanıdır.



Şekil 5.30. Tabanca çıkışından eksenel a) 3 cm ve b) 4 cm mesafelerdeki 3B hız grafikleri

- DG nozul ilavesi ile sıcaklık ve hız değerleri tabanca dışından daha uzak mesafelere taşınabilmiştir. Bu açıdan YTG geometrisine nispeten olumlu etkileri görülmüştür. Diğer bir olumlu etkisi ise DG nozul çapı tabanca çapından çok daha küçük olduğundan kesişim noktası ile tabanca çıkışı arasındaki mesafe kısaltılabilecektir.
- Hesaplanan We sayılarına göre YTG geometrisinin 4 cm uzağı hariç tüm geometriler ve 4 cm'e kadar olan mesafeler ergiyik metali parçalayabilmek için yeterli olduğu değerlendirilmiştir.
- Çap değerlerindeki artış plazma jeti sıcaklığını artıracak fakat hızları düşürecektir. Çapın 5mm'den 8 mm'ye büyümesi tabancaların kesişim noktasındaki sıcak bölge alanını artırmıştır. Bu durumun telin ergimesine katkıda bulunacağı düşünülmektedir.

Ara değerlendirme 3 ile nozul geometri değişimlerinin tabanca dışında plazma jetinin karakterizasyonu açısından değerlendirilmiştir. Buna göre DG nozul eklentisinin yapılması tabanca çıkışı ile tel arasındaki mesafeden dolayı zorunluluktur. Bundan sonra yapılacak sayısal modelleme çalışmalarında nozul çapını 8 mm'ye çıkartarak sıcak bölge yoğunluğu artırılması bu sayede telin ergimesine katkıda bulunulmasına, hız değerlerindeki düşüşü telafi etmek ve teli parçalayabilmek amacıyla ise DG nozul ilavesi yapılarak hız değerlerinin artırılmasına karar verilmiştir. Ayrıca DG eklentisinin mümkün olduğunca tabancaların kesişim noktasına yaklaştırılması için geometri değişikliğine gidilmesine karar verilmiştir. Nitekim bu kararların doğruluğu başlangıçta gerçekleştirilen test görüntüleri üzerinden ispatlanmıştır. Test görüntülerine ait fotoğraflar Şekil 5.31'de yer almaktadır. Çalışma parametresi 300 A 70 SLPM'dir. Aralarında geometri farkları bulunmaktadır.



Şekil 5.31. Ara değerlendirme sonucu verilen kararların deneysel görüntüler ile doğrulanması a) karar verilen geometri için, b) önceki geometri için

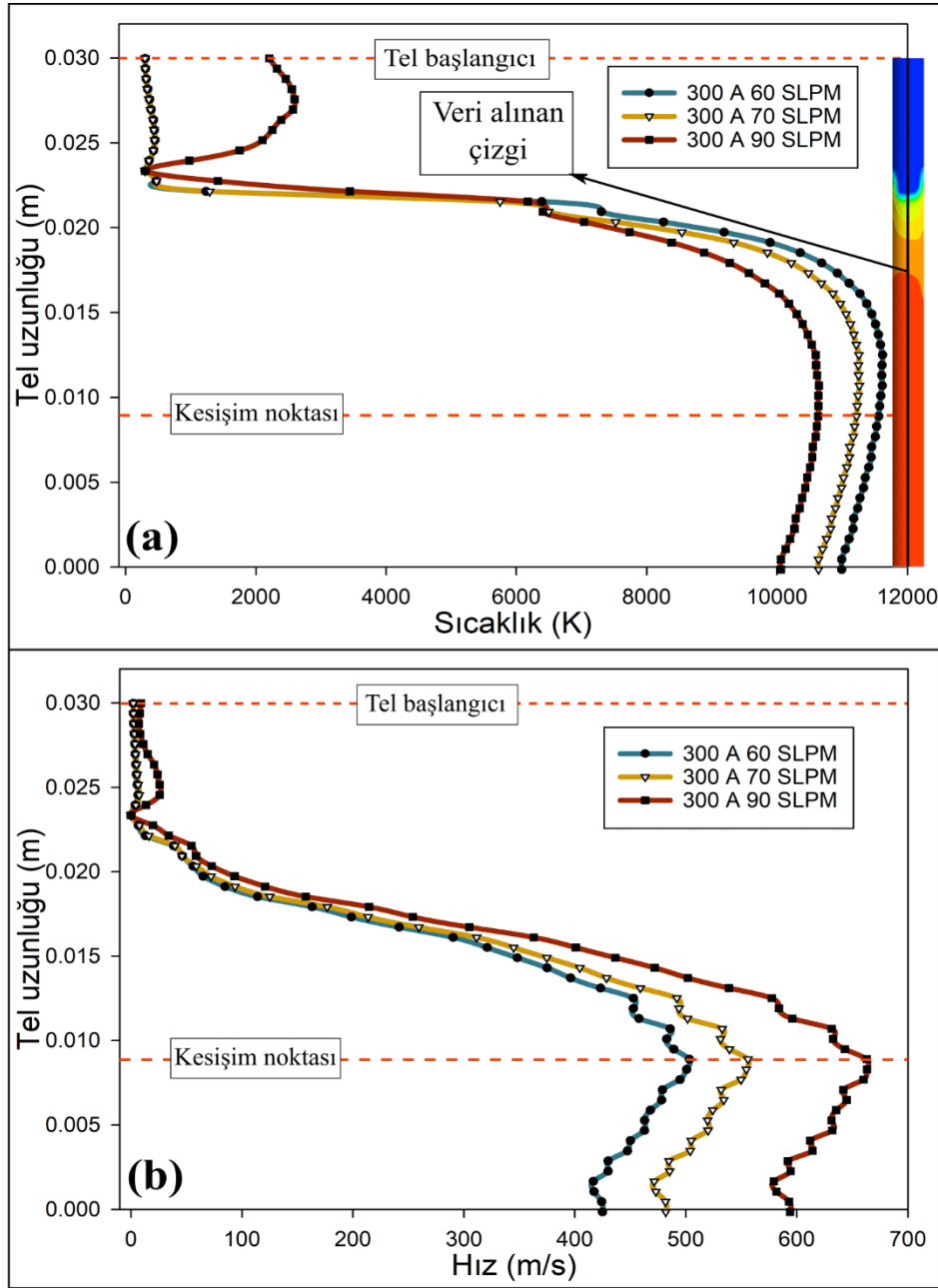
5.5. Modelleme Çalışması; Tel Ekli Geometri İçin Nozul Dışı Çalışma Bulguları

Tel ekli geometriye ait sınır şartları Bölüm 4’te verilmiştir. Ara Değerlendirme 1 başlığından itibaren geliştirilen nozul geometrileri, çap artırımını, yeni nozul geometrisi ve telin eklenmesi ile deneysel çalışmalara rehberlik edecek şekle dönüştürülmüştür. Nozul boğazından tele kadar ve tel üzerinden alınan sıcaklık ile hız değerleri karşılaştırılmıştır. Analizler, tabancaların kesişim noktasından yaklaşık 10 mm aşağısına tel sürüldüğü ve tabancaların ateşlendiği durum için yapılmıştır.

5.5.1. Tel üzerinden alınan verilerin karşılaştırılması

Önceki değerlendirmelerden elde edilen verilerin değerlendirilmesi sonucundan 3 adet çalışma şartları belirlenmiştir. Akım değeri olarak 300 A sabit tutularak 60, 70 ve 90 SLPM hacimsel debi değerlerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Tel başlangıcından bitişine kadar olan mesafe 30 mm’dir. Şekil 5.32’de tel üzerinden alınan verilerle çizilen sıcaklık ve hız değerlerinin karşılaştırılması bulunmaktadır. Buna göre hız değerleri incelendiğinde en yüksek değerler kesişim noktasında oluşmuştur. Sıcaklık değerlerinde ise durum farklı olup en yüksek sıcaklıklar kesişim noktasının yaklaşık 10 mm yukarısında meydana gelmiştir. Bu sonuç uygun bir tel hızının seçilmediği takdirde kesişim noktasında elde edilecek tozlardan daha kaba toz boyutuna sahip tozların üretileceğini göstermiştir. Değişkenler açısından değerlendirildiğinde ise 300 A değeri için 90 SLPM hacimsel debi değerinde en yüksek hız sonuçları elde edilmiştir. Sıcaklık değerlerinde ise 60 SLPM hacimsel debi değeri en yüksek

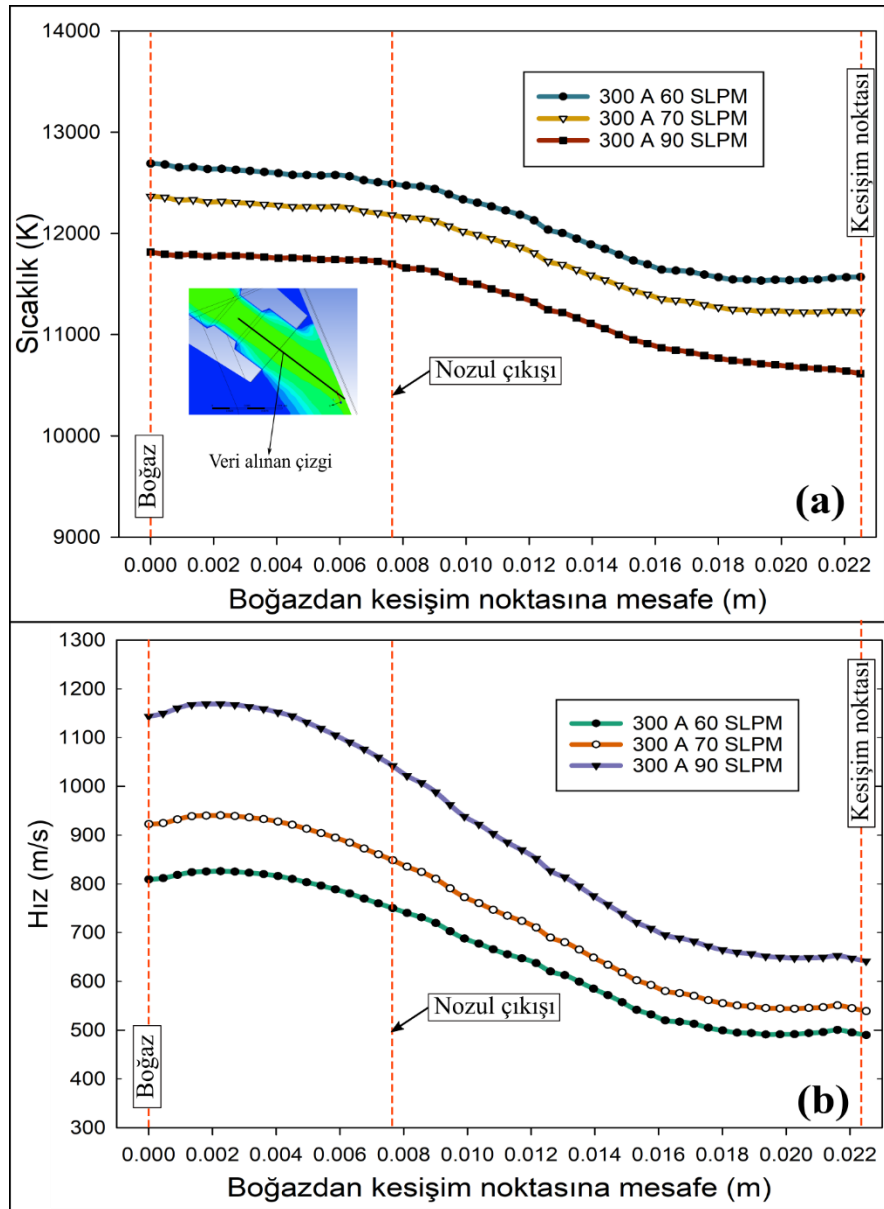
sıcaklıkların elde edildiği hacimsel debi değeri olmuştur. 60, 70 ve 90 SLPM değerlerinde yapılan analizler sonucunda kesişim noktasındaki hız değerleri sırasıyla, 489,1; 539,51 ve 643,31 m/s elde edilmiş bunlara karşılık gelen sıcaklık değerleri ise 11 575,89; 11 234,42; 10 636,32 K olarak elde edilmiştir. Bu değerler ve önceki çalışmalar yüksek sıcaklık istenilen plazma uygulamalarında yüksek amper ve düşük debi değerinin kullanılmasının daha uygun olacağını göstermiştir.



Şekil 5.32. Tel üzerinden alınan veriler ile çizilen a) sıcaklık ve b) hız değerlerinin tel üzerindeki mesafelere göre karşılaştırılması

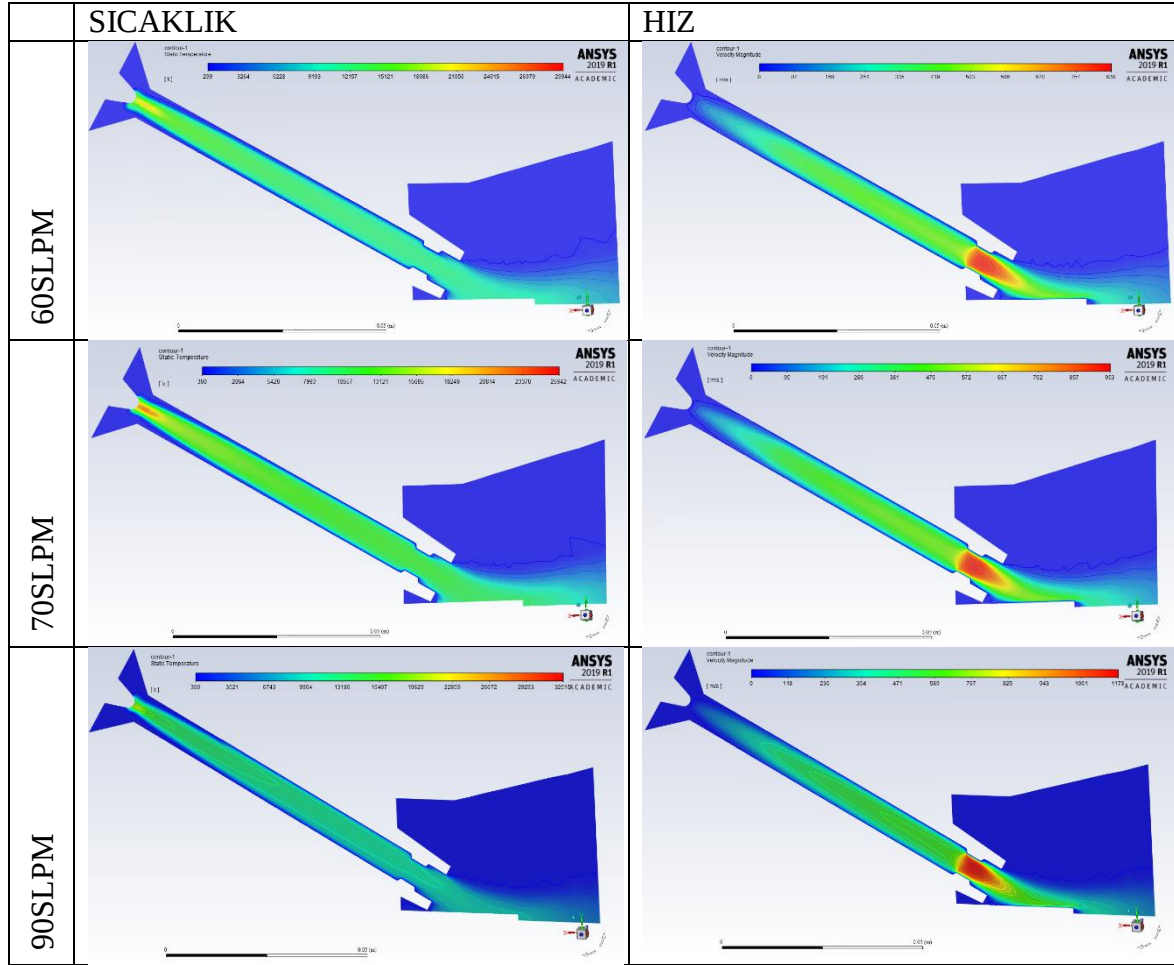
5.5.2. Nozul boğazından kesişim noktasına kadar alınan verilerin karşılaştırılması

Şekil 5.33'te hızlandırıcı nozulun en dar kısmı olan boğaz içerisinden kesişim noktasına kadar bir çizgi üzerinden alınan verilerle çizilmiş sıcaklık ve hız değer grafikleri yer almaktadır. Buna göre nozul çıkışından itibaren sıcaklık değerlerindeki düşüş telin ergime sıcaklığı ve plazma ile elde edilen yüksek sıcaklıklar düşünüldüğünde önemsenmeyecek değerdedir. Hız değerlerindeki düşüş nispeten daha dikkat çekicidir. 60, 70 ve 90 SLPM hacimsel debi değerlerinde nozul çıkışı ve kesişim noktası hız değerleri arasında sırasıyla % 35; % 37; % 39 azalma gerçekleşmiştir.



Şekil 5.33. Nozul boğazından kesişim noktasına kadar alınan veriler ile sıcaklık ve hız değerlerinin karşılaştırılması

Şekil 5.34'te analizleri gerçekleştirilen çalışma şartlarında sıcaklık ve hız dağılımları verilmiştir. Buna göre en yüksek sıcaklıklar katot ucuna çok yakın mesafelerde oluşmuştur. En yüksek 25 000 K ile 32 000 K arasında sıcaklık meydana gelmiştir. Hız değerleri boğaz kısmında en yüksek değerine ulaşmıştır. Hız değerleri en yüksek 838 m/s – 1 178 m/s arasında gerçekleşmiştir.



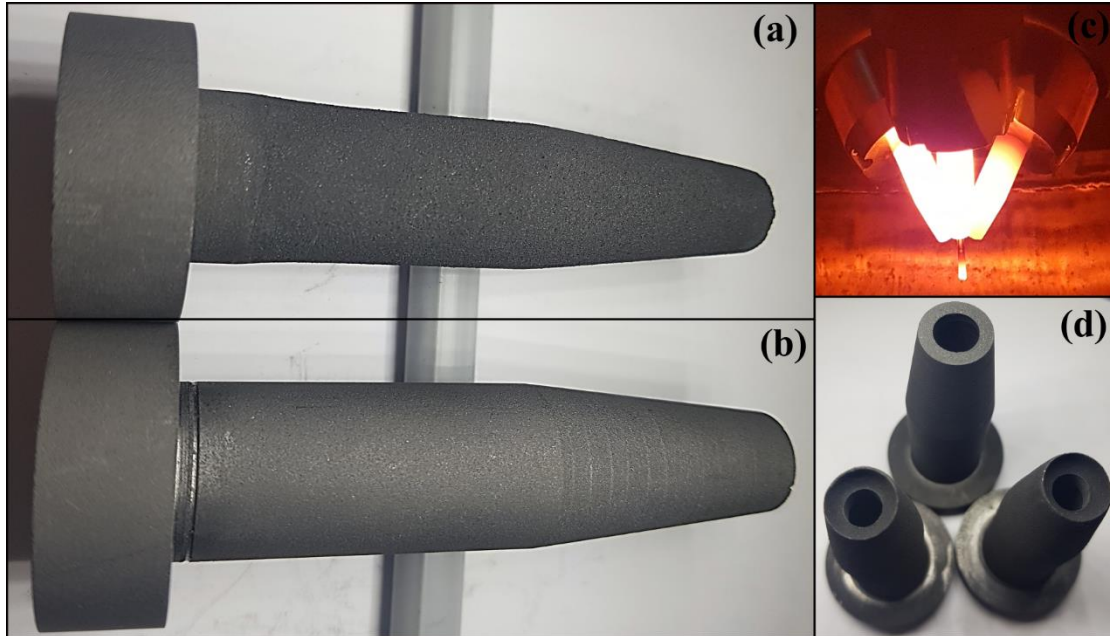
Şekil 5.34. 300 A akım değerinde 60, 70 ve 90 SLPM hacimsel debi değerleri için sıcaklık ve hız dağılımları

5.5.3. Deneysel çalışmalara geçiş değerlendirmesi

Deneysel çalışmalara referans olarak modellenen nihai nozul geometrisi ile yapılan analizler sonucunda aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

- 3 analiz sonucuna göre sıcaklığın etkin olduğu bir çalışma için 300 A 60 SLPM parametresinin, hız değerlerinin etkili olduğu bir çalışma yapmak için ise 300 A 90 SLPM parametresinin uygun olacağı değerlendirilmiştir.

- Şekil 5.32’de yer alan grafiğe göre elde edilen sıcaklık değerleri telin, kesişim noktasına ulaşmadan ergimeye başlayacağı anlamına gelmektedir. Oluşan sıcaklıklar ergime sıcaklığının üzerindedir. Hız değerleri ise kesişim noktasında en yüksek değerindedir. İnce toz boyutuna sahip tozlar üretilebilmesi için parçalanmanın mümkün olduğunca en yüksek hız değerlerinde yapılması gereklidir. Buna göre uygun bir tel hızı seçildiğinde ergime ve atomizasyon işlemleri kesişim noktasında eş zamanlı gerçekleşeceği ve ince toz boyutuna sahip tozların elde edileceği çıkarımında bulunulmuştur.
- Önceki başlıklar altında incelenen daralan genişleyen geometri ile mevcut geometri arasında geometri farkı bulunmaktadır. Plazma durumu ile elde edilen yüksek sıcaklık ve hız değerleri grafitten imal edilen nozulu çok kısa sürede aşındırmakta ve geometrik toleransların ötesine taşımaktadır. Bu durum nozul eklentisinin sesüstü nozul olma özelliğini yitirmesine sebep olmakta ve optimum çalışma koşulları kısa sürede değişmektedir. Bu durumun deneysel olarak gözlenmesi sonucu elde edilen görüntülerden Şekil 5.35’te grafit eklentinin aşınma görüntüleri bulunmaktadır. Yeni geliştirilen nozul sayesinde üretimi daha kolay ve hassas toleranslar içermeyen geometri tercih edilmiştir.

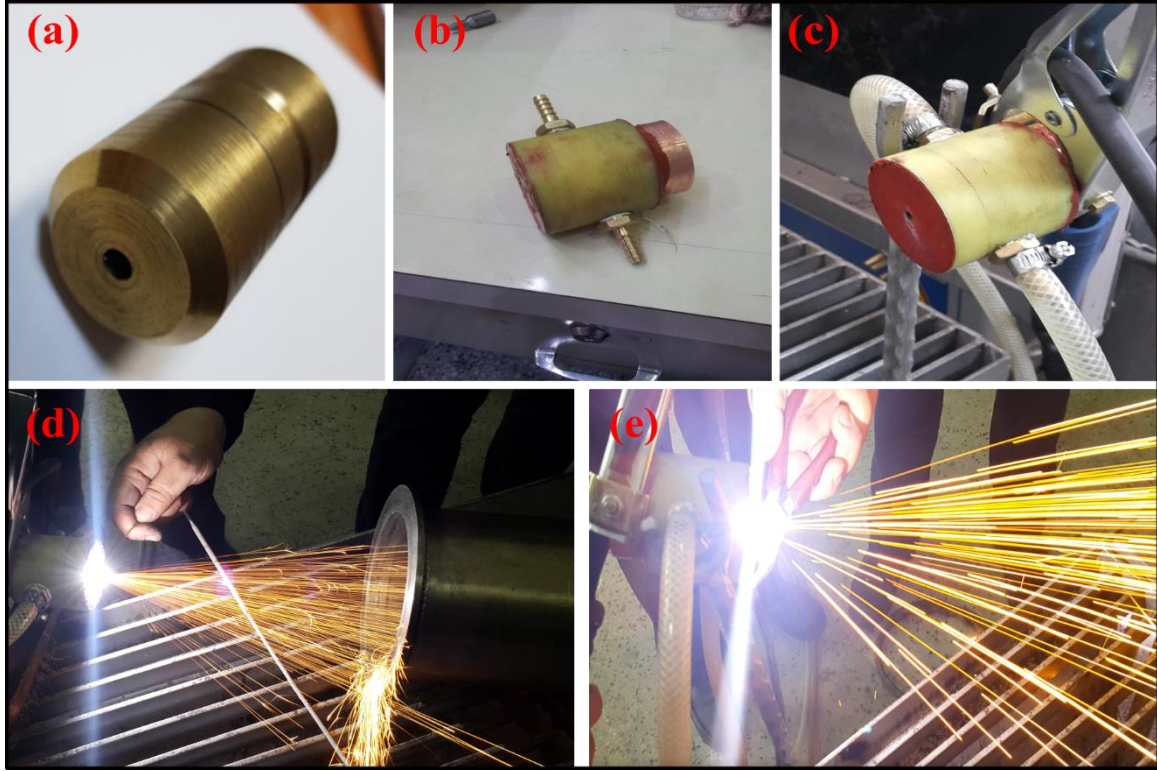


Şekil 5.35. Hızlandırıcı nozul görüntüleri a) aşınmış durum b) çalışma öncesi hali, c) çalışmanın hemen sonrasındaki durum, d) uç kısımlarındaki aşınmalar ile ilk hali karşılaştırması

Yukarıdaki değerlendirmeler ve analizler sonucunda atomizasyon işlemi için hız değerleri daha önemli olduğundan 300 A 90 SLPM değerinin ana deneysel parametre olarak belirlenmesine karar verilmiştir.

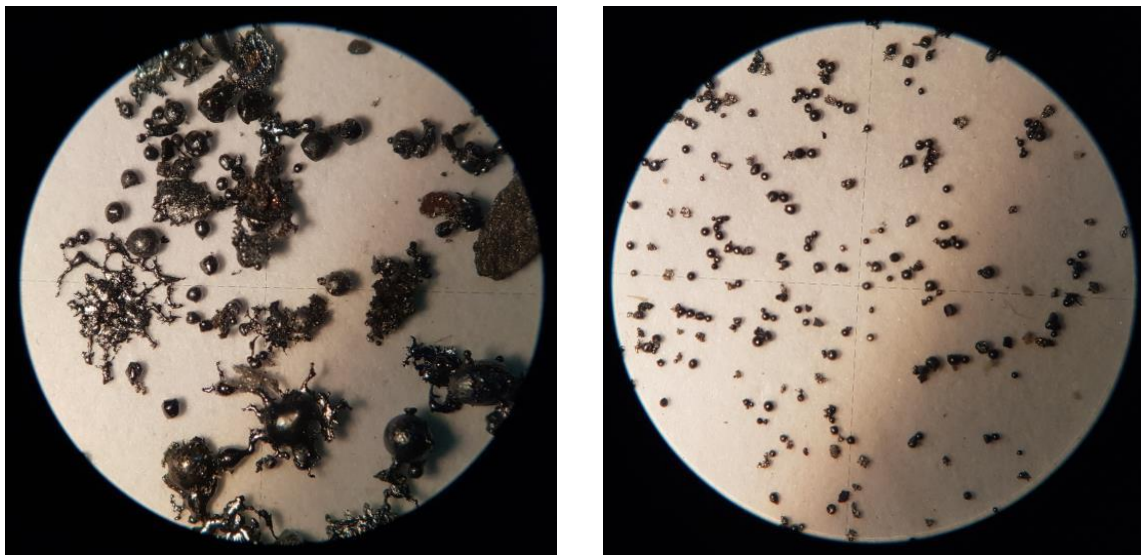
5.6. Deneysel Çalışma; Prototip Tabanca İle Toz Üretim Bulguları

Sayısal modelleme çalışmaları (Model 1)'den sonra değişkenlerin etkinliğinin araştırılması ve tabanca tasarımına başlanmadan önceliklerin belirlenmesi amacıyla prototip model oluşturma çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca toz üretimi ile ilgili mevcut literatür tozların hazır alınıp test edilmesine yöneliktir. Yararlanılan patent çalışmaları ise dünya üzerindeki eklemeli imalat makinalarının mevcut toz ihtiyacını karşılayabilmek için yüksek maliyet gerektiren sistemleri tarif etmektedir. Örneğin referans [294] ve [98]'de tabanca başına 25-30 kW değerinde güç kullanılarak üretim yapıldığı anlatılmaktadır. Prototip çalışması ile yukarıda amaçlanan düşüncelere ek olarak daha düşük güç değerlerinde toz üretilip üretilmeyeceği de araştırılmıştır. Şekil 5.36'da üretilen prototip modellerden ve üretim anından gerçek görünüm yer almaktadır. Şekil 5.35-a'da görülen nozul pirinç malzemeden yapılmış olup ölçüleri Model 1 geometrisi ile aynıdır. Model su soğutmasız olarak yapılmıştır. Anot ve katot kısa sürede erezyona uğramıştır. Şekil 5.36-b'de yer alan model su soğutmalı olarak iki parça şeklinde imal edilmiştir. Şekil 5.36-d çelik tozu üretiminden bir görüntüyü Şekil 5.36-e'de ise daha yüksek ergime sıcaklığına sahip tungsten tozu üretiminden bir görüntüyü ifade etmektedir. Bu tozlar 3 bar argon gazı ve yaklaşık 5 kW güç kullanılarak atmosfer şartlarında üretilmiştir.



Şekil 5.36. Prototip çalışmasından görüntüler a) su soğutmasız nozul, b) su soğutmalı nozul c) montaj edilmiş hali d) çelik tozu üretimi e) tungsten tozu üretimi

Şekil 5.37’de üretimi gerçekleştirilen çelik tozları kesici takım aşınmalarının gözlemlendiği mikroskop yardımı ile görüntülenmiştir. Bu tozlar 125 mikron elek açıklığına sahip elekten geçebilen ve geçemeyen tozlardır. Tozların büyük çoğunluğu 80 mikron altı olarak elde edilmiş ve şekillerinin küresele yakın olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5.37. Prototip tabanca ile toz üretiminden elde edilen tozlara ait genel değerlendirme görüntüsü

5.6.1. Ara değerlendirme 5

Prototip tabanca çalışması başlığı altında verilen şekillerin incelenmesi ve deneysel çalışma sırasında gözlenen durumlara göre Model 1 geometrisi ile düşük gler ve basınç değerlerinde de toz üretimi geekleştirilebilmiştir. Yapılan değerlendirmeler aşağıda sıralanmıştır.

- Parametreleri etkin belirlenmiş, uygun geometriye sahip ve hızlandırılmış plazma jetine sahip tabancalar ile yüksek güç değerlerine ıkılmaksızın iyi parçacık boyutuna sahip tozların üretilmesi mümkündür. Bu bilgi, seri üretim yerine, araştırma amaçlı kesikli üretim yapılacak bilimsel projeler için önemlidir. Yüksek güç değerleri bilimsel olarak alışlamayacak düzeyde maliyet gerektirmektedir.
- PA sisteminin başlıca elemanı olan plazma tabancalarının tasarımında anot ve katot soğutma sistemlerinin dikkate alınması zorunluluk arz etmektedir.
- Elektrotlar etkin bir şekilde soğutulurken anot ve katot arasındaki yalıtım görevi plastik esaslı çeşitli malzemeler ile geekleştirilebilir. Bu malzemelerde aranan özellik yüksek ergime sıcaklığı ve elektriksel yalıtkanlıktır. İncelenen literatür bu malzemelerin floroplastik (Teflon[®] , Vespel[®]), yüksek saflıkta bor nitrür (*ing.* Boron nitride) ve alüminyum oksit (Al_2O_3) olduğunu bildirmektedir [142, 157, 213, 248].
- Kesişim noktasına hedeflenecek olan plazma tabancalarının mümkün olduğunca küçük çapta olması, tel ile tabanca çıkışı arasındaki mesafeyi kısaltacağından ve telin daha yüksek sıcaklık ile hız değerleriyle buluşmasını sağlayarak atomize edeceğinden önemlidir.

Bu değerlendirmeler ve sayısal modelleme çalışmaları dikkate alınarak tabanca tasarımı yapılmıştır.

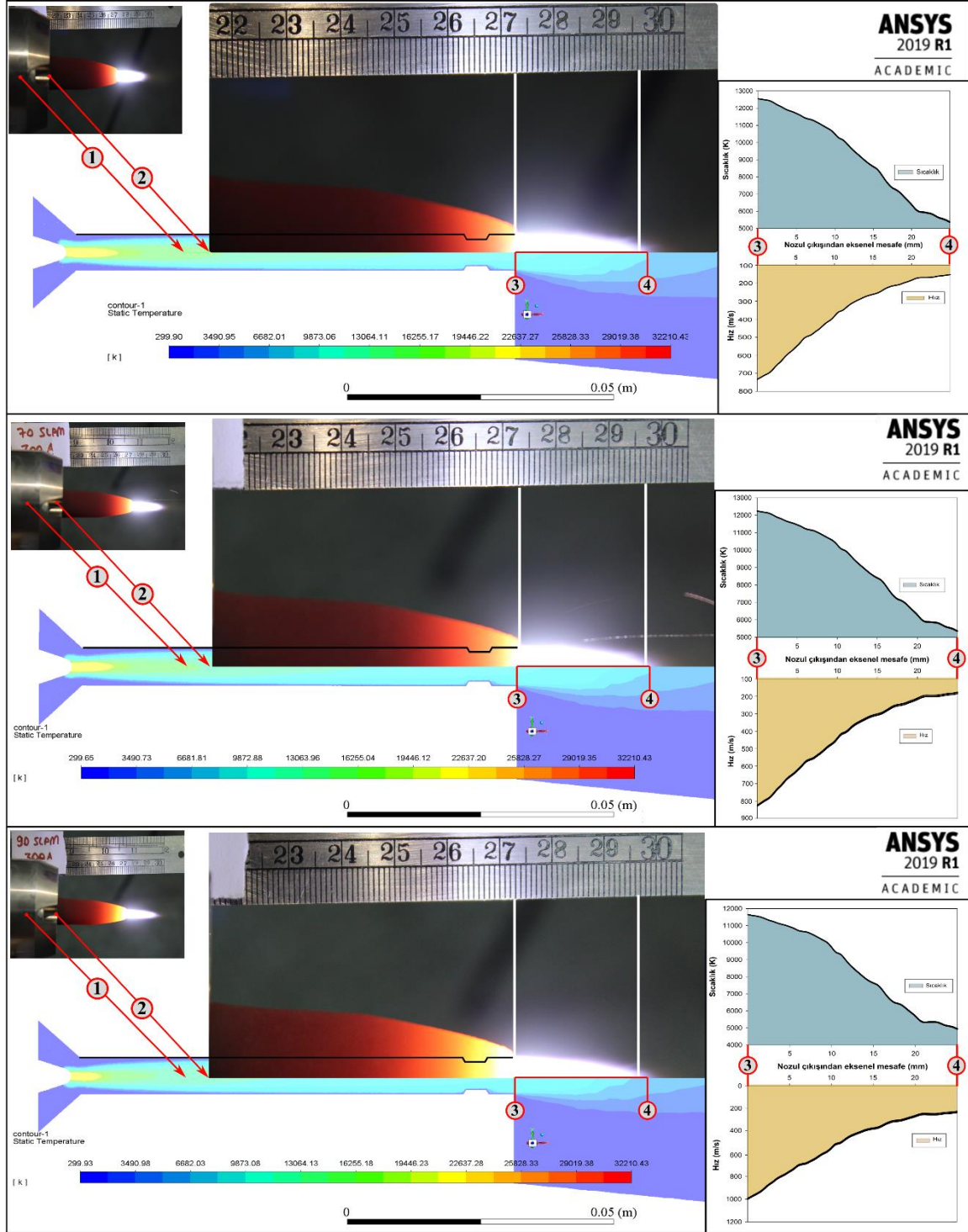
5.7. Deneysel alışma; Plazma Tabancaları İle Yapılan alışma Bulguları

Bu ana başlık altında daha önce belirlenen parametrelerde (300 A ve 60; 70; 90 SLPM) tabancaların deneysel olarak çalışılması, analizler ile karşılaştırılması, tabancaların ömrü ve üretilen tozların şekil ve mikroyapı özellikleri üzerinde etkili bir parametre olan elektrotların erezyonuna değinilecektir.

5.7.1. Parametre değişiminin plazma jeti üzerindeki etkisi

Plazma tabancalarından elde edilen yüksek sıcaklık ve hız değerlerinin ölçümü bilinen yöntemler ile mümkün değildir. Plazma jeti çıkış sıcaklıkları 10 000 K ve üzerindedir. Benzer bir durum hız değerleri için de geçerlidir. Şekil 5.38’de analiz sonuçlarının güvenilirliğinin belirlenmesi amacıyla tabancalar 300 A sabit tutularak 60,70 ve 90 SLPM değerlerinde bireysel olarak çalıştırılmış ve analizden elde edilen sıcaklık görüntüleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma işlemi yapılırken 60 SLPM için sıcaklık dağılım ölçeğinde yer alan en düşük (299,9 K) ve en yüksek sıcaklık (32 310,43 K) değeri, 70 ve 90 SLPM için uygulanmıştır. Tüm ölçüler bilindiğinden, ortaya çıkan sıcaklık dağılım grafiği ile tabancanın gerçek çalışma görüntüsü ölçülü olarak karşılaştırılmıştır. Şekil 5.38’deki 1 numara anodun bittiği/hızlandırıcı nozulun başladığı yeri, 2 numara ise soğutma haznesinden hızlandırıcı nozulun çıktığı yeri ifade etmektedir. Ayrıca renk dağılımında geniş bir alan olarak görülen jet karşılaştırma bölgesindeki sıcaklık ve hız değerlerinin daha iyi anlaşılabilmesi için tabancanın çıkış ekseninde 25 mm’lik bir çizgi üzerinden sıcaklık ve hız değerleri analizden alınmış ve grafikleştirilmiştir. Şekil 5.38’deki 3 ve 4 numara sırasıyla bu çizginin başladığı ve bittiği yeri ifade etmektedir. 3 ve 4 numara aynı şekilde sıcaklık ve hız grafikleri üzerinde de gösterilmiştir.

Şekil 5.38’de yer alan yaklaşım ile plazma jetinin gözle görülebilen boyu ile analiz sonuçlarından elde edilen dağılım grafiklerinin hemen hemen birbiri ile karşılaştığı tespit edilmiştir. Özellikle 300 A 70 SLPM parametresinde yapılan karşılaştırma işleminde ölçülen jet boyu ile analizden elde edilen jet boyu birbiri ile örtüşmüştür. Hacimsel debi değişimine bağlı olarak gözle görülen jet mesafeleri tüm parametrelerde benzer şekilde yaklaşık 23 mm olarak gelişmiştir. Şekil 5.38’in sağ tarafında yer alan sıcaklık ve hız grafikleri incelendiğinde ise grafik eğiliminin yaklaşık 22 mm’den sonra değiştiiği tespit edilmiştir. Bu durum Şekil 5.38’deki yaklaşımı destekleyici bir sonuç olarak değerlendirilmiştir. Hacimsel debi değişimi ile birlikte plazma jetinin gözle görülebilen mesafeleri hemen hemen aynıdır.



Şekil 5.38. Belirli parametrelerde tabancaların bireysel çalışması sonucunda elde edilen gerçek görüntülerin analizden elde edilen sıcaklık dağılımı ile karşılaştırılması

Bu 3 değişken için plazma tabancalarından deneysel olarak ölçülen voltaj değerleri 26-30 V aralığındadır. 300 A akım değeri ile beraber değerlendirildiğinde üretilen güç değeri yaklaşık 9 kW olarak hesaplanmıştır.

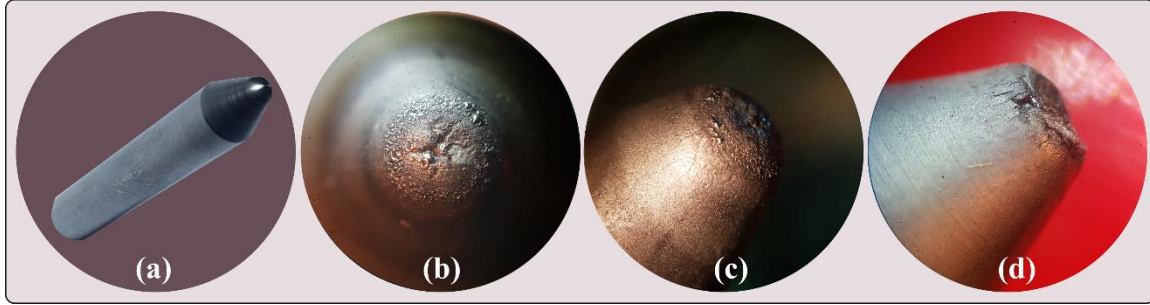
5.7.2. Elektrotların erezyonu

Plazma tabancalarının ömrü elektrotların (anot ve katot) erezyona uğrama süreleri ile yakından ilişkilidir. Örneğin uzun süren toz üretim çalışmalarında erezyona uğrayan elektrotlar tabancanın gücünde azalmaya ve toz boyutlarında değişimlere sebep olurlar. Elektrot erezyonunun başlıca sebepleri arasında etkin bir soğutma sisteminin sağlanamayışı, nozul çapına/boyuna uygun akım değerinin seçilmeyişi, uzun süren kontrolsüz çalışma ve malzeme özellikleri gelmektedir. Bu çalışmanın odak noktası toz üretimi olduğundan elektrotların erezyonu ile ilgili ne kadar sürede ne kadar aşınmanın gerçekleşeceği gibi bir deneysel veri alınmamıştır. Reaktör, koruyucu ortamda olduğundan belirli sürelerde tabancaların yerinden çıkartılıp sökülmesi bu ortamın bozulmasına ve fazladan gaz sarfiyatına sebep olacaktır. Burada değinilmesinin sebebi ise plazma atomizasyon yöntemi ile toz üretiminin çok sayıda değişkeninden biri olmasındandır. Elektrotlardan erezyon görüntüleri verilerek sebeplerine ve toz üretimini nasıl etkilediğine değinilmiştir.

Şekil 5.39'da üretim ve testlerde kullanılan katoda ait erezyon görüntüleri bulunmaktadır. Bu görüntülerde gösterilen katot için kullanılan değişkenler 250 A - 400 A akım değeri 60-100 SLPM hacimsel debi aralığındadır. Sürekli değil kesikli çalışmalar sonucunda toplamda 2 ve 3 saatlik çalışma sonucunda elde edilmiştir. Yüksek akım değerleri katot önündeki sıcaklığı artırdığından fazla aşınmaya sebep olmaktadır. Anoda nispeten daha küçük olan katot geometrisinde soğutma sınırlılıkları bulunmaktadır. Bu yüzden bakıra nispeten daha yüksek ergime sıcaklıklarına sahip ($T \sim 3900$ K) katkılı tungsten malzemesi ThO_2 kullanılmıştır. Bu malzeme halihazırda en genel katot malzemesidir. Mükemmel ateşleme (düşük voltaj), elektronlarını kolayca serbest bıraktığından iyi termiyonik yayılım kabiliyeti ve yüksek ergime sıcaklığı gibi özelliklerinden dolayı tercih sebebidir. Geometrik sınırlılıkları ve işlenmesi zor olduğundan etkin bir şekilde soğutulması oldukça zordur.

Katodun erezyon mekanizmalarının başında difüzyon ve buharlaşma gelmektedir. Elektrik arkı dolayısıyla oluşan yüksek sıcaklıklar Şekil 5.39'daki gibi katot malzemesinin yüzey yapısını bozarak geometri değişimlerine sebep olmaktadır. Bu duruma, yüksek hacimsel debi değerleri, eriyen katot malzemesini o bölgeden uzaklaştırarak katkı sağlamaktadır. Arkın ilk başlangıcında gerekli olan yüksek frekansta voltaj değerleri elektromanyetik basınçlara yol açmakta ve yüzey gerilim kuvvetleriyle dengelenemeyerek erezyona sebep

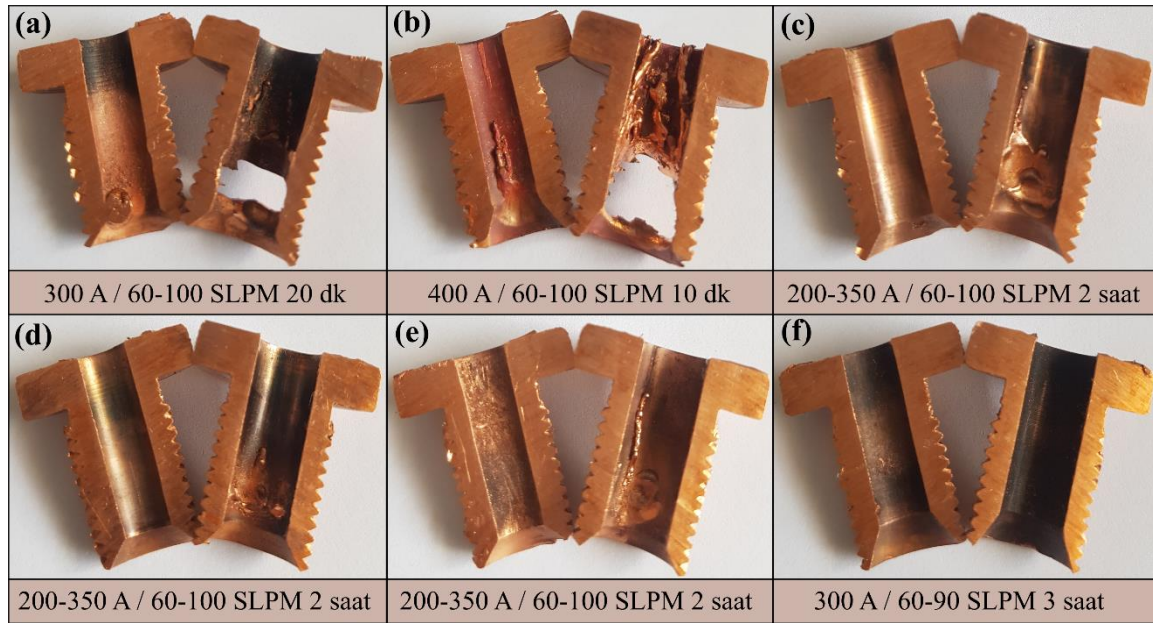
olmaktadır. Bu durumda katot aşınmasının büyük oranda ilk ateşleme sırasında meydana geldiği söylenebilir.



Şekil 5.39. Katot için a) çalışma öncesinden, b) 2 saat sonrasında ön görünüş, c) 2 saat sonrasında yan görünüş, d) 3 saat sonrasında erezyon görüntüleri

Katota benzer bir şekilde buharlaşma yoluyla erozyona uğrayan diğer elektrot ise anottur. Fakat anodun erozyon mekanizması katoda göre daha karmaşıktır. Bu karmaşıklık anodun doğrudan voltaj dalgalanmalarına ve ark kökü eklentisine maruz kaldığından kaynaklanmaktadır. Şekil 5.40'ta belirli sürelerde ve parametrelerde erezyona uğramış anot görüntüleri yer almaktadır. Burada Şekil 5.40-a 300A akım değeri 60-100 SLPM hacimsel debi değerinde 20 dk, Şekil 5.40-b 400A akım değeri 60-100 SLPM hacimsel debi değerinde 10 dk çalışma sonucu elde edilmiş görüntülerdir. Buna göre fan soğutmalı bir sistemden devirdaim edilen yalıtkan sıvı yetersiz kalmış ve anodun kısa sürede delinmesine sebep olmuştur. Bu görüntülere göre yapılan değerlendirmeler sonucunda soğutma sistemi geliştirilmiş ve erezyon azaltılmıştır. Şekil 5.40-c, Şekil 5.40-d ve Şekil 5.40-e 200-350 A akım değeri 60-100 SLPM hacimsel debi değerinde 2 saat çalışma sonrasında 3 tabancanın anotlarını göstermektedir. Görüntüler ark kökünün bir noktaya sabitlendiğini ve o nokta etrafında geliştiğini göstermesi açısından da önemlidir. Ark kökü sabitlendiği bölgede yüksek sıcaklık bölgesi geliştirmektedir. Uzun çalışma sürelerinde voltaj düşüşleri keskinleşir ve eriyen anot malzemesi gaz akış hızının da etkisiyle buharlaşma yoluyla veya yüksek debilerde buharlaşmadan tabanca dışına atılır. Şekil 5.40-c, Şekil 5.40-d ve Şekil 5.40-e'de aşınma miktarları da birbirinden farklıdır. Bu durumun oluşmasında, anot kanalının yüzey pürüzlülüğü, ark kökünün olduğu bölgedeki ergime/buharlaşma mekanizması ve katodun anot kanalına göre düşük toleranslar ile merkezlenmesinin etkili olduğu değerlendirilmiştir. Şekil 5.40-f'de 300 A akım değeri ve 60-90 SLPM hacimsel debi değerinde 3 saat çalışma sonrasındaki anot görüntüsü yer almaktadır. Geliştirilen soğutma sistemi sayesinde erezyon miktarı en aza indirilmiş ve tabanca ömrü daha uzun zamana

uzatılmıştır. Tipik olarak transfer edilmemiş bir ark plazma tabancasında, elektrik giriş gücünün yaklaşık yarısı tabanca bileşenlerine termal ısı yükü olarak gider. Katot bu ısı yükünün sadece % 1-5'ine maruz kalırken, anot, kalan ısı yükünün büyük bir bölümünü paylaşır [9]. Dolayısıyla anot, katottan daha erken aşınmaktadır ve erozyonun önlenmesi veya azaltılmasına yönelik çalışmalar anot üzerine yoğunlaşmaktadır.



Şekil 5.40. Anot için belirli parametre ve sürelerde gerçekleşen erezyon görüntüleri

Elektrotların erezyonu tabanca ömrü üzerinde etkili olduğu kadar kullanıldığı malzeme işlemlerinin kalitesi üzerinde önemli derecede etkilidir. Üç tabancanın kullanıldığı plazma atomizasyon işleminde erken erezyona uğrayan bir tabanca toz üretim işleminin simetrik bir şekilde gerçekleşmemesine ve istenilen toz boyutlarının/özelliklerinin (küresellik ve gözeneklilik gibi) elde edilememesine sebep olur. Bir diğer erezyon etkisi ise kirlilik oluşumudur. Oluşan yüksek sıcaklıklar ve ortamdaki yüksek gaz debisi elektrotlardan malzeme kaldırmakta ve buharlaştırarak veya debi etkisiyle buharlaştırmadan dışarı atılmaktadır. Bu durumda üretilen tozlar arasında elektrot parçacıkları ile karşılaşılabilir. Ayrıca ergimiş metalin üzerine kaplanmakta ve üretilen tozların bakır kaplı olmasına sebep olabilmektedir.

5.7.3. Ara değerlendirme 6

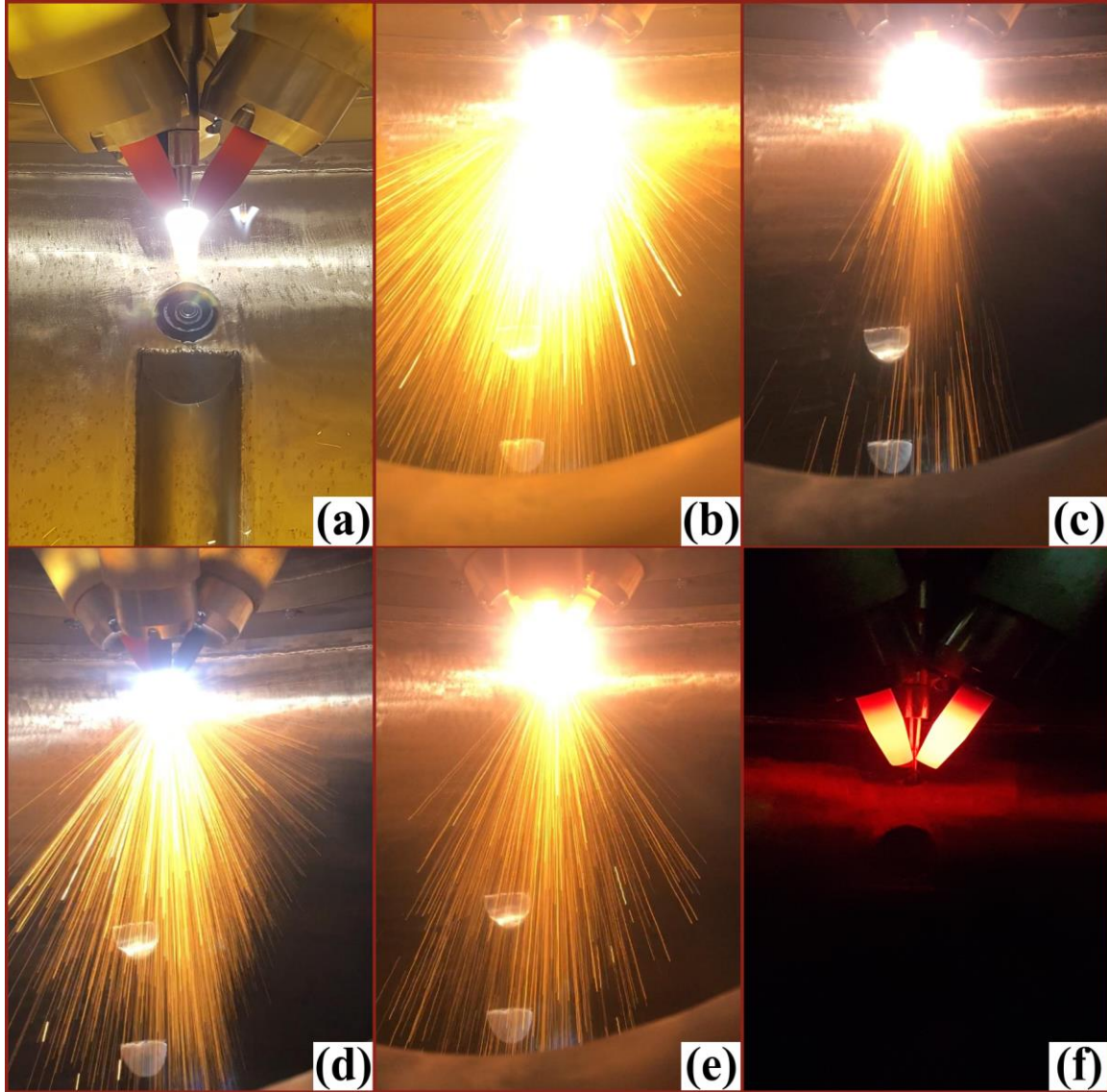
Tasarımı ve üretimi yapılan plazma tabancası ve bu tabancanın iki önemli özelliği olarak parametre değişimi ve erezyon görüntülerinden elde edilen bulgular neticesinde aşağıdaki değerlendirmeler yapılmıştır.

- Daha önceki analiz çalışmaları ile tasarlanan tabancadan elde edilen plazma jetinin karşılaştırılmasına yönelik şekilsel bir yaklaşım geliştirilmiş ve modelin güvenilirliği artırılmıştır. Buna göre 90 SLPM hacimsel debi değerinde elde edilen hız değerleriyle atomizasyon işleminin daha etkili olacağı açıktır.
- Anot aşınması katoda göre daha hızlı gelişmekte ve etkin bir soğutma sistemi gerektirmektedir.
- Plazma tabancalarında arkın izleyeceği yolun genel eğilimi bilinse de tüm parametrelerin aynı olması durumunda bile farklı plazma jetleri ve farklı erezyon durumları ortaya çıkabilmektedir. Parametrelerin aynı olmasının yanında anot kanalının yüzey pürüzlölük değerinin çok düşük olması, katodun anot kanalına göre mesafesinin sabitlenmesi ve merkezlenmesinin çalışma esnasında değişmeyecek şekilde sağlanması önemlidir.

Bu değerlendirmeler sonucunda laboratuvar ölçeğinde geliştirilen mevcut tabancaların uzun süreler kullanılabilir olması açısından toz üretim deneylerinde en yüksek 300 A akım ve 90 SLPM hacimsel debi parametrelerinin kullanılmasına karar verilmiştir.

5.8. Deneysel alışma; Toz Üretimi Sonucunda Elde Edilen Bulgular

Bu başlık altında 300 A akım ve 90 SLPM hacimsel debi parametresi kullanılarak gerçekleştirilen toz üretimine ait çeşitli karakterizasyon işlemleri hakkında bilgi verilecektir. Tozlar şekil, boyut ve mikroyapısal olarak incelenecek ve çeşitli değerlendirmelerde bulunulacaktır. Ayrıca yapılan üretime ait belirlenen bu özellikler aynı yöntemle üretilmiş farklı tozların benzer özellikleri ile karşılaştırılarak değerlendirmesi yapılacaktır. Karakterizasyon işleminin önce toz üretim sırasında çekilmiş görüntüler şekil 5.41’de gösterilmektedir. Burada dikkat edilecek nokta üretimin simetrikliğidir. Torlardan bir tanesinin verimli çalışmadığı durumlarda bu simetriklik bozulmakta ve istenilen toz özellikleri elde edilememektedir. Üretim değişkenleri 300 A akım ve 90 SLPM hacimsel debi değeridir.



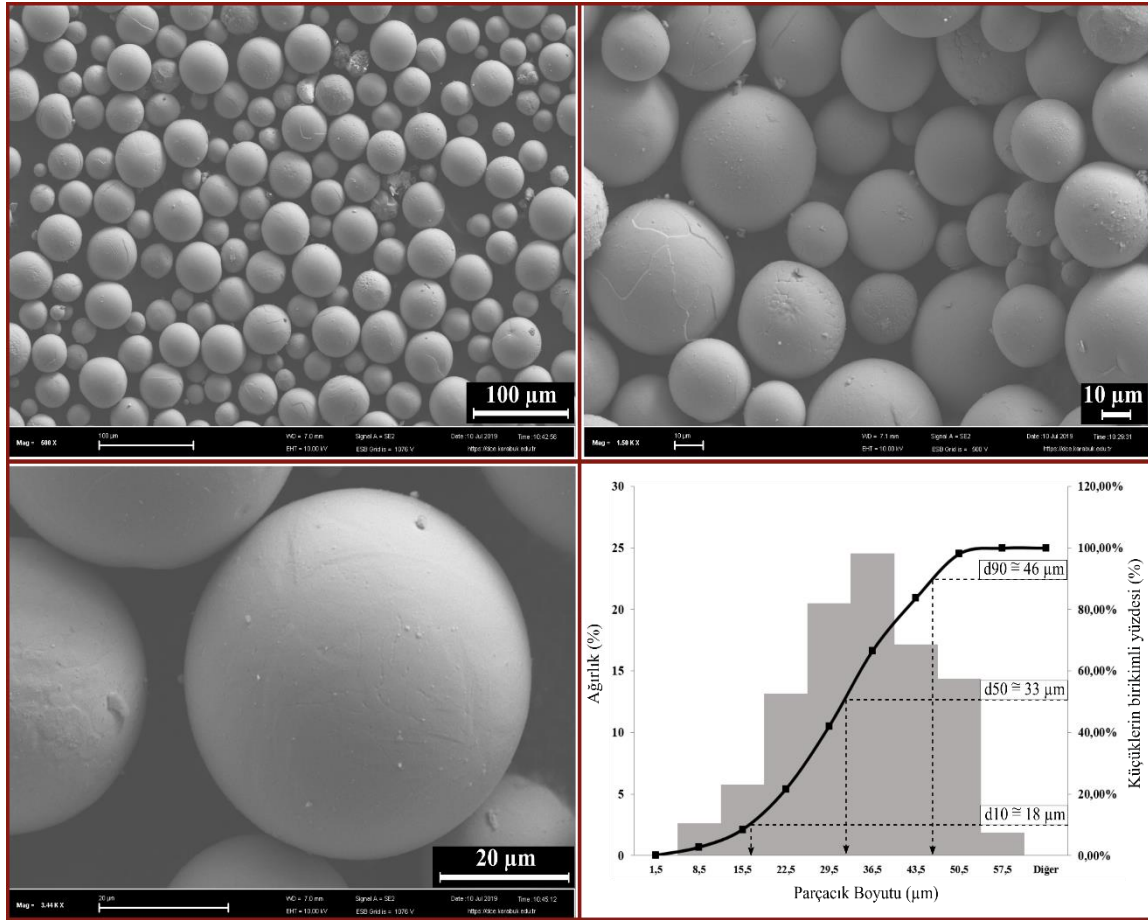
Şekil 5.41. Toz üretim sürecinden görüntüler a) başlamadan önce, b-e) üretim esnasında, f) bittiğinde kaydedilen görüntüler

5.8.1. Şekil, boyut, mikroyapı incelemesi

Toz parçacıklarının şekli, başta eklemeli imalat olmak üzere diğer geleneksel toz metalürjisi üretim teknikleri ile parça üretiminde tam yoğunluğun elde edilebilmesi açısından önemlidir. Küresel olmayan tozlar zayıf paketlenme yoğunluğundan dolayı, nihai parça boyunca boşluklara neden olurlar. Toz parçacıklarının boyutu, üretim yöntemine uygunluğu açısından değerlendirilmektedir. Örneğin seçici lazer ergitme (SLM), soğuk sprey kaplama (CSC), metal enjeksiyon kalıpcılığı (MIM) ve sıcak izostatik presleme (HIP) gibi işlemlerde 0-45 μm , elektron ışınıyla ergitme (EBM) işleminde ise 45-106 μm aralığında toz parçacıkları kullanılmaktadır [39]. Toz parçacıklarının mikroyapısı özellikle gaz

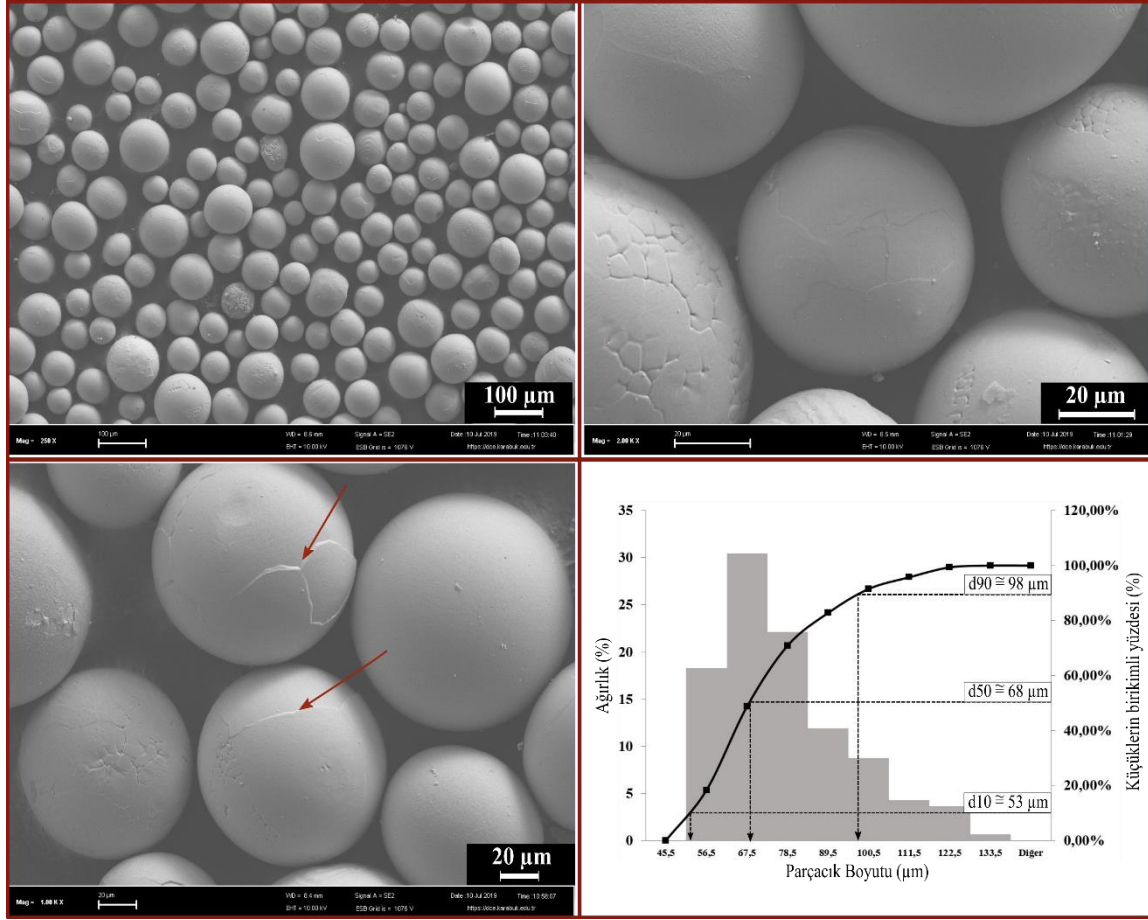
gözenekliliğinin incelenmesi açısından önemlidir. Bu gözenekli parçacıklardan üretilmiş parçaların yoğunluk ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkiye sebep olmaktadır [121] [122] [123] [124] [125]. Anlatılan bu karakterizasyon işlemlerinin yapılabilmesi amacıyla parçacıkların sınıflandırma işlemi 0-53 μm ve 53-125 olmak üzere iki şekilde yapılmıştır. Parçacık boyut analizi SEM görüntülerinin analiz edilmesi ile gerçekleştirilmiştir.

Şekil 5.42’de 300 A akım ve 90 SLPM hacimsel debi parametresi ile 0-53 μm boyut aralığında üretilen toz parçacıklarına ait çeşitli büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri ve parçacık boyut analizi grafiği yer almaktadır. Şekil incelendiğinde tozların neredeyse tamamının küresel olduğu görülmektedir. Genel bir ifade olarak küresel tozları üretebilmek için sıvı damlacıkların küreselleşme sürelerinin katılaşma sürelerinden daha küçük olması istenilir. [95] ve kısa küreselleşme zamanı, düşük sıvı metal viskozitesi ve yüksek nozul çıkış hızı ile sağlanır. Yüksek yüzey enerjisi ve küçük parçacık boyutu katılaşma öncesi küresel parçacık oluşumuna katkı sağlar [25]. Plazma atomizasyon yöntemi bu isterlerin tümünü sağlamaktadır. 3 plazma jetinden elde edilen yüksek sıcaklık teli eritmekte ve yüksek hız değerleri ise ergiyen metali küçük parçacıklara ayrıştırmaktadır. Tel hızı ile de bu işlem kontrol edilebilmektedir. Şekil 5.42’de yer alan boyut aralığında ortalama toz boyutu (d_{50}) değeri yaklaşık 33 μm olarak gerçekleşmiştir. Parçacık boyutları 29,5-36,5 μm aralığında en fazladır. Küçüklerin birikimli yüzdesi eksenine göre tozların %90’ı 46 μm ’nin, %10’u ise 16 μm ’nin altındadır. Ayrıca toz boyut dağılımı ve şekil özellikleri incelendiğinde elde edilen tozların SLM, CSC, MIM ve HIP yöntemleri ile üretim yapılmasında uygun olduğunu göstermektedir.



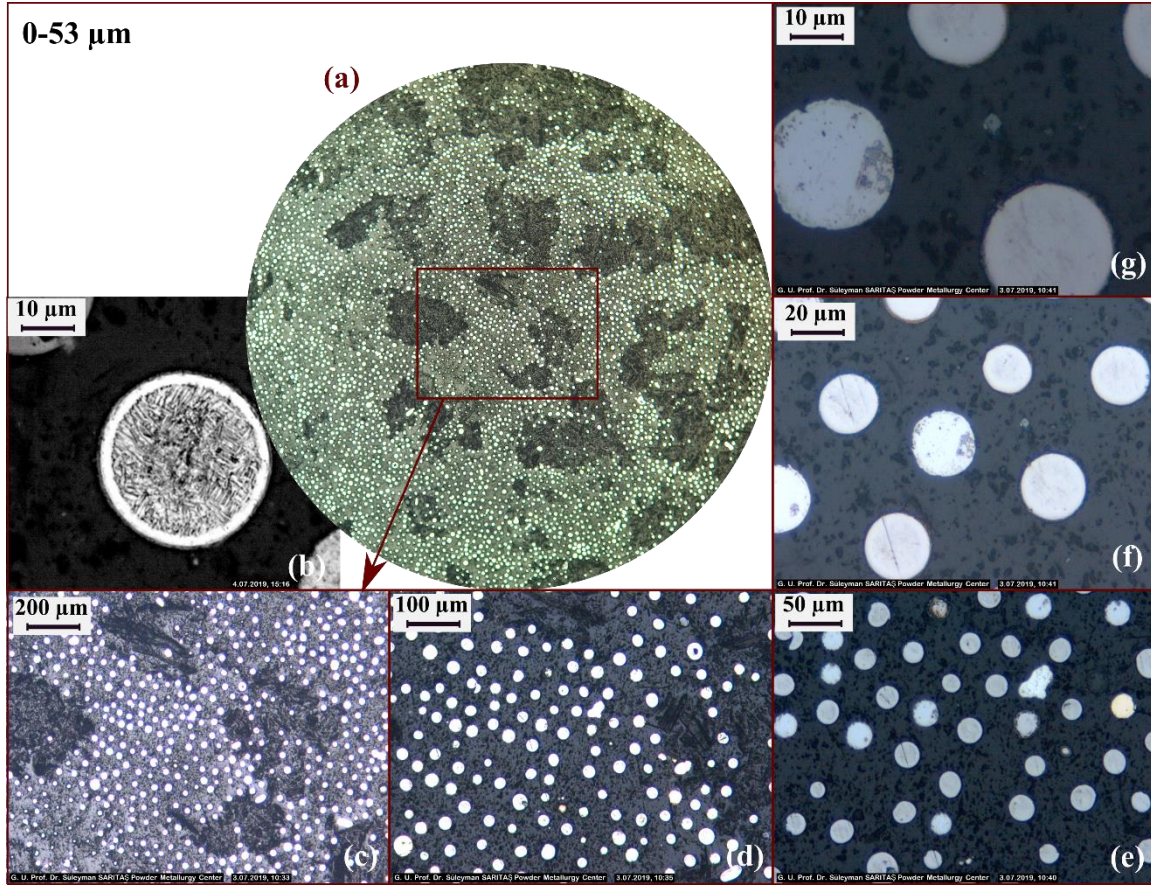
Şekil 5.42. 0-53 µm aralığında parçacık boyutuna sahip tozların SEM görüntüleri ve parçacık boyut analizi

Şekil 5.43'te 300 A akım 90 SLPM hacimsel debi parametresi ile 53-125 µm boyut aralığında üretilen toz parçacıklarına ait çeşitli büyütme ölçeklerinde SEM görüntüleri ve parçacık boyut analizi grafiği yer almaktadır. Bu boyut aralığında ortalama toz boyutu (d_{50}) değeri yaklaşık 68 µm olarak gerçekleşmiştir. Küçüklerin birikimli yüzdesi eksenine göre tozların % 90'ı 98 µm'nin, % 10'u ise 53 µm'nin altındadır. Ayrıca SEM görüntülerindeki bazı parçacıklar üzerinde çatlaklar tespit edilmiştir. Şekil 5.43'te ok işareti ile gösterilen bu parçacıkların merkezine göre daha hızlı soğuyan ve daha sert bir tabaka ile kaplanan yüzeylerinin, ısıl gerilmelere maruz kalarak bu görüntüyü aldığı değerlendirilmiştir. Benzer görüntüler üretici firmalardan alınmış tozlar ile yapılan bilimsel çalışmalarda da [26, 46, 121, 295-297] mevcuttur.



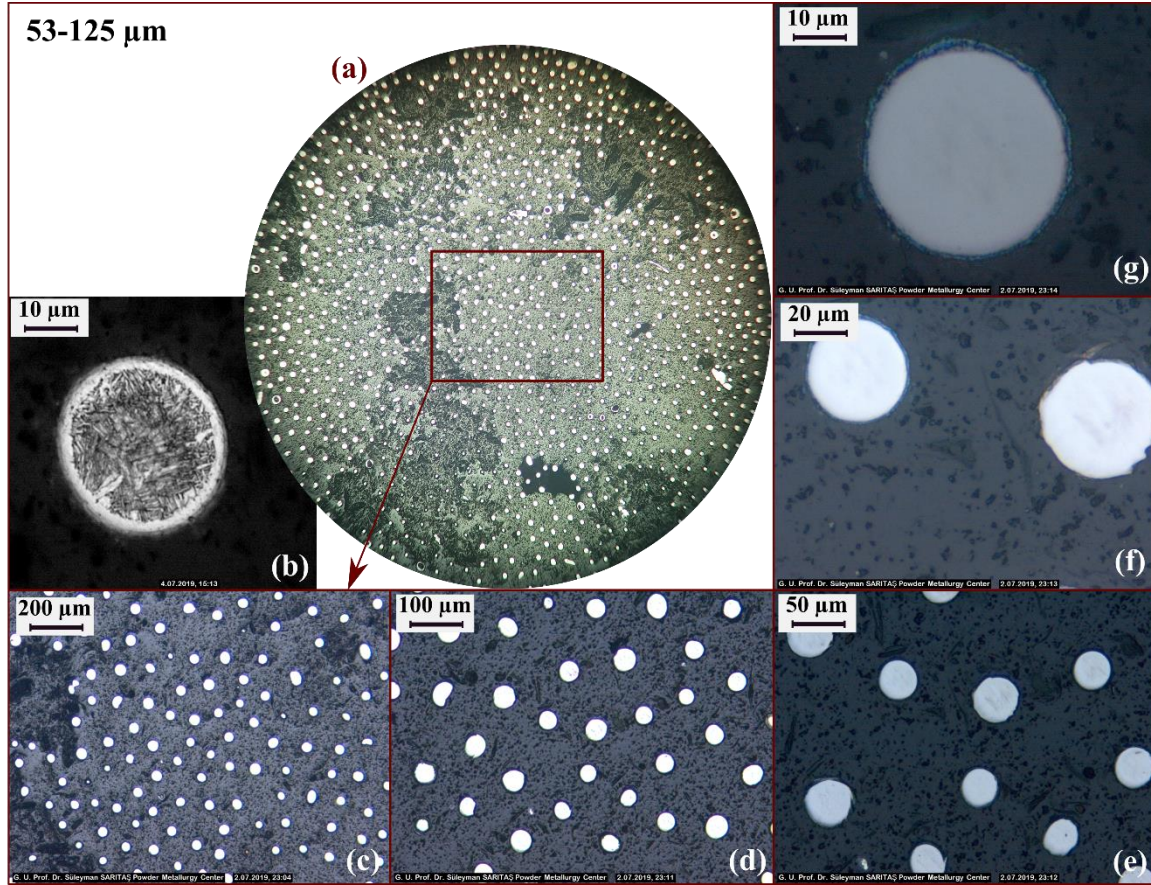
Şekil 5.43. 53-125 μm aralığında parçacık boyutuna sahip tozların SEM görüntüleri ve parçacık boyut analizi

Şekil 5.44'de 300A akım ve 90 SLPM hacimsel debi parametresi ile yapılan üretim sonucunda 53 μm 'lik elekten elenen parçacıklara ait mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Şekil 5.44-a'daki görüntü mikroskop dürbününden fotoğraf makinası ile çekilmiş görüntüyü göstermektedir. Bu görüntü ile daha fazla parçacık görülebilmektedir. Şekil 5.44-b'de üretilen parçacıktan yapılan dağlama işlemi sonucunda elde edilen görüntü yer almaktadır. Buna göre oluşan yapı, atomizasyon işlemindeki yüksek soğuma hızından dolayı (10^3 - 10^5 K/s) martenzitik α fazı baskındır. Bu yapılar iğnemsî şekilde görünmektedir. Parçacığın dış çeperinde bulunan beyaz tabaka ise parçacık merkezine doğru en başta hızlı katılaşma sonucunda oluşan birincil β sınırı olduğu düşünülmektedir. Martenzitik yapıyı ortaya çıkarmak için tepkimeye giren dağlayıcı bu yapıyı daha parlak bir şekilde ortaya çıkarmıştır. Benzer görüntüler diğer bilimsel çalışmalarda da [130], [297], [298] gözlemlenmiştir. Şekil 5.44-c,d,e,f,g'de metalografi işlemi uygulanmış parçacıklar çeşitli büyütme ölçeklerinde görüntüler gösterilmektedir. Buna göre parçacıkların küreselliklerinin oldukça iyi seviyede olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 5.44. 0-53 μm parçacık büyüklüğüne sahip tozların a) genel, b) dağlanmış, c) 5x büyütme, d) 10x büyütme, e) 20x büyütme, f) 50x büyütme, g) 100x büyütme görüntüsü

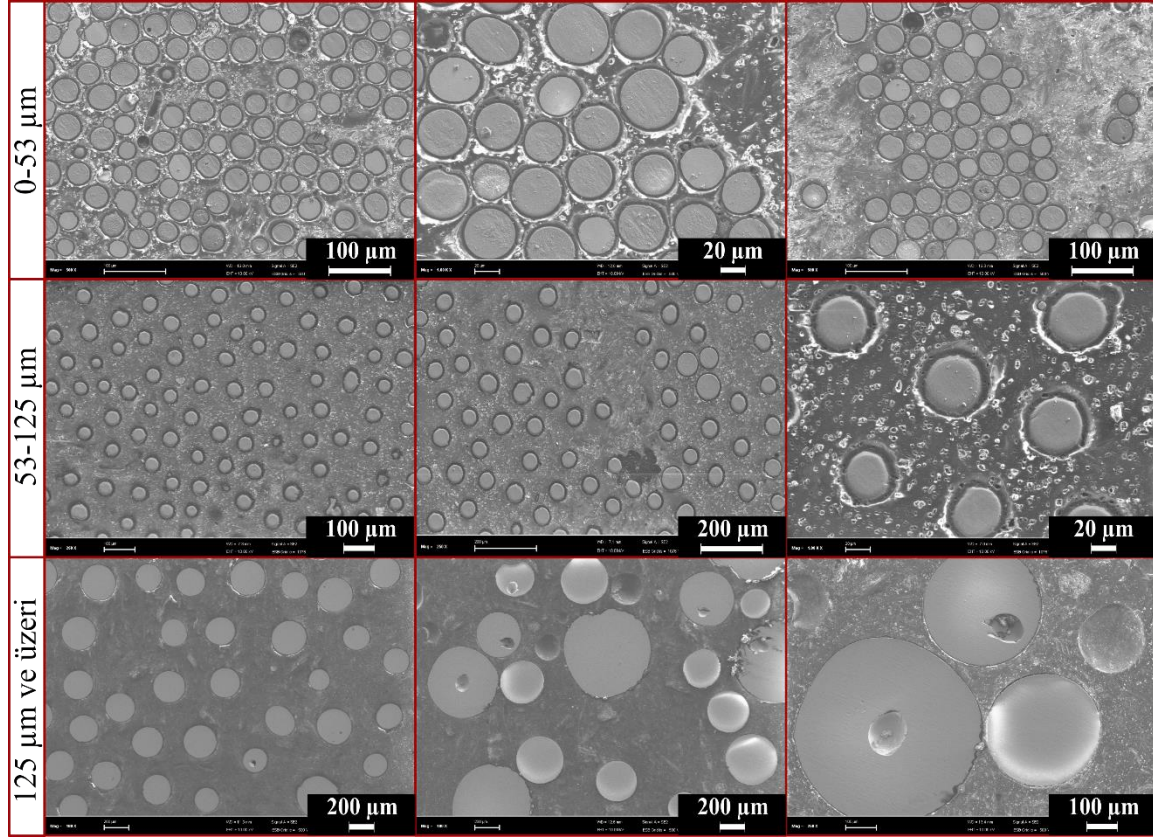
Şekil 5.45'te 300A akım ve 90 SLPM hacimsel debi parametresi ile yapılan üretim sonucunda 53-125 μm boyut aralığındaki parçacıklara ait mikroyapı incelemesi yapılmıştır. Şekil 5.45-b'de üretilen parçacıktan yapılan dağlama işlemi sonucunda elde edilen görüntü yer almaktadır. Şekil 5.44-b'de yer alan dağlama görüntüsüne benzer bir şekilde iğnemi yapılar olarak martenzitik α fazı baskındır. Reaktöre giren ve plazma jetleri ile karşılaşan tel formundaki malzeme atomize olur ve damlacıklarına ayrışır. Bu damlacıkların küresel şekle gelebilmesi için soğuma hızının nispeten daha yavaş olduğu bölgede küreselleştikten sonra hızlı bir şekilde soğumakta ve martenzitik yapıya dönüşmektedir. Şekil 5.45-c,d,e,f,g'de metalografi işlemi uygulanmış parçacıklar çeşitli büyütme ölçeklerinde görüntüler yer almaktadır. Toz içi gözeneklilik açısından değerlendirildiğinde ise bu boyut aralığında yapılan mikroyapısal incelemede neredeyse hiç gözeneklilik bulunmamaktadır.



Şekil 5.45. 0-53 μm parçacık büyüklüğüne sahip tozların a) genel, b) dağlanmış, c) 5x büyütme, d) 10x büyütme, e) 20x büyütme, f) 50x büyütme, g) 100x büyütme görüntüsü

Şekil 5.46’da 0-53 μm , 53-125 μm ve 125 μm üstü parçacık boyutlarına sahip tozlar için çeşitli büyütme ölçeklerinde gözenek oluşumları gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde 0-53 ve 53-125 boyut aralığındaki tozlar için neredeyse hiç gözeneklerin veya birkaç μm büyüklüğünde olduğu 125 ve üzeri tozlarda ise nispeten daha büyük gözeneklerin oluştuğu tespit edilmiştir. Bu gözeneklerin üretimde kullanılan gaz olan argon dolu gözenekler olduğu değerlendirilmiştir. Tammam-Williams ve arkadaşları [134] 5 μm ’den küçük gözeneklerin gerilme yığılmalarını çok az artıracağını ve bir çatlak başlatma olasılığının bulunmadığını ifade etmişlerdir. 125 μm üstü tozlarda meydana gelen gözeneklerin boyutları 0-100 μm aralığında ve küresel şekle yakındır. Ayrıca gözeneklerin kaba tozlarda daha kolay elde edildiği ve ince toz boyutuna sahip tozlara göre daha fazla argon içerdiği sonucu konu ile ilgili çalışan diğer araştırmacılar tarafından da belirtilmiştir [123, 124, 299, 300]. Bu durumun başlıca sebeplerinden bir tanesi soğuma hızlarıdır. Küçük parçacıklar büyük hacimli parçacıklara oranla daha hızlı ısınır ve soğurlar. Yani parçacık boyutu küçüldükçe soğuma hızı artmaktadır. Parçacık boyutu büyüdükçe ise ikincil dendrit kollar arası mesafe

ve mikro sertlik artmakta soğuma hızı azalmaktadır [301]. Plazma atomizasyon işleminde soğuma hızı 10^3 - 10^5 K/s arasındadır. Bu değerlerden soğuma işleminin birkaç milisaniyede tamamlandığı anlaşılmaktadır.

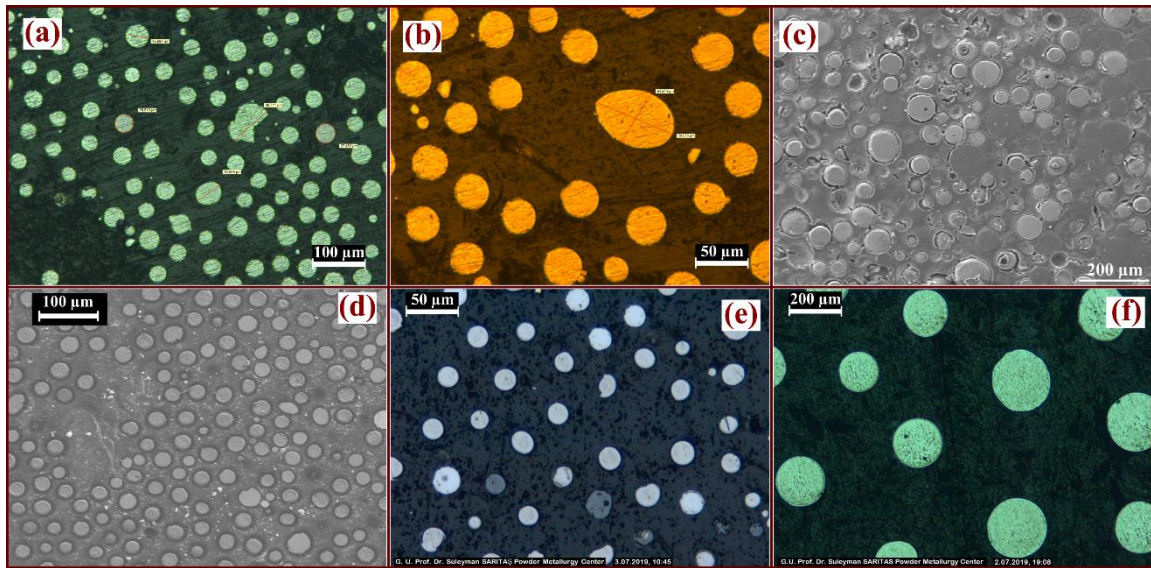


Şekil 5.46. Farklı parçacık büyüklüklerine sahip tozlarda gözeneklilik gösterimi

5.8.2. Aynı yöntemle üretilmiş farklı tozların ve diğer yöntemler ile üretilmiş tozların karşılaştırılması

Üretilen tozların tarafımızdan yapılan karakterizasyon çalışmalarından elde edilen görüntülemeler ve analizler aynı yöntemle üretilmiş farklı tozlar ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu alanda yapılan bilimsel çalışmalar üreticiden tedarik edilen tozlar üzerine yapılandırılan çalışmalardan oluşmaktadır. Başka bir karşılaştırma işlemi ise farklı yöntemler ile üretilmiş tozların plazma atomizasyon yöntemi ile üretilmiş tozlar ile karşılaştırılmasıdır. Şekil 5.47’de dağlama hariç metalografi işlemi uygulanmış tozlar yer almaktadır. Şekil 5.47-a ve b önemli toz üreticilerinden biri olan bir firmaya ait tozların incelenmesi sonucu elde edilmiş görüntülerdir. Şekil 5.47-d ve e bu çalışma kapsamında üretilmiş tozların Şekil 5.47-a ve b’deki büyütme oranlarıyla aynı büyütmede elde edilmiş görüntülerdir. Her iki toz numunelerinin şekilleri oldukça küresel olmakla birlikte

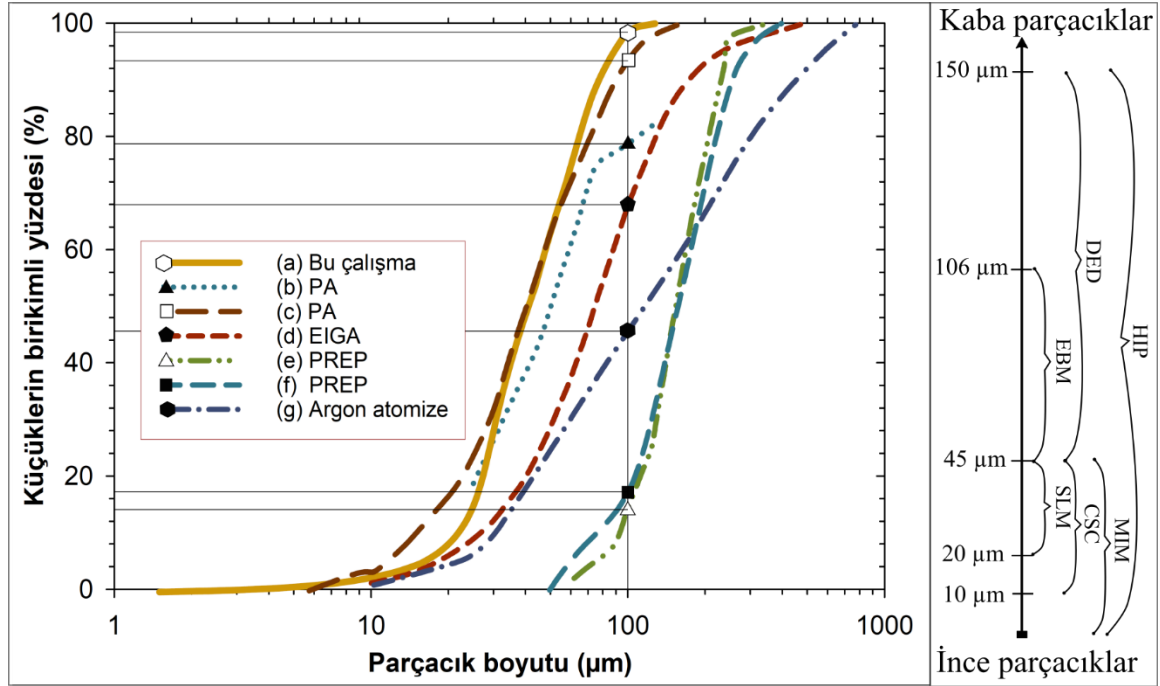
içerilerinde istisnalar bulunmaktadır. Şekli küresel olmayan toz parçacıklarının bu şekli almasında damlacık halinde iken ortamda birleşmeleri ve küreselliklerini tamamlayamadan soğumaları gibi nedenlerin etkili olduğu düşünülmektedir. Toz içi gözeneklilik olarak karşılaştırıldığında ise bu 4 fotoğrafta da neredeyse hiç gözenek bulunmamaktadır. Şekil 5.47-c’de bilimsel bir çalışmada sunulan toz görüntüleri yer almaktadır. Şekil 5.47-f’de ise dunulan görüntü ise aynı büyütme oranında görüntü alınmış bu çalışma kapsamında üretilen tozlara ait görüntülerdir. Şekil 5. 47-c’de verilen görüntüde toz parçacıklarının çok kaba taneli olduğu görülmektedir. 100 μm ve altı parçacık büyüklüğüne sahip tozlardan oluşturulduğu düşünülmüştür. Toz parçacıklarının küresellikleri oldukça başarılı fakat parçacık büyüklüğü ile artma eğiliminde olan ve özellikle 125 μm ve üzeri tozlarda parçacıklarında arttığı tarafımızca tespit edilen toz içi gözeneklilik oldukça fazla ve büyük ölçüdedir. Şekil 5.47-f’de aynı büyütme oranında 125 μm ve üzeri tozlardan alınmış bir görüntü yer almaktadır.



Şekil 5.47. Aynı yöntemle üretilmiş farklı tozların bu çalışma kapsamında üretilen tozlar ile mikroyapısal karşılaştırılması a) ve b) toz üretimi yapan bir firmaya ait, c) Referans [121] da yapılan incelemeye ait, d), e) ve f) Bu çalışma kapsamında üretilen tozlara ait çeşitli büyütme oranlarında elde edilmiş görüntüler

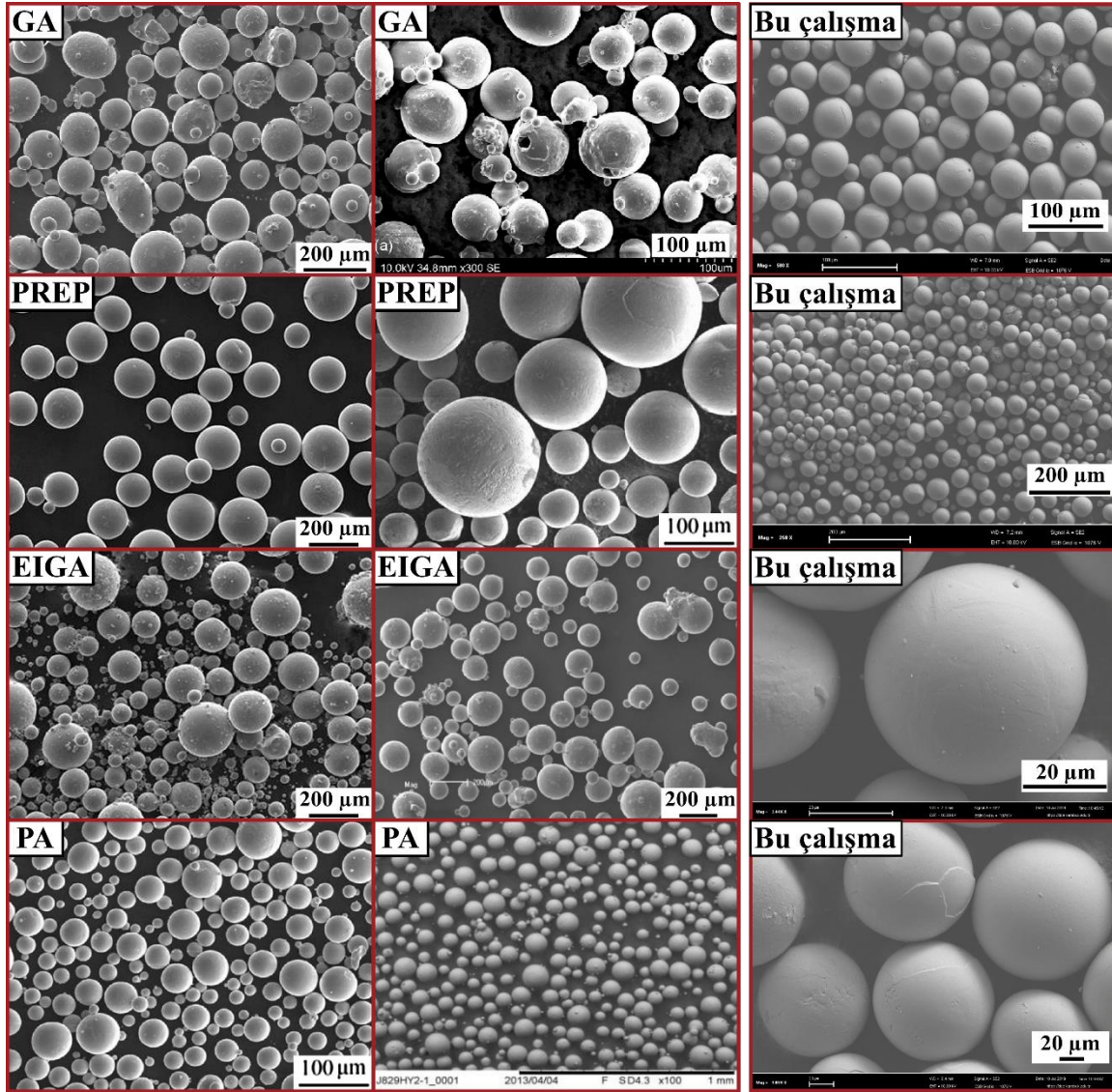
Şekil 5.48’de toz boyut analizlerinde kullanılan temel bir yöntem olarak küçüklerin birikimli yüzdesi grafiği aynı ve diğer yöntemlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Şekil 5.48’nin sağ tarafında ise önceki çalışmalardan elde edilen bilgiler sonucunda çizilmiş toz boyutlarına göre tercih edildikleri yöntemi gösteren bir grafik yer almaktadır. Buna göre (e, f) PREP (ing; plasma rotating electrode process) yöntemi ile üretilen tozların yalnızca % 15’i 100 μm

ve altı tozlardan oluşmaktadır. Bu yöntem ile daha kaba tozlar üretildiği [302], [303], fakat şekilsel olarak mükemmel küresellikleri, gaz dolu gözeneklerin azlığı gibi özellikleri bakımından PA ile benzer oldukları önceki çalışmalardan [304] elde edilen bilgilere göre sabittir. Kaba toz boyutlarının tercih edildiği DEB (ing; direct energy deposition) ve SİP (ing; hot isostatic pressing) gibi yöntemler ile ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Argon atomize (gaz atomizasyon) tozlarının % 45'i 100 µm ve altı tozlardan oluşmaktadır. Bu tozların şekil [128] ve içlerindeki gaz gözenekli boşluklardan [305] dolayı özellikle eklemeli imalat gibi yöntemlerde tercih edilmemektedir. Özellikle yüksek ergime sıcaklığına sahip reaktif malzemelerden toz üretiminde diğer yöntemlere nispeten daha yüksek enerji kullandığından maliyet olarak da verimsizdir. Yüksek maliyetler sonucu elde edilen toz şekilleri ve mikroyapıları PA yöntemi ile karşılaştırılamayacak düzeyde olduğundan bu tozlar daha çok geleneksel toz metalürjisi üretim teknikleri ile kullanıma uygun tozlardır. EIGA (ing; electrode induction melting gas atomization) tozlarının % 68'i 100 µm ve altı tozlardan oluşmaktadır. Küçüklerin birikimli yüzdesi açısından olumlu gibi düşünülse de uydulaşmanın, toz içi gözenekliliğinin [123] ve gaz sarfiyatının [35] fazla olması yöntemin olumsuz yanlarından. Şekil 5.48-b ve c Pa ile üretilmiş iki farklı tozlara ait eğrilerdir. Buna göre "b" eğrisi tozların % 79'unun 100 µm ve altında c eğrisi ise % 94'ünün 100 µm ve altı tozlardan oluştuğunu göstermektedir. Bu çalışma kapsamında üretilen tozların % 98'i 100 µm ve altı tozlardan oluşmaktadır. PA tozları eklemeli imalat, soğuk spreyl kaplama ve metal enjeksiyon kalıpcılığı gibi yöntemlerde kullanılmak için oldukça elverişlidir. Ayrıca bu çalışma kapsamında ve "c" tozuna ait eğriler incelendiğinde 10 µm altı çok ince tozların da olduğu görülmektedir. Bu durum eklemeli imalata uygunluğunu gösteren bir diğer toz özelliğidir. Küçük tozlar toz serimi esnasında nispeten büyük tozların aralarına girmekte ve parça yoğunluğunu artırıcı etkiye bulunmaktadır.



Şekil 5.48. Aynı ve farklı yöntemler ile üretilmiş farklı tozların birikimli yüzdelere açısından karşılaştırılması a) Bu çalışma, b) PA [39], c) PA [155], d) EIGA [39], e) PREP [39], f) PREP [155]. g) Argon atomize [155] toz parçacıklarına ait eğriler

Şekil 5.48’de gösterilen kıyaslama işleminin benzeri Şekil 5.49’da toz şekilleri üzerinden yapılmıştır. Şekil 5.48’de de bahsedilen uydulaşma durumu PA ve EIGA tozları için görülmektedir. Burada verilen görüntülere göre PA yönteminin şekil açısından karşılaştırılabileceği tek yöntem PREP tozlarıdır. Oldukça küresel bir yapıya sahip olmasına rağmen şekil özellikleri genellikle kabadır. Bu amaçla PA yöntemi toz içi gözeneklilik, şekil, boyut ve mikroyapı özellikleri bakımından diğer yöntemlere göre oldukça üstündür. Bu çalışma kapsamında üretilen tozlara ait çeşitli büyütme oranlarındaki görüntüler Şekil 5.49’un sağ tarafında ayrı bir sütun olarak verilmiştir. Düşük bütçe ve enerji kullanılarak laboratuvar şartlarında yapılmış bir deney düzeneği için diğer aynı yöntemle üretilen tozlar ile kıyaslanabilir olduğu değerlendirilmiştir.



Şekil 5.49. Aynı ve farklı yöntemler ile üretilmiş farklı tozların şekil özellikleri açısından karşılaştırılması (Referanslar; GA için [128],[121] PA için [39], [306], PREP için [123], [129] , EIGA için [122], [123]'dir)

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

PA işlemi toz üretimi için oldukça güncel bir yöntemdir. Bu yöntem ile üretilen tozlar eklemeli imalat yönteminde kullanılmaktadır. Bu çalışma ile yapılan literatür araştırması, analiz çalışmaları ile geliştirmelerde bulunulan nozul, bu nozula göre tasarımı yapılan tabanca ve sonrasında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda aşağıda başlıklar halinde verilen sonuçlar elde edilmiş ve kazanılan tecrübe doğrultusunda bazı önerilerde bulunulmuştur.

6.1. Sonuçlar

1. Ark kökü gerek tabanca aşınması gerekse de plazma jetinin karakteristiği üzerinde önemli etkilere sahiptir. Dinamiğinin iyi anlaşılması nozul ve tabanca tasarımı açısından önemlidir. Akım değerinin artırılması Lorentz kuvvetlerin etkinliğini artırmakta ve ark kökünü giriş bölgesine kaydırmaktadır. Hacimsel debi değerinin artırılması ise akış kuvvetlerinin baskınlığını artırmakta ve ark kökünün çıkışa doğru kaydırmaktadır.
2. Akım değerlerinde gerçekleşen artış ile birlikte sıcaklık ve hız değerleri de artmıştır. Bezer şekilde hacimsel debi değerlerinin artırılması sıcaklığı artırmaktadır.
3. Yüksek sıcaklıkların istenildiği durumlarda yüksek akım değeri ve yüksek hacimsel debi değeri tercih edilmelidir.
4. Hız değerlerinin artırılması amacıyla hızlandırıcı nozul kullanımı özellikle tabanca çıkışı ile malzeme işlemi arasında mesafe olduğu durumda kaçınılmazdır. Hızlandırıcı nozul kullanılmadığı durumda plazma jetinin nozul çıkışındaki sıcaklık ve hız değerleri çok hızlı bir şekilde düşüş göstermektedir.
5. Hızlandırıcı nozul ilavesi hız değerlerini istenilen düzeye getirmekle birlikte sıcaklık değerlerinde düşüşe sebep olmaktadır. Örneğin hacimsel debi değerinin 60 SLPM'den 70 SLPM'ye çıkartılması durumunda sıcaklık artışı beklenirken yaklaşık 500 K düşmüştür. Bu değer plazma ile elde edilen çıkış sıcaklıkları düşünüldüğünde (12 500 K) önemsizdir.
6. Tabanca ömrü üzerinde etkili bir parametre olan ark kökünün erezyon etkisi etkin bir soğutma suyu kullanımı ile azaltılabilir. Katot için de benzer bir durum geçerlidir.
7. Üçlü tabanca sisteminin kullanıldığı PA işleminde tabancaların hizalanması ince tozların üretilebilmesi açısından gerekliliktir.
8. Katodun anot kanalına göre merkezlenmesi ve mesafesinin ayarlanması plazma jetinin sürekliliği açısından önemlidir.

9. İnce toz buyutuna sahip tozlar üretebilmek için tabancalardan elde edilecek sıcaklık ve hız değerleri mümkün olduğunca yüksek olmalıdır.
10. Üretilen tozlar şekil, boyut ve mikro yapı özellikleri bakımından üretici firmaların ürettiği tozların özellikleriyle rekabet edebilecek durumdadır.
11. Üretilen tozların diğer yöntemler ile üretilmiş tozlara göre oldukça küresel olduğu gözlemlenmiştir.
12. Literatür çalışmalarında bahsedilen (tabanca başına 20-60 kW) güç değerlerine nispeten daha az güç (tabanca başına 9 kW) ile aynı şekilde ve benzer boyut aralığında tozlar üretilenmiştir.
13. Reaktör içerisinde argon atmosferinin korunması ve vakum ortamı tozların oksit tabakası olmadan üretilibilmeleri için önemlidir.

6.2. Öneriler

Edinilen tecrübe ve gerçekleştirilen deneysel ve sayısal çalışmalar sonucunda bundan sonra gerçekleştirilecek çalışmalar için aşağıdaki önerilerde bulunulmuştur.

1. Plazma tabancaları ve sistemin kurulumu oldukça maliyetli bir işlemdir. Özellikle güç kaynakları sistemin kurulum maliyetinin artırarak bilimsel çalışma isteğini kırmaktadır. Sanayi destekli projeler yapılarak geliştirilme çalışmaları yapılabilir.
2. Farklı sayıda tabanca kullanımının toz boyut ve özellikleri üzerine etkilerinin incelenmesi sağlanabilir.
3. Koruyucu ortamın oksijen seviyesi sürekli takip edilerek toz parçacıklarının oksijen ile teması iyileştirilebilir
4. Üretim süreci farklı sensörler ve kameralar ile daha yakından takip edilebilir.
5. Yüksek hızlı kamera yardımıyla tel malzemesinin parçalanması görüntülenebilir.

KAYNAKLAR

1. Trelles, J. P. (2007). *Finite Element Modeling of Flow Instabilities in Arc Plasma Torches*, Ph. D. Thesis, The Faculty of The Graduate School of The University of Minnesota, United States, 10-12.
2. Trelles, J. P. (2018). Advances and challenges in computational fluid dynamics of atmospheric pressure plasmas. *Plasma Sources Science and Technology*, 27 (9), 1-10.
3. Huang, R., Fukanuma, H., Uesugi, Y., and Tanaka, Y. (2012). Simulation of arc root fluctuation in a DC non-transferred plasma torch with three dimensional modeling. *Journal of Thermal Spray Technology*, 21 (3-4), 636-643.
4. Selvan, B. and Ramachandran, K. (2009). Comparisons between two different three-dimensional arc plasma torch simulations. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18 (5-6), 846-857.
5. Modirkhazeni, S. M. and Trelles, J. P. (2018). Non-transferred Arc Torch Simulation by a Non-equilibrium Plasma Laminar-to-Turbulent Flow Model. *Journal of Thermal Spray Technology*, 27 (8), 1447-1464.
6. Chang, C. H. and Ramshaw, J. D. (1994). Numerical simulation of nonequilibrium effects in an argon plasma jet. *Physics of Plasmas*, 1 (11), 3698-3708.
7. Guo, Z., Yin, S., Liao, H., and Gu, S. (2015). Three-dimensional simulation of an argon-hydrogen DC non-transferred arc plasma torch. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80, 644-652.
8. Paik, S., Huang, P. C., Heberleinand, J., and Pfender, E. (1993). Determination of the arc-root position in a DC plasma torch. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 13 (3), 379-397.
9. Ghorui, S. and Das, a K. (2013). Arc plasma devices: Evolving mechanical design from numerical simulation. *Pramana*, 80 (4), 685-699.
10. Huang, R., Fukanuma, H., Saitamai, J., Uesugi, Y., and Tanaka, Y. (2011). Simulation of Arc Root Fluctuation in a DC Non-Transferred Plasma Torch with Three Dimensional Modeling. *Journal of Thermal Spray Technology*, 21 (3-4), 636-643.
11. Benilov, M. S. (2008). Understanding and modelling plasma-electrode interaction in high-pressure arc discharges: A review. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 41 (14), 2-30.
12. Mitterer, C., Granzer, T., Kathrein, M., Schröder, J., and Heißl, M. (2013). Substitution of ThO₂ by La₂O₃ additions in tungsten electrodes for atmospheric plasma spraying. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 43, 181-185.
13. Szente, R. N., Munz, R. J., and Drouet, M. G. (1988). Arc velocity and cathode erosion rate in a magnetically driven arc burning in nitrogen. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 21 (6), 909-913.

14. Szente, R. N., Munz, R. J., and Drouet, M. G. (1992). Electrode erosion in plasma torches. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 12 (3), 327–343.
15. Peters, J., Yin, F., Borges, C. F. M., Heberlein, J. V. R., and Hackett, C. (2005). Erosion mechanisms of hafnium cathodes at high current. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38 (11), 1781–1794.
16. Nemchinsky, V. (2014). Erosion of thermionic cathodes in welding and plasma Arc cutting systems. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 42 (1), 199–215.
17. Zhou, X. and Heberlein, J. (1998). An experimental investigation of factors affecting arc-cathode erosion. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31 (19), 2577–2590.
18. Dorier, J., Gindrat, M., Hollenstein, C., Salito, A., Loch, M., and Barbezat, G. (2002). Time-resolved imaging of anodic arc root behavior during fluctuations of a DC plasma spraying torch. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 29 (3), 494–501.
19. Duan, Z. and Heberlein, J. V. R. (2002). Arc instabilities in a plasma spray torch. *Journal of Thermal Spray Technology*, 11 (1), 44–51.
20. Rat, V., Mavier, F., and Coudert, J. F. (2017). Electric Arc Fluctuations in DC Plasma Spray Torch. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 37 (3), 549–580.
21. Selvan, B., Ramachandran, K., Sreekumar, K. P., Thiyagarajan, T. K., and Ananthapadmanabhan, P. V. (2009). Numerical and experimental studies on DC plasma spray torch. *Vacuum*, 84 (4), 444–452.
22. Dalir, E., Moreau, C., and Dolatabadi, A. (2018). Three-Dimensional Modeling of Suspension Plasma Spraying with Arc Voltage Fluctuations. *Journal of Thermal Spray Technology*, 27 (8), 1465–1490.
23. Wen, K., Liu, X., Zhou, K., Liu, M., Zhu, H., Huang, J. (2019). 3D time-dependent numerical simulation for atmospheric plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 371, 344–354.
24. Li, H. and Pfender, E. (2007). Three dimensional modeling of the plasma spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*. 16 (2), 245–260.
25. Sarıtaş S., Türker M., Durlu N. (Editörler). (2007). *Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri*. (Birinci Baskı). Türkiye: Türk Toz Metalurjisi Derneği, 1-97.
26. Larouche, F., Balmayer, M., and Trudeau-Lalonde, F. (2017). *Plasma atomization metal powder manufacturing processes and systems therefore*, WO 2017/011900 A1, 2-53.
27. Antony, L. V. M. and Reddy, R. G. (2003). Processes for production of high-purity metal powders. *The Journal of The Minerals, Metals & Materials Society*, 55 (3), 14–18.
28. Alagheband, A. and Brown, C. (1998). UMT promises tight control of particle size. *Metal Powder Report*, 53 (11), 30–33.

29. Yukimasa, T. and Takemori, S. (1989). A review of metal powder production. *Metallurgical Review of Mining and Metallurgical Institute of Japan*, 6 (2), 38–53.
30. Dumitras, C. G., Cernat, R., Stamate, T., and Vardavoulis, M. (2014). Study on high-purity Titanium powder for biomedical application. *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*, 16 (11–12), 1447–1455.
31. Neikov, O. D., Naboychenko, S. S., and Dowson, G. (2009). *Handbook of Non-Ferrous Metal Powders* (First Edition). Great Britain: Elsevier, 317-370.
32. Reardon, A. C. (2011). *Metallurgy for The Non-metallurgist* (Second Edition). US: ASM International, 60-256.
33. Capus, J. M. (2005). *Metal Powders, A Global Survey of Production, Applications and Markets to 2010* (4th Edition). UK: Elsevier, 90-202.
34. Henein, H., Uhlenwinkel, V., and Fritsching, U. (2017). *Metal Sprays and Spray Deposition* (First Edition). Switzerland: Springer, 20-102.
35. Fang, Z. Z., Paramore, J. D., Sun, P., Chandran, K. S. R., Zhang, Y., Xia, Y. (2018). Powder metallurgy of titanium—past, present, and future. *International Materials Reviews*, 63 (7), 407–459.
36. Davis, J. R. (2004). *Thermal Spray Technology* (First Edition). US: ASM International, 36-253.
37. Witherspoon, F. D. and Massey, D. W. (1999). *Pulsed high energy synthesis of fine metal powders*, US005935461A, 1-6.
38. Dietrich, S., Wunderer, M., Huissel, A., and Zaeh, M. F. (2016). A new approach for a flexible powder production for additive manufacturing. *Procedia Manufacturing*, 6, 88–95.
39. Sun, P. E. I., Fang, Z. Z. A. K., Zhang, Y., and Xia, Y. (2017). Review of the methods for production of spherical ti and ti alloy powder. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 69 (10), 1853–1860.
40. Thümmel F., and Oberacker R. (1993). *Powder Metallurgy* (First Edition). Great Britain: The University Press Cambridge, 20-268.
41. Boulos, M. I., Jurexicz, J. W., and Auger, A. (2017). *Process and apparatus for producing powder particles by atomization of a feed material in the form of an elongated member*, WO2015/135075A1, 2-48.
42. News, N., Frigola, P. E., City, C., Murokh, A. Y., and News, N. (2015). *Additive manufacturing method for srf components of various geometries*, US009023765B1, 1-9.
43. Ünal, R. (1995). *Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi değişkenlerinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 40-96.

44. Yamanoglu, R., Zeren, M., and German, R. M. (2012). Solidification characteristics of atomized AlCu4Mg1-SiC composite powders. *Journal of Mining and Metallurgy, Section B: Metallurgy*, 48 (1), 73–79.
45. Pengjun, F., Yi, X., Xinggang, L., and Ya, C. (2018). influence of atomizing gas and cooling rate on solidification characterization of nickel-based superalloy powders. *Rare Metal Materials and Engineering*, 47 (2), 423–430.
46. Ti, U. and Tsantrizos, P. (1997). Plasma atomization gives unique spherical powders. *Metal Powder Report*, November, 34–37.
47. Flemings, M. C. (2006). Solidification processing. *Material Science and Technology*, 7, 1-602
48. Hussary, N. A. and Heberlein, J. V. R. (2007). Effect of system parameters on metal breakup and particle formation in the wire arc spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16 (1), 140–152.
49. Hussary, N. A. and Heberlein, J. V. R. (2001). Atomization and particle-jet interactions in the wire-arc spraying process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 10 (4), 604–610.
50. Kim, J. K., Xavier, F. A., and Kim, D. E. (2015). Tribological properties of twin wire arc spray coated aluminum cylinder liner. *Materials and Design*, 84, 231–237.
51. Kromer, R., Costil, S., Verdy, C., Gojon, S., and Liao, H. (2018). Laser surface texturing to enhance adhesion bond strength of spray coatings – Cold spraying, wire-arc spraying, and atmospheric plasma spraying. *Surface and Coatings Technology*, 352 642–653.
52. Darut, G., Liao, H., Coddet, C., Bordes, J. M., and Diaby, M. (2015). Steel coating application for engine block bores by Plasma Transferred Wire Arc spraying process. *Surface and Coatings Technology*, 268, 115–122.
53. Şerban, V. A., Roşu, R. A., Bucur, A. I., and Pascu, D. R. (2013). Deposition of titanium nitride layers by electric arc-reactive plasma spraying method. *Applied Surface Science*, 265, 245–249.
54. Gulyaev, I. P., Dolmatov, A. V., Kharlamov, M. Y., Gulyaev, P. Y., Jordan, V. I., Krivtsun, I. V. (2015). Arc-Plasma Wire Spraying: an optical study of process phenomenology. *Journal of Thermal Spray Technology*, 24 (8), 1566–1573.
55. Entezarian, M. (1997). *Reactive plasma spray forming of aluminum-titanium aluminide composites using a triple plasma system*, Ph. D. Thesis, McGill University, Montreal, 10-113.
56. İnternet: Strebl, P. (2019). *Kesişim Noktasının Gerçek Görünümü*. URL: www.streblenergy.com, Son Erişim Tarihi: 12.03.2019.
57. Ünal, A. (1990). Production of rapidly solidified aluminium alloy powders by gas atomisation and their applications. *Powder Metallurgy*, 33 (1), 53–64.

58. Bose, A. (1995). *Advances in Particulate Materials* (First Edition). US: Butterworth-Heinemann, 272-413
59. Grenier, S. (1998). Plasma Atomization goes commercial. *Metal Powder Report*, 53 (11), 26–28.
60. Hong-wu, O., Xin, C., and Bai-yun, H. (2007). Influence of melt superheat on breakup process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 17, 967–973.
61. Hussary, N. (2003). *Investigations into the Wire Arc Spraying Process*, Ph. D. Thesis, The University of Minnesota, United States, 3-140.
62. Güleşen, M. (2013). *Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Gaz Atomizasyonu Nozulunun Modellenmesi ve Toz Üretiminin Deneyisel Araştırılması*, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 10-96.
63. Mi, J. (1996). Numerical Simulation Of Gas Dynamics In The High Pressure Gas Atomization Process, Ph. D. Thesis, The Graduate School of Clemson University, United States, 20-160.
64. Dombrowski, N. and Johns, W. R. (1963). The aerodynamic instability and disintegration of viscous liquid sheets. *Chemical Engineering Science*, 18 (3), 203–214.
65. Fritsching, U. (2004). *Spray Simulation* (First Edition). US: Cambridge University Press, 10-260.
66. Randall, M. G., and Park, S. J. (2008). *Mathematical Relations In Particulate Materials Processing* (First Edition). Canada: John Wiley & Sons Inc, 12-452.
67. Bürger, M., Cho, S. H., Berg, E. v., and Schatz, A. (1995). Breakup of melt jets as pre-condition for premixing: Modeling and experimental verification. *Nuclear Engineering and Design*, 155, 215–251.
68. Lee, P. W. (1998). *Powder Metal Technologies and Applications*. US: ASM International, 758-1502.
69. Bradley, D. (1973). On the atomization of liquids by high-velocity gases I. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 6 (14), 1724–1736.
70. Bradley, D. (1973). On the atomization of a liquid by high-velocity gases II. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 6 (18), 2267–2272.
71. Eayii Leigh, B. L. (1878). Lord Rayleigh on the Instability of Jets. *Proceedings of the London Mathematical Society*, 10 (1), 4–13.
72. J., B. S. and G.H., J. (1978). Interactions Between Nitrogen Jets and Liquid Lead and Tin Streams. *Powder Technology*, 21, 119–133.
73. Lui, H. (1999). *Science and Engineering of Droplets: Fundamentals and Applications* (First Edition). US: Noyes Publication, 132-482

74. Hespel, J. M., Brunet, Y., and Dymont, A. (1995). Liquid sheet and film atomization: a comparative experimental study. *Experiments in Fluids*, 19 (6), 388–396.
75. Lagutkin, S., Uhlenwinkel, V., Achelis, L., Pulbere, S., and Sheikhaliev, S. (2004). *Centrifugal – Gas Atomization: Preliminary Investigation of the Method*. Paper presented at the Euro PM2004 Powder Manufacturing Processing, Europe.
76. Davis, J. R. (2004). *Handbook of Thermal Spray Technology* (First Edition). US: ASM International, 12-347
77. Mashayek, A. and Ashgriz, N. (2011). *Dynamics of Liquid Droplets in Handbook of Atomization and Sprays Theory and Application*, US: Springer, 97-123.
78. Crowe, C. T. (2005). *Multiphase Flow Handbook* (First Edition). US: Taylor & Francis Group, 725-982.
79. Guildenbecher, D. R., López-Rivera, C. and Sojka, P. E. (2009). Secondary atomization. *Experiments in Fluids*, 46 (3), 371–402.
80. Hsiang, L. P. and Faeth, G. M. (1995). Drop deformation and breakup due to shock wave and steady disturbances. *International Journal of Multiphase Flow*, 21 (4), 545–560.
81. Hinze, J. O. (1955). Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 1 (3), 289–295.
82. Strotos, G., Malgarinos, I., Nikolopoulos, N. and Gavaises, M. (2016). Predicting droplet deformation and breakup for moderate Weber numbers. *International Journal of Multiphase Flow*, 85, 96–109.
83. Mi, J., Grant, P. S., Fritsching, U., Belkessam, O., Garmendia, I. and Landaberea, A. (2008). Multiphysics modelling of the spray forming process. *Materials Science and Engineering A*, 477 (1–2), 2–8.
84. Chou, W. H., Hsiang, L. P. and Faeth, G. M. (1997). Temporal properties of drop breakup in the shear breakup regime. *International Journal of Multiphase Flow*, 23 (4), 651–669.
85. Li, X. and Fritsching, U. (2017). Process modeling pressure-swirl-gas-atomization for metal powder production. *Journal of Materials Processing Technology*, 239, 1–17.
86. Kulkarni, V. (2013). *An analytical and experimental study of secondary atomization for vibrational and bag breakup modes*, Ph. D. Thesis, Purdue University, Indiana, 50-75.
87. Krzeczowski, S. A. (1980). Measurement of liquid droplet disintegration mechanisms. *International Journal of Multiphase Flow*, 6 (3), 227–239.

88. Pilch, M. and Erdman, C. A. (1987). Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop. *International Journal of Multiphase Flow*, 13 (6), 741–757.
89. Lafayette, W. (2012). *Secondary Atomization of Newtonian Liquids in the Bag Breakup Regime : Comparison of Model Predictions to Experimental Data*. Paper presented at the 12th International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Heidelberg, Germany.
90. Michaelides, E., and Crowe, C. T. (2016). *Multiphase Flow Handbook*. US: Taylor & Francis Group, 725-982.
91. Schmehl, R., Maier, G. and Wittig, S. (2000). *CFD analysis of fuel atomization, secondary droplet breakup and spray dispersion in the premix duct of a LPP combustor*. Paper presented at the Eighth International Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, Pasadena, USA.
92. Kékesi, T., Amberg, G. and Pahl Wittberg, L. (2016). Drop deformation and breakup in flows with shear. *Chemical Engineering Science*, 140, 319–329.
93. Wierzbna, A. (1990). Deformation and breakup of liquid drops in a gas stream at nearly critical Weber numbers. *Experiments in Fluids*, 9 (1–2), 59–64.
94. Reitz, R. D. and Bracco, F. V. (1986). Mechanism of breakup of round liquid jets. *Encyclopedia of Fluids Mechanics*, Gulf Publishing, 3 (August), 233–249.
95. Vajpai, S. K., Ota, M., Watanabe, T., Maeda, R., Sekiguchi, T., Kusaka, T., et al. (2014). The development of high performance Ti-6Al-4V alloy via a unique microstructural design with bimodal grain size distribution. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 46 (2), 903–914.
96. Boulos, M. I., Jurekicz, J. W., and Auger, A. (2017). *Process and apparatus for producing powder particles by atomization of a feed material in the form of an elongated member*, WO2015/135075A1, 2-48
97. Yolton, C. F. and Moll, J. H. (1985). *Method For Atomizing Titanium*, 4544404, 1-6.
98. Tsantrizos, P. G., Allaire, F., and Entezarian, M. (1998). Method of Production of Metal and Ceramic Powders by Plasma Atomization, 5,707,419, 1998.
99. Altug-peduk, G. S., Dilibal, S., Harrysson, O., Ozbek, S. and West, H. (2018). Characterization of Ni – Ti alloy powders for use in additive manufacturing. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 59 (4), 433–439.
100. Hryha, E., Shvab, R., Gruber, H., Leicht, A., Nyborg, L., and Hryha, E. (2018). Surface Oxide State on Metal Powder and its Changes during Additive Manufacturing: an Overview. *La Metallurgia Italiana*, 3, 34-39.

101. Polozov, I., Su, V., Popovich, A., Masaylo, D., and Grigoriev, A. (2018). Synthesis of Ti-5Al , Ti-6Al-7Nb , and Ti-22Al-25Nb alloys from elemental powders using powder-bed fusion additive manufacturing. *Journal of Alloys and Compounds*, 763, 436–445.
102. Majumdar, T., Eisenstein, N., Frith, J. E., Cox, S. C., and Birbilis, N. (2018). Additive Manufacturing of Titanium Alloys for Orthopedic Applications : a materials science viewpoint. *Advanced Engineering Materials*, 20(9), 1-28.
103. Moulding, M. I., Kroeger, J., and Ap, R. (2011). Raymor AP & C : Leading the way with plasma atomised Ti spherical powders for MIM. *Powder Injection Moulding International*, 5 (4), 55–57.
104. Dawes, B. J. and Bowerman, R. (2015). Introduction to the Additive Manufacturing Powder Metallurgy Supply Chain. *Johnson Matthey Technology Review*, 59 (3), 243–256.
105. Hirose, Y., Nakamichi, M., Nakamura, K., Tadenuma, K., and Yonehara, K. (2010). *Method and apparatus for producing metal particles and metal particles produced thereby*, JP2010018825A, 3-13.
106. Nickels, L. (2017). Plasma boost for 3D printing. *Metal Powder Report*, 72 (2), 130–132.
107. Hanusiak, W. M. and McBride, D. R. (2018). *Titanium Powder Production Apparatus and Method*, US 9,956,615 B2, 1-4.
108. Yablokova, G., Speirs, M., Humbeeck, J. Van, Kruth, J., Schrooten, J., Cloots, R. (2015). Rheological behavior of β -Ti and NiTi powders produced by atomization for SLM production of open porous orthopedic implants. *Powder Technology*. 283 199–209.
109. Dorval, D., Christopher, A., Kreklewetz, W., and Carabin, P. (2016). *Plasma Apparatus for The Production of High Quality Spherical Powders at High Capacity*, WO 2016/191854 A1, 1-28.
110. Capus, J. (2017). AP & C : moving fast with the rise of AM. *Metal Powder Report*. 72 (1), 22–24.
111. Drouet, M. (2011). *Method and Apparatuses for Preparing Spheroidal Powders*, WO2011/54113, 1-40.
112. Aydın, M. (2005). *Gaz Atomizasyon Yönteminde Yeni Bir Nozul Tasarımı ve Toz Üretimi*, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kütahya, 15-42.
113. Uhlmann, E., Kersting, R., Klein, T. B., Cruz, M. F., and Borille, A. V. (2015). Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components. *Procedia CIRP*. 35 55–60.

114. Prashanth, K. G., Debalina, B., Wang, Z., Gostin, P. F., Gebert, A., Calin, M., et al. (2014). Tribological and corrosion properties of Al-12Si produced by selective laser melting. *Journal of Materials Research*. 29 (17), 2044–2054.
115. Cai, Z., Wang, R., Peng, C., and Zhang, C. (2015). Effect of Particle Size on Microstructure and Cold Compaction of Gas-Atomized Hypereutectic Al-Si Alloy Powder. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 46 (2), 824–830.
116. Van Elsen, M. (2007). *Complexity of Selective Laser Melting: a new optimisation approach*. Ph. D. Thesis, Katholieke Universiteit, Belgium, 18-128.
117. Gibson, I., Rosen, D., and Stucker, B. (2010). *Additive Manufacturing Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing* (Second Edition). US: Springer, 21-352.
118. Simchi, A. (2004). The role of particle size on the laser sintering of iron powder. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 35 (5), 937–948.
119. Gürtler, F. J., Karg, M., Dobler, M., Kohl, S., Tzivilsky, I., and Schmidt, M. (2014). *Influence of powder distribution on process stability in laser beam melting: Analysis of melt pool dynamics by numerical simulations*. Paper presented at the Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 1099–1117.
120. Liu, B., Wildman, R., Tuck, C., Ashcroft, I., and Hague, R. (2011). *Investigation the Effect of Particle Size Distribution on Processing Parameters Optimisation In Selective Laser Melting Process*. Paper presented at the Solid Freeform Fabrication Symposium. Austin, 227–238.
121. Chen, G., Zhao, S. Y., Tan, P., Wang, J., Xiang, C. S., and Tang, H. P. (2018). A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization , plasma rotating electrode process and plasma atomization. *Powder Technology*, 333 38–46.
122. Guo, R., Xu, L., Wu, J., Yang, R., and Zong, B. Y. (2015). Microstructural evolution and mechanical properties of powder metallurgy Ti-6Al-4V alloy based on heat response. *Materials Science and Engineering A*, 639 327–334.
123. Guo, R. P., Xu, L., Zong, B. Y. P., and Yang, R. (2017). Characterization of prealloyed Ti-6Al-4V powders from EIGA and PREP process and mechanical properties of HIPed powder compacts. *Acta Metallurgica Sinica*, 30 (8), 735–744.
124. Gerling, R., Leitgeb, R., and Schimansky, F. P. (1998). Porosity and argon concentration in gas atomized γ -TiAl powder and hot isostatically pressed compacts. *Materials Science and Engineering A*, 252 (2), 239–247.
125. Susan, D. F., Puskar, J. D., Brooks, J. A., and Robino, C. V. (2006). Quantitative characterization of porosity in stainless steel LENS powders and deposits. *Materials Characterization*. 57 (1), 36–43.

126. Cunningham, R., Nicolas, A., Madsen, J., Fodran, E., Anagnostou, E., Sangid, M. D., et al. (2017). Analyzing the effects of powder and post-processing on porosity and properties of electron beam melted Ti-6Al-4V. *Materials Research Letters*. 5 (7), 516–525.
127. Cunningham, R., Narra, S. P., Montgomery, C., Beuth, J., and Rollett, A. D. (2017). Synchrotron-Based X-ray Microtomography Characterization of the Effect of Processing Variables on Porosity Formation in Laser Power-Bed Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 69 (3), 479–484.
128. Ahsan, M. N., Pinkerton, A. J., Moat, R. J., and Shackleton, J. (2011). A comparative study of laser direct metal deposition characteristics using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders. *Materials Science and Engineering A*. 528, 7648–7657.
129. Sun, P., Fang, Z. Z., Zhang, Y., and Xia, Y. (2017). Review of the Methods for Production of Spherical Ti and Ti Alloy Powder. *The Minerals, Metals & Materials Society*, 69 (10), 1853–1860.
130. Birt, A. M., Champagne, V. K., Sisson, R. D., and Apelian, D. (2015). Microstructural Analysis of Cold-Sprayed Ti-6Al-4V at the Micro- and Nano-Scale. *Journal of Thermal Spray Technology*. 24 (7), 1277–1288.
131. Tan, A. W. Y., Sun, W., Bhowmik, A., Lek, J. Y., Marinescu, I., Li, F., et al. (2018). Effect of coating thickness on microstructure, mechanical properties and fracture behaviour of cold sprayed Ti6Al4V coatings on Ti6Al4V substrates. *Surface and Coatings Technology*. 349 (May), 303–317.
132. Tammas-Williams, S., Zhao, H., Léonard, F., Derguti, F., Todd, I., and Prangnell, P. B. (2015). XCT analysis of the influence of melt strategies on defect population in Ti-6Al-4V components manufactured by Selective Electron Beam Melting. *Materials Characterization*. 102 47–61.
133. Tan, A. W. Y., Sun, W., Phang, Y. P., Dai, M., Marinescu, I., Dong, Z. (2017). Effects of Traverse Scanning Speed of Spray Nozzle on the Microstructure and Mechanical Properties of Cold-Sprayed Ti6Al4V Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 26 (7), 1484–1497.
134. Tammas-Williams, S., Withers, P. J., Todd, I., and Prangnell, P. B. (2016). The Effectiveness of Hot Isostatic Pressing for Closing Porosity in Titanium Parts Manufactured by Selective Electron Beam Melting. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 47 (5), 1939–1946.
135. Tammas-Williams, S., Withers, P. J., Todd, I., and Prangnell, P. B. (2016). Porosity regrowth during heat treatment of hot isostatically pressed additively manufactured titanium components. *Scripta Materialia*, 122 72–76.

136. Murr, L. E., Quinones, S. A., Gaytan, S. M., Lopez, M. I., Rodela, A., Martinez, E. Y., et al. (2009). Microstructure and mechanical behavior of Ti-6Al-4V produced by rapid-layer manufacturing, for biomedical applications. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2 (1), 20–32.
137. Gallimore, S. D. (1998). *Operation of a High-Pressure Uncooled Plasma Torch with Hydrocarbon Feedstocks*. Master of Science, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, 15-96.
138. Fridman, A. and Kennedy L. A. (2011). *Plasma Physics and Engineering* (Second Edition). US: Taylor and Francis Group, 3-66.
139. Bittencourt, J. A. (2004). *Fundamentals of Plasma Physics* (Third Edition). New York: Springer, 12-88.
140. Boulos, M. I., Fauchais, P. L., and Pfender, E. (2016). *Handbook of Thermal Plasmas*. USA: Springer, 1-760.
141. Frank, D. A. (1972). *Plasma: the Fourth State of Matter*. Florida: Macmillan International Higher Education, 15-143.
142. Fridman, A. (2008). *Plasma Chemistry*. United Kingdom: Cambridge University Press, 1-10.
143. Morozov, A. I. (2013). *Introduction to Plasma Dynamics*. USA: Taylor & Francis Group, 1-30.
144. Peratt, A. L. (2015). *Physics of the Plasma Universe* (Second Edition). New York: Springer, 1-37.
145. Burton, W. B. (2003). *An Introduction to Plasma Astrophysics and Magnetohydrodynamics* (First Edition). USA: Springer, 1-54.
146. Gerdeman, D. A. and Hecht, N. L. (1972). *Arc Plasma Technology in Materials Science* (First Edition). New York: Springer, 1-4.
147. Kuzuya, M., Sasai, Y., Yamauchi, Y., and Kondo, S. (2010). *Industrial Plasma Technology: Applications from Environmental to Energy Technologies*. US: Wiley, 1-4.
148. Keidar, M., and Beilis, I. I. (2013). *Plasma Engineering Plasma Engineering Applications from Aerospace to Bio and Nanotechnology* (First edition). USA: Elsevier, 1-187.
149. Boulos, M. I., Fauchais, P. L., and Pfender, E. (1994). *Thermal Plasmas Fundamentals and Applications* (First Edition). USA: Springer, 1-462.
150. Vadikkeetil, Y., Ravi, G., and Ramachandran, K. (2017). Prediction of operational characteristics of a dc non-transferred arc plasma torch using similarity criteria. *European Physical Journal D*, 71 (10), 1-10.

151. Ghorui, S., Tiwari, N., Meher, K. C., Jan, A., Bhat, A., and Sahasrabudhe, S. N. (2015). Direct probing of anode arc root dynamics and voltage instability in a dc non-transferred arc plasma jet. *Plasma Sources Science and Technology*, 24 (6), 1-11.
152. Trelles, J. P., Chazelas, C., Vardelle, A., and Heberlein, J. V. R. (2009). Arc plasma torch modeling. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18 (5-6), 728-752.
153. Mostaghimi, J. and Boulos, M. I. (2015). Thermal Plasma Sources: How Well are They Adopted to Process Needs?. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 35 (3), 421-436.
154. Heberlein, J. V. R. (2002). New approaches in thermal plasma technology. *Pure and Applied Chemistry*, 74 (3), 327-335.
155. Entezarian, M., Allaire, F., Tsantrizos, P., and Drew, R. A. L. (1996). Plasma Atomization : A New Process for the Production of Fine , Spherical Powders. *Journal of Mining and Metallurgy*, (June), 53-55.
156. Rao, L., Rivard, F., and Carabin, P. (2013). Thermal plasma torches for metallurgical applications. *TMS Annual Meeting*. 57-65.
157. Zhukov, M. F. and Zasyrkin, I. M. (2007). *Thermal Plasma Torches*. UK: Cambridge International Publishing, 1-610.
158. Lago, F., Gonzalez, J. J., Freton, P., Uhlig, F., Lucius, N., and Piau, G. P. (2006). A numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: Part III. Application to the interaction of a lightning strike and an aircraft in flight. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 39 (10), 2294-2310.
159. Moreau, E., Chazelas, C., Mariaux, G., and Vardelle, A. (2006). Modeling the restrike mode operation of a dc plasma spray torch. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*. 15 (December), 524-530.
160. Collares, M. P. and Pfender, E. (1997). Effect of current connection to the anode nozzle on plasma torch efficiency. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 25 (5), 864-871.
161. Eichert, P., Imbert, M., and Coddet, C. (1998). Numerical study of an ArH₂ gas mixture flowing inside and outside a dc plasma torch. *Journal of Thermal Spray Technology*. 7 (4), 505-512.
162. Fauchais, P. L. and Vardelle, A. (2000). Pending problems in thermal plasmas and actual development. *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 42 B365-B383.
163. Yugesh, V., Ravi, G., Ramachandran, K., Vidhi, G., and Meher, K. C. (2018). Influence of the Shroud Gas Injection Configuration on the Characteristics of a DC Non-transferred Arc Plasma Torch. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 38 (4), 759-770.

164. Paik, S., Huang, P. C., Heberlein, J., and Pfender, E. (1993). Determination of the arc-root position in a DC plasma torch. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 13 (3), 379–397.
165. Pawlowski, L. (2008). *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings*. (Second Edition). England: John Wiley & Sons, 1-47.
166. L. Marqués, J., Forster, G., and Schein, J. (2009). Multi-Electrode Plasma Torches: Motivation for Development and Current State-of-the-Art. *The Open Plasma Physics Journal*, 2 (1), 89–98.
167. Westhoff, R. and Szekely, J. (1991). A model of fluid, heat flow, and electromagnetic phenomena in a nontransferred arc plasma torch. *Journal of Applied Physics*, 70 (7), 3455–3466.
168. Nogues, E., Vardelle, M., Fauchais, P., and Granger, P. (2008). Arc voltage fluctuations: Comparison between two plasma torch types. *Surface and Coatings Technology*, 202 (18), 4387–4393.
169. Ghorui, S., Sahasrabudhe, S. N., and Das, A. K. (2010). Current transfer in dc non-transferred arc plasma torches. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43 (24), 1-18.
170. Nemchinsky, V. A. (2005). Anode layer in a high-current arc in atmospheric pressure nitrogen. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38 (22), 4082–4089.
171. Murphy, A. B. and Uhrlandt, D. (2018). Foundations of High-Pressure Thermal Plasmas. *Plasma Sources Science and Technology*, 27 (6), 1-20.
172. Coulombe, S. and Meunier, J. L. (1997). Arc-cold cathode interactions: Parametric dependence on local pressure. *Plasma Sources Science and Technology*, 6 (4), 508–517.
173. Trelles, J. P., Pfender, E., and Heberlein, J. V. R. (2006). Multiscale finite element modeling of arc dynamics in a DC plasma torch. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 26 (6), 557–575.
174. Li, H., Pfender, E., and Chen, X. (2003). Application of Steenbeck ' s minimum principle for three-dimensional modelling of DC arc plasma torches. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36, 1084–1096.
175. Wutzke, S., Pfender, E., and Eckert, E. (1968). Symptomatic behavior of an electric arc with a superimposed flow. *AIAA Journal*, 6 (8), 1474–1482.
176. Wu, C. and Pan, W. (2011). Unsteadiness in non-transferred dc arc plasma generators. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 2 (024001), 1-7
177. Hu, M., Wan, S., Xia, Y., Ren, Z., and Wang, H. (2013). Effect of an external magnetic field on plasma torch discharge fluctuation. *A Letters Journal Exploring The Frontiers of Physics*, 102 (5), 1-6.

178. Trelles, J. P., Heberlein, J. V. R., and Pfender, E. (2008). The reattachment process in nonequilibrium arc simulations. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 36 (4), 1024–1025.
179. Trelles, J. P. and Heberlein, J. V. R. (2006). Simulation results of arc behavior in different plasma spray torches. *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, 15 (December), 563–569.
180. Trelles, J. P., Heberlein, J. V. R., and Pfender, E. (2007). Non-equilibrium modelling of arc plasma torches. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40 (19), 5937–5952.
181. Pfender, E. (1999). Thermal plasma technology: Where do we stand and where are we going?. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 19 (1), 1–31.
182. Alaya, M., Chazelas, C., Mariaux, G., and Vardelle, A. (2014). Arc-Cathode Coupling in the Modeling of a Conventional DC Plasma Spray Torch. *Journal of Thermal Spray Technology*. 24 (1–2), 3–10.
183. Tu, X., Yan, J. H., Chéron, B. G., and Cen, K. F. (2008). Fluctuations of DC atmospheric double arc argon plasma jet. *Vacuum*, 82 (5), 468–475.
184. Meillot, E., Vincent, S., Caruyer, C., Caltagirone, J. P., and Damiani, D. (2009). From DC time-dependent thermal plasma generation to suspension plasma-spraying interactions. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18 (5–6), 875–886.
185. Janisson, S., Vardelle, A., Coudert, J. F., Fauchais, P., and Meillot, E. (1999). Analysis of the stability of DC plasma gun operating with Ar-He-H₂ gas mixtures. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 891, 407–416.
186. Tiwari, N., Bhandari, S., and Ghorui, S. (2018). Stability and structures in atmospheric pressure DC non-transferred arc plasma jets of argon, nitrogen, and air. *Physics of Plasmas*. 25 (7), 2-13.
187. Coudert, J. F., Planche, M. P., and Fauchais, P. (1996). Characterization of d.c. plasma torch voltage fluctuations. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 16 (1), 211–227.
188. Bolot, R., Coddet, C., Allimant, A., and Billières, D. (2011). Modeling of the plasma flow and anode region inside a direct current plasma gun. *Journal of Thermal Spray Technology*. 20 (1–2), 21–27.
189. Alaya, M., Chazelas, C., and Vardelle, A. (2016). Parametric Study of Plasma Torch Operation Using a MHD Model Coupling the Arc and Electrodes. *Journal of Thermal Spray Technology*. 25 (1–2), 36–43.
190. Vardelle, A., Moreau, C., Akedo, J., Ashrafizadeh, H., Berndt, C. C., Berghaus, J. O., et al. (2016). The 2016 Thermal Spray Roadmap. *Journal of Thermal Spray Technology*. 25 (8), 1376–1440.
191. Li, H. and Chen, X. (2001). Three-dimensional modelling of a dc non-transferred arc plasma torch. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 34 (17), 1-6.

192. Li, H., Pfender, E., and Chen, X. (2003). Application of Steenbeck's minimum principle for three-dimensional modelling of DC arc plasma torches. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36 (9), 1084–1096.
193. Benilov, M. S. and Naidis, G. V. (2010). What is the mathematical meaning of Steenbeck's principle of minimum power in gas discharge physics?. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43 (29), 1–9.
194. Christen, T. (2010). Comment on "What is the mathematical meaning of Steenbeck's principle of minimum power in gas discharge physics?" *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43 (29), 1-6.
195. Coudert, J. F., Rat, V., and Rigot, D. (2007). Influence of Helmholtz oscillations on arc voltage fluctuations in a dc plasma spraying torch. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 40 (23), 7357–7366.
196. Rat, V. and Coudert, J. F. (2010). Acoustic stabilization of electric arc instabilities in nontransferred plasma torches. *Applied Physics Letters*, 96 (10), 1–4.
197. Noguès, E., Fauchais, P., Vardelle, M., and Granger, P. (2007). Relation between the arc-root fluctuations, the cold boundary layer thickness and the particle thermal treatment. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16 (5–6), 919–926.
198. Xi, C., Teng, L., Chengkang, W., Wenxia, P., and Xian, M. (2007). Comparative Observation of Ar, Ar-H₂ and Ar-N₂ DC Arc Plasma Jets and Their Arc Root Behaviour at Reduced Pressure. *Plasma Science and Technology*, 9 (2), 152–157.
199. Goyal, V., Ravi, G., and Mukherjee, S. (2018). Role of return currents in the dynamics of a magnetically rastered plasma torch. *Physics of Plasmas*, 25 (7), 1-8.
200. Venkatramani, N. (2002). Industrial plasma torches and applications. *Current Science*, 83 (3), 254–262.
201. Suryanarayana, C. (1999). *Non-equilibrium Processing of Materials* (First Edition). UK: Pergamon Materials Series, 23-45.
202. Capus, J. (2017). Titanium powder developments for AM – A round-up. *Metal Powder Report*, 72 (6), 384–388.
203. Gleizes, A., Gonzalez, J. J., and Freton, P. (2005). Thermal plasma modelling. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38 (9), 2-32.
204. Murphy, A. B. (2001). Thermal plasmas in gas mixtures. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 34 (20), 2-24.
205. Murphy, A. B. and Arundelli, C. J. (1994). Transport coefficients of argon, nitrogen, oxygen, argon-nitrogen, and argon-oxygen plasmas. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 14 (4), 451–490.

206. Pateyron, B., Elchinger, M. F., Delluc, G., and Fauchais, P. (1996). Sound velocity in different reacting thermal plasma systems. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 16 (1), 39–57.
207. Pateyron, B., Elchinger, M. F., Delluc, G., and Fauchais, P. (1992). Thermodynamic and transport properties of Ar-H₂ and Ar-He plasma gases used for spraying at atmospheric pressure. I: Properties of the mixtures. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 12 (4), 421–448.
208. Selvan, B., Ramachandran, K., Pillai, B. C., and Subhakar, D. (2011). Numerical modelling of Ar-N₂ plasma jet impinging on a flat substrate. *Journal of Thermal Spray Technology*, 20 (3), 534–548.
209. Selvan, B. and Ramachandran, K. (2009). Comparisons between two different three-dimensional arc plasma torch simulations. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18 (5–6), 846–857.
210. Selvan, B., Ramachandran, K., Sreekumar, K. P., Thiyagarajan, T. K., and Ananthapadmanabhan, P. V. (2009). Three-dimensional numerical modeling of an Ar-N₂ plasma arc inside a non-transferred torch. *Plasma Science and Technology*, 11 (6), 679–687.
211. Ghorui, S., Vysohlid, M., Heberlein, J. V. R., and Pfender, E. (2007). Probing instabilities in arc plasma devices using binary gas mixtures. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 76 (1), 1–13.
212. Solonenko, O. P. and Smirnov, A. V. (2014). Advanced oxide powders processing based on cascade plasma. *Journal of Physics: Conference Series*, 550 (1), 2-11.
213. Harris, W. J. (2002). *A Study of Cathode Erosion in High Power Arcjets*, Ph. D. Thesis, Texas Tech University, USA, 1-250.
214. Felipini, C. L. and Pimenta, M. M. (2015). Some numerical simulation results of swirling flow in d.c. plasma torch. *Journal of Physics: Conference Series*, 591 (1), 2-14.
215. Benilov, M. S. and Marotta, A. (1995). A model of the cathode region of atmospheric pressure arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 28 (9), 1869–1882.
216. Liang, P. (2018). *Self-Consistent Modelling of Non-Thermal Atmospheric Argon Plasma During Arc Discharge and Its Interaction with Metal Electrodes*, Universität Bremen, Germany, 10-98.
217. Ramachandran, K., Marques, J. L., Vaben, R., and Stöver, D. (2006). Modelling of arc behaviour inside a F4 APS torch. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39 (15), 3323–3331.
218. Hardy, T. L. and Nakanishi, S. (1984). Cathode Degradation and Erosion in High Pressure Arc Discharges. *International Electric Propulsion*, 84, 2-23..

219. Liang, P. and Groll, R. (2018). Numerical Study of Plasma – Electrode Interaction During Arc Discharge in a DC Plasma Torch. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 46 (2), 363–372.
220. Zhu, P., Lowke, J. J., Morrow, R., and Haidar, J. (1995). Prediction of anode temperatures of free burning arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 28 (7), 1369–1376.
221. Benilov, M. S. and Cunha, M. D. (2002). Heating of refractory cathodes by high-pressure arc plasmas : I. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35, 1736–1750.
222. Das, A. K. (1994). DC plasma torch voltage and current characteristics through heat balance measurements. *Plasma Sources Science and Technology*, 3, 108–113.
223. Shih, K. T., Pfender, E., Ibele, W. E., and Eckert, E. R. G. (1968). Experimental anode heat-transfer studies in a coaxial arc configuration. *AIAA Journal*. 6 (8), 1482–1487.
224. Leblanc, L. and Moreau, C. (2002). The long-term stability of plasma spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*. 11 (3), 380–386.
225. Sadek, A. A., Ushio, M., and Matsuda, F. (1990). Effect of rare earth metal oxide additions to tungsten electrodes. *Metallurgical Transactions. A, Physical Metallurgy and Materials Science*, 21 A (12), 3221–3236.
226. Tanaka, M., Hashizume, T., Imatsuji, T., Nawata, Y., and Watanabe, T. (2016). Investigation of erosion mechanism of tungsten-based electrode in multiphase AC arc by high-speed visualization of electrode phenomena. *Japanese Journal of Applied Physics*, 55 (07LC01), 1-8.
227. Hantzsche, E. and Jüttner, B. (1985). Current Density in Arc Spots. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 13 (5), 230–234.
228. Gray, E. W. and Pharney, J. R. (1974). Electrode erosion by particle ejection in low-current arcs. *Journal of Applied Physics*, 45 (2), 667–671.
229. Peters, J., Yin, F., Borges, C. F. M., Heberlein, J., and Hackett, C. (2005). Erosion mechanisms of hafnium cathodes at high current. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38 (11), 1781–1794.
230. Mitterer, C., Granzer, T., Kathrein, M., Schröder, J., and Heißl, M. (2013). Substitution of ThO₂ by La₂O₃ additions in tungsten electrodes for atmospheric plasma spraying. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 43, 181–185.
231. Liu, Z. M., Fang, Y. X., Chen, S. Y., Zhang, T., Lv, Z. Y., and Luo, Z. (2019). Focusing cathode tip characteristics in cooling tungsten. *Energy*, 167, 982–993.
232. Chau, S. W., Hsu, K. L., Szente, R. N., Munz, R. J., and Drouet, M. G. (1994). Erosion rate evaluation of plasma torch electrodes from measurements of. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 27, 2522–2525.

233. Harris, W. J., O'Hair, E. A., Hatfield, L. L., and Kristiansen, M. (1993). Cathode Erosion Research on Medium to High Power Arcjet Thrusters. *23rd International Electric Propulsion Conference*. 280–292.
234. Guo, Z., Yin, S., Qian, Z., Liao, H., and Gu, S. (2015). Effect of the deviation of the current density profile center on the three-dimensional non-transferred arc plasma torch. *Computers and Fluids*. 114, 163–171.
235. Boccaccini, A. R., Wise, M., Gomez, E., Deegan, D., Rani, D. A., and Cheeseman, C. R. (2008). Thermal plasma technology for the treatment of wastes: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*. 161 (2–3), 614–626.
236. Oerlikon Metco (2015). Metco F4MB-XL Series. *Product Data Sheet*, Switzerland. 1-6
237. Wang, C., Sun, L., Sun, Q., Zhang, Z., Xia, W., and Xia, W. (2019). Experimental Observations of Constricted and Diffuse Anode Attachment in a Magnetically Rotating Arc at Atmospheric Pressure. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 39 (2), 407–421.
238. Sun, L., Lu, Z., Wang, C., Xia, W., Sun, Q., and Xia, W. (2019). Spot and diffuse mode of cathode attachments in a magnetically rotating arc plasma generator at atmospheric pressure. *Journal of Applied Physics*, 125 (3), 1-16.
239. Park, J. M., Kim, K. S., Hwang, T. H., and Hong, S. H. (2004). Three-dimensional modeling of arc root rotation by external magnetic field in nontransferred thermal plasma torches. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 32 (2), 479–487.
240. Cao, X., Yu, D., Xiang, Y., and Yao, J. (2016). Influence of the Gas Injection Angle on the Jet Characteristics of a Non-transferred DC Plasma Torch. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*. 36 (3), 881–889.
241. Liu, F., Yu, D., LV, C., Duan, Y., Zhong, Y., and Yao, J. (2018). Experimental study on the jet characteristics of a steam plasma torch. *Plasma Science and Technology*, 20 (12), 1-10.
242. Lawton, J. (1971). Arc motion in magnetic fields in presence of gas flow. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 4 (12), 1946–1957.
243. Goyal, V., Ravi, G., Bandyopadhyay, P., Banerjee, S., Yuges, V., and Mukherjee, S. (2017). Study of dynamical behaviour of the plasma in a dc non-transferred plasma torch using fast imaging. *Physics of Plasmas*, 24 (3), 1-12.
244. Bobzin, K., Öte, M., Knoch, M. A., Heinemann, H., Zimmermann, S., and Schein, J. (2019). Influence of external magnetic fields on the coatings of a cascaded plasma generator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 480 (012004), 1–11.

245. Miao, J., Yu, D., Cao, X., Xiang, Y., Xiao, M., and Yao, J. (2015). Experimental study on the characteristics of a miniature laminar plasma torch with different gas flow patterns. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 35 (5), 879–883.
246. Cao, X., Yu, D., Xiao, M., Miao, J., Xiang, Y., and Yao, J. (2016). Design and characteristics of a laminar plasma torch for materials processing. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 36 (2), 693–710.
247. Urbakh, E. K., Urbakh, A. E., Anshakov, A. S., Faleev, V. A., and Radko, S. I. (2015). Electric-arc steam plasma generator. *Thermophysics and Aeromechanics*, 22 (1), 95–104.
248. Gallimore, S. D. (2001). *A Study of Plasma Ignition Enhancement for Aeroramp Injectors in Supersonic Combustion Applications*, Ph. D. Thesis, The Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, 10-271.
249. Lago, F., Gonzalez, J. J., Freton, P., and Gleizes, A. (2004). A numerical modelling of an electric arc and its interaction with the anode: Part I. The two-dimensional model. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37 (6), 883–897.
250. Huang, H. and Pan, W. (2008). Arc root motion in an argon-hydrogen DC plasma torch. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 36 (4), 1050–1051.
251. Herbert, C. G. and Johnstone, R. A. W. (2010). Plasma Torches; APT, RPT and Minigun. *PyroGenesis*, 1-8.
252. Zhou, X. and Heberlein, J. (1994). Analysis of the arc-cathode interaction of free-burning arcs. *Plasma Sources Science Technology*, 3, 564-574.
253. Chamorro, J. C., Prevosto, L., Cejas, E., and Kelly, H. (2019). Quantitative schlieren diagnostic applied to a nitrogen thermal plasma jet. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 47 (1), 473–482.
254. Cao, X., Yu, D., and Li, C. (2018). Influences of the Arc Chamber Length on the Jet Characteristics of Laminar Plasma Torch. *IEEE Transactions on Plasma Science*. 46 (8), 3017–3021.
255. Huang, R., Fukanuma, H., Uesugi, Y., and Tanaka, Y. (2011). An Improved Local Thermal Equilibrium Model of DC Arc Plasma Torch. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 39 (10), 1974–1982.
256. Cao, X., Yu, D., Xiang, Y., Li, C., Jiang, H., and Yao, J. (2017). Study on the ignition process of a segmented plasma torch. *Plasma Science and Technology*, 19 (7), 1-8.
257. Coudert, J. F. and Rat, V. (2010). The role of torch instabilities in the suspension plasma spraying process. *Surface and Coatings Technology*, 205 (4), 949–953.
258. Rat, V. and Coudert, J. F. (2010). Pressure and arc voltage coupling in dc plasma torches: Identification and extraction of oscillation modes. *Journal of Applied Physics*, 108 (4), 1-9.

259. Ramasamy, R. and Selvarajan, V. (2002). Current-voltage characteristics of a non-transferred plasma spray torch. *The European Physical Journal D - Atomic, Molecular and Optical Physics*, 8 (1), 125–129.
260. Waleed Sunjuq, W. K., Yurtkuran, E., Özsunar, A. K., and Ünal, R. (2018). Investigation of the effect of gas flow rate and electric current on plasma jet temperature and velocity at torch exit by CFD analysis. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 361-369.
261. Zhang, D., Zheng, L., Hu, X., and Zhang, H. (2016). Numerical studies of arc plasma generation in single cathode and three-cathode plasma torch and its impact on plasma spraying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 98, 508–522.
262. Yurtkuran, E., Unal, R., and Ozsunar, A. (2018). Numerical modeling of torch design for plasma atomization. *Acta Physica Polonica A*, 134 (1), 292–296.
263. Murphy, A. B. and Kovitya, P. (1993). Mathematical model and laser scattering temperature measurements of a direct current plasma torch discharging into air. *Journal of Applied Physics*, 73 (10), 4759–4769.
264. Deng, J., Li, Y., Xu, Y., and Sheng, H. (2011). Numerical simulation of fluid flow and heat transfer in a DC non-transferred arc plasma torch operating under laminar and turbulent conditions. *Plasma Science and Technology*, 13 (2), 201–207.
265. Huang, R., Fukanuma, H., Uesugi, Y., and Tanaka, Y. (2013). Comparisons of two models for the simulation of a DC arc plasma torch. *Journal of Thermal Spray Technology*, 22 (2–3), 183–191.
266. Tanaka, M. and Ushio, M. (1999). Plasma state in free-burning argon arc and its effect on anode heat transfer. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32 (10), 1153–1162.
267. Khrabry, A., Kaganovich, I. D., Nemchinsky, V., and Khodak, A. (2018). Investigation of the short argon arc with hot anode. I. Numerical simulations of non-equilibrium effects in the near-electrode regions. *Physics of Plasmas*, 25 (1), 1-17.
268. Guo, H., Zhang, X. N., Chen, J., Li, H. P., and Ostrikov, K. (2018). Non-equilibrium synergistic effects in atmospheric pressure plasmas. *Scientific Reports*, 8 (1), 1–10.
269. Zhu, P., Lowke, J. J., and Morrow, R. (1992). A Unified Theory of Free Burning Arcs, Cathode Sheaths and Cathodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 25 (8), 1221–1230.
270. Park, E. and Trout, J. (1991). A one-dimensional theory for the electrode sheaths of electric arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 26, 1–16.
271. Chen, D. M., Hsu, K. C., and Pfender, E. (1981). Two - Temperature Modeling of an Arc Plasma Reactor. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 1 (3), 295–314.
272. Haidar, J. (1999). Non-equilibrium modelling of transferred arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 32 (3), 263–272.

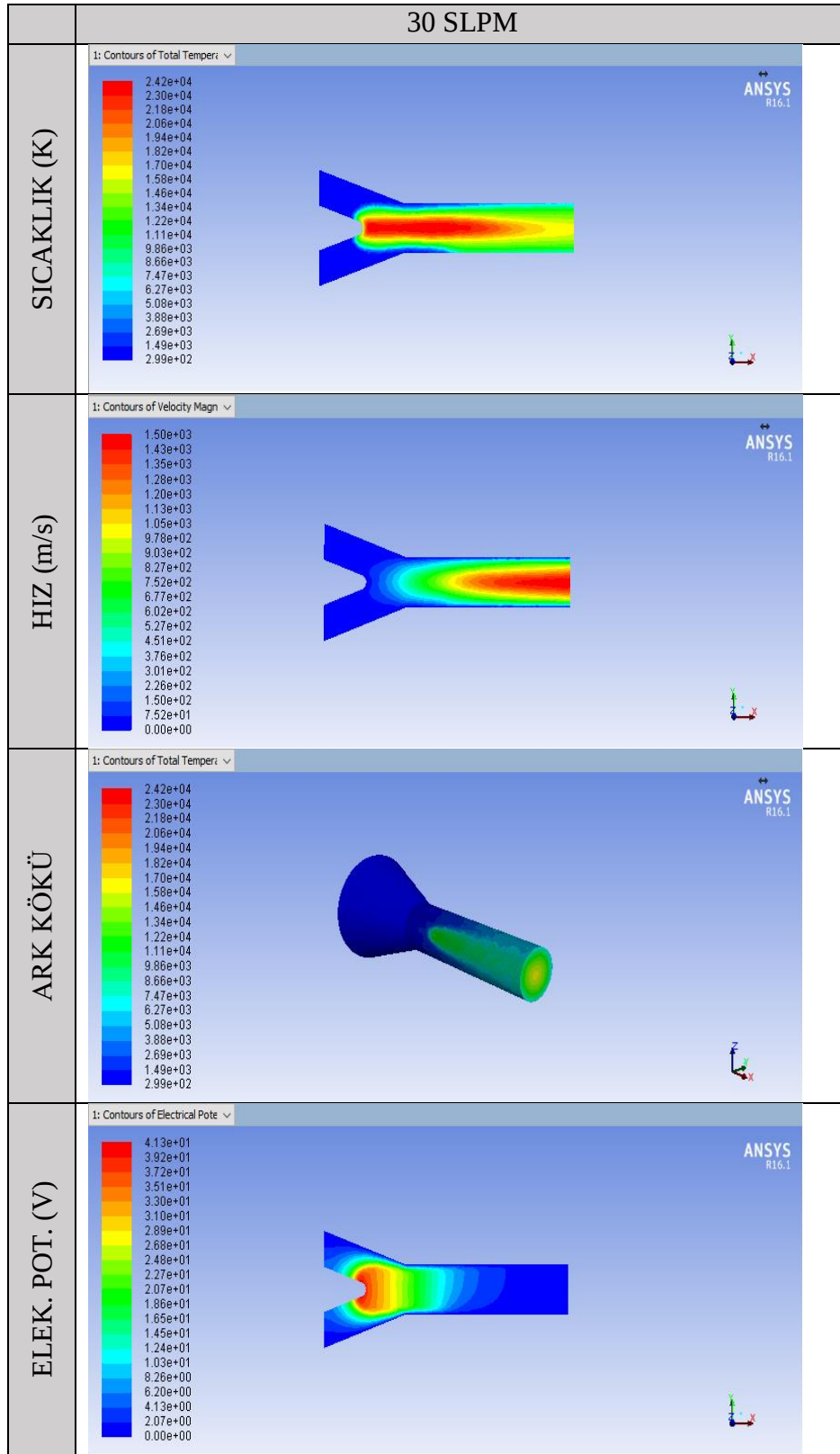
273. Yurtkuran, E., Unal, R., and Ozsunar, A. (2018). Numerical modeling of torch design for plasma atomization. *Acta Physica Polonica A*, 134 (1), 292-295.
274. Gonzalez, J. J., Freton, P., and Gleizes, A. (2002). Comparisons between two- and three-dimensional models : gas injection. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35, 3181–3191.
275. Murphy, A. B. and Kovitya, P. (1993). Mathematical model and laser-scattering temperature measurements of a direct-current plasma torch discharging into air. *Journal of Applied Physics*, 73 (10), 4759–4769.
276. Mariaux, G. and Vardelle, A. (2005). 3-D time-dependent modelling of the plasma spray process. Part 1: Flow modelling. *International Journal of Thermal Sciences*, 44 (4), 357–366.
277. Meillot, E., Guenadou, D., and Bourgeois, C. (2008). Three-dimension and transient D.C. Plasma flow modeling. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 28 (1), 69–84.
278. Pourang, K., Moreau, C., and Dolatabadi, A. (2016). Effect of Substrate and Its Shape on in-Flight Particle Characteristics in Suspension Plasma Spraying. *Journal of Thermal Spray Technology*, 25 (1–2), 44–54.
279. Waleed Sunjuq, W. K. (2016). *Argon DC taşınnımsız ark plazma torcunun üç boyutlu simülasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-52.
280. Demir, F. (2018). *Plazma Tabancalarındaki Plazma Oluşumunun Sayısal Modellenmesi ve Parametrik İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-63.
281. Lowke, J. J. (1979). Simple theory of free-burning arcs. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 12, 1873–1886.
282. Amakawa, T., Jenista, J., Heberlein, J., and Pfender, E. (1998). Anode-boundary-layer behaviour in a transferred, high-intensity arc. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 31 (20), 2826–2834.
283. Park, J., Heberlein, J. V. R., Pfender, E., Candler, G., and Chang, C. H. (2008). Two-dimensional numerical modeling of direct-current electric arcs in nonequilibrium. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 28 (2), 213–231.
284. Bauchire, J. M., Gonzalez, J. J., and Gleizes, A. (1997). Modeling of a DC Plasma Torch in Laminar and Turbulent Flow. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 17 (4), 409–432.
285. Jenista, J. and Heberlein, J. V. R. (1997). Numerical model of the anode region of high-current electric arcs. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 25 (5), 883–890.

286. Bhuyan, P. J. and Goswami, K. S. (2007). Two-dimensional and three-dimensional simulation of DC plasma torches. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 35 (6), 1781–1786.
287. İnternet: Automation Creations, Inc.. (2009). *Matweb, Katot Malzemesinin Özellikleri*. URL: <http://www.matweb.com>, Son erişim tarihi 10.03.2019.
288. Welsch, G., Boyer, R., and Collings, E. W. (1993). *Materials Properties Handbook: Titanium Alloys*. USA: ASM International, 1-68.
289. ASM International. Handbook Committee (Second Edition). (1990). *Properties and selection: nonferrous alloys and special-purpose materials*. USA: ASM International, 1-256.
290. Benjamin, D. and Kirkpatrick, C. W. (1980). *Properties and selection: stainless steels, tool materials and special purpose metals*. USA: ASM International, 65-342.
291. ANSYS (2006). “Magnetohydrodynamics (MHD) Module Manual”, 1-47.
292. ANSYS (2015). “Ansys Fluent Theory Guide Version 15.0”, 1-1251.
293. Selvan, B., Ramachandran, K., Thiyagarajan, T. K., Sreekumar, K. P., and Ananthapadmanabhan, P. V. (2010). Modelling of non-transferred argon-nitrogen plasma arc and plasma jet. *Journal of Physics: Conference Series*, 208 (012047), 2-11.
294. Larouche, F., Francis, T. L., and Matthieu, B. (2018). *Plasma Atomization Metal Powder Manufacturing Processes And System Therefor*, US 2018 / 0214956 A1, 2-8.
295. Seyda, V., Herzog, D., and Emmelmann, C. (2017). Relationship between powder characteristics and part properties in laser beam melting of Ti-6Al-4V, and implications on quality. *Journal of Laser Applications*, 29 (2), 1-9.
296. Kim, Y., Kim, E. P., Song, Y. B., Lee, S. H., and Kwon, Y. S. (2014). Microstructure and mechanical properties of hot isostatically pressed Ti-6Al-4V alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 603, 207–212.
297. Birt, A. M., Champagne, V. K., Sisson, R. D., and Apelian, D. (2015). Microstructural analysis of Ti-6Al-4V powder for cold gas dynamic spray applications. *Advanced Powder Technology*, 26, 1335–1347.
298. Zhang, K., Mei, J., Wain, N., and Wu, X. (2010). Effect of hot-isostatic-pressing parameters on the microstructure and properties of powder Ti-6Al-4V hot-isostatically-pressed samples. *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 41 (4), 1033–1045.
299. Larson, J. M., Clark, I. S. R., and Gibson, R. C. (1977). *Porosity Reduction in Inert-Gas Atomized Powders*, 4,047,933, 2-8.
300. Ünal, A. (1989). Liquid break-up in gas atomization of fine aluminum powders. *Metallurgical Transactions B*, 20 (1), 61–69.

301. Guo, Y., Jia, L., Kong, B., Zhang, S., Zhang, F., and Zhang, H. (2017). Applied Surface Science Microstructure of rapidly solidified Nb-based pre-alloyed powders for additive manufacturing. 409, 367–374.
302. Vajpai, S. K. and Ameyama, K. (2013). A novel powder metallurgy processing approach to prepare fine-grained Ti-rich TiAl-based alloys from pre-alloyed powders. *Intermetallics*. 42 (November), 146–155.
303. Yamanoglu, R., German, R. M., Karagoz, S., Bradbury, W. L., Zeren, M., Li, W., (2011). Microstructural investigation of as cast and PREP atomised Ti–6Al–4V alloy. *Powder Metallurgy*. 54 (5), 604–607.
304. Capus, J. (2017). AP&C: moving fast with the rise of AM. *Metal Powder Report*. 72 (1), 22–24.
305. Chen, Y., Zhang, J., Wang, B., and Yao, C. (2018). Comparative study of IN600 superalloy produced by two powder metallurgy technologies : Argon Atomizing and Plasma Rotating Electrode Process. *Vacuum*. 156 (July), 302–309.
306. Hamilton, H., Attia, U. M., Fones, A., Trepleton, R., Hamilton, H., Davies, S. (2014). HIPing of Pd-doped titanium components : A study of mechanical and corrosion properties properties. *Journal of Food Science*, 1, 1-15.

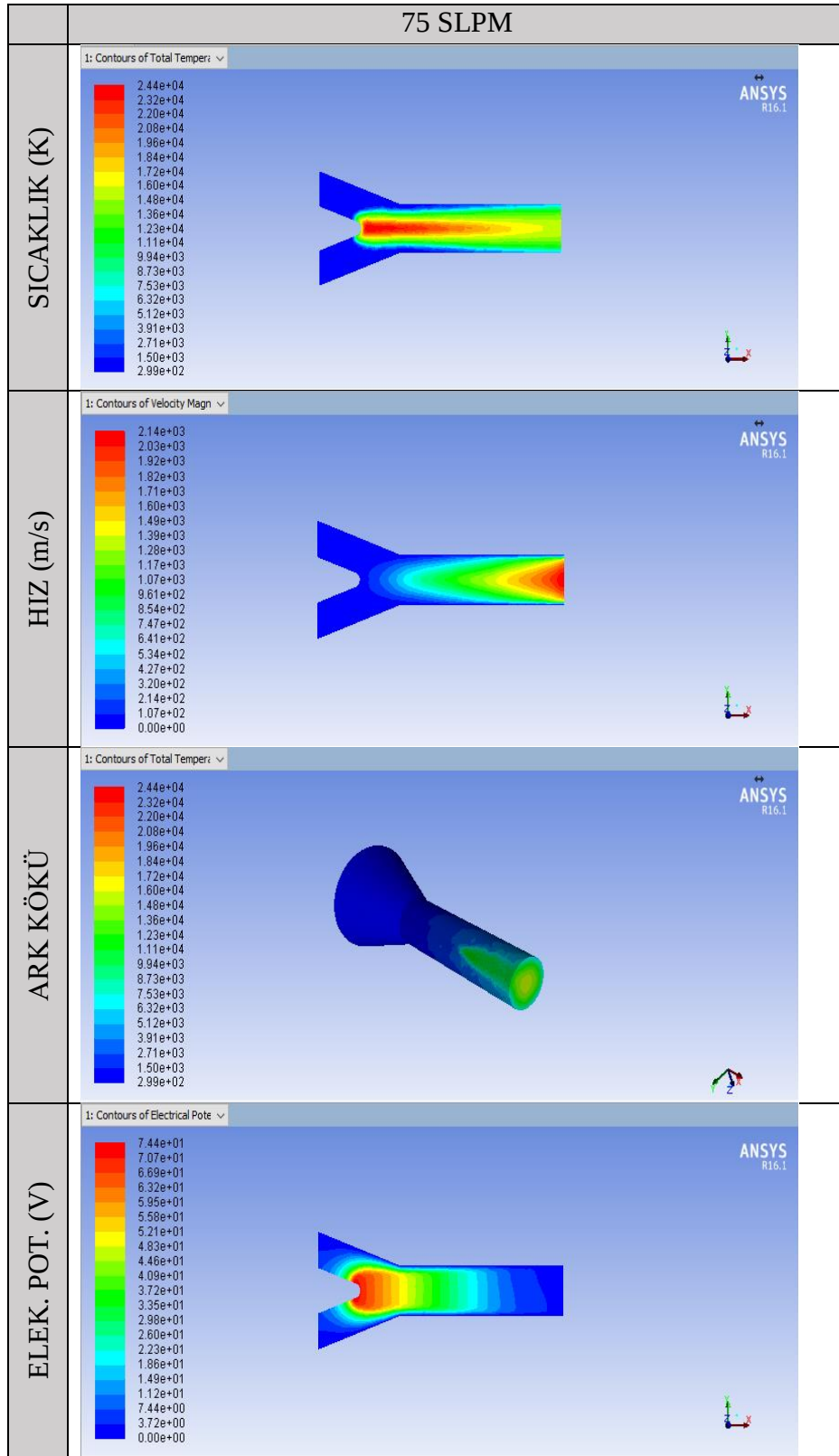
EKLER

EK-1. Sabit 170 A akım değerinde 30 SLPM hacimsel debi değeri için dağılımlar



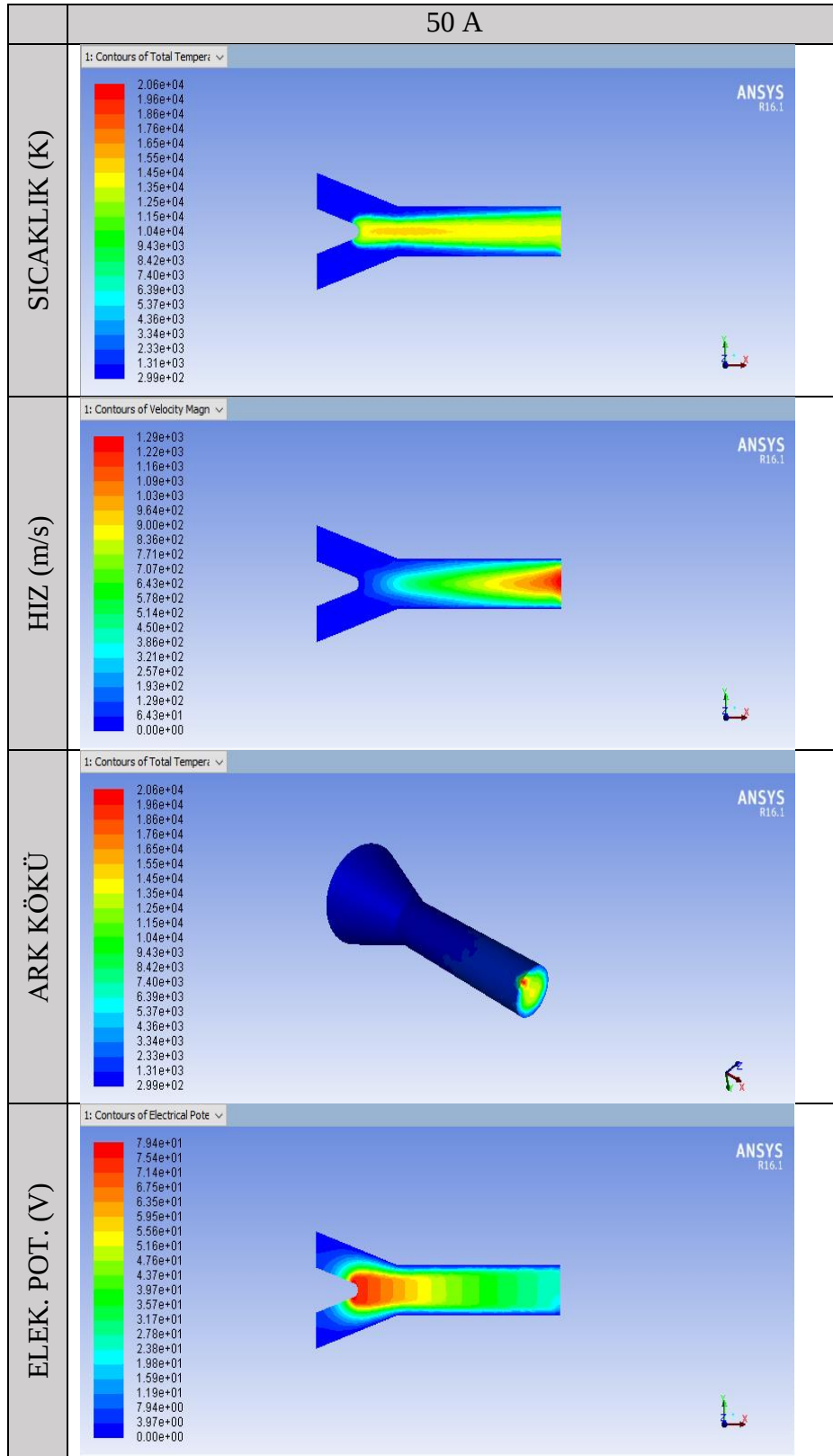
Şekil 1.1. 30 SLPM için sıcaklık, hız, elektrik potansiyeli dağılımları ve ark kökü eklentisinin konumu

EK-2. Sabit 170 A akım değerinde 75 SLPM hacimsel debi değeri için dağılımlar



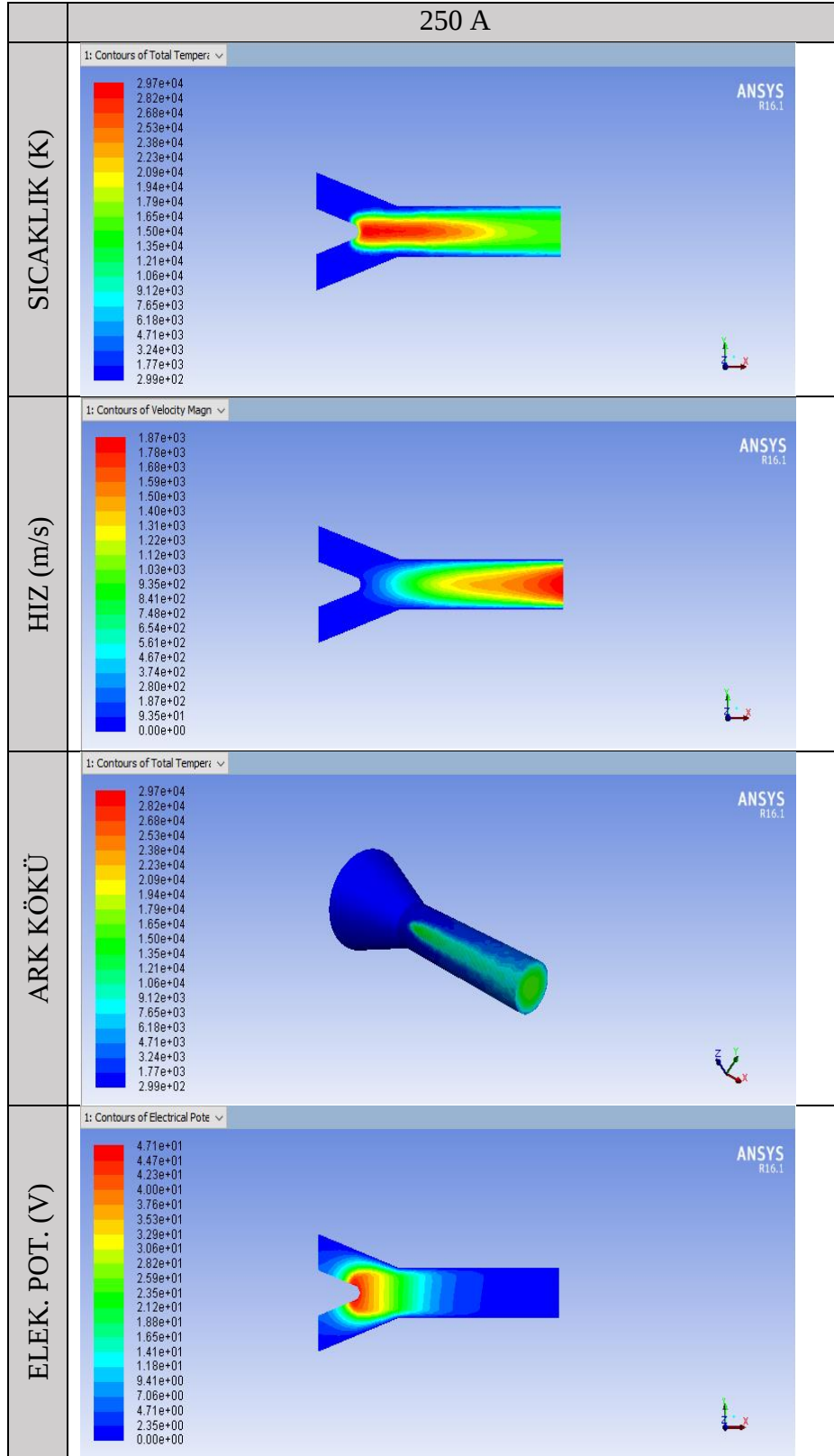
Şekil 2.1. 75 SLPM için sıcaklık, hız, elektrik potansiyeli dağılımları ve ark kökü eklentisinin konumu

EK-3. Sabit 48 SLPM hacimsel debi değerinde 50 A akım değeri için dağılımlar



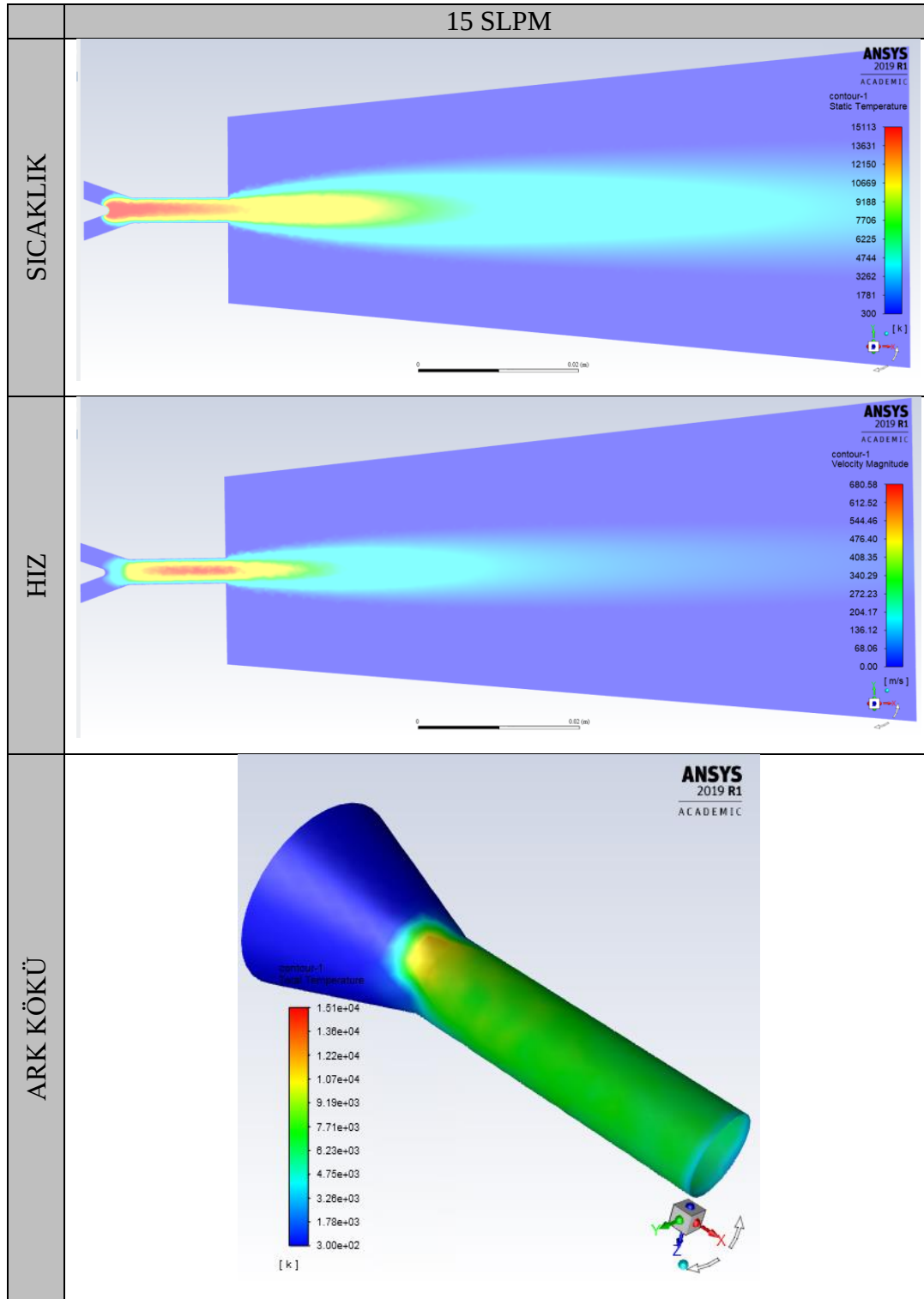
Şekil 3.1. 50 A için sıcaklık, hız, elektrik potansiyeli dağılımları ve ark kökü eklentisinin konumu

EK-4. Sabit 48 SLPM hacimsel debi değerinde 250 A akım değeri için dağılımlar



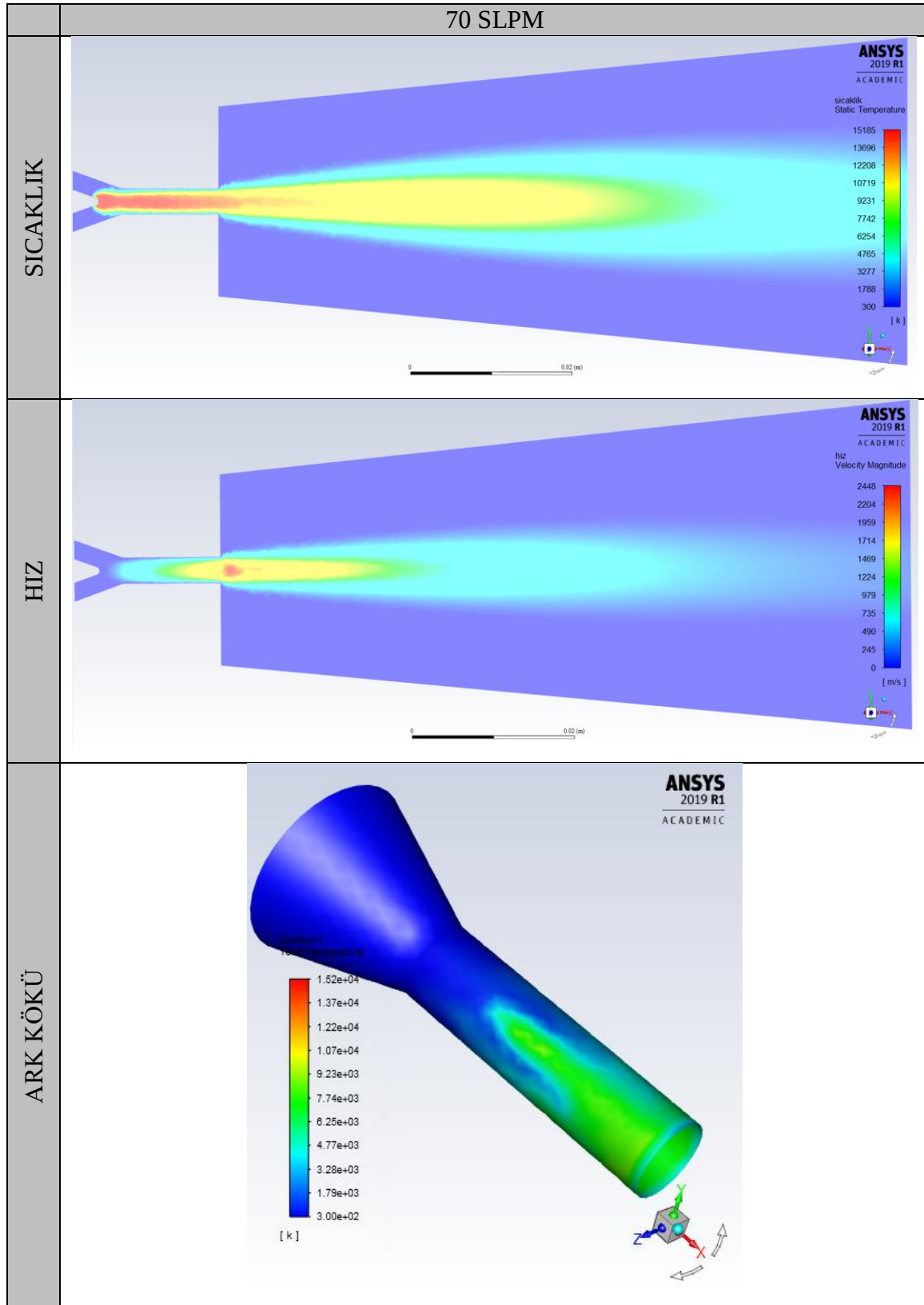
Şekil 4.1. 250 A için sıcaklık, hız, elektrik potansiyeli dağılımları ve ark kökü eklentisinin konumu

EK-5. Sabit 200 A akım değerinde 15 SLPM hacimsel debi değeri için dağılımlar



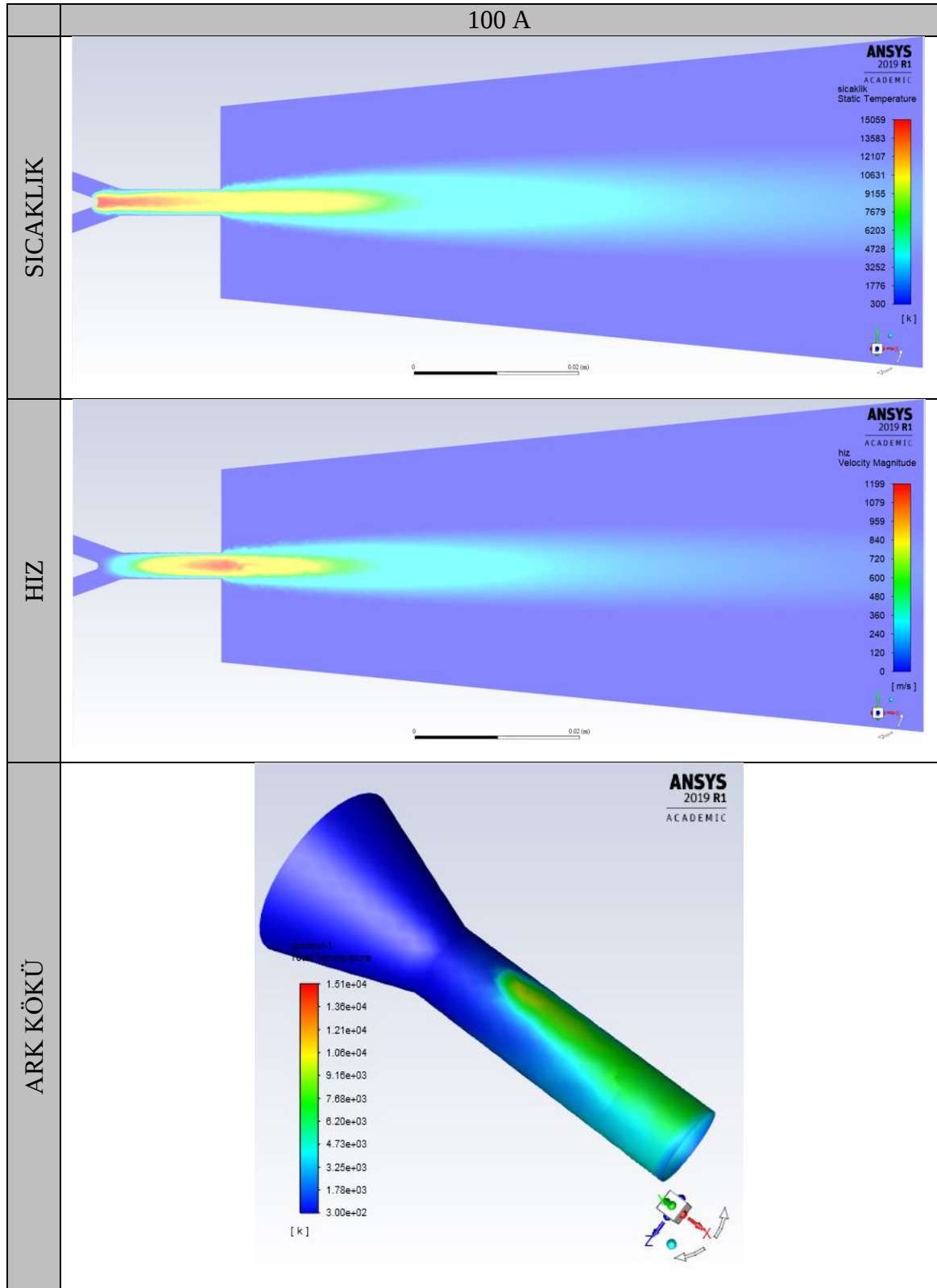
Şekil 5.1. 15 SLPM için sıcaklık, hız, elektrik potansiyeli dağılımları ve ark kökü eklentisinin konumu

EK-6. Sabit 200 A akım değerinde 70 SLPM hacimsel debi değeri için dağılımlar



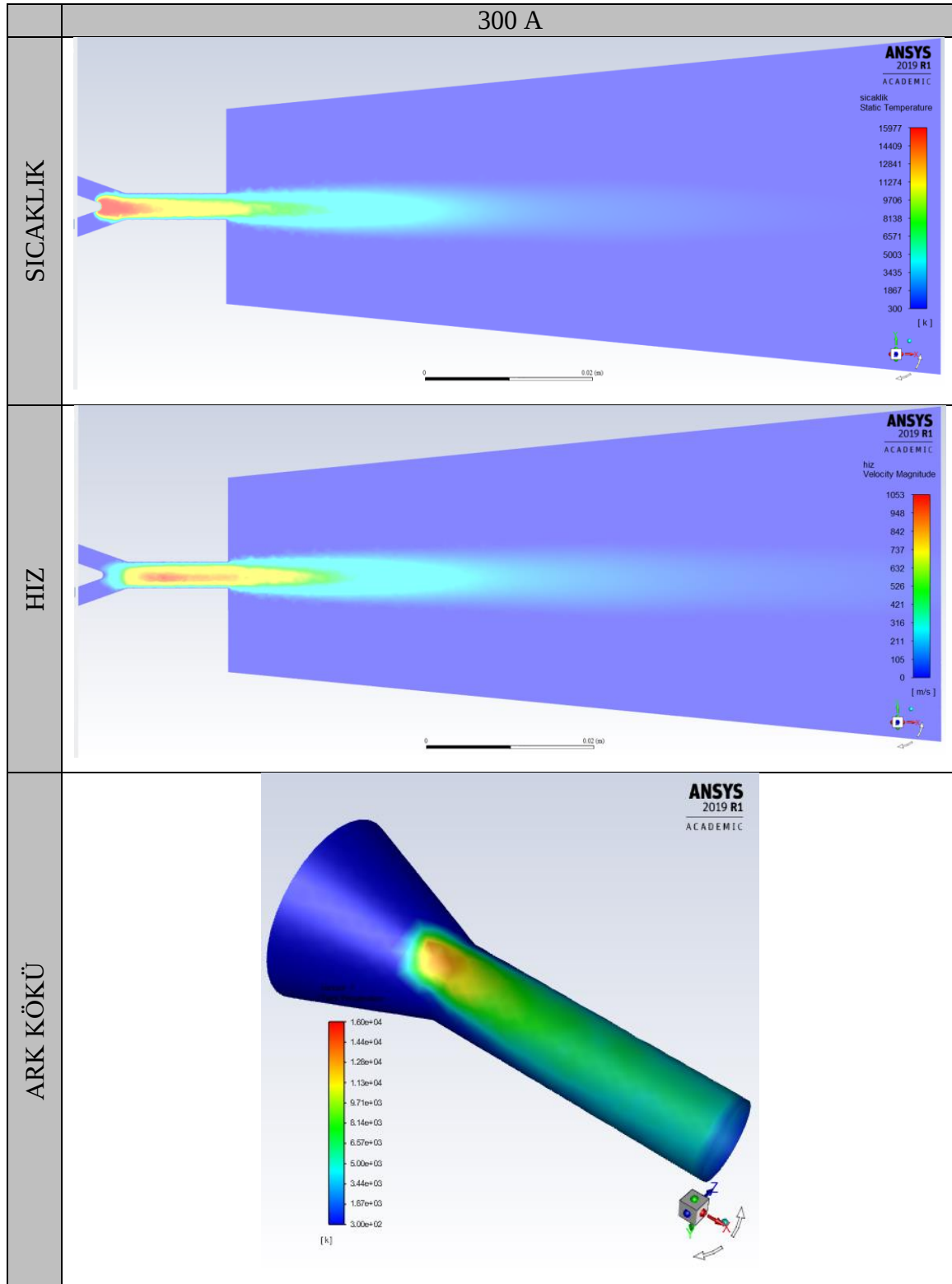
Şekil 6.1. 70 SLPM için sıcaklık, hız, elektrik potansiyeli dağılımları ve ark kökü eklentisinin konumu

EK-7. Sabit 37 SLPM hacimsel debi değeriinde 100 A akım değeri için dağılımlar



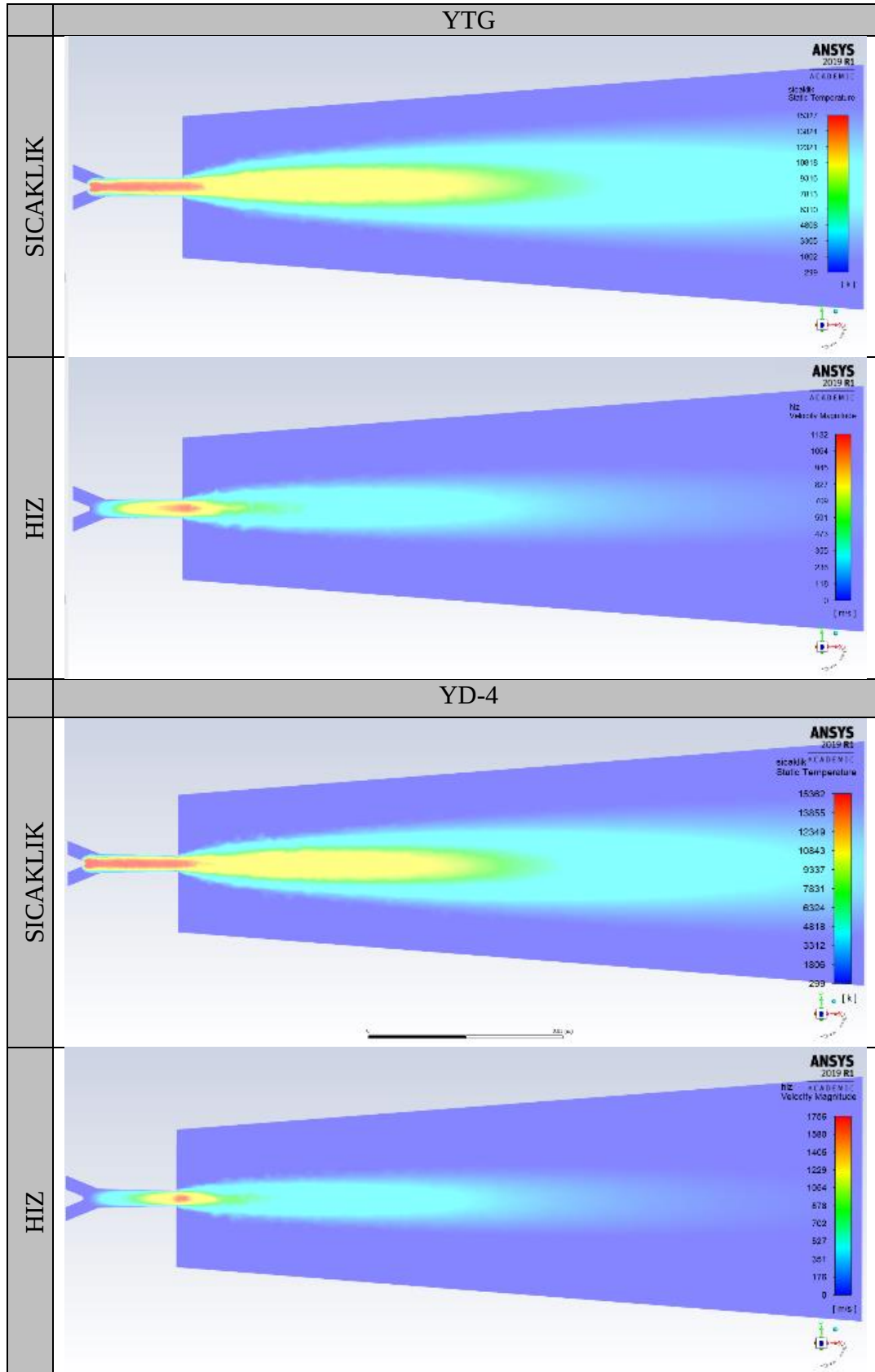
Şekil 7.1. 100 A için sıcaklık, hız, elektrik potansiyeli dağılımları ve ark kökü eklentisinin konumu

EK-8. Sabit 37 SLPM hacimsel debi değeriinde 300 A akım değeri dağılımlar



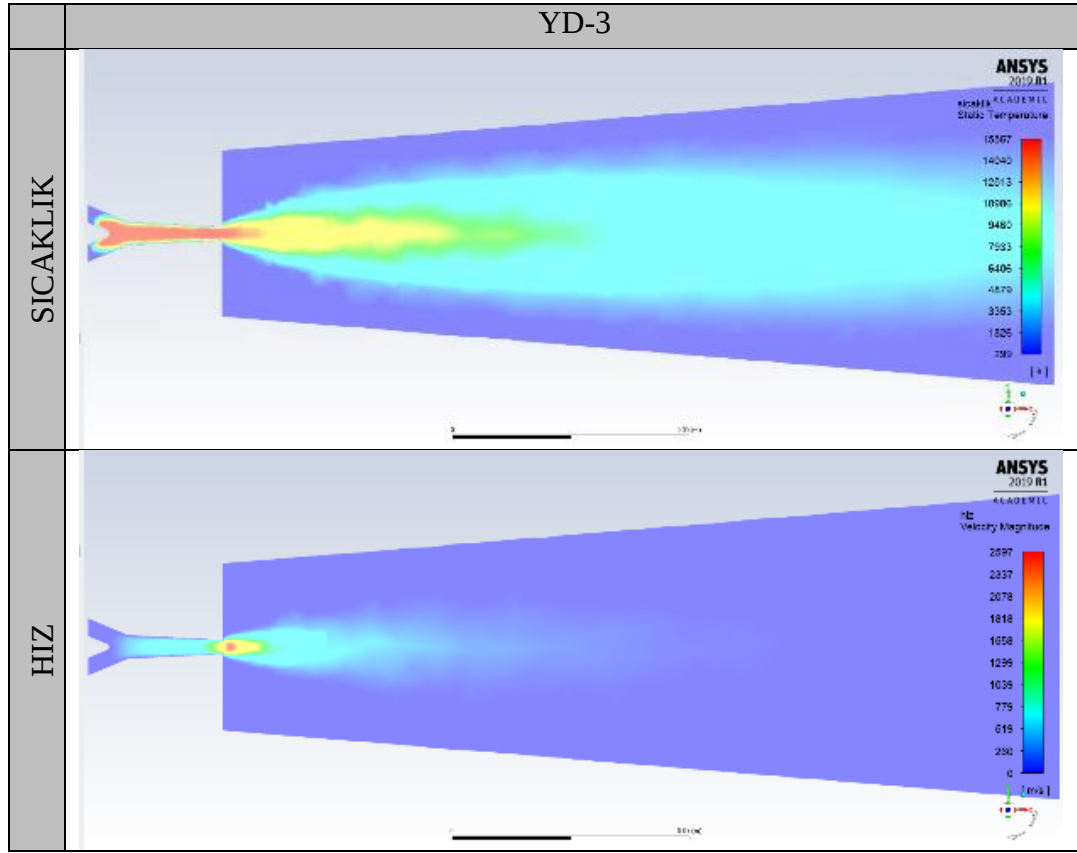
Şekil 8.1. 300 A için sıcaklık, hız, elektrik potansiyeli dağılımları ve ark kökü eklentisinin konumu

EK-9. YTG ve YD geometrileri için dağılımlar



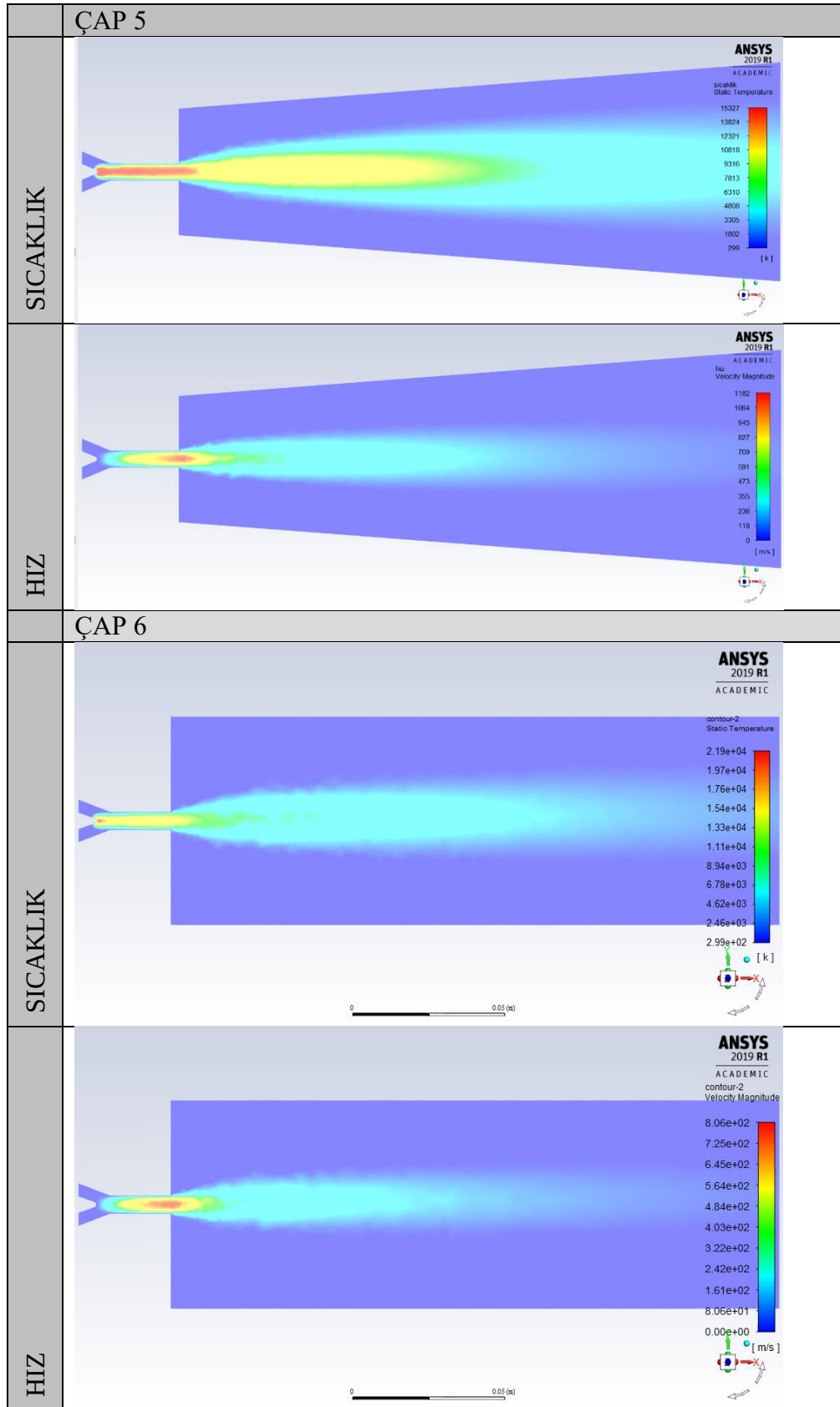
Şekil 9.1. YTG ve YD geometrileri için sıcaklık ve hız dağılımları

EK-9. (devam) YTG ve YD geometrileri için dağılımlar



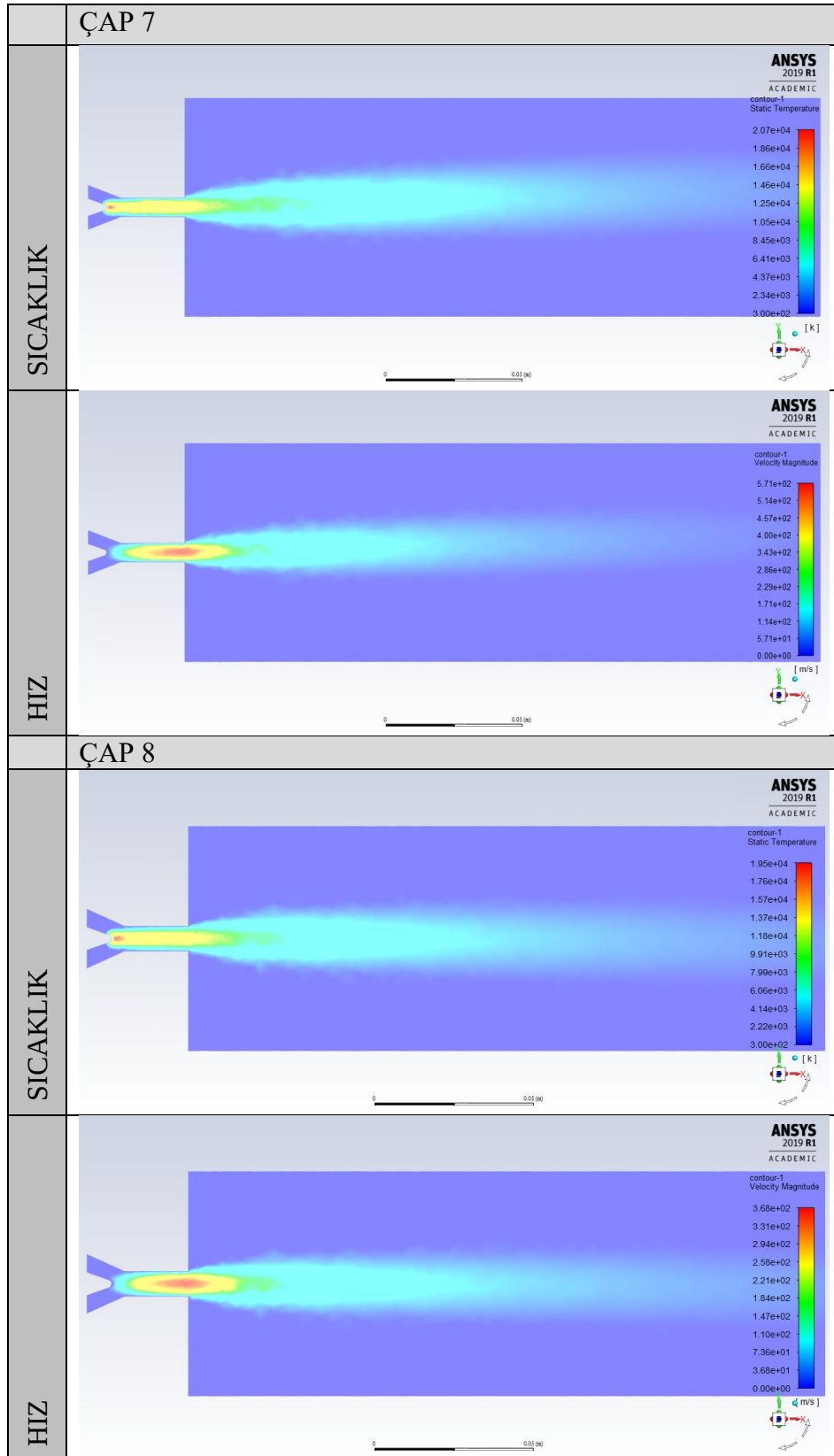
Şekil 9.1. (devam) YTG ve YD geometrileri için sıcaklık ve hız dağılımları

EK-10. Farklı anot çapları için dağılımlar



Şekil 10.1. Farklı anot çapları için sıcaklık ve hız dağılımları

EK-10. (devam) Farklı anot çapları için dağılımlar



Şekil 10.1. (devam) Farklı anot çapları için sıcaklık ve hız dağılımları

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : YURTKURAN, Emre
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 09.09.1986, Kırıkkale
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (505) 4623464
 e-mail : yurtkuranemre@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği A.B.D.	Devam Ediyor
Yüksek Lisans	Karabük Üniversitesi / Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği A.B.D.	2011
Lisans	Karabük Üniversitesi / Teknik Eğitim Fakültesi Makine Eğitimi Bölümü / Talaşlı Üretim A.B.D.	2009
Lise	Kırıkkale Anadolu Teknik Lisesi / Bilgisayarlı Nümerik Kontrol (CNC) Bölümü	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2013-	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2011-2013	Gümüşhane Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Sunjuq, W. K. W., Yurtkuran, E., Özsunar, A., and Ünal, R. (2018). Plazma Ark Tabancaunda Gaz Akış Debisi ve Elektrik Akım Değerlerinin Gaz Çıkış Sıcaklığı ve Hızlarına Etkisinin HAD Analizi ile İncelenmesi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33(1), 361-369.

2. Yurtkuran, E., Ünal R., and Özsunar A. (2018). Numerical Modeling of Torch Design for Plasma Atomization. *Acta Physica Polonica A*, 134 (1), 292-296.
3. Abdurahmanov K., Yurtkuran, E., Ünal R., (2019). *Malzeme İşlemlerinde Kullanılmasına Yönelik Üçlü Termal Plazma Torç Sisteminin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği İle Modellenmesi*. Paper presented at the Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi, İstanbul, Turkey.
4. Yurtkuran, E., Ünal, R., and Özsunar, A. (2017). *Improvement Of Plasma Torch Geometry By Cfd Formetal Powder Production*. Paper presented at the The Porous and Powder Materials Symposium and Exhibitions, Aydın, Turkey.
5. Demir, F., Yurtkuran, E., Ünal, R., and Özsunar, A. (2017). *3D Modelling of DC Non-Transferred Arc Plasma Torch And Investigation Of Creation Of Arc Root In the Torch*. Paper presented at the The Porous and Powder Materials Symposium and Exhibitions, Aydın, Turkey.
6. Yurtkuran, E., Ünal, R., and Özsunar, A. (2017). *Numerical Modeling of Torch Design for Plasma Atomization*. Paper presented at the 7th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress, Muğla, Turkey.
7. Demir, F., Yurtkuran, E., Ünal, R., and Özsunar, A. (2017). *3D CFD Modelling of Argon Non-Transferred Plasma Torch*. Paper presented at the 7th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress, Muğla, Turkey.
8. Yurtkuran, E., Sur, G.,Gürün, H., Çinici H., and Polat, R. (2011). *Alüminyum Esaslı T/M Malzemelerin Tel Elektro Erozyon Tezgahında İşlenebilirliklerinin Araştırılması*. Paper presented at the 6. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu, Elazığ, Turkey.
9. Yurtkuran, E., (2011). *T/M ile Üretilmiş Alüminyum Esaslı Malzemelerin Alaşım Elementleri Ve Takviye Elemanı İçermelerine Bağlı Tel Erezyonda İşlenebilirliklerinin Araştırılması*. Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.



GAZİ GELECEKTİR..