



**MALZEME İŞLEMLERİNDE KULLANIMA YÖNELİK ÜÇLÜ TERMAL
PLAZMA TORÇ SİSTEMİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ
İLE MODELLENMESİ**

Knyaz ABDURAHMANOV

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

TEMMUZ 2019

Knyaz ABDURAHMANOV tarafından hazırlanan “MALZEME İŞLEMLERİNDE KULLANIMA YÖNELİK ÜÇLÜ TERMAL PLAZMA TORÇ SİSTEMİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE MODELLENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. Abuzer Kadir ÖZSUNAR

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi Oğuz ERDEM

Makina Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Ahi Evran Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 05/07/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans 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.

Knyaz ABDURAHMANOV

05/07/2019

MALZEME İŞLEMLERİNDE KULLANIMA YÖNELİK ÜÇLÜ TERMAL PLAZMA
TORÇ SİSTEMİNİN HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ İLE
MODELLENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Knyaz ABDURAHMANOV

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Temmuz 2019

ÖZET

Bu çalışmada literatür incelenmesi sonucunda özgün DC taşınımsız üçlü plazma torçunun geometrisi oluşturulmuştur. Plazma torçları yatay eksen ile 30° açıyla, merkez eksen etrafında ise 120° açıda yerleştirilmiştir. Böylece, torçlar tek merkeze hedeflenmiştir. Amaca uygun plazma torçu için şekilsel olarak, basit ve parametrelerin sıkça değişimine uygun olması, analizlerde düzenli hücre yapısı kullanılabilmesi için, üretiminin kolay olması gibi etkenler göz önünde bulundurulmuştur. Torç üç boyutlu modellenmiştir. Akış türü türbülanslı ve sıkıştırılamazdır. Çalışma gazı olarak argon kullanılmıştır. Zamandan bağımsız olarak çözümlemeler yapılmıştır. Daha sonra oluşturulan bu geometri içerisindeki elektromanyetik alan ve gaz akışı arasındaki etkileşimi çözebilmek için ANSYS Fluent ve MHD modülü birlikte kullanılmış, akım ve gaz hacimsel debisi değiştirilerek sonuçlar elde edilmiştir. Değişen parametrelerle torç nozulundan 4 cm mesafe'deki kesişme noktasındaki, ortalama çıkış sıcaklığı ve ortalama çıkış hızı değişimi üzerine çalışılmıştır. Plazma jetlerinin kesişim bölgesinde sıcaklık ve hız, dağılımları verilmiştir. Artan akım ve hacimsel debiyle kesişme noktasındaki sıcaklığın ve hızın arttığı görülmüştür. Artan akımla ark bağlantı noktasının nozul girişine doğru kaydığı ve artan hacimsel debiyle ark bağlantısının nozul çıkışına doğru kaydığı görülmüştür. Alınan sonuçlar, bulgular ve tartışmalar bölümünde değerlendirilmiş ve literatürde daha önce yapılmış olan çalışmalarla karşılaştırması yapılmıştır.

Bilim kodu : 91411
Anahtar Kelimeler : Plazma torç, Taşınımsız, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
Sayfa Adedi : 80
Danışman : Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

MODELING OF TRIPLE THERMAL PLASMA TORCH SYSTEM BY
COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS FOR MATERIAL PROCESSING
(M. Sc. Thesis)

Knyaz ABDURAHMANOV

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES
July 2019

ABSTRACT

In this study, a typical non-transferred DC triple plasma torch geometry has been developed. Plasma torches were placed at 30° with horizontal axis and at 120° around central axis. Thus, torches are targeted at a single center. In designing the torch, flexibility for frequent changes in parameters in regular cell structure analysis has been considered. The type of flow used in the study is considered to be turbulent and incompressible. Argon was used as the working gas. The study is done independent to time and performed as a 3D steady state analysis. To solve the interaction between electromagnetic fields and gas flow rates in this triple torch geometry, ANSYS Fluent and MHD module has been used together. By changing each of magnitude of electric current and gas flow rate, results were obtained. Both average output temperature and output speed has been studied by changing the parameters at an intersection point at distance of 4 centimeters from the torch nozzle. Plasma distribution velocity and temperature are given for the intersection area from the jet outputs. It was observed that the temperature and velocity were increased at the intersection point with increasing current and volumetric flow. By increasing current, it has been observed that the arc connection point was shifted towards the nozzle inlet and by increasing volumetric flow, the arc connection point was shifted towards the nozzle exit. Then in discussion, the results of the study has been compared to the studies found in the literature.

Scienc Code : 91411

Key Words : Plasma torch, Non transferred, Computational Fluid Dynamics

Page Number : 80

Supervisor : Prof. Dr. Rahmi UNAL

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyip bana yol gösteren, bilgisi ve manevi desteği ile yanımda duran sayın hocam Prof. Dr. Rahmi ÜNAL'a teşekkürlerimi sunarım. Çalışmalarım sırasında maddi ve manevi desteğiyle yanımda olan Arş. Gör. Emre YURTKURAN'a ve tez çalışmalarım süresince beni destekleyen arkadaşlarıma teşekkür ederim. Bu günlere gelmemi sağlayan, eğitim hayatım boyunca beni teşvik ve terbiye eden fedakar aileme gösterdiği sabır ve destek için teşekkürlerimi sunarım.

Bu çalışma TÜBİTAK 1001 Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Projelerini Destekleme Programı ile desteklenmiştir. 215M295 kodlu TÜBİTAK projesi tez ile birlikte yürütülmüştür. Destek ve katkılarından dolayı TÜBİTAK'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Birimi personeline teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ.....	3
2.1. Temel Bilgiler.....	3
2.1.1. Plazma	3
2.1.2. Plazma gazları	4
2.1.3. Termal ve termal olmayan plazmalar	5
2.1.4. Termal plazmanın oluşumu.....	5
2.1.5. Plazma torçları	6
2.1.6. Plazma radyasyonunun hacim niteliği	10
2.2. Literatür Özeti	10
3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL	21
3.1. Problemin Tanımı ve Geometrilerin Belirlenmesi	21
3.2. Kabuller.....	22
3.3. Temel Denklemler.....	23
3.3.1. Kütlelerin korunum dnlklemi	23
3.3.2. Momentum korunum denklemleri.....	23

	Sayfa
3.3.3. Enerjinin korunum denklemi.....	24
3.4. Türbülans Modelleri.....	25
3.5. Gerçekleştirilebilir $k-\varepsilon$ Türbülans Modeli (RKE)	25
3.6. Reynold sayısı	27
3.7. P-1 Radyasyon Modeli	28
3.8. Manyetohidrodinamik (MHD)	30
3.9. Sınır Şartları	32
3.9.1. Giriş sınır şartı.....	32
3.9.2. Çıkış sınır şartı	33
3.9.3. Anot duvar sınır şartı.....	33
3.9.4. Katot duvar sınır şartı.....	34
4. SAYISAL ÇÖZÜM	35
4.1. Çözüm Ağ Yapısı	36
4.2. Genel Ayarlar	38
4.3. Enerji Denkleminin Çözümü.....	40
4.4. Manyetik Alan Denklemlerinin Çözümü	41
4.5. P-1 Radyasyon Modeli	41
4.6. Çözücü Ayarları	42
4.7. Yakınsama Kontrolü	43
4.7.1. Çözümün yakınsaması	43
4.7.2. Çözümün iterasyon sayısından bağımsızlığı	43
4.7.3. Korunum denklemleri kontrolü.....	45
4.7.4. Çözümün hücre sayısından bağımsızlığı.....	45
5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	47

	Sayfa
5.1. Elde Edilen Verilerin Literatürle Karşılaştırılması	47
5.2. Sabit Akımda Farklı Debilerde Yapılan Analizler	50
5.2.1. Plazma torçlarında ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde plazma sıcaklık dağılımı	50
5.2.2. Plazma torçlarında ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde plazma hız dağılımı	54
5.2.3. Sabit akımda plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde sıcaklık ve hız değişimi.....	58
5.2.4. Sabit akımda farklı akış debilerinde plazma torçlarında radyasyon dağılımı	61
5.3. Sabit Akış Debisinde Farklı Akımlarda Yapılan Analizler	63
5.3.1. Plazma torçlarında ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde plazma sıcaklık dağılımı	64
5.3.2. Plazma torçlarında ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde plazma hız dağılımı	67
5.3.3. Sabit akış debisinde farklı akımlarda plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde sıcaklık ve hız değişimi.....	70
5.3.4. Sabit akış debisinde farklı akımlarda plazma torçlarında radyasyon dağılımı	73
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	75
6.1. Sonuçlar.....	75
6.2. Öneriler.....	76
KAYNAKLAR	81
ÖZGEÇMİŞ	84

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. Sayısal çalışmalarda kullanılan sınır şartları	47

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Plazma torç şematik gösterimi.....	7
Şekil 2.2. Katot (a) ve anotta (b) meydana gelen ısı transferlerine etki eden mekanizmalar.....	9
Şekil 2.3. (a) ticari plazma torç nozul örnek resmi (b) Nozul iç kısmında oluşan bozulma.....	13
Şekil 2.4. Plazma torç iç ve dış bölgesindeki sıcaklık dağılımı.....	14
Şekil 2.5. Transfer edilmeyen plazma torçunun iki farklı tipi a) ÇTK b) İTK.....	15
Şekil 2.6. Plazma jetlerinin kesişim bölgesinde veri alınan noktalar.....	16
Şekil 3.1. Plazma torçunun ölçüleri.....	21
Şekil 3.2. Üçlü plazma torçunun 3B görünümü.....	22
Şekil 3.3. Plazma torç sınır şartları.....	32
Şekil 3.4. MHD anot duvar sınır şartı paneli.....	34
Şekil 3.5. MHD katot duvar sınır şartı paneli.....	34
Şekil 4.1. Sayısal analizde kullanılan ağ yapısı.....	37
Şekil 4.2. Hücre kalite değer aralıkları.....	37
Şekil 4.3. Çalışmada kullanılan hücre yapısı için hücre kalitesi.....	38
Şekil 4.4. Genel ayarlar görüntüsü.....	39
Şekil 4.5. Yapılan modelin boyut kontrolü.....	39
Şekil 4.6. Yapılan modelin ağ yapısı kontrolü.....	40
Şekil 4.7. Enerji denklemi çözümü için enerji modeli paneli.....	40
Şekil 4.8. MHD model paneli.....	41
Şekil 4.9. Radyasyon modeli paneli.....	42
Şekil 4.10. Coupled algoritma şeması.....	42

Şekil	Sayfa
Şekil 4.11. Plazma jetlerinin kesişim noktasındaki plazma hızının iterasyon sayısı ile değişimi.....	44
Şekil 4.12. Plazma jetlerinin kesişim noktasındaki plazma sıcaklığının iterasyon sayısı ile değişimi.....	44
Şekil 4.13. Örnek çalışma için kütle korunumu paneli.....	45
Şekil 4.14. Plazma jetlerinin kesişim noktasındaki plazma hızının hücre sayısı ile değişimi	46
Şekil 4.15. Plazma jetlerinin kesişim noktasındaki plazma sıcaklığının hücre sayısı ile değişimi	46
Şekil 5.1. Asmann vd. yaptıkları çalışmalarında plazma jetlerinin kesişim bölgesindeki enine kesit düzlemde veri alınan noktalar	48
Şekil 5.2. Yapılan çalışmada plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzlemde veri alınan noktalar.....	48
Şekil 5.3. Bu çalışmanın referans alınan çalışma ile normalize edilmiş hız karşılaştırması	49
Şekil 5.4. Bu çalışmanın referans alınan çalışma ile normalize edilmiş sıcaklık karşılaştırması	50
Şekil 5.5. Sabit 200 A’de farklı akış debilerinde üçlü plazma torçlarının genel sıcaklık dağılımı (a) ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzlemindeki yerel sıcaklık dağılımları.....	51
Şekil 5.6. Bir torç katotunun ucundan plazma jetlerinin kesişim noktasına kadar olan çizgi üzerinden alınmış plazma sıcaklığı değişimi	53
Şekil 5.7. Plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzlemde çizgi üzerinde belirli noktalardan alınmış sıcaklık değişimi.....	54
Şekil 5.8. Sabit 200 A’de farklı debilerde üçlü plazma torçlarının genel hız dağılımı (a) ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzlemindeki yerel sıcaklık dağılımı	55
Şekil 5.9. Bir torç katotunun ucundan plazma jetlerinin kesişim noktasına kadar olan çizgi üzerinden alınmış mach sayısı değişimi	57
Şekil 5.10. Plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzleminde çizgi üzerinde belirli noktalardan alınmış hız değişimi	57
Şekil 5.11. Plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde verialınan noktalar.....	58

Şekil	Sayfa
Şekil 5.12. Sabit akımda farklı akış debilerinde plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde sıcaklık değişimi.....	59
Şekil 5.13. Sabit 200 A’de farklı debilerde üçlü plazma torçlarının genel vektörel hız dağılımı.....	59
Şekil 5.14. Sabit akımda farklı akış debilerinde plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde hız değişimi.....	61
Şekil 5.15. Sabit akımda farklı akış debilerinde plazma torçlarında radyasyon dağılımı.....	62
Şekil 5.16. Sabit 70 SLPM’de ve farklı akım değerleri için üçlü plazma torçlarının genel sıcaklık dağılımı (a) ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzleminde yerel sıcaklık dağılımı	64
Şekil 5.17. Bir torç katotunun ucundan plazma jetlerinin kesişim noktalarına kadar olan çizgi üzerinden alınmış sıcaklık değişimi	66
Şekil 5.18. Plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzleminde çizgi üzerinde belirli noktalardan alınmış hız değişimi	66
Şekil 5.19. Sabit 70 SLPM’de farklı akım değerleri için üçlü plazma torçlarının genel hız dağılımı (a) ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzleminde yerel hız dağılımı (b).....	67
Şekil 5.20. Bir torç katotunun ucundan plazma jetlerinin kesişim noktasına kadar olan çizgi üzerinden alınmış plazma mach sayısı değişimi	69
Şekil 5.21. Plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzleminde çizgi üzerinde belirli noktalardan alınmış hız değişimi	69
Şekil 5.22. Sabit debide farklı akımlarda plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde sıcaklık değişimi.....	70
Şekil 5.23. Sabit 70 SLPM’de farklı akımlar için üçlü plazma torçlarının genel vektörel hız dağılımı.....	71
Şekil 5.24. Sabit debide farklı akımlarda plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde hız değişimi.....	72
Şekil 5.25. Sabit debide farklı akımlarda plazma torçlarında radyasyon dağılımı	73

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu tez çalışmasında 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 ($kJ/(kg.K)$)
DC	Doğru akım (A)
D_h	Hidrolik çap (m)
E	Elementer yük (C)
G	Kütle akış hızı (kg/s)
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	Türbülanslı kinetik enerji (J/kg)
k	Isı iletim katsayısı ($W/(m.K)$)
k_B	Boltzmann sabiti (J/K)
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 ($kJ/(kmol.K)$)
R_{Ar}	Argon özgül gaz sabiti ($kJ/(kg.K)$)
Re	Reynolds sayısı
T	Sıcaklık (K)

Simgeler**Açıklamalar**

T_e	Elektron 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**

DSS	Doğrudan Sayısal Simülasyon
HAD	Hesaplama Akışkanlar Dinamiği
MHD	Manyetohidrodinamik
SAD	Sayısal Akışkanlar Dinamiği
SLPM	Dakikadaki Standart Litre
Vd	Ve Diğerleri
YTD	Yerel Termodinamik Denge

1. GİRİŞ

Plazma, birlikte sıfır yüke sahip olan parçacık gruplarından oluşan bir elektromanyetik sistemdir. Plazma çok yüksek elektriksel iletkenliğe sahiptir ve manyetik bir alan yaratır. Madenin dördüncü durum olan plazma, iyonlar ve serbest elektronlardan oluşan bir maddedir. Plazma ısıtıldığında, iyon olarak adlandırılan pozitif veya negatif yüklü parçacıklar oluşturarak elektron sayısı azalır veya artar [1]. Plazmalar termal ve termal olmayan plazmalar olmak üzere iki şekilde sınıflandırılır. Termal plazmaları önem verilme nedeni, yüksek entalpi içeriği, yüksek sıcaklık değerleri (10 000-50 000 K), yüksek ısı akısı ($\sim 10^7$ - 10^9 W/m²), yüksek çalışma gücü (kW-MW) ve farklı çalışma gazlarından oluşan kombinasyonlarıdır. Atmosferik basınçta plazmaya dönüştürmek için temel güç kaynağı kullanılır; DC (0Hz), AA, düşük frekans ($f < 1$ MHz) RF ($1 < f < 500$ MHz genellikle 13,56 MHz) ve MW ($0,5 < f < 10$ GHz genellikle 2,45 GHz) frekans aralıkları ve bu aslında uyarma modlarına göre yapılmış bir sınıflandırmanın ifadesidir [2].

Plazma torç teknolojileri geliştirilerek genellikle kesme, püskürtme, yüzey kaplama, metal tozu üretiminde, atık arıtılmasında, tıpta, nükleer enerji üretiminde, ve bunun gibi başka teknoloji alanlarında kullanılmaktadır. Plazma püskürtme yöntemi 1900'lerin başlarında metallerin korozyon direncini artırmak için uygulanmıştır. Kimya, otomotiv, imalat, havacılık ve uzay, elektronik, seramik ve nükleer alanlarda yoğun endüstriyel uygulamalar giderek artmıştır [3]. Plazma oluşturmak için transfer edilen ve transfer edilemeyen torçlar olarak iki tip torç tasarımı mevcuttur. Bu torçların teknoloji yöntemleri birbirinden farklıdır. Transfer edilen plazma tekniğinde ark, elektrod ve iş parçası arasında gerçekleşmektedir. Transfer edilemeyen plazma torç tekniğinde ise ark, elektrod ve su ile soğutulan bir nozul arasında oluşmaktadır [4].

Plazma torçundan istenilen, sıcaklık ve hız gibi başlıca parametrelerin başarılı bir şekilde elde edilmesi için torçun geometrisi, sınır koşulları gibi parametrelerin iyi bilinmesi ve bunların plazma bilgisiyle harmanlanması birincil önem taşımaktadır. Plazma torçlarının uygulamalı olarak ayrıntılı analizi (sıcaklık ve hız gibi parametrelerin tespiti) gerek yüksek sıcaklıkların oluşması gerekse de dahili bölgelere ulaşma sınırlılığı nedeniyle çok zordur. Bu yüzden alternatif bir yöntem olarak matematiksel modelleme, sistemin bu tür özelliklerini tahmin etmek için geçerli ve güçlü bir yöntemdir. Ayrıca yakın zamanda

bilgisayar teknolojisinde yapılan ilerlemeler sayesinde daha karmaşık modelleme yaklaşımlarının uygulanma olanağı sağlanmıştır [5].

Literatür inceleme sonucunda konu ile ilgili 3'lü torç analiz çalışmalarının fazla bulunmadığı genellikle tekli torç çalışmaları üzerinde durulduğu gözlemlenmiştir. Simülasyon konusunda yapılan çalışmalarda, öncelikle iki boyutlu (2B) incelemeler yapılarak ve daha sonra üç boyutlu (3B) modeller üzerine genişletilmiştir. 3B modellerde, ark eklentisi her zaman anot duvara sıkıştırılmış bir nokta olarak kabul edilmiştir. Farklı tip geometrilerde akım ve debi parametreleri değiştirilerek plazma sıcaklığı, hız, yoğunluk, elektrik potansiyeli, ark oluşum noktaları belirleme çalışmaları yapılmıştır. Literatürde yapılan bu çalışmalar literatür özeti başlığı altında detaylı olarak verilmiştir.

Bu tez çalışmasında, plazma torçları 3'lü olarak modellenmiştir. Plazma torçları içinde ve plazma jetlerinin kesişme noktalarındaki değişimler plazma teknolojisi üzerindeki önemli etkilere sebep olduğu için plazma jetlerinin kesişim noktasındaki plazma sıcaklığı, hızı, radyasyon gibi plazma akış alanı karakteristiklerinin plazma oluşumuna ve plazma jetinin yapısına etkisi hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile sayısal çözümler ile incelenmiştir. Plazma atomizasyon işleminde kullanılan nozul geometrileri ticari olarak önemli olduğundan geometrisi detaylı olarak açıkça verilmemektedir. Çözümler zamandan bağımsız olarak çalışılmış ve elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılmıştır. Analizlerde Ansys Fluent Manyetohidrodinamik (MHD) modülü kullanılmıştır.

2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Temel Bilgiler

2.1.1. Plazma

Gazlarda elektriksel deşarj çalışan İngiliz fizikçi Sir William Crookes 1879'da iyonize olmuş gazı maddenin dördüncü bir hali olarak tanımlamıştır. Maddenin bu hali için plazma kelimesini ilk kullanan 1929 yılında Amerikalı bir fizikçi olan Irving Langmuir'dur. İçinde bulunduğumuz evrenin % 99'u plazma halindedir. Plazma terimi genellikle maddenin dördüncü hali olarak adlandırılır. Sıcaklık arttıkça moleküller daha enerjik hale gelir ve dönüşürler; sırasıyla katı, sıvı, gaz ve plazma. Son aşamalarda, gazdaki moleküller, bir atom gazı oluşturmak için birbirinden ayrışır ve daha sonra serbestçe hareket eden yüklü parçacıklar, elektronlar ve elektronlarını kaybetmiş pozitif iyonları içeren bir iyonize gaz karışımı oluştururlar. Plazma, oluşturulduğu maddenin (genelde gazın) yapısına göre farklı parçacık türlerinden oluşabilir. Ancak genel olarak plazma; pozitif ve negatif iyonlardan, elektronlardan, nötral atom ya da moleküllerden, uyarılmış atom ya da moleküllerden ve fotonlardan oluşur [6].

Plazma serbest hareket eden elektronlar, iyonlar ve nötr parçacıkların karışımı ile karakterizedir ve ortalama elektriksel olarak nötrdür. Diğer bir deyişle net elektrik yükü sıfırdır. Bununla beraber plazmalar bu serbest yük taşıyıcılarının varlığı sebebiyle elektriksel olarak iletkenlerdir. Elektromanyetik alanlarla hem karşılıklı etkileşime girer hemde kendisi elektromanyetik alanlar oluşturur ve bu durum plazmayı gazdan ayıran üç özelliktir. Plazma, çok yüksek sıcaklıklarda, güçlü elektrik ve/veya manyetik alanlarla oluşturulabilmektedir. 10.000 K'nin üzerindeki sıcaklıklarda tüm molekül ve atomlar iyonize olmaktadır. Maddenin plazma hali ile gaz hali arasında bazı temel farklılıklar bulunmaktadır. Bunlar; - Gazlar elektriği iletmezken plazma iyi bir elektriksel iletken olmaktadır. Plazma elektriksel olarak nötr durumda bulunmasına karşın; elektriksel alan ve manyetik alanlarla etkileşimdedir. Bunun nedeni gazların nötral parçacıklardan, plazmanın ise iyonize olmuş gazlardan oluşmasıdır. - Gazlar boşluğu doldurma eğiliminde olmasına rağmen, plazmalarda toplanma eğilimi vardır. - Gazlarda moleküller ve atomlar arasındaki çekim kuvvetleri zayıf

iken, plazmalarda yüklü parçacıklar arasındaki Coulomb çekim kuvvetleri çok uzak mesafelerde bile etkili olmaktadır [6].

2.1.2. Plazma gazları

Plazma işlemlerin önemli avantajlarından biri gaz seçimidir. Bir gaz seçerek, reaktörde herhangi bir ortam oluşturmak mümkündür: oksitleyici, indirgeyici veya nötr. Bununla birlikte, belirli bir teknolojik süreç geliştirilirken, kullanıma uygun gaz yelpazesi önemli ölçüde daralır ve çoğu zaman tek olana indirgenir. Plazma gazı seçimindeki kısıtlamalar, plazma jeneratörünün tipi, teknolojisi ve ekonomisinden kaynaklanmaktadır. Herhangi bir plazma oluşturuucu gaz, bir veya başka bir plazma torçunda yüksek bir sıcaklığa ısıtılmalıdır. Bu nedenle, gaz özelliklerinin böyle bir plazma torçunda çalışmasını nasıl etkileyeceğini düşünmek gerekir. Akım voltajı karakteristikleri, servis ömrü ve bir elektrik ark plazma torcunun verimi büyük ölçüde plazma oluşturan gazın özelliklerine bağlıdır. Plazma oluşturan gazlar olarak: monatomik (argon, helyum, ksenon); diatomik (azot, hidrojen, oksijen); poliatomik (metan, karbon dioksit, amonyak, vb.) gibi gazlar kullanılır [7].

Plazma üretimi için en çok kullanılan gazlar argon, helyum, azot, hidrojen ve havadır. Argon, düşük termal iletkenliği olan inert bir monatomik gazdır. Argon, tungsten elektrodunu ve nozülü aşırı ısınmaya ve tahribata karşı korur. Argon'un düşük bir elektrik alan şiddeti vardır, bu nedenle ark başlatmak için yüksek voltaj gerekmez ve güvenilir bir sürekli ark yanma işlemi sağlanır. Helyum, argondan daha yüksek termal iletkenliğe sahip inert bir monatomik gazdır. Helyum, bir yay kolonunda (argondan dört kat daha fazla) yüksek bir elektrik alan kuvveti sağlar ve elektrik enerjisini termal enerjiye daha iyi dönüştürür. Helyumun iyonlaştırılması daha fazla enerji gerektirir, bu nedenle en sık helyum argon ile karıştırılır. Azot (havanın % 78'i azottur, bu nedenle saf azot yerine hava kullanılabilir), plazma arkını iyi stabilize eden bir diatomik gazdır. Çalışma sıcaklıklarında azot ısı içeriği argonunkinden beş kat fazladır. Argon ile karşılaştırıldığında azot, tungsten elektrotlarının direncini azaltan tungsten nitridleri oluşturmak için tungsten ile daha aktif etkileşime girer. Teknik azottaki (% 1'e kadar oksijen) safsızlıkların varlığı tungsten oksitlerin oluşumuna neden olur. Hava - içindeki oksijenin varlığı nedeniyle metaller için güçlü bir oksitleyicidir. Bu nedenle, yalnızca zirkonyum veya hafniyum elektrotları kullanmak gereklidir. Arkın oksijen atmosferindeki elektrik alan kuvveti azot

atmosferindeki değerden daha düşüktür, dolayısıyla enerji dönüşümü daha az verimlidir. Hidrojen, elektrik enerjisinin ısıya en iyi dönüşümünü belirleyen argoninkinden çok daha büyük bir ark kolonunun voltajına sahip olan bir diatomik gazdır. Hidrojen ayrışması ve iyonlaşması, helyum ve argondan daha düşük sıcaklıklarda meydana gelir. Bu nedenle, hidrojen plazmasının ısı içeriği argon plazmasından yaklaşık dört kat daha yüksektir. Hidrojen yüksek bir ısı iletkenliğine sahiptir, bu nedenle nozülün hızlı bir şekilde ısıtılması (aşırı ısınması) ve tahribatı vardır. Hidrojen nadiren tek başına bir plazma gazı olarak kullanılır. Çoğu zaman 1:2 oranında argon veya azota katkı maddesi olarak kullanılır. Argon-hidrojen karışımının kullanılması (% 35'e kadar hidrojen), alüminyum alaşımlarının temiz ve düzgün kenarlarla kesilmesine olanak sağlar [7].

2.1.3. Termal ve termal olmayan plazmalar

Plazmalar elektronlar, iyonlar ve nötronların, sıcaklıklarına göre iki ana kategoride sınıflandırılabilir: Termal plazma ve termal olmayan plazmalardır. Termal olmayan plazmada iyonların termal hareketini görmezden gelinir. Termal olmayan plazma durumunda basınç kuvveti ve manyetik kuvvet göz ardı edilebilir. Termal olmayan plazmalar, ağır türlerin düşük sıcaklığından dolayı sıklıkla "soğuk" plazmalar olarak sınıflandırılır ($T_{\text{elektron}} \gg T_{\text{iyon}}, T_{\text{gaz}} = 300 \text{ ila } 10^3 \text{ K}, n_{\text{element}} \approx 10^{20} \text{ ila } 10^{21} \text{ m}^{-3}$). Termal olmayan plazmanın temel özelliklerinden bazıları aşağıda listelenmiştir. İyonlar ve nötrler yaklaşık oda sıcaklığı özelliğini korur. Tüm gaz akışını ısıtmak yerine aktif elektronlar üretir. İyonların ve nötr elementlerin yaklaşık oda sıcaklığı özellikleri, düşük sıcaklıktaki plazma uygulamaları için soğuk plazma kullanma imkanı sağlar [8]. Termal plazmalar, Amerika ve Avrupa literatüründe "sıcak" plazmalar olarak adlandırılırken, Rus literatüründe termonükleer füzyon plazmalarından ayırt etmek için "düşük sıcaklık" plazmaları olarak isimlendirilir ve termal plazmalar yerel termodinamik dengeye (LTE) yakın olan plazmalardır [9].

2.1.4. Termal plazmanın oluşumu

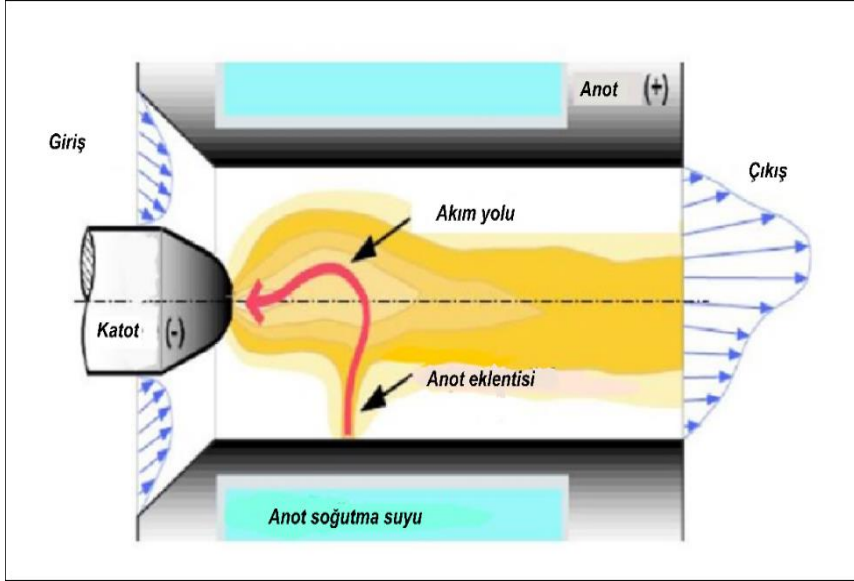
Termal plazma jetini diğer ısı kaynaklarından ayıran benzersiz özelliği, yüksek güç yoğunluğudur. Termal plazmalar, yani, bir LTE durumuna yaklaşan ve elektron yoğunlukları $10^{22} \text{ ila } 10^{28} \text{ m}^{-3}$ arasında değişen, 10^4 K civarında olan sıcaklıklarda meydana gelen plazmalardır ($T_{\text{elektron}} \approx T_{\text{iyon}} \approx T_{\text{gaz}} 10^4 \text{ ila } 10^8 \text{ K}, n_{\text{element}} > 10^{22} \text{ ila } 10^{28} \text{ m}^{-3}$). Bu plazmalar

alevler, elektrik kıvılcımları ve atmosferik arklardan oluşabilir. Termal plazma nötrler, iyonlar ve elektronlar arasındaki yakın eşitlik ile tanımlanır [8]. Gaz içerisinde elektrik akımı verilerek plazma oluşumunu elde etmek mümkündür. Oda sıcaklığında gazlar iyi derecede yalıtkanlar olduğundan elektriksel olarak iletken durumda olması için yeterli miktarda yük taşıyıcı oluşturmalarıdır. Elektriksel bozunmayı elde etmek için farklı yollar vardır. İlk olarak elektriksel iletken olmayan gaz elektrot çiftleri arasında iletim yolu oluşturur. İyonlaşmış gazın içinden geçen elektrik akımı gaz deşarjları olarak adlandırılan durum meydana getirir. Farklı uygulamalar için plazma, elektrotsuz RF deşarjları, mikrodalgalar, şok dalgaları ve lazer veya yüksek enerjili parçacık ışınları tarafından üretilir. Termal plazma elde etmek için yüksek yoğunluklu ark veya induktif olarak bağlanmış yüksek basınçlı deşarj yöntemleri yaygın olarak kullanılmaktadır [10].

2.1.5. Plazma torçları

Termal plazmalar plasmatronlar olarak da bilinen plazma tabancaları (plazma torçları) ile üretilir. Bu plazma tabancaları doğru akım, alternatif akım veya radyo frekansı gibi birincil kaynağa bağlandıklarında, DC, AC veya RF tabancası olarak bilinirler [11].

DC plazma torçları genel olarak biyogaz üretimi, atık yok edimi, ultra ince parçacıkların sentezi, metal kaynağı, plazma püskürtme ve bunun gibi birçok alanlarda kullanılır. Bunun yanı sıra kullanıldığı başka bir alan plazma atomizasyon yöntemidir. Bu yöntemle yüksek ergime sıcaklığı olan titanyum, tungsten, nikel, tantal, niyobyum, zirkonyum, molibden ve bunların alaşımları gibi reaktif metal malzemelerin, başka yöntemlerle üretimi kısıtlı ve maliyetli olan metallerin toz üretiminde önemli rol oynamaktadır. Plazma atomizasyon işlemi plazma torçları tarafından oluşan yüksek sıcaklık ve hız parametreleri tarafından gerçekleşmektedir [12]. Geleneksel bir DC plazma torçu, gövde, gaz akış mekanizması, bir tungsten çubuk katot ve bir nozul şekli verilmiş, su soğutmalı bir bakır anottan oluşur. Elektrik arkı, bu iki elektrot arasında, yani katot ve anot arasında oluşturulur (şekil 2.1). Plazma torçları tasarıma ve uygulamaya bağlı olarak, torçlar birkaç watt ile birkaç yüz kW güçte çalışacak şekilde tasarlanır [8]. İki elektrot, plazma gazı girişi olan bir izolatör ile ayrılır. Elektrot boşluğuna bir gaz girdiğinde ve elektrotlar arasında bir DC arkı oluştuğunda, ark, nozuldaki itilir ve böylece yüksek sıcaklıkta hızlı bir alev elde edilir. Elektromanyetik kuvvetler ve gaz dengelemesi ark sütununu daraltır ve plazmayı yaklaşık 20.000 K sıcaklığa ısıtır [11].



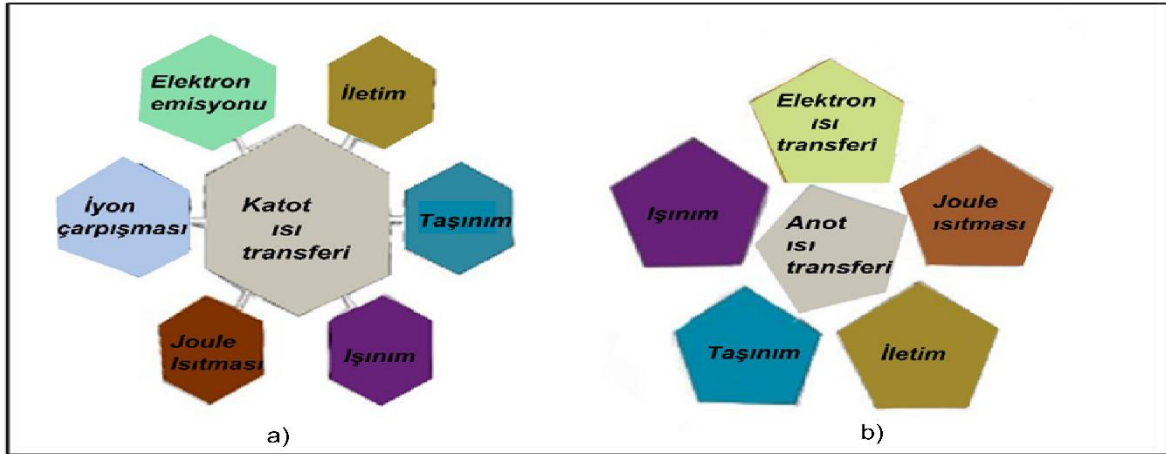
Şekil 2.1. Plazma torç şematik gösterimi [8]

Gaz akış mekanizması: Gaz akış modeli, torçta plazma üretilmesinde önemli bir rol oynar, ayrıca maksimum sıcaklık, plazma jet uzunluğu, elektrotların soğutulması, akışkan dinamikleri ve plazma torç tasarımının parametrik yönüne bakarak mevcut araştırmanın odağı olan ısı transfer koşulu tarafından büyük ölçüde etkilenen farklı parametreleri kontrol eder. Gövde: Katot ve anot gibi plazma torçunun ana bileşenleri bir mahfazaya monte edilir ve plazma bir yönde akacak şekilde sınırlandırılır. Plazma torçunun gövdesi, sertlik, ısıl ve elektriksel olarak nötrlüğün muhafaza edilmesi koşulunu yerine getiren çeşitli malzemelerden oluşturulur [8].

Katot, gazın plazma torçuna girerken karşılaştığı ilk nesnedir. Katotlar uygulamaya bağlı olarak ince ve düz uçludur. Torcun negatif güç kaynağına elektriksel olarak bağlanırlar [8]. Katot, ark deşarjını korumak için elektron kaynağıdır. Isıyı arkten türetilir ve elektronlar termiyonik olarak yayılır. Katotta arkın sona erdiği yer, katot malzemesine, soğumasına ve ark akımına bağlıdır. Katot refrakter bir metal olduğunda ve yeterince soğutulduğunda, ark kıvrımları ve katot akım yoğunlukları 100 A/mm^2 kadar yükselir, bu katot ucunun ısınmasına sebep olur. Diğer katot türlerinde ark, bir manyetik alan veya girdap akışı ile katot yüzeyinin üzerinde kaydırılır ve katot yoğun suyla soğutulur. Tipik katot malzemeleri tungsten, toryumlu tungsten, grafit, bakır, zirkonyum/zirkonya'dır. Tungsten elektrotlar en yaygın olanıdır. Bununla birlikte tungsten, argon veya azot gibi inert gazlar ile çalıştırılmalıdır. Düşük güç çıkışlı tabancalarda, elektrot ucu koni biçimindedir; yüksek güç çıkışlı tabancalarda ise ucu kesik koni biçimindedir [11].

Anot, farklı uygulama durumlarına bağılı olarak disk, halka veya nozul şeklinde olabilir ve torcun içine veya dışına monte edilebilirler. Nozul tipi anot, akışı hızlandırmak için boğazın yukarısında bir nozula sahiptir, gaz ve plazma karışımını, yüzey işleme alanını arttırmaya yardımcı olan torçtan yüksek hızda dışarı çıkarır [8]. Anottaki ısı, plazma tabancalarında oldukça büyüktür. Anot, plazma tabancasının nozulu olarak da adlandırılır. Nozuldaki ısı akışı 160 W/mm^2 kadar yüksek olabilir. Anot malzemesinin seçimi genelde, mükemmel ısı iletkenliğine sahip olan yüksek saflıktaki bakırdır. Bunun yanında grafit ve refrakter metaller gibi diğer malzemeler de kullanılmıştır. Plazma tabancasının bu kısmında, yani anotta, akış sırasında ark kökü oluşur ve bu nedenle anot malzemesi plazma torçunun ömrünü belirleyen kısımdır. Anot, ark kökü eklentisinin olduğu yerden aşınır. Nozulun tamamında veya bir kısmında kullanılan malzeme ısıya dayanıklı olsa bile düşük ısı iletkenliğe sahip ise ömrünü azaltır [11]. Katot ile anot arasından geçen gaz bu elektrotlar arasında oluşmuş bir arka ısıtılır ve plazma oluşturulmaya başlar. Son olarak plazma jeti şeklinde anot nozulundan çıkar [8]. Katot ve anotta olan ısı geçişinden dolayı plazma tabancası imalatında bu kısımlara çok dikkat edilmelidir. Elektrotların yetersiz soğutulması, elektrotların hızlı erozyonu, lehim derzlerinde başarısızlık yapılması, elektrotların eritilmesi ve buharlaştırılması ve elektrot duvarının delinmesi ile bir plazma kaynağının kullanım ömrünü önemli ölçüde sınırlandırabilir. Aktarımsız (arkın iş parçasına aktarılmadığı) ark plazma tabancasının, elektrik giriş gücünün yarısı tabanca bileşenlerine termal ısı yükü olarak gidecektir. Katot, bu ısı yükünün sadece % 1-5'ine maruz kalırken, anot kalan ısı yükünün önemli bir bölümünü paylaşır. Plazma tabancasının gücü düşük olduğu zaman katodun daha fazla ısıya maruz kaldığı deneysel olarak gözlemlenmiştir [13].

Katot ve anotta meydana gelen ısı transferlerine etki eden mekanizmalar Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Katot ısı geçişinin mekanizması Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Katot için birincil ısıtma mekanizması katot çapının ve bunun içinden geçen akımın bir fonksiyonu olan Joule ısıtmasıdır. Isıtma mekanizmasına katkıda bulunabilecek diğer bileşenler, plazmanın tamamından gelen radyasyon ve iyon bombardımanıdır. Katodun sıcak olan ucundan, soğuk halde çevresinde bulunan çalışma akışkanına yaptığı radyasyon soğutma etkisine sebep olabilir. Bununla birlikte, soğutma için katot ucundan olan radyasyon, ısıtma için plazmadan gelen radyasyon ve iyon bombardımanı etkileri Joule ısıtmasına göre önemsizdir. Katodun temel amacı yüzey sıcaklığına ve elektrik alanına bağılı olarak termiyonik ve elektrik alan emisyonları yoluyla elektronları yayarak bir plazma tabancasına elektron kaynaklığı yapmaktır [11].



Şekil 2.2. Katot (a) ve anotta (b) meydana gelen ısı transferlerine etki eden mekanizmalar [12]

Katottan olan iletim, konveksiyon, Joule ısıtması, radyasyon ve elektronik ısı geçişi, anot içinde ana ısı aktarım mekanizmalarıdır (Şekil 2.2 a). Bununla birlikte, anodun rolü katottan farklıdır, mekanizmalara farklı bir şekilde katkıda bulunur. Katodun aksine, konveksiyon anot ısıtması için artık güçlü bir ajan görevi görmektedir. Soğuk olan çalışma akışkanı katodun üzerinden geçtikten sonra, ark bölgesine girer ve elektrik arkından dolayı yüksek ısıya maruz kalır. Böylece genişler, iyonlaşır ve plazmayı oluşturur. Akış kanalının dahili profiline bağlı olarak, aşırı derecede ısınan, genişleyen plazma gazı, duvara çarpıp konvektif ısı geçişi gerçekleştirir. Isı geçişi, katodun akış kanalının eksenine göre hizalanmasına bağlıdır ve genellikle anoduyla temas halindeki soğuk bir sınır tabakası duvara aktarılan ısı miktarını sınırlar. Herhangi bir hizalama soğuk sınır tabakanın delinmesine ve konveksiyon yoluyla anot ısı geçişinde keskin bir artışa neden olabilir [11].

Genellikle, ark plazma cihazlarındaki anot tasarımlarının çoğunda kalın bakır duvarlar kullanılır. Sonuç olarak, ark akımının geçmesi için çok düşük bir direnç yolu önerilir. Bu nedenle, katodun aksine, anotta önemli bir miktarda Joule ısınması yoktur. Bununla birlikte, mekanizma, ark kök oluşumu gerçekleştiği anot ark noktasının konumuna önemli ölçüde katkıda bulunur. Bağlantı noktasının küçük olması nedeniyle, ısıtma, anot duvarının erimesine ve nihai olarak delinmesine neden olacak kadar yoğun olabilir. Anot ısıtılmasının radyasyona bağlı net etkisi, diğer kaynaklara göre genellikle küçüktür. Anoda yüklenen ısı, anot içerisinde tasarlanan soğutma kanalındaki soğutma sıvısı tarafından alınır. İletim, anot sıcaklığının anot malzemesinin erime noktasının altında kalması için bu sıcaklığın giderilmesi için birincil mekanizmadır [13].

2.1.6. Plazma radyasyonun hacim niteliği

Plazmada radyasyonun transferi karmaşıktır ve çalışma gazının yeterince yüksek bir basıncında, boşaltma akımının yoğunluğu ve plazma torçunun geometrik boyutları, radyasyonun yeniden emilimini artırabilir. Bu transferi tanımlamak için, radyasyon enerjisi transferi denklemlerinin, emme katsayısının bilinen radyasyon, sıcaklık ve plazma basıncı sıklığına bağlı denklemlerinde kullanılması gerekir. Bu, radyasyon transferi, sıcaklık ve hız alanları işlemlerinin birbirine bağlanması nedeniyle plazma denklemlerinin çözümünü oldukça karmaşık hale getirir. Bu nedenle, atmosferik basınç sırasındaki basınçlarda ark boşalması ile yayılan enerji kayıplarını tanımlamak için, genellikle plazma radyasyonunun hacim niteliği üzerinde varsayımı kullanmak gerekir. Bu, problemin matematiksel formülasyonunu ve analizini basitleştirmeyi mümkün kılar, ancak modelin uygulanabilirlik bölgesi, plazma parametrelerinin belirli bir aralığı ile sınırlıdır [14].

2.2. Literatür Özeti

Literatür incelendiğinde aktarımsız DC ark plazma torçları için çalışmalar hem deneysel ve hem de sayısal olarak yapılmıştır. Deneysel çalışmalar genellikle elektromanyetik alanlar ile plazma akışı ve sıcaklık alanları ile plazma torçunun küçük boyutları ile birleşen karışık çevre arasındaki karışık etkileşimler nedeniyle akış alanının ölçümleri, sıcaklık dağılımı ve plazma torçlarındaki ark-kök konumunu belirlemek oldukça zorluk teşkil ettiği görülmüştür. Bunun gibi etkenler deneysel çalışmaların sınırlı olmasının nedenlerindendir. Bilgisayar donanımının ve yazılımının hızla gelişmesi ile yüksek hızlı bilgisayarlarla sayısal modelleme, plazma torçu içindeki ve dışındaki plazma akışını ve ısı transfer özelliklerini araştırmak için ekonomik ve etkili bir yöntem haline gelmiştir.

Bauchire ve diğerleri DC plazma torç sıcaklığı ve hız profillerini açıklamayı amaçlayarak matematiksel 2B model sunmuşlardır [15]. Yaptıkları çalışma Patankar sonrasında daha basit yöntem kullanılarak korunum denklemlerinin çözümlenmesine dayanmaktadır. Analizlerinin birinci kısmında, Prandtl'ın karıştırma uzunluğu modeli ile birlikte standart $k-\epsilon$ modelini kullanarak oluşan turbulansın etkisini izah etmeye çalışmışlardır. İlave olarak, kütleli debi, akım yoğunluğu ve çalışma gaz çeşitleri (argon veya hava) gibi fiziksel değişkenlerinin plazmanın durumuna olan etkisini tetkik etmişlerdir. Yaptıkları çalışmanın diğer bölümünde ise analizini yaptıkları modelin literatürdeki deneysel çalışma sonuçlarıyla

yaptıkları karşılaştırmalarını açıklamışlardır. Argon ve hava için sınır şartları aynı girilmiştir, giriş kütle akış hızı $D_o = 0.5$ g/s ve torç gücü 1.9 kW'dır. Her iki gazla yapılan çalışma sonucu karşılaştırmalarında argon gazında elde edilen plazma sıcaklığının hava plazmasına göre yüksek olduğunu belirlemişlerdir. Çalışmalarında sınır şartı olarak verilen akım değeri 250 A, kütleli debisi değeri ise $D_o = 0.29$ g/s (0.59 scmh) için yaptıkları çalışmanın deneysel olarak elde ettikleri torç çıkışındaki eksen sıcaklığı ile karşılaştırma yapmışlardır. Torç gücü yaklaşık deneysel çalışma sonucuna eşit ve elde edilen torç gücüne karşılık gelen ark uzunluğunu $L_{arc} = 12.25$ mm olarak tespit etmişlerdir. Kullandıkları modellerinde, yaklaşık 2 cm'lik bir mesafede elde ettikleri verilerin deneysel sonuçlara kıyasla yüksek olduğunu görmüşlerdir.

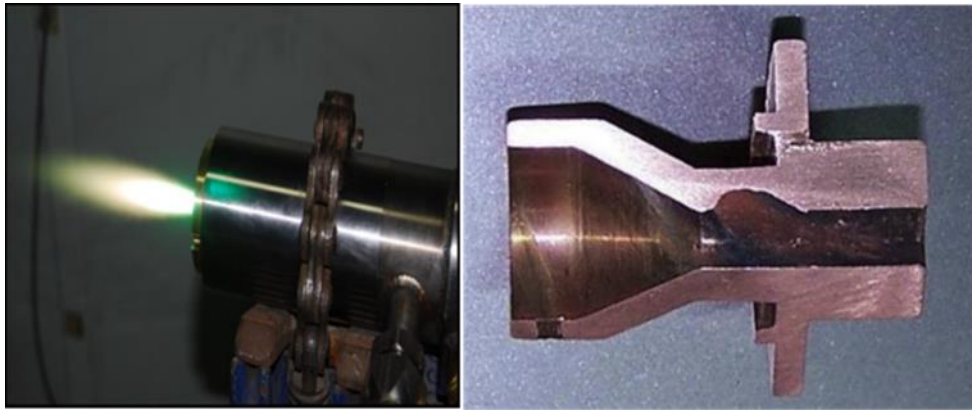
Ardakani ve diğerleri SG-100 aktarılmamış DC argon plazma torçunun 3 boyutlu bir sayısal modelindeki çalışmasında ark kök bağlantı noktasındaki dalgalanmaları ve davranışını ark kararsızlığının plazma jet kararsızlığı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır [16]. Torç içinde dalgalanan ark kök bağlantısı, parçacıkların ısınmasını etkileyebilecek olan plazma jetinin sıcaklık, hız ve türbülans parametrelerinde kararsızlık oluşturduğunu görmüşlerdir. Bu modelde, plazma sürekli olarak Kabul edilir ve optik olarak ince olduğunu tesbit etmişlerdir. Türbülansı modellemek için $k - \epsilon$ türbülans modelini kullanılmıştır. ANSYS FLUENT ticari yazılımında birkaç kullanıcı tanımlı işlev (UDF) uygulayarak, kütle, momentum ve enerji denklemlerinin yanı sıra elektrik potansiyel ve manyetik vektör potansiyel denklemlerini çözmüşlerdir. Anottaki termal sınır koşulları için, soğutma suyu kullanılmıştır. Elektrik akımı 500 A ve giriş debisi 70 SLPM Argon olarak kullanmışlardır. Sonuç olarak, sıcaklığın parçacıkların serbest kaldığı torç çıkışındaki dalgalanmaları göstermektedir. Torç çıkışındaki hızın dalgalanması torç içinde hareket eden ark sebebiyle aynı zamanda dalgalandığı gösterilmiştir. Ark dalgalanması sebebiyle hızın sıcaklığa nisbeten daha hassas olduğu görülmüştür. Kararsız sonuçlar, torç çıkışındaki hızın, maksimum hızın maksimum değerlerinin % 30'una kadar dalgalandığını göstermişlerdir. Ayrıca, plazma jetini ve partikül ısıtmasını incelemek için, sabit olmayan bir model kullanmışlardır. Çıkış hızı profilinin, sıcaklık profilinden daha üniform olduğu gözlemlenmiştir. Çalışma sonuçlarının deneysel sonuçlarla karşılaştırmalarında uyum içinde olduğunu bildirmişlerdir.

Han ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında taşınımsız DC plazma torç içindeki bir ark özelliklerini incelemek için anot noktasının çapı ve verilen akımdaki, gücü ve entropiyi simule etmek için 3B model geliştirmişlerdir [17]. Birkaçı verilen akım ve gaz akış hızında

anot noktasının çapını ve yay uzunluğunu dikkate almıştır. Anot noktası çapının ve ark uzunluğunun farklı kombinasyonları, verilen akım ve gaz akış hızına karşılık gelen torç gücü elde edebileceğini gözlemlemişlerdir. Verilen akım ve gaz akış hızı için öngörülen anot nokta çapının ve ark uzunluğunun elde edilen kombinasyonlarından, en uygun olan kombinasyonu belirlemişlerdir. Verilen akım 800 A ve anot noktasının çapı 4mm olduğu durumda artan gaz akış hızı ve artan ark uzunluğu ile torç gücünün arttığını gözlemlemişlerdir. 4mm çapın olduğu durumda gaz akış hızının her 2m/s artırılmasıyla torç gücünün yaklaşık 1KW arttığını, torç entropisinin azaldığını göstermişlerdir. Verilen akım ve gaz akış hızı için en uygun kombiasyonda minumum entropi 14,40W/K olarak elde edilmiş ve ark uzunluğu 6,6mm ve anot noktasının çapı 5mm olduğunu gözlemlemişlerdir. Sıcaklık ve hız, X-0 düzleminde asimetric iken sıcaklık ve hız, Y-0 düzleminde simetrik. Katot ve anot noktası etrafındaki maksimum hız 1600 m/s ve maksimum sıcaklığı ise 28000 K olarak elde etmişlerdir.

Guo ve diğerleri Argon-hidrojen ile çalışan DC taşınmısz bir ark plazma torcunun 3B modelini oluşturmuş ve analiz çalışmalarında ANSYS FLUENT ticari yazılımı kullanmışlardır [18]. Akım yoğunluk dağılımı tanımlamak için iki denklem uygulayarak yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Bununla birlikte, anot duvarı üzerinde asgari toplam ısı transfer hızının en düşük enerji kaybı durumu olarak değerlendirilerek, ark-kök bağlantı pozisyonunu belirlemek için farklı yöntem önerisinde bulunarak gerçek ark çekirdek yarıçapı ve uzunluğu konumunu belirlemişlerdir. Ayrıca, ark akımı ve kütle akış debisinin plazma ark özelliğinin üzerindeki etkileri de çalışılmıştır. Çalışmanın sonucunda elde edilen verilerin, önceki çalışmalarla ve deneysel gözlemlerle uyum içinde olduğunu söylemişlerdir. Bunlara ilave olarak, artan akım veya azalan debi ile ark uzunluğunun azaltılabileceği sonucuna varmışlardır. Akımın ve kütleli debinin artırılmasıyla, torç içerisinde plazma hızı ve plazma sıcaklığının arttığını gözlemlemişlerdir. Ark çekirdeğin yarıçapı artmasıyla, ark uzunluğu hem de tabanca gücünde azalma gözlemlenilmiş fakat ark çekirdek yarıçapının kademeli olarak arttıkça anot duvarı boyunca toplam ısı aktarım hızının dalgalı olduğunu görmüşlerdir. Asgari ısı aktarım hızı ilkesine dayanarak, 400 A ve 500 A akım için gerçek ark çekirdek yarıçapının sırasıyla 0.0016 m ve 0.0019 m olduğunu tespit etmişlerdir. Aynı akış hızında, akım artırılırken daha yüksek plazma ark sıcaklığı, dolayısıyla daha yüksek anot duvar sıcaklığı ve daha yüksek ısı transfer hızı oluştuğunu bulmuşlardır. Sabit akış oranında akımın artırılmasıyla, toplam ısı transfer hızı oluşturduğunu, fakat gerilimin ve ark uzunluğunun azaldığı gözlemlenilmiştir. Sabit akımda, kütleli debi arttırılırken, çekirdek

yarıçapı azalacak ve ark uzunluğu artacak ve böylece enerjinin uzun bir mesafede kalması sağlanmış ve bu sayede tabanca çıkışında daha fazla enerji korunabilecektir. Kütlesel debinin sabit olduğu durumda ise, akımın artırılmasıyla ark çekirdek yarıçapında artar ve yay uzunluğu azalır, bu da plazma enerjisinin esasen plazma tabancası akışının üst kısmında yoğunlaştığına işaret eder. Bu durumda, toplam ısı aktarım hızı artar ve soğutma suyuna daha fazla enerji geçişi olacağını söylemişlerdir. Bu sebeple, arttırılan akımın, arttırılan debiye göre torç çıkışında sıcaklık ve hız üzerinde daha az etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan torçun şematik yapısı şekil 2.3 (a) ve şekil 2.4 (b) gösterilmektedir.

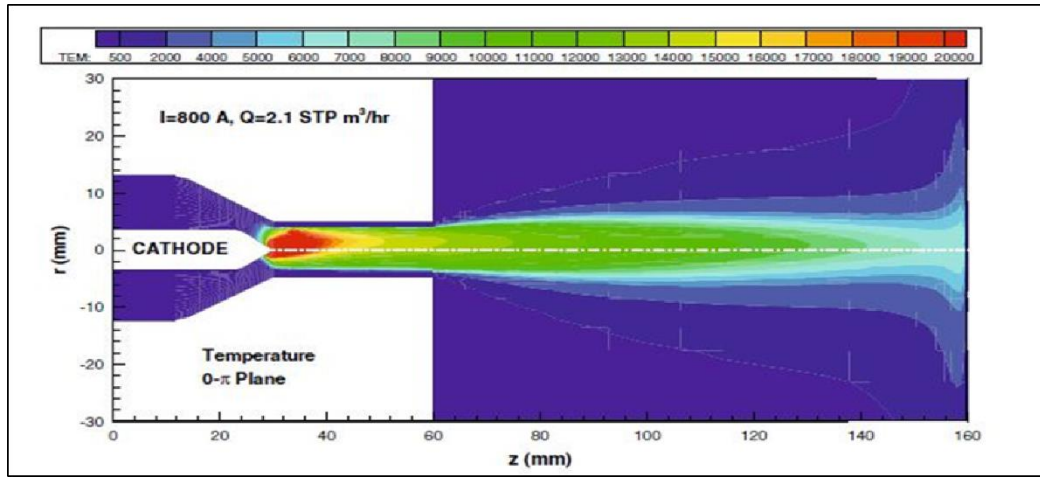


Şekil 2.3. (a) Ticari plazma nozul örnek resmi (b) Nozul iç kısmında oluşan bozulma [18]

Trelles ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında DC aktarılmamış ark plazma torçu içindeki elektrik ark dinamikleri, 3B modelini yerel termodinamik kullanarak simule etmişlerdir [19]. Verilen elektrik akımı 400, 600 ve 800 A olarak ve gaz akış hızı 60 ve 90 slpm olan sınır koşulları şartları girilerek, 0,1 ve 1,0 μ s arasındaki zaman adımları ile çalışılmıştır. Maksimum sıcaklığın torç çıkışına yakın yerde olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca, bu modlarda çalışan ve düz gaz enjeksiyonunu kullanan bir torç için arkın gerçek ataşmanın karşı tarafına tekrar bağlanma durumunda olduğunu belirtmişlerdir. Toplam akım arttıkça arkın oldukça dengeli durumda olduğu, akış tarafından daha az saptığı ve toplam voltaj düşüşünün azaldığı gözlemlenmiştir. Argon ile çalışırken daha küçük bir voltaj düşüşüne ve daha az akış hızına dönüşen yayların daha dağınık olduğunu gösterir

Li ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında DC ark plazma tabancasının kararlı durumdaki 3B sıcaklık ve akış alanlarının simülasyonlarının sonuçları, kararlı durumda enine parçacık ve taşıyıcı gaz enjeksiyonu ile plazma jetine ilave edilmesini sunmuşlardır [20]. Verilen sabit akımdaki gaz akış hızındaki bir artışın, anot ark kökünü nozul çıkışına doğru, tabanca

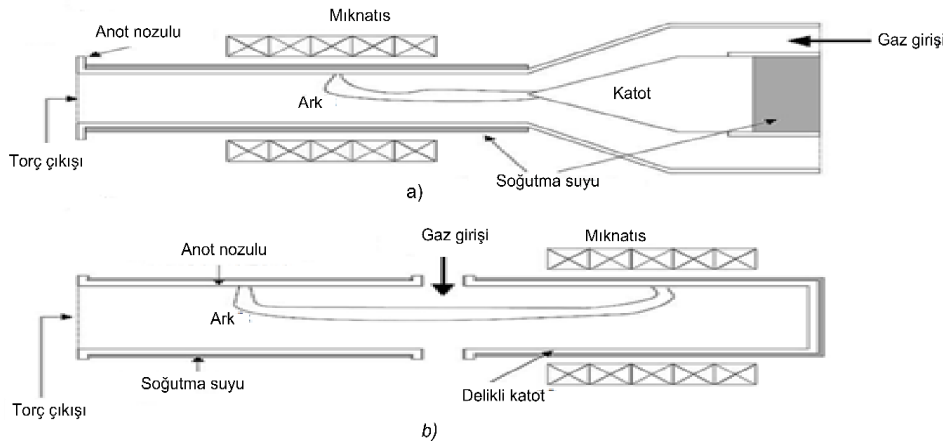
çıkışında daha yüksek entalpi ve hıza ve jet bölgesinde daha güçlü karıştırma etkilerine yol açtığını görmüşlerdir. Sabit gaz akış hızınada, ark akımının artması ile ark uzunluğunun kısaldığını, fakat nozul çıkışındaki entalpi ve hızı arttırdığını ve daha uzun jetlerin elde edildiğini belirtmişlerdir. $I = 600$, $Q = 2.0$ STP m³/saat ve $I = 800$ A, $Q = 2.1$ STP m³ / saat hesaplamalarında plazma jetinin geometrik ekseninden hesaplanan sapma açıları sırasıyla 1,6 ile 0,3 ve plazma jetinin içerisindeki yüksek sıcaklık bölgelerinin uzunlukları 90 ve 91 mm olduğunu belirlemişlerdir [20].



Şekil 2.4. Plazma torç iç ve dış bölgesindeki sıcaklık dağılımı [20]

Park ve diğerleri dış manyetik alan tarafından yönlendirilen ark kök dönüşünü ve bunun çubuk tipi katot (ÇTK) ve iyi tip katot (İTK) ile taşınmayan plazma torçlarındaki termal plazma karakteristiği üzerindeki etkilerini araştırmak için üç boyutlu (3B) zamana bağlı sayısal model geliştirmişlerdir [21]. Elektrik akımı yoğunluğunun üç boyutlu dağılımları, genelleştirilmiş Ohm yasası ile birlikte bir akım sürekliliği denkleminde elde edilirken, arkın dış alanı üzerine bindirilmiş ark tarafından indüklenen manyetik alanlar, manyetik vektör potansiyel denklemi ile hesaplanır. Ark ve plazma akışı arasındaki bağlantılı etkileşimler, k-e türbulans modeliyle birlikte zamana bağlı manyetohidrodinamik (MHD) denklemleriyle açıklanmaktadır. Sayısal simülasyonlar, sırasıyla ÇTK torç için anot ark kökünün ve İTK torç için katod ark kökünün manyetik olarak tahrik edilen dönen hızlarını bulmaya odaklanmıştır. Manyetik alanın dış uygulaması, tipik torç çalışmasında elektrot erozyonunu azaltmak için ark kökünü hızla döndürmek için pratik bir yöntem olarak görülmektedir. Üç boyutlu simülasyonları, dış manyetik alan tarafından büyük bir dönen hareketin başlatıldığını, böylece plazma sıcaklığının dağılımının helezoni olarak bozulduğu durumu gözlemlemişlerdir. Her iki torç için farklı gazlar kullanılmıştır. ÇTK torç için Ar-

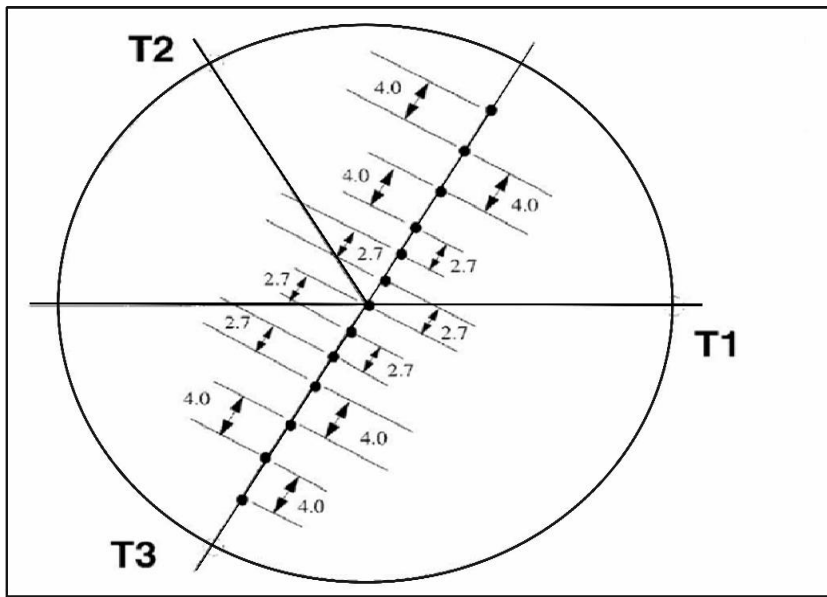
10% H_2 , İTK torç için hava çalışma gazı olarak kullanılmıştır. ÇTK torçunda $I=500A$ ve $G=40$ l/min, İTK torçu için $I=200A$ ve $G=200$ l/min değerleri tanımlanmıştır. Buna ek olarak, ÇTK tabanca için ark kökünün dönüş hızının dış alan kuvvetinin kareköküne orantılı olarak arttığı ve giriş akımı ile arttığı, ancak gaz akış hızı ile azaldığını göstermişlerdir. 2 kG'lık harici manyetik alan tarafından tahrik edilen ark kökü rotasyon hızları, tipik çalışma koşullarında ÇTK tabancası için 378 m/s, İTK tabancası için ise 92 m/s olarak ölçmüşlerdir. ÇTK ve İTK tabancaları Şekil 2.5'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.5. Transfer edilmeyen plazma torçunun iki farklı tipi a) ÇTK b) İTK [21]

Asmann ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında entalpi probu ölçümleri üçlü torç plazma reaktöründe (ÜTPR) birleşen plazma jetlerinden alınmış ve substrat ısı akışı ölçümleriyle ilgili olarak alınmıştır [22]. Sonuçlar, merkezi enjeksiyon probu aracılığıyla birleştirilen plazma jetine enjekte edilen çalışma gazlarının mükemmel şekilde sürüklendiğini göstermektedir. Düşük basınçlarda (40 kPa), plazma hacmi, tipik bir DC ark jeti ile karşılaştırıldığında nispeten homojen sıcaklık, hız ve substrat ısı akışı profillerine sahip en az 3 cm çapında, 4 cm uzunluğunda bir silindire eşdeğer olduğunu gözlemlemişlerdir. Birleşen plazma jet boyutu, substrat ısı akışı ve entalpi profilleri, uygulanan sistem gücünün güçlü bir fonksiyonu olarak gösterilmiştir. Substrat ısı akışı ölçümleri, substrat sınır katmanındaki gazların yüksek radyal hız bileşeni sebebiyle, entalpi prob ölçümlerinden daha küçük radyal eğimler gösterdiği gözlemlenmiştir. Entalpi ölçüm sonuçlarının tekrar üretilebilirliği, hız için % 11,8 ve sıcaklık ölçümleri için % 7,6 ortalama standart değer kaybıyla gösterilmiştir. Bu çalışmanın amacı, simetrinin varlığını belirlemek ve oda basıncı, torç gücü ve merkezi gaz enjeksiyonunun ÜTPR birleşmiş jet bölgesi ve substrat ısı akışının hızı, sıcaklığı ve yoğunluk profilleri üzerindeki etkilerini araştırmaya çalışmışlardır. Isı akışı

ölçümleri için radyal simetri varsayımının geçerli olduğu düşünülmektedir, çünkü plazma jetindeki asimetri torç nozulundan uzaklaştıkça azaldığını söylemişlerdir. Birleşen plazma jet merkezinde sıcaklık ve hız profillerinde küçük bir azalma gözlemlenmiş yoğunlukta ise dikkate alınır bir değişiklik görülmemiştir. Sıcaklık ve hızdaki düşüşün sebebi olarak, üç ayrı plazma jetinin birleşme noktasındaki odadan soğuk gazların girmesi durumu söylemişlerdir. Birleşen jet radyal enine-kesit düzleminin kesişimi ile tanımlanan bir çizgi boyunca ileri deneysel ölçümler yapılmıştır. Veri alma noktaları şekil 2.6’da gösterildiği gibi düzenlenmiştir.



Şekil 2.6. Plazma jetleri kesişim bölgesinde veri alınan noktalar

Selvan ve diğerleri çalışmalarında taşınımsız plazma torç içindeki arkın özelliklerini incelemek amacıyla birkaç sayısal model geliştirmişlerdir. Çalışmalarında iki farklı tip geometri kullanmışlardır [23]. Tip I geometrisinde, katot ve anot nozulunun tam geometrisi üzerinde çalışmışlardır, Tip II geometrisinde ise sadece anot nozulu ve katot ucu olarak ele almışlardır. Her iki geometri için çalışma gazı olarak Ar-N₂ gaz karışımını uygulayarak üç boyutlu bir model geliştirmişlerdir. Verilen gaz akış oranına ve akımına karşılık gelen torç gücü için ark uzunluğu ve ark çekirdeği yarıçapının farklı kombinasyonlarını sunmuşlardır. Tüm koşullar aynı kalarak minimum entropi üretiminin farklı kombinasyonlarını, tip II geometrisinde uygulamamışlardır. Bu çalışmanın sonucu olarak geometrilerin sonuçlarını karşılaştırdıklarında hızlar arasındaki fark ve sıcaklık arasındaki farkdan daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Tip I geometride anot noktasının yakınında öngörülen sıcaklık, tip II geometridekinden daha yüksektir. Her iki geometride varsayılan torç verimliliği ve ark

voltajları ölçümleri deneysel sonuçlarla mukayese edilmiştir. Ar-N₂ plazma ark özellikleri, plazma jet ve tabanca verimliliği üzerine ark akımı ve gaz akış hızının etkisini sunmuşlardır. Simülasyonda elde ettikleri tabanca verimini ve ark voltajını deneysel sonuçlarla kıyaslamışlardır. Torç çıkışında, plazma hızının sıcaklığa göre daha güçlü üç boyutlu etkiye sahip olduğunu yani ark oluşumuna karşı daha kararlı profile sahip olduğunu görmüşlerdir. Plazma jet oluşumunu, plazma ark modelinden elde edilen çeşitli nozul çıkış profilleri kullanılarak modellemiş ve sıcaklık ve hız dağılımlarını sunmuşlardır. Entropi üretimi, ark akımının azaltılmasıyla ve gaz akış hızının artırılması ile azaldığını ve ark boyunun artan ark akım ile ve gaz akış hızında azalma ile arttığını belirlemişlerdir.

Huang ve diğerleri çalışmalarında taşınimsız DC ark plazma torcunun içindeki akış modelinin 3B simülasyonu için genellikle modeller yerel termal denge (YTD) hipotezine dayandığını ve dengesiz modellerin, elektron sıcaklığının hesaplanması için oldukça karmaşık olduğunu bildirmişler [5]. Bu duruma istinaden yeni YTD modeli geliştirilmiş ve transfer edilen DC ark plazma torçu için 3B modelleme yapmışlardır. Plazma torç içindeki gaz sıcaklığı ve hız dağılımı üzerindeki yapılan sayısal hesaplamaları çalışma gazı olarak argon kullanarak elde etmişlerdir. Elektrik akım yoğunluğu ve potansiyeli dikkate alınmış ve tartışılmıştır. Elde ettikleri sonuçlar, arkın sıcaklık ve hız dağılımlarının eksenel simetrik olduğunu görmüşlerdir. Voltaj düşüşünün sonuçları, deneysel gözlemlerle iyi bir şekilde uyumlu olduğu görülmüştür. Anot erozyonunun, anotun iç yüzeyinde, en fazla sayıda elektronun enjekte edildiği yerde bulunduğu gözlemlenmiştir. Anot kısmının aşındığı bölge plazma torcunun 30 saat süresinde çalışmasıyla elde edilmiş ve anot aşındığı bölge genellikle köşeye yakın bir yerde oluştuğunu görmüşlerdir. Torç çıkışındaki sıcaklık 13.000 K ve hız 1000 m/s olarak tespit edilmiştir. Bu model kullanılarak anot erozyonunun oluştuğu yeri elektrik akım yoğunluğunun dağılımının hesaplanmasıyla daha iyi bir şekilde tahmin edilebileceğini söylemişlerdir.

Huang ve diğerleri çalışmada için DC aktarımsız plazma torç anot ark kökü bağlantısını analiz etmek için 3B kararsız bir modelleme kullanmışlardır [24]. Plazma torcunun gaz sıcaklığı ve hız dağılımı üzerine sayısal hesaplamaları plazma gazı olarak argon kullanılarak yapılmıştır. Çalışma sonucunda, plazma torcu içindeki arkın dalgalanmasının esas olarak ark kökünün anot yüzeyindeki hareketi ile indüklendiğini gözlemlenmiştir. Anod duvarının soğuk sınırındaki elektrik iletkenliğinin düşük olması sebebiyle, 0,1 mm'lik mesafe için, 104 S/m'lik yüksek bir elektrik iletkenliğini öngörmüşlerdir; bu durumda ark, anot sınırına

yeterince yakın olduğunda, oluşmuş bağlantının yukarısında bir yerde yeni bir ark kökü oluştuğunu görmüşlerdir. Argon gazı, 500 A elektrik akımı ve 50 SLPM gaz akış hızı mevcut püskürtme koşulları altında 30 000 K sıcaklıktan ve 1000 m/s hızdan yüksek sonuçlar elde edilebileceğini göstermişlerdir.

Li ve diğerleri yaptıkları çalışmalarında eksenel simetrik geometrik konfigürasyona ve eksenel simetrik sınır koşullarına sahip, doğru akım DC taşınımsız ark plazma torçuna ilişkin 3B modellemesi sonuçlarını sunmuşlardır [25]. Arkın, plazma torçun anot yüzeyine lokal olarak bağlandığı ve torç içinde oluşan ısı transferi ve plazma akışının 3B özelliklere sahip olduğu gösterilmiştir. Yaptıkları çalışmada 2B ve 3B yaklaşımları arasında dikkate değer fark olduğunu göstermişlerdir. Üç boyutlu modellemenin verdiği voltaj değeri, ölçülen değere iki boyutlu modellemenin verdiği değerden daha yakın olduğunu belirtmişlerdir. Su soğutmalı anodun dış yüzeyindeki yüksek duvar sıcaklığı bölgesi, anotun iç yüzeyindeki ark bağlantısının konumuna karşılık gelmelidir. Anot yüzeyindeki ark bağlantısının çevresel olarak düzgün olmadığını ve ark bağlantı parçasının eksenel konumunun yakınsak kısım ile anotun silindirik kısmı arasındaki kesişme noktasına yakın bölgesinde olduğunu görmüşlerdir. 3B modellemenin, 2B karşılaştırıldığında, daha gerçekçi ark voltajını ve ark kök konumunu tahmin edebileceği gösterilmiştir. Anot yüzeyinde tahmin edilen ark kök konumu ve torcun ark voltajı, karşılık gelen deneysel sonuçlarla uyum içinde olduğunu söylemişlerdir.

Yurtkuran ve diğerleri plazma atomizasyonu için aktarımsız bir plazma torçunun iç geometrisini tetkik etmişlerdir. Plazma oluşum durumunu sayısal olarak analiz etmek için HAD kullanılmıştır [26]. Torçun iç geometrisinin plazma jetinin sıcaklığı ve hızının yüksek olması ve atomizasyon verimliliği üzerinde önemli dercede etkisi olduğunu sunmuşlardır. Gaz akış hızı ve akım değerinin plazma jetindeki gaz hızı ve sıcaklığına olan etkisini incelemişlerdir. İç geometrinin, torcun dışındaki plazma jet sıcaklığı ve hızı üzerinde önemli ölçüde etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Başlangıç olarak gerçek geometri üzerinde akım ve kütle akış hızı üzerinde çalışmış sonrasında ise geometride değişiklik yapılarak plazma jetinin uzunluğunun üzerinde inceleme yapmışlardır. Katotun uç kısmından çıkışın sonuna doğru çizilen çizgi üzerindeki 200 noktadan değerler alınarak plazma jeti uzunluğu belirlemeyi amaçlamışlardır. Akım, kütle akış hızı, geometri değiştirilerek plazma jetinin torç çıkışından sonra sıcaklık ve hızının daha uzak mesafede daha yüksek olduğu durumu belirlemeye çalışmışlardır. Torç çıkışından 40, 60 ve 80 mm mesafeden hız, sıcaklık

değerlerini almışlardır. Kütle akış hızı arttıkça, çıkış sıcaklığında yükseldiğini gözlemlemiştir. Artan gaz akışı ve verilen akım değerine bağlı olarak çıkış sıcaklığını ve hızının arttığını tespit etmişlerdir. Sonuç olarak, torçun dışındaki yüksek hız ve sıcaklık için istenen plazma jet geometrisinin, geometriye uygun değişiklikler yapılarak elde edilebileceği sonucuna varmışlardır.

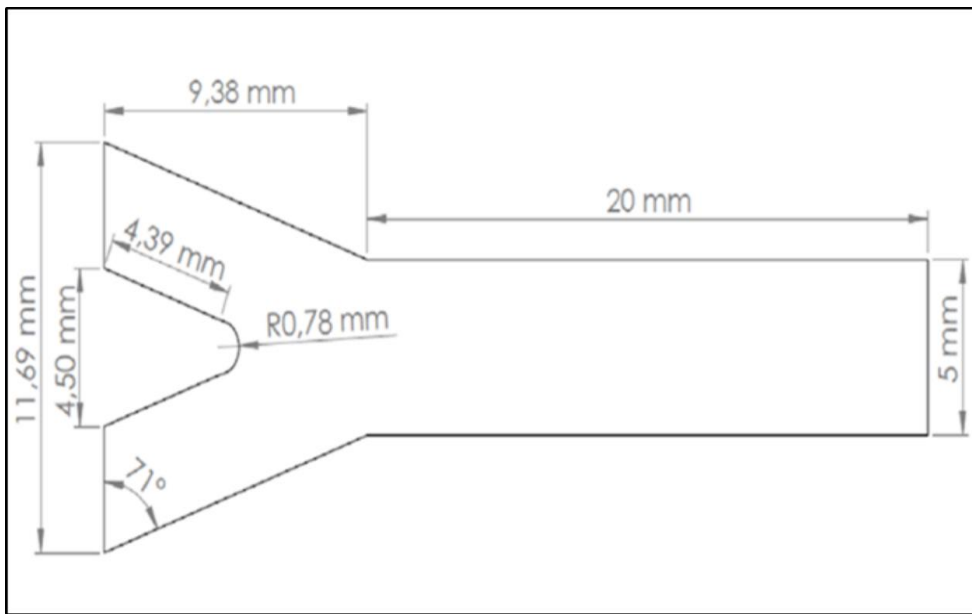
Meillot ve diğerleri DA plazma püskürtme tabancası ile oluşturulan plazma akışının davranışını üç boyutlu bir model yardımıyla zamana bağlı olarak simüle etmişlerdir [27]. Ayar parametresi olarak sadece anot içindeki plazma sütunun uzunluğu alınmıştır. Plazma oluşturmak için, hacimsel olarak 75% argon ve 25% hidrojen içeren gaz 60 SLPM kütle akış hızında kullanılmıştır. Verilen elektrik gücü 30-35kW arasında ve sıcaklık zamana bağlı olarak 2.000 ila 8.000 K arasında dalgalanma yaparken, hız 200'den yaklaşık 1.400 m / s'ye kadar değiştiği ve torcun termik verimi 50%'dir. Enerji dengesi ve gaz akış hızından, LTE varsayımına göre hesaplanan ortalama çıkış gazı entalpisi, 11.500 ila 12.000 K ortalama gaz sıcaklığına (% 5'den az değişim) denk gelen 18.5 ila 21 MJ/kg arasında tahmin edilebilmektedir. Nozul çıkışındaki sayısal sıcaklık ve hızın değerleri deneysel verilerle iyi bir şekilde benzetilmektedir.

3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

3.1. Problemin Tanımı ve Geometrilerin Belirlenmesi

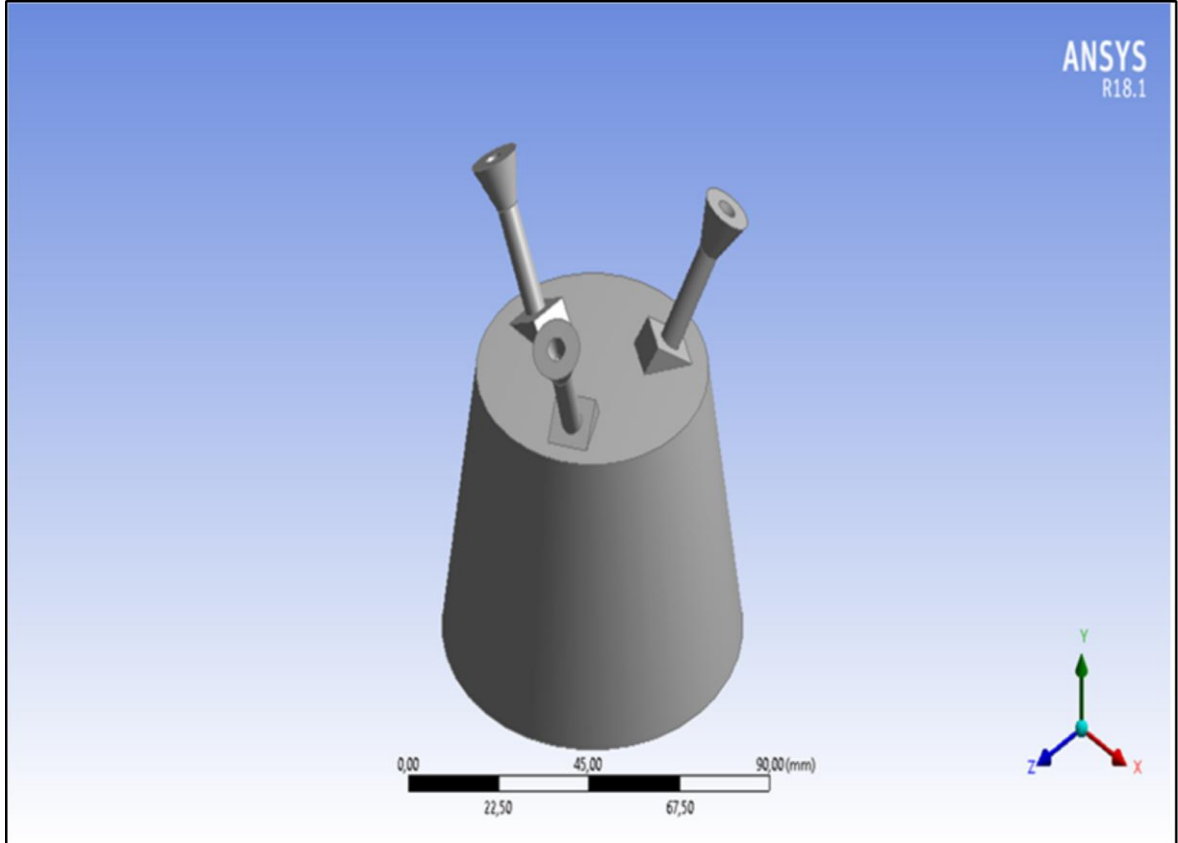
Bu çalışmada literatür ve mekalelerde DC transfer edilmeyen ark plazma torç çalışmaları dikkate alınarak 3'lü plazma torçun fiziksel modeli oluşturularak hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile ANSYS FLUENT programı kullanılarak simülasyon çalışması yapılmıştır. Problemin çözümü zamanandan bağımsız olarak, türbülanslı, sıkıştırılamaz olarak gerçekleştirilmiştir. Problemin çözümünde kütle korunum, momentum, enerji, radyasyon ve bunların yanısıra manyetohidrodinamik (MHD) denklemleri kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada katot duvarı için farklı akım değerleri ve gazın farklı hacimsel debilerinin, plazma jetlerinin kesişim noktasındaki sıcaklık, hız, yoğunluk ve bunun yanı sıra plazma oluşum sebebiyle radyasyon durumu incelenmiştir. Şekil 3.1'de plazma torçunun ölçüleri gösterilmiştir. Çözümler yapılırken plazmatörçları içerisindeki oluşan elektrik ark nedeniyle ortaya çıkan elektromanyetik alan ile gaz akışı arasındaki durumu ortaya koyabilmek için ANSYS Fluent ve Manyetohidrodinamik modülü birlikte kullanılmıştır. Çalışmada akım değeri sabit tutularak ve hacimsel debi değiştirilerek sonrasında hacimsel debi sabit tutularak ve akım değerleri değiştirilerek sonuçlar elde edilerek, akım ve hacimsel debinin akış alanı üzerindeki etkileri incelenmiştir.



Şekil 3.1. Plazma torçunun ölçüleri

Çözüm Fluent 18.1 paket programında Sonlu Hacimler Yöntemi ile çözümde kullanılan diferansiyel formdaki denklemler çeşitli ayrıklaştırma yöntemleri kullanılarak bilgisayar programlarının çözebileceği şekilde cebirsel denklemlere dönüştürülerek hız-basınç ilişkisiyle birlikte çözülen çeşitli algoritmalar ile problemin analizi sağlanmaktadır. Şekil 3.2’de üçlü plazma torçunun 3B görünümü gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Üçlü plazma torçunun 3B görünümü

3.2. Kabuller

Yapılan çalışmada plazma torçları içinde ve dışında gerçekleşen akış için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

1. Enerji denklemindeki var olan viskoz yayılma ve basınç işi terimleri ihmal edilmiştir [18].
2. Yer çekimi kuvveti, kinetik etkilerle karşılaştırıldığında çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir [5, 21]
3. Plazma gazı transport özellikleri sadece plazma gazı sıcaklığı ile belirlenmiştir [27].

4. Süreklilik varsayımı geçerli ve plazma, yerel termodinamik dengede (YTD) mükemmel bir gaz olarak kabul edilmiştir [23, 27].
5. Plazma akışı, kararlı, türbülanslı ve sıkıştırılmaz olarak kabul edilmiştir [27].
6. Plazma optik olarak incedir [17, 23].
7. Işınım dikkate alınmıştır.
8. Ark işlemi kararlı durumda olduğu varsayılır, bu sebepten denklemler zamana bağlı değil.
9. Plazma torç elektrik kaynağı sabit bir değere sahip ve kararlı durumdadır [4, 27].

3.3. Temel Denklemler

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. Akışkanlar dinamiğinde temel korunum denklemleri olarak bilinen süreklilik, momentum ve enerji denklemleri aşağıda sırasıyla verilmiştir [11].

3.3.1. Kütle korunum denklemi

Kütle korunum denklemi ya da süreklilik denklemi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.1)$$

3.3.2. Momentumun korunum denklemi

X – momentum

$$\frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right) \quad (3.2)$$

Y – momentum

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right) \quad (3.3)$$

Z –momentum

$$\frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) \quad (3.4)$$

3.3.3. Enerjinin korunum denklemi

$$\rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{j_x^2 + j_y^2 + j_z^2}{\sigma} + \frac{5}{2} \frac{k_B}{e} \vec{j} \cdot \nabla T \quad (3.5)$$

T: gaz sıcaklığı (K)

σ : elektrik iletkenliği (1/ Ω m)

j_x , j_y ve j_z x-, y- ve z- yönündeki akım yoğunluğunun (j) bileşenleri. Elektrik akım yoğunluğu vektörü (j) elektrik akım yoğunluğu veya elektrik potansiyel $\emptyset$ ile ilişkilidir.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} = -\sigma \nabla \emptyset \quad (3.6)$$

$j \cdot \nabla T$ elektron entalpisinin yayılması

E: elementer yük (C)

k_B : Boltzmann sabiti (J/K)

Γ_T : sıcaklığın laminar ve türbülans etkinlik katsayısı

$$\Gamma_T = \lambda + \frac{\mu_t c_p}{Pr_t} \quad (3.7)$$

λ : termal iletkenlik (W/ K.m)

μ_t : türbülans vizkozitesi ($\mu_t = \rho c_\mu K^2 / \epsilon$)

c_μ : sistem sabiti

3.4. Türbülans Modelleri

Çalışmada kullanılan argon gazı torç içerisine oda sıcaklığında girer. Torç içinde oluşan etkileşimden dolayı giren gazda 10^4 K/mm’lik değerinde sıcaklık oluşur. Bu durum argon gazının plazma haline geçmesine neden olur. Plazma torç içinde oluşan yüksek hız ve sıcaklık, elektromanyetik alanla akışın karmaşık bir duruma geçmesine sebep olur [28].

Üç boyutlu akımı idare eden 4 adet denklem 10 adet bilinmeyen içermektedir, bunlar: üç hız bileşeni, basınç ve 6 bağımsız Reynolds gerilmesidir. Böylece bilinmeyenler açısından denklemin kapatılabilmesi için türbülans gerilmelerinin tanımlanması gerekmektedir. Bu sorun, zamansal ortalama denklemlerin sayısal hesaplama sürecinde, denklemlerde yer alan türbülans gerilmelerinin türbülans kapatma modelleri kullanılarak çözülmesini gerektirmektedir. Reynolds gerilmelerinin oluşturduğu bu hal türbülans modelleri aracılığıyla, Eş. 3.8’deki τ_{ij} türbülans kayma gerilmelerinin çözümüyle kapanmama problemine çözüm elde edilir [29].

$$\tau_{ij} = -p\sigma_{ij} + 2\mu\epsilon_{ij} - \frac{2}{3}\mu\text{div}V\delta_{ij} + \tau_{ij} \quad (3.8)$$

Kapatma problem durumunu ortadan kaldırmak için birçok türbülans modeli geliştirilmiştir. Bu çalışmada çözümün yakınsama durumu göz önünde bulundurularak geliştirilmiş $k-\epsilon$ türbülans modeli olan Gerçekleştirilebilir (Realizable) $k-\epsilon$ (RKE) türbülans modeli uygulanmıştır. RKE türbülans modeli, COUPLED algoritmasıyla (ikinci dereceden upwind) beraber uygulanmıştır.

3.5. Gerçekleştirilebilir $k-\epsilon$ Türbülans Modeli (RKE)

RKE türbülans modeli Standart $k-\epsilon$ türbülans modeli (SKE) üzerinde, akım alanındaki yüksek şekil değiştirme hızlarının ve sınır tabakası ayrılmasının mevcut olduğu karmaşık akım durumlarında performansı yükseltmek için RKE modeli adı altında birkaç geliştirmeler yapılarak gerçekleştirilir. RKE türbülans modeli türbülans viskozitesi, μ_t , ifadesinde, sabit bir değer yerine değişken C_μ terimi kullanılarak SKE modelindeki katı yüzeye dik şekil değiştirme bileşenlerinin değeri küçültülmüş, ve ϵ transport denkleminde yerel şekil değiştirme hızını esas alarak gelişmiş ek denklemler ve değişken türbülans viskozite

katsayısı önerir. RKE türbülans modeli jet akışı, dönen akışlar, güçlü basınç gradyanları altındaki sınır koşullarındaki akışlarda ve ayrılma-yeniden birleşmelerin olduğu akışlarda üstün performans gösterir. Türbülans kinetik enerjisi yayılımı (ε) için yeni bir formülasyon ve türbülans viskozitesi denklemi için yeni yaklaşım içerir. RKE türbülans modeli gergin, ortalama bir akışta Boussinesq denklemi ve eddy viskozite denkleminin kombinasyonu ile türetilmiş türbülans modelidir [29].

Taşıma denklemleri: Türbülans kinetik enerjisi (k) ve türbülans yayılım oranını (ε) aşağıda sırasıyla verilen taşıma denklemlerden elde edilir.

Eş. 3.9 ve Eş. 3.10'da P_k , ortalama hız gradyanlarından kaynaklı türbülans kinetik enerjisi üretimi, P_b , kaldırma kuvvetinden kaynaklı türbülans kinetik enerjisi üretimi, Y_M , disipasyon oranı, $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ve $C_{3\varepsilon}$ sabit katsayıları, σ_ε ve σ_k kinetik enerjisi (k) ve yayılım oranını (ε) için türbülans Prandtl Sayıları, S_ε ve S_k kullanıcı tanımlı kaynak terimlerdir.

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_t} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] P_k + P_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (3.9)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{1\varepsilon} S_\varepsilon - \rho C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (C_{3\varepsilon} P_b) + S_\varepsilon \quad (3.10)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5} \right] \quad (3.11)$$

$$\eta = S \frac{k}{\varepsilon} \quad (3.12)$$

$$S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} \quad (3.13)$$

Eş. 3.14 ortalama hız geçişleri sebebiyle meydana gelen türbülansı ifade eder. Türbülans viskozite, diğer modellerden farklı olarak C_μ değeri sabit olmayıp belli değışkene göre değışen bir fonksiyondur.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.14)$$

$$C_\mu = \frac{1}{A_0 + A_s \frac{kU^*}{\varepsilon}} \quad (3.15)$$

$$U^* \equiv \sqrt{S_{ij}S_{ij} + \tilde{\Omega}_{ij}\tilde{\Omega}_{ij}} \quad (3.16)$$

$$\tilde{\Omega}_{ij} = \Omega_{ij} - 2\partial_{ijk}\omega_k \quad (3.17)$$

$$\Omega_{ij} \equiv \bar{\Omega}_{ij} - 2\partial_{ijk}\omega_k \quad (3.18)$$

$$A_0 = 4.04, A_s = \sqrt{6} \cos \phi \quad (3.19)$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1} \sqrt{6} W \quad (3.20)$$

$$W = \frac{S_{ij}S_{ij}S_{ki}}{\tilde{S}^3} \quad (3.21)$$

$$\tilde{S} = \sqrt{S_{ij}S_{ij}} \quad (3.22)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.23)$$

Model sabitleri: Taşıma denklemleri ve türbülans viskozite denklemleri oluşturulurken ara kademelerde belli sabitler elde edilir. Bunla aşağıda gösterilmiştir.

$$C_{1\partial} = 1.44, C_2 = 1.9, \sigma_k = 1.0, \sigma_\partial = 1.2$$

3.6. Reynold sayısı

Reynolds sayısı bir akışkan akımında atalet kuvvetleri ile viskoz kuvvetler (sürtünme kuvvetleri) arasındaki oranı gösteren çok önemli bir parametredir.

$$Re = \frac{\text{Atalet Kuvvetleri}}{\text{Viskoz Kuvvetleri}} \quad (3.24)$$

$$Re = \frac{\rho \times V \times D_h}{\mu} \quad (3.25)$$

ρ : yoğunluk (kg/m³)

V : hız (m/s)

D_h : nozulun hidrolik çapı (m)

μ : dinamik viskozitesi (N.s/m²)

Bu tanıma göre, Reynolds sayısının çok küçük olduğu zaman bir akım alanının hemen tamamında viskoz kuvvetlerin hakim olacağı söylenebilir. Buna karşılık Reynolds sayısı arttıkça viskoz kuvvetlerinin atalet kuvvetleri yanında öneminin azaldığını görürüz. Reynolds sayısının yüksek değerlerinde ise akım alanının genelinde atalet kuvvetlerinin baskın olduğunu, bu kuvvetler yanında sürtünme kuvvetlerinin etkisinin ihmal edilebilir olduğunu görürüz.

$$Re = \frac{0,071 \text{ kg/m}^3 \times 1200 \text{ m/s} \times 7.6 \times 10^{-3} \text{ m}}{9.23 \times 10^{-5} \text{ kg/m.s}} = 7015,38$$

Reynolds sayısı 4 000'den büyük olduğu için akış türbülanslı olarak değerlendirilmiştir.

3.7. P-1 Radyasyon Modeli

P-1 modelinin diğer radyasyon modellerine göre birkaç avantajı vardır. Model saçılma etkisini içerir. Optik kalınlığın büyük olduğu yanma uygulamaları için, P-1 modeli oldukça iyi çalışır. P-1 modeli eğrisel koordinatlarla karmaşık geometrilere kolayca uygulanabilir. P-1 radyasyon modelini kullanırken bazı sınırlamalara dikkat edilmelidir. P-1 modeli tüm yüzeylerin dağılmış olduğunu kabul eder. Bu olay radyasyonunun yüzeydeki yansımalarının katı açığa göre izotropik olduğu anlamına gelir. Uygulama, gri bantlı bir model kullanarak gri radyasyonla veya gri olmayan radyasyonla sınırlandırılmıştır. Gri olmayan uygulama, her dalga boyu bandında sabit bir emme katsayısı varsaymaktadır. Gri olmayan uygulama aynı zamanda duvarlardaki spektral yayılmanın her bir bant içinde sabit olduğunu varsayar. Bu bölümde P-1 modelinde kullanılan denklemler hakkında ayrıntılı bilgi verilmektedir [30].

$$q_r = - \frac{1}{3(a+\sigma_s)-c\sigma_s} \nabla G \quad (3.26)$$

Burada q_r radyasyon akışı, a emme katsayısı, σ_s saçılma katsayısı, G olay radyasyonu ve aşağıda tarif edilen C doğrusal anizotropik faz fonksiyon katsayısıdır.

$$\Gamma = \frac{1}{3(a+\sigma_s)-C\sigma_s} \quad (3.27)$$

$$q_r = -\Gamma \nabla G \quad (3.28)$$

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) - aG + 4an^2\sigma T^4 = S_G \quad (3.29)$$

burada n , ortamın kırılma indisidir, σ , Stefan-Boltzmann sabitidir ve S_G , kullanıcı tarafından tanımlanmış bir radyasyon kaynağıdır.

$$-\nabla \cdot q_r = aG - 4an^2\sigma T^4 \quad (3.30)$$

$$\nabla \cdot (\Gamma_\lambda \nabla G_\lambda) - a_\lambda G_\lambda + 4a_\lambda n^2\sigma T^4 = S_{G\lambda} \quad (3.31)$$

$$G_{b\lambda} = 4[F(0 \rightarrow n\lambda_2 T) - F(0 \rightarrow n\lambda_1 T)]\sigma T^4 \quad (3.32)$$

buradaki $F(0 \rightarrow n\lambda T)$, bir refraktif indeks λ_1 ve λ_2 ortamında T sıcaklığında 0 ila λ arasındaki dalga boyu aralığında bir kara cisim tarafından yayılan radyan enerjinin kesitidir ve bandın dalga boyu sınırlarıdır.

$$-\nabla q_r = \sum_{\text{tüm bandlar}} -\nabla q_{r,\lambda} = \sum_{\text{tüm bandlar}} a_\lambda (G_\lambda - n^2 G_{b\lambda}) \quad (3.33)$$

$$\nabla \cdot (\Gamma \nabla G) + 4\pi \left(an^2 \frac{2\sigma T^4}{\pi} + E_p \right) - (a + a_p)G = 0 \quad (3.34)$$

E_p , parçacıkların eşdeğer emisyonudur, a_p , eşdeğer emme katsayısıdır ve n , ortamın kırılma indisidir.

$$A_{pn} = \frac{\pi d_{pn}^2}{4} \quad (3.35)$$

A_{pn} projelendirilmiş alan,

$$\Gamma = \frac{1}{3(a+a_p+\sigma_p)} \quad (3.36)$$

σ_p eşdeğer parçacık saçılma katsayısı

$$-\nabla \cdot q_r = -4\pi \left(an^2 \frac{\sigma T^4}{\pi} + E_p \right) + (a + a_p)G \quad (3.37)$$

$$q_r \cdot \vec{n} = -\Gamma \nabla G \cdot \vec{n} \quad (3.38)$$

$$q_{r,w} = -\Gamma \frac{\partial G}{\partial n} \quad (3.39)$$

$$q_{r,w} = -\frac{\varepsilon_w}{2(2-\varepsilon_w)} (4n^2 \sigma T_W^4 - G_w) \quad (3.40)$$

Bu denklem, enerji denklemi için $q_{r,w}$ olayını hesaplamak ve gelen radyasyon denklemi sınır koşulları için kullanılır.

$$q_{\lambda,w} = -\frac{\varepsilon_{\lambda,w}}{2(2-\varepsilon_{\lambda,w})} (4n^2 [F(0 \rightarrow n\lambda_2 T) - F(0 \rightarrow n\lambda_1 T)] \sigma T^4 - G_{\lambda,w}) \quad (3.41)$$

$\varepsilon_{\lambda,w}$ duvarın yayılmasıdır, $G_{\lambda,w}$ duvardaki spektral gelen ışıdır, $q_{\lambda,w}$ duvardaki spektral ışı akışıdır.

3.8. Manyetohidrodinamik (MHD)

Literatürde genel olarak plazma durumu için üç adet temsil göstermiştir. İlk temsili olarak parçacık hızlandırıcılarının esasları olan parçacık optiği gösterim durumudur. Bu sistem ışığın merceklerdeki optik tutumuna benzetilerek elektron ve iyonların elektromanyetik alandaki davranışını incelemektedir. İkinci temsili kinetik plazma durumunu toplu gaz dinamiği şeklinde tetkik eder ayrıca bu gösterim biçimi kinetik teoriyi ifade eder. Üçüncü temsili ise manyetohidrodinamik (MHD) temsidir. Burada kinetik teorisinin özel bir durumunda parçacıklar arası uzaklık çok kısa ve ortam sürekli bir akışkan gibi düşünülür. Dolayısıyla kinetik teorisinin temelini oluşturan Vlasov-Boltzmann denkleminin integralleri alınarak plazmayı tanımlayan MHD denklemleri elde edilir. Manyetohidrodinamik kelimesinin

etimolojik kökeni manyetik alandan kaynaklanan “manyeto”, akışkan anlamındaki “hidro” ve hareket anlamındaki “dinamik” kelimelerinin birleşimine dayanmaktadır. MHD, manyetik alan ve sıvı akışkanın karşılıklı etkileşimiyle ilgilidir. Manyetohidrodinamik (MHD) elektriksel iletken akışkanların akışını tanımlamak için elektromanyetizma ve akışkanlar mekaniğini birleştiren bir çalışma alanıdır [31].

Manyetik alan (B) ve bir hız alanın (u) karşılıklı etkileşimi Faraday ve Amper ve kısmen bir akım taşıyan cisim tarafından karşılaşılan Lorentz kuvveti tarafından oluşur. İletken bir sıvı ve bir manyetik alanın ilişkili hareketi Faraday kanunlarınca bir elektro manyetik alanın ($u \times B$) meydana gelmesine neden olur. Amper yasasına göre indüklenmiş akım ikinci bir indüklenmiş manyetik alana sebep olur. İlk manyetik alanın üzerine bunlarda eklendiği zaman genel olarak akışın manyetik alan çizgilerine sürtünmesine neden olur. Birleşik manyetik alan, indüklenmiş akım yoğunluğuyla (J) etkileşmesiyle Lorentz kuvvetinin ortaya çıkarır ($J \times B$) [12].

Elektromanyetik alanlardaki özelliklerin akım ve yükler tarafından nasıl oluşturulduğu durumu Maxwell'in eşitlikleri denklemleriyle açıklanır. Bu denklemler Gaus, Amper, ve Faraday yasalarına göre yazılmış olup aşağıda verilmiştir: [26]

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (3.42)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (3.43)$$

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{J} \quad (3.44)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (3.45)$$

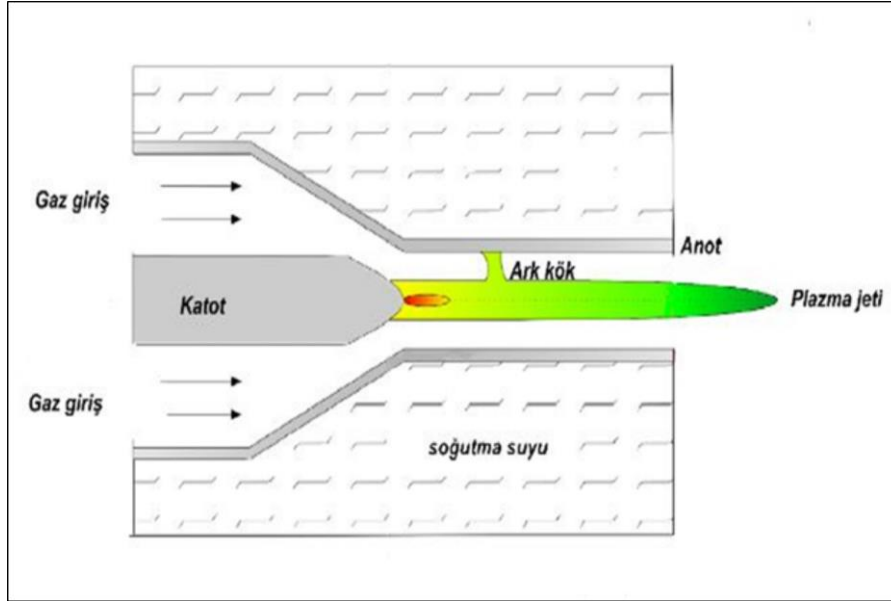
Manyetohidrodinamik (MHD), elektromanyetik alanların oluşturduğu noktasal yük üzerindeki elektrik ve manyetik kuvvetlerin bileşkesi olan “Lorentz Force” denklemi ve elektrik akımının oluşturduğu ısı ile bir ideal gazın iç enerjisinin, basınç, hacim ve sıcaklığına olan ilişkisini gösteren “Joule Heating” denklemi çözülmüştür. “Lorentz Force” 3.16 eşitliğinde, “Joule Heating” 3.17 eşitliğinde verilmiştir: [11].

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (3.46)$$

$$Q_J = \frac{1}{\sigma} \vec{j} \cdot \vec{j} \quad (3.47)$$

.

3.9. Sınır şartlar



Şekil 3.3. Plazma torç sınır şartları

3.9.1. Giriş sınır şartı

DC plazma torçları simülasyonlarında sınır şartları uygulanmasında giriş sınır şartı diğer sınır şartlarına göre oldukça kolay uygulanır. Giriş sınır şartı, çalışma gazın hesaplama alanına giren kısım üzerinde özelliklerinin hız ve sıcaklık gibi değerlerinin girilmesiyle uygulanılır. Plazma torç simülasyonlarında giriş ve çıkış durumu için basınç belirtilmesi torç içini kapsadığı durumlarda zordur. Sıkıştırılamaz akış durumunda basınç genellikle çıkış sınır şartı olarak belirtilirken sıkıştırılabilir akışlarda ise basınç, akış sesaltı ve supersonik olmasına bağlı olarak, giriş ve çıkış sınır şartı olarak tanımlanılabilir. Akış genel olarak torç girişinde sıkıştırılamaz olduğu ve torç çıkışında ise akış sesaltı ve supersonik olduğu bilinmektedir [19].

Bu çalışmada literatür dikkate alınarak giriş sınır şartı uygulanarak daha iyi sınır şartları elde etmek için denemeler yapılmıştır. Çalışma gazı olarak kullanılan argon gazı için hacimsel akış debisi olarak 15, 25, 37, 50, 70 SLPM değerleri uygulanmıştır. Çalışma gaz

giriş sıcaklığı 300 K olarak girilmiştir [24, 27]. Gaz giriş sınırından normal (normal to boundary) olarak enjekte edilmiştir. Gaz giriş basıncı, 8 bar olarak uygulanmıştır.

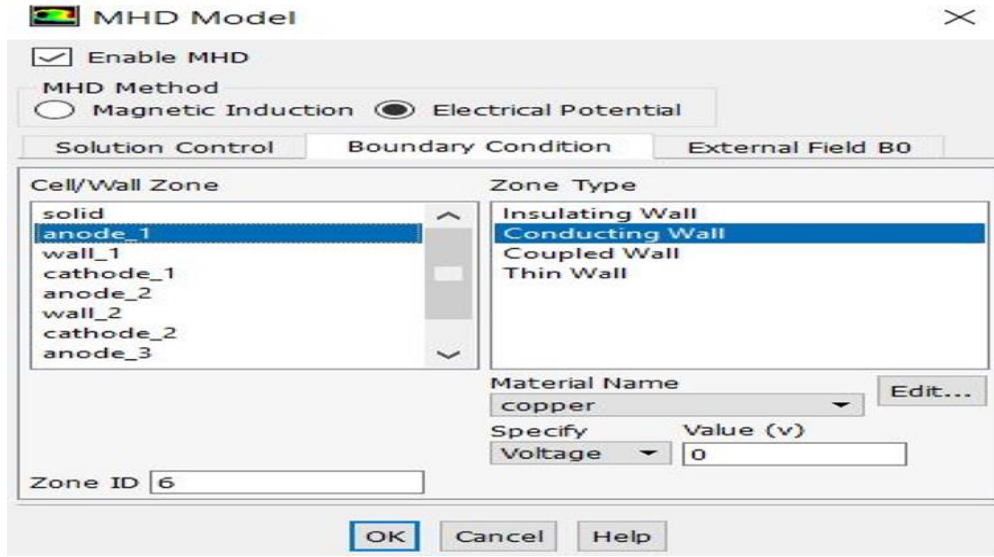
3.9.2. Çıkış sınır şartı

DC plazma torçlarının simülasyonlarında çıkış sınırı olarak torç çıkışına yakın alanlardır. Plazma jeti oluşturan torçlarda hız ve sıcaklık durumundan dolayı çıkış sınır koşulunu belirtilirken dikkat edilmesi gerekir.

Bu çalışmada üç torç için tek çıkış sınır şartı uygulanmıştır. Literatür dikkate alınarak çıkış sınır şartı basınç (pressure outlet) olarak tanımlanarak, çıkış basıncı olarak atmosfer basıncı girilmiştir. Gösterge basıncı ‘‘sıfır’’ olarak tanımlanmıştır. Çıkış için sıcaklık sınır şartı 300 K olarak girilmiştir.

3.9.3. Anot duvar sınır şartı

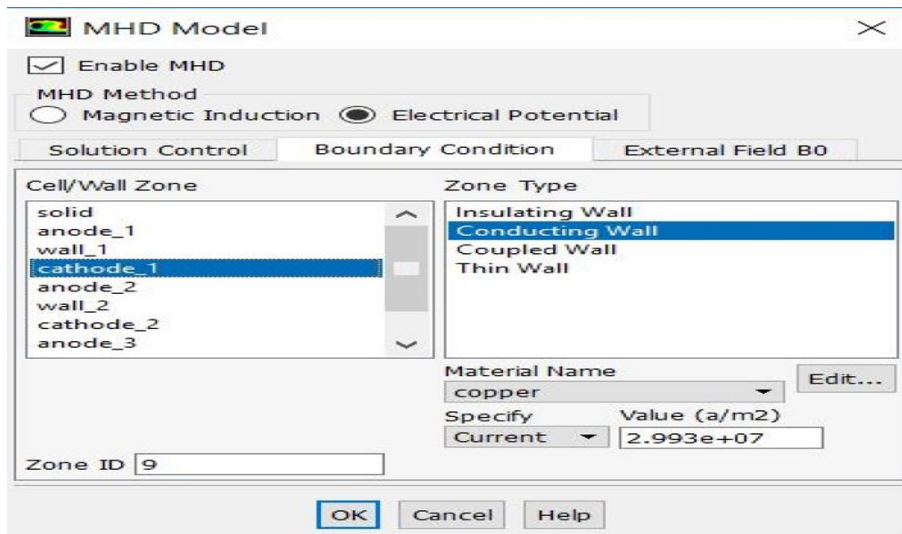
Ark oluşumu için elektrodlar ve iletken olmayan duvarlar arasında farklı sınır şartları verilmesi gerekir. Anot duvarı için kayma olmama (No Slip) durumu uygulanır ve elektrik akımı tanımlanmamıştır [28]. Bu problemde anot duvarına elektrik potansiyeli belirtilmemiştir [30, 32]. Anot duvar sınır şartında anot malzemesi olarak bakır seçilmiştir [33]. Anot iletken duvar (conducting wall) olarak tanımlanmıştır. Anot duvarı için konveksiyon seçilerek anot duvarı soğutma suyu için ısı transfer katsayısı 10^2 W / Km^2 olarak girilmiştir. Soğutma suyu sıcaklığı 300 K olarak tanımlanmıştır [16, 27]. Bakır malzemesi için radyasyon dış salınım değeri 0,8 olarak girilmiştir [34]. Anot duvarları için hareketsiz (Stationary wall) ve kaymasız (No Slip) koşulları belirlenmiştir. Bu sınır şartları diğer anot duvarları içinde girilmiştir. MHD anot sınır şartı paneli Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. MHD anot duvar sınır şartı paneli

3.9.4. Katot duvar sınır şartı

Bu problemde plazma torçlarının her katot duvarı için iletken duvar olarak tanımlanmış katot malzemesi olarak bakır seçilmiştir [35]. Bakır malzemesi için radyasyon dış salınım değeri 0,8 olarak girilmiştir [34]. Katot duvarları için sıcaklık sınır şartı 3500 K olarak tanımlanmıştır [19, 27]. Katot duvarları için haraketsiz (Stationary Wall) ve kaymasız (No Slip) sınır koşulları tanımlanmıştır. Debi sabit tutularak katotun uç bölgesinden 100, 150, 200, 250, 300 A akım değerleri verilerek anot ve katot arasında ark oluşumu sağlanmıştır. MHD katot sınır şartı paneli Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. MHD katot duvar sınır şartı paneli

4. SAYISAL ÇÖZÜM

Deneysel çalışmalar sayısal çözümlemelere nispeten daha doğru ve daha güvenilir sonuçlar göstermesinin yanı sıra deneysel yöntemleri kısıtlayan, ölçme zorlukları, yüksek maliyet, ölçmelerde oluşabilecek hatalar, farklı noktalardan veri alma problemleri, oluşabilecek fiziksel sorunlar gibi dezavantajları olması sebebiyle istenilen çözümlere ulaşılamamaktadır. Bunun gibi zorlukların olması ve bilgisayar donanımının gelişmesi ve kapasitelerinin yükseltilmesi, farklı akış parametrelerinin çalışılması için hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımıyla istenilen sonuçlar elde etme olanağı sağlar. HAD (Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği), temel olarak akışkan davranışının etkili olduğu problemlerin, sayısal metot ve algoritmalar ile bilgisayar üzerinde çözülerek analiz edildiği, akışkanlar mekaniğinin bir koludur. Karmaşık geometriler, viskozite, sıcaklık farkları vb. etkenler klasik akışkanlar mekaniğinin temel denklemlerine uygulandığında çözüm çok zor, çoğunlukla olumsuzdur.

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD), akış, ısı, kütle transferi, enerji, yanma ve bunlar gibi problemlerin sayısal olarak çözümlendiği bir yöntemdir. HAD analiz yöntemi akış hareketini belirleyen diferansiyel denklemlerin çözümlendiği özellikle hız, basınç, sıcaklık dağılımları akış alanına ait akım çizgileri ve bunlar gibi akış alanı üzerindeki özellikleri elde etmek için kullanılmaktadır. HAD yazılımlarının yardımıyla daha az maliyet ve daha kısa sürede sonuç elde edilmesinin yanı sıra model üzerinde oluşturulacak ağ yapısı, sınır şartları problemleri, güçlü bilgisayarlar gerektirmesi gibi zorluklar vardır. HAD ve deneysel yöntemler birlikte ele alınarak deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar HAD sonuçlarıyla karşılaştırma yapılarak uyum içinde olup olmadığı doğrulanır. Hesaplamalı akışkanlar dinamiğinde problemin temel matematiksel işlemlerle çözülebilecek hale getirilmesine durumu ayrıklaştırma olarak bilinir. Ayrıklaştırma yöntemiyle matematiksel formülasyonlarla ifade edilen denklemlerin çözüm ağı boyunca ayrıklaştırılarak lineer denklemler sistemine dönüştürülerek elde edilmesi sağlanır.

Yapılan çalışmanın bu bölümünde uygun ağ yapısının oluşturulması, türbülans modeli, çözüm metodları, uygun çözücünün belirlenmesi gibi önemli hususlardan bahsedilmiştir. Yapılan çalışmada HAD yazılımı olarak ‘ANSYS FLUENT 18.1’ paket programı kullanılmıştır. ANSYS FLUENT programında sonlu hacimler metodunun kullanılması çözücü seçeneklerini oldukça geliştirmiştir. Modelin geometrisi ‘ANSYS WORKBENCH’

içinde ‘‘Geometry’’ (Design Modeler adı verilen) panelinde oluşturularak ve bu geometriye uygun hücre yapısı ‘‘WORKBENCH’’ içindeki ‘‘mesh’’ bölümünde oluşturulmuştur.

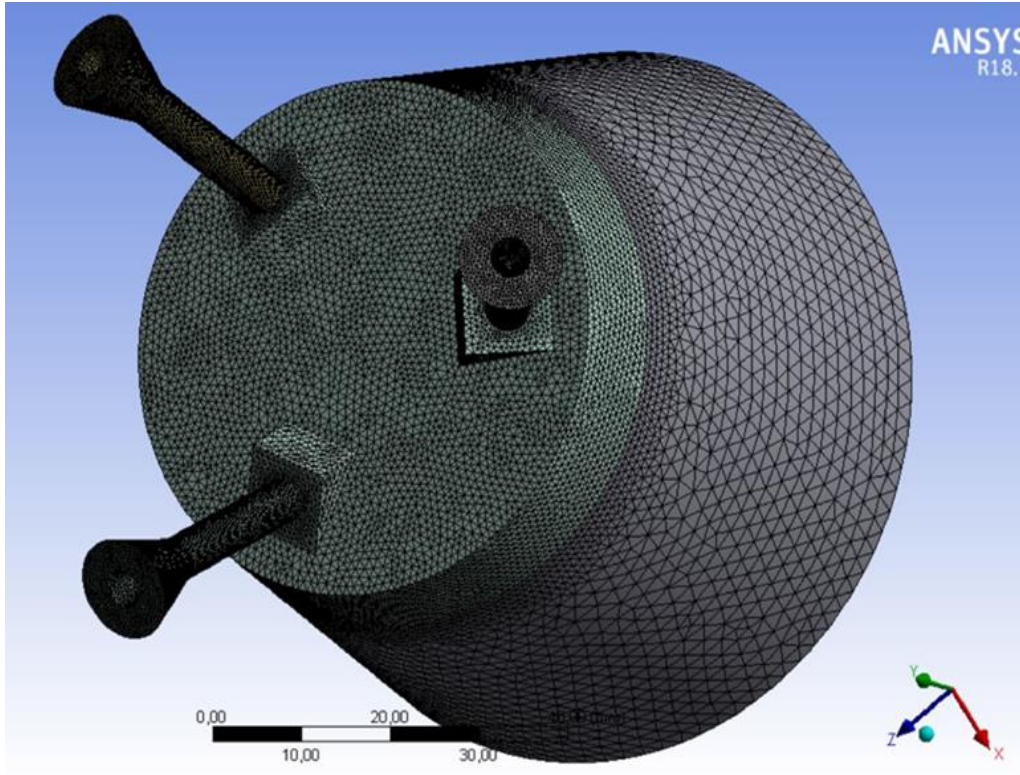
4.1. Çözümün Ağ Yapısı

Akışın gerçekleşeceği hacmin, akışı canlandıracak farklı sayılarda elemanlara bölünme işlemine ‘‘ağ oluşturma’’ denir. Ağ oluşturma işlemi için ANSYS FLUENT, sonlu hacimler metodu kullanarak gerçekleştirir. Sayısal çözümün elde edilebilmesi için çözüm alanında sayısal ağ yapısı oluşturularak diferansiyel denklemler olarak bilinen matematiksel fonksiyonlar cebirsel denklemlere dönüştürülerek sayısal çözüm sağlanır. Teorik olarak çözüm alanı için cebirsel denklemlerin yazılması durumunda sonsuz sayıda denklem yazılmış olur ve bu denklemlerin çözümü mümkün olmamasından dolayı belli noktalar ayrıştırılarak cebirsel denklem çözümü gerçekleştirilir. Bu noktalar hücre adı verilen birimlerdir.

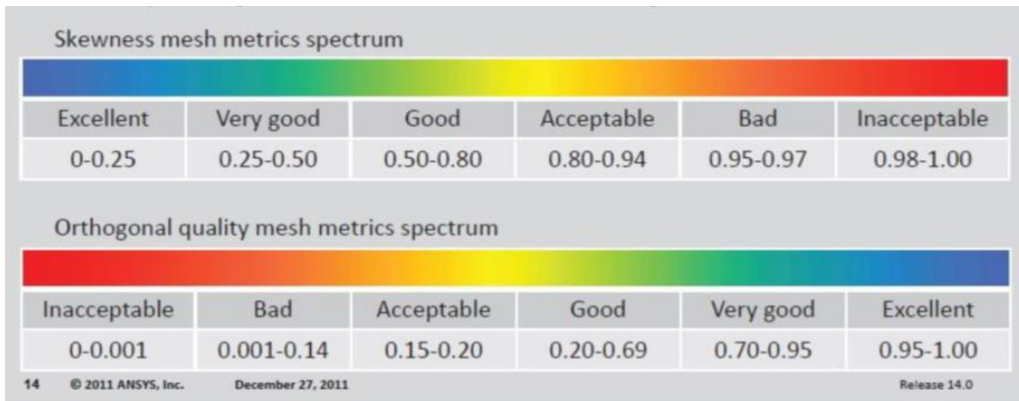
Bu problemde çözüm alanı farklı eleman adedi ve elemanın bulunduğu konuma göre eleman yoğunluğunun, akışı en uygun seviyede canlandıracak şekilde seçilmesidir. Hücre sayısı ve yoğunluğunun az olması durumunda çözüm alanında çözümün yeterli hassasiyetle elde edilmemesine ve çok seçilmesi durumunda ise zaman ve kaynak kullanımını artıracak gibi sonuçlar ortaya çıkar. Hücre yapısı olarak dört yüzlü (tetrahedral) hücre tipi kullanılmıştır.

Yapılan çalışmada modelin farklı eleman sayıları kullanılarak, çözümün ağ sayısından bağımsızlaştırma işlemi uygun eleman sayısı elde edilerek gerçekleştirilmiştir. Çözümler elde edilen uygun eleman sayılarını belirlemek için 136 992 ile 1 577 317 hücre sayıları arasında denemeler yapılmıştır.

Modelin hücre yapılarının uygun aralıklarda olduğunu belirlemek için şekil 4.2’de gösterilen tablodan yararlanarak ‘‘skewness’’ ve ‘‘orthogonal’’ değerleri kontrol edilmiştir.



Şekil 4.1. Sayısal analizde kullanılan ağ yapısı



Şekil 4.2. Hücre kalite değer aralıkları [36]

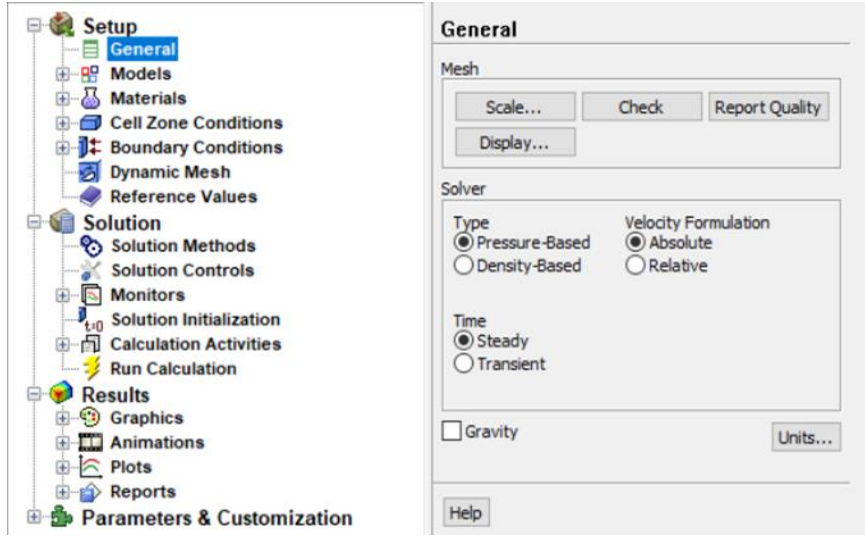
Yapılan çalışmada kullanılan hüce yapısı için “skewness” ve “orthogonal” değerleri şekil 4.3’te gösterilmiştir. Kullanılan hücre kalite değer aralıkları ortalama olarak skewness için 0,21 ve othogonal için ise 0,79 olarak elde edilmiştir.

Quality		Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors	Check Mesh Quality	Yes, Errors
☐ Target Skewness	Default (0.900000)	☐ Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	High	Smoothing	High
Mesh Metric	Skewness	Mesh Metric	Orthogonal Quality
☐ Min	2,3351e-007	☐ Min	0,20157
☐ Max	0,79843	☐ Max	0,99617
☐ Average	0,20955	☐ Average	0,78913
☐ Standard Deviation	0,11448	☐ Standard Deviation	0,11283
+ Inflation		+ Inflation	
+ Assembly Meshing		+ Assembly Meshing	
+ Advanced		+ Advanced	
+ Statistics		+ Statistics	

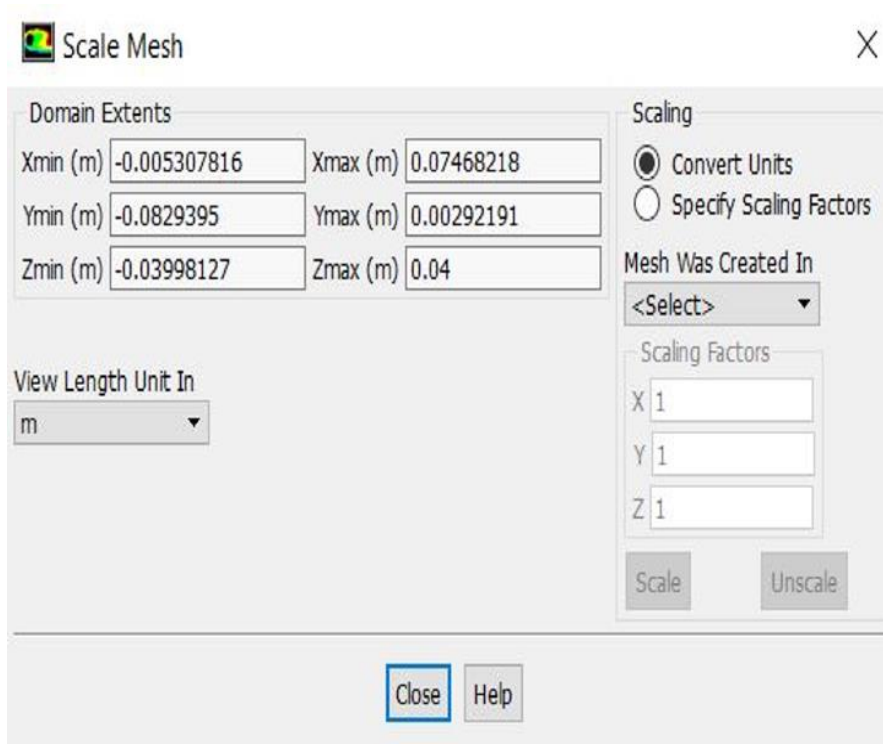
Şekil 4.3. Çalışmada kullanılan hücre yapısı için hücre kalitesi

4.2. Genel Ayarlar

Yapılan çalışmalar için zamandan bağımsız (steady-state) çözüm yapılmıştır. Plazma torçunun giriş bölgesinde akış sıkıştırılamazken ($Ma < 0,3$), torç çıkışında sıkıştırılabilir. Literatüre de bağlı kalınarak akış sıkıştırılamaz olarak kabul edilmiştir ve basınç tabanlı (Pressure-based) çözücü kullanılmıştır (şekil 4.4). Çözüm ağı kontrolü: ‘‘scale’’ sekmesi yardımıyla hücre oluşturulurken kullanılan birimlerin (mm, sm, m gibi) uygunluğunu kontrol ederek uygun birimlerin dönüşümü elde edilebilir. ‘‘Chek’’ sekmesi yardımıyla ağın geçerliliği doğrulama kontrolü yapılır. ‘‘Chek’’, hacim istatistikleri, ağ topolojisi ve periyodik sınır bilgisinin, eksene referansla düğüm konumunun doğrulanması sağlar. Negatif hacim değerleri olması durumunda tekrar geometri bölümüne giderek yeniden düzenleme yapılması gerekir (Şekil 4.5). ‘‘Report quality’’ sekmesi yardımıyla da çözüm ağ yapı kalitesi uygunluğu kontrol edilir (Şekil 4.6).



Şekil 4.4. Genel ayarlar görüntüsü



Şekil 4.5. Yapılan modelin boyut kontrolü

```

Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = -5.307816e-03, max (m) = 7.468218e-02
  y-coordinate: min (m) = -8.293950e-02, max (m) = 2.921910e-03
  z-coordinate: min (m) = -3.998127e-02, max (m) = 4.000000e-02
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 1.730652e-12
  maximum volume (m3): 3.815673e-09
  total volume (m3): 2.109213e-04
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 2.268076e-08
  maximum face area (m2): 6.421035e-06
Checking mesh.....
Done.

Mesh Quality:

Minimum Orthogonal Quality = 2.00003e-01
(To improve Orthogonal quality , use "Inverse Orthogonal Quality" in Fluent Meshing,
 where Inverse Orthogonal Quality = 1 - Orthogonal Quality)

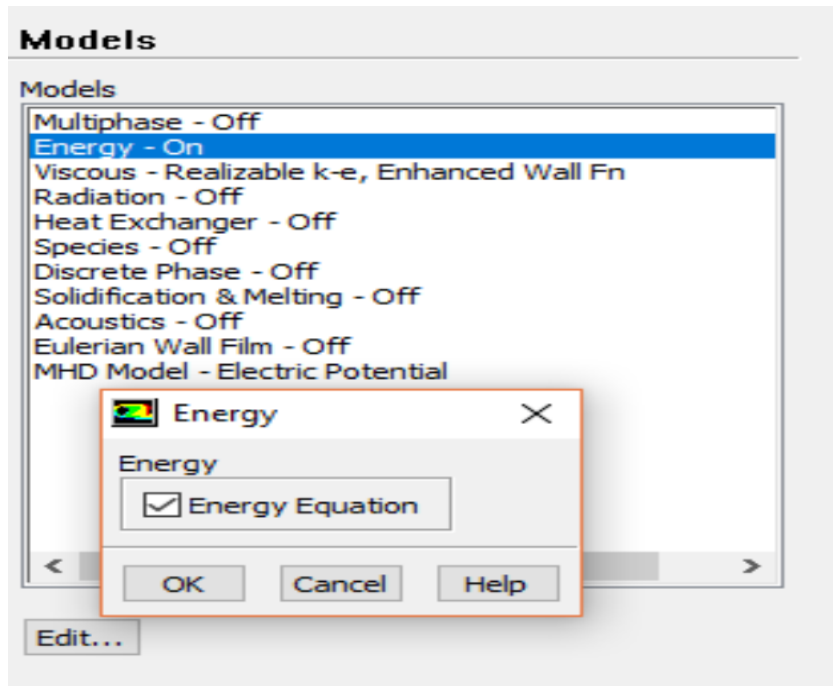
Maximum Aspect Ratio = 1.87569e+01

```

Şekil 4.6. Yapılan modelin ağ yapısı kontrolü

4.3. Enerji Denkleminin Çözümü

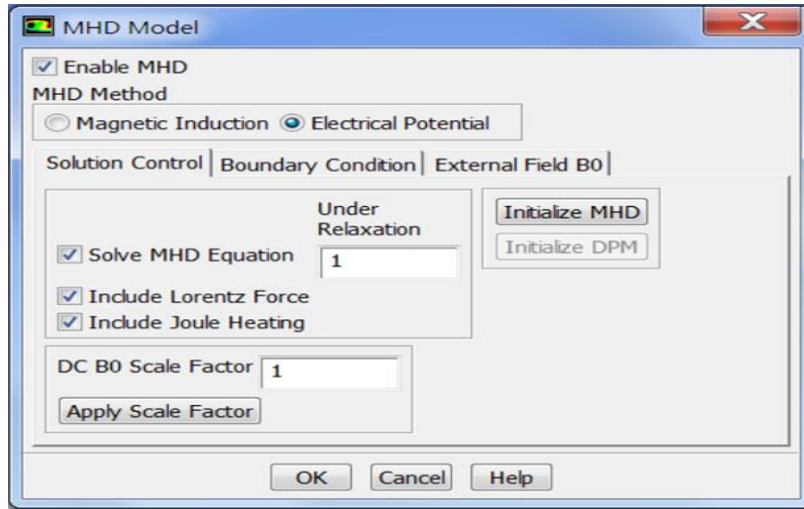
Modelimizde giriş, çıkış, duvar sınır şartlarında sıcaklık değerleri girilmesi sebebiyle “Energy” sekmesi aktif edilerek enerji denklemleri çözümü gerçekleştirilmiştir. Enerji modeli paneli şekil 4.7’de gösterilmiştir.



Şekil 4.7. Enerji denklemleri çözümü için enerji modeli paneli

4.4. Manyetik Alan Denklemlerinin Çözümü

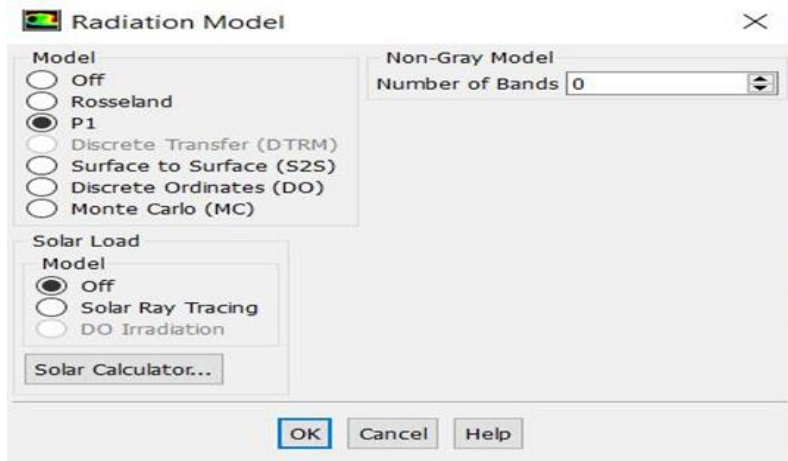
Yapılan çalışmada Manyetohidrodinamik (MHD) modülü, çalışma gazı ve elektrik alan arasındaki ilişkiyi sunmak için aktif edilmiştir. MHD panelinde “Solve MHD Equation, Include Lorentz Force ve Include Joule Heating” seçenekleri aktif hale getirilerek çözümler yapılmıştır. Katot ve anot arasında ark oluşumunu sağlamak için “Electrical Potential” seçeneği tanımlandı. MHD paneli Şekil 4.8’te gösterilmiştir.



Şekil 4.8. MHD model paneli

4.5. P1 Radyasyon Modeli

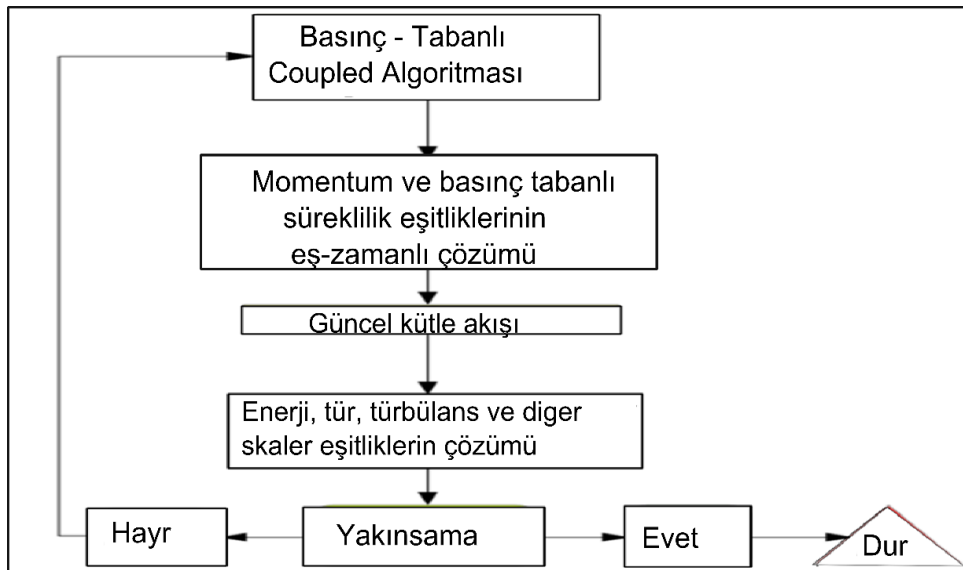
Bu çalışmada da daha doğru sonuçlara ulaşmak amaçlanarak; sayısal simülasyonlarda daha iyi yakınsayan çözümler vermesi, hesaplama süresinin daha az olması ve daha az bilgisayar kapasitesi kullanması nedeniyle P1 radyasyon modeli kullanılmıştır. P1 model, radyasyon yoğunluğunun genişlemesine dayanan P-N modelin en basit halidir. P1 model radyasyonun bütün yüzeylere yayıldığını kabul ederek çözümleri yapar. P1 radyasyon modeli aktif hale getirilerek duvar sınır şartlarında duvar malzemesi dış salınım değeri girilerek çözümler yapılmıştır. Radyasyon model paneli Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



Şekil 4.9. Radyasyon modeli paneli

4.6. Çözücü Ayarları

Fluen paket programında basınç tabanlı çözümünde SIMPLE, SIMPLEC, PISO ve CUOPLED olmak üzere dört ayrı basınç-hız eşlenik algoritma türü mevcuttur. Bu çalışmada çözücü algoritması olarak COUPLED (birleşik) algoritma kullanılmıştır. Ayrık algortmadan farklı olarak birleşik algortmada momentum ve basınç bazlı süreklilik denklemleri çözümü birlikte yapılmaktadır. Bu denklem sisteminin birlikte çözülmesi yakınsama işlemini hızlandırmakla birlikte, aynı anda basınç ve hız alanları için tüm momentum ve basınca dayalı süreklilik denklemlerinin ayrık sistemi bellekde tutluması sebebiyle hafıza gereksinimi ayrık algortmaya göre 1,5-2 kat artırmaktadır [30].



Şekil 4.10. Coupled algoritma şeması

4.7. Yakınsama Kontrolü

HAD’de yazılımları kullanılarak birçok sayısal çözümlere ulaşılabilir. Çözüm sonuçlarının fiziksel kanunlara ve fiziksel olaylara uygun olmalıdır. Doğru sonuçlara ulaşmak için çözümler birkaç defa değiştirilerek ve iyileştirilerek, farklı tanımlamalar ve farklı çözücü ayarları yapılarak işlemler tekrarlanarak elde edilir. Çözüm sonucunun doğruluğunun kontrol edilmesi gerekmektedir ve bunlar aşağıda anlatılmıştır.

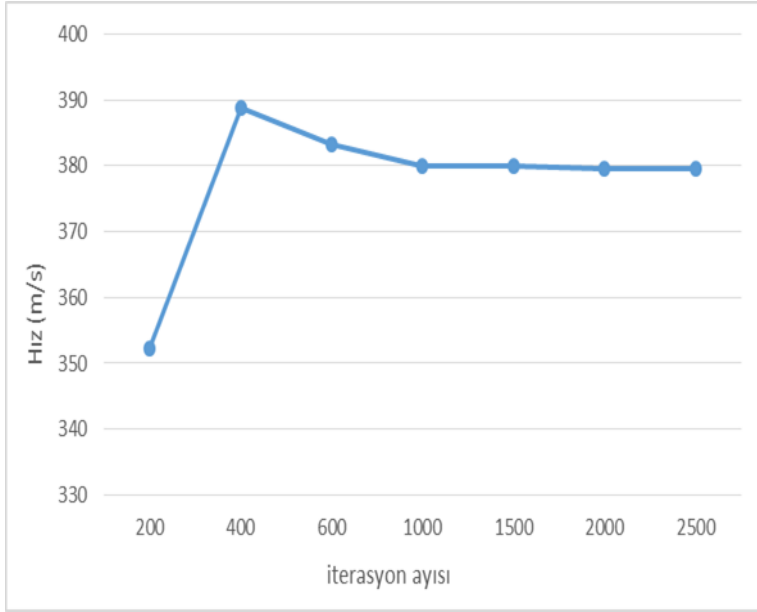
4.7.1. Çözümün Yakınsaması

Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılan sayısal çözümlemelerde, korunum denklemlerindeki terimlerin denklemin bir tarafında toplanamaması ve korunum denklemlerinin çözüm bölgesindeki her noktada dengeye geldiği durumda gerçekleşir. Çözüm alanındaki hücreler için artık (residual) olarak tanımlanan veriler oluşur. HAD analizlerinde bu verilerin toplamı hiçbir zaman sıfır olmasa da, toplamın sıfıra yakınlığı kullanılarak yapılan çözümün tam çözümünden ne kadar saptığı hakkında fikir yürütülebilir. Artık ne kadar düşük olursa çözüm sayısal olarak o kadar doğru olacaktır. Bu işlem HAD analizlerinde yakınsama olarak tanımlanmaktadır. HAD analizi çözümlemesinde girilen değere göre çözümün başlatılması ve bu değere yakınsaması gözlemlenir. Çok küçük değerlerdeki bir yakınsama kriteri için çözüm ne kadar az iterasyonda gerçekleşirse; problemin tanımlanması, sınır şartlarının oluşturulması ve ulaşılan çözüm sonuçları o kadar doğru olabilmektedir.

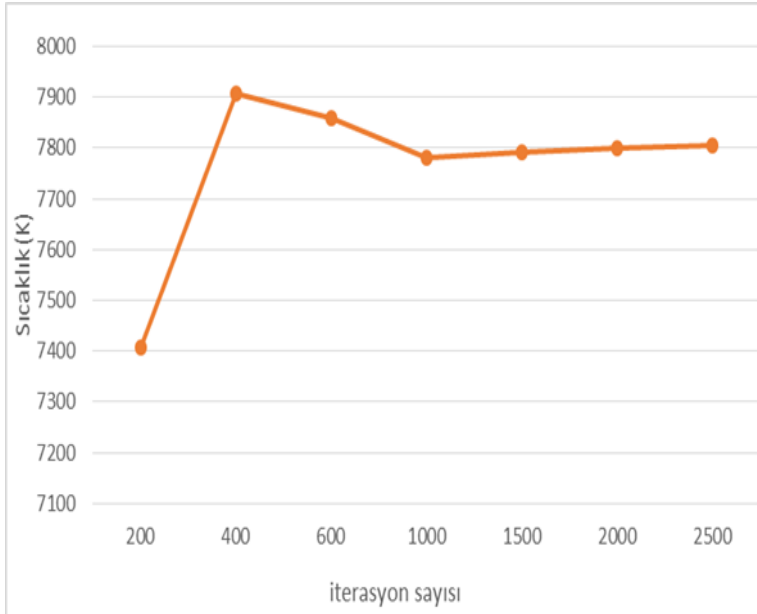
4.7.2. Çözümün iterasyon sayısından bağımsızlığı

Yakınsama durumu ve doğru çözümlerin elde edilmesi iterasyon sayısı ile yakından ilişkilidir. Analizlerin çözümlemelerinde bazı durumlarda 100 iterasyonla sonuca ulaşılabilirken, bazı durumlarda ise 10000 iterasyon sayısı ile geçerli durum elde edilemez. Bunun gibi nedenlerden dolayı yapılan analizlerde iterasyon sayısı artırılarak yakınsama durumuna ve çözüm sonucuna etkisi gözlemlenir. Analizlerin belli iterasyon sayısından sonra değişmediği durumda çözümün iterasyon sayısından bağımsızlığı elde edilir. Bu iterasyon sayısı referans alınarak tüm çözümler için kullanılır. Şekil 4.11 ve Şekil 4.12’de bu çalışma için plazma jetleri kesişim noktasında elde edilen plazma sıcaklığı ve hızının iterasyon sayısı ile değişim grafikleri verilmiştir. Çözümün yaklaşık 200 ile 2500 iterasyon

aralığında inceleme yapılmıştır. Plazma jetleri kesişim noktasında plazma sıcaklığı ve hızının 1 000 iterasyondan sonra değişmediği görülmüş ve diğer tüm çözümlemeler için iterasyon sayısı 1 000 olarak belirlenmiştir.



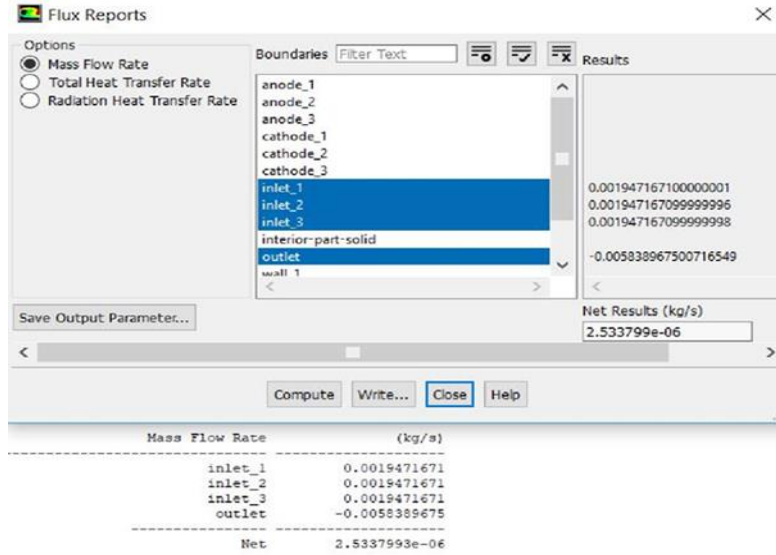
Şekil 4.11. Plazma jetlerinin kesişim noktasındaki plazma hızının iterasyon sayısı ile değişimi



Şekil 4.12. Plazma jetlerinin kesişme noktalarındaki plazma sıcaklığının iterasyon sayısı ile değişimi

4.7.3. Korunum denklemleri kontrolü

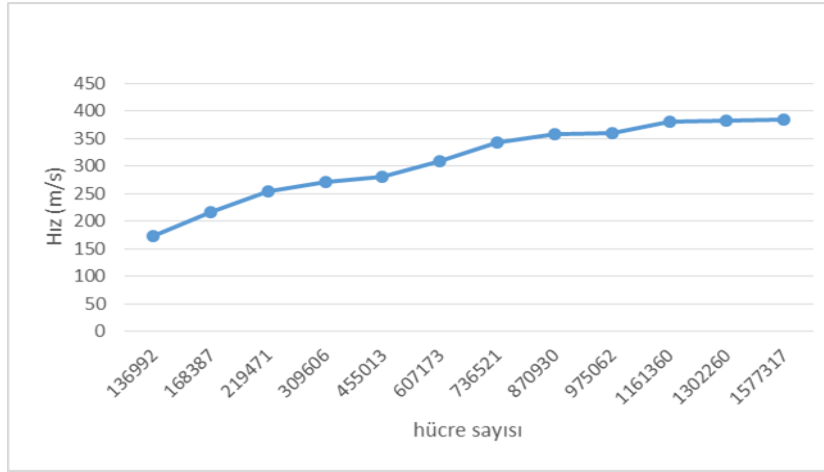
Çözümün yakınsadığını ve iterasyon sayısından bağımsızlaştığı şartı sağlandıktan sonra problemin çözümünün kütle korunum denklemlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Örnek bir çözüm için kütle korunumu kontrolü Şekil 4.13’de verilmiştir.



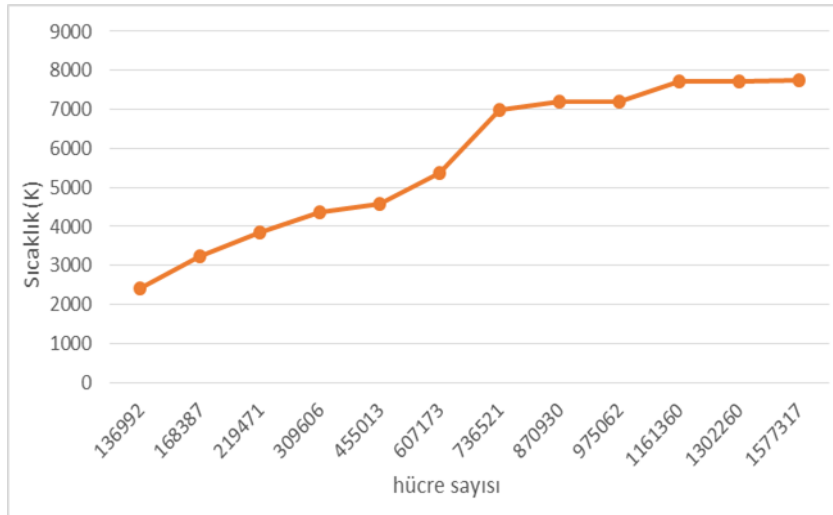
Şekil 4.13. Örnek çalışma kütle korunum paneli

4.7.4. Çözümün hücre sayısından bağımsızlığı

HAD yaklaşımı kullanılan çözümlemelerde önemli faktörlerden biri çözüm sonuçlarının hücre sayısından bağımsız olmasıdır. Hücre sayısından bağımsızlık, oluşturulan ağ yapısındaki hücrelerin sayısında, boyutunda veya geometrisinde oluşan değişikliklerin olması durumunda elde edilen sonuçların kabul edilebilir hata oranları içerisinde olmasıdır. Sayısal çözümlemede hücre sayısı artırılmasına rağmen sonuçlarda belli değerlerden sonra farklılık olmuyorsa ve ya çok az değişiklik oluyorsa çözümlemede hücre sayısından bağımsızlık elde edilmiştir. Bu çalışmada hücre sayısından bağımsızlaştırma işlemi için 136 992 ile 1 577 317 arasında değişen hücre sayıları kullanılmıştır. Plazma jetlerinin kesişim noktasındaki plazma sıcaklığı ve hızı değerleri kontrol edilerek uygun hücre sayısı elde edilmiştir. Çözüm uygun hücre sayısı 1 161 390 olarak referans alınmış ve diğer çözümlemelerde kullanılmıştır. Şekil 4.14 ve şekil 4.15 ortalama plazma sıcaklığı ve plazma hızının hücre sayısı ile değişimini göstermektedir.



Şekil 4.14. Plazma jetlerinin kesişim noktasındaki plazma hızının hücre sayısı ile değişimi



Şekil 4.15. Plazma jetlerinin kesişim noktasındaki plazma sıcaklığının hücre sayısı ile değişimi

5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

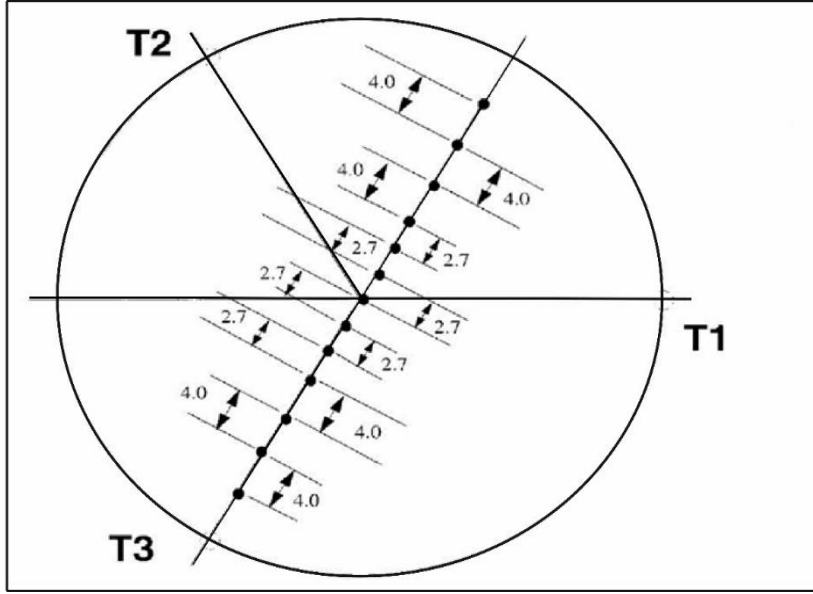
Bu çalışmada 3'lü DC transfer edilmeyen plazma torçu modellenmiştir. Plazma akışkanı olarak argon gazı kullanılmıştır. Yapılan çalışmada akım yoğunluğu ve gaz akış debisi değerleri değiştirilerek, plazma sıcaklığı ve hızı, nozul ucundan 4 cm mesafedeki kesişim bölgesindeki hız ve sıcaklık üzerine etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmada sınır şartı olarak kullanılan değerler çizelge 5.1'de verilmiştir. Oluşan yüksek sıcaklık nedeniyle çalışmada radyasyon dikkate alınarak incelemeler yapılmıştır.

Çizelge 5.1. Sayısal çalışmalarda kullanılan sınır şartları

	Giriş	Katot	Anot	Çıkış
P	8 Bar	$\partial P / \partial n = 0$	$\partial P / \partial n = 0$	101325
T	300 K	3500 K	$Q_a = h_{konv}(T_{duvar} - T_{su})$	$\partial T / \partial n = 0$
V	15-25-37-50-70	0	0	$\partial v / \partial n = 0$
I	$\partial I / \partial n = 0$	100-150-200-250-300 A	$\partial I / \partial n = 0$	$\partial I / \partial n = 0$
A	$\partial A / \partial n = 0$	$\partial A / \partial n = 0$	$\partial A / \partial n = 0$	$\partial A / \partial n = 0$

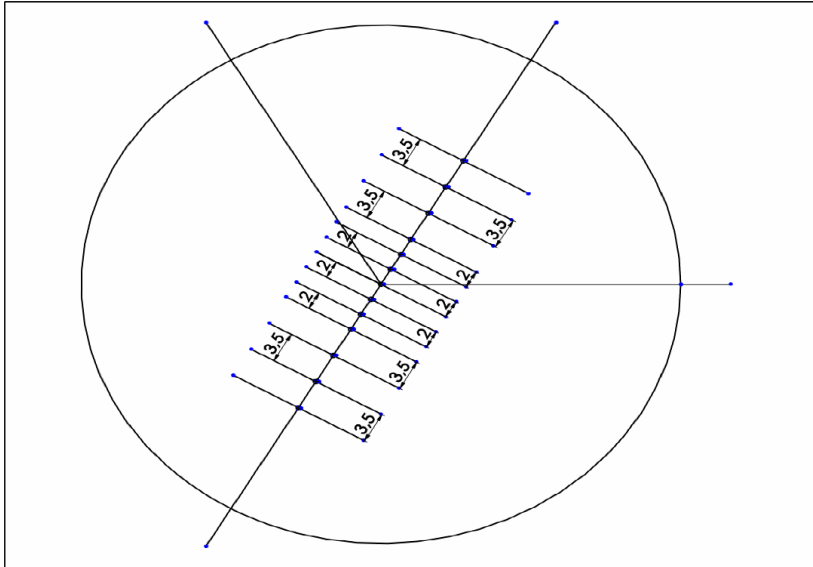
5.1. Elde Edilen Verilerin Literatürle Karşılaştırılması

Asmann vd. üçlü torç sistemini deneysel olarak incelemişler ve yerleştirdikleri entalpi probu sayesinde veriler almışlardır. Bu çalışma da kullanılan torç sistemi ile parametre ve sistem olarak benzerlik taşıdığından karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Veri alma yöntemi aynı şekilde düzenlenmiş ve bu çalışmada yapılan sayısal modelleme sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Veri alınan noktalara ait şematik görünüm şekil 5.1'de gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Asmann vd. [22] çalışmalarında plazma jetlerinin kesişim bölgesindeki enine kesit düzlemde veri alınan noktalar

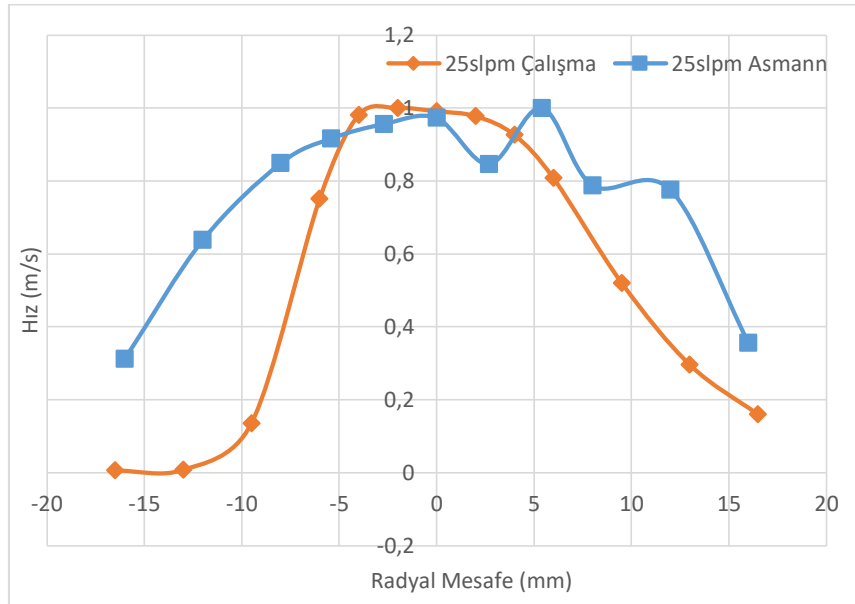
Karşılaştırmada, bu çalışmada oluşturulan modelde referans alınan mekaleye uygun olarak, plazma jetlerinin 4 cm mesafedeki kesişime bölgesinde enine kesit düzlemindeki çizgi üzerinde belirli noktalardan veri alma işlemi yapılmıştır. Çalışmada yapılan veri alma işlemi şekil 5.2’de gösterilmiştir.



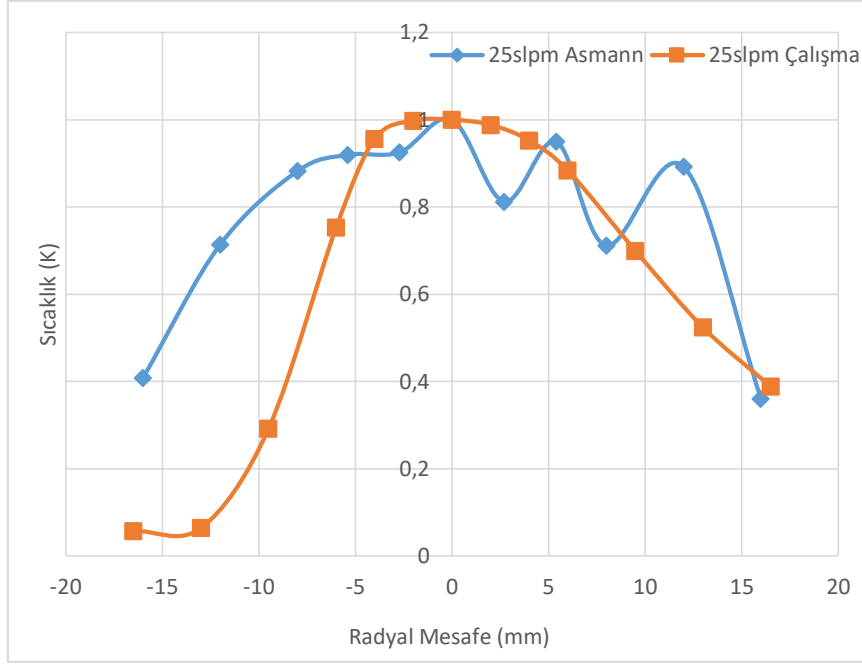
Şekil 5.2. Yapılan çalışmada plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzlemde veri alınan noktalar

Referans alınan çalışmada 25 SLPM gaz akış debisi, 200 A akım, çalışma gazı olarak argon gazı tanımlamışlardır. Torç geometrisinin ve sınır şartlarının belirtilmemesi nedeniyle, bu çalışma ile karşılaştırma yapılması için bu çalışma sonuçlarından elde edilen sıcaklık ve hız verilerinin normalize işlemi yapılarak karşılaştırma yapılmıştır. Referans alınan çalışmada sıcaklık ve hız değişimi simetrik olarak değişmiştir. Bu çalışmada ise kesişim bölgesinde sıcaklık ve hız değişimi simetrik değildir. Bunun sebebi referans alınan çalışmada plazma torçları merkezi eksenine olan açının daha az olabileceği düşünülmektedir. Sıcaklık ve hızdaki dalgalanmaların nedeni ise plazma jetleri kesişim bölgesine odadaki soğuk havanın girmesi ile düşüşlerin olduğunu söylemişlerdir. Sıcaklık ve hız değerleri kendisinin en yüksek sıcaklık ve hız değerine bölünerek normalize edilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında uyum içinde olduğu görülmektedir.

Asmann vd. [22] yaptıkları çalışmalarında plazma jetlerinin 4 cm mesafedeki kesişim noktasında elde ettikleri hız ve sıcaklık sırasıyla 216 m/s ve 4922 K olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada ise plazma jetlerinin 4 cm mesafedeki kesişim noktasında elde edilen hız ve sıcaklık sırasıyla 169 m/s ve 6885 K olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.3. Bu çalışmanın referans alınan mekale [22] ile normalize edilmiş hız karşılaştırması



Şekil 5.4. Bu çalışmanın referans alınan mekale [22] ile normalize edilmiş sıcaklık karşılaştırması

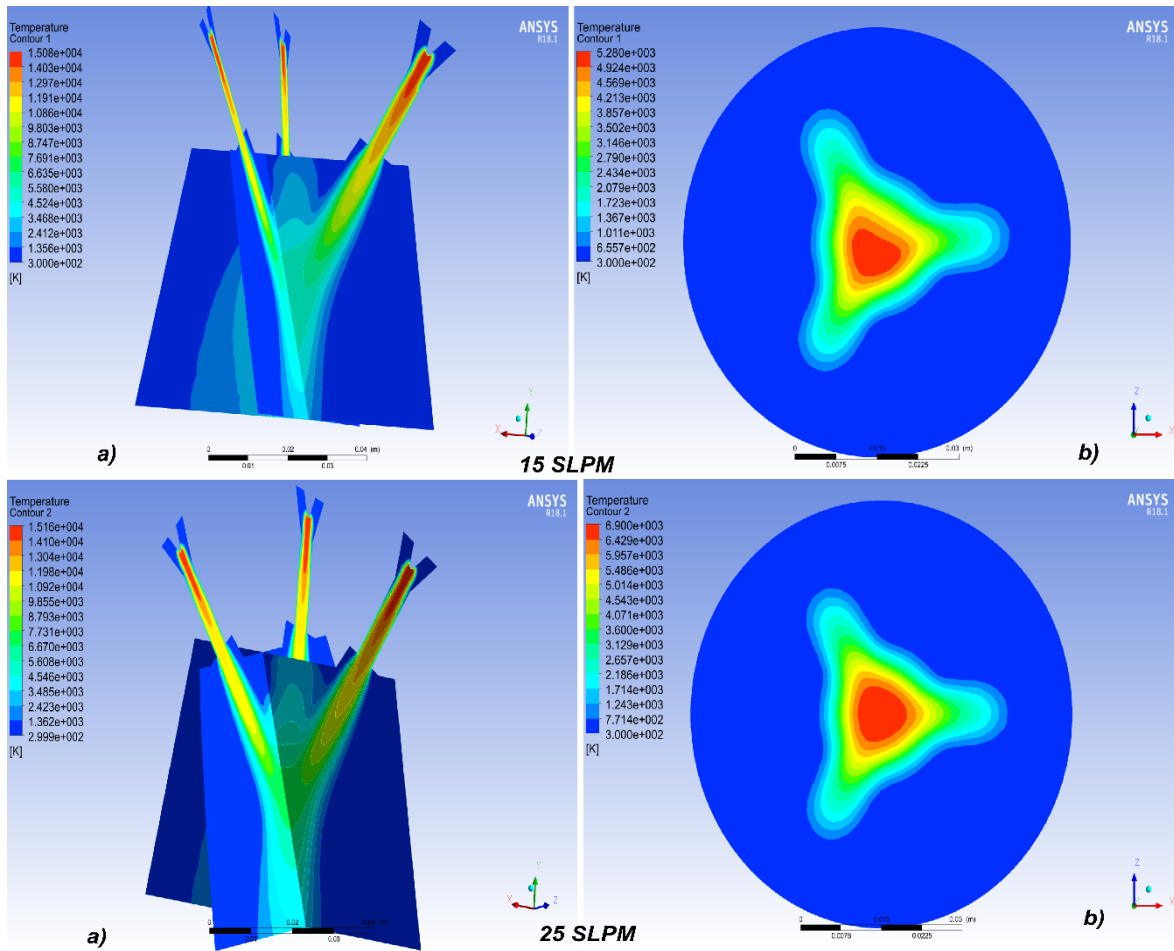
5.2. Sabit Akımda Farklı Debilerde Çalışılan Analizler

Çalışmada sabit akım ve farklı akış debisi parametrelerinde incelemeler yapılmış ve çalışma sonuçları bu bölümde değerlendirilmiştir. Çalışma gazı olarak kullanılan argon gazının giriş sıcaklığı 300 K olarak girilmiştir. Katot duvarının sıcaklık değeri 3500 K olarak belirlenmiştir. Anot duvarı için anot soğutma suyu kullanılmıştır. Katot ve anot arasındaki ark oluşumun sağlamak için verilen sabit akım değeri 200 A olarak girilmiştir. Gaz akış debileri 15, 25, 37, 50, 70 SLPM olarak belirlenmiştir. Çalışma gazı giriş basıncı 8 bar ve çıkış basınç sınır şartı olarak atmosfer basıncı değeri tanımlanmıştır. Sabit akımda hacimsel debilerin torçların içinde ve plazma jetlerinin kesişim bölgesindeki plazma hızı ve sıcaklığı üzerinde etkileri incelenmiştir.

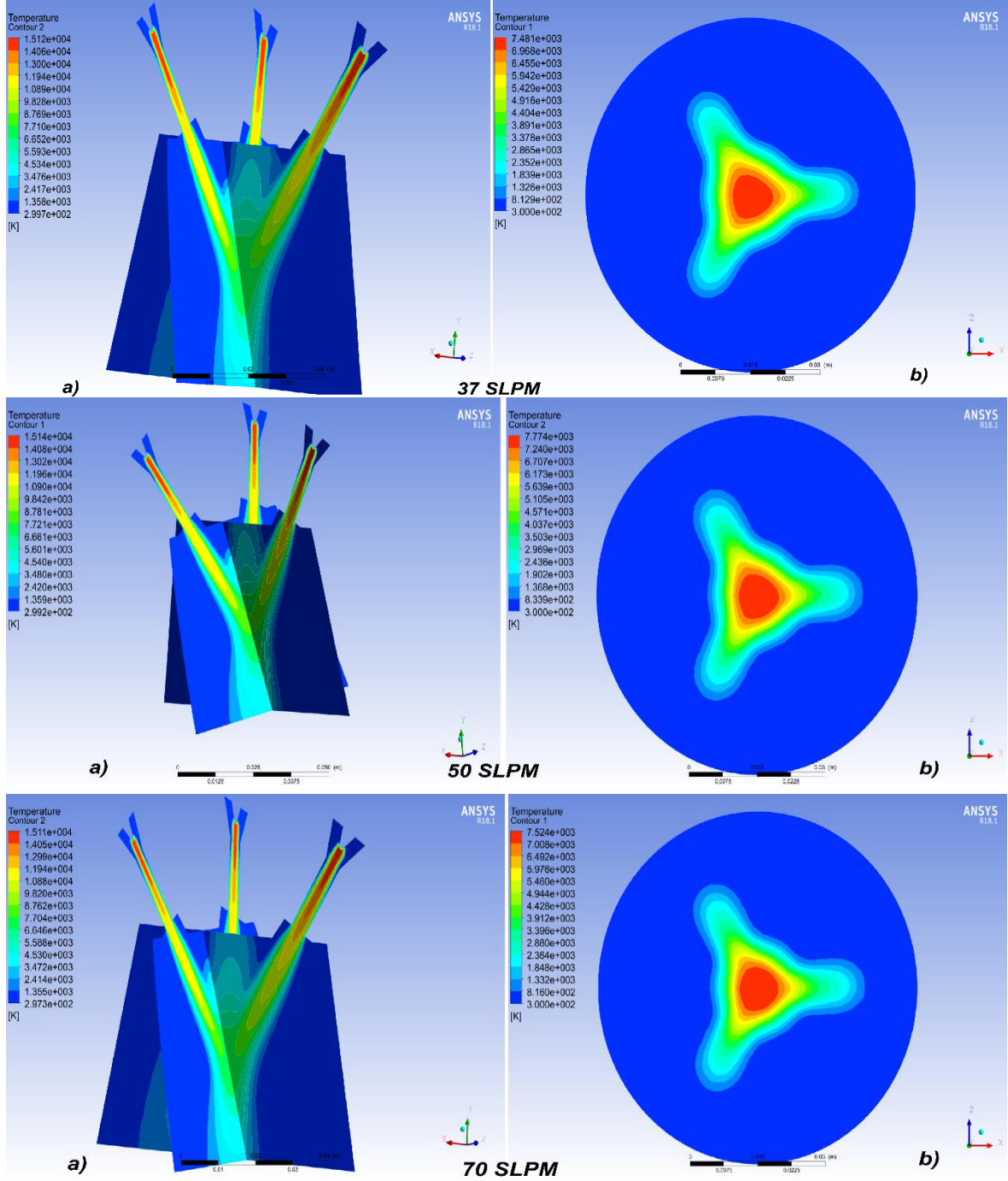
5.2.1. Plazma torçlarında ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde plazma sıcaklığı dağılımı

Yapılan analizlerin bu kısmında torçlar içinde ve plazma jetlerinin kesişim bölgesindeki sıcaklık dağılımları incelenmiştir. Katot ucundan verilen akım değeri 200 A olarak sabit tutularak beş farklı akış debisi analizleri yapılmıştır. Şekil 5.5’de görüldüğü gibi en yüksek sıcaklık değeri, değiştirilerek girilen hacimsel debiler için yaklaşık olarak aynı kalmıştır. DC

plazma torçlarında katot ve anot arasındaki etkileşimi ile oluşan elektrik arkları sebebiyle sıcaklık değeri katot elektrodunun yakınında yüksek olduğu görülmektedir. Torçların içinde ve plazma jetlerinin kesişim bölgesindeki düzlemdeki incelemelerde, değiştirilen akış debileri ile elde edilen maksimum sıcaklık 15 080 K ile 15 163 K, plazma jetlerinin kesişim noktasındaki sıcaklık 5070 K ve 7737 K arasında elde edilmiştir. Farklı akış debilerinde plazma torçlar içindeki maksimum sıcaklığı dikkate alınmayacak kadar az olmasına rağmen plazma jetlerinin kesişim noktasındaki sıcaklıklarında farklılık görülmüştür. Şekil 5.5’de plazma torçlarının iç ve dış kısmındaki düzlemlerde, plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzleminde sıcaklık dağılımları verilmiştir.



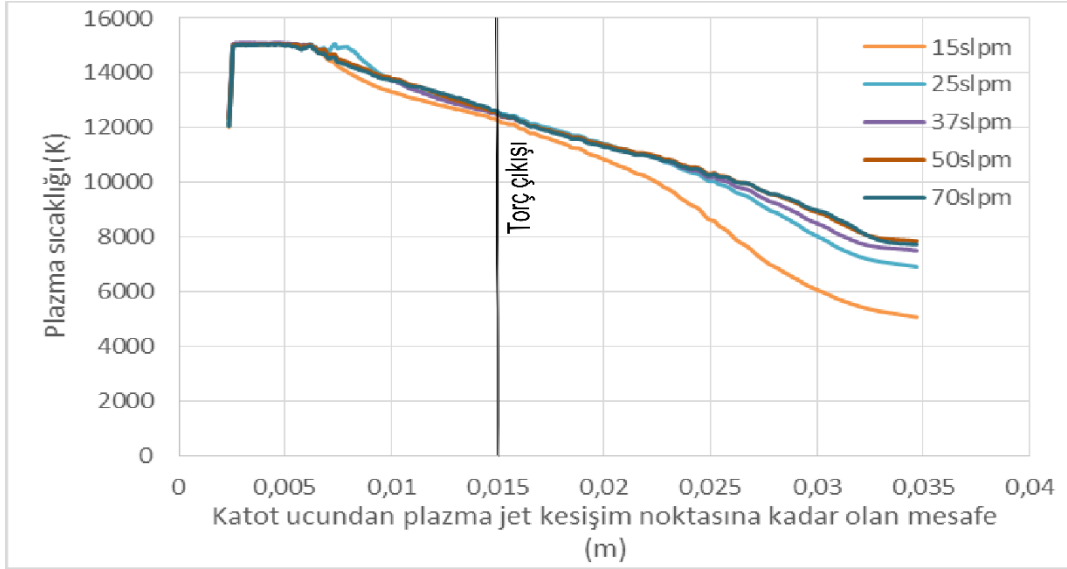
Şekil 5.5. Sabit 200 A’da farklı akış debilerinde üçlü plazma torçlarının genel sıcaklık dağılımı (a) ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzlemlerindeki yerel sıcaklık dağılımları (b)



Şekil 5.5. (devam) Sabit 200 A’da farklı akış debilerinde üçlü plazma torçlarının genel sıcaklık dağılımı (a) ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzlemlerindeki yerel sıcaklık dağılımları (b)

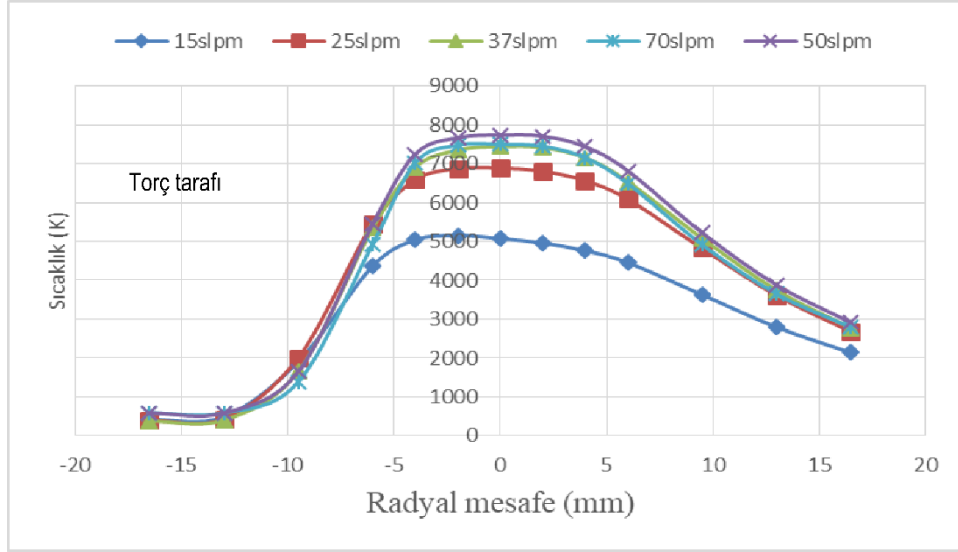
Şekil 5.6’da farklı akış debileri için bir torç katotunun ucundan plazma kesişim noktasına kadar düz bir çizgi üzerinden alınmış plazma sıcaklığı dağılımı gösterilmektedir. Elektrik ark oluşumuyla ani genişleme nedeniyle torç iç kısmında sıcaklığın hızlı şekilde yükseldiği görülmektedir. Akış debilerin artırılmasıyla ark oluşum noktasının torç çıkışına doğru

sürüklendiği bilinmektedir. Ark uzunluğuyla beraber aynı zamanda torç içerisindeki elektrik potansiyeli de artmaktadır. Bu olay daha fazla gaz iyonlaştırmak için gerekli olan enerjinin artması şeklinde açıklanabilir. Plazma sıcaklığının katot ucuna yakın bölgelerde artışı ve plazma jetlerinin kesişim noktasına doğru azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.6. Bir torç katotunun ucundan plazma jetlerinin kesişim noktasına kadar olan çizgi üzerinden alınmış plazma sıcaklığı değişimi

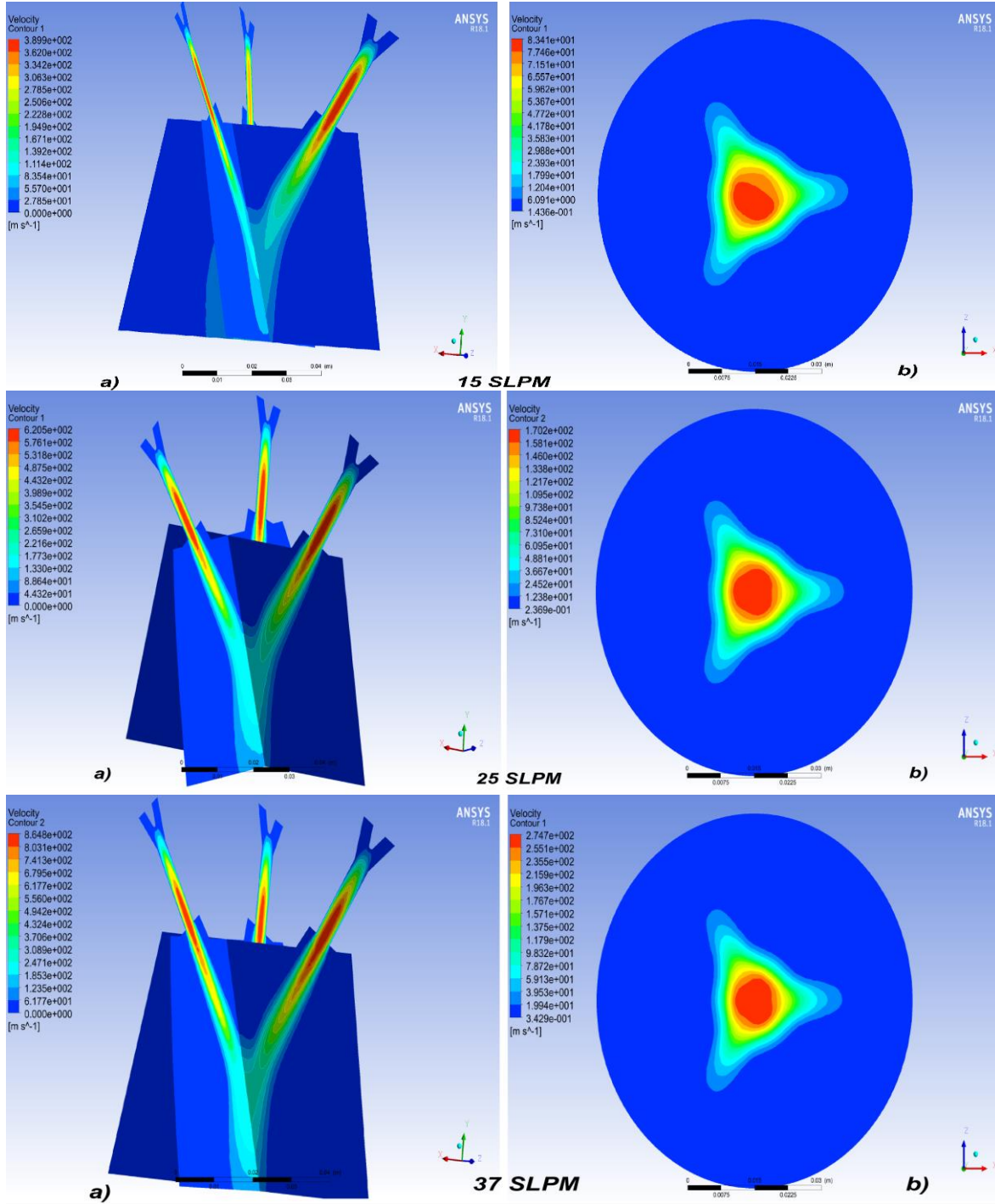
Şekil 5.7’de plazma torçlarından birinin ekseninden ve plazma jetlerinin kesişim noktasından geçen dik düzlemin, plazma jetlerinin kesişim noktasındaki enine kesit düzlemiyle kesişme bölgesindeki düz bir çizgi üzerinde belirli noktalardan veriler alınarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Kesişim bölgesinde çizgi üzerinde 13 noktadan alınmış sıcaklık değişimi görülmektedir. Enine kesit düzleminde kesişim noktasında sıcaklığın artan akış debisiyle artma eğiliminde olmuş 70 SLPM’de ise tekrardan azalma görülmüştür. Bunun nedeni ark oluşumundan kaynaklandığı düşünülmektedir. 50 SLPM’de anot yüzeyinde birden fazla ark oluşum noktası görülmüştür. Plazma jetlerinin kesişim noktasındaki sıcaklık artan akış debisiyle 5070 K ve 7737 K arasında elde edilmiştir.



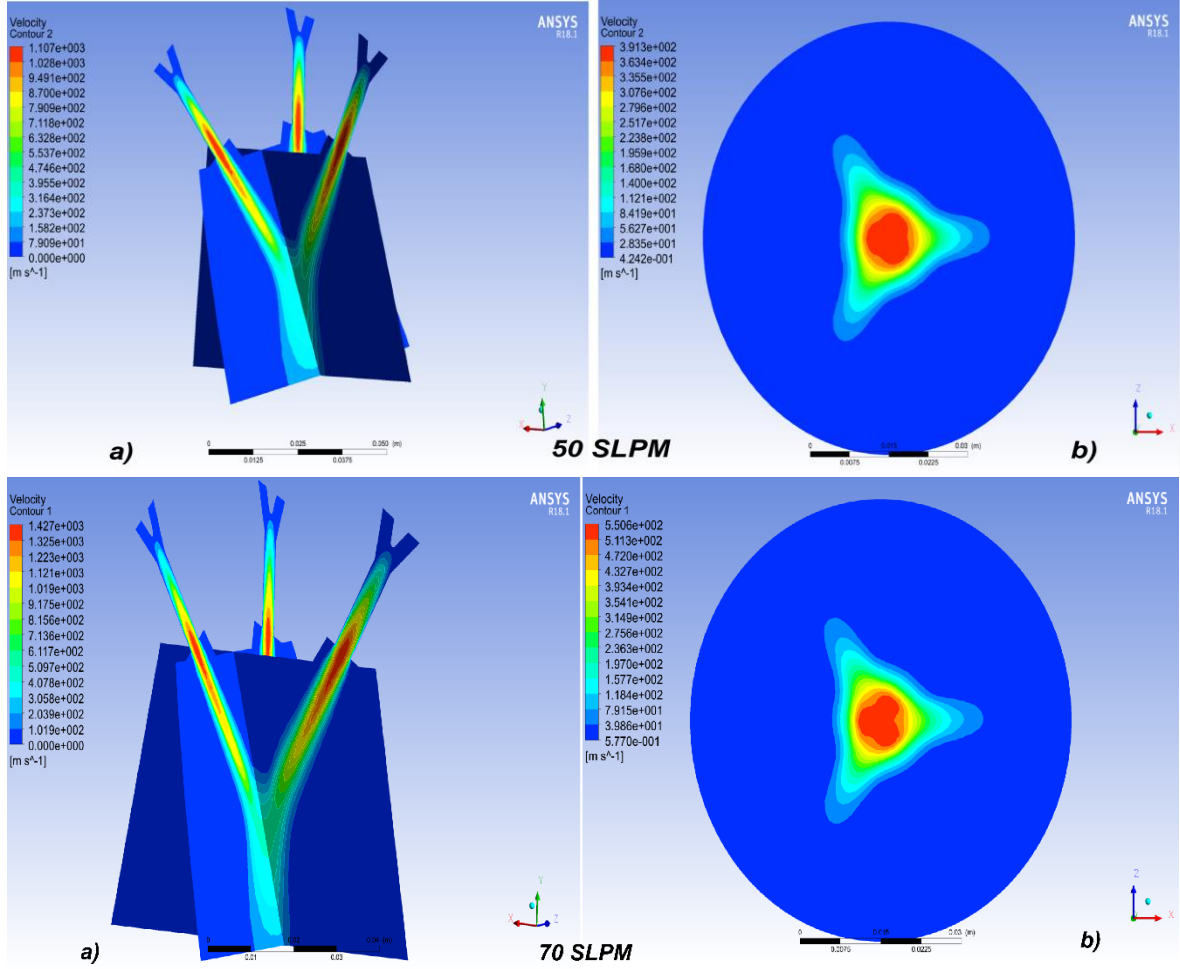
Şekil 5.7. Plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzleminde çizgi üzerinde belirli noktalardan alınmış sıcaklık değişimi

5.2.2. Plazma torçlarında ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde plazma hızı dağılımı

Katot ucundan verilen 200 A akım değeri sabit olarak ve akış debileri 15, 25, 37, 50, 70 SLPM değerlerinin değiştirilmesiyle, torç içinde ve plazma jetlerinin kesişim bölgesindeki hız incelemeleri yapılmıştır. Şekil 5.8’de görüldüğü gibi artırılarak girilen akış debileri için maksimum plazma hızı değerlerinde artış görülmüştür. Plazma torçlar içinde maksimum plazma hızı 395 m/s ile 1427 m/s, plazma jetlerinin kesişim noktasındaki hızı 80 m/s ve 525 m/s arasında değiştiği görülmektedir. Akış debisinin artırılması torç içindeki ve kesişim noktasındaki plazma hızı üzerine etkisi sıcaklık üzerine etkisinden daha fazla olduğu görülmektedir.

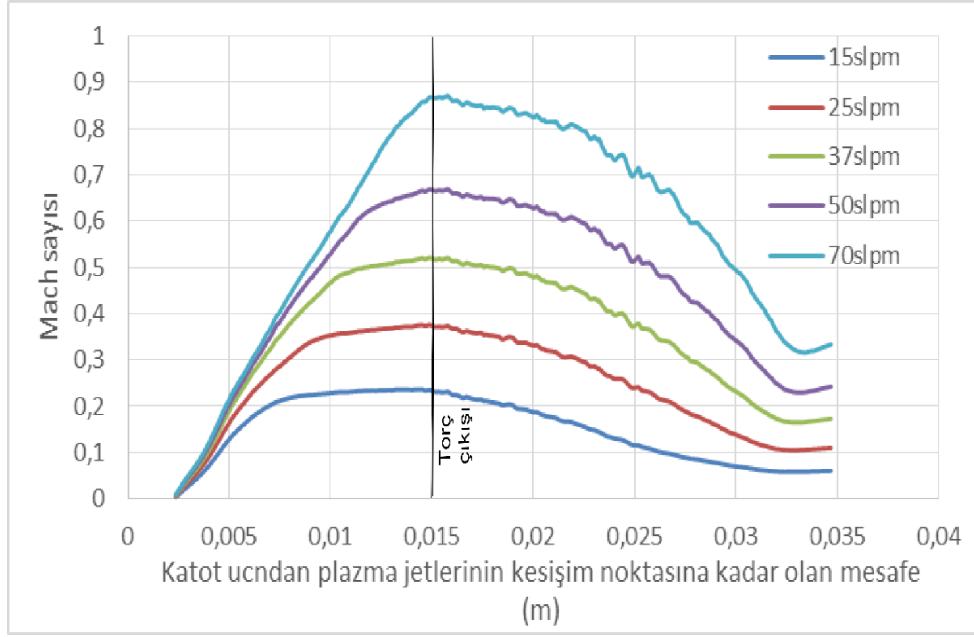


Şekil 5.8. Sabit 200 A’de farklı debilerde üçlü plazma torçlarının genel hız dağılımı (a) ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzlemindeki yerel hız dağılımı (b)



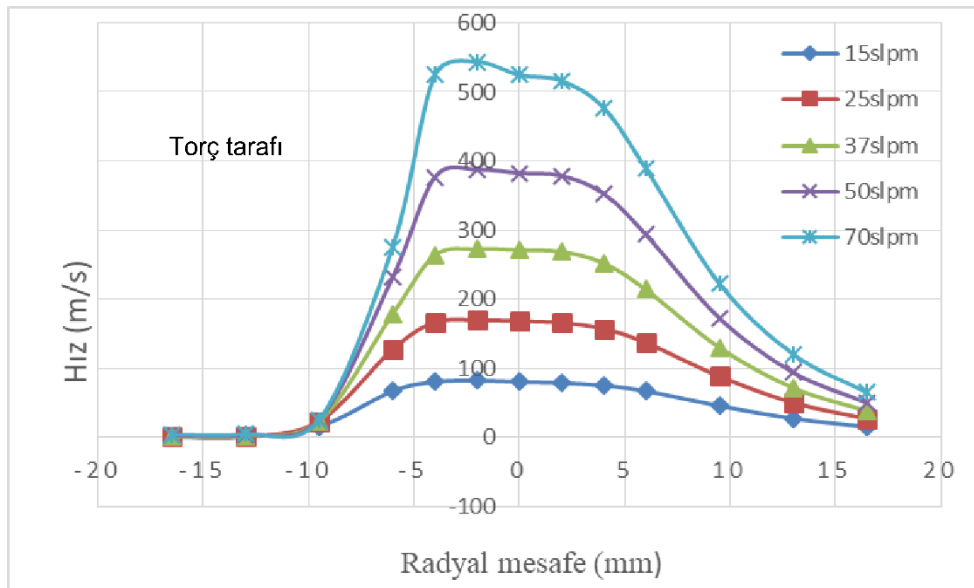
Şekil 5.8. (devam) Sabit 200 A’de farklı debilerde üçlü plazma torçlarının genel hız dağılımı (a) ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzlemindeki yerel hız dağılımı (b)

Şekil 5.9 akım değeri 200 A’de sabit tutularak değiştirilen akış debileri için katot ucundan plazma kesişim noktasına kadar düz bir çizgi üzerinden alınmış plazma hız değişimi gösterilmektedir. Akış debilerinin artırılmasıyla plazma hızının torç çıkışına doğru arttığı, kesişim noktasına doğru tekrardan azaldığı görülmektedir. Maksimum hız çıkış bölgesinde oluşmuş ve 70 SLPM’de 1427 m/s olarak görülmüştür. Mach değeri 70 SLPM’de 0.87 olarak görülmüştür. Sesaltı (subsonik) olarak kabul edilmiştir.



Şekil 5.9. Bir torç katodunun ucundan plazma jetlerinin kesişim noktasına kadar olan çizgi üzerinden alınmış plazma mach sayısı

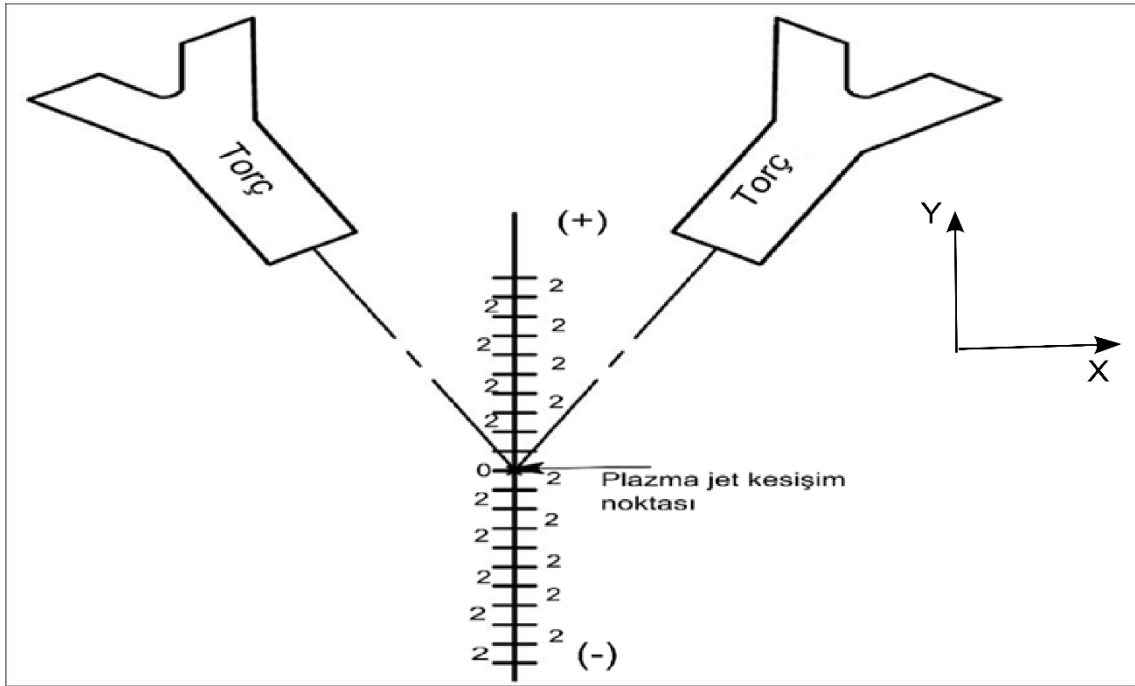
Plazma torçlarından birinin ekseninden ve plazma jetlerinin kesişim noktasından geçen dik düzlemin, plazma jetlerinin kesişim noktasındaki enine kesit düzlemiyle kesişme bölgesindeki düz bir çizgi üzerinde belirli noktalardan veriler alınarak hız ölçümleri yapılmıştır. Kesişim bölgesinde çizgi üzerinde 13 noktadan alınmış hız değişimi şekil 5.10'da görülmektedir.



Şekil 5.10. Plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzleminde çizgi üzerinde belirli noktalardan alınmış hız değişimi

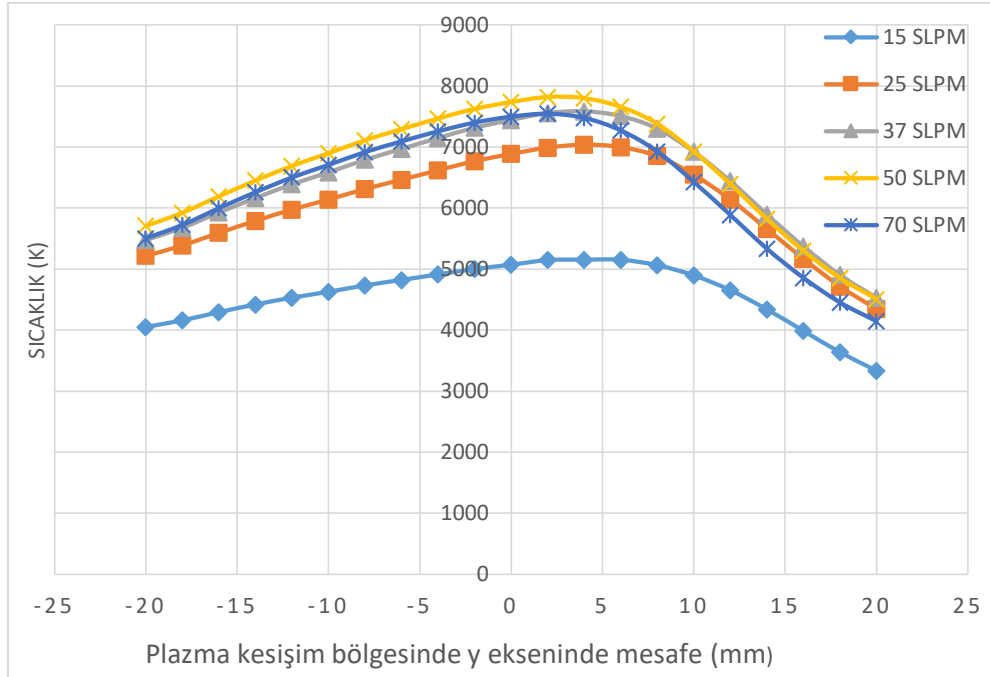
5.2.3. Sabit akımda farklı akış debilerinde plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde sıcaklık ve hız değişimi

Plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde sıcaklık ve hız değişimi incelenmek için kesişim noktasından (0 noktası) 2 cm üst ve 2 cm alt bölgesinde 2 mm aralıklarla belirlenen noktalardan veriler elde edilmiştir. Veri alma işlemini gösterim amaçlı ikili torç sistemi çizimi gösterilmiştir (şekil 5.11).



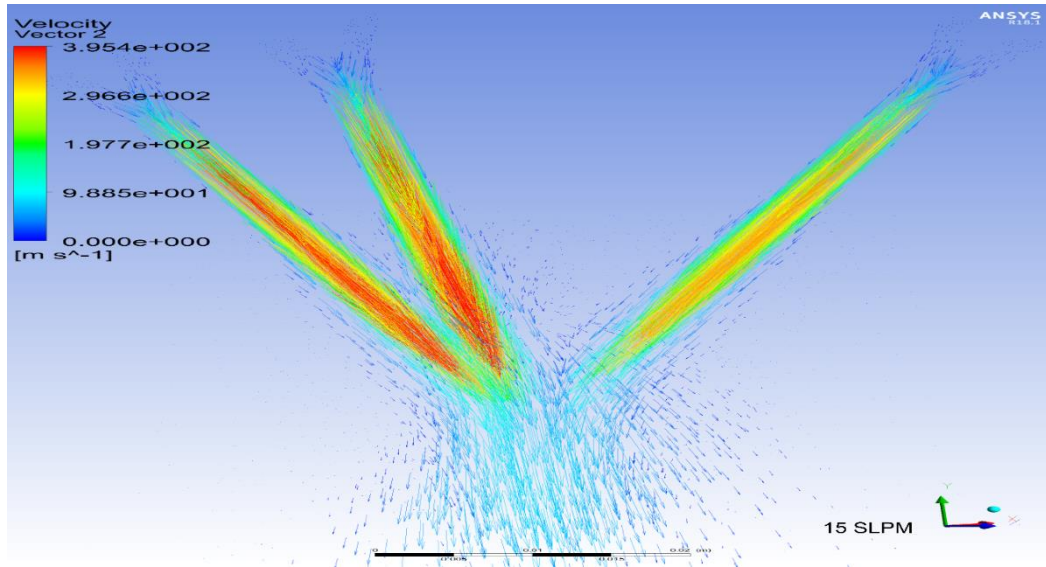
5.11. Plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde veri alınan noktalar

Şekil 5.12 ve şekil 5.14 plazma jetleri kesişim noktasından uzaklaştıkça hız ve sıcaklık değerlerinde düşüşler olduğu görülmektedir. Kesişim noktasının üst bölgesindeki sıcaklık ve hız değerlerindeki düşüşler alt bölgeye kıyasla daha fazladır. Akış debisinin sıcaklığa nispeten hız üzerinde daha etkili olmuştur.

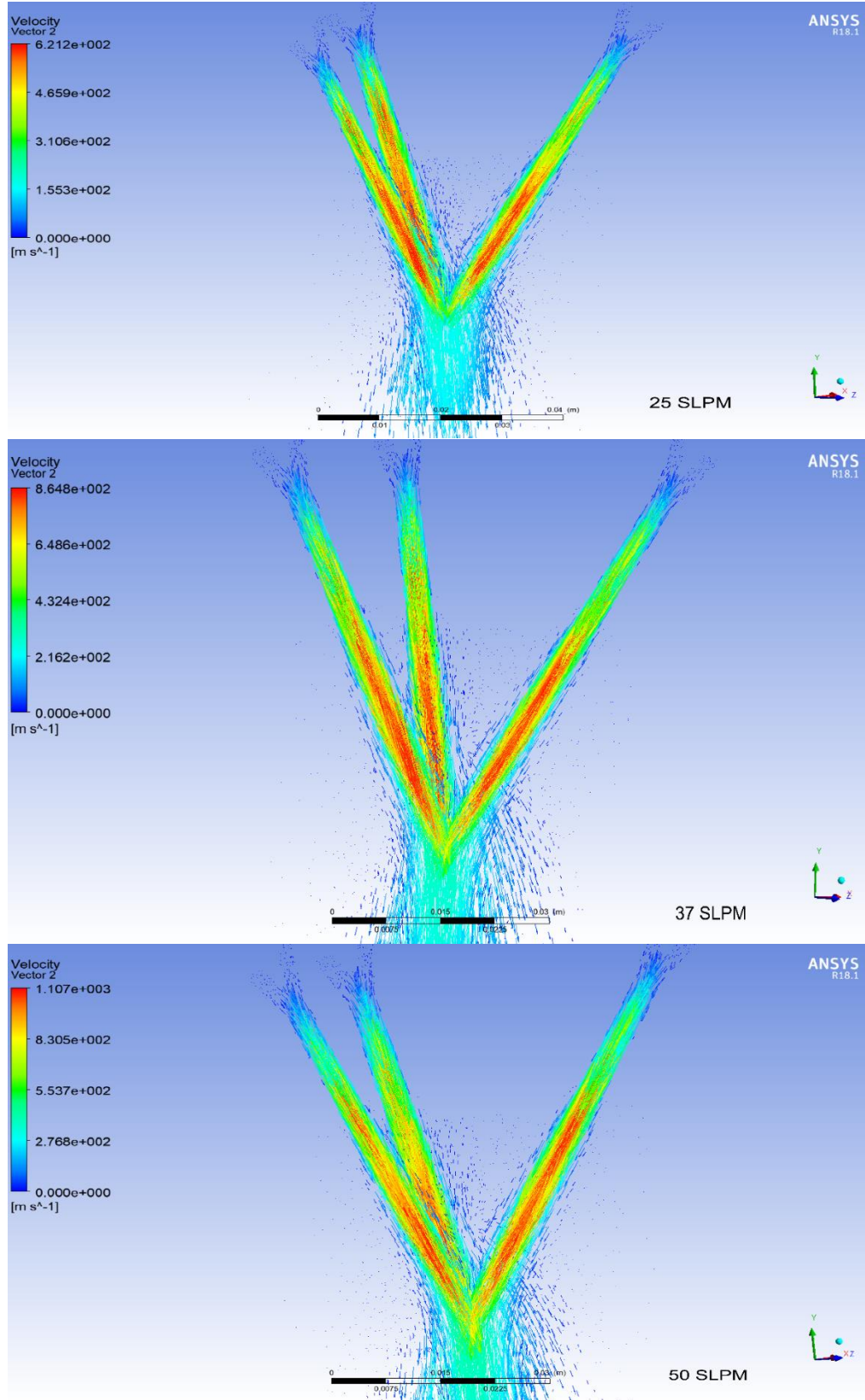


5.12. Sabit akımda farklı akış debilerinde plazma jettleri kesişim bölgesinde y ekseninde sıcaklık değişimi

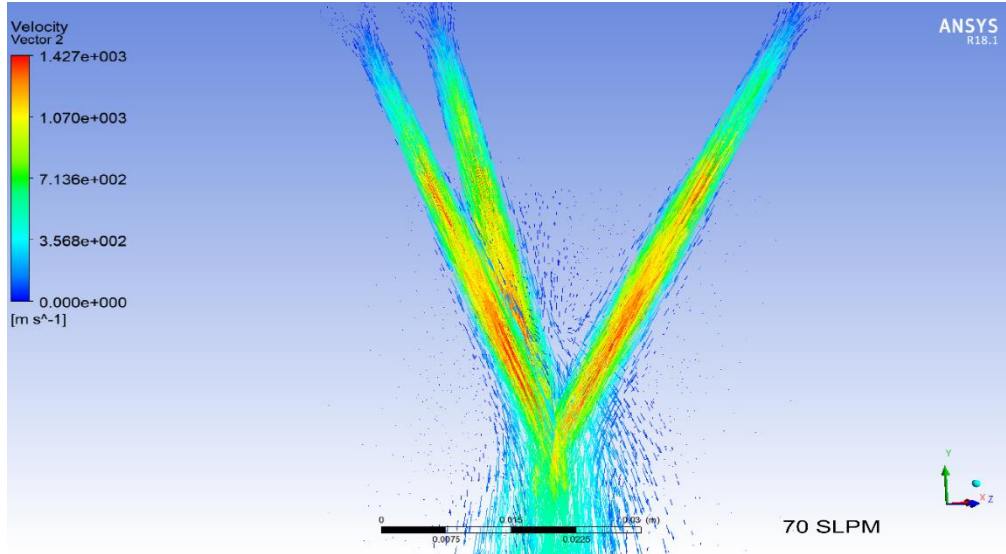
Şekil 5.13’de plazma jettleri hız dağılımları incelemek için vektörel dağılımları verilmektedir.



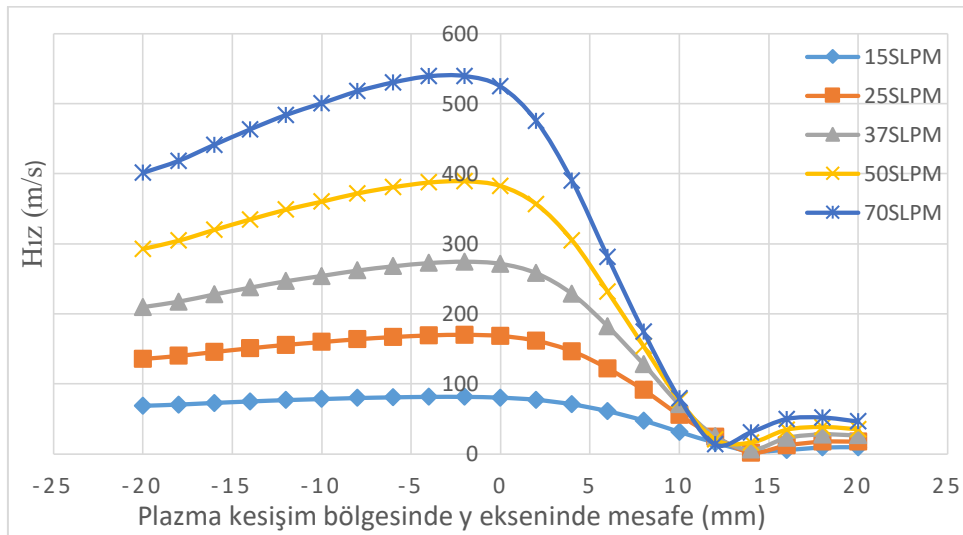
Şekil 5.13. Sabit 200 A’de farklı debilerde üçlü plazma torçlarının genel vektörel hız dağılımı



Şekil 5.13. (devam) Sabit 200 A’de farklı debilerde üçlü plazma torçlarının genel vektörel hız dağılımı



Şekil 5.13. (devam) Sabit 200 A’de farklı debilerde üçlü plazma torçlarının genel vektörel hız dağılımı

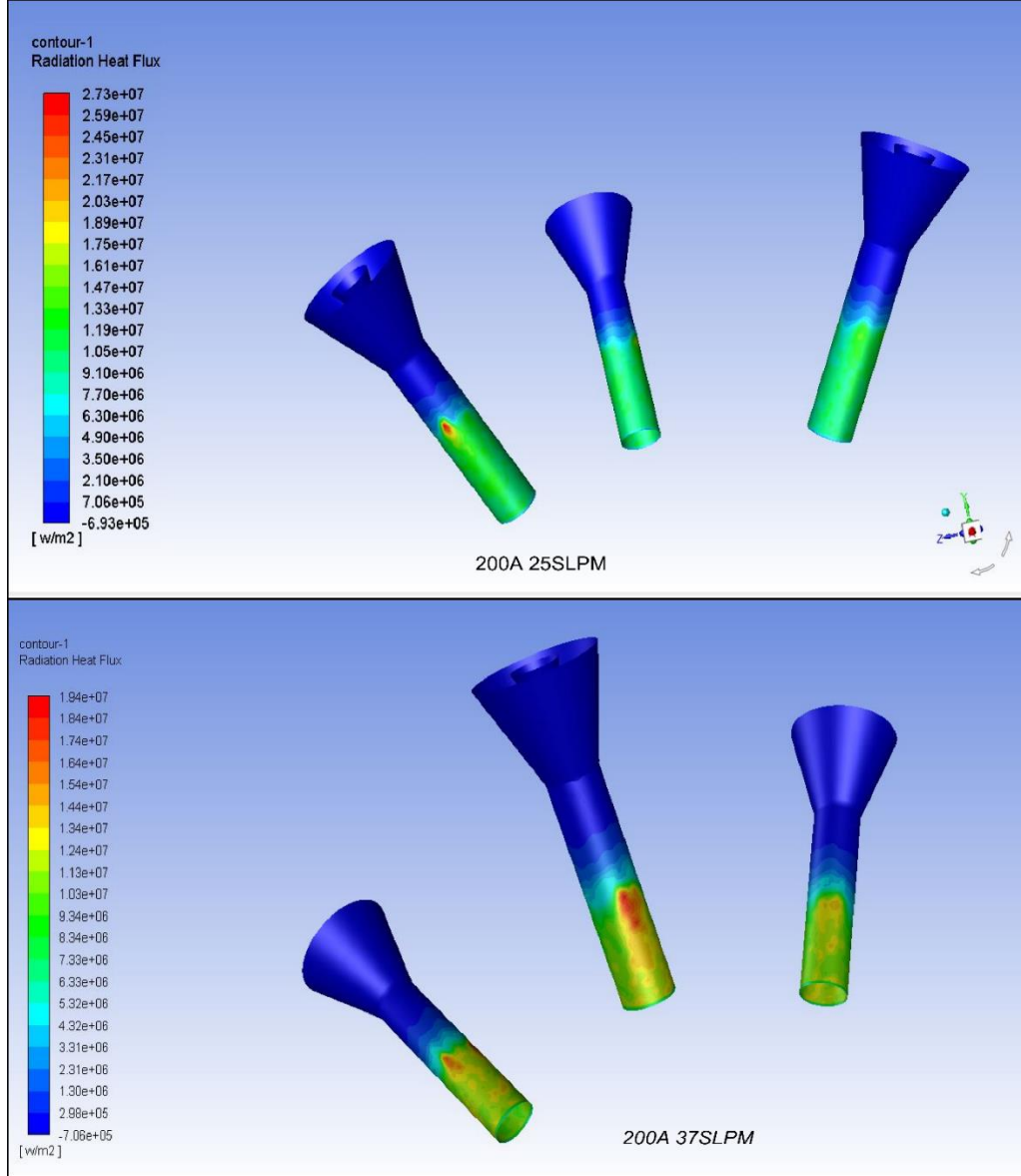


5.14. Sabit akımda farklı akış debilerinde plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde hız değişimi

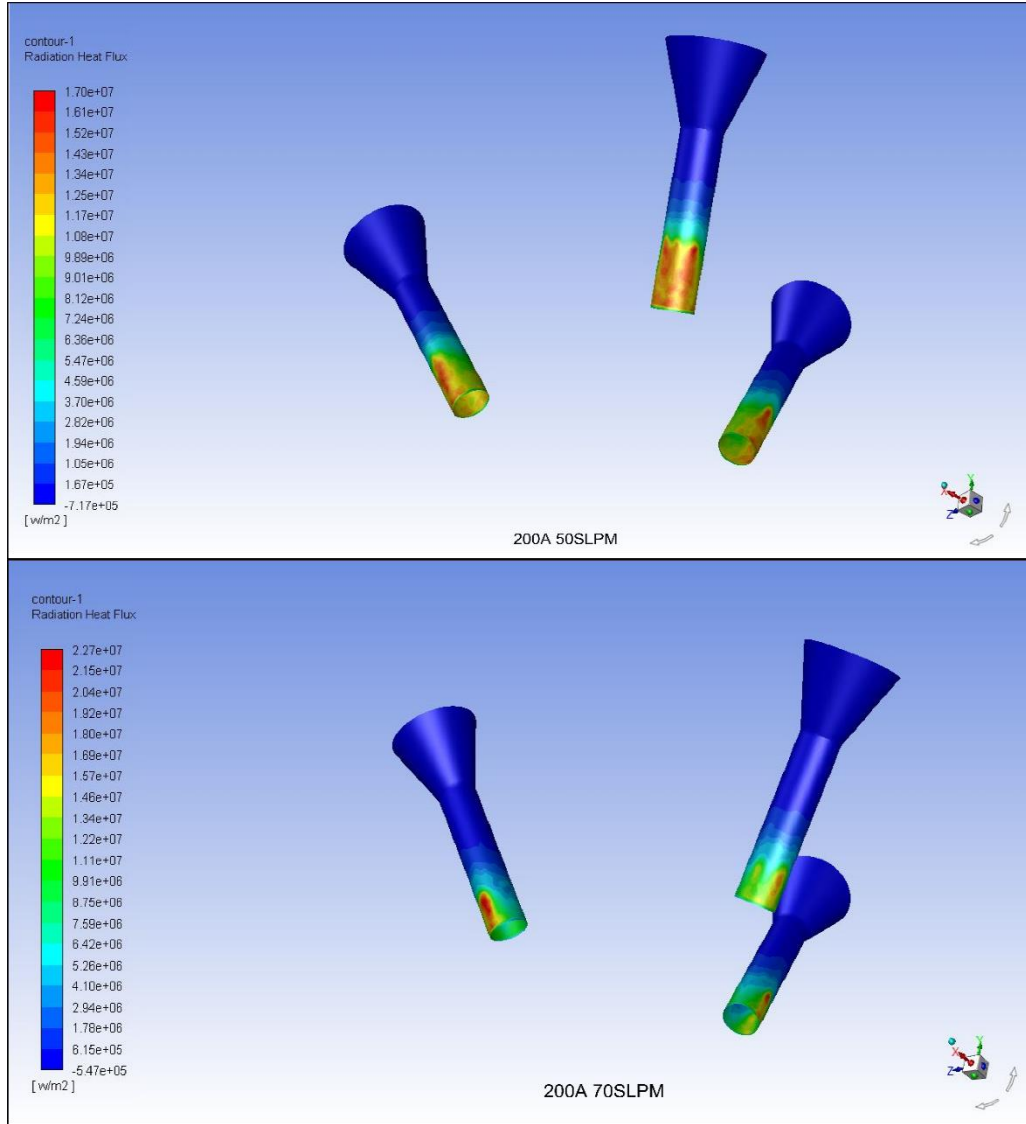
5.2.4. Sabit akımda farklı akış debilerinde plazma torçlarında radyasyon dağılımı

Sabit akımda ve farklı akış debilerinde analizler yapılarak katı yüzeylerden radyasyon dağılımları incelenmiştir. Oksitlenmiş bakır malzemesi için yayınma (emissivity) değeri 0.8 olarak girilerek katot ve anot duvarları üzerinde radyasyon dağılımları incelenmiştir. Radyasyon sıcaklığın yüksek olduğu yerlerde yani ark-kök bağlantı noktalarının olduğu bölgelerde daha yüksektir. Akış debilerinin artmasıyla radyasyon dağılım değerlerinde

azalma olduğu görülmüştür. Akış debisinin artması ark kökünde soğutma etkisinde bulunduğu düşünülmektedir.



5.15. Sabit akımda farklı akış debilerinde plazma torçlarında radyasyon dağılımı



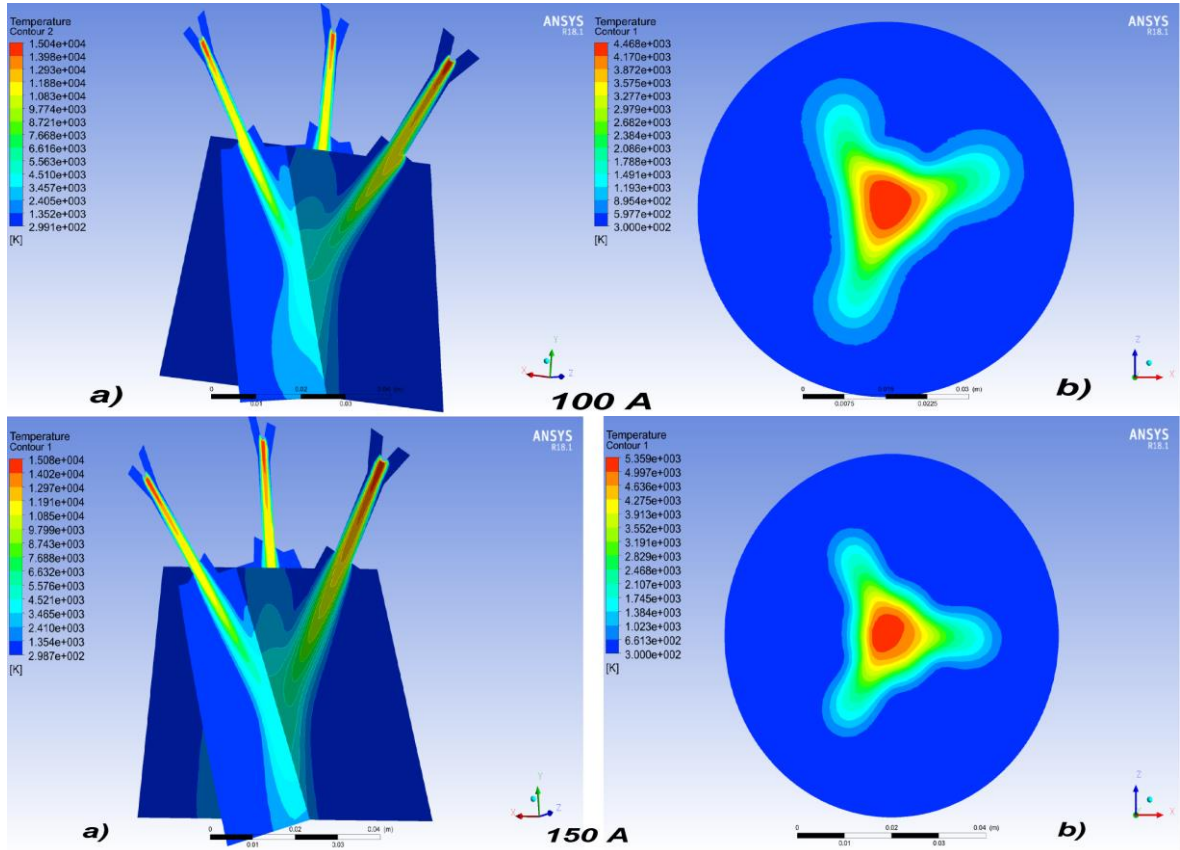
5.15. (devam) Sabit akımda farklı akış debilerinde plazma torçlarında radyasyon dağılımı

5.3. Sabit Akış Debisinde Farklı Akımlarla Yapılan Analizler

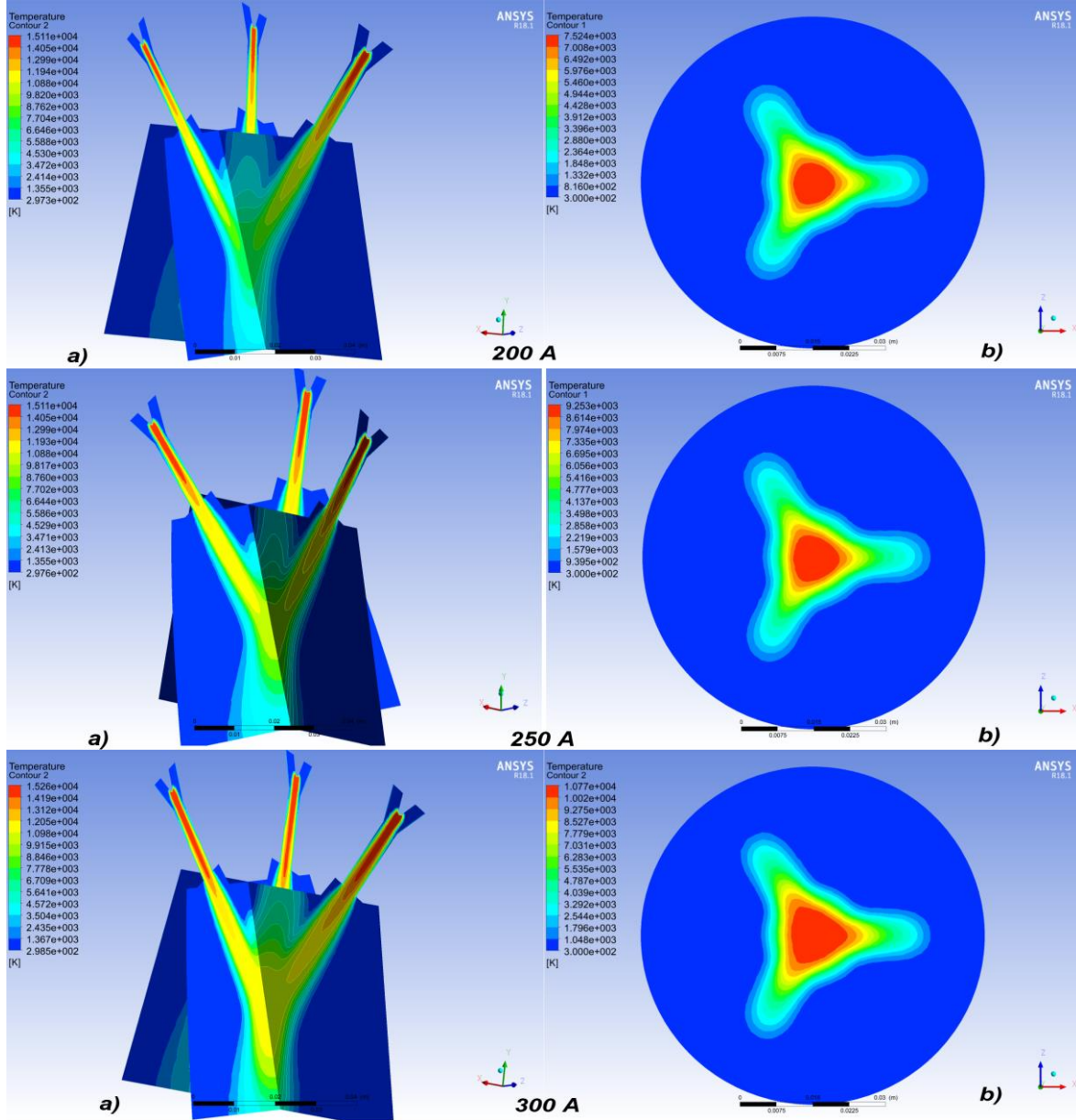
Çalışmada sabit hacimsel debi ve farklı akım parametrelerinde incelemeler yapılarak çalışma sonuçları bu bölümde verilmiştir. Çalışma gazı olarak kullanılan argon gazının giriş sıcaklığı 300 K olarak girilmiştir. Katot duvarının sıcaklık değeri 3500 K olarak belirlenmiştir. Anot duvarı için anot soğutma suyu kullanılmıştır. Sabit akış debi değeri 70 SLPM olarak belirlenerek akım değeri 100, 150, 200, 250, 300 A olarak girilmiştir. Çalışma gazı giriş basıncı 8 bar ve çıkış basınç sınır şartı olarak atmosfer basıncı değeri tanımlanmıştır. Sabit akımda hacimsel debilerin torçların içinde ve plazma jetlerinin kesişim bölgesindeki plazma hızı ve sıcaklığı üzerinde etkileri incelenmiştir.

5.3.1. Plazma torçlarında ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde plazma sıcaklık dağılımı

Şekil 5.16'de sabit 70 SLPM akış debisinde farklı akım değerleri için üçlü torç ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzleminde plazma sıcaklık dağılımını göstermektedir. Akım değerlerinin artmasıyla maksimum plazma sıcaklığı 15 040 K ile 15260 K, plazma jetlerinin kesişim noktasında ise 4430 K ile 10713 K arasında değiştiği görülmektedir. Maksimum plazma sıcaklık değeri 300 A'de görülmüştür. Akım değerinin artırılmasıyla plazma jetlerinin kesişim noktasında sıcaklığı artış eğilimindedir. DC akım plazma torçlarında oluşan elektrik arkları sebebiyle oluşan elektromanyetik alanlar katot elektrodu yakınında sıcaklık dereceleri çok yüksek gradyanların oluşumuna yol açmaktadır.

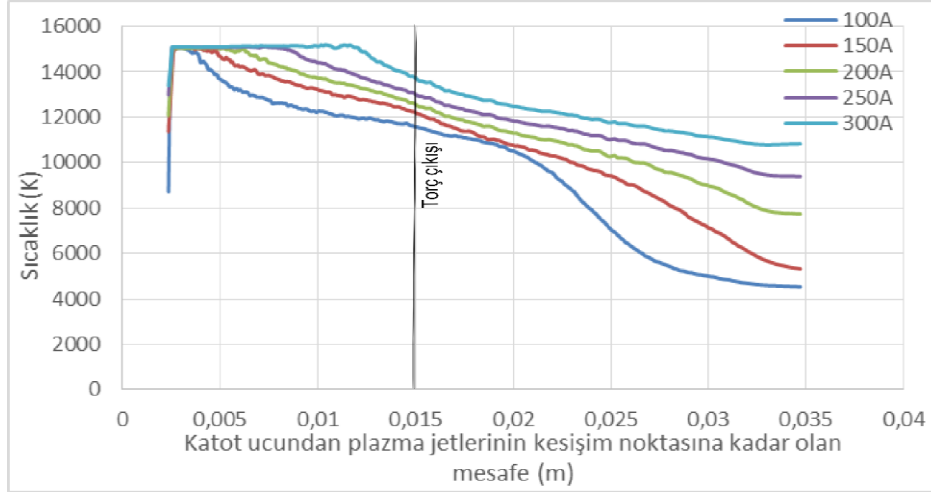


Şekil 5.16. (devam) Sabit 70 SLPM akış debisi ve farklı akım değerleri için üçlü plazma torçlarının genel sıcaklık dağılımı (a) ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzleminde yerel sıcaklık dağılımı (b)



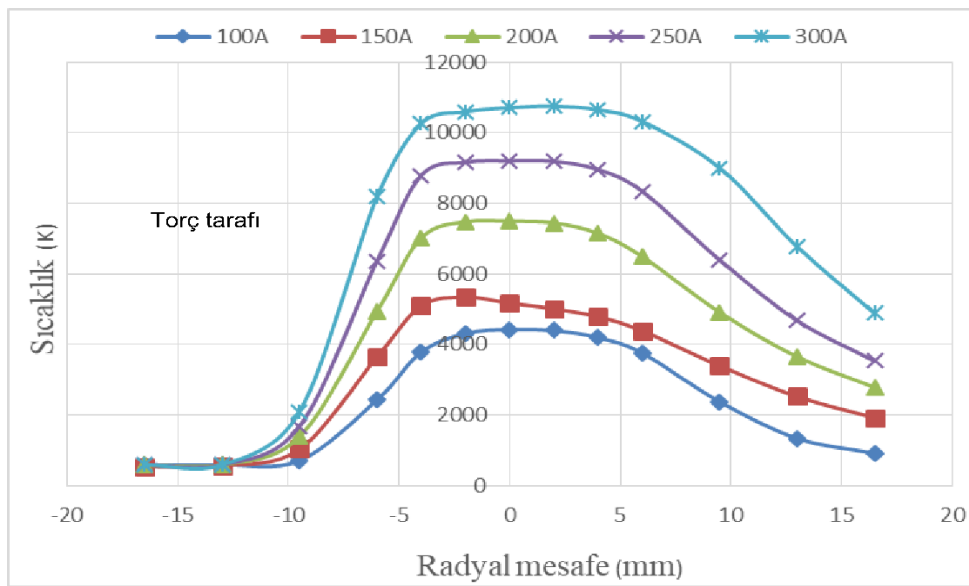
Şekil 5.16. (devam) Sabit 70 SLPM akış debisi ve farklı akım değerleri için üçlü plazma torçlarının genel sıcaklık dağılımı (a) ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzleminde yerel sıcaklık dağılımı (b)

Şekil 5.17’de sabit akış debisi ve farklı akım değerlerinde bir torçun katot ucundan plazma kesişim noktasına kadar düz bir çizgi üzerinden alınmış plazma sıcaklığı dağılımı gösterilmektedir. Elektrik ark oluşumuyla torç iç kısmında sıcaklığın hızlı şekilde yükseldiği görülmektedir. Plazma sıcaklığının katot ucuna yakın bölgelerde arttığı ve plazma jetlerinin kesişim noktasına doğru azaldığı görülmektedir. Akım ile hacimsel debi karşılaştırılmsında akımın plazma sıcaklığı üzerindeki etkisi akış debisine nispeten daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 5.17. Bir torç katotunun ucundan plazma jetlerinin kesişim noktalarına kadar olan çizgi üzerinden alınmış sıcaklık değişimi

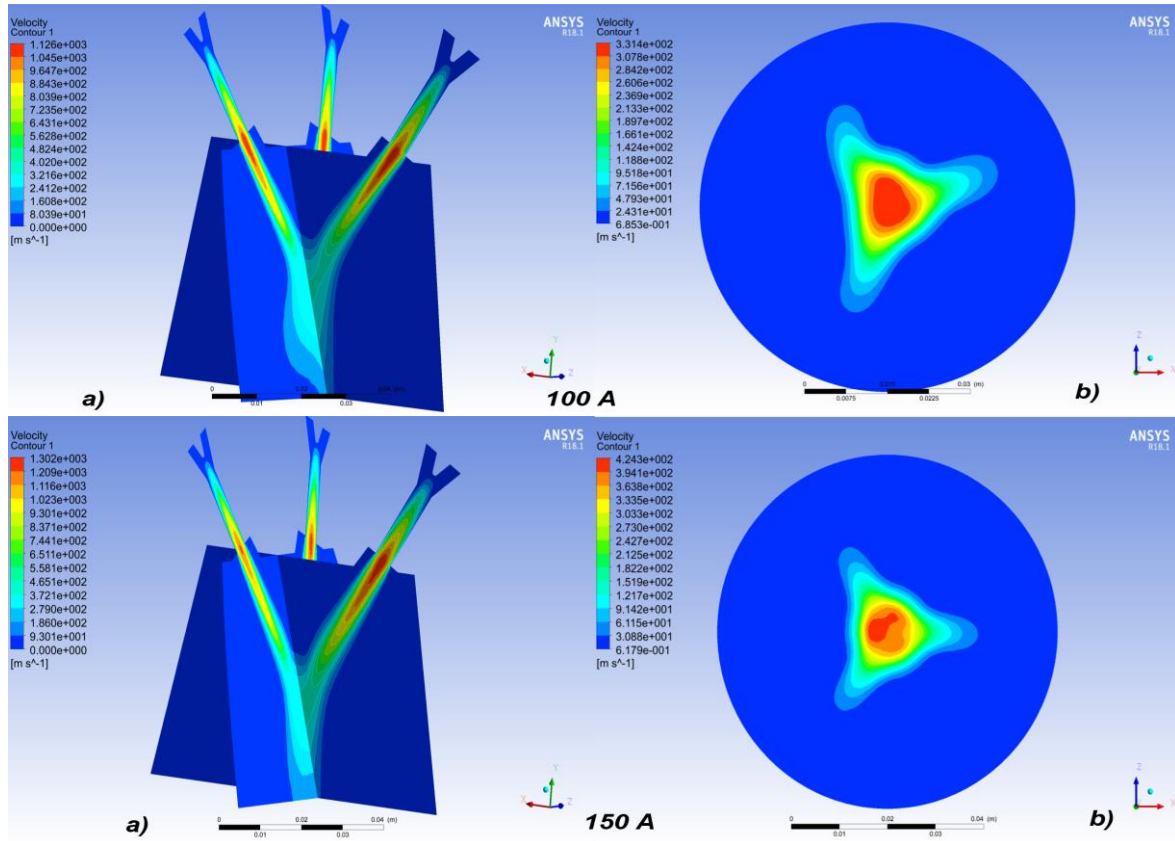
Şekil 5.18'de sabit hacimsel debide plazma torçlarından birinin ekseninden ve plazma jetlerinin kesişim noktasından geçen dik düzlemin, plazma jetlerinin kesişim noktasından geçen enine kesit düzlemiyle kesişme bölgesindeki düz bir çizgi üzerinde belirli noktalardan veriler alınarak sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Kesişim bölgesinde çizgi üzerinde 13 noktadan alınmış sıcaklık değişimi görülmektedir. Plazma jetlerinin kesişim noktasında plazma sıcaklığı 4430 K ile 10713 K arasında değiştiği görülmektedir. Enine kesit düzleminde kesişim noktasında sıcaklığın diğer noktalardan daha yüksek olduğunu ve sıcaklık değişiminin simetrik olmadığını görülmektedir.



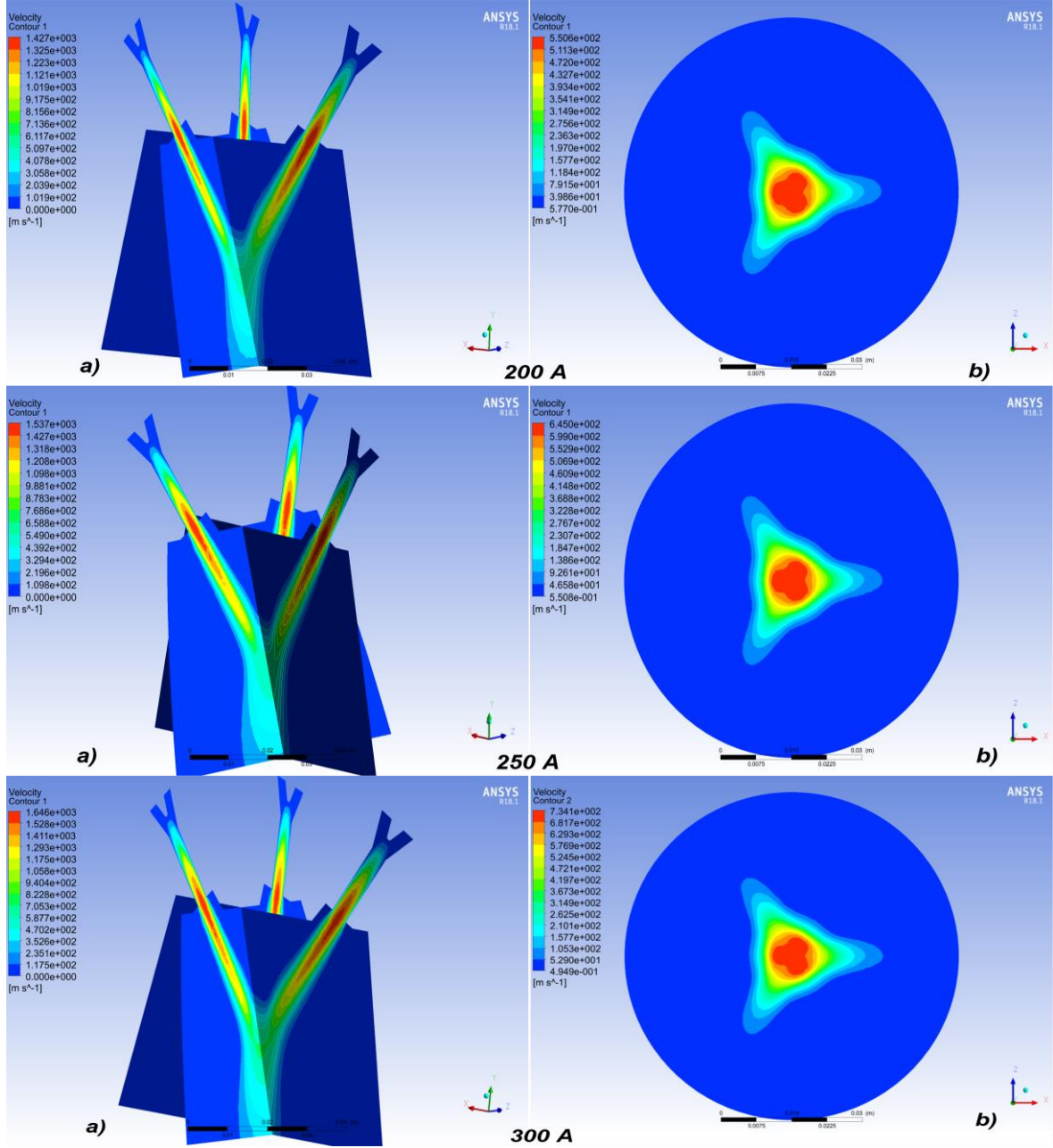
Şekil 5.18. Plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzleminde çizgi üzerinde belirli noktalardan alınmış sıcaklık değişimi

5.3.2. Plazma torçlarında ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde plazma hızı dağılımı

Şekil 5.19 sabit 70 SLPM’de farklı akım değerleri için torçlar içerisinde plazma jetlerinin kesişim bölgesindeki plazma hız dağılımını göstermektedir. Akım değerlerinin artırılmasıyla plazma hızının arttığı görülmektedir. Elektrik arkındaki akım, gazı ısıtan ve iyonlaştıran joule ısınmasına neden olur. Plazma durumuna geçişte hızlı bir genişleme ve plazma hızında büyük bir artış meydana gelmektedir. Akışkan dinamiği, ısı akışı ve elektromanyetik etkiler, tabancanın voltaj-akım oranına karşı akış hızı özelliklerini vermek üzere etkileşime girer. Maksimum plazma hızı 1 125 m/s ile 1 645 m/s, plazma jetlerinin kesişim nokasında ise 330 m/s ile 695 m/s arasında değiştiği görülmektedir.

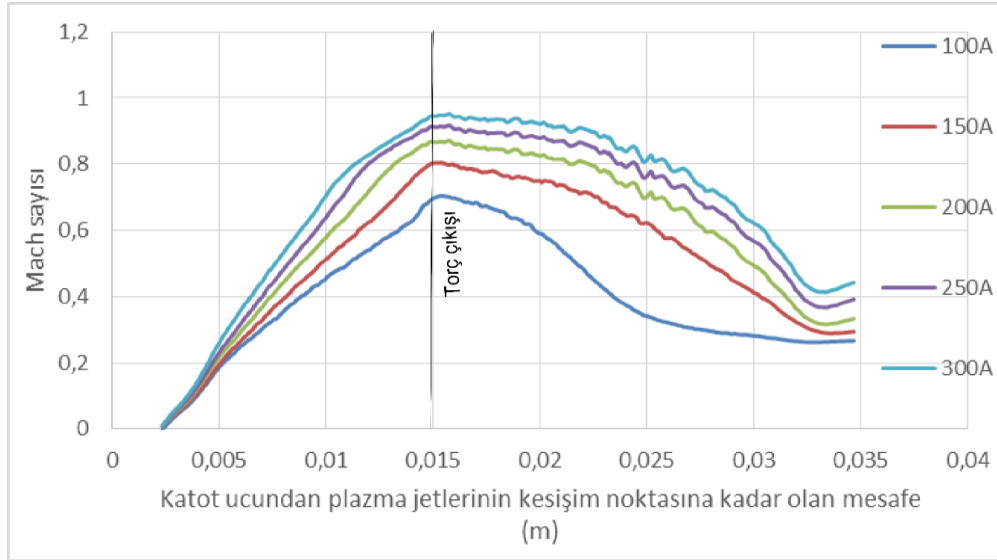


Şekil 5.19. Sabit 70 SLPM’de farklı akımlar için üçlü plazma torçlarının genel hız dağılımı (a) ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzlemdeki yerel hız dağılımı (b)



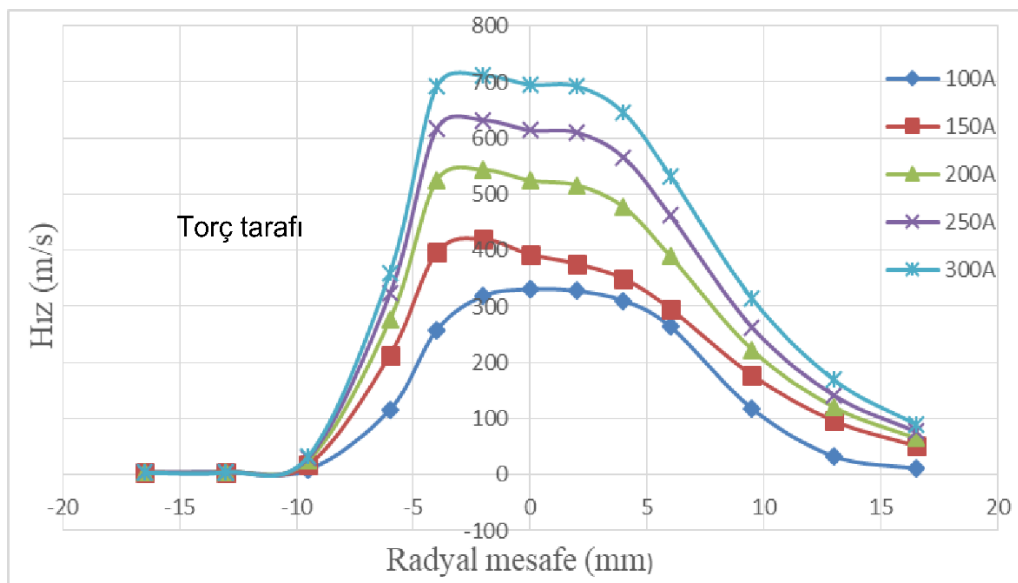
Şekil 5.19. (devam) Sabit 70 SLPM’de farklı akımlar için üçlü plazma torçlarının genel hız dağılımı (a) ve plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzlemdeki yerel hız dağılımı (b)

Şekil 5.20 debi değeri sabit tutularak değiştirilen akım değerleri için katot ucundan plazma kesişim noktasına kadar düz bir çizgi üzerinden alınmış plazma hız değişimi gösterilmektedir. Akış debilerinin yükseltilmesiyle plazma hızının torç çıkışına doğru arttığı, kesişim noktasına doğru tekrardan azaldığı görülmektedir. En yüksek hız çıkış bölgesinde meydana geldiği ve 300A’de 1645 m/s olarak görülmüştür. Mach sayısı değeri 300 A’de 0.95 olarak görülmüştür.



Şekil 5.20. Bir torç katotunun ucundan plazma jetlerinin kesişim noktasına kadar olan çizgi üzerinden alınmış plazma mach sayısı değişimi

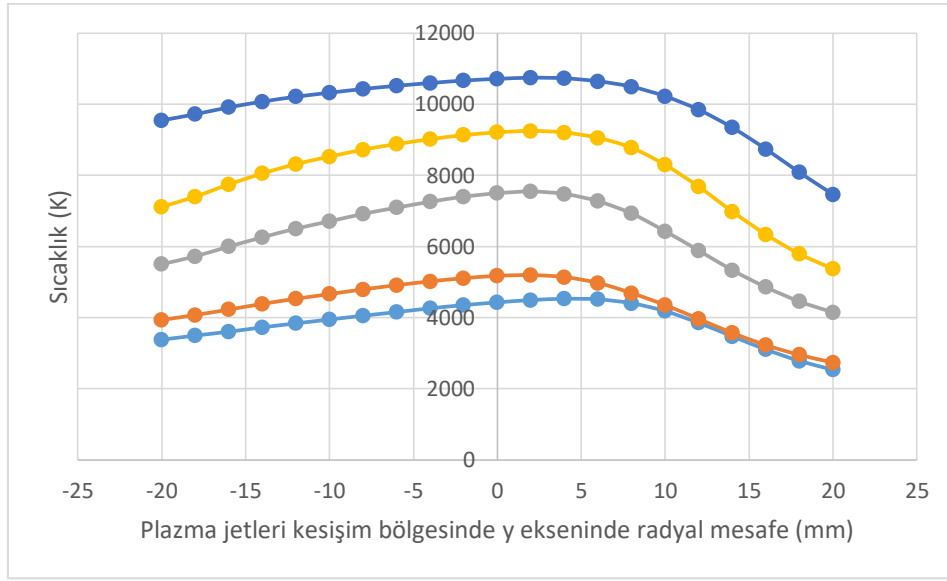
Şekil 5.21’de plazma torçlarından birinin ekseninden ve plazma jetlerinin kesişim noktasından geçen dik düzlemin, plazma jetlerinin kesişim noktasındaki enine kesit düzlemiyle kesişme bölgesindeki düz bir çizgi üzerinde belirli noktalardan veriler alınarak hız ölçümleri yapılmıştır. Kesişim bölgesinde çizgi üzerinde 13 noktadan alınmış hız değişimi görülmektedir. Enine kesit düzleminde kesişim noktasında hız değişimi akış debisine kıyasla daha etkili olduğunu göstermektedir. Plazma jetlerinin kesişim noktasında hız değişimi artan akımla 330 m/s ile 695 m/s arasında değiştiği görülmektedir.



Şekil 5.21. Plazma jetlerinin kesişim bölgesinde enine kesit düzlemde çizgi üzerinde belirli noktalardan alınmış hız değişimi

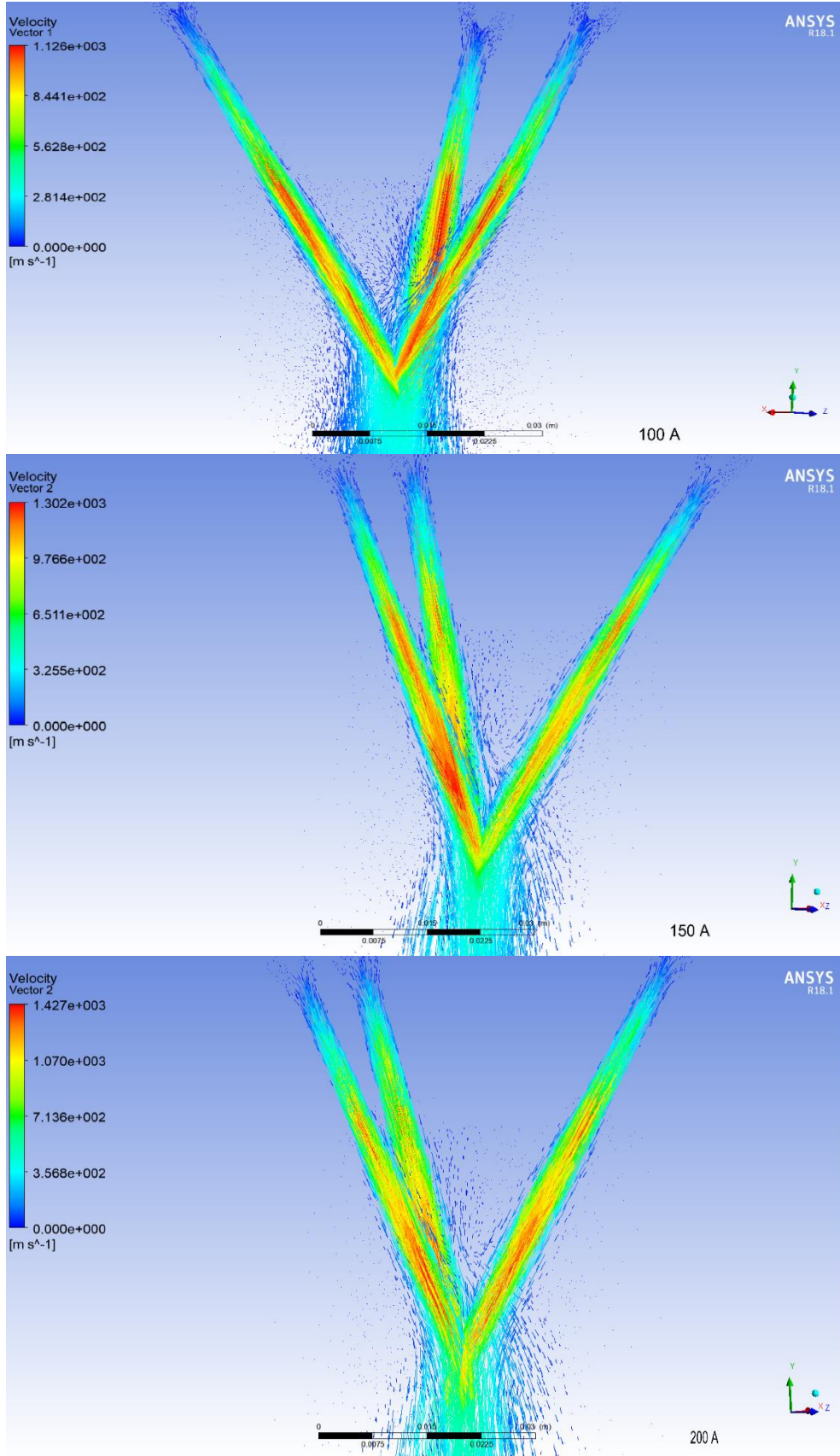
5.3.3. Sabit akış debisinde farklı akımlarda plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde sıcaklık ve hız değişimi

Şekil 5.22 ve şekil 5.24’de plazma jetlerinin kesişim bölgesinde y ekseninde sıcaklık ve hızdaki değişimler akış debisinde olduğu gibi üst bölgede daha fazla düşüş görülmüştür. Akım yoğunluklarının artırılması ile hız ve sıcaklıkta artış görülmüştür. Bu nedenle akımın artırılması akış debisine kıyasla daha etkili olmaktadır.

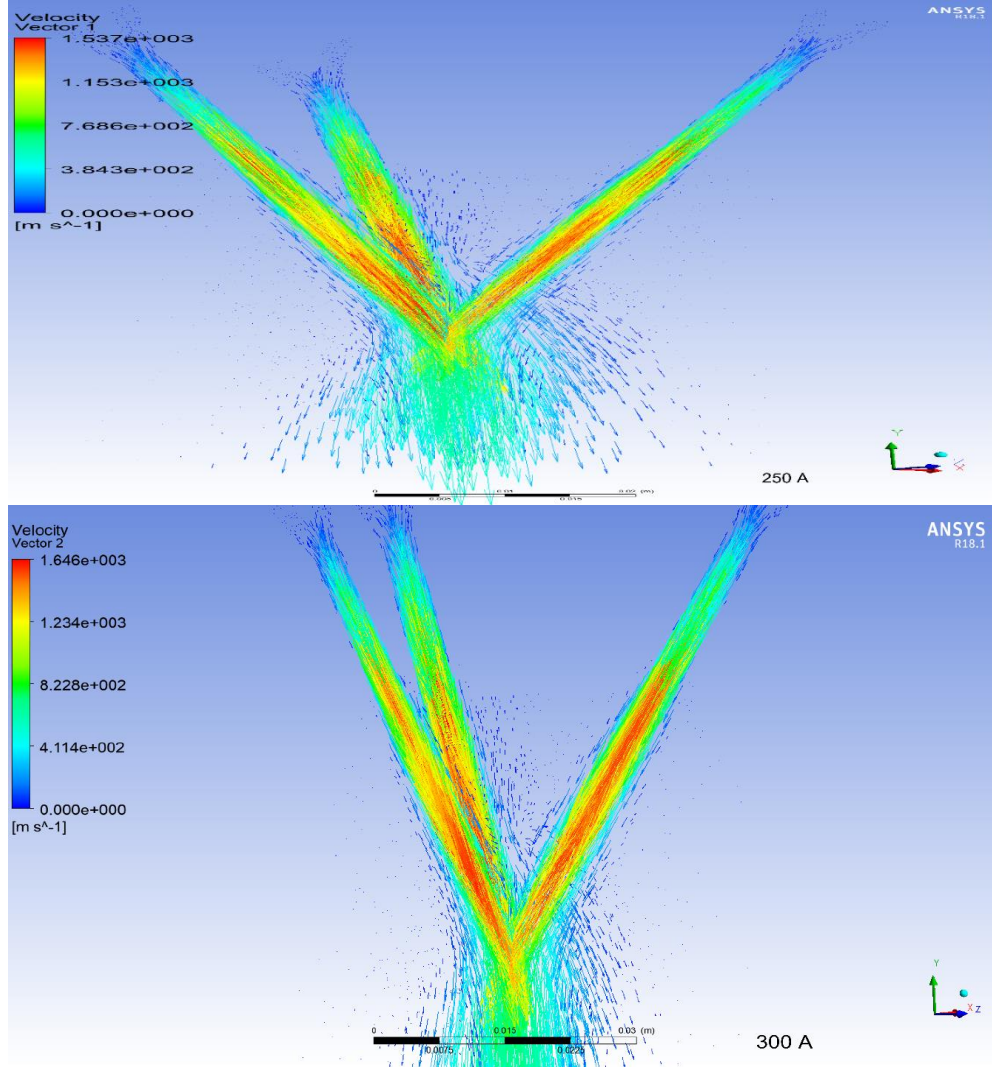


5.22. Sabit akış debisinde farklı akımlarda plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde sıcaklık değişimi

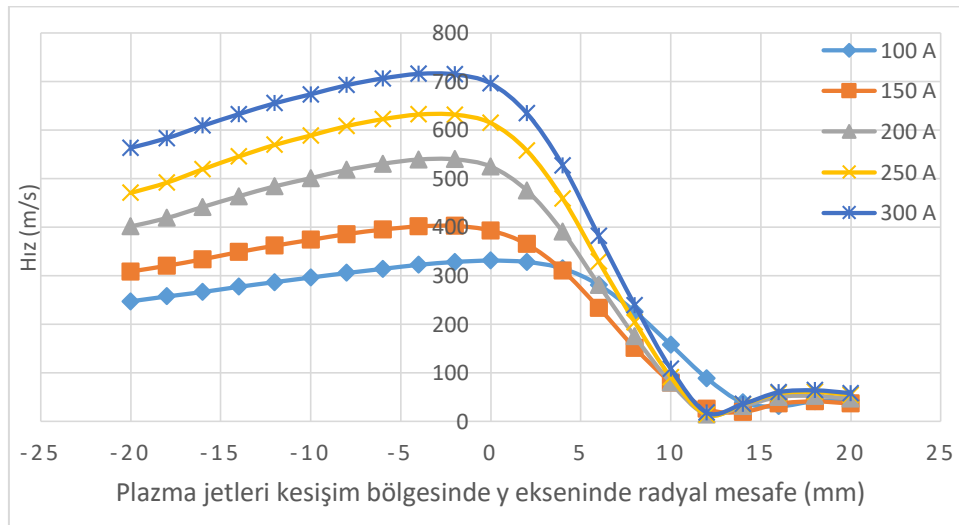
Şekil 5.23’de sabit akış debisinde farklı akım yoğunluklarında yapılan analizlerde elde edilen hız değişimlerinin incelenmesi için hız vektörel dağılımları verilmektedir.



Şekil 5.23. Sabit 70 SLPM’de farklı akımlar için üçlü plazma torçlarının genel vektörel hız dağılımı



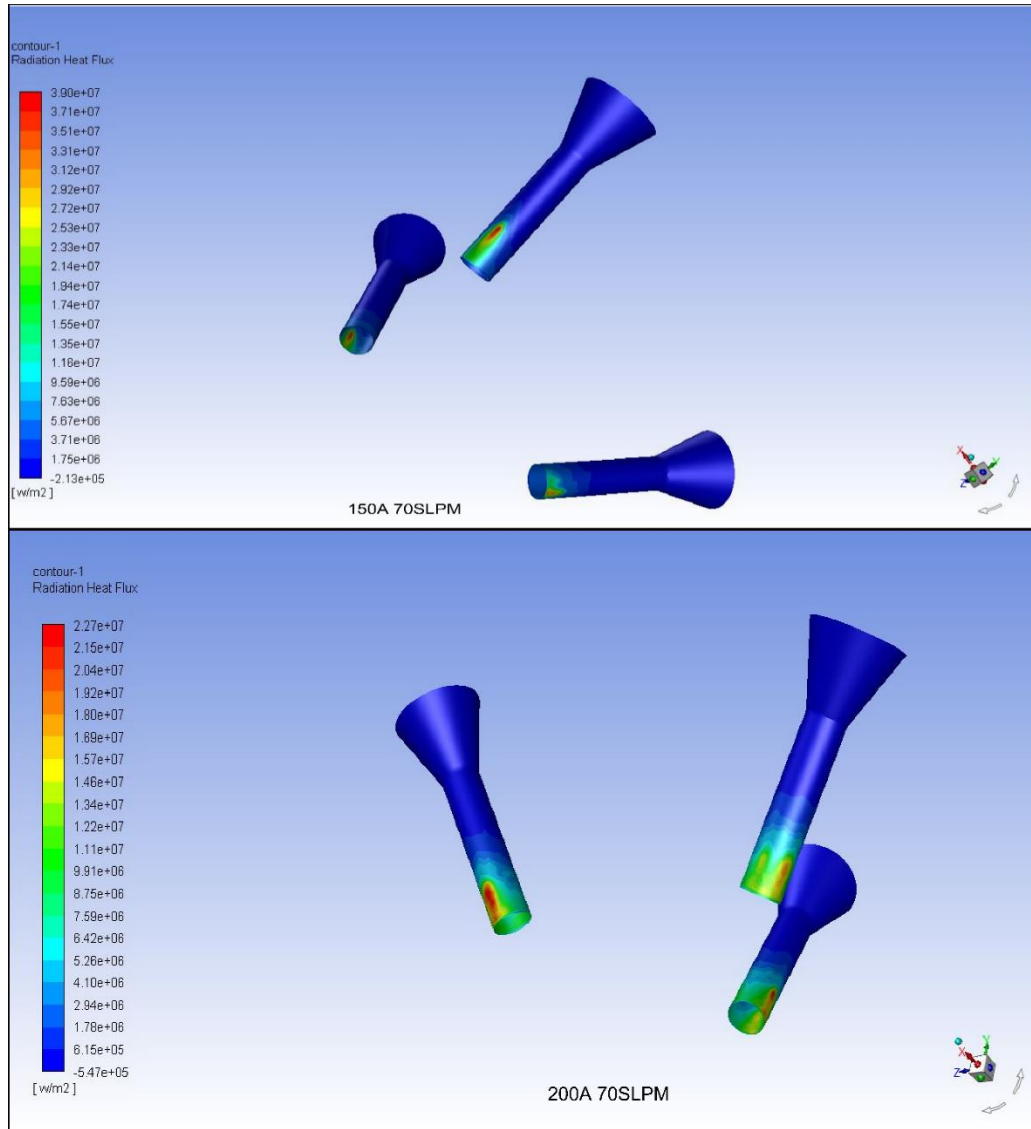
Şekil 5.23. (devam) Sabit 70 SLPM’de farklı akımlar için üçlü plazma torçlarının genel vektörel hız dağılımı



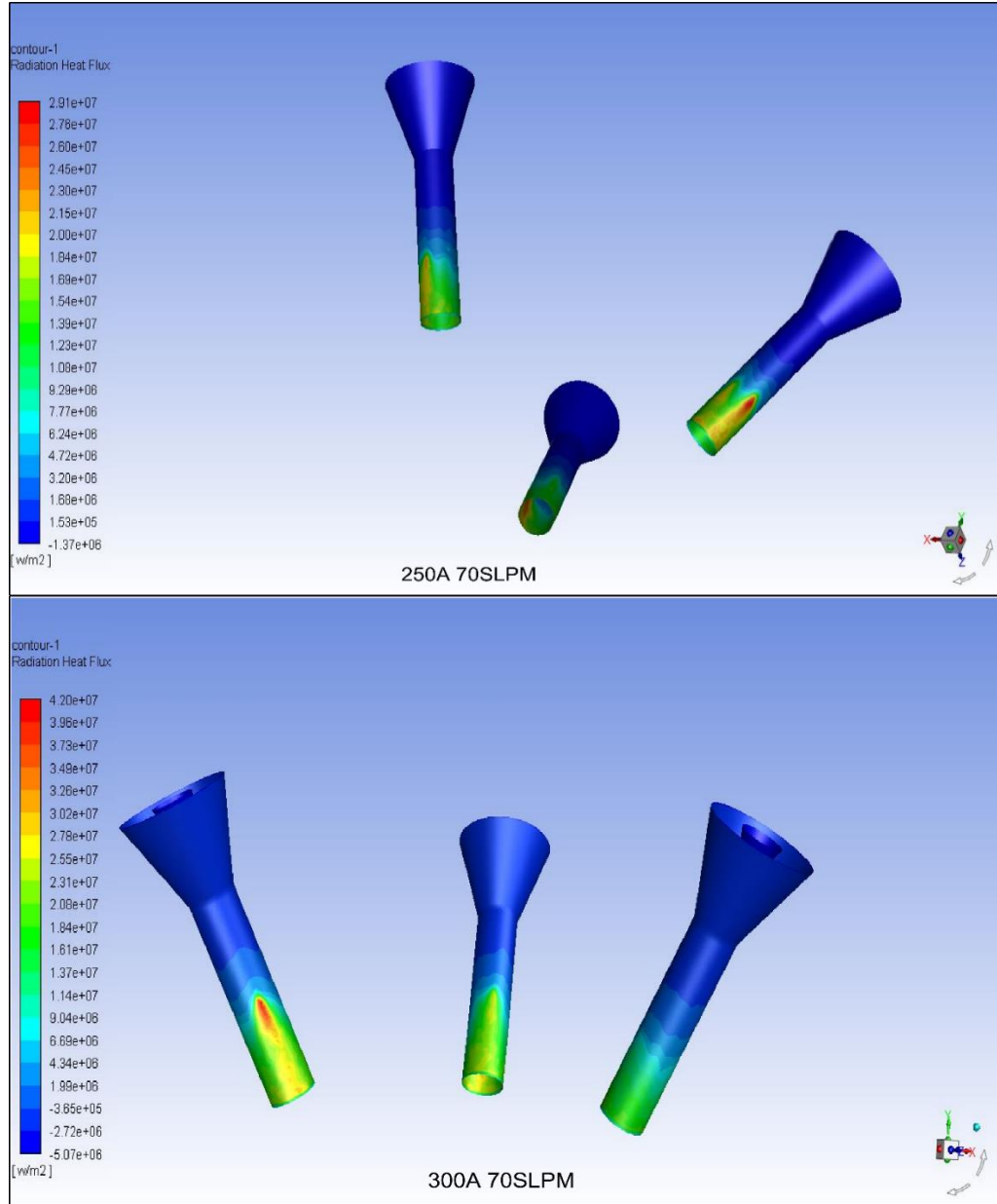
5.24. Sabit akış debisinde farklı akımlarda plazma jetleri kesişim bölgesinde y ekseninde hız değişimi

5.3.4. Sabit akış debisinde farklı akımlarda plazma torçlarında radyasyon dağılımı

Sabit debide ve farklı akım yoğunluklarında analizler yapılarak katı yüzeylerden radyasyon dağılımları incelenmiştir. Oksidlenmiş bakır malzemesi için yayımlılık (emissivity) değeri 0.8 olarak girilerek katot ve anot duvarları üzerinde radyasyon dağılımları incelenmiştir. Radyasyon sıcaklığın yüksek olduğu yerlerde yani ark-kök bağlantı noktalarının olduğu bölgelerde daha yüksektir. Artan akımla radyasyon dağılım değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Akımın artması ark kökünde sıcaklığın artmasıyla radyasyon artış eğilimindedir.



Şekil 5.25. Sabit debide farklı akımlarda plazma torçlarında radyasyon dağılımı



Şekil 5.25. (devam) Sabit debide farklı akımlarda plazma torçlarında radyasyon dağılımı

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Bu çalışmada transfer edilmeyen DC ark üçlü plazma torçları ANSYS FLUENT 18.1 paket programı yardımıyla modellenerek plazma torçlarının iç ve dışındaki akış incelemesi yapılmıştır. Çözümlemelerde manyetik kuvvetlerin akış üzerindeki etkilerini incelemek için ANSYS programı ile birlikte Manyetohidrodinamik (MHD) modülü tanımlanmıştır. Çalışma öncesi literatür taramasında elde edilen sayısal ve deneysel çalışma sonuçları incelenerek analizler yapılmıştır. Bu çalışmada üçlü plazma torcu 3B olarak modellenmiştir. Çalışma gazı olarak saf argon gazı kullanılmıştır. Çözümlemeler zamandan bağımsız olarak çözülmüştür. Akış debisi ve akım değerleri gibi parametreler değiştirilerek torç içinde ve dışında oluşan plazma jetlerinin kesişim bölgesinde plazma hızı ve sıcaklığı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Akım değeri sabit tutularak ve akış debisi değiştirilerek yapılan analiz sonuçları:

1. Plazma torçları içerisinde oluşan plazma sıcaklığında dikkate alınacak değişiklik görülmemiştir fakat plazma jetlerinin kesişim noktasında sıcaklık artmıştır.
2. Plazma torçlar içerisinde ve plazma kesişim noktasında plazma hızının arttığı görülmüştür.
3. Plazma hız mach sayısı torç çıkışında artarak plazma jetlerinin kesişim noktasına doğru azalmıştır.

Akış debisi sabit tutularak ve akım değeri değiştirilerek yapılan analiz sonuçları:

1. Plazma torçlar içerisinde oluşan plazma sıcaklığında dikkate alınacak değişiklik görülmemiştir fakat plazma jetlerinin kesişim noktasında sıcaklık arttığı görülmüştür.
2. Plazma torçları içerisinde ve plazma jetlerinin kesişim noktasında plazma hızı artmıştır.
3. Plazma mach sayısı değeri torç çıkışında artarak plazma jetlerinin kesişim noktasına doğru azalmıştır.

En uygun akış debisi ve akım yoğunluğunun belirlenmesi için elde edilen sıcaklık ve hız değerleri dikkate alınarak elde edilmiştir. Sabit akım farklı akış debilerinde yapılan

analizlerde 50 SLPM ile 70 SLPM’de elde edilen sıcaklıklar arasında fazla fark olmaması nedeni ile hız değişimleri üzerinden inceleme yapılarak uygun akış debisi elde edilmiştir. En uygun akış debisi 70 SLPM olarak belirlenmiştir.

Elde edilen uygun akış debisi sabit tutularak akım değerlerinin artırılmasıyla plazma sıcaklığının ve hızının arttığı görülmektedir. En yüksek sıcaklık ve hız değerlerinin 300 A akım değerinde elde edilmiştir.

6.2. Öneriler

Gelecekte yapılacak çalışmalar için torç geometrileri, nozul ucundan kesişim noktalarına kadar olan mesafe, torçların çember ekseni etrafında yerleşim konumları, merkezi eksene olan açıları, girilen akım ve debi değerleri değiştirilerek plazma sıcaklığı ve hızına olan etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Abdel Rahman, M. (2012). Ion sources for use in research and low energy accelerators. *International Journal of Instrumentation Science*, 1(5), 63-77.
2. Boulos, M. (1991). Thermal plasma processing. *IEEE Transactions On Plasma Science*, 19(6), 1078-89.
3. Kumar, S., and Selvarajan, V. (2008). Plasma spheroidization of iron powders in a non-transferred. *Materials Characterization*, 59(6), 781-785.
4. Kutlu, E., Monno, M., and Bini, R. (2005). Plazma ile kesme metoduna genel bir bakış. *Mühendis ve Makina*, 46(541), 21-29.
5. 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
6. Карегин, А. Г. (2009). *Плазменные процессы и технологии*. Томск: Томского Политехнического Университета, 20-38.
7. Кролл, Н., и Трайвелпис, А. (1975). *Основы физики плазмы*. Москва: Мир. 3-10.
8. Ramanlal, P. A. (2018). *Experimental design of a pen-like plasma torch with a parametric fea to improve effective treating area*, Doctoral Dissertation, Gujarat Technological University, Ahmedabad, 1-12.
9. Boulos, M. I., Fauchais, P., and Pfender, E. (1994). *Thermal plasmas fundamentals and applications*. New York: Plenum Press, 5-47.
10. Chen, F. (1984). *Plasma physics and controlled fusion* (Second Edition). New York: Plenum Press, 1-10.
11. Demir, F. (2018). *Plazma tabancalarındaki plazma oluşumunun sayısal modellenmesi ve parametrik incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 27-29.
12. Sunjuq, W. (2016). *Argon DC taşınimsız ark plazma torçunun üç boyutlu simülasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-8.
13. Ghorui, S., and Das, A. K. (2013). Arc plasma devices: Evolving mechanical design from numerical simulation. *Pramana Journal of Physics*, 80(4), 685-699
14. Zhukov, M. F., and Zasyrkin, I. M. (2007). *Thermal plasma torches*. Cambridge: Cambridge International Science Publishing, 254-262.
15. 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.

16. Ardakani , E. S., and Mostaghimi, J. (2015). Arc fluctuation modeling in non-transferred direct current argon plasma torch. *Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Toronto*, 3-6.
17. Han, H., and Wang, Q. (2012). Three-dimensional arc modeling inside non-transferred plasma torch. *Trans Tech Publications*, 1407-1410.
18. Guo, Z., Yin, S., Liao, H., and Gu, S. (2015). Three-dimensional simulation of an argon–hydrogen DC non-transferred. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 80, 644-652.
19. Trelles, J. P., Pfender, E., and Heberlein, J. (2006). Multiscale finite element modeling of arc dynamics in a DC plasma torch. *Plasma Chemistry and Plasma Processing Journal*, 26(6), 557–575
20. Li , H., and Pfender, E. (2007). Three dimensional modeling of the plasma spray process. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16(2), 245-260.
21. Park, J. M., Kim, K. S., Hwang, T. H., and Hong, S. (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
22. Asmann, M., Wank, A., Kim, H., and Heberlein, J. (2001). Characterization of the converging jet region in a triple torch plasma reactor. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 21(1), 37-63.
23. 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.
24. 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.
25. Li , H., and Chen, X. (2001). Three-dimensional modelling of a dc non-transferred arc plasma torch. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 34, 99-102.
26. Yurtkuran , E., Unal, R., and Ozsunar, A. (2018). Numerical modeling of torch design for plasma atomization. *ACTA Physica Polonica A*, 134(1), 292-296
27. Meillot, E., Guenadou, D., and Bourgeois, C. (2008). Three-dimension and transient DC plasma flow modeling. *Plasma Chemistry and Plasma Processing Journal*, 28(1), 69-84.
28. Trelles, J. P., Chazelas, C., Vardelle, A., and Heberlein, J. (2009). Arc plasma torch modeling. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(5-6), 728-752.
29. Soydan, N. G., Şimşek, O., ve Aköz, M. S. (2016). Eşik mansabındaki kritik üstü açık kanal akımının deneysel ve sayısal analizi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(2), 33-45.

30. ANSYS. (2015). Ansys fluent theory guide version 15.0. ANSYS.
31. Çavuş, H. (2007). *Güneş kabuğunaki konvektif olayların manyetohidrodinamik (mhd) yaklaşımıyla modellenmesi*, Doktora Tezi, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale, 21-27
32. 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.
33. 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*, 36(9), 1084-1096.
34. Ghosh, A. K. (2012). *Introduction to measurements and instrumentation*. New Delhi: PHI Learning.
35. Selvan, B., Ramachandran, K., Sreekumar, K., Thiyagarajan, T., and Ananthapadmanabhan, p. (2009). Numerical and experimental studies on DC plasma spray torch. *Vacuum Journal*, 84(4), 444-452.
36. ANSYS. (2015). Ansys fluent users guide version 15.0. ANSYS.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ABDURAHMANOV, Knyaz
 Uyuğu : AZERBAYCAN
 Doğum tarihi ve yeri : 07.06.1990, Kırkızistan
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (531) 315 83 56
 e-mail : knyaz.abdurahmanov@gazi.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Makina Mühendisliği	2019
Lisans	Azerbaycan Devlet Petrol Akademisi / Mak Müh	2013
Lise	Şeki Teknik ve Humanitar Lisesi / Azerbaycan	2007

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017	Birant Makina Mühendislik	Mühendis

Yabancı Dil

Kırkızca
 İngilizce
 Rusca

Yayınlar

1. Abdurahmanov, K., Yurtkuran, E., & Ünal, R. (2019, 23-24 Nisan). *Malzeme İşlemlerinde Kullanılmasına Yönelik Üçlü Termal Plazma Torç Sisteminin Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği ile Modellenmesi*. 4. Uluslararası Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Kongresi, İstanbul, Türkiye.

Hobiler

Yüzme, Gitar, Satranç, Atıcılık



GAZİ GELECEKTİR..