



**PLAZMA TABANCAALARINDAKİ PLAZMA OLUŞUMUNUN SAYISAL
MODELLENMESİ VE PARAMETRİK İNCELENMESİ**

Fatih DEMİR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MART 2018

Fatih DEMİR tarafından hazırlanan “PLAZMA TABANCALARINDAKİ PLAZMA OLUŞUMUNUN SAYISAL MODELLENMESİ VE PARAMETRİK İNCELENMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Doç. Dr. Abuzer Kadir ÖZSUNAR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Başkan: Prof. Dr. Rahmi ÜNAL

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

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

.....

Üye: Dr. Öğretim Üyesi Kemal BİLEN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi

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

.....

Tez Savunma Tarihi: 05/03/2018

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.

Fatih DEMİR

05/03/2018

PLAZMA TABANCALARINDAKİ PLAZMA OLUŞUMUNUN SAYISAL MODELLENMESİ VE PARAMETRİK İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Fatih DEMİR

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mart 2018

ÖZET

Bu çalışmada taranan literatür sonucunda aktarımsız DC plazma tabancası (plazma torcu) modellenmiştir. Plazma tabancası üç boyutlu olarak modellenmiştir ve içerisinde gerçekleşen akış türbülanslı ve sıkıştırılmaz olarak kabul edilmiştir. Çalışma akışkanı olarak argon kullanılmıştır. Çözümlemeler zamana bağlı ve zamandan bağımsız olarak yapılmıştır. Çalışmada anot ark kökü bağlantısının yeri belirlenmeye ve anot duvarı aşınması azaltılmaya çalışılmıştır. Katot duvarından tanımlanan farklı akım değerleri ve gazın farklı hacimsel debilerinin, plazma sıcaklığı, plazma hızı, plazma çıkış sıcaklığı ve hızı, plazma elektrik potansiyeli, anot ark kökü bağlantı noktası sıcaklığı, anot ark kökü oluşum noktası ve verim üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca plazma tabancasının çıkış çapı ve anot duvarının uzunluğu değiştirilerek ark bağlantı noktası değişimleri incelenmiş ve plazma tabancasının verimi hesaplanmıştır. Analizler yapılırken plazma tabancası içerisinde elektrik arkından dolayı ortaya çıkan elektromanyetik alan ile gaz akışı arasındaki etkileşimi ortaya koyabilmek için ANSYS Fluent ve manyetohidrodinamik modülü beraber kullanılmıştır. Çalışmada akım ve gazın hacimsel debisinin etkilerini incelemek için analizlerin bir bölümünde akım değeri sabit tutulup, gazın hacimsel debisi değiştirilmiştir diğer bölümde ise gazın hacimsel debisi sabit tutulup akım değeri değiştirilmiştir. Plazma tabancasının farklı çıkış çapı ve farklı anot duvarı uzunluğu için yapılan çözümlerde akım ve hacimsel debi değeri sabit tutulmuştur. Gazın hacimsel debisinin sabit tutulup, akımın artırılarak değiştirilmesiyle plazma sıcaklığının, anot ark bağlantı noktası sıcaklığının ve plazma hızının arttığı görülmüştür. Anot ark bağlantı noktasının ise artan akım değerleriyle plazma tabancasının girişine doğru hareket ettiği görülmüştür. Akım değerinin sabit tutularak, gazın hacimsel debisinin artırılarak değiştirilmesiyle plazma sıcaklığında ve anot ark bağlantı noktası sıcaklığında kayda değer bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Artan hacimsel debiyle plazma hızı arttığı görülmüştür. Anot ark bağlantı noktası ise artan hacimsel debiyle plazma tabancasının çıkışına doğru hareket ettiği görülmüştür. Elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırıldığında uyum içinde olduğu görülmektedir.

Bilim Kodu : 91411

Anahtar Kelimeler : Plazma tabancası, ark dinamiği, hesaplamalı akışkanlar dinamiği.

Sayfa Adedi : 136

Danışman : Doç. Dr. Abuzer Kadir ÖZSUNAR

NUMERICAL MODELING OF PLASMA FORMATION IN PLASMA TORCH AND PARAMETRIC INVESTIGATION

(M. Sc. Thesis)

Fatih DEMİR

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

March 2018

ABSTRACT

As a result of the literature investigated in this study, a non-transferred DC plasma torch is modeled. The plasma torch is modeled as three-dimensional and the flow is assumed to be turbulent and incompressible. Argon was used as working fluid. The solutions were done as time-independent (steady-state) and time-dependent (transient). In this study, the position of the anode arc root attachment was tried to be determined and the erosion of the anode wall was tried to be reduced. The effects of the current values defined by the cathode wall and the different volumetric flows of the gas on the plasma temperature, plasma velocity, plasma exit temperature and velocity, plasma electrical potential, anode arc root point temperature, anode arc root attachment and torch efficiency were investigated. ANSYS Fluent and Magnetohydrodynamic modules are used together to reveal the interaction between the electromagnetic field caused by the electric arc in the plasma torch and the gas flow. In order to investigate the effects of current and gas volumetric flow rate in the study, the current value was kept constant in one part of the analysis and the volumetric flow rate of the gas was changed. In the other part, the gas flow rate was kept constant. Additionally, the current and volumetric flow rate are kept constant in the solutions made for different output diameter and different anode wall length of the plasma torch. At the constant gas volumetric flow, plasma temperature, anode arc root attachment temperature and plasma velocity were increased with increasing the current. It has been observed that the anode arc root point moves towards the entrance of plasma torch with increasing current values. At constant current, it has been observed that there is no significant change in the plasma temperature and the anode arc root attachment temperature by increasing the gas flow rate. It has been seen that the plasma velocity increases with increasing gas flow rate. The anode arc root point moves towards the exit of plasma torch with increasing gas flow rate. It is seen that the the obtained results are consistent with the literature.

Science Code : 91411

Key Words : Plasma torch, arc dynamics, computational fluid dynamics.

Page Number : 136

Supervisor : Assoc. Prof. Dr. Abuzer ÖZSUNAR

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyip bana yol gösteren değerli hocam Doç. Dr. Abuzer Kadir ÖZSUNAR'a saygı ve minnetlerimi sunarım. Yaptığım çalışmanın basamaklarında 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 fedakâr 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.....	xvi
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. Plazma tabancaları	4
2.1.4. Termal ve termal olmayan plazmalar.....	7
2.1.5. Termal plazmanın oluşumu.....	8
2.1.6. Plazma ark dinamiği.....	8
2.1.7. Plazma ark voltajı ve verimi	9
2.1.8. DC plazma tabancası güç kaynağı	10
2.2. Literatür Özeti	11
3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL.....	25
3.1. Problemin Tanımı ve Geometrilerin Belirlenmesi.....	25
3.2. Kabuller.....	27
3.3. Temel Denklemler.....	27
3.3.1. Kütlenin korunumu denklemi	28

	Sayfa
3.3.2. Momentumun korunumu denklemleri.....	28
3.3.3. Enerjinin korunumu denklemi.....	28
3.4. Türbülans Modelleri.....	29
3.5. Gerçekleştirilebilir k - ε Türbülans Modeli	30
3.6. Manyetohidrodinamik (MHD)	32
3.7. Sınır Şartları	33
3.7.1. Giriş sınır şartı.....	34
3.7.2. Çıkış sınır şartı	35
3.7.3. Anot duvarı sınır şartı.....	35
3.7.4. Katot duvarı sınır şartı.....	36
4. SAYISAL ÇÖZÜM	39
4.1. Çözüm Ağ Yapısı.....	40
4.2. Genel Ayarlar	42
4.3. Enerji ve Manyetik Alan Denklemlerinin Çözümü	44
4.4. Çözücü Ayarları	45
4.5. Yakınsama Kontrolü	46
4.5.1. Çözümün yakınsaması	47
4.5.2. Çözümün iterasyon sayısından bağımsızlığı.....	47
4.5.3. Korunum denklemlerinin kontrolü.....	48
4.5.4. Çözümün hücre sayısından bağımsızlığı.....	49
5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR.....	51
5.1. Elde Edilen Verilerin Literatürle Karşılaştırılması	51
5.2. Zamana Bağlı ve Zamandan Bağımsız Çözümlerin Karşılaştırılması	55
5.3. Sabit Akımda Farklı Debilerle Yapılan Analizler.....	61
5.3.1. Plazma tabancası içinde oluşan plazma sıcaklığı dağılımı	61
5.3.2. Plazma tabancası çıkış kesitinde oluşan plazma sıcaklığı dağılımı	64

	Sayfa
5.3.3. Plazma tabancası içinde oluşan plazma hızı dağılımı	68
5.3.4. Plazma tabancası çıkış kesitinde oluşan plazma hızı dağılımı.....	71
5.3.5. Anot ark kökü bağlantı noktası	75
5.3.6. Anot cidarı sıcaklığının x eksenini boyunca dağılımı	77
5.3.7. Anot cidarı sıcaklığının y eksenini boyunca dağılımı	79
5.3.8. Ark voltajının ark uzunluğu ile ilişkisi	81
5.4. Sabit Hacimsel Debi Farklı Akımlarla Yapılan Analizler.....	84
5.4.1. Plazma tabancası içinde oluşan plazma sıcaklığı dağılımı	84
5.4.2. Plazma tabancası çıkış kesitinde oluşan plazma sıcaklığı dağılımı	87
5.4.3. Plazma tabancası içinde oluşan plazma hızı dağılımı	91
5.4.4. Plazma tabancası çıkış kesitinde oluşan plazma hızı dağılımı.....	94
5.4.5. Ark kökü bağlantı noktası	98
5.4.6. Anot cidarı sıcaklığının x eksenini boyunca dağılımı	100
5.4.7. Anot cidarı sıcaklığının y eksenini boyunca dağılımı	102
5.4.8. Ark voltajının ark uzunluğu ile ilişkisi	104
5.5. Sabit Hacimsel Debi ve Sabit Akımda Yapılan Analizler	107
5.5.1. Plazma tabancası çıkış çapının plazma akış alanı üzerine etkisi.....	107
5.5.2. Plazma tabancası anot duvarı uzunluğunun plazma akış alanının üzerine etkisi	117
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	127
KAYNAKLAR	131
ÖZGEÇMİŞ	135

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 5.1. R. Huang vd.nin çalışmalarında kullandıkları sınır şartları.....	51
Çizelge 5.2. He-Ping Li vd. nin çalışma sonuçları	55
Çizelge 5.3. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar	55
Çizelge 5.4. Sabit akımda farklı hacimsel debiler için çıkış kesitindeki plazma sıcaklıkları	67
Çizelge 5.5. Sabit akımda farklı hacimsel debiler için çıkış kesitindeki plazma hızları.....	74
Çizelge 5.6. Sabit akımda farklı hacimsel debiler için analiz sonuçları.....	84
Çizelge 5.7. Sabit hacimsel debide farklı akımlar için çıkış kesitindeki plazma sıcaklıkları	90
Çizelge 5.8. Sabit hacimsel debide farklı akımlar için çıkış kesitindeki plazma hızları.....	97
Çizelge 5.9. Sabit hacimsel debide farklı akımlar için analiz sonuçları.....	107
Çizelge 5.10. Farklı çıkış çapları için analiz sonuçları.....	113
Çizelge 5.11. Farklı anot duvarı uzunlukları için analiz sonuçları	122

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Plazma tabancasının şematik gösterimi.....	5
Şekil 2.2. Katot ve anotta meydana gelen ısı geçişlerinin şematik gösterimi.....	6
Şekil 2.3. (a) Tip I geometri, (b) Tip II geometri	13
Şekil 2.4. Plazma püskürten F4 plazma tabancasının gösterimi.....	14
Şekil 2.5. Aktarımsız plazma tabancasının iki farklı tipi: (a) ÇTK ve (b) İTK.....	15
Şekil 2.6. Plazma tabancasının şematik gösterimi.....	16
Şekil 2.7. (a) Uzun süreçte plazma tabancasının anot aşınması (b) Kısa süreçte plazma tabancasının anot aşınması.....	18
Şekil 3.1. Plazma tabancasının ölçüleri	26
Şekil 3.2. Plazma tabancasının 3B görünümü	26
Şekil 3.3. Plazma tabancasının sınır şartları	34
Şekil 3.4. Manyetohidrodinamik anot duvarı sınır şartı paneli	36
Şekil 3.5. Manyetohidrodinamik katot sınır şartı paneli.....	37
Şekil 4.1. Sayısal analizde kullanılan hücre yapısı.....	41
Şekil 4.2. Hücre kalite değer aralıkları	41
Şekil 4.3. Parametrik çalışmalarda kullanılan hücre yapısı için hücre kalitesi	42
Şekil 4.4. Boyut kontrolü.....	43
Şekil 4.5. Ağ yapısının kontrolü.....	43
Şekil 4.6. Genel ayarların görüntüsü	44
Şekil 4.7. Enerji modeli paneli	44
Şekil 4.8. Manyetohidrodinamik paneli.....	45
Şekil 4.9. Coupled algoritması şeması.....	46
Şekil 4.10. Örnek çözümün rezidü grafiği.....	47
Şekil 4.11. Plazma tabancası çıkış kesitinden alınan ortalama plazma sıcaklığı ve plazma hızının iterasyon sayısı ile değişimi.....	48
Şekil 4.12. Örnek bir çözüm için kütlenin korunumu paneli.....	49

Şekil	Sayfa
Şekil 4.13. Plazma tabancası çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığının hücre sayısı ile değişimi	50
Şekil 4.14. Plazma tabancası çıkış kesitindeki ortalama plazma hızının hücre sayısı ile değişimi	50
Şekil 5.1. Plazma sıcaklık dağılımı (a) R. Huang vd.nin çalışması (b) Bu tez çalışması	52
Şekil 5.2. Plazma elektrik potansiyeli dağılımı (a: R. Huang vd. nin çalışması b: Bu tez kapsamında yapılan çalışma)	53
Şekil 5.3. R. Huang vd.nin plazma tabancası çıkış kesiti sıcaklık dağılımı	54
Şekil 5.4. Bu çalışmadaki plazma tabancası çıkış kesiti sıcaklık dağılımı	54
Şekil 5.5. Plazma tabancasında zamana bağlı olarak sıcaklık dağılımı (a:25 ms, b: 30 ms, c: 45 ms, d: 60 ms, e: 100 ms)	56
Şekil 5.6. 30 SLPM 170 A'de ark oluşum noktası (a: Zamana bağlı çözüm b: Kararlı çözüm).....	58
Şekil 5.7. 30 SLPM 170 A'de anot cidarının sıcaklık dağılımı (a: Zamana bağlı çözüm b: Zamandan bağımsız çözüm)	59
Şekil 5.8. Plazma tabancası çıkış kesitinde elde edilen ortalama plazma sıcaklığı ile hacimsel debi grafiği	60
Şekil 5.9. Plazma tabancası çıkış kesitinde elde edilen ortalama plazma hızı ile hacimsel debi grafiği	61
Şekil 5.10. Sabit 170 A'de farklı hacimsel debiler için plazma sıcaklığı dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)	62
Şekil 5.11. x eksenini boyunca katot ucundan plazma tabancası çıkış kesitine doğru 50 noktadan alınmış plazma sıcaklığı değişimi	64
Şekil 5.12. Sabit 170 A'de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitindeki plazma sıcaklığı dağılımı (a:30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM).....	65
Şekil 5.13. Sabit 170 A'de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitindeki farklı eksenlerden alınmış plazma sıcaklığı (a: y eksenini, b: yz eksenini, c: z eksenini)	67
Şekil 5.14. Sabit 170 A'de farklı hacimsel debiler için plazma hızı dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)	69
Şekil 5.15. x eksenini boyunca katot ucundan plazma tabancası çıkış kesitine doğru 50 noktadan alınmış plazma hızı değişimi	71

Şekil	Sayfa
Şekil 5.16. Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitindeki plazma hızı dağılımı (a:30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)	72
Şekil 5.17. Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitinde farklı eksenlerden alınmış plazma hızı (a: y eksen, b: yz eksen, c: z eksen)	74
Şekil 5.18. Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için ark oluşum noktaları (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM).....	76
Şekil 5.19. Sabit 170 A akım değeri için anot cidarı sıcaklığının x eksen boyunda dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)	78
Şekil 5.20. Sabit 170 A akım değeri için anot cidarı sıcaklığının y eksen boyunda dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)	80
Şekil 5.21. Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası içerisindeki elektrik potansiyeli dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM).....	82
Şekil 5.22. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma sıcaklığı dağılımı (a: 50 A, b: 75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)	85
Şekil 5.23. x eksen boyunda katot ucundan plazma tabancası çıkış kesitine doğru 50 noktadan alınmış plazma sıcaklığı değişimi.....	87
Şekil 5.24. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitinde plazma sıcaklığı dağılımı (a: 50 A, b: 75 A, c:112 A, d:170 A, e: 250 A)...	88
Şekil 5.25. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitinde farklı eksenlerden alınmış plazma sıcaklığı (a: y eksen, b: yz eksen, c: z eksen)	90
Şekil 5.26. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma hızı dağılımı (a: 50 A, b:75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)	92
Şekil 5.27. x eksen boyunda katot ucundan plazma tabancası çıkış kesitine doğru 50 noktadan alınmış plazma hızı değişimi	94
Şekil 5.28. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitindeki plazma hızı dağılımı (a: 50 A, b:75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)	95
Şekil 5.29. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitinde farklı eksenlerden alınmış plazma hızı (a: y eksen, b: yz eksen, c: z eksen).....	97

Şekil	Sayfa
Şekil 5.30. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için ark oluşum noktaları (a: 50 A, b: 75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)	99
Şekil 5.31. Sabit 48 SLPM debi değeri için anot cidarı sıcaklığının x eksenini boyunca dağılımı (a: 50 A, b: 75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A).....	101
Şekil 5.32. Sabit 48 SLPM debi değeri için anot cidarı sıcaklığının y eksenini boyunca dağılımı (a: 50 A, b: 75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A).....	103
Şekil 5.33. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası içerisindeki elektrik potansiyeli dağılımı (a: 50 A, b:75 A, c:112 A, d:170 A, e:250 A).....	105
Şekil 5.34. 60 SLPM 112 A’de farklı çıkış çapları için ark oluşum noktaları (a: 2,6 mm; b: 3,2 mm; c: 3,6 mm; d: 4,00 mm; e: 5,00 mm).....	108
Şekil 5.35. 60 SLPM 112 A’de plazma tabancası çıkış çapı 2,6 mm için analiz sonuçları (a: ark bölgesindeki ısı akısı, b: sıcaklık dağılımı, c: hız dağılımı)	110
Şekil 5.36. 60 SLPM 112 A’de plazma tabancası çıkış çapı 3,6 mm için analiz sonuçları (a: ark bölgesindeki ısı akısı, b: sıcaklık dağılımı, c: hız dağılımı)	111
Şekil 5.37. 60 SLPM 112 A’de plazma tabancası çıkış çapı 5,00 mm için analiz sonuçları (a: ark bölgesindeki ısı akısı, b: sıcaklık dağılımı, c: hız dağılımı)	111
Şekil 5.38. Farklı tabanca çıkış çapları için çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklık ve hız değişimi	112
Şekil 5.39. 60 SLPM 112 A’de farklı tabanca çıkış çapları için x eksenini boyunca anot cidarı sıcaklığı dağılımı (a: 2,6 mm, b: 3,2 mm, c: 3,6 mm, d: 4,00 mm)	114
Şekil 5.40. 60 SLPM 112 A’de farklı tabanca çıkış çapları için y eksenini boyunca anot cidarının sıcaklık dağılımı (a: 2,6 mm, b: 3,2 mm, c: 3,6 mm, d: 4,00 mm)	116
Şekil 5.41. 60 SLPM 112 A’de farklı anot duvar uzunlukları için ark oluşum noktaları (a: 9 mm; b: 15 mm; c: 18 mm; d: 22 mm).....	118
Şekil 5.42. 60 SLPM 112 A’de plazma anot duvar uzunluğunun 9 mm’deki analiz sonuçları (a: ark bölgesindeki ısı akısı, b: sıcaklık dağılımı, c: hız dağılımı)	119
Şekil 5.43. 60 SLPM 112 A’de plazma anot duvar uzunluğunun 15 mm’deki analiz sonuçları (a: ark bölgesindeki ısı akısı, b: sıcaklık dağılımı, c: hız dağılımı)	120

Şekil	Sayfa
Şekil 5.44. 60 SLPM 112 A’de plazma anot duvar uzunluğunun 22 mm’deki analiz sonuçları (a: ark bölgesindeki ısı akısı, b: sıcaklık dağılımı, c: hız dağılımı)	120
Şekil 5.45. Farklı anot duvar uzunlukları için sıcaklık ve hız değişimi.....	121
Şekil 5.46. 60 SLPM 112 A’de farklı anot duvarı uzunlukları için x eksenı boyunca anot cidarının sıcaklık dağılımı (a: 9 mm, b: 15 mm, c: 18 mm, d: 22 mm)	122
Şekil 5.47. 60 SLPM 112 A’de farklı anot duvarı uzunlukları için y eksenı boyunca anot cidarının sıcaklık dağılımı (a: 9 mm, b: 15 mm, c: 18 mm, d: 22 mm)	124



SİMGELER VE KISALTMALAR

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

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

1. GİRİŞ

Plazma maddenin dördüncü hali olarak bilinir. Serbest halde gezinen elektronlardan ve iyonlardan oluşur. Plazma oluşumu, doğru akım (DC) arkı veya radyo frekansı (RF) deşarjı ile uygulanan aşırı ısıtma (örn., 8000 K'nin üstünde) veya lazerler tarafından üretilen yüksek enerjili fotonlar veya bir mikrodalga kaynağının yüksek elektromanyetik alanları vasıtasıyla gerçekleştirilir. Plazmayı DC elektrik arkı ile üreten plazma tabancaları (plazma torçları) DC plazma tabancası olarak adlandırılır [1]. Plazmalar genel olarak termal plazma ve termal olmayan plazma olarak sınıflandırılır. Termal plazmaları cazip hale getiren yüksek entalpi içeriği, yüksek sıcaklık değerleri (10 000-50 000 K), yüksek ısı akısı ($\sim 10^7$ - 10^9 W/m²), geniş aralıkta çalışma gücü (kW-MW) ve çeşitli çalışma gazları kombinasyonudur.

DC ark plazma tabanca teknolojisi genel olarak, plazma püskürtme, ultra ince parçacık sentezi, metal kaynağı ve kesme, ekstraktif metalurji, atık işleme ve biyogaz üretimi, metal ve seramik parçaların yakın şekillerini elde etmek gibi işlemlerde kullanılmaktadır [2]. Aynı zamanda bu teknoloji ile malzemelerin bazı yüzey özelliklerini artırmak için (örneğin, yüzeylerin aşınmaya, korozyona karşı korunması ve sıcaklığa karşı dayanıklı olması gibi) yüksek kaliteli yüzey kaplamaları yapılmaktadır. Bu kaplamalar, yanma odaları, türbin kanatları, makine parçaları, otomotiv endüstrisi ve süper alaşımların özel kaplamalarında yaygın şekilde kullanılmaktadır. Yüksek kaliteli bir kaplama elde etmek için toz parçacıkları düzgün şekilde ısıtılır ve daha sonra kaplanacak malzeme yüzeyine püskürtülür. Isının tutarlılığı ve tozun ivme kazanması esas olarak plazma jetinin durumuna bağlıdır ve bu da tabanca içindeki DC ark hareketi tarafından belirlenir. Tabanca içinde arkın hareketini ve arkın, plazma tabancasından çıkan plazma jetinin hızına ve sıcaklığına olan etkilerini anlamak büyük önem taşımaktadır [3]. Plazma tabancalarının önem kazandığı ve geliştirilmeye çalışılan alanlardan biri de kesme teknolojisidir. Günümüz hassas plazma sistemleri ise lazer kesme sistemlerinin çalıştığı 1-12 mm malzeme kalınlığı arasında ve lazer sistemlerine yakın hassasiyette kesme yapabilmek yönünde geliştirilmektedir [4]. Bu gelişmeler plazma tabancası içindeki plazma sıcaklığını, hızını ve tabanca çıkışındaki plazma jetinin sıcaklığını, hızını, istikrarını anlamaya ve ark dinamiğini kontrol etmekle doğru orantılıdır. DC plazma tabancası içindeki akış, sıcaklık ve elektromanyetik alanları incelemek son derece zordur [3].

Literatür incelendiğinde çalışmaların bir kısmında farklı tip plazma tabancası geometrileri kullanılarak incelemeler yapıldığı görülmektedir. Bu geometrilerde farklı akım ve debi parametreleri kullanılarak plazma sıcaklığı, hızı, elektrik potansiyeli, ark oluşum noktası belirlenmeye çalışılmıştır. Bir kısım çalışmalarda ise katot tipinin plazma akış alanı üzerine etkisini incelemek amacıyla katot geometrisi değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Başka bir çalışmada ise plazma gazının torca giriş şekli (eksene göre düz veya döndürülerek girmesi gibi) değiştirilerek analizler yapılmıştır. Literatürde yapılan bu çalışmalar literatür özeti başlığı altında detaylı olarak verilmiştir.

Bu tez çalışmasında, ark plazma tabancası içindeki fiziksel ve kimyasal değişimler, plazma tabancasından çıkan plazma jetinin özellikleri plazma teknolojisi üzerinde önemli etkilere yol açtığı için (örneğin, ultra ince metal toz parçacıkları üretme, kaliteli yüzey kaplama gibi) plazma tabancası içindeki plazmanın sıcaklığı, hızı, ark oluşum noktası, ark anot bağlantı noktası sıcaklığı, arkın dinamiği, tabanca çıkışında plazma sıcaklığı ve hızı, plazma voltajı, tabanca verimi, anot duvarı sıcaklığı gibi plazma akış alanı karakteristikleri hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) yardımı ile sayısal olarak incelenmeye çalışılmıştır. Çözümlemeler hem zamana bağlı hem zamandan bağımsız olarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Zamana bağlı yapılan çözümler ile zamandan bağımsız çözümler arasında dikkate değer bir fark olmadığı ortaya konmuştur. Çözümü hızlandırmak, zamandan tasarruf sağlamak ve çıktıların bilgisayar hafızasında fazla yer kaplamaması için çözümlemelere zamandan bağımsız olarak devam edilmiştir. Manyetik alan ile plazma akış alanı arasındaki etkileşimi araştırmak için manyetohidrodinamik denklemleri tanımlanmıştır. Bu incelemeler gerçekleştirilirken akım, hacimsel debi, tabanca çıkış çapı, anot duvarı uzunluğu gibi parametrelerin plazma akış alanı karakteristikleri üzerine etkilerinin anlaşılması amaçlanmıştır. Analizlerde “ANSYS FLUENT” yazılımı kullanılmıştır. Bu çalışma 215M895 kodlu TÜBİTAK projesi ile desteklenmektedir.

2. TEMEL BİLGİLER VE LİTERATÜR ÖZETİ

2.1. Temel Bilgiler

2.1.1. Plazma

Plazma maddenin dördüncü hali olarak bilinir: katı, sıvı, gaz ve plazma. Maddenin bir durumu olarak bu sınıflandırma, bilinen evrenin % 99'undan fazlasının plazma durumunda olması ile doğrulanır. Tipik bir örnek olarak iç sıcaklığı 10^7 K'ni aşan güneş verilebilir. Plazmanın enerji içeriği katı, sıvı ve gazlarınkine kıyasla çok yüksek olduğundan önemli uygulamalara katkıda bulunur [5].

Plazma durumunun diğer bir tanımı, elektronlar, iyonlar ve nötr parçacıkların bir karışımından oluşan gaz plazmaları ile sınırlandırılacaktır. İyonların ve nötronların kütleleri, elektron kütlelerinden (m_H , H atomunun kütlesi ve m_e , elektron kütlesi olduğu $m_H/m_e = 1840$) çok daha yüksek olduğu için, nötronlar ve iyonlar, ağır parçacıklar veya ağır bir plazma bileşenleridir. Bu ağır partiküllerin bir kısmı, plazmanın yüksek enerji içeriğinden dolayı uyarılmış durumda olabilir. Uyarılmış bir haldeki parçacıklar foton emisyonuyla sıradan veya başlangıç durumlarına geri dönebilir. Temel haldeki iyonlara ve nötron parçacıklarına ek olarak, plazma ayrıca uyarılan türler ve fotonlar içerir, yani genel olarak temel durumdaki elektronlar, iyonlar ve nötrlerden, uyarılmış türlerden ve fotonlardan oluşur. Bununla birlikte, böyle bir karışım, yalnızca negatif ve pozitif yüklerin birbirini dengelemesi, yani genel olarak bir plazmanın elektriksel olarak nötr olması şartıyla plazma niteliğindedir. Bu özellik, yarı tarafsızlık olarak bilinir. Bir gazın aksine, plazma, serbest yük taşıyıcılarının varlığı nedeniyle elektriksel olarak iletkenidir [5].

Aslında, plazmalar oda sıcaklığında metallerinkini aşan elektriksel iletkenliğe ulaşabilirler. Örneğin, 10^6 K'lik bir sıcaklığa kadar ısıtılan atmosferdeki hidrojen plazması, oda sıcaklığında bakır ile yaklaşık olarak aynı elektriksel iletkenliğe sahiptir [5]. Plazmada oluşan bir pertürbasyon plazmanın içerisinde elektromanyetik dalga hızıyla iletilir. Plazma elektriksel olarak nötr durumda bulunmasına karşın; elektriksel alan ve manyetik alanlarla etkileşimdedir. Günümüzde plazma teknolojileri birçok uygulama alanında kullanılmaktadır. Tıpta, ışıklandırmada, imalatla, televizyonlarda, enerji üretmekte ve daha birçok teknolojiye kullanılmaktadır [6].

2.1.2. Plazma gazları

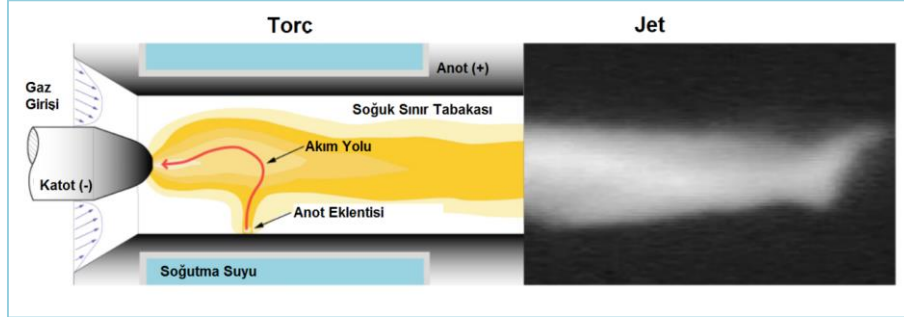
Plazma üretiminde en sık kullanılan gazlar argon, helyum, azot, hava ve hidrojenidir. Plazma gazının seçimi, gaz entalpisi, reaktivite ve maliyet üzerine kuruludur. Diyatamik olan azot ve hidrojenin enerji içeriği, argon veya helyumunkinden çok daha yüksektir. Bu, iyonlaşmadan önce azot ve hidrojen durumunda ayrışma reaksiyonundan kaynaklanmaktadır. Tamamen inert bir gaz atmosferi gerekiyorsa genellikle argon tercih edilir. Soy gaz, özellikle malzeme işleme operasyonları dile getirildiğinde son derece saf olmalıdır. Plazmaya indirgenme, oksitleme, klorlama veya nitrüleme etkileri vermek için hidrojen, oksijen (hava), klor ve azot gibi reaktif gazlar kullanılabilir [7].

Argon, birçok plazma ekipmanında kullanılan gazdır. Plazmanın ısı kaynağı ortamı olarak üretilmesi ve inert bir kalkan gaz tabakasının oluşturulması için kullanılır. Yay sütununu sürdürmek için düşük gerilime ihtiyaç duyar. Düşük ısı iletimi, sıkıştırılmış sütunun oluşturulmasına yardımcı olur ve dolayısıyla daha sıcak bir yay oluşturur. Argon, aynı zamanda koruyucu bir gaz olarak da kullanılırsa yay sütunu genişleyecek, daha az konsantre olacak ve yoğunlaşacaktır. Koruyucu gaz olarak argon kullanılmazsa, sıkı yay sütunları korunur, çünkü oksijen ve azot içeren çevre havası kolaylıkla iyonlaşamazlar. Hidrojen öncelikle indirgeyici ya da oksijen giderici ajan olarak kullanılır. Fiziksel özellikleri, onu ısı içeriğini ve ısı geçişini artırmak için mükemmel bir ortam haline getirir. Kaynak veya eritme uygulamalarında, hidrojen havuz akışkanlığının iyileştirilmesine ve nüfuz etmenin sürdürülmesine yardımcı olur. Ayrıca kalıntı oksijeni kaldırarak sistemin temizlenmesine yardımcı olur [7].

2.1.3. Plazma tabancaları

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. Geleneksel bir DC plazma tabancası, bir tungsten çubuk katot ve bir nozul şekli verilmiş, su soğutmalı bir bakır anottan oluşur (Bkz. Şekil 2.1). İki elektrot, plazma gazı girişi olan bir izolator ile ayrılır. Elektrot boşluğuna bir gaz girdiğinde ve elektrotlar arasında bir DC arkı oluştuğunda, ark, nozuldan itilir ve böylece yüksek sıcaklıkta hızlı bir alev elde edilir. Elektromanyetik

kuvvetler ve gaz dengelemesi ark sütununu daraltır ve plazmayı yaklaşık 20.000 °C dereceye ısıtır.



Şekil 2.1. Plazma tabancasının şematik gösterimi [2]

Torca ait gövde, katot ve anod için soğutma odalarından oluşur. Tabanca beslenmesi su, güç ve su soğutmalı kablolar ile gerçekleşir ve bunlar ana güç kaynağına ve su başlıklarına bağlanır. Arkın stabilizasyonu, elektrot geometrisi, plazma gazı, elektrot soğutması ve gaz akışı tipindeki farklılıklara dayalı olarak plazma tabancasının çeşitli varyasyonları vardır [7].

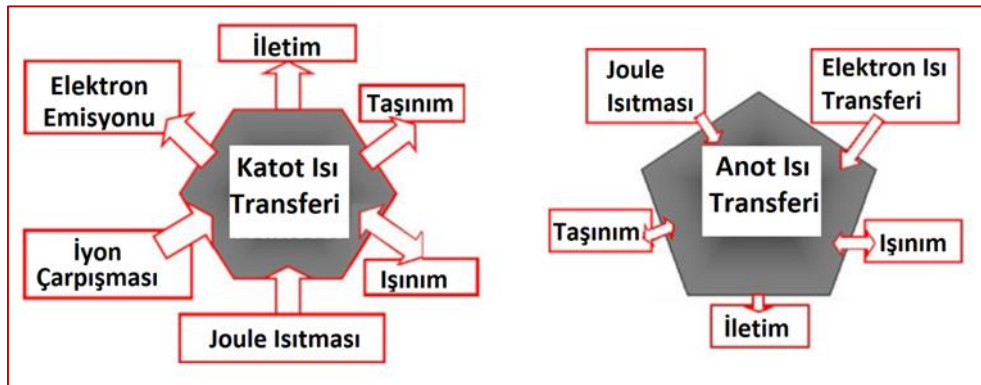
Katod, ark deşarjını korumak için elektron kaynağıdır. Isıyı arktan türetir ve elektronlar termiyonik olarak yayılır. Katotta arkın sona erdiği yer, katot malzemesine, soğumasına ve ark akımına bağlıdır. Katot refrakter bir metal olduğunda ve yeterince soğutulduğunda, ark kıvrımları ve katot akım yoğunlukları 100 A/mm² 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 [7].

Anottaki ısı, plazma tabancalarında oldukça büyüktür. Anot, plazma tabancasının nozulu olarak da adlandırılır. Nozuldaki ısı akışı 160 W/mm² kadar yüksek olabilir. Anot materyalinin seçimi genelde, mükemmel ısı iletkenliğine sahip olan yüksek saflıktaki bakırdır. Bunun yanında grafit ve refrakter metaller gibi diğer malzemeler de kullanılmıştır [7]. Plazma tabancasının bu kısmında, yani anotta, akış sırasında ark kökü oluşur ve bu nedenle anot malzemesi plazma tabancasının ömrünü belirleyen kısımdır. Anot, ark kökü

eklentisinin olduğu yerden aşınır [8]. Nozulun tamamında veya bir kısmında kullanılan malzeme ısıya dayanıklı olsa bile düşük ısı iletkenliğe sahip ise ömrünü azaltır.

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 [9].

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 (T_K) ve elektrik alanına (E_K) bağlı olarak termiyonik ve elektrik alan emisyonları yoluyla elektronları yayarak bir plazma tabancasına elektron kaynaklığı yapmaktır [9].



Şekil 2.2. Katot ve anotta meydana gelen ısı geçişlerinin şematik gösterimi [8]

Katottan olan iletim, konveksiyon, Joule ısıtması, radyasyon ve elektronik ısı geçişi, anot içinde ana ısı aktarım mekanizmalarıdır (Şekil 2.2). 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 katotun 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 [9].

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 [9]. 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 [9].

2.1.4. Termal ve termal olmayan plazmalar

Plazmalar, iyonların, elektronların ve nötronların, sıcaklıklarına göre, "termal" ya da "termal olmayan" olarak adlandırılır. Aynı sıcaklıkta elektron ve ağır parçacıkları bulunduran plazmalar termal plazma olarak adlandırılır yani parçacıklar birbirleriyle termal dengededirler. Termal plazmalar, Amerika ve Avrupa literatüründe "sıcak" plazmalar olarak isimlendirilirken, Rus literatüründe termonükleer füzyon plazmalarından ayırt etmek için "düşük sıcaklık" plazmaları olarak sınıflandırılır ve termal plazmalar yerel termodinamik dengeye (YTD) yakındırlar [2, 6].

Diğer taraftan termal olmayan plazmalar, düşük ortam sıcaklığında (bazen oda sıcaklığında) elektronlar fazla "sıcak" iken iyonlar ve nötronlar düşük sıcaklıklara sahiptir ($T_e \gg T_n$) [10]. Termal olmayan plazmalar (dengesiz plazmalar), ağır türlerin düşük sıcaklıklarından dolayı sıklıkla "soğuk" plazmalar olarak sınıflandırılır). Termal plazmalardan farklı olarak, dengesiz plazma sistemleri çoğu zaman $p < 10$ kPa basınçlarda çalıştırılır.

2.1.5. Termal plazmanın oluşumu

Plazma, bir gazdan elektrik akımı geçirerek üretilebilir. Oda sıcaklığında gazlar mükemmel yalıtkanlar olduğundan gazın elektriksel olarak iletken hale getirilmesi için yeterli miktarda yük taşıyıcı üretilmelidir. Bu işlem elektriksel bozunma olarak bilinir ve bu bozunmayı başarmanın birçok olası yolu vardır. Başlangıçta elektriksel olarak iletken olmayan gazın dağılması, bir çift elektrot arasında iletken bir yol oluşturur. İyonize gaz üzerinden bir elektrik akımının geçirilmesi, gaz boşaltımları olarak bilinen bir dizi olaya yol açar. Bu tür gazlı deşarjlar plazma üretmek için en yaygın yöntemdir, ancak tek değildir. Çeşitli uygulamalar için plazmalar elektrot olmaksızın RF deşarjları, şok dalgaları, mikrodalgalar ve lazer veya yüksek enerjili parçacık ışınlarıyla üretilebilir. Son olarak, plazma gazların (buharların) yüksek sıcaklık fırınında ısıtılmasıyla da elde edilebilir. Doğal sıcaklık sınırlamaları nedeniyle, bu yöntem düşük iyonizasyon potansiyeli olan metal buharı ile sınırlandırılmıştır. Termal plazmalar üretmek için en yaygın kullanılan elektriksel yöntemler, yüksek yoğunluklu arklar veya indüktif olarak bağlanmış yüksek basınçlı deşarjlar kullanır [5].

2.1.6. Plazma ark dinamiği

Ark, elektrotların yakınında birkaç voltluk bir gerilim düşüşü ile kendi kendini sürdüren bir deşarjdır. Ark dinamiği, gelen gaz akışının yay üzerinde etkileşiminin neden olduğu sürüklenme kuvveti ile yayın yerel eğriliğinden kaynaklanan elektromanyetik (veya Lorentz) kuvvetler arasındaki dengenin bir sonucudur [11]. Yayın uzunluğu voltaj dalgalanmalarının büyüklüğünün değişimi ile orantılıdır. Bu voltaj dalgalanmalarına göre tabancanın üç farklı çalışma modu belirlenmiştir. Bunlar, azalan akıma veya artan akış oranına göre sıralanır [9, 10]:

1. Kararlı mod (steady mode), anota bağlantının hemen hemen sabit bir konumu ve buna bağlı olarak ihmal edilebilir voltaj dalgalanmaları ile karakterizedir; Bu mod, anodun hızla erimesine neden olduğu için arzu edilmez.

2. Periyodik mod (takeover mode), arkın ve voltaj dalgalanmalarının periyodik veya yarı-periyodik hareketiyle karakterizedir; Bu işletim modu şu an plazma püskürtme tabancalarının çalışması için en çok istenen şeydir, çünkü anot üzerinde ısı yükünün yeterli bir dağılımına izin verir ve arkın dalgalanmalarını iyi tanımlayarak jetin hareketini daha tahmin edilebilir kılar.

3. Kararsız mod (restrike mode), son derece kararsız tahmin edilemeyen karmaşık ark tipi ve voltaj dalgalanmaları görülür. Bu mod, püskürtme işleminin tekrarlanabilirliğini sınırlayarak, püskürtmeyi kuvvetle zorlar, soğuk akışın sürüklenmesini ve türbülans gelişimini artırır [13].

Bu modlar, çalışma parametreleriyle (akım yoğunluğu, plazma gazının yapısı ve akış hızı gibi) ilişkilendirilen anot duvarında geliştirilen soğuk gaz sınır tabakasının kalınlığına bağlıdır [14].

2.1.7. Plazma ark voltajı ve verimi

Genellikle plazma, aktarımlı veya aktarımsız (arkın iş parçasına aktarıldığı veya arkın iş parçasına aktarılmadığı) tabancalarda katot ve anot arasında bir elektrik arkının oluşturulması için iletken bir yol oluşturan yüksek gerilim darbesi ile başlatılır [2]. Ark kendini, elektrotların yakınında birkaç voltluk bir gerilim düşüşü ile sürdürür.

Arkın doğal eğilimi katot ve anot arasındaki en kısa yoldan geçerek kısa bir ark ve düşük tabanca gerilimi oluşturur. Bununla birlikte, çalışma akışkanı (bu durumda argon), katodun yakınına sokulur ve normal çalışma koşulları altında daha uzun bir yay ve daha yüksek gerilimin ortaya çıkması için ark uzanan kanaldan akmaya zorlanır [15].

Toplam ark voltajı (V_{arc}), katot düşme bölgesi (V_c), ön nozul bölgesi (V_{cn}), nozul bölgesi, nozul sonrası bölge (V_{an}) ve anot düşme bölgesi (V_n) gibi farklı bölgelerdeki tek tek gerilim düşüşlerinin toplamıdır. Katot ve anot düşme voltajları toplam ark voltajının sadece küçük bir bölümünü oluşturur. Tungsten katot ile katot düşme bölgesinde ve bakır anot düşme

bölgesinde 5-8 V arasında voltaj düşüşü görülür. Ön nozul ve çıkış kesitindeki elektrik alanları neredeyse sabittir. Plazma ark voltajı, nozul boyutlarına (çap, uzunluk, katot mesafesi, vb.), ark akımına, gaz bileşimine ve akış oranına ve nozulun çalışma parçasına olan mesafesine bağlıdır [7].

Eş. 2.1 plazma tabancasının termal veriminin hesabını göstermektedir [16]. $P_{\text{çıkış}}$ (W), plazma jetine iletilen toplam termal güçtür. I (A), katottan tanımlanan akım ve V_{ark} (V), ark voltajıdır.

$$\eta = \frac{P_{\text{çıkış}}}{V_{\text{ark}} I} \quad (2.1)$$

2.1.8. DC plazma tabancası güç kaynağı

Yüksek gerilim sistemlerinde de doğru akım elektrik enerjisine ihtiyaç duyulur, kesici ve ayırıcıların kumandasında, koruma rölelerinin beslemesinde, plazma tabancalarında vb. doğru akım güç kaynaklarına ihtiyaç vardır. Alternatif akımı doğru akıma çevirmek doğrultucu devre elemanları olan transformatör, diyot ve tristörler ile yapılır. Doğrultucu devrelerin en önemli elemanı transformatördür. Transformatörler alternatif gerilimin veya akımın değerini değiştirmek için kullanılır. Diyotlar, yalnızca bir yönde akım geçiren devre elemanıdır. Tristörler üzerinden sadece bir yönde akım geçmesini sağlayan yarı iletken bir devre elemanıdır. Transformatör ile istenilen gerilim değerine ayarlanan alternatif akım elektrik enerjisi doğrultucu devreler ile doğru akım elektrik enerjisine çevrilir. Bu doğrultucu devreleri faz sayısına göre bir fazlı, üç fazlı ve çok fazlı olarak yapmak mümkündür. Yarım dalga ve tam dalga olmak üzere iki çeşit temel doğrultucu devre vardır. Doğrultucudan alınan doğru gerilimin düzgün olması için filtre devreleri kullanılır. Filtre devresinden sonra daha düzgün doğru gerilim elde edilmesine rağmen yine de bir pilden alınan doğru gerilim elde edilemez. Bütün güç kaynaklarında istenilen en önemli özellik çıkış geriliminin sabit kalmasıdır. Elektronik DA güç kaynaklarında şebeke geriliminin değişmesi veya yük akımının değişmesi sonucu çıkış gerilimi de değişir. Güç kaynağının çıkış uçlarında gerilimin sürekli sabit kalması için gerilim regüle devreleri kullanılır [17].

2.2. Literatür Özeti

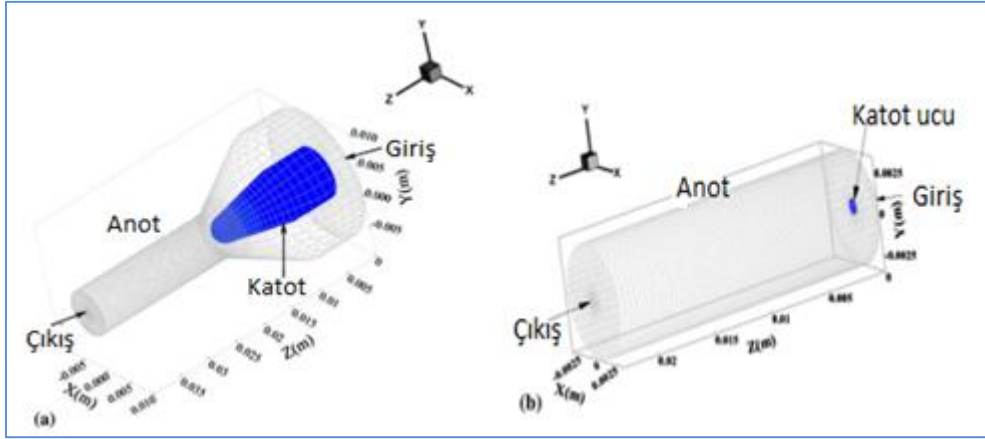
Literatür incelendiğinde aktarımsız (arkın iş parçasına aktarılmadığı) DC ark plazma tabancası için hem deneysel ve sayısal çalışmalar yapıldığı görülmektedir. Deneysel çalışmalar elektromanyetik alanlar ile plazma akışı ve sıcaklık alanları ile plazma tabancasının küçük boyutları ile birleşen karışık çevre arasındaki karışık etkileşimler nedeniyle akış alanın ölçümleri, sıcaklık dağılımı ve plazma tabancasındaki ark-kök konumunu belirlemek oldukça zorluk teşkil ettiği görülmüştür. Bu nedenler deneysel çalışmaların kısıtlı olmasına yol açmıştır. Bilgisayar donanımının ve yazılımının hızla gelişmesi ile, yüksek hızlı bilgisayarlarla sayısal modelleme, plazma tabancası içindeki plazma akışını ve ısı transfer özelliklerini araştırmak için ekonomik ve etkili bir yöntem haline gelmiştir [18]. Sayısal modellemeler 2B olarak başlamış ve iyileştirmeler yapılarak 3B olarak devam ettirilmiştir. Literatürde yapılan bazı çalışmalar aşağıda verilmiştir.

Paik ve diğerleri iki-boyutlu bir modele dayanan, verilen ark akımı ve çalışma gaz debisi değerleri için Steenbeck'in minimum ilkesini kullanarak anotun iç yüzeyinde ark kökünün konumunu belirlemişlerdir. Onların sonuçları; ark akımı arttırıldığında, anot ark oluşum konumu, daha güçlü manyetik gövde kuvvetinin eylemi nedeniyle nozul girişine doğru kayacağını, daha güçlü gaz dinamik sürüklenme kuvvetinin eylemi nedeniyle artan çalışma akışkan akış hızı ile anot ark bağlantısının nozul çıkışına doğru itileceğini göstermektedir [19].

R. Westhoff vd. aktarımsız bir ark plazma tabancası içinde ortaya çıkan elektromanyetik, ısı akışı ve akışkan akış olaylarını tanımlamak için 2B matematiksel model sunmuşlardır. Modelin geliştirilmesinde, kütle, momentum, termal enerji ve akımın sürekliliğinin korunması dikkate alınmıştır. Modelin önemli, yeni bir özelliği hem tabanca içindeki ısı üretiminin hem elektromanyetik kuvvetlerin tahmin edebilmesidir, böylece ark davranışını tahmin etmede bir temel oluşturmuştur. Saf bir argon sistemi (örn. argon ortamına boşaltılmış bir argon plazması), laminar bir modda çalışırken hesaplamalar sunulmaktadır. Çalışmanın önemli bir bulgusu şudur: Elektromanyetik kuvvetler hız profillerini belirgin bir şekilde değiştirebilir ve tabancadan çıkan plazma gazının girdapını önemli ölçüde etkileyebilir. İlaveten, girdapın arkın davranışında önemli bir etkisi olduğu ve dolayısıyla ortaya çıkan gazın etkilendiğini göstermişlerdir. Teorik tahminler deneysel ölçümlerle oldukça iyi uyum içindedir [15].

Trelles vd. plazma tabancasını üç boyutlu, zamana bağlı, denge modelinde yani yerel termodinamik denge (YTD) kullanarak simüle etmişlerdir. Gaz akışını ve elektromanyetik denklemleri sayısal olarak sonlu elemanlar yöntemiyle tam olarak birleştirilmiş yaklaşımla çözmüşlerdir. Farklı çalışma koşullarında argon ve argon-hidrojen ile çalışan tabanca simülasyonları sunmuşlardır. Model, denge varsayımı nedeniyle ihtiyaç duyulan, elektrotların yakınında yapay olarak yüksek bir elektrik iletkenliği kullanılması haricinde, yeniden bağlanma işlemi üzerinde başka bir varsayım yapılmaksızın, tabanca hareketinin kalıcı (steady mode) ve devir (takeover mode) modlarında olacağını ön görmüşlerdir. Elde edilen sonuçlar, bu işletim türlerinde yeniden birleştirme işleminin, kırılmaya benzer bir işlem yerine ark hareketi tarafından yönlendirilebileceğini göstermektedir. Ayrıca, bu modlarda çalışan ve düz gaz enjeksiyonu kullanan bir tabanca arkının orjinal bağlantısının zıt tarafına yeniden takılma eğilimi göstereceğini ifade etmişlerdir. Bunun manyetik kuvvetler ve gaz sürüklenme kuvvetleri arasındaki dengesizlik nedeniyle ark üzerinde net bir açısal momentum tarafından sebep olunacağını görmüşlerdir. Elde edilen sonuçlardan, ark dinamiklerini daha iyi tanımlamak için (elektrotların yakınında yapay olarak yüksek bir elektrik iletkenliğinin kullanılmasını önlemek) dengesiz bir modelin gerekli olduğu ve elektrotlar ile soğuk duvar etkileşiminin daha iyi tanımlanması gerektiğini görmüşlerdir. Çıkışta ve anotta daha iyi sınır koşullarının oluşturulmasıyla (yani jetin bir bölümünü içerir) ark dinamiklerinden daha iyi sonuçlar bekleneceğini ön görmüşlerdir [13].

B. Selvan vd. 2009 yılında yaptıkları çalışmada aktarımsız plazma tabancası içinde bir arkın özelliklerini incelemek için çeşitli sayısal modeller geliştirmişlerdir. Kullandıkları geometrinin birisinde, katot ve anot nozulunun (tip I) tam geometrisini ele almışlar, diğer geometriyi ise sadece anot nozulu ve katot ucu (tip II) olarak düşünmüşlerdir.



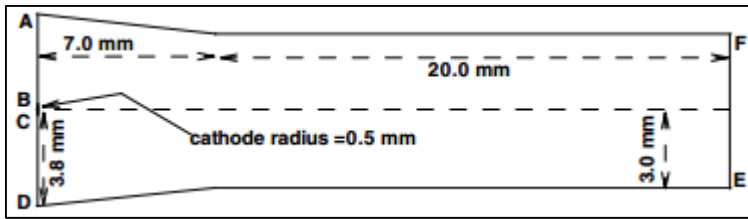
Şekil 2.3. (a) Tip I geometri, (b) Tip II geometri

Çalışmalarında, tip I ve tip II geometrilerinde Ar-N₂ gaz karışımını kullanarak üç boyutlu bir model geliştirmişlerdir. Verilen gaz akış oranına ve akımına karşılık gelen tabanca gücü için ark uzunluğu ve ark çekirdeği yarıçapının çeşitli kombinasyonlarını ortaya koymuşlardır. Tüm koşullar aynı kalarak minimum entropi üretiminin çeşitli kombinasyonlarını, tip II geometrisinde uygulamamışlardır. İki geometride elde edilen sonuçları karşılaştırdıklarında da hızlar arasındaki fark sıcaklıklar arasındaki farktan daha büyük olduğunu görmüşlerdir. Her iki geometride de tahmin edilen tabanca verimliliği ve ark voltajları ölçümlerini deneysel verilerle kıyaslamışlardır.

B. Selvan vd. plazma sprej tekniğindeki zorlu sorunlardan biri kaplama kalitesinin tekrarlanabilirliği olduğunu görmüşler ve 2009 yılında yaptıkları diğer bir çalışmada bunu ele almışlardır. Çalışmalarında, tabanca içindeki ark davranışını ve ark dalgalanmalarının plazma jetinin sıcaklığı ve hızı üzerindeki etkisini incelemek için 3B sayısal modeller geliştirmişlerdir. Plazma arkını, farklı çalışma parametreleri için simüle etmişlerdir. Elde edilen tabanca kuvveti için minimum entropi üretiminin termodinamik prensibi kullanılarak farklı ark boyutları öngörmüşlerdir. 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. Tabanca çıkışında, plazma hızının sıcaklığa göre daha güçlü üç boyutlu etkiye sahip olduğunu yani ark oluşumuna karşı daha kararlı profile sahip olduğunu gözlemlemişlerdir. Plazma jetlerini, plazma ark modelinden elde edilen farklı nozul çıkış profilleri kullanılarak simüle etmişler ve sıcaklık ve hız dağılımlarını ortaya koymuşlardır. Entropi üretimi, ark akımında azalma

ve gaz akış hızında artış ile azaldığını tesbit etmişlerdir ve ark boyunun artan ark akımı ve gaz akış hızında azalma ile arttığını görmüşlerdir [16].

K. Ramachandran vd. atmosferik plazma püskürtmesi için kullanılan F4 tabancasının (Bkz. Şekil 2.4) içindeki plazma arkını, analitik ve sayısal yöntemlerle karakterize etmişlerdir. Plazma arkının fiziksel davranışını anlamak için basitleştirilmiş bir analitik model oluşturulmuştur. Tabanca içindeki gerçekçi plazma ark akışını taklit etmek için üç boyutlu bir sayısal model geliştirilmiştir. Belli bir tabanca gücünde ve gaz akış hızında, ark çekirdeği yarıçapı ve yay uzunluğu olası kombinasyonlarını tahmin etmişlerdir. Minimum entropi üretiminin termodinamik ilkesi, arkın çekirdek yarıçapı ve arkın uzunluğu kombinasyonunu belirlemek için kullanılır ki bu da tabanca içindeki arkın fiziksel durumuna karşılık gelir. Akımı ve gaz akış hızının, plazma ark özellikleri üzerine etkisi açıklığa kavuşturulmuştur. Plazma gazındaki hidrojen içeriğinin nozul çıkışındaki hız ve sıcaklık profillerine etkisi gösterilmektedir. Öngörülen tabanca verimliliği, ölçülen değerlerle karşılaştırılmıştır. Sayısal modelin sonuçları, analitik bir modele benzer olduğu görülmüştür. Ark akımının artırılmasıyla, ark merkezinin yarıçapını arttığını ve ark uzunluğunun ise azaldığını gözlemlemişlerdir. Gaz akış debisi düşürüldüğü zaman ark merkezinin yarıçapının azaldığı ve yay uzunluğunun arttığı görülmüştür. Plazma gazına hidrojenin eklenmesi, nozul çıkışında sıcaklık ve özellikle hız üzerinde daha belirgin artışlara yol açar. Deneysel ve sayısal sonuçlar mevcut sonucun bir bölümünü desteklemektedir [20].

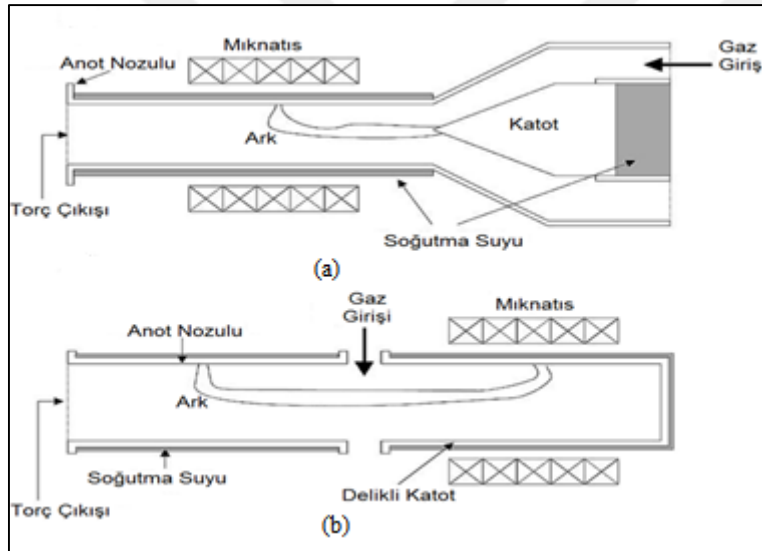


Şekil 2.4. Plazma püskürten F4 plazma tabancasının gösterimi

J. Park vd. 2008 yılında yaptıkları bir çalışmada doğru akım elektrik arklarındaki ark-anot bağlantısını analiz etmek için sayısal bir model geliştirmişlerdir. Geliştirilen modelde, plazma akışı ile elektromanyetik alanı birlikte incelemişlerdir. Çalışmalarında elektronların ve ağır türlerin (iyonlar ve nötronlar) farklı sıcaklıklara sahip olduğu kabul edilmiştir. Kimyasal dengesizliğin giderilmesi için tür sürekliliği göz önünde bulundurulmuş. Elektrik ve manyetik alan denklemleri, yeni geliştirilen Ohm kanunuyla belirlenerek ve bu da geleneksel genelleştirilmiş Ohm kanununa göre geliştirilmiştir. Yönetim denklemleri iki

boyutlu bir alanda Sonlu Hacim Metodu (SHM) ve Gauss-Seidel metodu kullanılarak ayrık hale getirilerek çözülmüştür. Model, iki boyutlu bir aksel simetrik yüksek yoğunluklu argon arkına uygulanmıştır. Sonuçlar, deneysel ve diğer sayısal verilerle karşılaştırıldığında olumlu olduğunu gözlemlemişlerdir. Anot çevresinde termal ve kimyasal dengesizlik etkileri nedeniyle belirgin bir elektrik potansiyel düşüşü gözlemlemişlerdir [21].

J. Park vd. 2004 yılında yaptıkları çalışmada harici bir manyetik alan tarafından yönlendirilen ark kök rotasyonunu ve bunun çubuk tipi katot (ÇTK) ve iyi-tip katot (İTK) ile aktarımsız plazma tabancalarının termal plazma özelliklerine etkilerini araştırmak için üç boyutlu (3B) zamana bağlı sayısal model geliştirildiler. ÇTK ve İTK tabancaları Şekil 2.5’de gösterildiği gibidir.



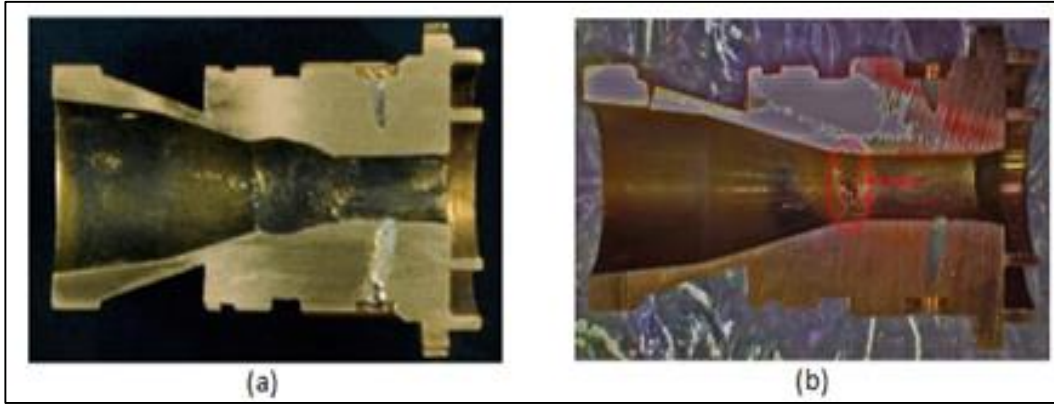
Şekil 2.5. Aktarımsız plazma tabancasının iki farklı tipi: (a) ÇTK ve (b) İTK [22]

Elektrik akım yoğunluğunun 3B dağılımları, genelleştirilmiş Ohm yasası ile birlikte bir akım süreklilik denkleminde elde edilirken, ark tarafından uyarılan manyetik alanlar manyetik bir vektör potansiyel denklemi ile hesaplanmıştır. Ark ile plazma akışı arasındaki birleşmiş etkileşimler, türbülans modeli ile birlikte zamana bağlı manyetohidrodinamik (MHD) denklemleri çerçevesinde tanımlanmıştır. Sayısal simülasyonlar, sırasıyla ÇTK tabancası için anod ark kökünün manyetik olarak tahrik edilen dönme hızlarını ve İTK tabancası için katot ark kökünü bulmaya odaklanmıştır. Manyetik alanın harici uygulanmasıyla, tipik tabanca operasyonunda elektrot erozyonunu azaltmak için ark kökünü hızla döndürmek için pratik bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. 3 boyutlu simülasyonlarla, harici manyetik

malzeme ve yüzeyinde akım yoğunluğu dağılımının değiştiğini görmüşlerdir. Aynı şekilde, anodik akılarla olduğu gibi anot maddesinin plazmanın kolonuna kaynaşmasından kaynaklanan metal buharının etkisini araştırmışlardır. Buharın varlığı öncelikle kenarlardaki plazmayı soğutmaya eğilimli olduğunu tesbit etmişlerdir. Mevcut yoğunluklarla ilgili olarak, metal buharının varlığı ile birlikte, ark merkezindeki bu yoğunluklarda bir artış ve kenarlara doğru bir azalma olduğunu fark etmişlerdir. Anodik akış seviyesinde, buharların varlığı toplam akıları azalttığını görmüşlerdir. Ayrıca, buharın varlığını elektrik terimlerini ve dolayısıyla anot seviyesindeki akım yoğunluklarını arttırdığını da not etmişlerdir. Son olarak, akım geçişinin anodik akışlar üzerindeki etkisini incelemişler ve incelenen olaylara göre, anot yüzeyindeki akıları etkilemediğini, sadece radyal akım yoğunluklarını etkilediğini kaydetmişlerdir [23].

R. Huang vd. 2011 yılında yaptıkları çalışmada ark plazması ile ilgili simülasyon modellerinin çoğunun, yerel termal denge (YTD) hipotezine dayandığını ve dengede olmayan modellerin, elektron sıcaklığının hesaplanması nedeniyle çok karmaşık olduğunu bildikleri için çalışmalarında geliştirilmiş bir YTD modeli kullanmışlardır ve aktarımlı (arkın iş parçasına aktarıldığı) DC ark plazma tabancası için 3B modelleme yapmışlardır. Geliştirilmiş YTD modelinde, plazma gaz sıcaklığından türetilen ve elektrik alan şiddeti ile ayarlanan ve plazma gazının elektriksel iletkenliğini değiştirmek için nominal bir elektron sıcaklığı önermişlerdir. Plazma tabancası içindeki gaz sıcaklığı ve hız dağılımı üzerine sayısal hesaplamalar yapmışlar ve plazma gazı olarak argon kullanmışlardır. Elektrik akım yoğunluğu ve potansiyeli üzerinde de durmuşlardır. Sonuçlar, arkın sıcaklık ve hız dağılımlarının neredeyse eksenel simetrik olduğunu göstermektedir.

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 erozyonunun olduğu bölgeyi 30 saat boyunca plazma tabancasının çalışmasıyla elde etmişlerdir ve Şekil 2.7’de gösterilmektedir.



Şekil 2.7. (a) Uzun süreçte plazma tabancasının anot aşınması (b) Kısa süreçte plazma tabancasının anot aşınması

Anot erozyonu her zaman köşeye yakın bir yerde cereyan ettiğini görmüşlerdir. Tabanca içersindeki maksimum hız 1740 m/s'ye yakın olduğunu gözlemlemişlerdir [24].

R. Huang vd. 2012 yılında yaptıkları çalışmada için DC aktarımsız plazma tabancası anot ark kökü bağlantısını analiz etmek için üç boyutlu (3B) kararsız bir modelleme kullanmışlardır. Plazma tabancasının gaz sıcaklığı ve hız dağılımı üzerine sayısal hesaplamalar yapılmış, plazma gazı olarak argon kullanılmışlar. Anodun soğuk sınırının yakınında daha düşük elektrik iletkenliği amacıyla, 0,1 mm'lik mesafe için, 10^4 S/m'lik yüksek bir elektrik iletkenliğini düşünmüşlerdir; böylece katot anot yüzeyine yeterince yakın olduğunda yeni bir ark-kökü oluşturulabilir. Argon gazı, 500 A elektrik akımı ve 50 SLM gaz akış hızı mevcut püskürtme koşulları altında 30 000 K'den yüksek maksimum hız ve 1000 m/s'den yüksek hız elde edilebileceği sonuca varmışlardır [25].

He-Ping Li vd. yaptıkları çalışmada aktarımsız DC ark plazma tabancası içinde plazma akışını üç boyutlu ve yarı kararlı bir şekilde modellemişlerdir. Anot yüzeyinde anot ark kökünün eksenel konumunu belirlemek için Steenbeck'in minimum ilkesini kullanmışlardır. Bu ilke, belirli bir ark akımı, çalışma gaz akış hızı ve tabanca konfigürasyonu için minimum bir ark voltajı oluşmasını öngörür. Analiz sonuçları, DC aktarımsız ark plazma tabancası sıcaklığının ve akış alanlarının önemli üç boyutlu özellikleri olduğunu göstermektedir. Steenbeck'in minimum ilkesinin kullanılması ile tahmin edilen anot ark-kökü bağlantı konumu ve ark şekli, deneysel sonuçlarla tutarlı olduğunu görmüşlerdir. Bu makalede, ısı verim ve tabanca gücünü de hesaplamışlardır. Sonuçlar, tabanca ısı verimliliğinin her zaman % 30 ile % 45 arasında değiştiğini, yani toplam güç girişinin yarısından fazlasının katot ve

anot soğutma suyu tarafından alındığını tespit etmişlerdir. Steenbeck'in minimum prensibi uygulanarak anot ark-kök bağlantı konumunu belirlemek için, ilk önce verilen ark akımı ve çalışma gaz akış hızı için farklı anot ark-kök pozisyonları belirtmişlerdir. $I = 400 \text{ A}$ ve $Q = 2.0 \text{ STP m}^3.\text{h}^{-1}$ durumunda 2,3 mm, 3,3 mm, 4,5 mm, 5,9 mm, 7,5 mm ve 9,5 mm'lik anot ark kök pozisyonlarını tespit etmişlerdir. Hesaplamalarında Steenbeck'in asgari ilkesi tarafından belirlenen yay uzunluğu, $L_{\text{Arc}} = 5.9 \text{ mm}$ 'dir ve $V_{\text{Arc}} = 35.2 \text{ V}$ 'luk bir minimum ark voltajına karşılık geldiğini görmüşlerdir. Anot ark bağlantı nokta bölgesinde, lokal akım yoğunlukları yüksek Joule ısınmasına bağlı olarak daha yüksek sıcaklıklara yol açtığını görmüşlerdir. Tabanca çıkışındaki ortalama sıcaklık ve eksenel hızların maksimum değerlerini sırasıyla 12 650 K ve 426 m.s^{-1} olarak bulmuşlardır. Farklı θ -açıları için sıcaklık ve eksenel hız bileşeninin maksimum değerleri, tabancasın çıkışında merkez çizgide yer almamasına rağmen, ortalama değerlerin dağılımları neredeyse simetrik olduğunu göstermişlerdir. Anot ark kök bağlantısının, daha güçlü gaz-dinamik sürüklenme kuvvetinden ötürü artan çalışma akışkanı akış oranı ile tabancanın çıkışına itildiği ve ark akımının artması için anot ark-kök bağlantısının, daha güçlü manyetik kaynaktan dolayı tabanca girişine doğru aktığı sonucuna varmışlardır [18].

Guo vd. argon-hidrojen ile çalışan bir DC aktarımsız ark plazma tabancasını üç boyutlu bir model kullanarak yapmışlardır. Yapay olarak yüksek bir elektriksel iletkenlik tabakası, anot duvarının yakınındaki düşük sıcaklık bölgesinde geçiş sağlamak için kullanmışlardır. Mevcut yoğunluk dağılımını tanımlamak için iki denklem kullanarak yeni bir yol geliştirmişler. Ayrıca, anot duvarı boyunca asgari toplam ısı aktarım hızının en düşük enerji kaybı kriteri olarak kabul ederek, ark-kök bağlantısının yerini belirlemek için yeni bir yöntem önermişlerdir. Bu kritere dayanarak, gerçek ark çekirdek yarıçapı ve uzunluğu tahmin etmişlerdir. Ayrıca ark akımı ve kütleli debinin plazma ark özellikleri üzerine etkilerini de araştırmışlardır. Elde edilen sonuçlar, asgari toplam ısı aktarım hızı prensibi ile öngörülen ark kök bağlantı yerinin önceki çalışma ve deney verileri ile iyi uyum içinde olduğunu göstermişlerdir. Buna ek olarak, artan akım veya azalan debi ile ark uzunluğunun azaltılabileceğini bulmuşlardır. Ayrıca, daha yüksek akım ve akış hızı, plazma tabancası içinde daha yüksek sıcaklığa ve hıza yol açacağını tespit etmişlerdir. Çekirdeğin yarıçapı arttıkça hem ark uzunluğu hem de tabanca kuvvetinin azaldığını görmüşlerdir. Ark çekirdek yarıçapının kademeli olarak arttıkça anot duvarı boyunca toplam ısı aktarım hızının dalgalı olduğunu gözlemlemişlerdir. Asgari ısı transfer hızı prensibine dayanarak, 400 A ve 500 A akım için gerçek ark çekirdek yarıçapının sırasıyla 0.0016 m ve 0.0019 m civarında

olduğunu bulmuşlardır. Aynı zamanda, 400 A ve 500 A'e karşılık gelen ark uzunlukları sırasıyla 0.0083 m ve 0.0061 m civarında olduğunu tespit etmişler. Ark uzunluğunu, ark çekirdeği yarıçapının bir fonksiyonu olarak göstermişlerdir. Akım ve kütleli debi göz önüne alındığında, ark uzunluğu ark çekirdeği yarıçapı arttıkça azaldığını göstermişlerdir [26]. Ayrıca, anot aşınmasının tabancanın nozul bölgesinin giriş kısmında olduğunu belirlemişler ve deneysel çalışmalarda anot aşınmasının aynı bölgede olduğuna işaret eder [26]. 400 A akımda tahmin edilen ark kökü konumu, girişten 0.0083 m tabanca çıkışına doğrudur.

Ark voltajı, kütleli debi arttıkça yükseliyor. Bu fenomeni, daha fazla gaz hacmi iyonlaştırmak için ark voltajıyla temsil edilen daha fazla enerjiye ihtiyaç duyulması olarak açıklamışlardır. Aksine olarak akım yükselirken, voltajın azalma eğilimi gösterdiğini tespit etmişlerdir. Dahası, daha büyük voltajın ark kökünü tabanca çıkışına doğru kaydırmasına neden olabileceğini tesbit etmişlerdir. [26].

Kütleli debi ve akımın, tabanca çıkışındaki sıcaklık ve hız profilleri üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Sıcaklığın ve hızın, aynı akım altında argonun kütleli debisini arttırarak kabaca bir artış eğilimi gösterdiği ancak aynı kütleli debide akımdan çok az etkilendiğini görmüşlerdir. Bu gerçeğin nedeni şöyle açıklamışlardır: Aynı akım altında, 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 korunabilecek. Aynı kütleli debi için, akım arttıkça çekirdek yarıçapı 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 nedenle, arttırılan akımın, arttırılan debiye göre tabanca çıkışında sıcaklık ve hız üzerinde daha az etki gösterdiğini tespit etmişlerdir [26].

J J Gonzalez vd. çalışmalarında üç boyutlu olarak bir model geliştirmişler ve sonuçlarını birkaç varsayım gerektiren klasik olarak kullanılan iki boyutlu yaklaşımlarla karşılaştırarak iki boyutlu modelin sınırlamalarını belirlemeye çalışmışlardır. Bu çalışmalarında, iki konfigürasyon sunmuşlardır: aktarılan bir ark ve bir plazma tabancası ve iki ana nokta incelenmiştir: gaz döndürülerek torca verilmiş ve ark bağlantısı. Sonuçlarda, eksen üzerinde sıcaklık tahmininde iki boyutlu modelin geçerliliğini ve aynı zamanda hızlar ve plazma

kenarlarındaki sıcaklık belirlemeleri için iki boyutlu yaklaşımın sınırlamasını göstermişlerdir. Çalışmaları ilk olarak nokta gaz enjeksiyonu ile ilgiliydi. Davranış farklılıkları enjeksiyon türünün ardından oluşabileceğinden: püskürtme gibi uygulamalar için birincil gaz enjeksiyonu veya ikincil gaz enjeksiyonu, iki konfigürasyon sunmuşlardır. İki boyutlu ekseninde sıcaklık tahminlerinin, üç boyutlu model ile uyumlu olduğunu görmüşlerdir. İkinci durumda ana gaz sekiz delik boyunca bir girdapta enjekte etmişlerdir. Katot ucu yakınında küçük farklar oluştuğunu ve tıkanma etkisi nedeniyle, girdabın tamamen üretilmediğini görmüşlerdir. Bu durumda, plazmanın sütundaki davranışı temsil etmek için iki boyutlu yaklaşım yeterli olduğunu tespit etmişlerdir. İkinci bölümde, literatürde klasik olarak kullanılan yanal elektrotların yanal ark kökü bağlantısına kıyasla doğruluğunu araştırmışlardır [23].

J. M. Bauchire vd. DC plazma tabancası sıcaklığı ve hız profillerini tanımlayan matematiksel 2B model geliştirmişlerdir. Patankar'dan sonra basit yöntem kullanılarak korunum denklemlerinin çözümlenmesine dayanmaktadır. Çalışmalarının ilk bölümünde, Prandtl'in karıştırma uzunluğu modeli ile standart $k-\epsilon$ modelini kullanarak türbülansın etkilerini açıklamışlardır. Ayrıca, kütleli debi, akım yoğunluğu ve gazın türü (argon veya hava) gibi fiziksel parametrelerin plazmanın karakteristiği üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Bu çalışmanın ikinci kısmı, modelin literatürde karşılaşılan deneysel sonuçlarla karşılaştırmasını sunmaktadır. Hava ve argon ile laminar bir akış içindeki sıcaklık alanlarını göstermişlerdir. Sınır koşulları iki gaz için aynıdır, giriş kütle akış hızı $D_0 = 0.5$ g/s ve tabanca gücü 1.9 kW'dır. Argon gazı kullanıldığında plazma sıcaklığının daha yüksek olduğu kaydetmişlerdir. Modellerinde sınır şartı olarak 250 A akım, kütleli debisi $D_0 = 0.29$ g/s (0.59 scmh) için yaptıkları analizi deneysel olarak elde edilen tabanca çıkışındaki eksen sıcaklığı ile karşılaştırmışlardır. Hesaplanan toplam tabanca gücü yaklaşık deneysel olana eşit ve bu tabanca gücüne karşılık gelen ark uzunluğunu $L_{arc} = 12.25$ mm olarak elde etmişlerdir [27].

E. Safaei Ardakani vd. çalışmalarında, aktarımsız DC argon plazma tabancasını 3B olarak modelleyip ark kök bağlantısı noktasını doğru bir şekilde vermeyi amaçlamışlardır. ANSYS FLUENT ticari yazılımında bir dizi kullanıcı tanımlı işlev uygulayarak tabanca içinde ark uzunlukları ve yarıçap aralıkları için elektrik potansiyeli ve manyetik vektör potansiyel denklemlerini çözmüşlerdir. Ayrıca arkın deneysel voltajı ölçülmüş ve ark uzunluğunun tahmini için kullanılmıştır. Deneyden kaynaklanan voltaj dalgalanmaları ile sayısal olarak

tahmin edilen voltaj dalgalanmaları arasındaki karşılaştırmaya dayanarak yay uzunluğunu önceden kullanılan yöntemlerden (ör. Minimum enerji prensibi ve minimum entropi yöntemleri) daha yüksek doğrulukla tahmin etmişlerdir. Tahmini ark uzunluğunun sayısal sonuçları termal verimlilik, çıkış hızı ve sıcaklık profilleri de dahil olmak üzere deneysel ölçümlerden gelen tüm parametrelerle iyi bir şekilde uyumludur. Farklı ark uzunlukları ve yarıçaplarına sahip birkaç durumu, deneysel sonuçlarla çok iyi eşleştiklerini görmüşlerdir. Elektrik akımı 500 A ve giriş akış hızı 70 SLPM Argon olarak kabul etmişlerdir. Farklı ark kök yarıçapları için gerilim düşüşüne karşı ark uzunluğunu göstermişlerdir. Gerilim düşümü yay uzunluğuna göre artar ve yay yarıçapı arttığında azaldığını tespit etmişlerdir. Ark uzunluğunun artmasıyla tabanca gücünün arttığını tespit etmişlerdir. Sıcaklık ve hızın ark köküne yakın bir şekilde arttığını göstermişlerdir. Ayrıca katottan uzaklık arttıkça hız ve sıcaklık profilleri üniform kalma eğilimi gösterdiğini ve çıkış hız profili, sıcaklık profilinden daha uniform olduğunu tespit etmişlerdir. Difüzyon nedeniyle, katottan artan mesafe ile azami sıcaklığın düştüğünü görmüşlerdir. Hız yoğunluğa bağlı olduğundan, hız profilindeki değişim daha yavaş ve pürüzsüzdür. Bu nedenle, tabanca çıkışına yakın maksimum hızı oluşacağını beklemişlerdir [3].

Trelles 2017 yılında yaptığı bir çalışmada 3B olarak plazma tabancasında ark deşarjını ele almıştır. Ark deşarjlarının sayısal simülasyonu, büyük gradyanların varlığında çok boyutlu özelliklerin çözümü, çok fazlı bağlanma ve kuvvet gibi çeşitli zorlukları barındırır. Makale, bu zorlukların üstesinden gelmek için etkili olduğunu kanıtlamış olan Sonlu Elemanlar ve Varyasyonel Çok Ölçekli yöntemlerini gözden geçirmiştir. Kullanılan ark deşarj modeli, plazmayı kimyasal dengede ve termodinamik dengesizlikte sıkıştırılabilir bir elektromanyetik akışkan olarak ele alır. Model, çözümüne uygun sayısal tekniklerin sergilenmesini basitleştiren ve diğer plazma akış modellerinin analizi için sağlam bir temel oluşturan genel bir taşıma sistemi olarak ele alınmıştır. Sonlu Elemanlar yönteminin temellerinin yanı sıra, dengelenmiş Varyasyonel Çok Ölçekli-Sonlu Elemanlar formülasyonlarının türetilmesi ve sayısal uygulamalarının yönleri sunulmuştur. Varyasyonel Çok Ölçekli-Sonlu Elemanlar yöntemlerinin etkinliği, aktarılan ve aktarılmayan ark plazma tabancalarında plazma akışının simülasyonu ile gösterilmiştir. Sonuçlar, yerel termodinamik dengede olmayan plazma akış modellerinin çoklu çözümler ile kullanılmasına duyulan ihtiyacı vurgulamaktadır [28].

V. Goyal vd. DC aktarımsız plazma tabancasında plazmanın dinamik davranışını incelemişlerdir. Bu davranışı, düşük güç plazma tabancasıyla (≈ 25 kW) hızlı görüntüleme içeren bir deneyde incelemişlerdir. Çalışma akışkanı olarak azot gazı kullanmışlardır. Gaz akış debisi 20-60 lpm, akım 70-120 A seçilerek plazma tabancasını atmosferik basınçta çalıştırmışlardır. Plazma tabancasına güçlü bir eksenel harici manyetik alan (100-500 G) uygulayarak ve plazma kolonunun uçtan uca görüntüleri, yüksek hızlı bir kare hızı olan 117 000 fps'lik bir kamera kullanılarak alınmıştır. Çalışmalar, ark kökü dinamiklerinde dışardan uygulanan manyetik alanın baskın rolünü ortaya koymuştur. Plazma kolonunu, üç ana kısımda açıkça göstermişlerdir: merkezi plazma, katot-anot bağlantısı ve anoda bağlanan kolonun radyal bileşeni. Ark dinamiği, özellikle kolonun radyal kısmının açılma hızı üzerine etki eden kuvvetleri ayrıntılı olarak incelemişlerdir. Ark kökü bağlantısının, akım, manyetik alan ve akış gibi ana deneysel parametrelerle değiştiğini gözlemlemişlerdir [29].

Bu çalışmada, ark plazma tabancası içindeki fiziksel ve kimyasal değişimler, plazma tabancasından çıkan plazma jetinin özellikleri üzerinde önemli etkilere yol açtığı için (örneğin, termal plazma püskürtmede kaplamaların kalitesine, ultra ince metal toz parçacıkları üretme gibi) plazma tabancası içindeki plazmanın sıcaklığı, hızı, plazmanın çıkış sıcaklığı, çıkış hızı, ark oluşum noktası, ark anot bağlantı noktası sıcaklığı, plazma elektrik potansiyeli, ark voltajı, arkın dinamiği hesaplamalı akışkanlar dinamiği yardımıyla sayısal olarak incelenmiştir. Akım, hacimsel debi, anot duvar uzunluğu ve tabanca çıkış çapı özgün olarak seçilmiş parametrelerin değiştirilerek uygulanmasıyla yukarıda verilen plazma karakteristikleri üzerine etkileri bu çalışma kapsamında sunulmuştur. Ayrıca çalışmada, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile sayısal olarak literatürde sınırlı olan anot duvarı sıcaklık dağılımı ve anot duvarı üzerinde oluşan maksimum sıcaklık noktası sunulmuştur. Yüksek sıcaklıklardan dolayı zamanla anot duvarında meydana gelen aşınmayı azaltmak için elde edilen veriler doğrultusunda tavsiyelerde bulunulmuştur. Bu analizleri gerçekleştirmek için DC aktarımsız ark plazma tabancası 3B olarak modellenmiştir. Çözümlemeler hem zamana bağlı hem zamandan bağımsız olarak yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Zamana bağlı yapılan çözümler ile zamandan bağımsız çözümler arasında dikkate değer bir fark olmadığı ortaya konmuştur. Çözümü hızlandırmak, zamandan tasarruf sağlamak ve çıktıların bilgisayar hafızasında fazla yer kaplamaması için çözümlemelere zamandan bağımsız olarak devam edilmiştir. Manyetik alan ile plazma akış alanı arasındaki etkileşimi araştırmak için manyetohidrodinamik denklemleri tanımlanmıştır. Akım değeri sabit tutulup, plazma gazının hacimsel debisi artırılarak yapılan analizlerde tabanca içerisinde

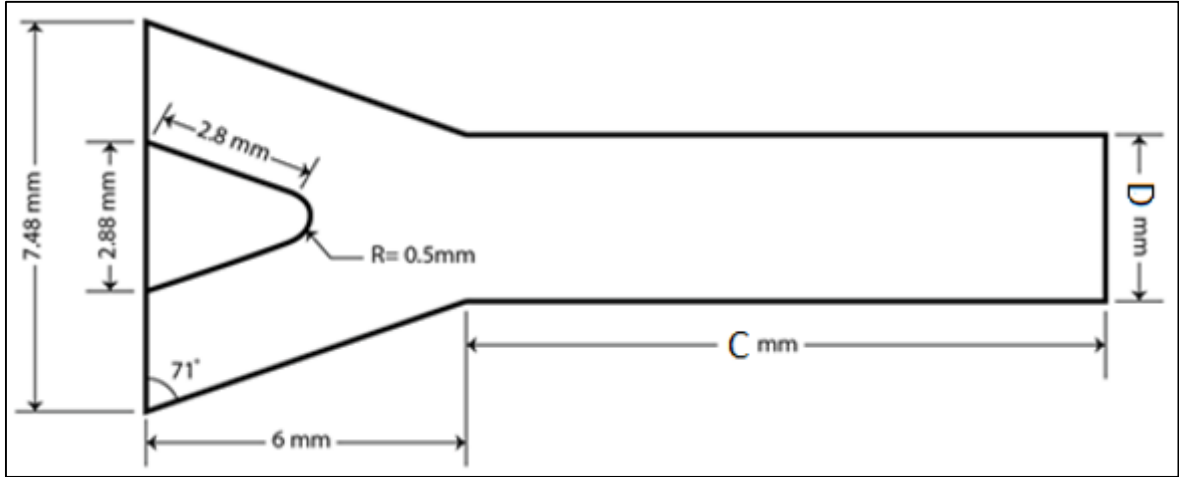
oluşan plazma sıcaklığı ile çıkış plazma sıcaklığında çok fazla bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Artan hacimsel debiyle plazma kolonun daraldığı, ark boyunun uzadığı görülmektedir. Ark boyunun uzamasından dolayı ark voltajı ile plazma voltajının arttığı görülmüştür. Ark bağlantı noktasıyla birlikte anot yüzeyinde yoğunlaşan sıcaklık bölgesinde plazma tabancası çıkışına doğru hareket etmiştir. Hacimsel debi artışı tabanca içindeki plazma hızını arttırdığı gibi tabanca çıkışındaki plazma hızını da arttırmıştır. Plazma gazının hacimsel debisi sabit tutulup, akımın arttırılmasıyla yapılan analizlerde tabanca içerisinde oluşan plazma sıcaklığı ile çıkış plazma sıcaklığında artmalar görülmüştür. Akımın artmasıyla, ark boyunun kısaldığı görülmektedir. Ark boyunun kısılmasına bağlı olarak ark voltajı ile plazma voltajında azalmalar görülmüştür. Anot ark bağlantı noktası artan akım değeriyle plazma tabancasının girişine doğru kaydığı görülmektedir. Ark bağlantı noktasıyla birlikte anot yüzeyinde yoğunlaşan sıcaklık bölgesinde plazma tabancası girişine doğru hareket etmiştir. Akım artışı tabanca içindeki plazma hızını arttırdığı gibi tabanca çıkışındaki plazma hızını da arttırmıştır. Sabit akım ve hacimsel debide yapılan tabanca çıkış çapının arttırılmasıyla anot ark bağlantı noktasının tabanca çıkışına doğru kaydığı görülmüştür. Artan çapla birlikte tabanca veriminin düştüğü görülmüştür. Sabit akım ve hacimsel debide yapılan anot duvar uzunluğunun artmasıyla anot ark bağlantı noktasında dikkate değer bir değişim olmadığı görülmektedir. Artan anot duvarı uzunluğuyla plazma tabancası veriminin düştüğü görülmektedir. Yapılan çalışmayla elde edilen sonuçlar literatürle karşılaştırılıp uyum içerisinde olduğu görülmektedir.

3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

3.1. Problemin Tanımı ve Geometrilerin Belirlenmesi

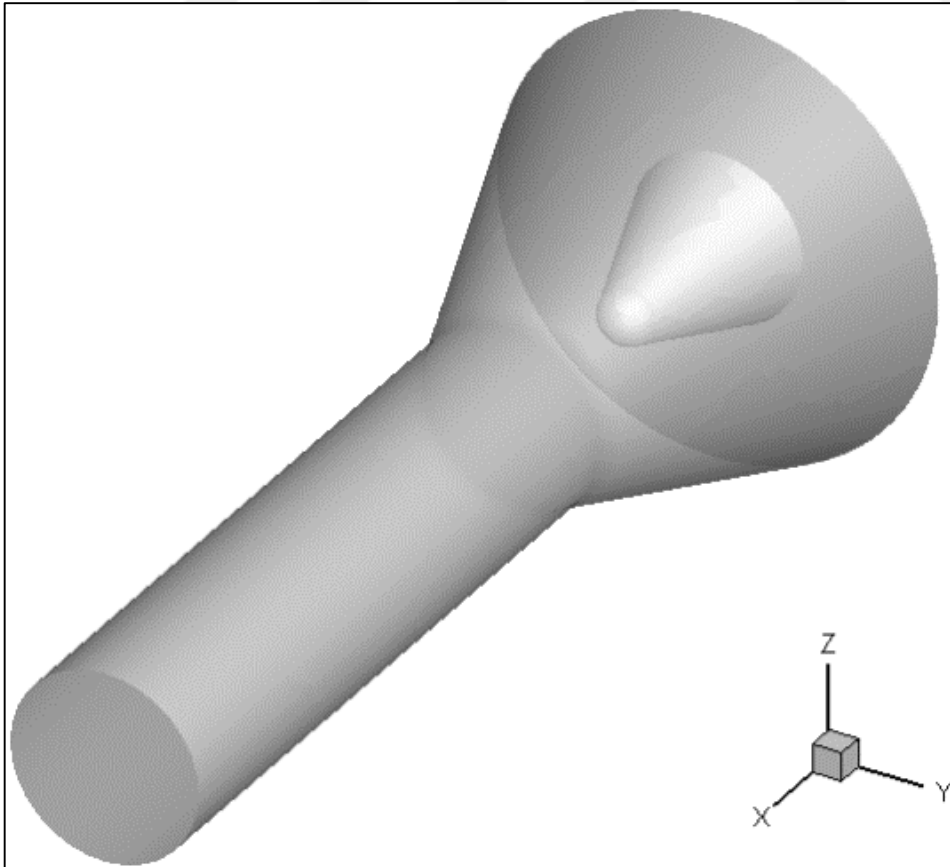
Bu çalışmada literatür ve makalelerde sunulan DC ark plazma tabancaları göz önünde bulundurularak özgün plazma tabancası hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile ANSYS FLUENT programı kullanılarak modellenmiştir. Çalışma 3B olarak gerçekleştirilmiştir. Problemin çözümü hem kararlı rejim şartları altında hem zamana bağlı olarak, türbülanslı, sıkıştırılmaz olarak gerçekleştirilmiştir. Problemin çözümünde kütle korunum, momentum, enerji ve manyetohidrodinamik (MHD) denklemleri kullanılmıştır.

Çalışmada katot duvarından tanımlanan farklı akım değerleri ve gazın farklı hacimsel debilerinin, plazma sıcaklığı, plazma hızı, plazma çıkış sıcaklığı ve hızı, plazma elektrik potansiyeli, anot ark kökü bağlantı noktası sıcaklığı, anot ark kökü oluşum noktası üzerine etkileri incelenmiştir. Anot ark kökü bağlantısının yeri belirlenmeye ve anot duvarında oluşan sıcaklık üzerine parametrelerin etkisi incelenmiştir. Ayrıca plazma tabancası çıkış çapı ve anot duvarının uzunluğu değiştirilerek ark bağlantı noktası değişimleri incelenmiş ve plazma tabancasının verimi hesaplanmıştır. Şekil 3.1’de plazma tabancasının ölçüleri gösterilirken anot duvar uzunluğu değiştiği için “C mm” ile plazma tabancasının çıkış çapıda “D mm” ile temsili olarak gösterilmiştir. Analizler yapılırken plazma tabancası içerisinde elektrik arkından dolayı ortaya çıkan elektromanyetik alan ile gaz akışı arasındaki etkileşimi ortaya koyabilmek için ANSYS Fluent ve manyetohidrodinamik modülü beraber kullanılmıştır. Çalışmada akım ve hacimsel debinin akış alanı üzerine etkilerini incelemek için analizlerin bir bölümünde akım değeri sabit tutulup, gazın hacimsel debisi değiştirilerek sonuçlar elde edilmiş, diğer analizlerde ise gazın hacimsel debisi sabit tutulup akım değeri değiştirilerek sonuçlar elde edilmiştir. Plazma tabancasının farklı çıkış çapı ve farklı anot duvarı uzunluğu için yapılan çözümlerde akım ve hacimsel debi değeri sabit tutulmuştur.



Şekil 3.1. Plazma tabancasının ölçüleri [8]

Çözümde kullanılan diferansiyel formdaki denklemler Sonlu Hacimler Yöntemi ile çözüm yapan Fluent paket programı yardımıyla cebirsel denklemlere dönüştürülürler problemnin çözümü gerçekleştirilmiştir. Hız – basınç ilişkisiyle çözülen farklı algoritmalarla problemin analizi sağlanmıştır. Şekil 3.2 plazma tabancasının 3B görünümünü göstermektedir.



Şekil 3.2. Plazma tabancasının 3B görünümü

3.2. Kabuller

Yapılan çalışmada plazma tabancası içinde gerçekleşen akış için aşağıdaki kabuller yapılmıştır.

1. Yerçekimi kuvveti, kinetik etkilerle karşılaştırıldığında çok küçük olduğu için ihmal edilmiştir. [24, 26, 30].
2. Plazma gazı transport özellikleri sadece plazma gazı sıcaklığı dikkate alınarak belirlenmiştir [30].
3. Enerji denklemindeki var olan viskoz yayılma ve basınç işi terimleri ihmal edilmiştir. [26].
4. Plazma akışı, kararlı, türbülanslı ve sıkıştırılmaz olarak kabul edilmiştir [16].
5. Plazma gazı olarak kullanılan argon plazma tabancasına aksel yönünde enjekte edilmiştir, bu yüzden tabanca girişinde herhangi bir girdap hızı oluşmaz [30, 33].
6. Süreklilik varsayımı geçerli ve plazma, yerel termodinamik dengede (YTD) mükemmel bir gaz olarak kabul edilmiştir [16, 30].
7. Plazma tabancasının elektrik kaynağı sabit bir değere sahip ve kararlı durumdadır [4,30,33].
8. Işınım etkisi ihmal edilmiştir (Anot duvarına olan net ısınmaya etkisi çok az olduğundan) [5, 19].
9. Arkın etrafında ani ısınma gazın hızlıca genişlemesine sebep olur bu yüzden gazda ani ivmelenme meydana gelir bu akışı türbülanslı yapar [25, 29].

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 kütleye 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.

3.3.1. Kütlenin korunumu denklemi

Kütlenin korunumu ya da süreklilik denklemi aşağıdaki gibidir:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (3.1)$$

3.3.2. Momentumun korunumu denklemleri

Momentumun korunumu denklemleri Eş. 3.2, 3.3, 3.4'te gösterilmektedir.

x – momentum

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

y – momentum

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

z – momentum

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

u : x yönü hız bileşenini, v : y yönü hız bileşenini, w : z yönü hız bileşenini, ρ : yoğunluk (kg/m^3), Re : reynolds sayısı, τ : gerilme tensörü, t : zaman

3.3.3. Enerjinin korunumu denklemi

Enerjinin korunumu denklemi Eş. 3.5'te gösterilmektedir.

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

T : gaz sıcaklığı (K)

σ : elektrik iletkenliği ($1/\Omega \cdot \text{m}$)

j_x, j_y ve j_z x, y ve z yönündeki akım yoğunluğu (j) bileşenleridir. Elektrik akım yoğunluğu vektörü (j), elektrik akım yoğunluğu veya elektrik potansiyel ϕ ile ilişkilidir.

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

E : elementer yük (C)

k_B : Boltzmann sabiti (J/K)

$j \cdot \nabla T$: elektron entalpisinin yayılması

Γ_T : sıcaklığın laminar ve türbülans etkinlik katsayısı

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

k : ısı iletim katsayısı (W/(m.K))

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

c_μ : sistem sabiti

3.4. Türbülans Modelleri

Bu çalışmada plazma gazı olarak kullanılan Ar gazı plazma tabancasına oda sıcaklığında girer. Plazma tabancası içerisinde oluşturulan ark içerisinde geçirilen argon gazının sıcaklığı ark ile etkileşimi sırasında 10^4 K/mm'lik bir oranda hızla artar [2]. Sıcaklıktaki bu artış argon gazının plazma haline geçmesine sebep olduğu gibi genleşmeden dolayı hızlanmasına da yol açar. Plazma tabancası içindeki yüksek hız ve sıcaklık değişimleri, elektromanyetik alanla beraber akışın karmaşık hale girmesine yol açar.

Reynolds denklemleri, üç boyutlu akımda u, v, w hız bileşenlerine ve basınç bileşeni, p olmak üzere 4 bileşenden oluşur. Ayrıca 6 adet türbülans gerilmesiyle birlikte toplam 10 adet bilinmeyene karşılık süreklilik denklemi ile birlikte 4 adet denklem olacağından Reynolds denklemlerinin bu şekilde çözümü mümkün olmayacaktır. Bu durum denklemlerde kapanma problemi olarak bilinir. Reynolds gerilmelerinin neden olduğu bu hal türbülans modelleri aracılığıyla, Eş. 3.8'deki τ_{ij} türbülans kayma gerilmelerinin çözümüyle kapanmama durumu ortadan kaldırılır [32].

$$\tau'_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij} - \frac{2}{3}\mu\text{div}\vec{V}\delta_{ij} + \tau'_{ij} \quad (3.8)$$

Türbülanslı akım problemlerinde kapatma problemini ortadan kaldırmak için farklı türbülans modelleri kullanılır. Bu çalışmada problemin yakınsama durumu dikkate alınarak $k-\varepsilon$ türbülans modellerinden Gerçekleştirilebilir (Realizable) $k-\varepsilon$ türbülans modeli kullanılmıştır. Gerçekleştirilebilir türbülans modeli, COUPLED algoritması (ikinci dereceden upwind) ile birlikte kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan türbülans modeliyle ilgili özet bilgi aşağıda sunulmaktadır.

3.5. Gerçekleştirilebilir $k-\varepsilon$ Türbülans Modeli

Gerçekleştirilebilir (Realizable) $k-\varepsilon$ modeli, ε için gelişmiş ek denklemler ve değişken türbülans viskozite katsayısı önerir. Bu model jet akışı, dönen akışlar, güçlü basınç gradyenleri altındaki sınır koşullarındaki akışlarda ve ayrılma-yeniden birleşmelerin olduğu akışlarda üstün performans sağlar. Türbülans kinetik enerjisi yayılımı (ε) için yeni bir formülasyon ve türbülans viskozitesi denklemi için yeni yaklaşım içerir. Gerçekleştirilebilir $k-\varepsilon$ türbülans modeli gergin, ortalama bir akışta Boussinesq denklemi ve eddy viskozite denkleminin kombinasyonu ile ortaya konulmuş bir model türüdür [33].

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 gradyenlerinden kaynaklı türbülans kinetik 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_k ve σ_ε kinetik enerjisi (k) ve yayılım oranını (ε) için türbülans Prandtl Sayıları, S_ε ve S_k kullanıcı tanımlı kaynak terimlerdir.

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

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

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

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

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

Eş. 3.14 ortalama hız geçişleri nedeniyle oluşturulan türbülansı temsil eder. Türbülans viskozite, diğer modellerden farklı olarak C_μ değeri sabit olmayıp belli değişkene göre değişen bir fonksiyondur.

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (3.14)$$

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

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

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

$$\Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \partial_{ijk}\omega_k \quad (3.18)$$

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

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

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

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

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

Model sabitleri: Taşıma denklemleri ve türbülans viskozite denklemleri türetilirken ara kademelerde belli sabitler elde edilir. Bunlar aşağıda verilmiştir.

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

3.6. Manyetohidrodinamik (MHD)

Literatürde plazma için üç temsil verilmiştir. Bunlardan birincisi, parçacık hızlandırıcılarının da temeli olarak bilinen parçacık optiği gösterim şeklidir. Bu yöntem, ışığın merceklerdeki optik davranışına gönderme yapılarak elektron ve iyonların da elektromanyetik alandaki davranışları tetkik edilir. İkinci gösterim biçimi, plazmanın davranışını toplu gaz dinamiği şeklinde inceler aynı zamanda bu gösterim kinetik teori olarak da bilinir. Üçüncü gösterim biçimi ise manyetohidrodinamik (MHD) temsildir. Manyetohidrodinamik temsiliyle kinetik teorinin özel bir durumu olan parçacıklar arası uzaklığın çok kısa ve ortamın sürekli bir akış halinde olduğu düşünülür. Bu nedenle kinetik teorinin temelini ortaya koyan Vlasov-Boltzmann denkleminin integralleri alınarak plazmayı tanımlayan MHD denklemleri oluşturulur. Manyetohidrodinamik kelimesinin etimolojik kökeni manyetik alandan kaynaklanan “manyeto”, akışkan anlamındaki “hidro” ve hareket anlamındaki “dinamik” kelimelerinin birleşimine dayanmaktadır. Kısaca MHD, elektriksel olarak iletken olan akışkanların elektromanyetik alandaki dinamiğini inceleyen disiplindir [34].

Manyetik alanlar birçok doğal ve insan yapımı akışları etkiler. Sıvı metalleri ısıtmak, pompalamak, karıştırmak ve yüzdürmek için rutin olarak endüstride kullanılırlar. Yerin çekirdeğinde sıvı hareketi ile korunan karasal manyetik alan, güneş lekeleri ve güneş fışkileri oluşturan güneş manyetik alanı ve yıldızlararası bulutlardan yıldız oluşumunu etkilediği düşünülen galaktik manyetik alan vardır. Bu akışların çalışmasına manyetohidrodinamik (MHD) adı verilir. MHD, akışkan akışının ve manyetik alanların karşılıklı etkileşimiyle ilgilidir [35].

Manyetik alan B ve bir hız alanı u 'nın karşılıklı etkileşimi, kısmen Faraday ve Ampere kanunlarının bir sonucu olarak ve kısmen bir akım taşıyan cismin Lorentz kuvveti yüzünden meydana gelir. İletken bir sıvı ve bir manyetik alanın etkileşimiyle Faraday kanunlarınca bir elektromanyetik alanın ($u \times B$) oluşmasına sebep olur. Amper yasasına göre indüklenmiş akım ikinci bir indüklenmiş manyetik alanın ortaya çıkmasına neden olur. İlk manyetik alandan sonra bu ilaveler genellikle akışın manyetik alan çizgileriyle sürtünmesine sebep olur. Birleşik manyetik alan, indüklenmiş akım yoğunluğuyla (J) etkileşmesi sonucu Lorentz kuvvetinin ortaya çıkmasına neden olur ($J \times B$) [8].

Elektromanyetik dalgaların varlığını ve bunların özelliklerini açıklayabilen denklemler Maxwell denklemleridir. Maxwell denklemleri, Gauss, Amper ve Faraday yasalarına göre yazılmış olup denklemler aşağıda verilmiştir:

$$\nabla \cdot (-\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (3.24)$$

$$\vec{E} = -\nabla \phi \quad (3.25)$$

$$\Delta \vec{A} = -\mu_0 \vec{J} \quad (3.26)$$

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (3.27)$$

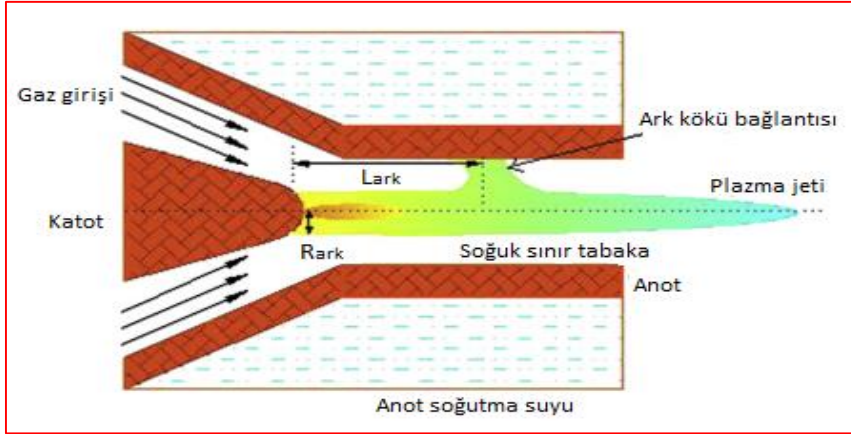
Manyetohidrodinamik, elektromanyetik alanların noktasal yük üzerinde oluşturduğu elektrik ve manyetik kuvvetlerin bileşkesi olan “Lorentz Force” denklemi ve elektrik akımının yol açtığı ısı ile bir ideal gazın iç enerjisinin, gazın basınç, hacim ve sıcaklığına olan ilişkisini ortaya koyan “Joule Heating” denklemi çözülmüştür. “Lorentz Force” Eş. 3.28’de, “Joule Heating” Eş. 3.29’da verilmiştir [8].

$$\vec{F} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (3.28)$$

$$Q_J = \frac{1}{\sigma} \vec{j} \cdot \vec{j} \quad (3.29)$$

3.7. Sınır Şartları

Plazma tabancasındaki akış analizini gerçekleştirmek için tabancanın sınır koşullarının tanımlanması gerekmektedir. Anot, katot, gaz giriş ve çıkış bölgeleri Şekil 3.3’te gösterilmiştir ve sonra sınır koşulları tanımlanmıştır.



Şekil 3.3. Plazma tabancasının sınır şartları [36]

3.7.1. Giriş sınır şartı

Giriş sınır şartı, bir DC ark plazma tabanca simülasyonunda diğer sınır şartlarına göre uygulanması en kolay olanıdır. Giriş koşulları tipik olarak, gazın hesaplama alanına girdiği bölge üzerinden bilinen özelliklerin, genel olarak hız ve sıcaklık değerlerinin girilmesiyle yapılır. Ayrıca giriş sınır koşulları gaz enjeksiyon işleminin tanımını da içerir. Gaz düz (tabanca eksenine paralel olarak), radyal olarak, teğetsel olarak (yani girdapla) enjekte edilebilir. Gaz plazma tabancasına radyal, teğetsel veya tabanca eksenine paralel olarak girmesi plazma hızı, sıcaklığı ve arkın hareketi gibi plazma karakteristikleri üzerine etkisi vardır [15]. Sıkıştırılabilir akış problemlerinin iyi düzenlenmiş formülasyonu için iyi bir giriş sınır şartı gerekli olduğu gibi, bunların tür ve sayıları çıkış koşullarının tipi ve sayısı ile tutarlı olması nedeniyle, giriş koşulları belirlenirken dikkatli olunmalıdır. Bazı durumlarda, giriş ve çıkış bölgeleri yakınındaki gaz sıkıştırılmaz olarak düşünülebilir, bu da bu bölgelerdeki sınır koşullarının uygulanmasını önemli ölçüde basitleştirir.

Ark plazma tabanca simülasyonlarında giriş veya çıkış durumu olarak basınç belirtmek özellikle simülasyon alanı sadece tabancanın iç kısmını kapsarsa zordur. Sıkıştırılmaz iç akışlar için, basınç, çoğunlukla bir çıkış koşulu olarak uygulanırken, hız ise giriş koşulu olarak uygulanır. Sıkıştırılabilir akışlar için, basınç, akışın ses altı veya süpersonik olması durumunda, giriş veya çıkış koşulları olarak uygulanabilir [13]. DC ark tabancası girişinin genellikle sıkıştırılmaz olduğu (çok düşük Mach sayısı), buna karşın tabancanın çıkışında akışın kesinlikle subsonik veya süpersonik olduğu bilinmektedir. DC ark plazma tabancasının akış simülasyonu sıklıkla, uygun ve sağlam fiziki koşulları bulmak için farklı giriş ve çıkış koşulları denemeyi gerektirir [13].

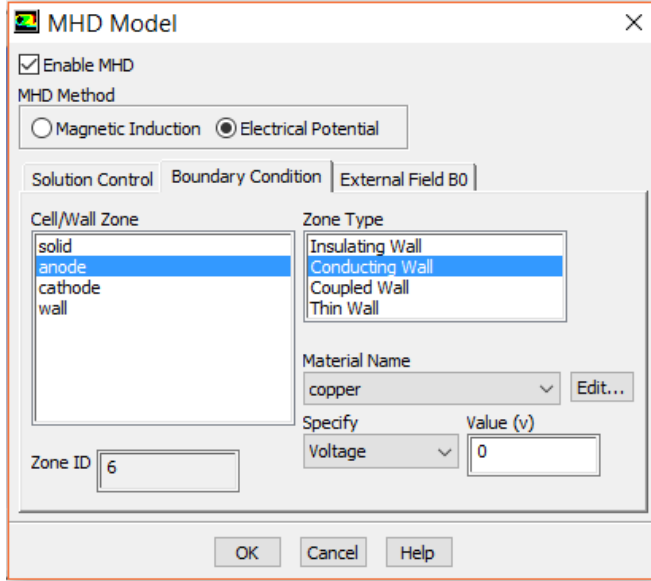
Bu çalışmada literatür göz önünde bulundurularak giriş sınır koşulları belirlenmiştir. Sağlam koşullar elde etmek için denemeler yapılmıştır. Argon gazı için hacimsel akış debisi 30, 38, 48, 60, 75 SLPM (Standart Liter Per Minute) olarak girilmiştir. Argon gazının giriş sıcaklığı 300 K olarak belirlenmiştir [3, 23, 38]. Ar gazı tabanca içerisine herhangi bir girdap etkisi, dönme etkisi yapılmadan x eksen yönünde yatay olarak gönderilmiştir. Böylece girdap hızından kaçınılmıştır [6, 30]. Girişte basınç 2 bar olarak tanımlanmıştır ve herhangi bir elektrik potansiyeli ya da akım tanımlanmamıştır.

3.7.2. Çıkış sınır şartı

DC ark tabancası simülasyonlarındaki çıkış sınırı genelde tabanca çıkışı olarak veya arkın altındaki tabanca çıkışına yakın bölgelerdir. Ark hareketi, büyük hız ve sıcaklık eğiliminden dolayı, jet üreten aktarımsız ark plazma tabancalarının çıkış sınır şartının uygulamak özel dikkat gerektirir [2]. Çalışmada literatür göz önünde bulundurularak çıkış sınır şartı basınç olarak (pressure-outlet) tanımlanmıştır. Çıkış basıncı atmosfer basıncı olarak alınmıştır [3]. Gösterge basıncı (gauge-pressure) “sıfır” olarak girilmiştir. Sıcaklık sınır şartı 300 K olarak tanımlanmıştır.

3.7.3. Anot duvarı sınır şartı

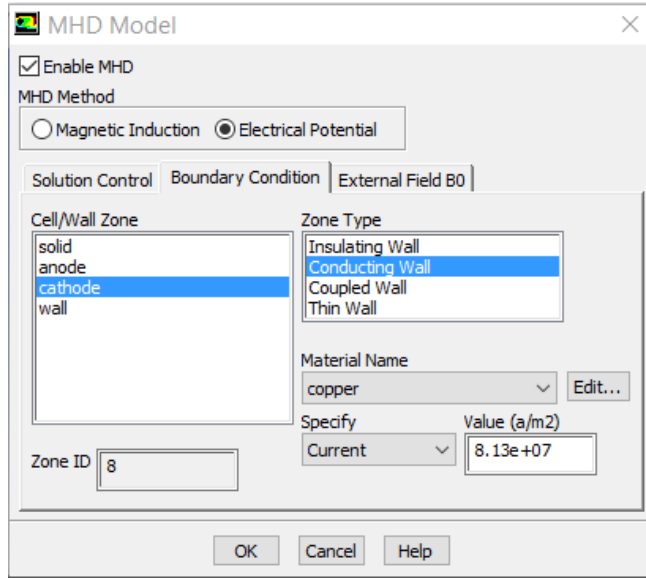
Sınır koşulları olarak duvarların modellenmesi, elektrotlar ve iletken olmayan duvarlar arasında ayırım yapılması gerekmektedir. İletken olmayan duvarlar kaymaz duruma (no Slip) göre tanımlanmıştır. Aktarımsız ark tabancalarında, anodun ark bağlantısına uzak olan bölgelerinde ayrıca, iletken bir duvar olmadığı düşünüldüğünde, bunlar boyunca elektrik akımı uygulanmaz [2]. Çalışmada anot duvarına elektrik potansiyeli tanımlanmamıştır [3, 23, 38]. Anot malzemesi bakır olarak seçilmiş ve anot duvar tipi iletken duvar (conducting wall) olarak tanımlanmıştır. Anot duvar sıcaklığı 1000 K olarak girilmiştir [2, 30]. Anot duvarına hareketsiz (Stationary Wall) sınır şartı ve kayma olmama (No Slip) şartı tanımlanmıştır. Manyetohidrodinamik anot sınır şartı paneli Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Manyetohidrodinamik anot duvarı sınır şartı paneli

3.7.4. Katot duvarı sınır şartı

Katot, ark deşarjını sürdürmek için elektron kaynağıdır. Katot ısıyı arkta alır ve elektronları termiyonik olarak yayar. Tipik katot malzemeleri tungsten, toryumlu tungsten, grafit, bakır, zirkonyum/zirkonya'dır [7]. Bu çalışmada plazma tabancasının katodu iletken duvar (conducting wall) ve malzemeside bakır olarak seçilmiştir. Katot sıcaklığı 3500 K olarak belirlenmiştir [26]. Hareketsiz (Stationary Wall) sınır şartı ve kaymama (No Slip) sınır şartı tanımlamaları yapılmıştır. Katot elektrotunun uç kısmından 50, 75, 112, 170, 250 A olarak akım değerleri, hacimsel debi debi sabit tutularak tanımlanmıştır. Böylece anot ve katot arasında ark oluşumu sağlanır. Manyetohidrodinamik katot sınır şartı paneli Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Manyetohidrodinamik katot sınır şartı paneli



4. SAYISAL ÇÖZÜM

Deneyssel yöntemler, sayısal çözümlemelere göre daha gerçekçi ve daha güvenilir sonuçlar vermesine rağmen yüksek bütçe gerektiren donanım, ölçekleme problemleri, ölçüm zorlukları, ölçümde ortaya çıkan hata payları ve işletme maliyetleri gibi dezavantajlara sahip olmasından deneyssel yöntemlerin kullanımını kısıtlanır. Bilgisayarların sistemlerinin gelişmesi ve kapasitelerinin artmasıyla birlikte, deneyssel olarak yapılan akış incelemeleri yerini büyük oranda hesaplamalı akışkanlar dinamiğine (Computational Fluid Dynamics, CFD) bırakmıştır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD), ısı geçişi ve akışkanlar dinamiği alanlarında karmaşık akış ve ısı transfer benzetim problemlerinin çözümü için geliştirilmiş modelleme yapma, sayısal ağ oluşturma ve analiz yapma olanakları sunan bir sistemdir.

HAD karmaşık fiziksel durumlar için benzetim yapabilme özeliği, akışın zamana bağlı gelişiminin elde edebilmesi, kısa sürede ve az maliyetle sonuç alabilme özellikleri bakımından deneyssel yöntemlere göre çok büyük kolaylık sağlamaktadır. Bu kolaylıkların yanı sıra ağ oluşturma problemleri, sınır koşulları problemleri ve güçlü bilgisayar tedariki istemesi de HAD'ın zorlukları olarak gösterilebilir. Bu yüzden ısı geçişi ve akışkanlar dinamiği uygulamalarında HAD ve deneyssel yöntemler geri beslemeli olarak birlikte ele alınır. Yani deneyssel çalışmalardan alınan sonuçlarla HAD kodları geliştirilerek deneyssel koşulların benzeri yapılmağa çalışılır ve yapılan sayısal çalışmalarda elde edilen farklı analiz sonuçlarının fiziksel olarak bir anlam ifade edip etmediği deneyssel çalışmalarla karşılaştırılarak doğrulanır. Hesaplamalı akışlar dinamiğinde temel ilke oluşturulan modelin çözüm alanının alt bölgelere (sonlu sayıda hücre) ayrıklaştırılmasıdır. Bu yöntemde ağ yapısı oluşturularak ilgili diferansiyel formdaki korunum denklemlerinin bu çözüm ağı boyunca ayrıklaştırılıp lineer denklem sistemlerine dönüştürülmesi sağlanarak çözüm yapılır. Böylece tüm hesaplama alanı içindeki son çözümün elde edilmesiyle sonuçların fiziksel anlam taşıyıp taşımadığı kontrol edilerek sonuçların değerlendirilmesi yapılır.

Çalışmanın bu bölümünde HAD analizinin doğru sonuçlar vermesi için bazı önemli noktalardan bahsedilmiştir. Bunlardan bazıları; akış fiziğine uygun türbülans modelinin seçilmesi, uygun çözüm metotlarının kullanılması, yeterli sayıda ağ yapısı oluşturulması, düşük hata oranlarının elde edilmesi gibi sıralanabilir. HAD analizinde bu hususların göz önünde bulundurulması daha doğru sonuçlara ulaşmamızı sağlar.

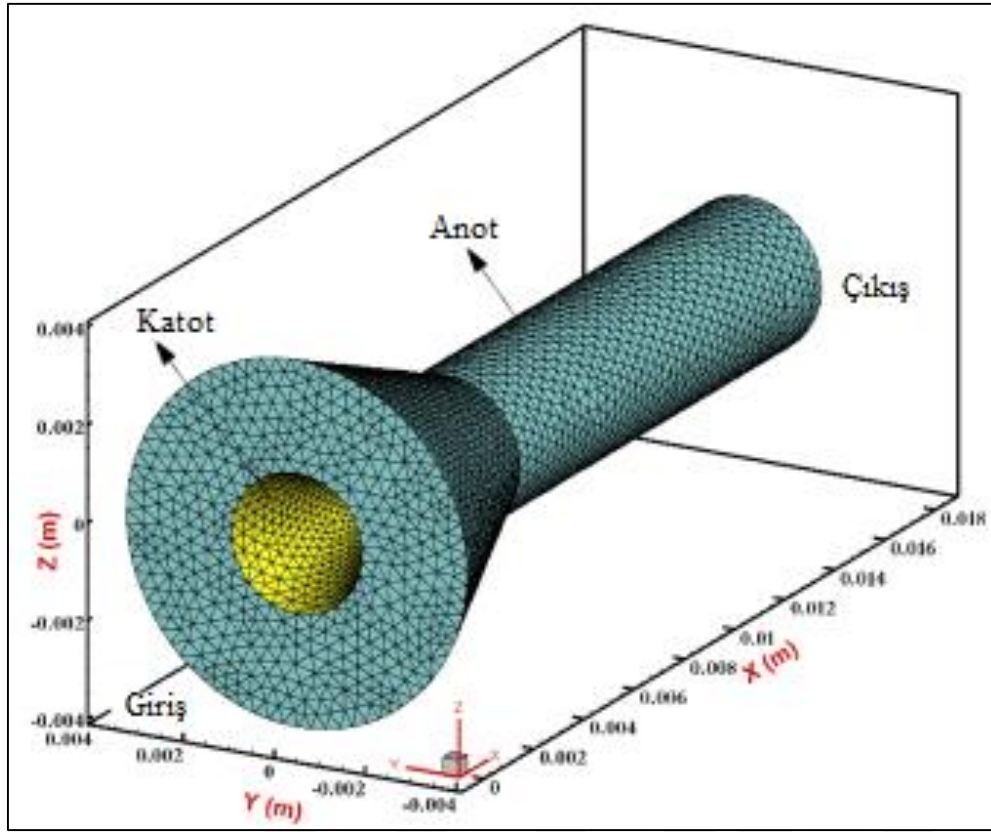
Yapılan çalışmada HAD yazılımı olarak “ANSYS FLUENT” kullanılmıştır. Sayısal çözüm için WORKBENCH içerisinde bulunan “Fluent” programı seçilmiştir. Sonlu hacimler metodunu kullanarak çözüm yapan FLUENT programı çözücü seçenekleri bakımından oldukça gelişmiştir. Problemin geometrisi ANSYS WORKBENCH içerisinde “Geomerty” bölümünde oluşturulmuştur. Oluşturulan bu geometriye uygun hücre yapısı yine WORKBENCH içerisinde bulunan “Mesh” bölümünde yapılmıştır.

4.1. Çözüm Ağ Yapısı

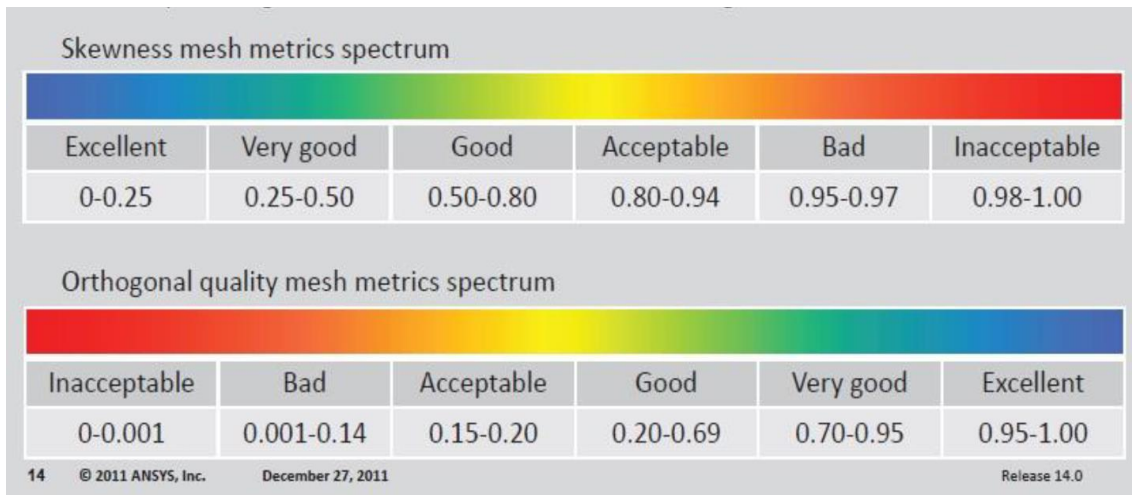
ANSYS FLUENT, bir problemi çözmek için sonlu hacimler metodunu kullanır. Çözüm alanını kontrol hacmine bölerek sayısal ağ yapılarını oluşturur. Çözüm alanında sayısal ağ yapısı oluşturulmasıyla diferansiyel denklem olarak ifade edilen matematiksel fonksiyonlar cebirsel olarak ifade edilen denklemlere dönüştürülerek sayısal çözüm mümkün hale getirilir. Teorik olarak her bir çözüm alanı için cebirsel denklemler yazılması mümkündür ama bu durumda sonsuz sayıda cebirsel denklem türetilmiş olur. Sonsuz sayıda cebirsel denklemlerin çözümü mümkün olmadığından belli noktalar için cebirsel denklem yazılır ve çözüm gerçekleştirilir. Bu noktalar hücre (mesh) olarak adlandırılır.

Bu çalışmada DC plazma tabancası çözüm alanı farklı sayılarda elemanlara bölünerek uygun eleman sayısı çözüm ağ sayısından bağımsızlaştırılarak elde edilmiş ve çözümler için bu eleman sayıları kullanılmıştır. Çözüm alanı için uygun olan eleman sayısını belirlemek üzere 40 000 ile 150 000 arasında değişen hücre sayıları denenmiştir. Hücre tipi olarak düzgün dört yüzlü (tetrahedral) hücre yapısı kullanılmıştır. Sayısal çalışmalarda kullanılan örnek bir hücre yapısı Şekil 4.1’de sunulmuştur.

DC ark plazma tabancası için seçilen hücre yapılarının, kullanılan modele uygunluğunu belirlemek için Şekil 4.2’deki tabloda yararlanılarak “skewness” ve “orthogonal” değerlerinin uygun aralıkta olduğu belirlenmiştir [37].



Şekil 4.1. Sayısal analizde kullanılan hücre yapısı



Şekil 4.2. Hücre kalite değer aralıkları [37]

Kullanılan hücre yapısı için “skewness” ve “orthogonal” değerleri şekil 4.3’de gösterilmiştir. Çalışmada kullanılan hücre kalite değer aralıkları ortalama olarak skewness için 0,21 orthogonal için 0,86 olduğu görülmüştür. Bu değerler hücre kalite değer aralıkları tablosuna göre uygundur.

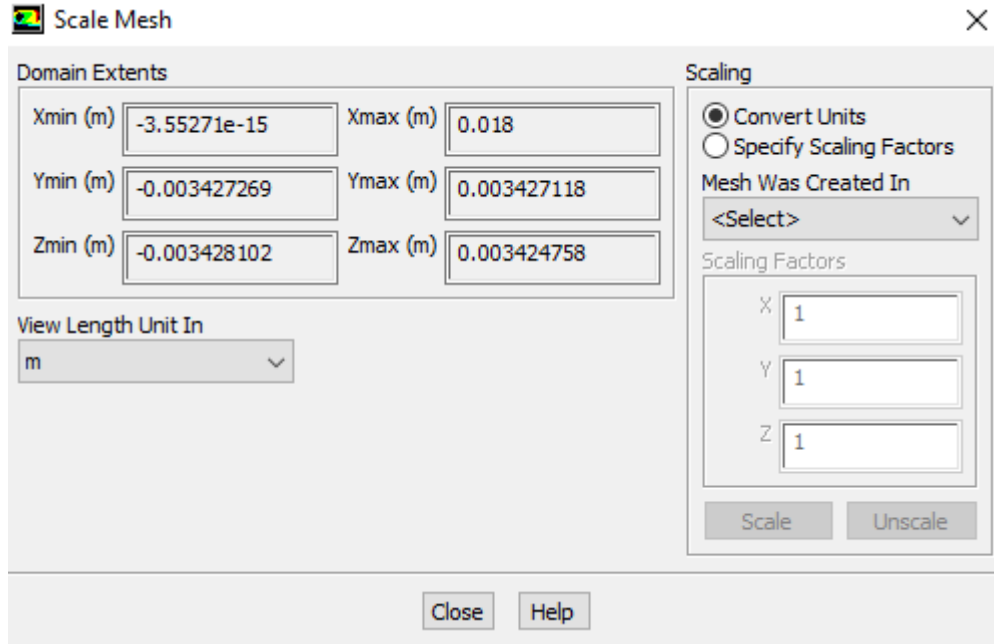
Details of "Mesh"	Details of "Mesh"
☒ Display	☒ Display
☒ Defaults	☒ Defaults
☒ Sizing	☒ Sizing
☒ Inflation	☒ Inflation
☒ Assembly Meshing	☒ Assembly Meshing
☒ Patch Conforming Options	☒ Patch Conforming Options
☒ Patch Independent Options	☒ Patch Independent Options
☒ Advanced	☒ Advanced
☒ Defeaturing	☒ Defeaturing
☒ Statistics	☒ Statistics
☐ Nodes 18271	☐ Nodes 18271
☐ Eleme... 96723	☐ Elements 96723
Mesh Me... Skewness	Mesh Metric Orthogonal Quality
☐ Min 1,6591e-006	☐ Min 0,2885
☐ Max 0,77123	☐ Max 0,99353
☐ Average 0,21307	☐ Average 0,86367
☐ Stand... 0,11788	☐ Standard Deviation 8,4283e-002

Şekil 4.3. Parametrik çalışmalarda kullanılan hücre yapısı için hücre kalitesi

4.2. Genel Ayarlar

Burada matematiksel ve fiziksel tanımlaması yapılan modelin ANSYS FLUENT programına nasıl tanımlandığı, giriş çıkış şartlarından, duvar sınır şartlarından ve çözücü ayarlarından bahsedilmiştir [37].

Çözüm ağı kontrolü: Problem için tanımlanan geometrinin birimleri çalışmak istediğimiz birimlere uygun olup olmadığı "Scale" sekmesi yardımıyla kontrol edilir ve istenilen uygun birimleri dönüşümü bu sekme sayesinde yapılabilir (Şekil 4.4). İkinci olarak "Check" sekmesiyle çağrılan geometrinin sınır uzunluk değerleri, yüzey ve hacim istatistik değerleri kontrol edilir. Eğer negatif bir hacim değeri görülürse geometri düzenlemesine gidilir ve gerekli düzeltmeler yapılır. Son olarak ise "Report Quality" sekmesi yardımıyla çözüm ağı yapısı kalitesine bakılır (Şekil 4.5). Ayrıca parametrik çalışmalar için zamandan bağımsız (steady-state) ve zamana bağlı çözüm yapılmıştır. Plazma tabancasının giriş bölgesi ve plazma kolonunun olduğu bölgede akış sıkıştırılamazken ($Ma < 0,3$), tabanca çıkışında sıkıştırılabilir. Literatüre de bağlı kalınarak akış sıkıştırılamaz olarak kabul edilmiştir ve basınç tabanlı (Pressure-based) çözücü kullanılmıştır (Şekil 4.6).



Şekil 4.4. Boyut kontrolü

```

Domain Extents:
  x-coordinate: min (m) = -3.552714e-15, max (m) = 1.800000e-02
  y-coordinate: min (m) = -3.427269e-03, max (m) = 3.427118e-03
  z-coordinate: min (m) = -3.428102e-03, max (m) = 3.424758e-03
Volume statistics:
  minimum volume (m3): 1.799282e-13
  maximum volume (m3): 6.720027e-12
  total volume (m3): 2.862422e-07
Face area statistics:
  minimum face area (m2): 4.895166e-09
  maximum face area (m2): 7.713529e-08
Checking mesh.....
Done.

Mesh Quality:

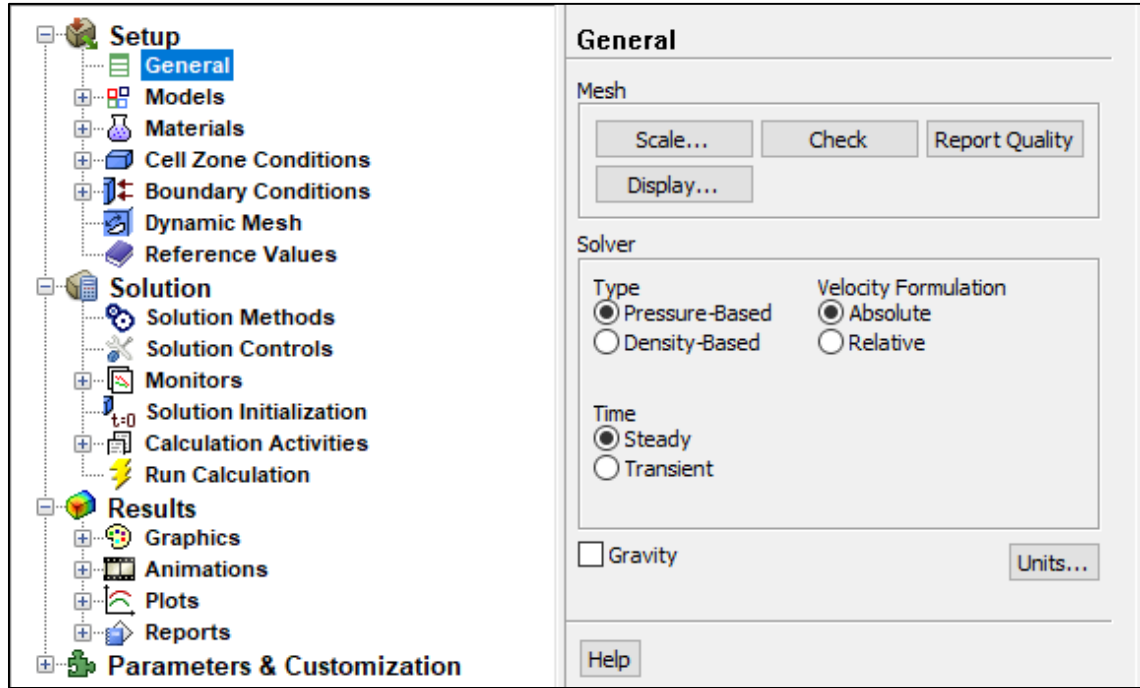
Minimum Orthogonal Quality = 3.61920e-01
(Orthogonal Quality ranges from 0 to 1, where values close to 0 correspond to low quality.)

Maximum Ortho Skew = 5.92780e-01
(Ortho Skew ranges from 0 to 1, where values close to 1 correspond to low quality.)

Maximum Aspect Ratio = 1.09054e+01

```

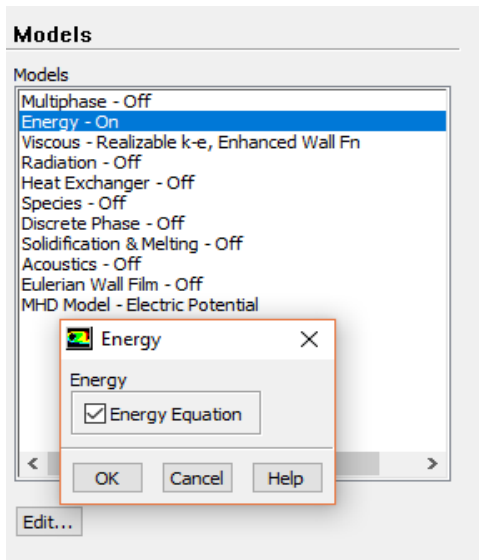
Şekil 4.5. Ağ yapısının kontrolü



Şekil 4.6. Genel ayarların görüntüsü

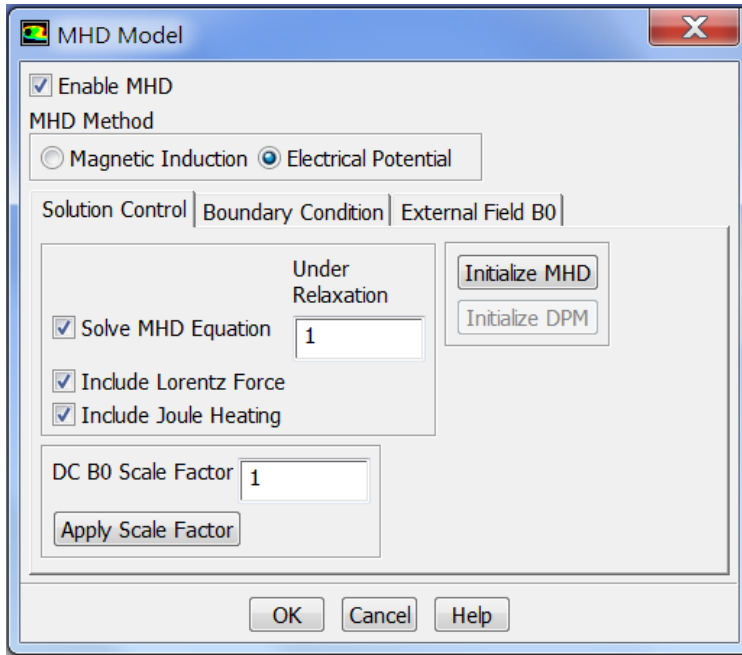
4.3. Enerji ve Manyetik Alan Denklemlerinin Çözümü

Modelimizde giriş, çıkış, duvar sınır şartlarına sıcaklıklar tanımlandığı için “Energy” paneli aktif hale getirilerek enerji denklemleri çözülmüştür (Şekil 4.7). Ark akışı ile plazma akışı arasındaki birleşmiş etkileşimler türbülans modeli ile birlikte manyetohidrodinamik denklemleri çerçevesinde tanımlanmıştır.



Şekil 4.7. Enerji modeli paneli

Plazma hali elektriksel alandan etkilenmekte ve bu durum akış üzerinde etkili olmaktadır. Bu çalışmada ANSYS Fluent'deki (MHD) modülü, plazma tabancası çalışma akışkanı olan argon ve elektrik alan arasındaki ilişkiyi sunmak için kullanılmıştır. Manyetohidrodinamik panelinde “Solve MHD Equation, Include Lorentz Force ve Include Joule Heating” seçenekleri aktif olarak çözümler yapılmıştır. Katot ucundan elektrik arkı oluşumu için “Electrical Potential” seçeneği tanımlandı. Kullanılan manyetohidrodinamik model paneli Şekil 4.8’te gösterilmiştir. “Electrical Potential” seçeneği tanımlandı.

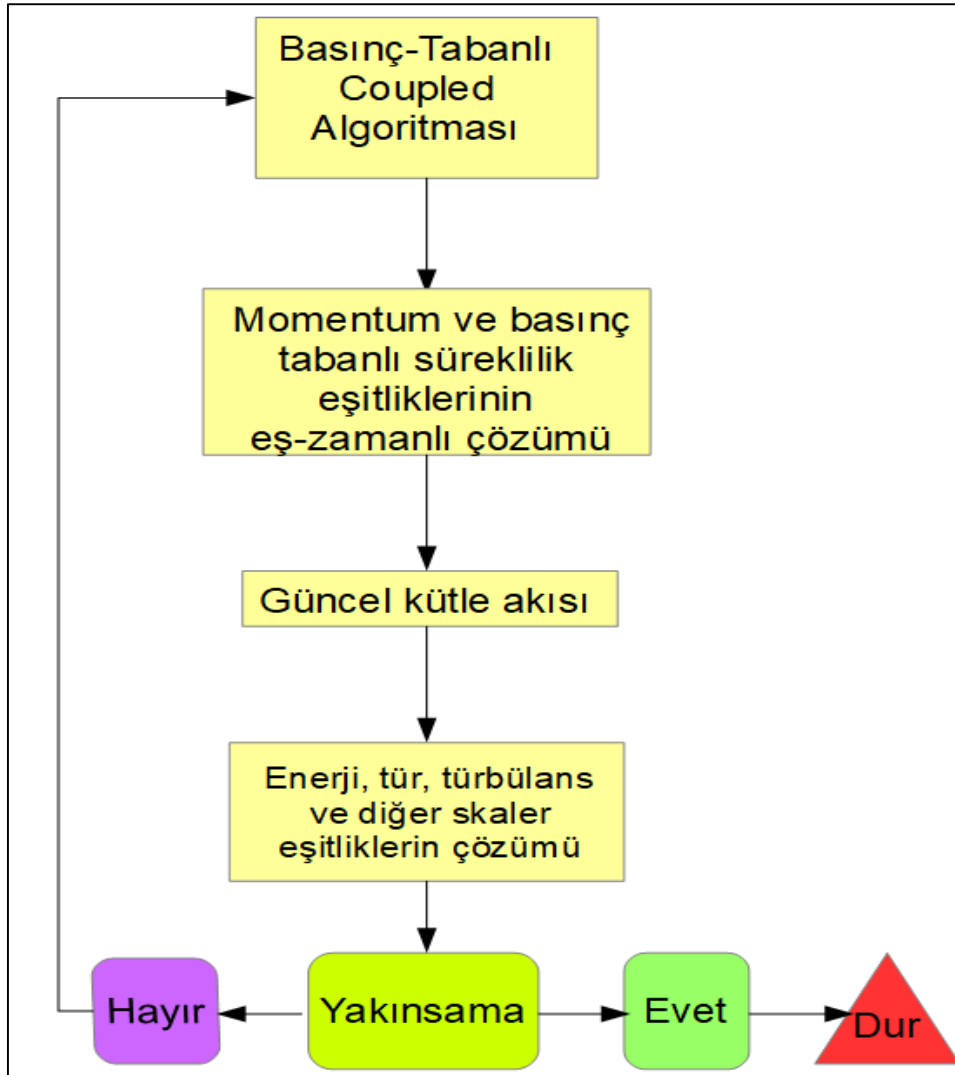


Şekil 4.8. Manyetohidrodinamik paneli

4.4. Çözücü Ayarları

Fluentte, genel olarak SIMPLE, SIMPLEC, PISO ve COUPLED olmak üzere 4 farklı basınç-hız eşlenik çözüm seçeneği vardır. Bu problemin çözümünde COUPLED algoritması kullanılmıştır. Basınca dayalı coupled algoritması, momentum denklemlerini ve basınca dayalı süreklilik denklemini içeren denklemlerin birleştirilmiş sistemini çözer. Coupled algoritmasında momentum ve süreklilik denklemleri yakından bağlantılı bir şekilde çözüldüğünden, çözüm yakınsama oranı segregated algoritması ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde iyileşir. Bununla birlikte, hafıza gereksinimi, segregated algoritmaya göre 1.5-2 kat artar çünkü hız ve basınç alanları için (sadece tek bir denklem yerine) tüm momentum ve basınca dayalı süreklilik denklemlerinin ayrı sistemleri hafızada saklanır [38].

COUPLED algoritmasının uyguladığı temel işlem ise aşağıdaki gibidir.



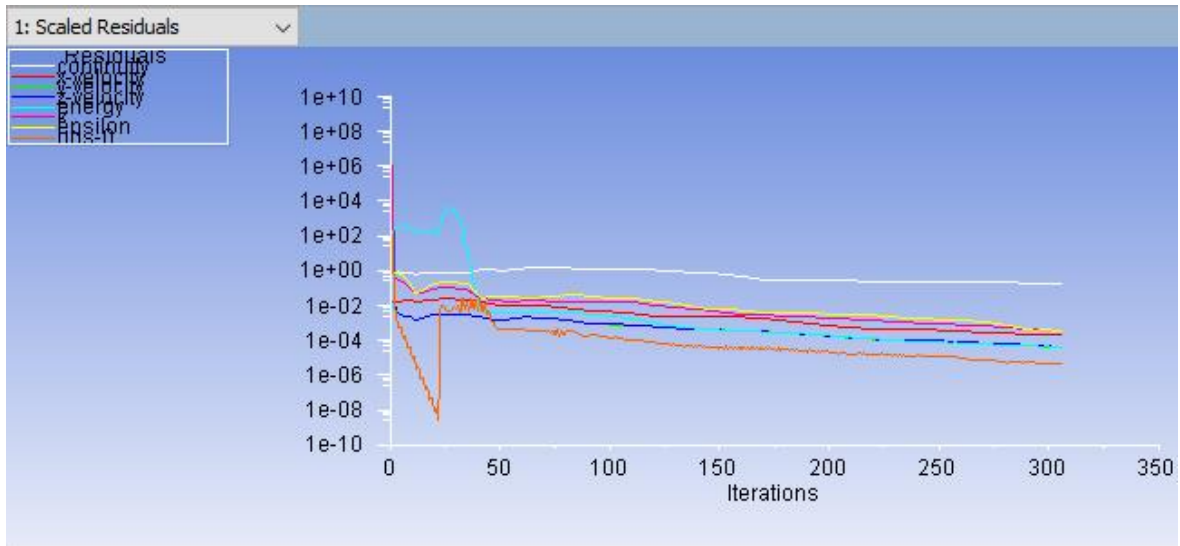
Şekil 4.9. Coupled algoritması şeması [38]

4.5. Yakınsama Kontrolü

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiğinde yazılımları kullanarak birden fazla sayısal çözüme kısa bir sürede ulaşmak mümkündür. Ancak elde edilen sonuçların doğru olabilmesi için fiziksel kanunlara ve fiziksel olaylara uygun olmalıdır. Bu gibi sebeplerden dolayı elde edilen çözümleri doğrulamak ve iyileştirmek için farklı tanımlarla, farklı çözücüler yardımıyla analiz birçok defa tekrarlanabilir. Sonuçların doğruluğu için ise bazı kontrollerin yapılması gerekir ve bunlar alt başlıklarda anlatılmıştır.

4.5.1. Çözümün yakınsaması

Yakınsama, sayısal çalışmalarda kullanılan her bir nokta için tüm korunum denklemlerinin çözüm alanındaki her noktada dengeye geldiğinde gerçekleşir. Çözümün yakınsadığı bütün değişkenlerin rezidüleri monoton veya değişken bir azalma göstermesiyle anlaşılır. Kullanılan ANSYS FLUENT programında iterasyon sayısına bağlı olarak tüm değişkenler için rezidü grafikleri elde edilebilir. Elde edilen rezidü miktarları ise çözümde oluşan hatanın oranı hakkında bize bilgi vermektedir. Rezidü miktarları programa tanıtılarak istenilen hassasiyete ve istenilen hata oranına ulaşana kadar çözümün devam etmesi sağlanır.

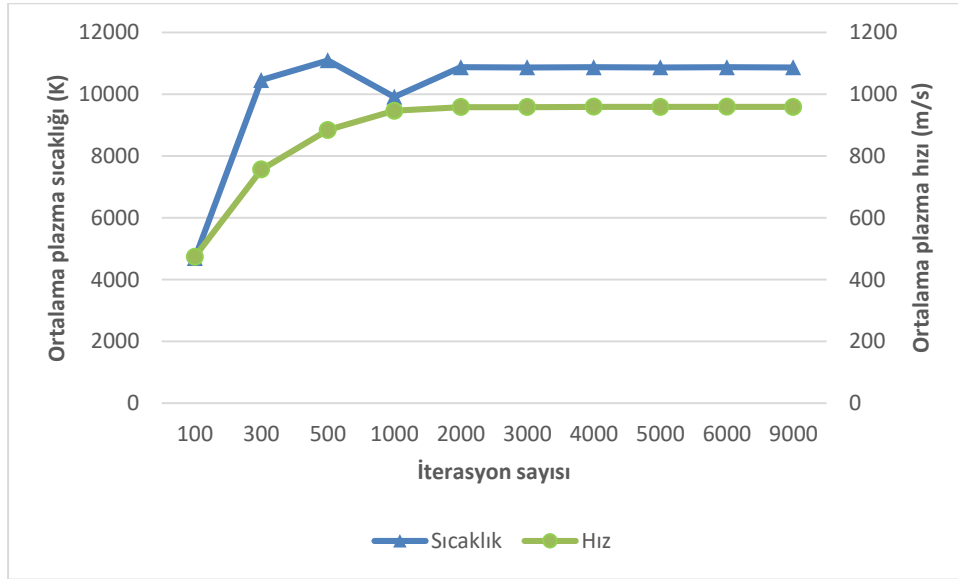


Şekil 4.10. Örnek çözümün rezidü grafiği

4.5.2. Çözümün iterasyon sayısından bağımsızlığı

Doğru çözüme ulaşılabilmesi ve yakınsamanın gerçekleşmesi iterasyon sayısı ile yakından ilişkilidir. Bazı problemlerde 100 iterasyon ile geçerli duruma gelinirken bazı problemlerde ise 10 000 iterasyonla bile geçerli duruma ulaşılamayabilir. Bu sebepten dolayı yapılan çalışmalarda iterasyon sayısı değiştirilerek yakınsamanın ve incelenen sonucun iterasyonla değişimi gözlemlenir. Bu sayede iterasyon sayısının değişimi ve artışıyla belli bir iterasyon sayısından sonra yakınsamanın değişmediğini veya devam ettiğini gözlemlenir. Yakınsamanın değişmediği iterasyon sayısı yapılacak çözümler için referans değer olarak alınır ve tüm çözümlemelerde bu iterasyon sayısı kullanılır. Böylece doğru sonuca optimum iterasyon sayısı ile daha hızlı bir şekilde ulaşılmış olur.

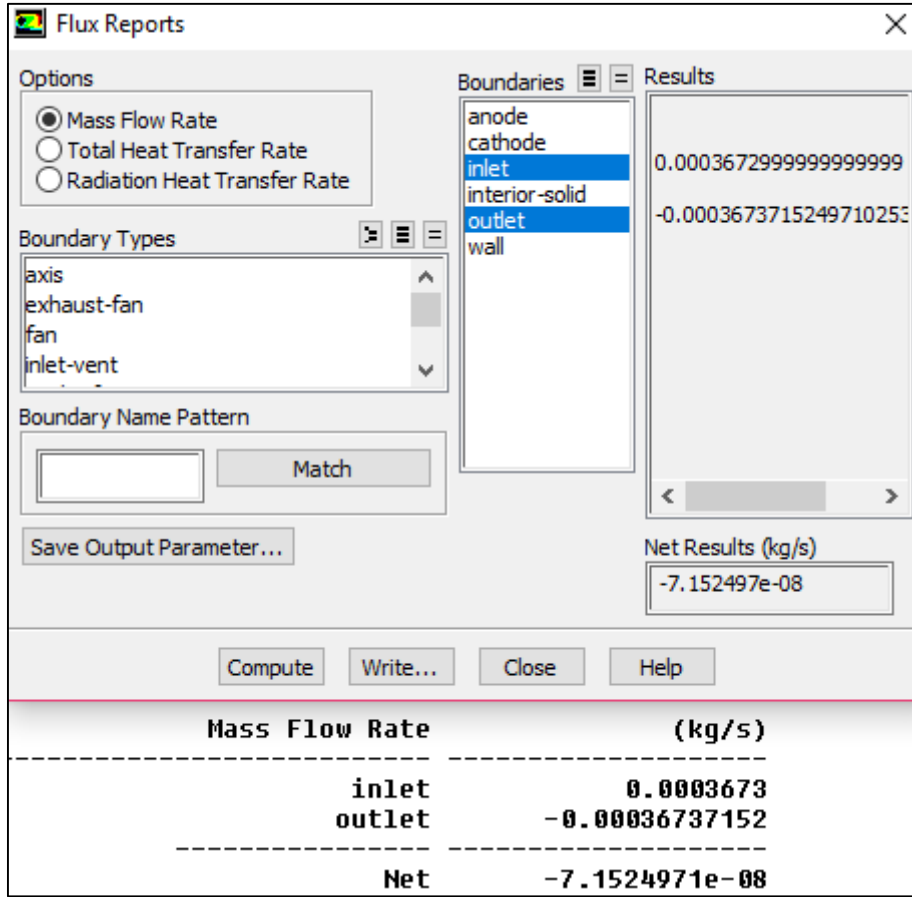
Şekil 4.11 bu çalışma için plazma tabancası çıkış kesitinde ortalama olarak elde edilen plazma sıcaklığının ve hızının iterasyon sayısı ile değişim grafiği verilmiştir. Ortalama sıcaklık ve hız değerleri plazma tabancası çıkış kesitinde yer alan 107 noktanın sıcaklık değerleri ile hesaplanmıştır. Çözümün yaklaşık 2 000 iterasyondan sonra iterasyon sayısı ile değişmediği görülmüş ve diğer tüm çözümlemeler için iterasyon sayısı 7 000 olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.11. Plazma tabancası çıkış kesitinden alınan ortalama plazma sıcaklığı ve plazma hızının iterasyon sayısı ile değişimi

4.5.3. Korunum denklemlerinin kontrolü

Çözümün yakınsadığını ve iterasyon sayısından bağımsızlaştığı şartı sağlandıktan sonra problemin çözümünün kütle korunum denklemlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir.



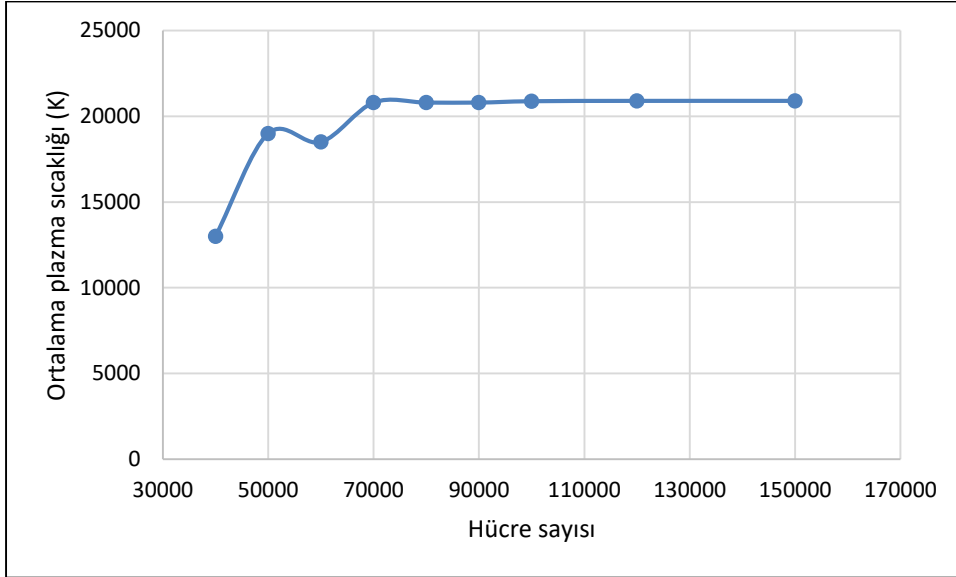
Şekil 4.12. Örnek bir çözüm için kütlenin korunumu paneli

4.5.4. Çözümün hücre sayısından bağımsızlığı

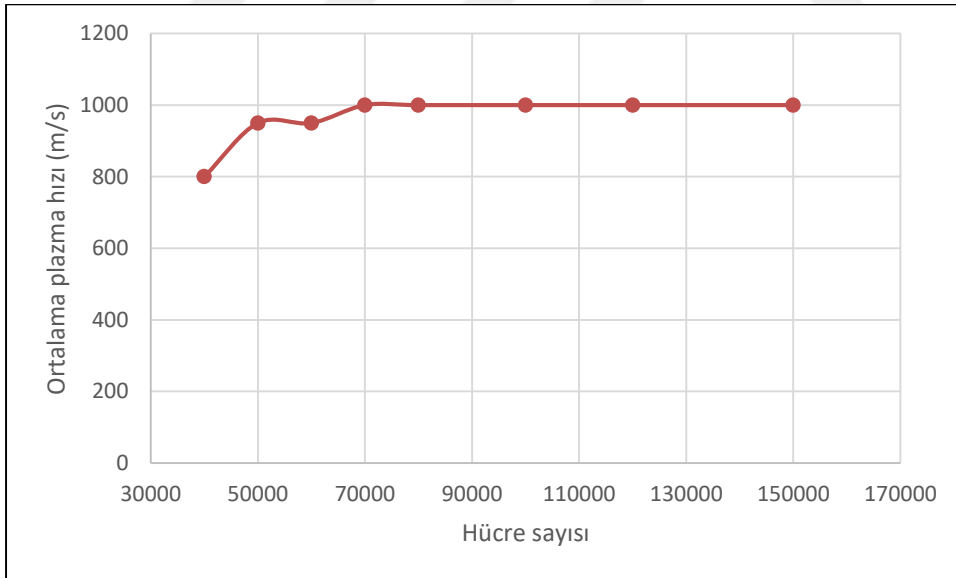
Çözümün yakınsaması, iterasyon sayısından bağımsızlığı ve korunum denklemlerini sağlayıp sağlamadığına bakıldıktan sonra çözümün hücre sayısından bağımsız olup olmadığına bakılarak bu şart sağlanır. Hücre sayısı ve dağılımı sonuçları doğrudan etkileyen bir faktördür. Bundan dolayı elde edilen yeni sonucun bir önceki sonuçla aynı olması durumuna ulaşana kadar ya da çok az değişiklikler gösterene kadar hücre sayısı değiştirilerek bu şart sağlanmaya çalışılır. Elde edilen sonuçlar dikkate alınarak en uygun hücre yapısı ve sayısı belirlenir, böylece çözüm hücre sayısından bağımsızlaştırılır.

Yapılan bağımsızlaştırma çalışmaları için 40 000 ile 150 000 arasında değişen hücre sayıları kullanılmıştır. Çıkış kesitinde oluşan ortalama plazma sıcaklığı ve plazma hızı değerleriyle uygun hücre sayısı belirlenmiştir. Ortalama plazma sıcaklığı ve hızı hesaplanırken plazma tabancası çıkış kesitinde yer alan noktaların sıcaklık ve hız verileri dikkate alınmıştır. Çalışmada 80 000 ile 130 000 arasında değişen hücre sayısı kullanılmıştır.

Şekil 4.13 ve şekil 4.14 ortalama plazma sıcaklığı ve plazma hızının hücre sayısı ile değişimini göstermektedir.



Şekil 4.13. Plazma tabancası çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığının hücre sayısı ile değişimi



Şekil 4.14. Plazma tabancası çıkış kesitindeki ortalama plazma hızının hücre sayısı ile değişimi

5. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada DC plazma tabancası modellenmiştir. Çalışma akışkanı olarak kolay plazma haline geçebilen Ar gazı kullanılmıştır. Plazma tabancası içerisindeki akış, manyetik alan kuvvetleri dikkate alınarak incelenmiştir. Çalışmada akım, hacimsel debi, anot duvarı uzunluğu, tabanca çıkış çapı değişimlerinin plazma tabancası içerisinde oluşan plazma sıcaklığı, hızı, çıkış sıcaklığı ve hızı, ark oluşum noktası, ark boyu, anot duvarı üzerinde oluşan sıcaklık değerleri ve plazma tabancasının verimi üzerine etkileri araştırılmıştır. Anot duvarı üzerinde sınırlı bir noktada oluşan ark bağlantı noktası “Joule ısınması” etkisinden dolayı zamanla anodun aşınmasına neden olmaktadır. Bu nedenle anot üzerinde oluşan ark bağlantı noktasının yeri, anot duvarı üzerinde oluşan sıcaklık değerleri ve bu değerlerin hangi aralıklarda yoğunlaştığı hangi parametrelere bağlı olduğu bilinmesi gerekir.

5.1. Elde Edilen Verilerin Literatürle Karşılaştırılması

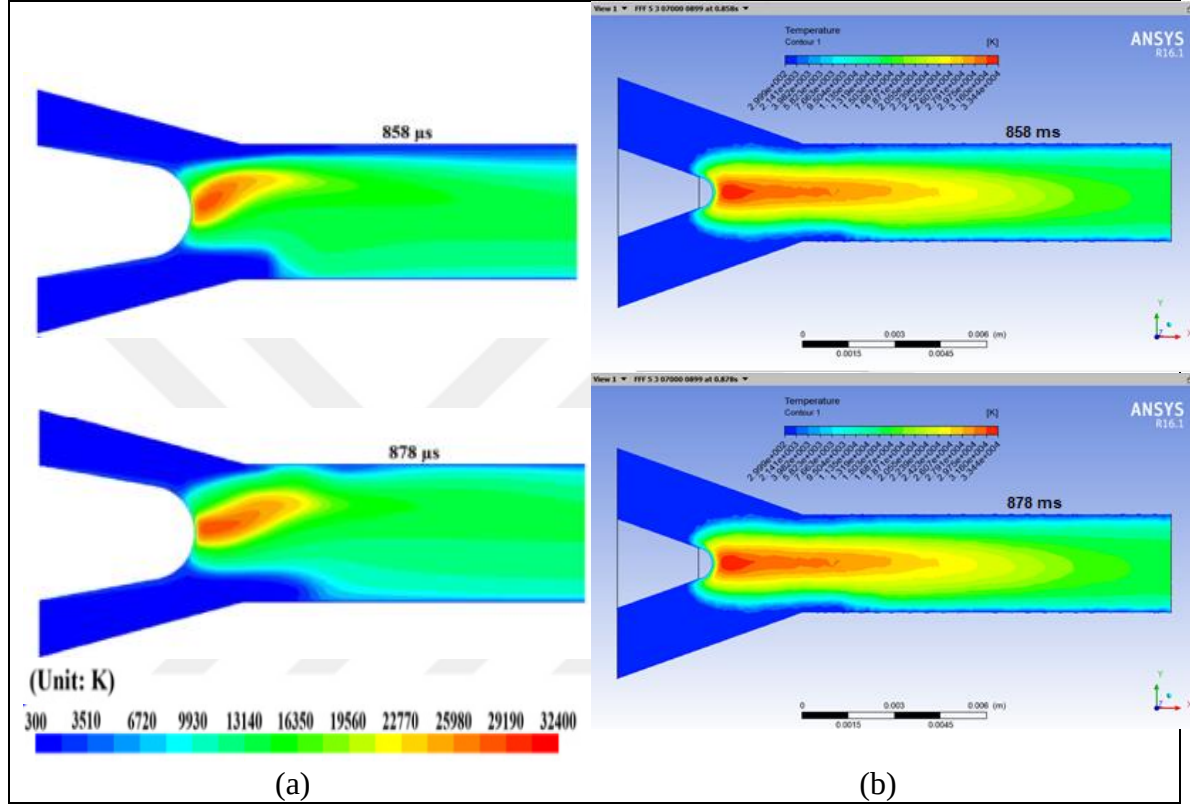
R. Huang vd.nin yaptığı çalışma ile bu çalışma karşılaştırılmıştır. Karşılatırmada, bu çalışmada oluşturulan modele R. Huang vd.nin çalışmalarında kullandıkları sınır şartları uygulanmıştır. R. Huang vd.nin [25] sınır şartı olarak kullandıkları değerler Çizelge 5.1’de verilmiştir. Sonuçlar karşılaştırıldığında uyum içinde olduğu görülmektedir. 50 SLM gaz debisi, 300 K giriş sıcaklığı, 500 A ($2,08 \times 10^8$ A/m²) akım değeri, katot sıcaklığı 3 000 K, anot duvar sıcaklığını konveksiyon olarak tanımlamışlardır ve taşınım katsayısını 10^5 W/m².K, soğutma suyunun sıcaklığını 500 K olarak almışlardır.

Çizelge 5.1. R. Huang vd.nin çalışmalarında kullandıkları sınır şartları

Sınır şartları	P (atm)	V (SLM)	T (K)	ϕ (A)	A (T.m)
Giriş	P_{in}	50 SLM	300	$\partial\phi n = 0$	0
Katot	$\partial P n = 0$	0	3 000	j (r)	$\partial A n = 0$
Anot	$\partial P n = 0$	0	$h_w(T-T_w)$	0	$\partial A n = 0$
Çıkış	1	$\partial V n = 0$	$\partial T n = 0$	$\partial\phi n = 0$	$\partial A n = 0$

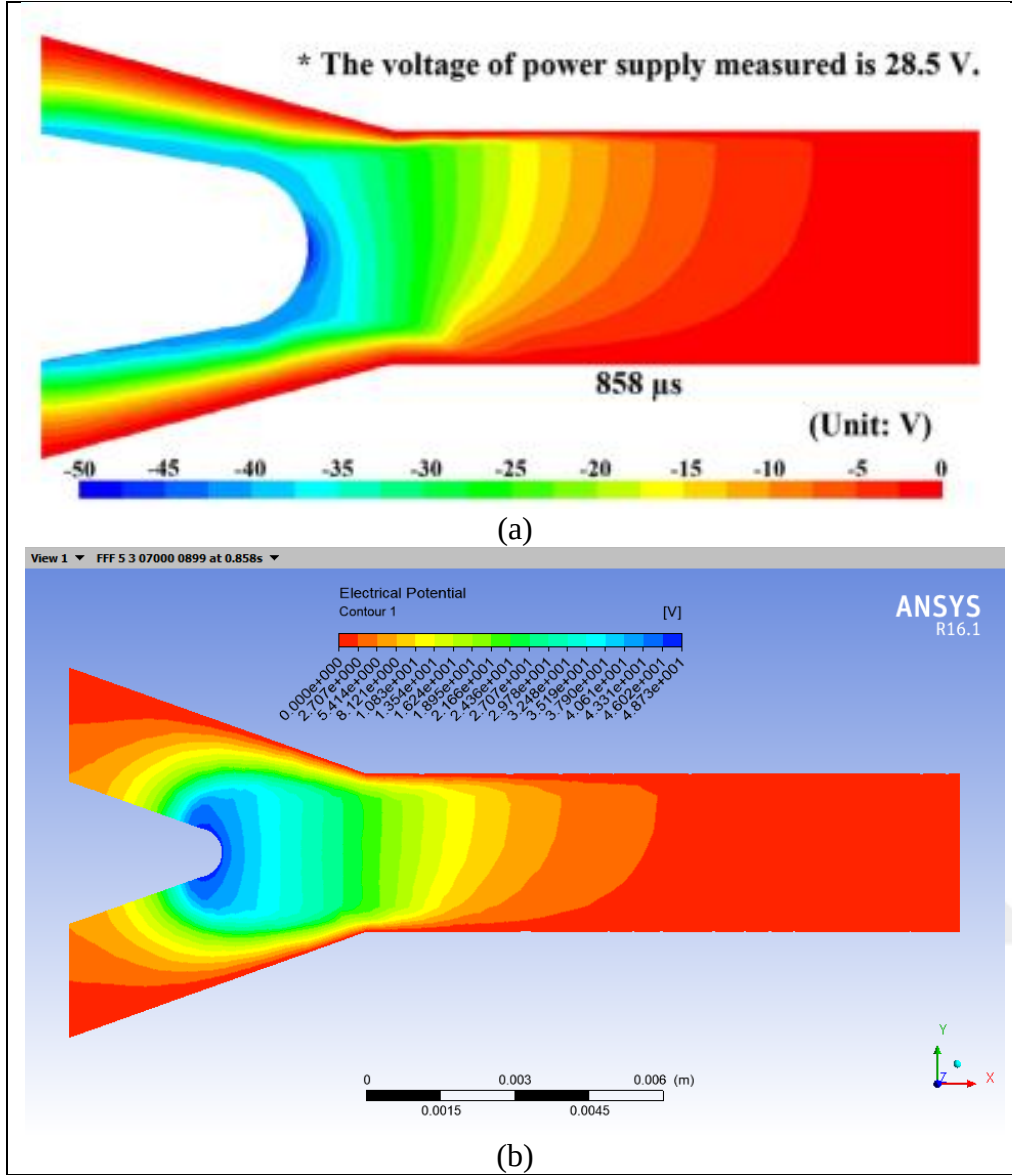
R. Huang vd.nin çözümleme sonucunda elde ettikleri plazma sıcaklık dağılımı ve bu çalışmada elde edilen plazma sıcaklık dağılımı Şekil 5.1’de verilmiştir. Şekil 5.1’de görüldüğü gibi maksimum plazma sıcaklıklarının ve plazma tabancası içerisindeki plazma

sıcaklık dağılımının birbirlerine yakın oldukları görülmektedir. R. Huang vd.nin çalışmalarında plazmanın maksimum sıcaklığını 32 400 K olarak elde etmişlerdir. Bu çalışmada ise maksimum plazma sıcaklığı 33 440 K olarak elde edilmiştir. Plazma sıcaklık dağılımlarının her iki çalışma içinde dalgalı olmadığı görülmektedir.



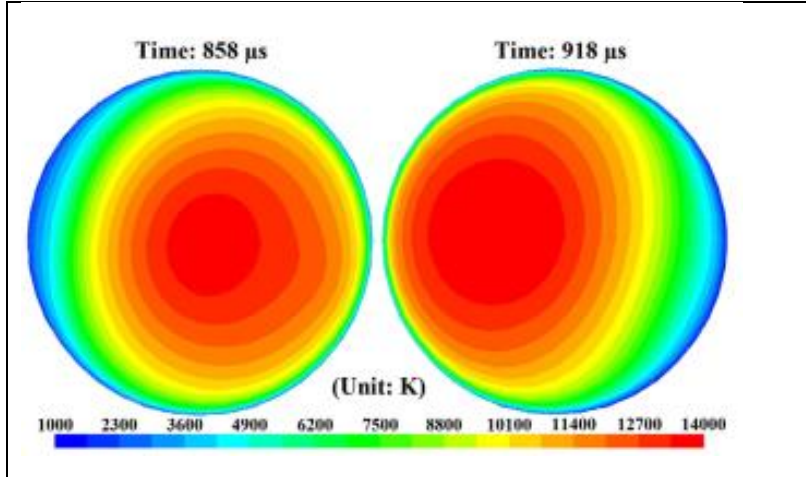
Şekil 5.1. Plazma sıcaklık dağılımı (a) R. Huang vd.nin çalışması (b) Bu tez çalışması

Şekil 5.2 bu çalışma ile R. Huang vd.nin yaptıkları çalışma sonucunda plazma tabancası içerisinde elde edilen elektrik potansiyeli dağılımını göstermektedir İki çalışmanın da elektrik potansiyelinin uyum içerisinde olduğu görülmektedir. R. Huang vd. çalışmalarında plazmanın maksimum elektrik potansiyelini 50 V olarak bulmuşlar. Bu çalışmada ise maksimum elektrik potansiyelini 48,7 V olarak elde edilmiştir. Her iki çalışmada da elektrik potansiyeli plazma tabancası çıkış kesitine doğru sıfır olduğu görülmektedir.

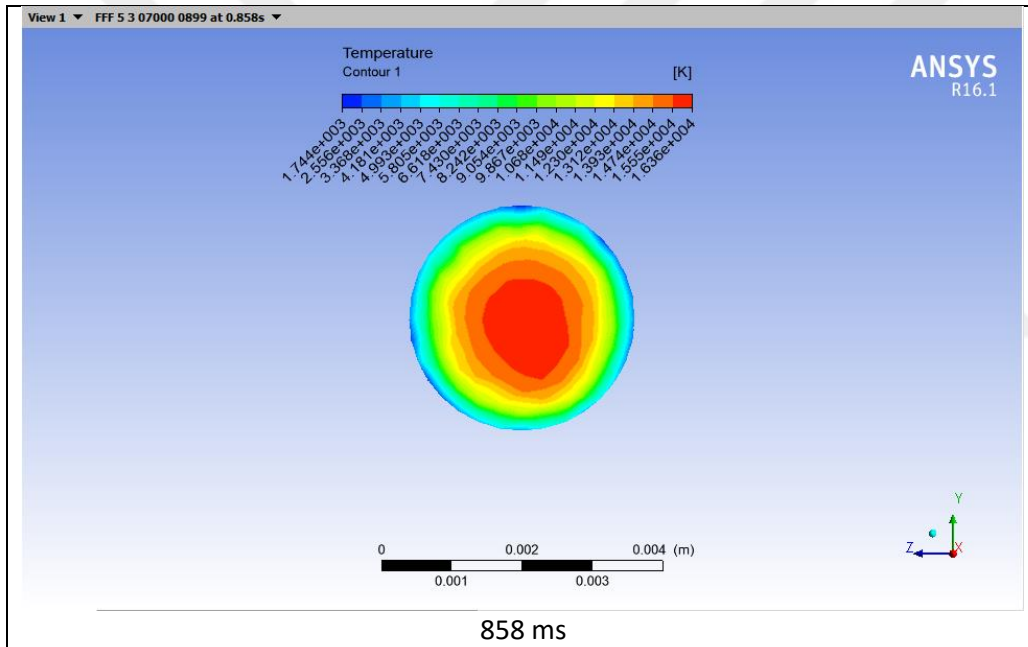


Şekil 5.2. Plazma elektrik potansiyeli dağılımı (a: R. Huang vd. nin çalışması b: Bu tez kapsamında yapılan çalışma)

Şekil 5.3 R. Huang vd.nin çalışmasında plazma tabancası çıkış kesitindeki sıcaklık dağılımı ve değerlerini göstermektedir. Şekil 5.4 bu çalışmada elde edilen plazma tabancası çıkış kesitindeki sıcaklık dağılımını ve değerlerini göstermektedir. Bu veriler karşılaştırıldığında uyum içerisinde olduğu görülmektedir. R. Huang vd. plazma tabancası çıkış kesitinde maksimum sıcaklığı 14 000 K olarak bulmuşlardır. Bu çalışmada ise çıkış kesitindeki maksimum sıcaklık 16 360 K olarak elde edilmiştir. Her iki çalışmada da çıkış kesitinde elde edilen sıcaklık konturleri ark oluşumundan dolayı simetrik olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.3. R. Huang vd.nin plazma tabancası çıkış kesiti sıcaklık dağılımı



Şekil 5.4. Bu çalışmadaki plazma tabancası çıkış kesiti sıcaklık dağılımı

He-Ping Li vd. [18], 3B ve yarı kararlı olarak modelledikleri DC ark plazma tabancası için Çizelge 5.2’de verilen değerleri elde etmişlerdir. Çalışma akışkanı olarak argon gazını kullanmışlardır. Anot duvarı sınır şartı olarak konveksiyon tanımlamışlardır. Gaz debisi sabit tutularak, akım değerinin artırılmasıyla ark boyunun kısaldığını, çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığı, ortalama plazma hızı ve ark voltajının arttığını görmüşlerdir. Akım değerinin sabit tutularak gaz debisinin artırılmasıyla çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığı, ortalama plazma çıkış hızı, ark voltajı ve ark boyunun uzadığını görmüşlerdir. Bu çalışmada elde edilen sonuçların bir kısmı Çizelge 5.3’te verilmiştir. Akımın sabit tutulup hacimsel debinin artırılmasıyla çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığı, çıkış hızı, ark

voltajının arttığı ve ark boyunun uzadığı görülmüştür. Hacimsel debinin sabit tutulup akımın artırılmasıyla çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığı, çıkış hızı, ark voltajının arttığı ve ark boyunun kısaldığı görülmüştür. He-Ping Li vd.nin yapmış olduğu çalışma ile bu çalışmanın uyumlu olduğu görülmektedir. Her iki çalışmada da parametrelerin aynı şekilde değişmesiyle sonuçlarda aynı şekilde değiştiği görülmektedir.

Çizelge 5.2. He-Ping Li vd. nin çalışma sonuçları

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

Çizelge 5.3. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar

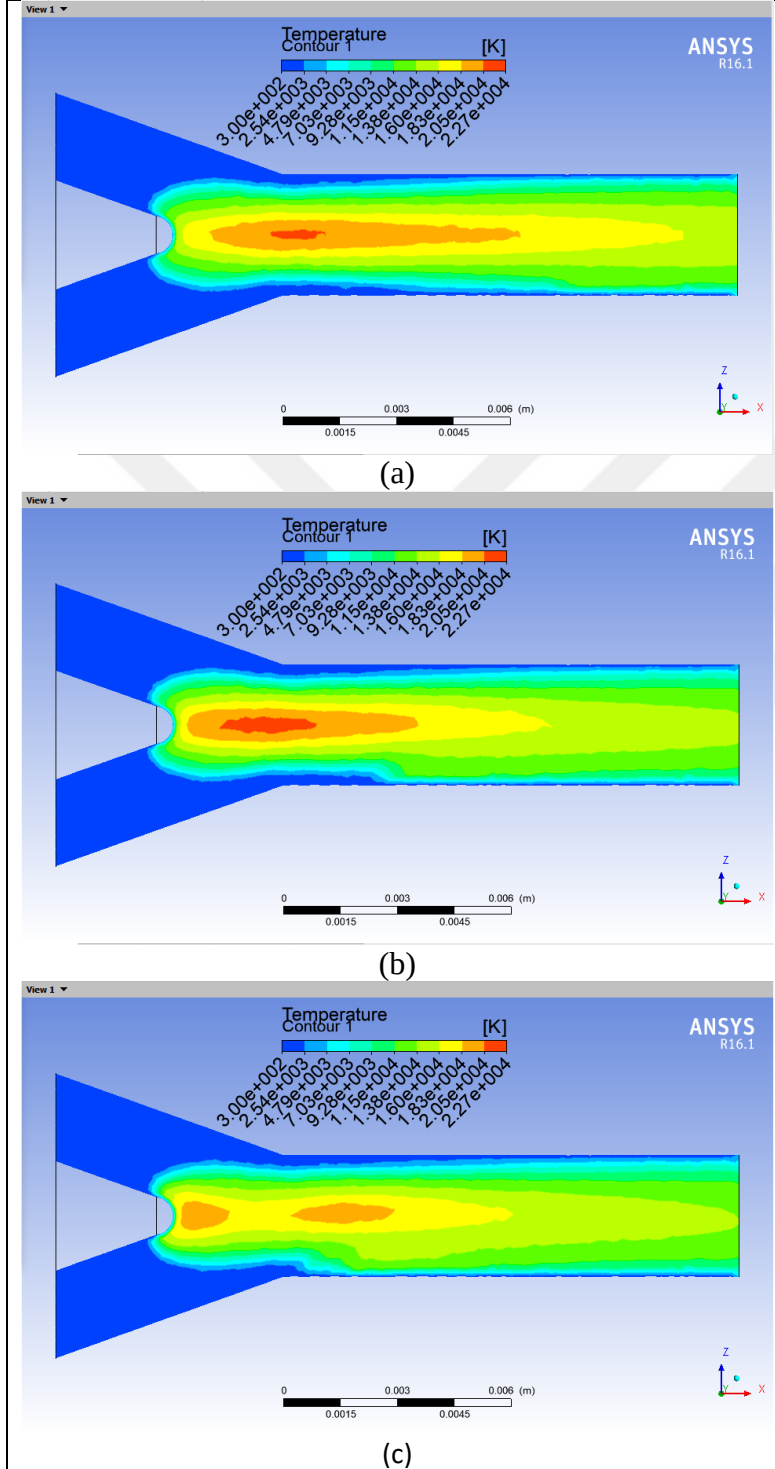
I (A)	Q (SLPM)	$\bar{T}_{m, \text{çıkış}}$ (K)	$\bar{U}_{m, \text{çıkış}}$ (m s ⁻¹)	L_{ark} (mm)	V_{ark} (V)
170	30	10 622	931	8,6	49,1
170	48	10 871	1 352	10,5	61,5
250	48	12 031	2 250	7,8	64,3

5.2. Zamana Bağlı ve Zamandan Bağımsız Çözümlerin Karşılaştırılması

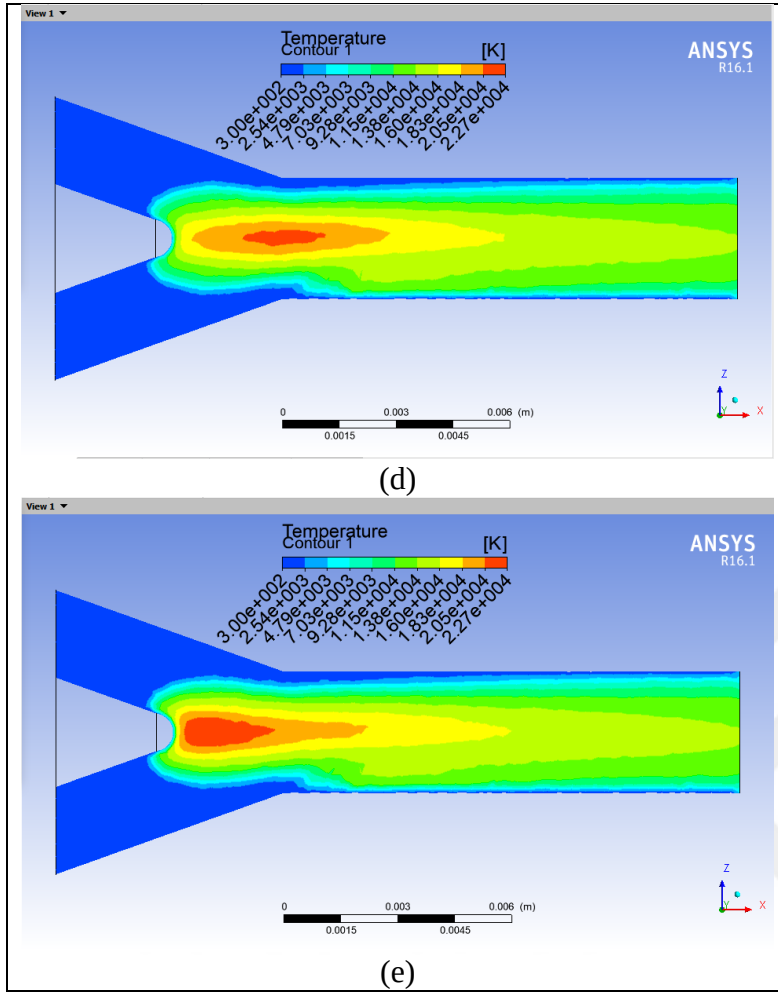
Çalışmanın bu bölümünde plazma tabancası zamana bağlı olarak ele alınıp öyle çözümlemeler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar zamandan bağımsız çözümler ile kıyaslandığında arada çok fark olmadığı görülmektedir. Bu nedenle çözümlemelere zamandan bağımsız devam edilmiştir. Zamana bağlı çözüm 45 ms'den sonra kararlı hale ulaştığı için karşılaştırmalar için zamana bağlı çözümde 100 ms'de elde edilen sonuçlar kullanılmıştır.

Şekil 5.5 30 SLPM 112 A'de zamana bağlı olarak farklı milisaniyelerde (ms) tabanca içerisindeki plazma sıcaklığını göstermektedir. Plazma maksimum sıcaklığında zaman değişimiyle bir değişiklik olmadığı görülmektedir. Plazma kolonunun 45 ms'den sonra plazma tabancası çıkış kesitine doğru aynı dağılımı gösterdiği görülmektedir ve buna

bakılarak plazma içerisindeki akışın 45 ms'den sonra kararlı bir hale gelmekte ve sonrasında dikkate değer bir değişim göstermediği söylenebilir.

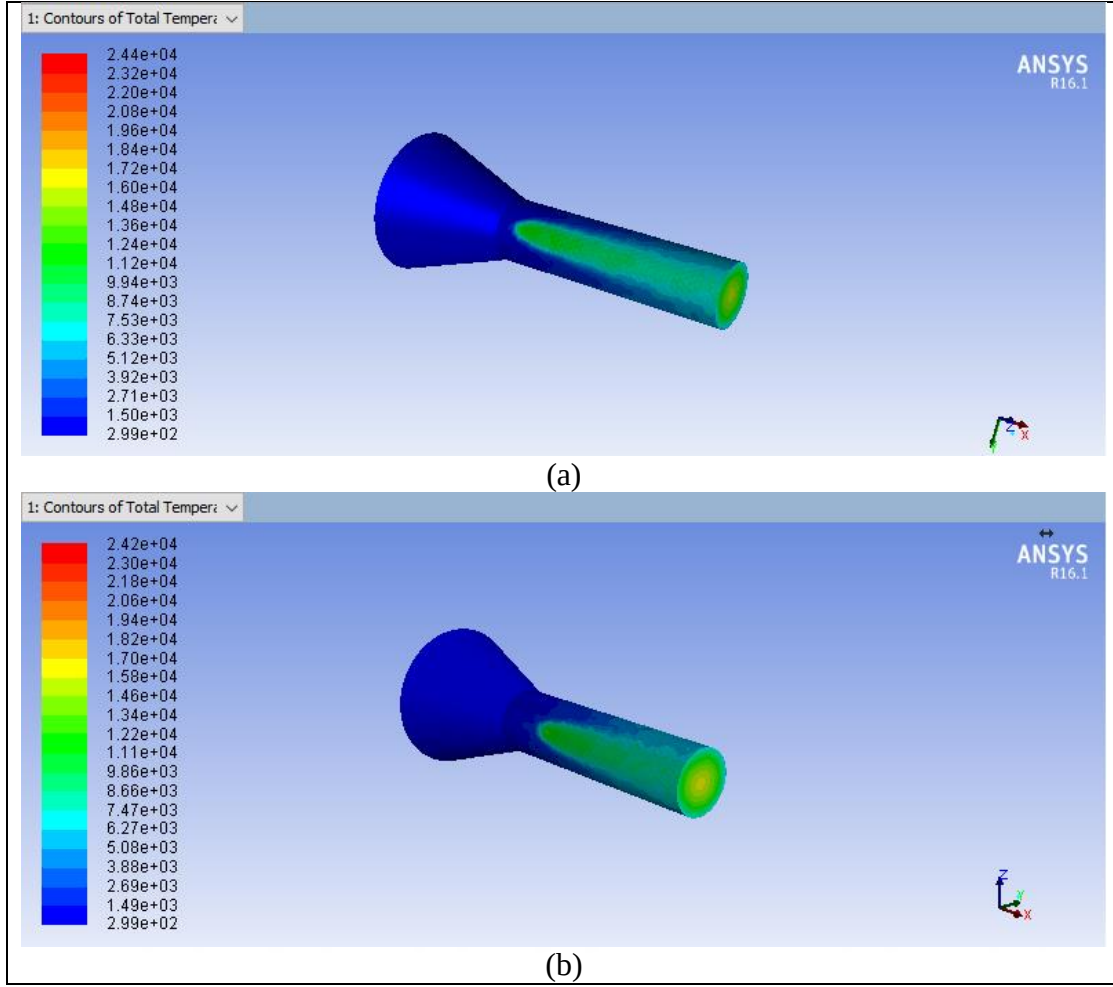


Şekil 5.5. Plazma tabancasında zamana bağlı olarak sıcaklık dağılımı (a:25 ms, b: 30 ms, c: 45 ms, d: 60 ms, e: 100 ms)



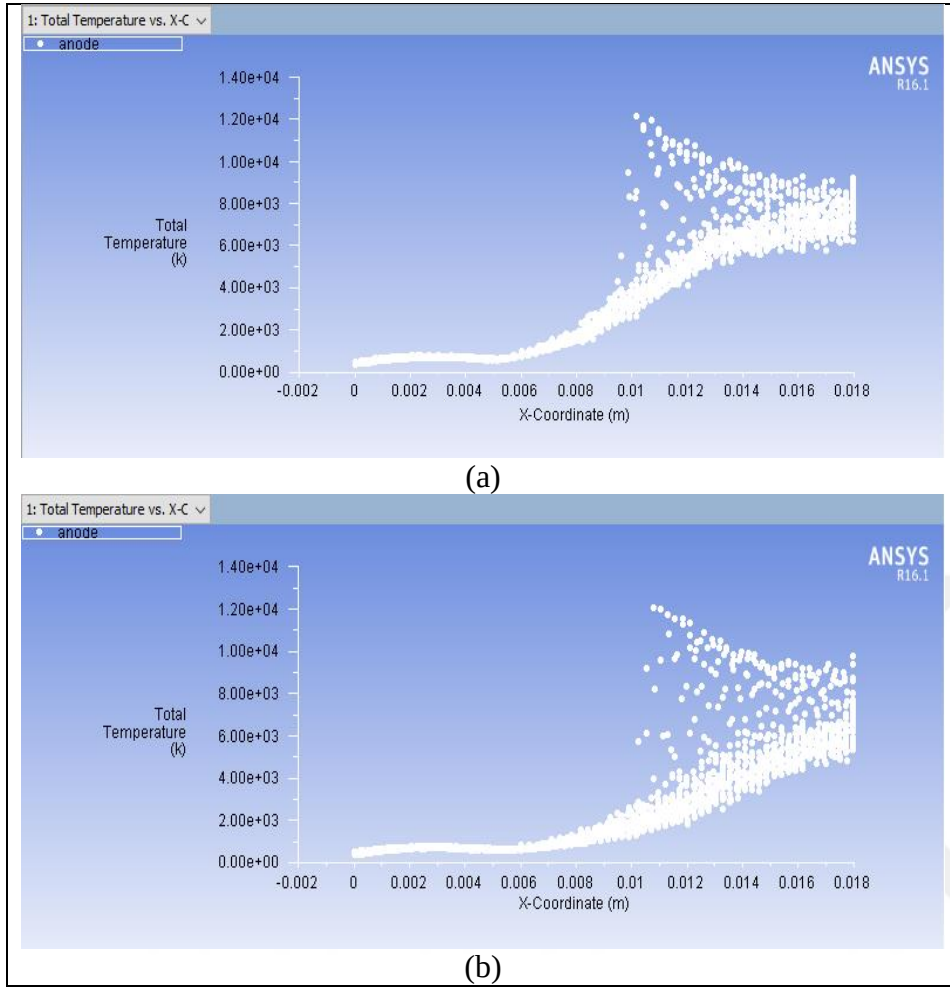
Şekil 5.5. (devam) Plazma tabancasında zamana bağlı olarak sıcaklık dağılımı (a:25 ms, b: 30 ms, c: 45 ms, d: 60 ms, e: 100 ms)

Şekil 5.6 30 SLPM 170 A'de zamana bağlı ve kararlı çözüm için ark oluşum bölgesini göstermektedir. Şekil 5.6 (a) plazma tabancasının 100 ms'deki zamana bağlı çözümüdür. Şekil 5.6 (b) plazma tabancasının zamandan bağımsız olarak yapılan çözümünü göstermektedir. İki çözüm için ark oluşum noktasının dikkate değer bir fark göstermediği görülmektedir. Plazma tabancasında oluşan maksimum sıcaklık değerleride birbirine çok yakındır.



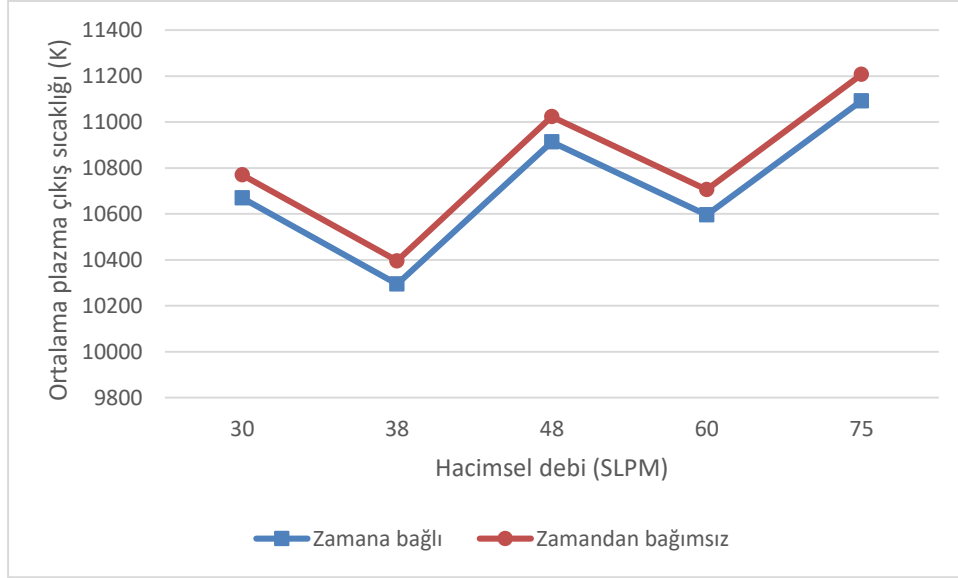
Şekil 5.6. 30 SLPM 170 A’de ark oluşum noktası (a: Zamana bağlı çözüm b: Kararlı çözüm)

Şekil 5.7 30 SLPM 170 A’de zamana bağlı (100 ms) ve kararlı çözüm için anot cidarının sıcaklık dağılımını göstermektedir. Anot cidarında oluşan maksimum sıcaklık anot ark bağlantı noktasını göstermektedir. Her iki çözüm içinde anot cidarında noktasal olarak oluşan maksimum sıcaklık 13 000 K civarında olduğu görülmektedir. Zamana bağlı çözümde (100 ms) noktasal olarak anot cidarında oluşan maksimum sıcaklık x ekseninde 10,1 mm’de zamandan bağımsız çözümde ise 10,6 mm’de olduğu görülmektedir. Böylece her iki çözüm içinde anot ark bağlantı noktasının dikkate değer bir fark göstermediği söylenebilir.



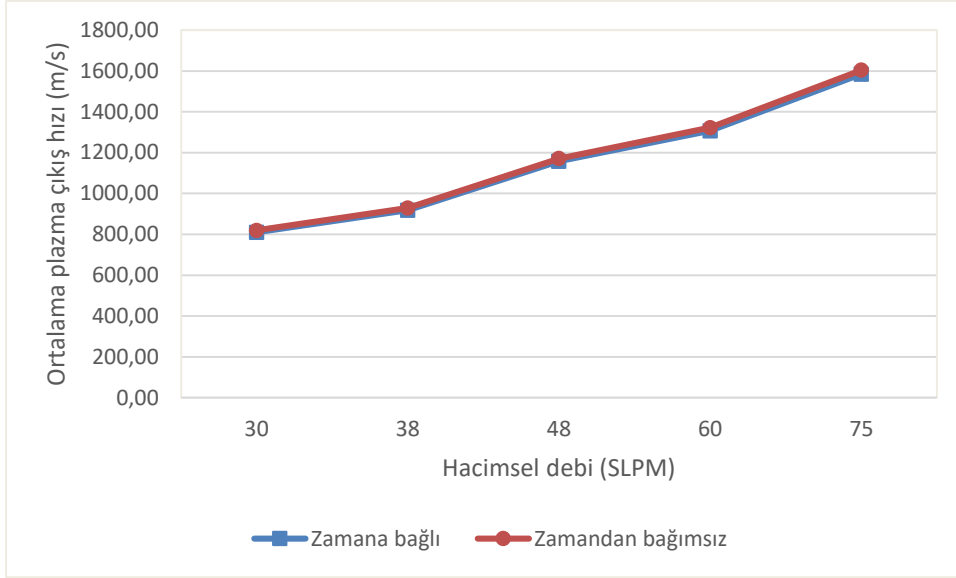
Şekil 5.7. 30 SLPM 170 A’de anot cidarının sıcaklık dağılımı (a: Zamana bağlı çözüm b: Zamandan bağımsız çözüm)

Şekil 5.8 farklı hacimsel debilerde sabit 112 A’de hem zamana bağlı (100 ms) hem de zamandan bağımsız olarak yapılan çözümlerden elde edilen plazma tabancası çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığı sonuçlarını göstermektedir. Ortalama plazma sıcaklığı çıkış kesiti üzerinde y eksenini doğrultusunda bulunan çap üzerindeki 80 noktadan alınan sıcaklık değerleri ile hesaplanmıştır. 30 SLPM’de zamana bağlı çözümde ortalama sıcaklık 10 670 K zamandan bağımsız çözümde 10 770 K olarak görülmüştür. Zamana bağlı ve zamandan bağımsız çözüm sonuçlarından elde edilen çıkış kesitindeki ortalama sıcaklık değerlerinin birbirine çok yakın olduğu ve dikkate değer bir fark olmadığı görülmektedir. Her iki çözümde de değişen hacimsel debiler, çıkış kesitindeki ortalama sıcaklık üzerine aynı değişimi göstermektedir.



Şekil 5.8. Plazma tabancası çıkış kesitinde elde edilen ortalama plazma sıcaklığı ile hacimsel debi grafiği

Şekil 5.9 farklı hacimsel debilerde sabit 112 A’de hem zamana bağımlı (100 ms) hem de zamandan bağımsız olarak yapılan çözümlerden elde edilen plazma tabancası çıkış kesitindeki ortalama plazma hızını göstermektedir. Ortalama plazma hızı çıkış kesiti üzerinde y ekseni doğrultusunda bulunan çap üzerindeki 80 noktadan alınan hız değerleri ile hesaplanmıştır. Zamana bağımlı ve zamandan bağımsız çözüm sonuçlarından elde edilen ortalama hız değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Her iki çözümde de değişen hacimsel debilerin ortalama çıkış hızı üzerine aynı değişimi göstermektedir.



Şekil 5.9. Plazma tabancası çıkış kesitinde elde edilen ortalama plazma hızı ile hacimsel debi grafiği

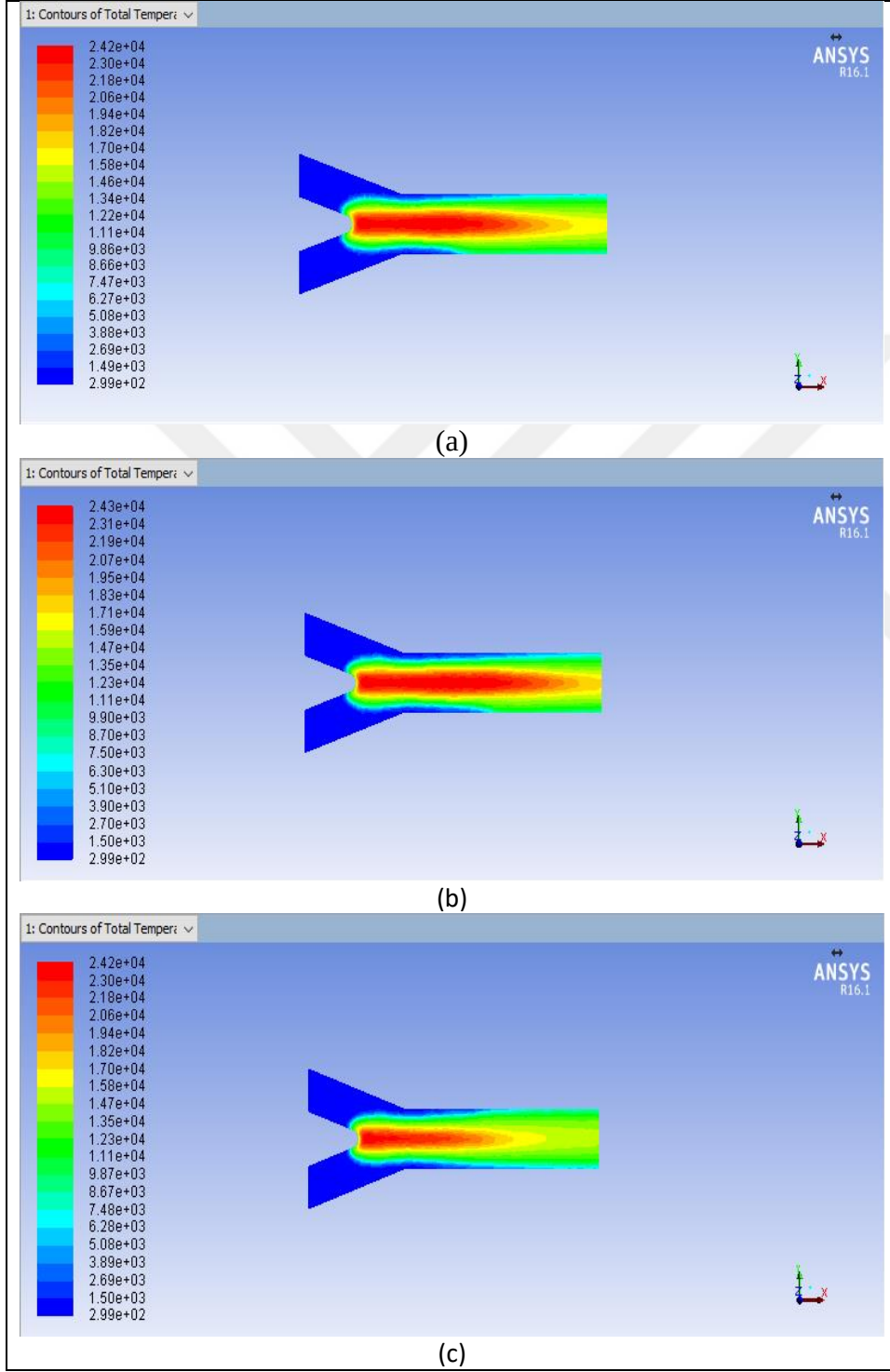
5.3. Sabit Akımda Farklı Debilerle Yapılan Analizler

Sabit akımda farklı hacimsel debilerle yapılan analiz sonuçları bu bölümde verilmiştir. Ar gazının tabanca içerisine giriş sıcaklığı 300 K olarak belirlenmiştir. Anot duvarının sıcaklığı 1000 K olarak tanımlanmıştır. Katot sıcaklığı değeri 3500 K olarak girilmiştir. Katot ucundan ark oluşumu için girilen akım değeri 170 A'dır. Hacimsel debiler 30, 38, 48, 60, 75 SLPM olarak seçilmiştir. Giriş basıncı 2 bar ve çıkış basıncı atmosfer basıncı olarak girilmiştir. Hacimsel debinin tabanca içindeki plazma akış alanı üzerine etkileri incelenmiştir.

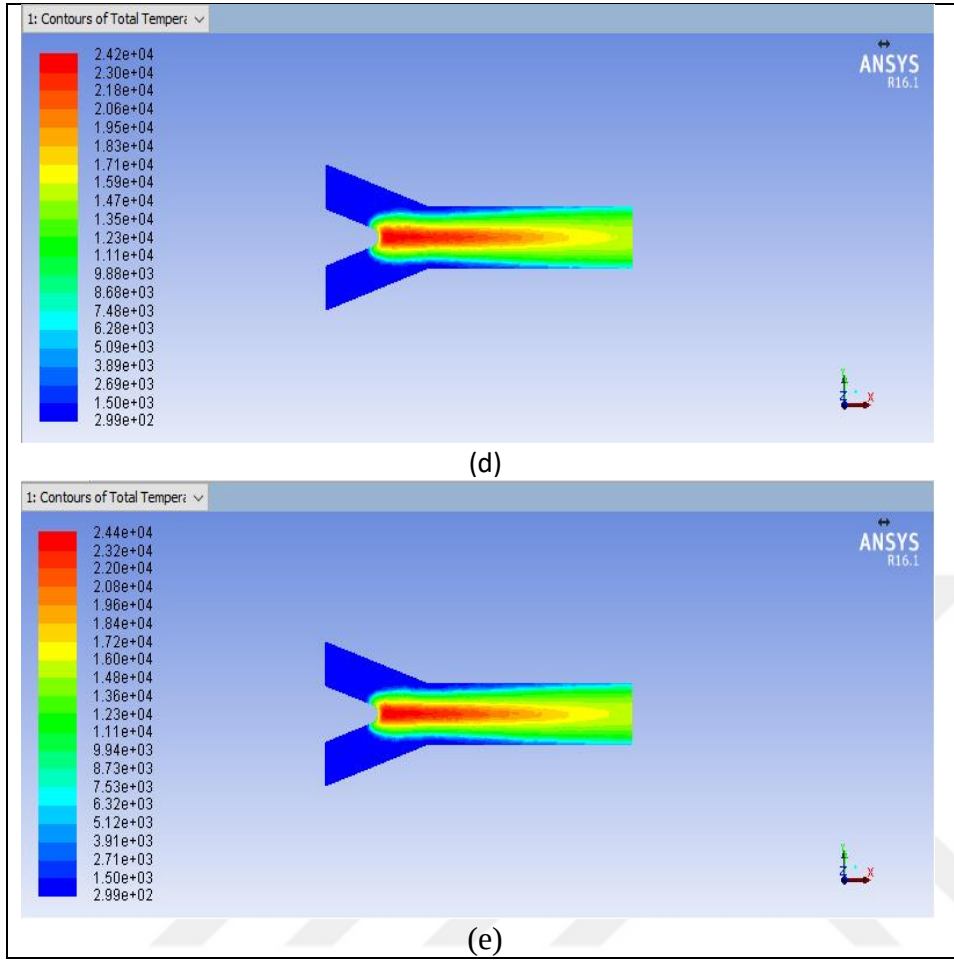
5.3.1. Plazma tabancası içinde oluşan plazma sıcaklığı dağılımı

Çalışmanın bu bölümünde tabanca içerisindeki plazma sıcaklık dağılımı incelenmiştir. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi maksimum sıcaklık değeri, değiştirilerek girilen tüm hacimsel debiler için yaklaşık olarak aynı kalmıştır. Doğru akım plazma tabancalarında oluşan elektrik arkları nedeniyle meydana gelen elektromanyetik alanlar özellikle katot elektrodunun yakınında sıcaklık dereceleri çok yüksek gradyanları oluşturur [21]. Maksimum plazma sıcaklığı tabanca içerisinde xy düzleminde alınan kesitte tüm hacimsel debiler için yaklaşık olarak 24 200 K ile 24 400 K arasında elde edilmiştir. Hacimsel debi değişiminin tabanca içindeki plazma sıcaklığının değişimi üzerine etkisi dikkate alınmayacak kadar az olduğu elde edilen sıcaklık konturlarından görülmektedir. Fakat şekil

5.10’da görüldüğü gibi plazma kolonunu (plasma column) etkilemektedir. X eksenine paralel olarak plazma tabancası içerisine giren hacimsel debinin artışı plazma kolonunun daralmasına yol açmıştır.

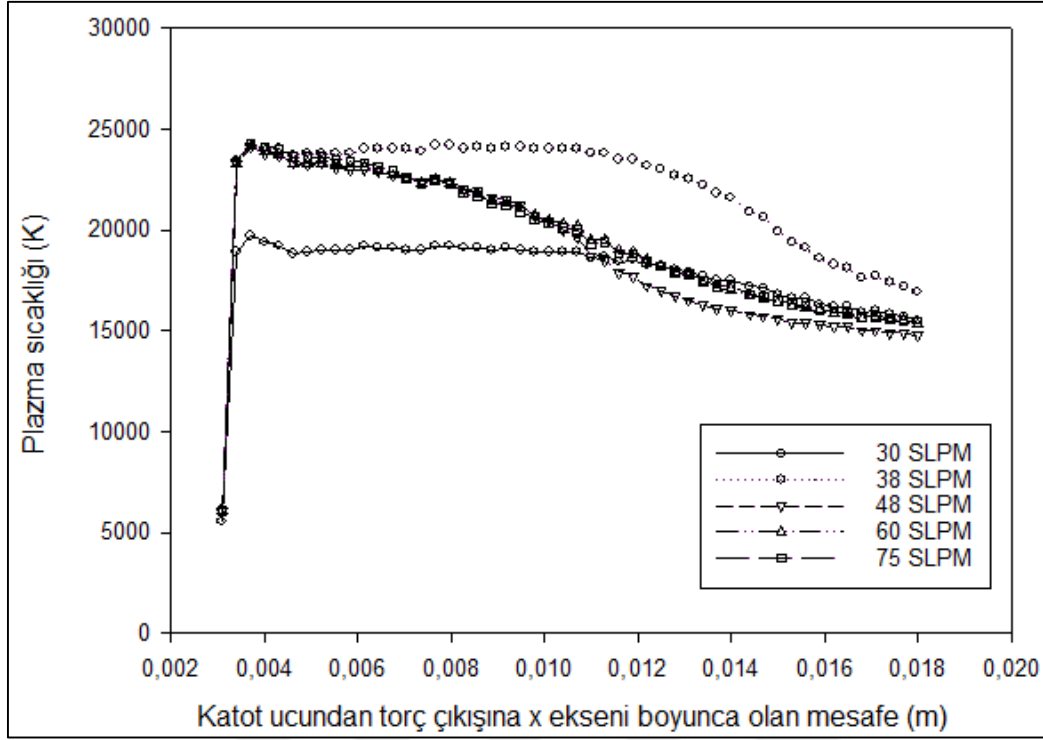


Şekil 5.10. Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma sıcaklığı dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)



Şekil 5.10. (devam) Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma sıcaklığı dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)

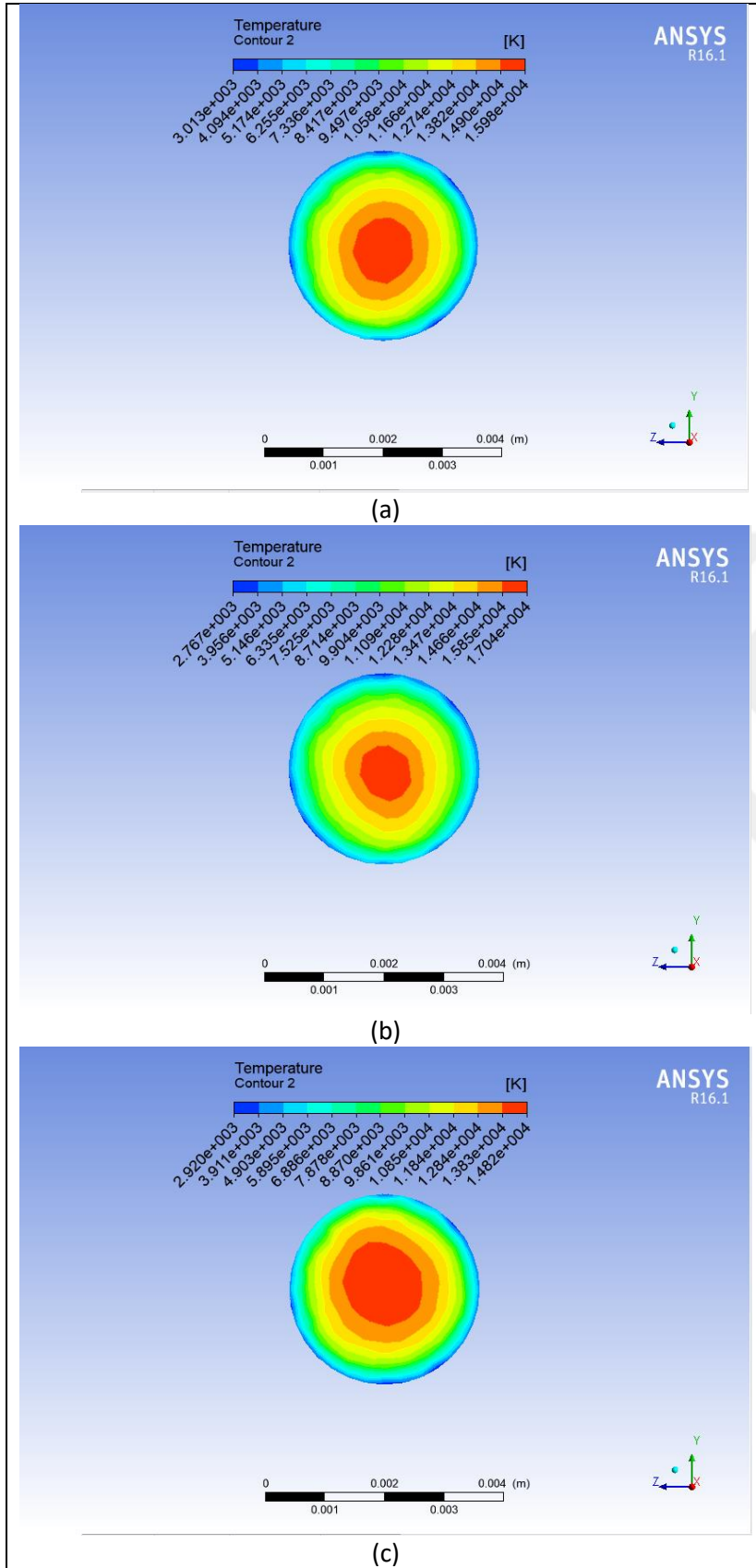
Şekil 5.11 sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için x eksenini boyunca katot ucundan plazma tabancası çıkış kesitine doğru 50 noktadan alınmış plazma sıcaklığı değişimini göstermektedir. Ark oluşumuyla tabanca içerisindeki sıcaklıkların hızlı bir şekilde arttığı görülmektedir. Sıcaklıklar katota yakın yerlerde yüksek olduğu görülmekte ve plazma tabancası çıkış kesitine doğru azalmaktadır. Tabancanın çıkış kesitinin merkezinde noktasal olarak plazma çıkış sıcaklıkları birbirlerine yakındır. Noktasal olarak çıkış kesitindeki sıcaklık yaklaşık olarak 16 000 K olduğu görülmektedir. 50 noktanın sıcaklık değerleri alınarak hesaplanan ortalama sıcaklık değerinde en yüksek plazma ortalama sıcaklığı 38 SLPM’de 22 000 K olarak ölçülmüştür.



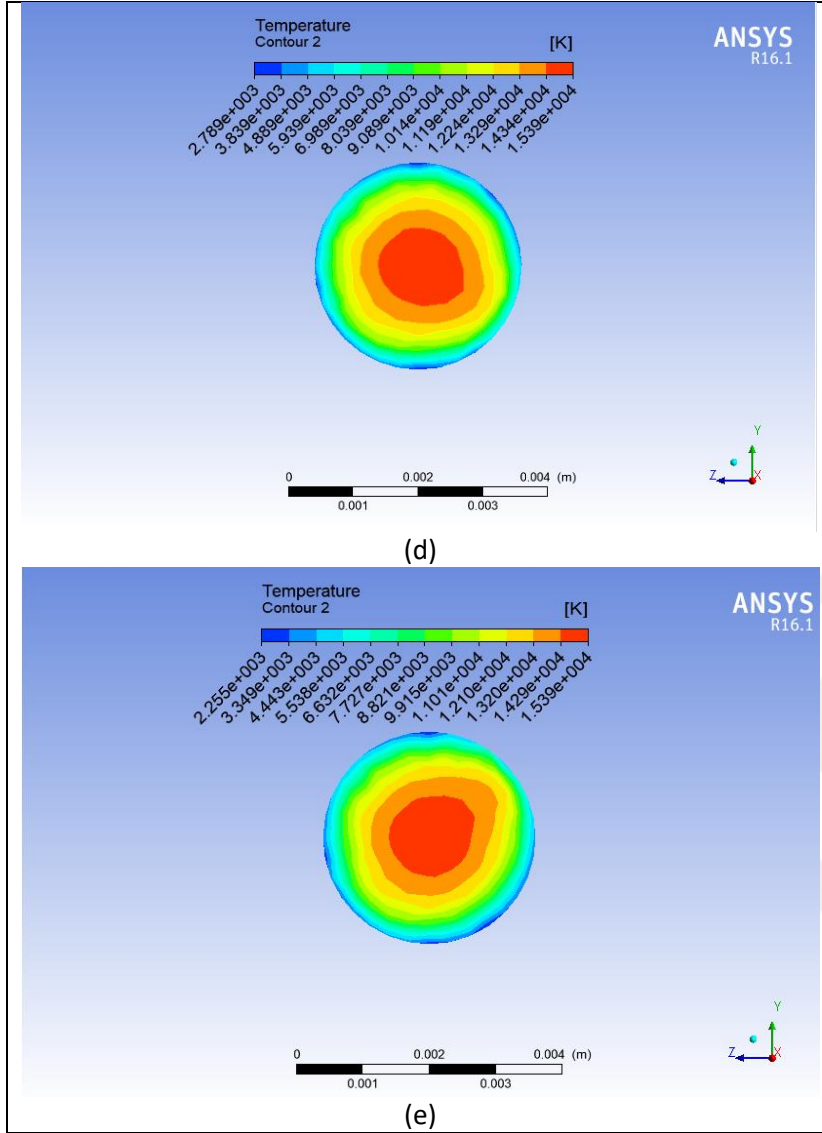
Şekil 5.11. x ekseninde katot ucundan plazma tabancası çıkış kesitine doğru 50 noktadan alınmış plazma sıcaklığı değişimi

5.3.2. Plazma tabancası çıkış kesitinde oluşan plazma sıcaklığı dağılımı

Şekil 5.12 sabit 170 A'de farklı hacimsel debiler için plazma tabancasının çıkış kesitindeki sıcaklık dağılımını göstermektedir. Plazma jetinin dalgalanmalarını tabanca çıkış kesitindeki gaz akışı belirlemektedir. Dalgalanmalar yüzey kaplama, kesme kalitesi ve toz parçacıklarının boyutu üzerine etkili olduğu için tabanca çıkış kesitindeki gaz akışını anlamak önemlidir. Hacimsel debiler için çıkış kesitindeki maksimum plazma sıcaklıkları 14 800 K ile 17 000 K arasında değişmektedir. Ark oluşumundan dolayı tabanca çıkış kesitinde oluşan sıcaklık konturleri simetrik değildir. Düşük hacimsel debilerde sıcaklık konturlerinin daha simetrik olduğu görülmektedir. Hacimsel debi değişiminin çıkış kesitindeki soğuk sınır tabakası üzerine çok etkisi olmadığı görülmektedir.



Şekil 5.12. Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitindeki plazma sıcaklığı dağılımı (a:30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)



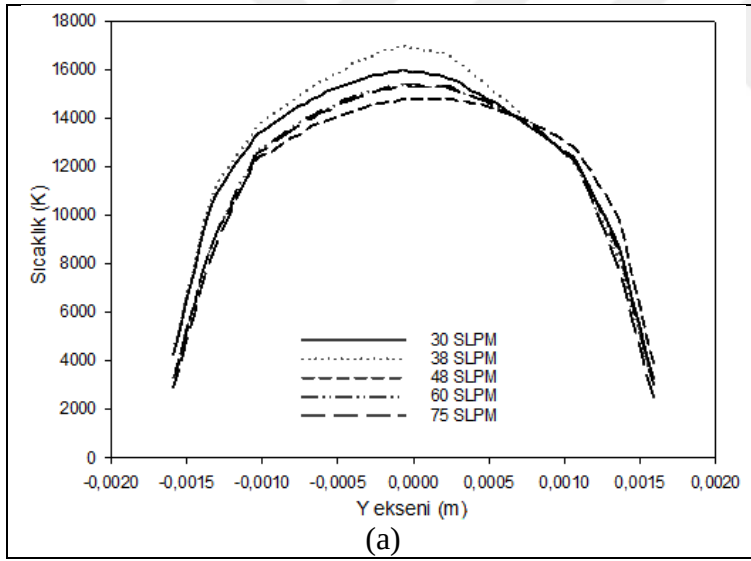
Şekil 5.12. (devam) Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitindeki plazma sıcaklığı dağılımı (a:30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)

Çizelge 5.4 sabit akımda farklı hacimsel debiler için plazma tabancasının çıkış kesitindeki ortalama sıcaklık ve maksimum sıcaklık değerlerini göstermektedir. Ortalama sıcaklık değerleri çıkış kesitinde yer alan 107 noktanın sıcaklık değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Hacimsel debi değişimiyle elde edilen ortalama plazma çıkış kesiti sıcaklıkları birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Hacimsel debi değişiminin plazma çıkış kesitinde oluşan sıcaklık üzerine etkisi az olduğu görülmektedir.

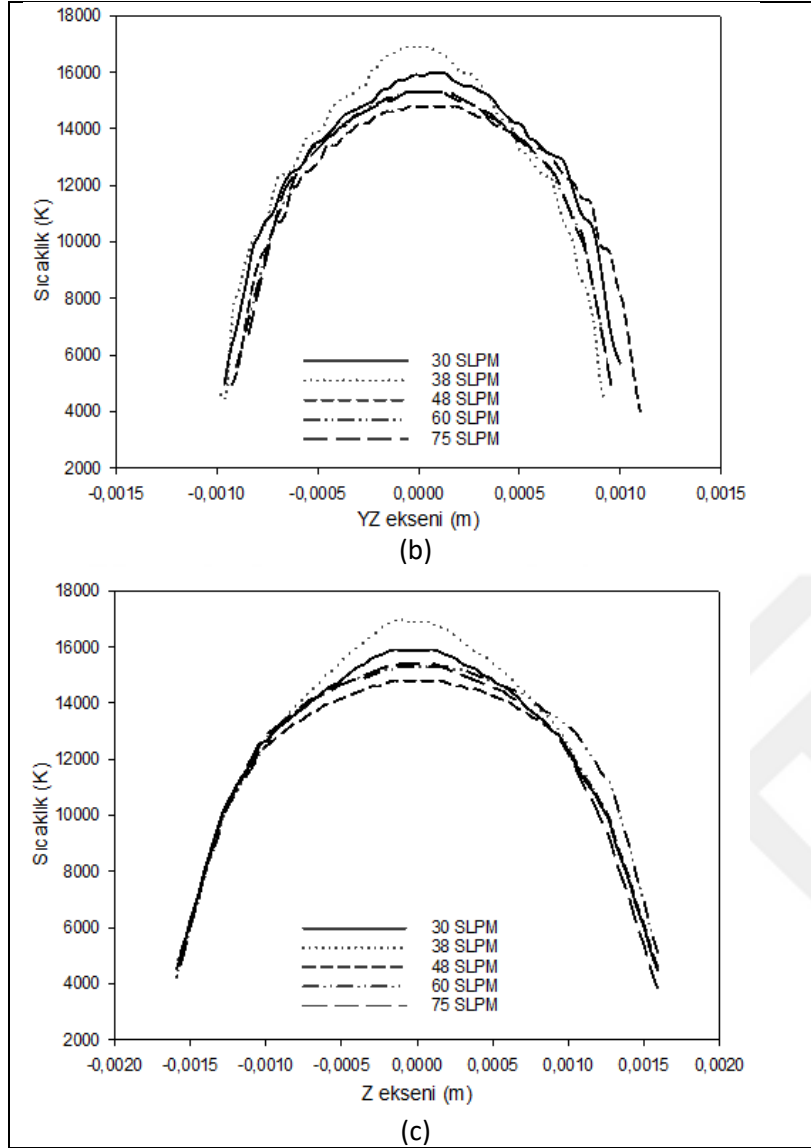
Çizelge 5.4. Sabit akımda farklı hacimsel debiler için çıkış kesitindeki plazma sıcaklıkları

Hacimsel debi (SLPM)	30	38	48	60	75
Çıkış kesitinde ortalama plazma sıcaklığı (K)	10 622	10 973	10 871	11 275	11 023
Çıkış kesitinde maksimum plazma sıcaklığı (K)	15 980	17 040	14 820	15 390	15 390

Şekil 5.13 sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitinde farklı eksenlerde yer alan çap üzerindeki 70 noktadan alınmış plazma sıcaklıklarını göstermektedir. Eksenlerin hepsinde sıcaklık değerlerinin birbirine yakın olduğu görülmektedir. Fakat ark oluşum noktasından dolayı sıcaklık profilleri birbirinden farklıdır ve simetrik değildir. Artan hacimsel debi değerleriyle sıcaklık profillerinin y ve z ekseninde daha kararlı bir hale geldiği yani dalgalanmalardan daha az etkilendiği görülmektedir.



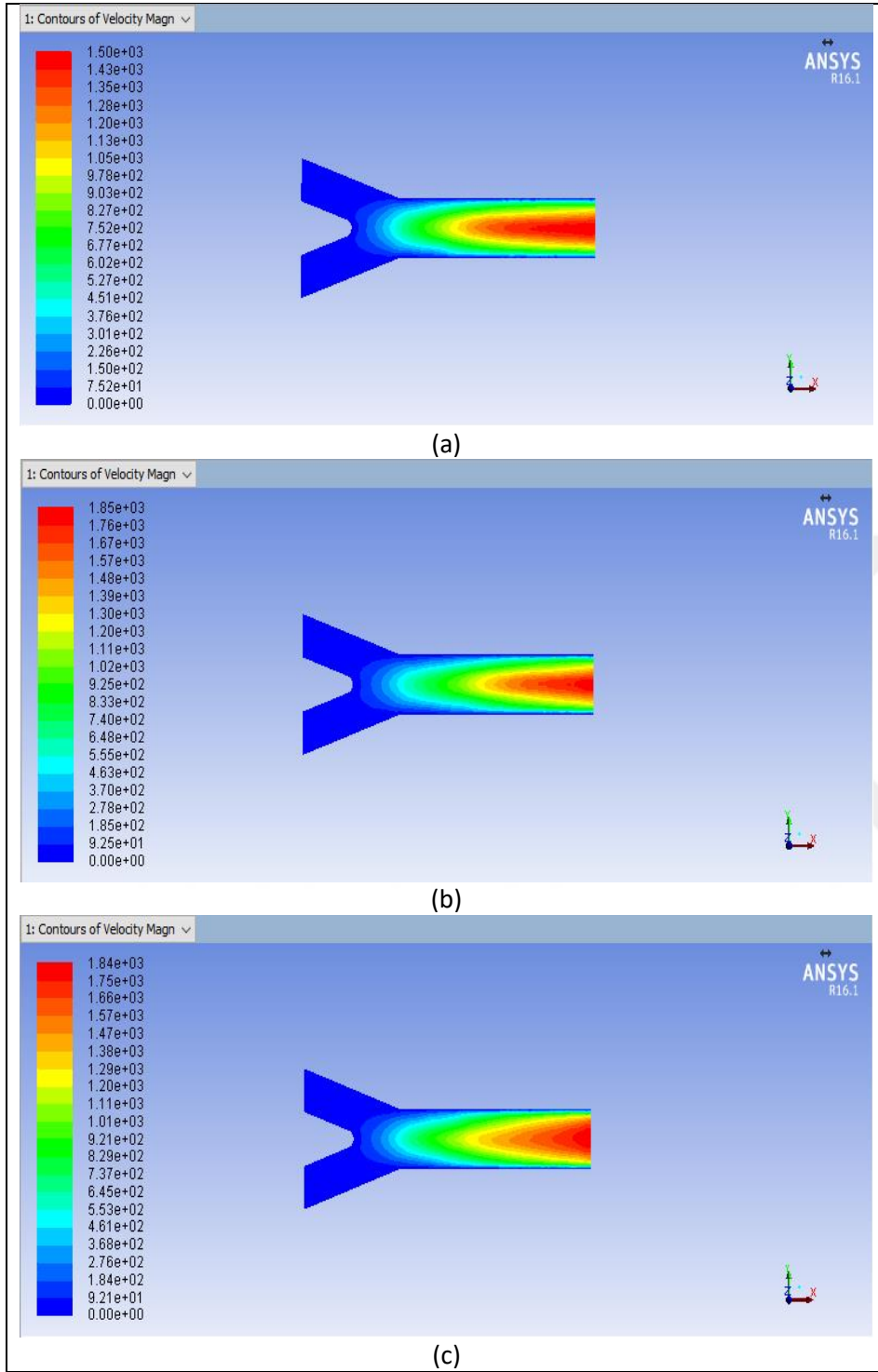
Şekil 5.13. Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitindeki farklı eksenlerden alınmış plazma sıcaklığı (a: y eksen, b: yz eksen, c: z eksen)



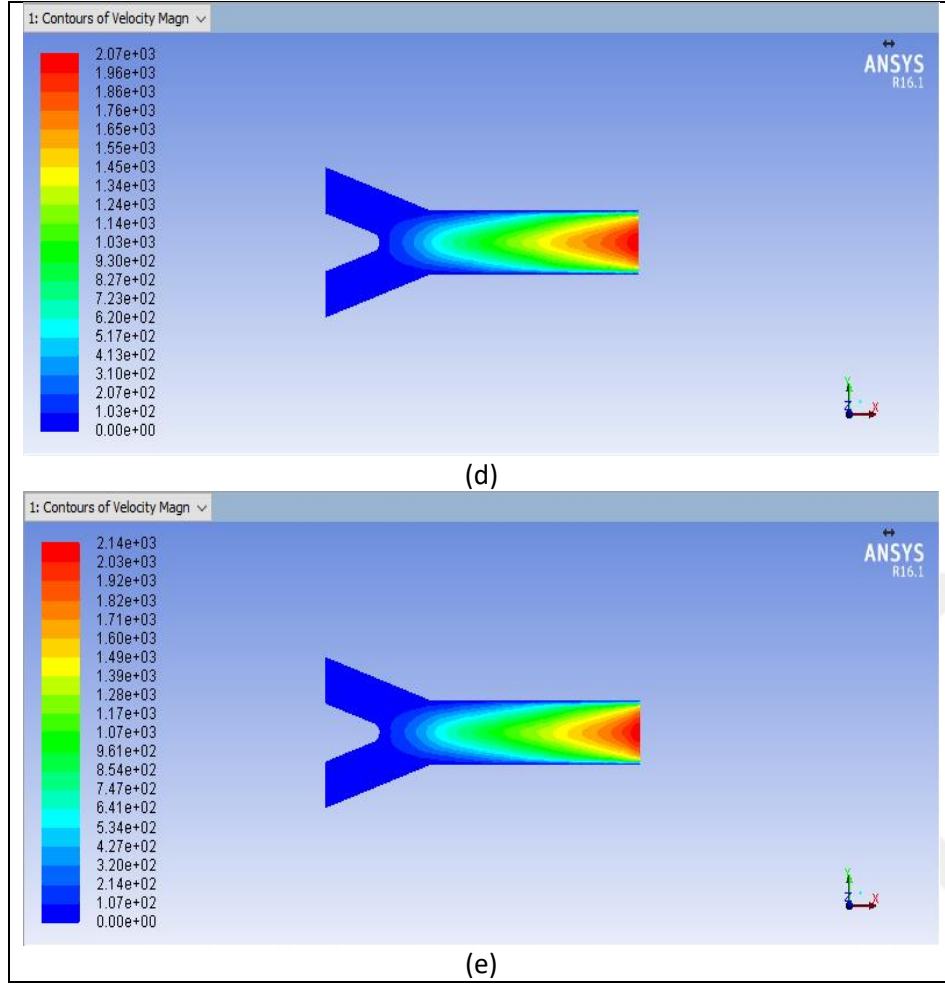
Şekil 5.13. (devam) Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitinde farklı eksenlerden alınmış plazma sıcaklığı (a: y eksenini, b: yz eksenini, c: z eksenini)

5.3.3. Plazma tabancası içinde oluşan plazma hızı dağılımı

Akım değeri 170 A’de sabit tutularak gazın hacimsel akış debisi değiştirilmiştir. 30, 38, 48, 60, 75 SLPM hacimsel debileri için plazma tabancası içerisindeki plazma hızı dağılımına bakılmıştır. Şekil 5.14’te görüldüğü gibi artırılarak girilen hacimsel debiler için maksimum plazma hızı değerlerinde artış görülmüştür. Maksimum plazma hızı 1 500 m/s ile 2 140 m/s arasında değiştiği görülmektedir. Hacimsel debi değişiminin tabanca içindeki plazma hızı üzerine etkisi sıcaklık üzerine etkisinden daha fazla olduğu görülmektedir.

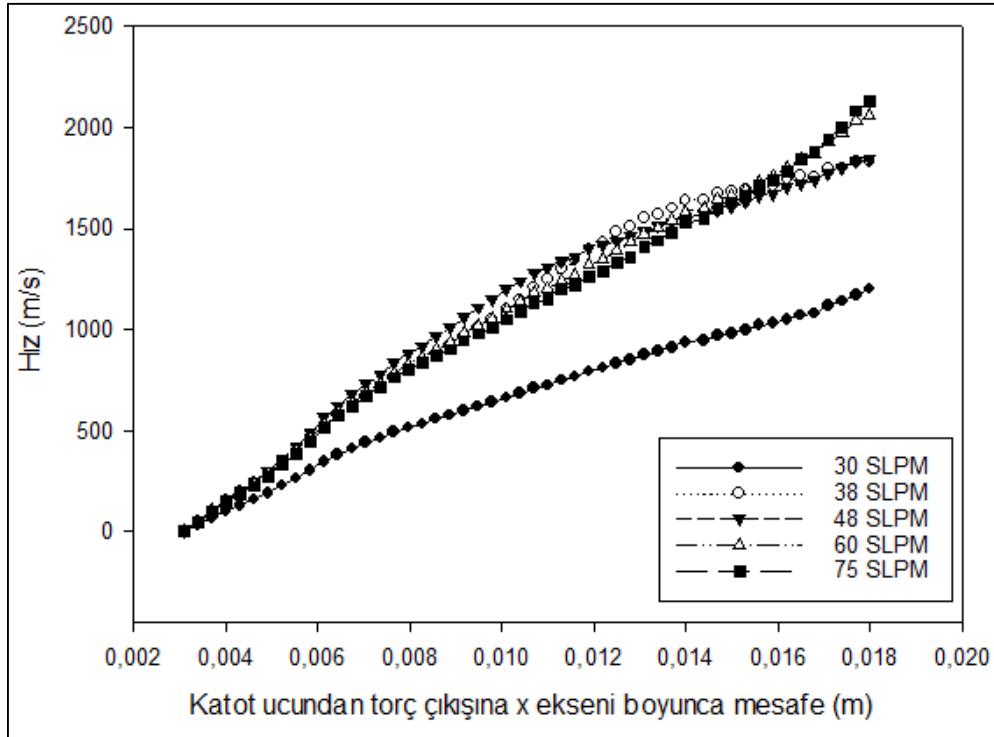


Şekil 5.14. Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma hızı dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)



Şekil 5.14. (devam) Sabit 170 A’de plazma hızı dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)

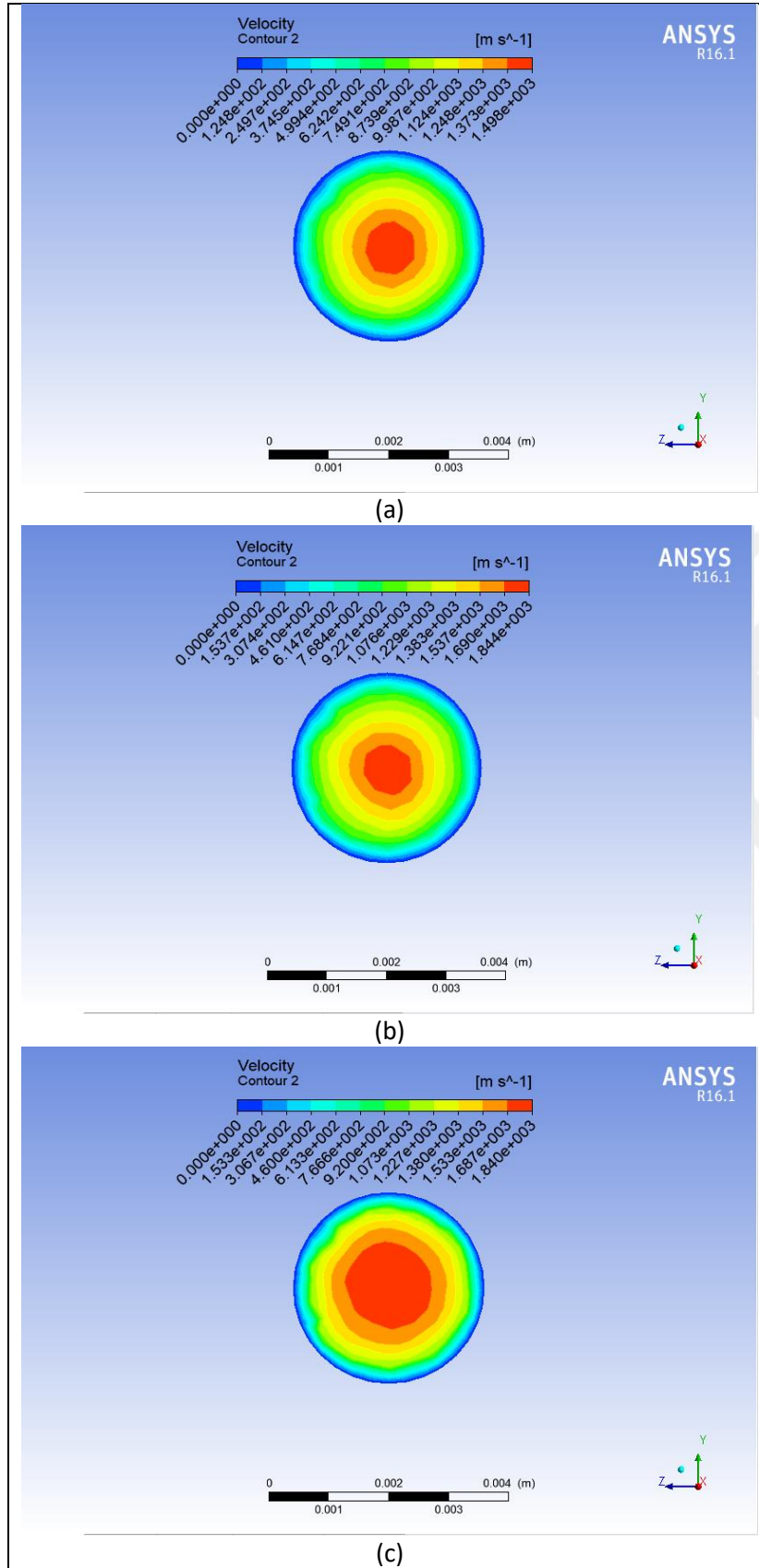
Şekil 5.15 sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için x eksenı boyunca katot ucundan plazma tabancası çıkış kesıtine doğru 50 noktadan alınmış plazma hızı değişimini göstermektedir. Hacimsel debilerin artırılmasıyla x eksenı boyunca plazma hızı arttığı görülmüştür. Ark oluşumundan dolayı linear bir artış olmamıştır ve hız profillerinin simetrikliğini bozmıştır. Noktasal olarak maksimum hız çıkış kesıtinde oluşmuş ve 75 SLPM’de 2130 m/s olarak görülmüştür.



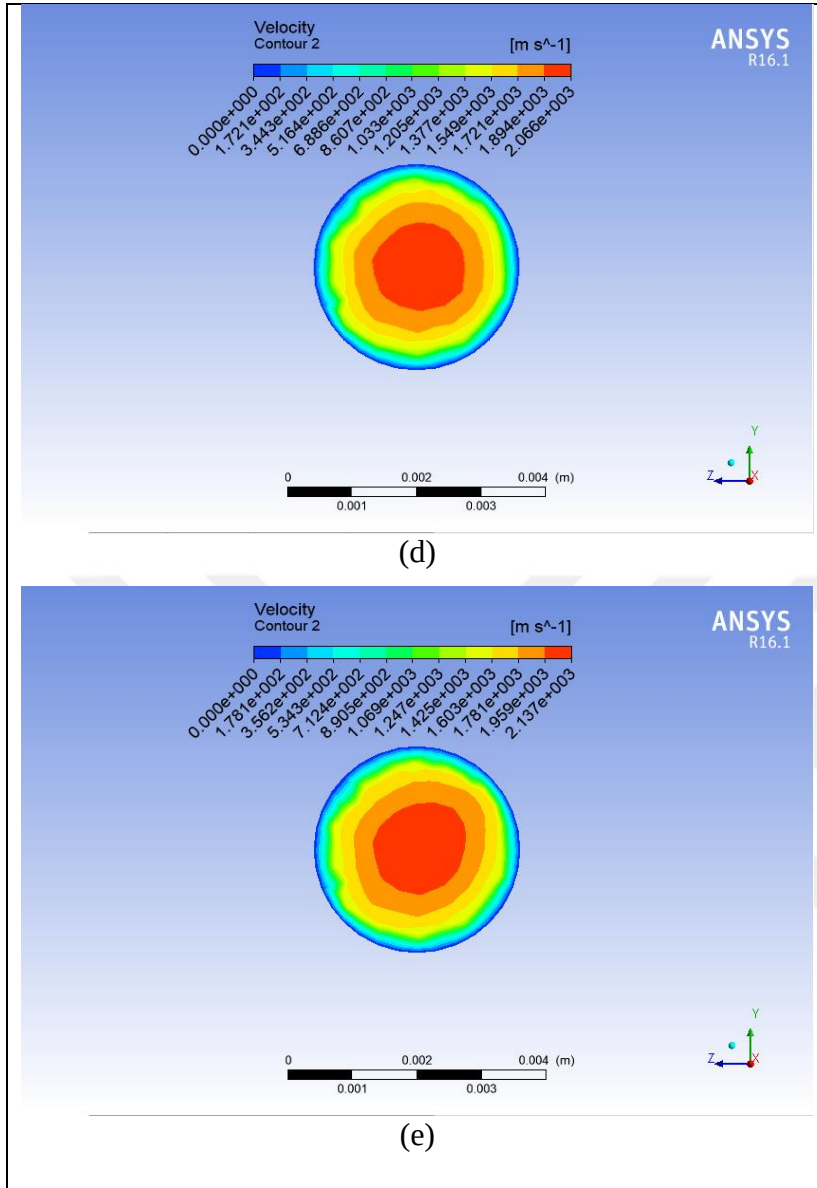
Şekil 5.15. x eksenini boyunda katot ucundan plazma tabancası çıkış kesitine doğru 50 noktadan alınmış plazma hızı değişimi

5.3.4. Plazma tabancası çıkış kesitinde oluşan plazma hızı dağılımı

Şekil 5.16 sabit 170 A'de farklı hacimsel debiler için plazma tabancasının çıkış kesitindeki plazma hızı dağılımını göstermektedir. Hacimsel debiler için çıkış kesitinde oluşan maksimum plazma hızları 1 378 m/s ile 2 136 m/s arasında değişmektedir. Hacimsel debilerin artmasıyla plazma çıkış kesitindeki hızın arttığı görülmüştür. Ark oluşumundan dolayı plazma tabancası çıkış kesitinde oluşan hız konturleri simetrik değildir. Fakat çıkış kesitinde oluşan hız konturleri çıkış kesitinde oluşan sıcaklık konturlerine (Bkz. Şekil 5.12) göre daha simetrik olduğu görülmektedir.



Şekil 5.16. Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkışı kesitindeki plazma hızı dağılımı (a:30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)



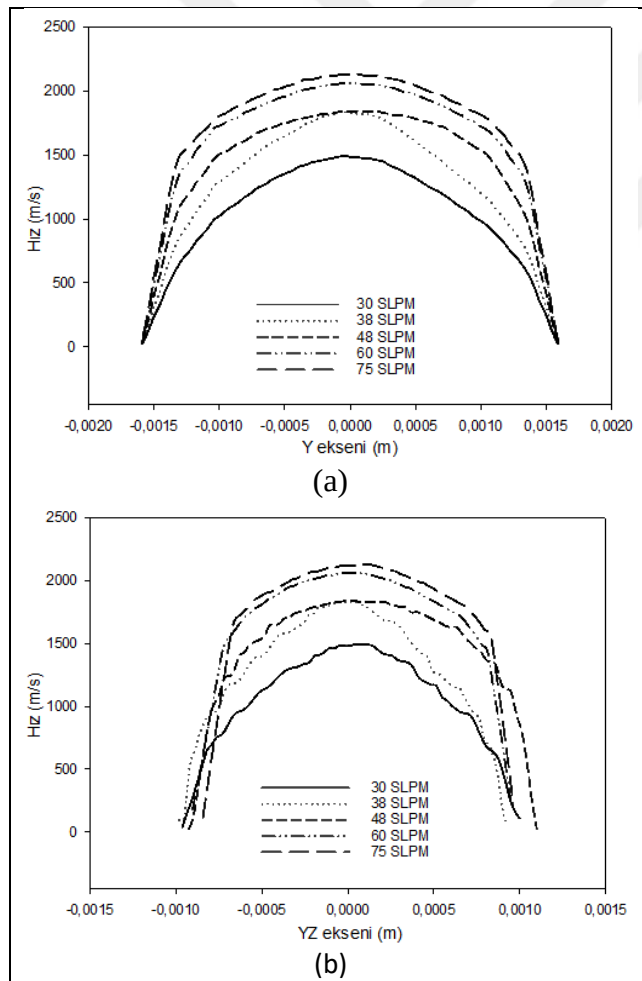
Şekil 5.16. (devam) Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitindeki plazma hızı dağılımı (a:30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)

Çizelge 5.5 sabit akımda farklı hacimsel debiler için plazma tabancasının çıkış kesitindeki ortalama hız ve maksimum hız değerlerini göstermektedir. Ortalama plazma hızı çıkış kesitinde yer alan 107 noktanın hız değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çıkış kesitinde oluşan ortalama plazma hızı 931 m/s ile 1 755 m/s arasında maksimum hız ise 1 378 m/s ile 2 137 değiştiği görülmektedir.

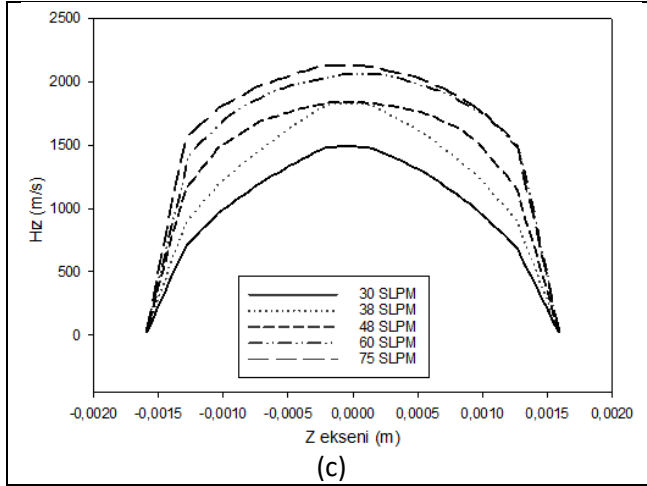
Çizelge 5.5. Sabit akımda farklı hacimsel debiler için çıkış kesitindeki plazma hızları

Hacimsel debi (SLPM)	30	38	48	60	75
Çıkış kesitindeki ortalama plazma hızı (m/s)	931	1 196	1 352	1 666	1 755
Çıkış kesitindeki maksimum plazma hızı (m/s)	1 498	1 844	1 840	2 066	2 137

Şekil 5.17 sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitinde farklı eksenlerde yer alan çap üzerindeki 70 noktadan alınmış plazma hızlarını göstermektedir. Hacimsel debilerin artmasıyla plazma hızları artmıştır. Hız profilleri neredeyse simetrikdir. Şekil 5.13 ile Şekil 5.17’ye bakıldığı zaman çıkış kesitindeki hız profillerinin çıkış kesitindeki sıcaklık profillerine göre daha düzgün daha simetrik olduğu görülmektedir.



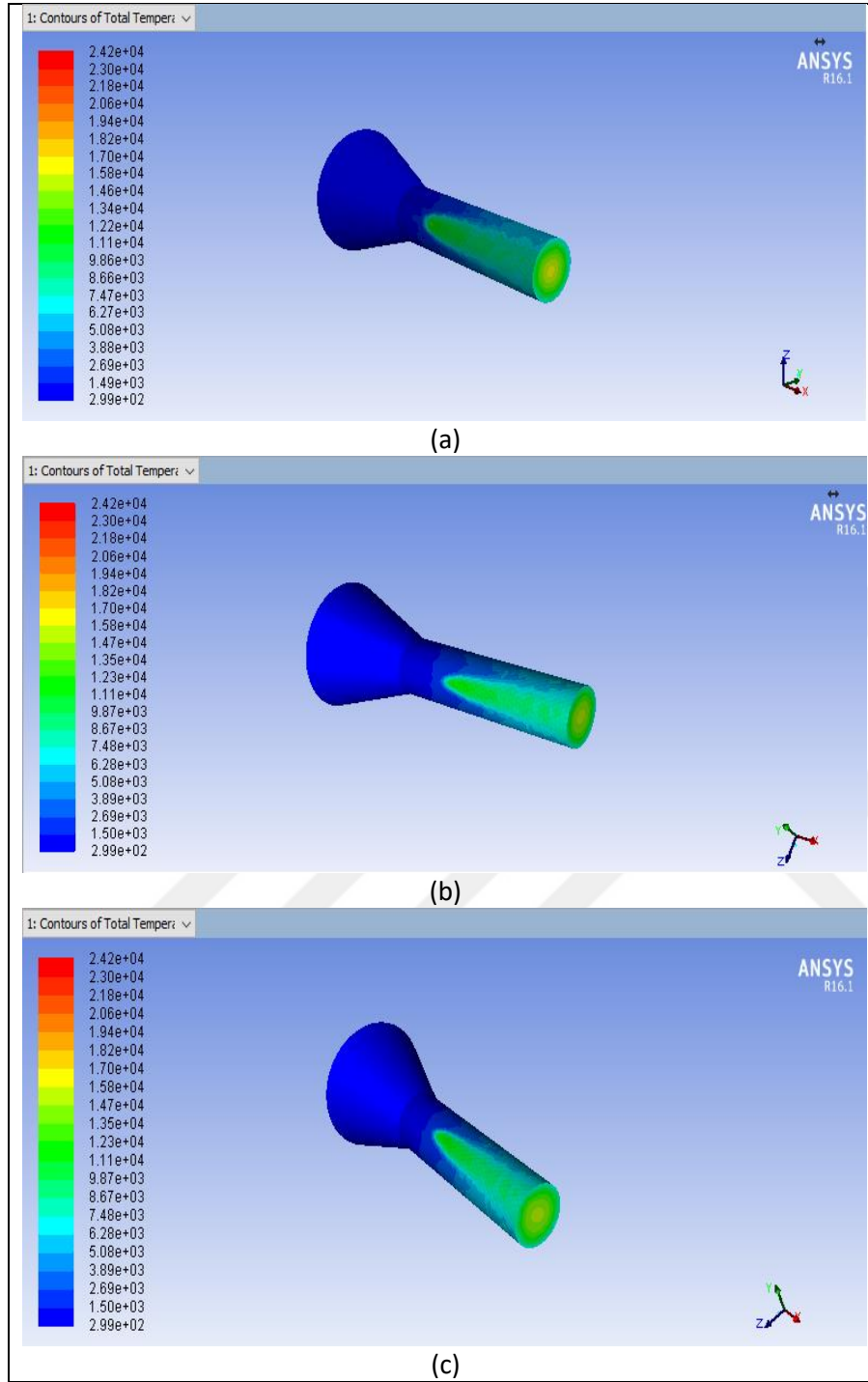
Şekil 5.17. Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitinde farklı eksenlerden alınmış plazma hızı (a: y eksen, b: yz eksen, c: z eksen)



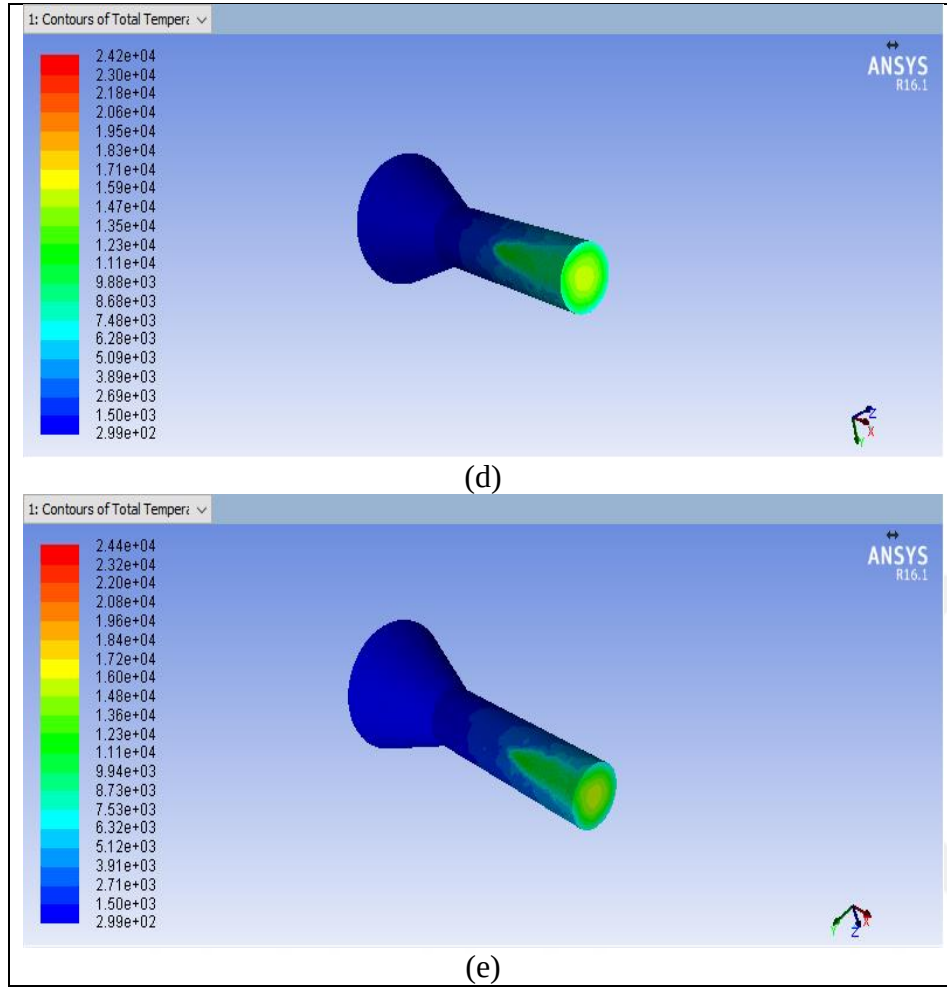
Şekil 5.17. (devam) Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası çıkış kesitindeki farklı eksenlerden alınmış plazma hızı (a: y eksen, b: yz eksen, c: z eksen)

5.3.5. Anot ark kökü bağlantı noktası

Şekil 5.18 sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için ark oluşum noktalarını göstermektedir. Anot ve katoda uygulanan voltaj farkından dolayı anot ve katot arasında ark oluşumu sağlanmıştır. Ark yapısı gereği anot ve katot arasında en kısa yolu izlemektedir [22]. Ar gazının tabanca içerisine belli bir hacimsel debiyle gönderilmesi ark boyunu etkilemektedir. Hacimsel debinin artmasıyla ark uzunluğu (katot ucundan anot üzerindeki ark oluşum noktasına kadar olan x eksenindeki mesafe) artmaktadır. Artan hacimsel debi anot üzerindeki ark oluşum noktasını tabanca çıkış kesitine doğru kaydırmaktadır [24]. Anot ark-kökü bağlantısı gaz dinamik sürüklenme kuvveti nedeniyle anot yüzeyinde tabanca çıkış kesitine doğru hareket etmesine rağmen sonunda sabit bir duruma gelir. Anot ark kökünün son konumu, gaz dinamik sürüklenme ve Lorentz kuvvetleri arasındaki kuvvet dengesi ile belirlenir. Bu sayısal simülasyonda, anot ark kökü için, kararlı hal elde edildiğinde giriş için tanımlanan 30, 38, 48, 60, 75 SLPM hacimsel debileri için ark boyları sırasıyla yaklaşık olarak 5,9; 7,1; 7,4; 9,1; 10,4 mm olarak ölçülmüştür.



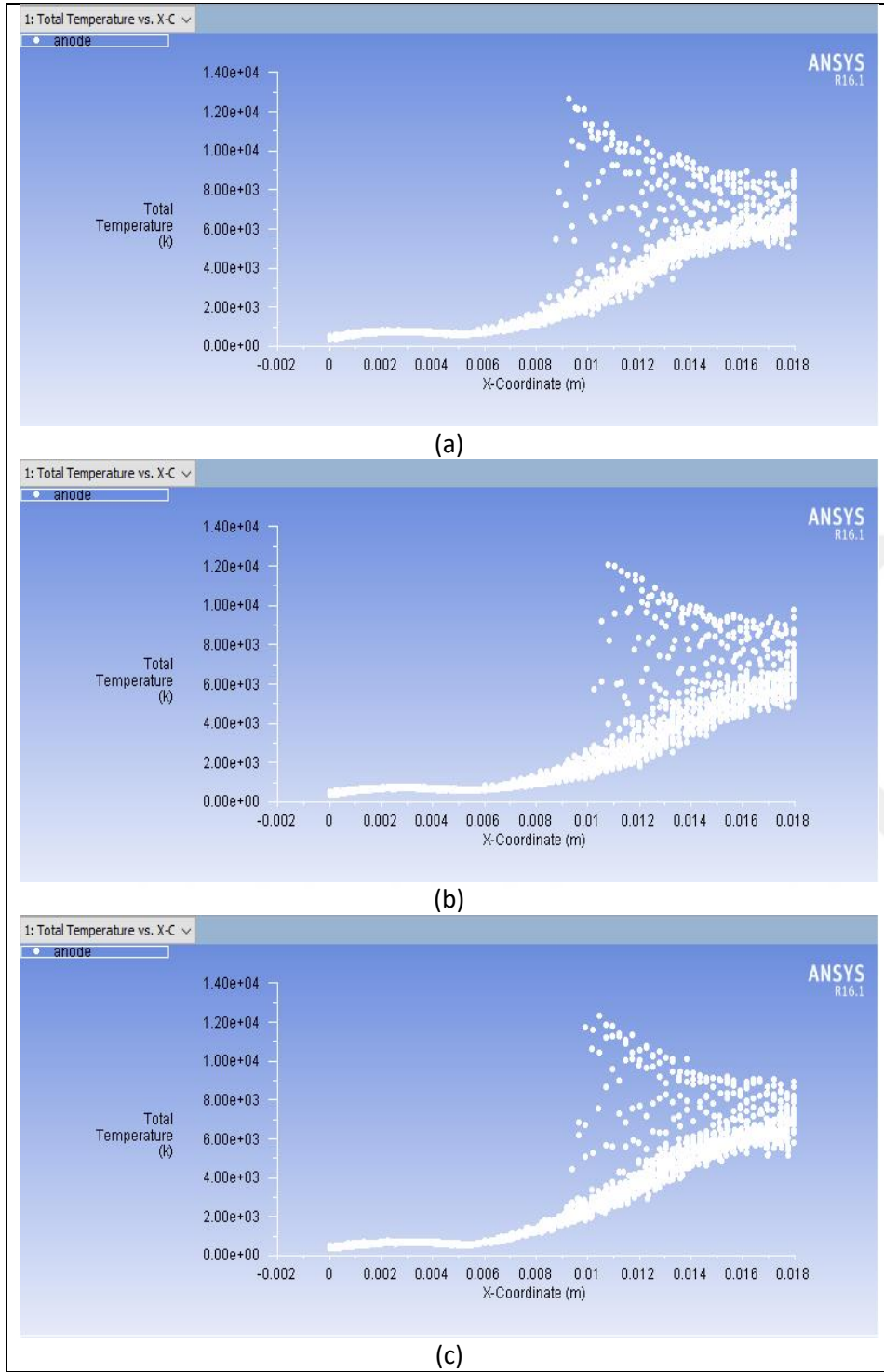
Şekil 5.18. Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için ark oluşum noktaları (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)



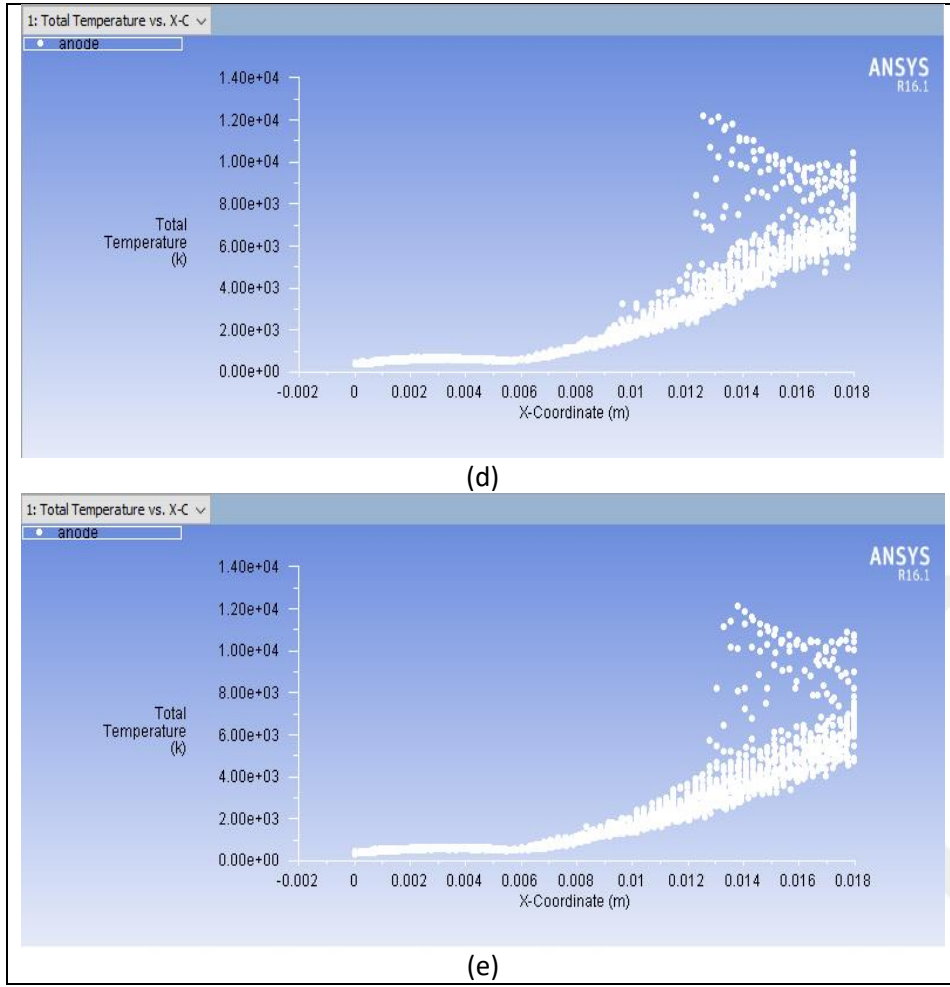
Şekil 5.18. (devam) Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için ark oluşum noktaları (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)

5.3.6. Anot cidarı sıcaklığının x ekseni boyunca dağılımı

Şekil 5.19 sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için x ekseni boyunca anot cidarı üzerinde oluşan sıcaklık dağılımını göstermektedir. Joule ısınma etkisinden dolayı anot cidarı üzerinde oluşan maksimum sıcaklık ark oluşum noktasında meydana gelmektedir. Tüm hacimsel debiler için ortalama olarak anot cidarında oluşan maksimum sıcaklık noktasal olarak 13 000 K civarında olduğu görülmektedir. Ark oluşum bölgesinin artan hacimsel debiyle plazma tabancası çıkış kesitine doğru kaymasıyla anot cidarında oluşan sıcak bölgede plazma tabancası çıkış kesitine doğru hareket etmektedir.



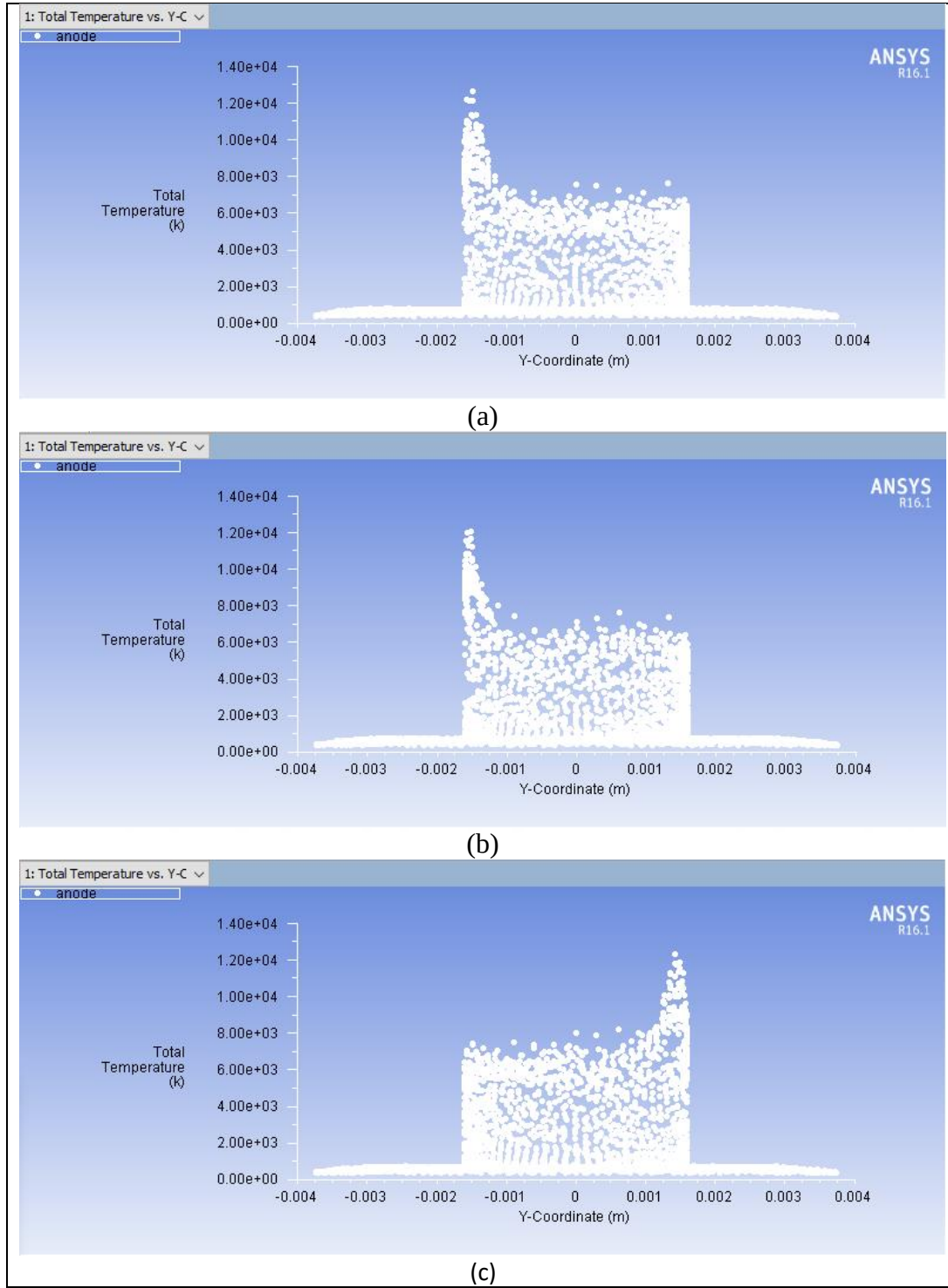
Şekil 5.19. Sabit 170 A akım değeri için anot cidarı sıcaklığının x eksenı boyunca dağılımı
(a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)



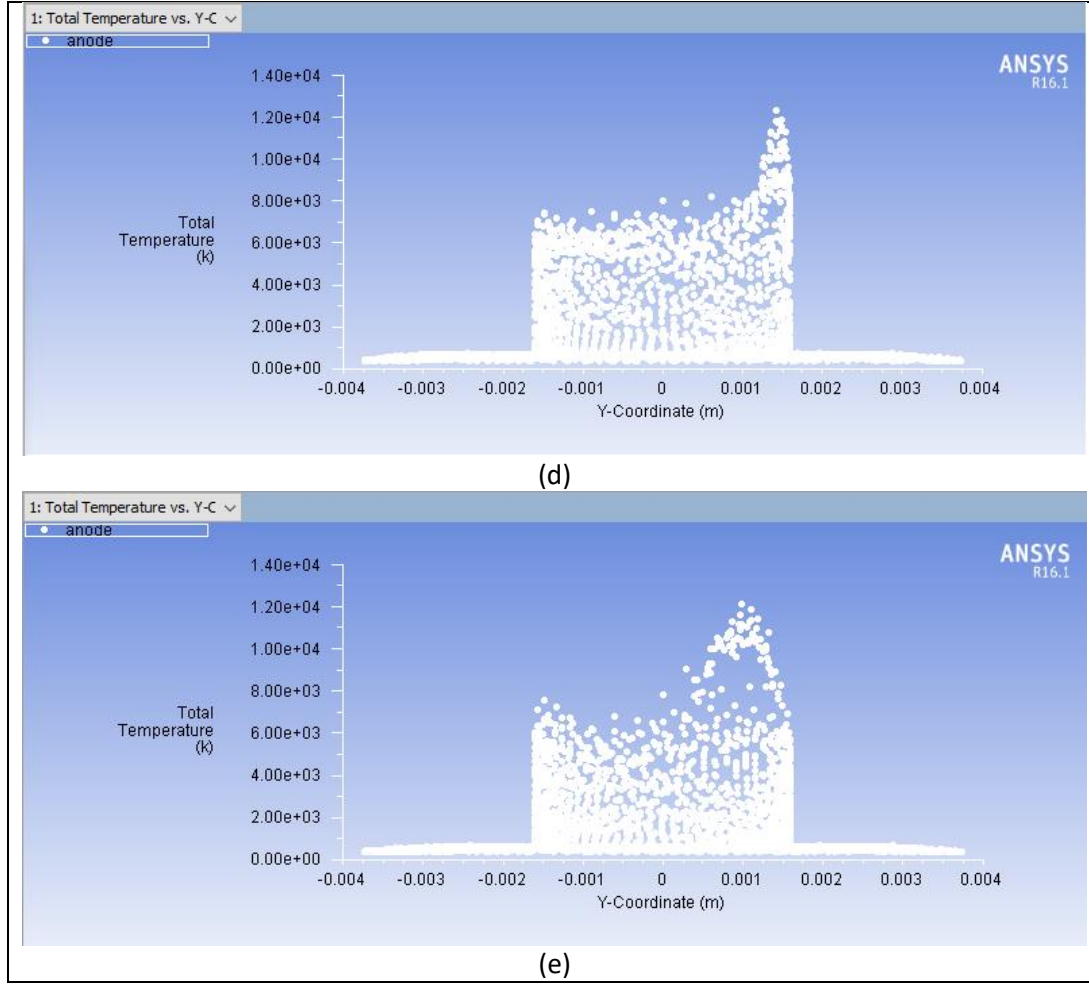
Şekil 5.19. (devam) Sabit 170 A akım değeri için anot cidarı sıcaklığının x eksenı boyunca dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)

5.3.7. Anot cidarı sıcaklığının y eksenı boyunca dağılımı

Şekil 5.20 sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için y eksenı boyunca anot cidarı üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı göstermektedir. Hacimsel debilerin artırılmasıyla anot duvarı cidarında oluşan yoğun sıcaklık aralığının dikkate değer bir değişiklik göstermediği görülmektedir. Anot cidarı sıcaklık değişimi yoğun olarak 1000 K ile 7500 K arasında yoğunlaşmaktadır. Anot cidarı sıcaklığı hacimsel debi değişiminden pek fazla etkilenmediği söylenebilir. Bunun için anodun sıcaklıkla aşınmasına hacimsel debinin değiştirilmesiyle pek fazla bir şey yapılamıyacağı görülmektedir. Fakat Şekil 5.19’a bakılarak istenen çalışma koşullarını etkilemeyecek şekilde (çıkış kesitinde istenen sıcaklık, hız değerleri ve profilleri gibi.) ark oluşum bölgesinin anot duvarı üzerinde çıkış kesitine doğru kaydırılması ile yoğun sıcaklık bölgesinin anot duvarıyla temas alanı azaltılabilir.



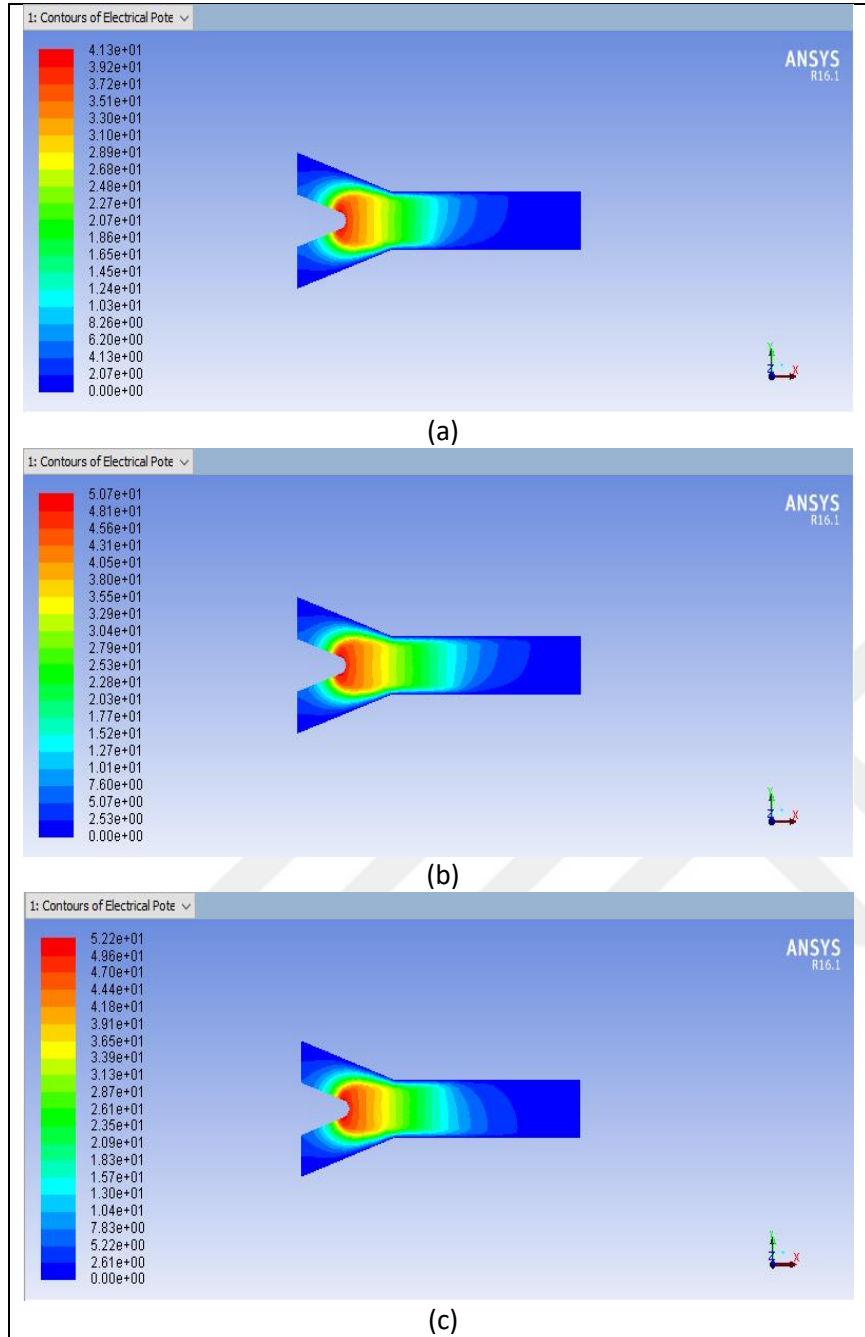
Şekil 5.20. Sabit 170 A akım değeri için anot cidarı sıcaklığının y eksenı boyunca dağılımı
(a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)



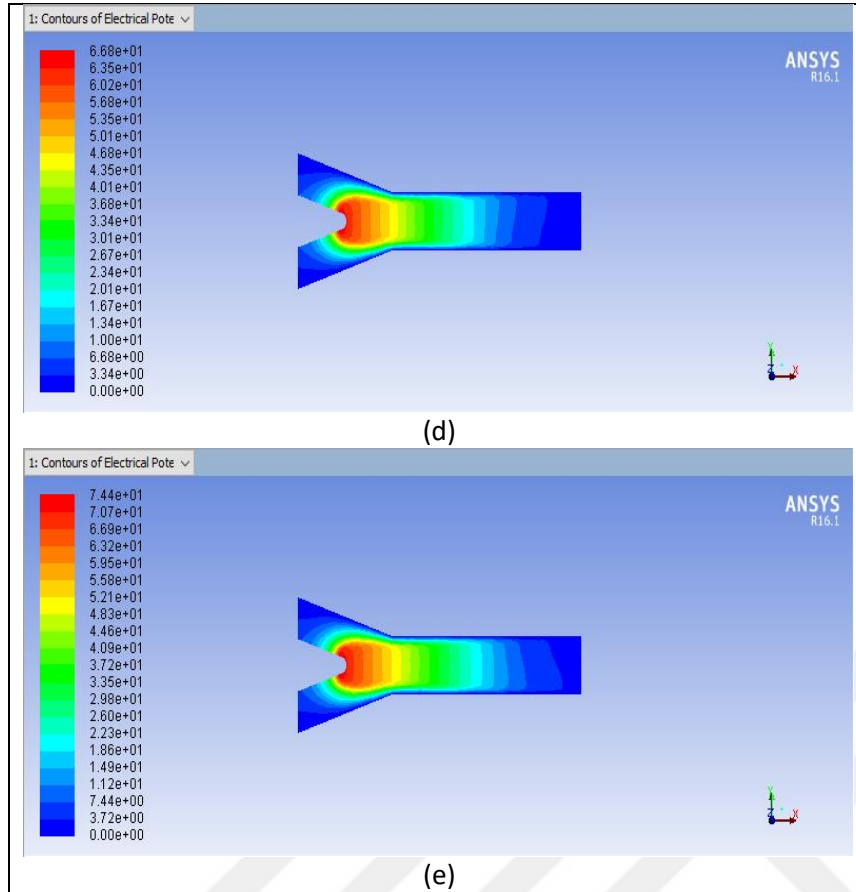
Şekil 5.20. (devam) Sabit 170 A akım değeri için anot cidarı sıcaklığının y eksenı boyunca dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)

5.3.8. Ark voltajının ark uzunluğu ile ilişkisi

Şekil 5.21 sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için tabanca içerisinde oluşan elektrik potansiyel dağılımını göstermektedir. Hacimsel debilerin artırılmasıyla ark oluşum noktasının tabanca çıkış kesatine sürüklendiği bilinmektedir. Ark uzunluğuyla beraber aynı zamanda tabanca içerisindeki elektrik potansiyeli de artmaktadır [15]. Böylelikle tabanca gücünde ($P=VI$) artan ark uzunluğuyla artar [23, 24]. Bu olay daha fazla gaz iyonlaştırmak için gerekli olan enerjinin artması şeklinde açıklanabilir [26]. Maksimum elektrik potansiyeline katot ucuna yakın yerlerde rastlanmaktadır. Anot duvarı üzerinde elektriksel potansiyel değeri sıfır olduğu görülmektedir.



Şekil 5.21. Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası içerisindeki elektrik potansiyeli dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)



Şekil 5.21. (devam) Sabit 170 A’de farklı hacimsel debiler için plazma tabancası içerisindeki elektrik potansiyeli dağılımı (a: 30 SLPM, b: 38 SLPM, c: 48 SLPM, d: 60 SLPM, e: 75 SLPM)

Çizelge 5.6 sabit 170 A’de farklı hacimsel debilerde plazma tabanca gücünü ve verimini göstermektedir. Artan hacimsel debi ile ark uzunluğu artmasından dolayı ark voltajı artmaktadır. Bunun sonucu olarak plazma tocuğun gücü de daha fazla Ar gazını iyonize edebilmek için arttığı görülmüştür. Artan hacimsel debiyle plazma tabancası veriminde de artış görülmüştür.

Toplam ark voltajı (V_{arc}), katot duvarı bölgesi, giriş kesiti, nozul bölgesi, çıkış kesiti, anot duvarı bölgesi gibi farklı bölgelerdeki gerilim düşüşlerinin tek tek toplamıdır. Katot ve anot düşme voltajları toplam ark voltajının sadece küçük bir bölümünü oluşturur [32].

Eş. 5.1 plazma tabancası termal veriminin hesabını göstermektedir [16]. $P_{çıkış}$ (W), plazma jetine iletilen toplam ısı gücüdür. I (A), katottan tanımlanan akım ve V_{ark} (V), ark voltajıdır.

$$\eta = \frac{P_{çıkış}}{V_{ark}I} \quad (5.1)$$

Çizelge 5.6. Sabit akımda farklı hacimsel debiler için analiz sonuçları

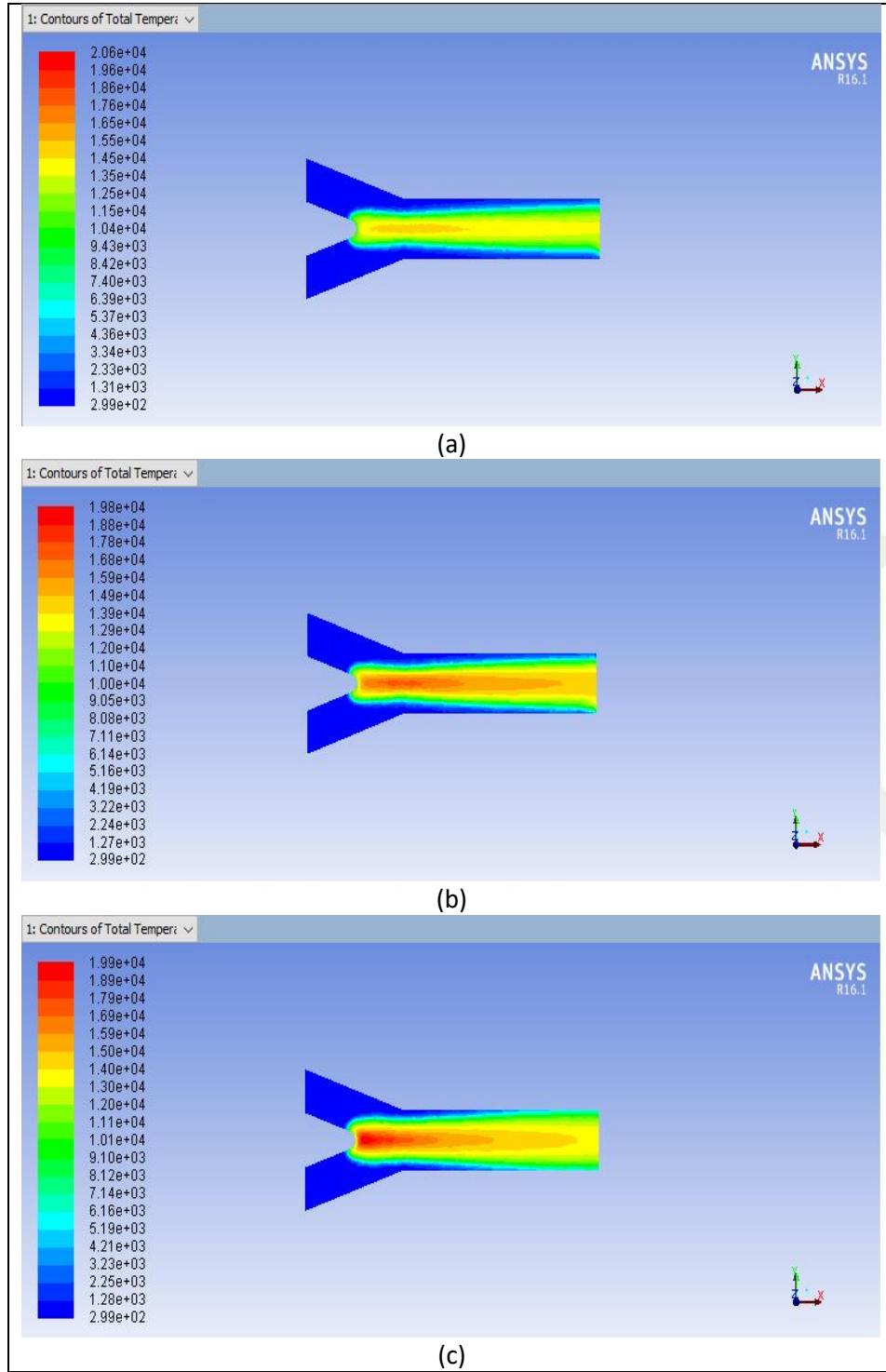
Hacimsel debi (SLPM)	Çıkış kesiti ısı geçişi (W)	$V_{ark}I$ (W)	Plazma tabancası verimi (%)
30	5386	8376	64,2
38	7198	10 304	69,8
48	7280	10 453	69,6
60	10 026	13 508	74,2
75	11 605	15 090	76,9

5.4. Sabit Hacimsel Debide Farklı Akımlarla Yapılan Analizler

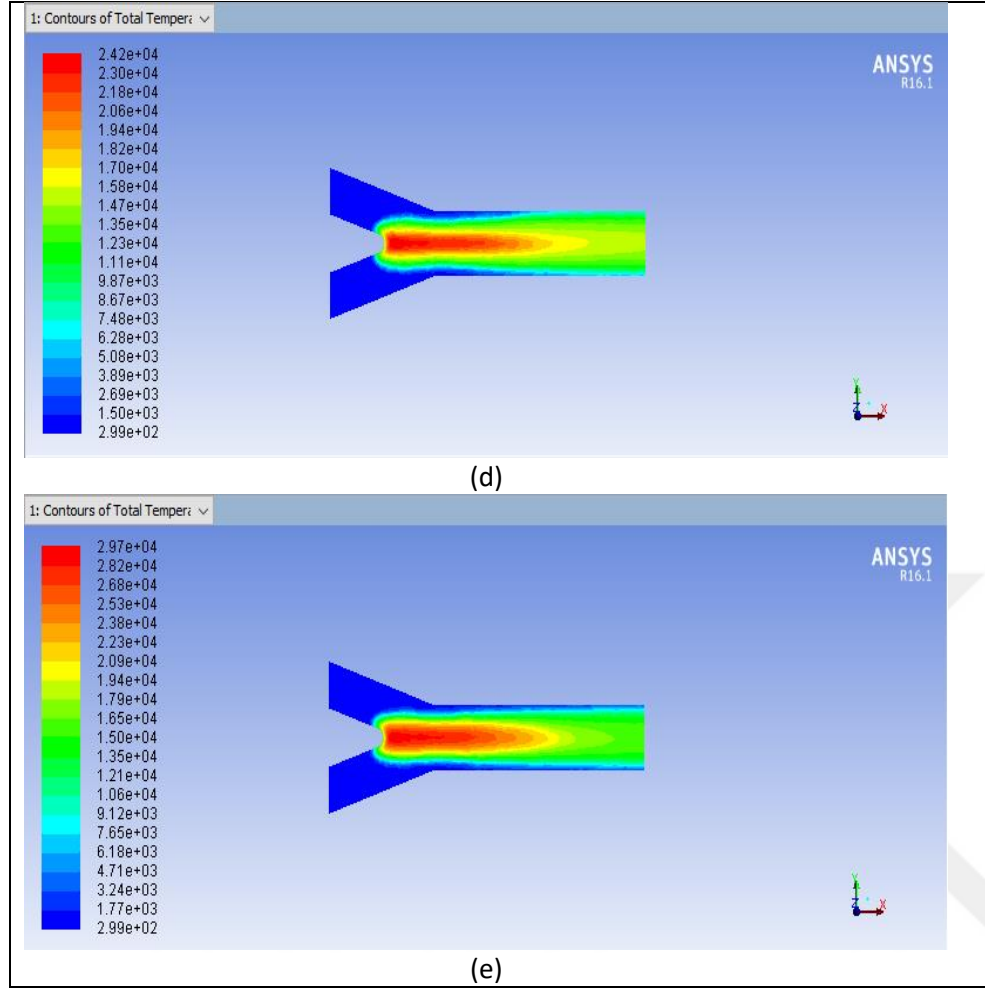
Sabit hacimsel debide farklı akım değerleriyle yapılan analiz sonuçları bu bölümde değerlendirilmiştir. Çalışma akışkanı olarak kolay plazma haline geçebilen Ar gazı kullanılmıştır. Ar gazının tabanca içerisine giriş sıcaklığı 300 K olarak belirlenmiştir. Anot duvarının sıcaklığı 1000 K olarak tanımlanmıştır. Katot duvarı sıcaklığı 3500 K olarak girilmiştir. Hacimsel debi değeri 48 SLPM’de sabit tutulup akım değeri 50, 75, 112, 170, 250 A olarak girilmiştir. Akımın plazma tabancası içindeki plazma akış alanı üzerine etkileri incelenmiştir. Giriş basıncı 2 bar ve çıkış basıncı atmosfer basıncı olarak girilmiştir.

5.4.1. Plazma tabancası içinde oluşan plazma sıcaklığı dağılımı

Şekil 5.22 sabit 48 SLPM’de farklı akım değerleri için tabanca içerisinde xy düzleminde plazma sıcaklık dağılımını göstermektedir. Akım değerlerinin artmasıyla şekil 5.22’de görüldüğü gibi plazma sıcaklığı artmaktadır. Maksimum plazma sıcaklığı 19 800 K ile 29 700 K arasında değiştiği görülmektedir. Maksimum plazma sıcaklık değeri 250 A’de 29 700 K olduğu görülmüştür. Akım artmasıyla plazma sıcaklığı artış eğilimindedir. Doğru akım plazma tabancalarında oluşan elektrik arkları nedeniyle meydana gelen elektromanyetik alanlar özellikle katot elektrodu yakınında sıcaklık dereceleri çok yüksek gradyanların oluşumuna yol açar [21]. Akımın artmasıyla plazma kolonun kısaldığı görülmektedir.

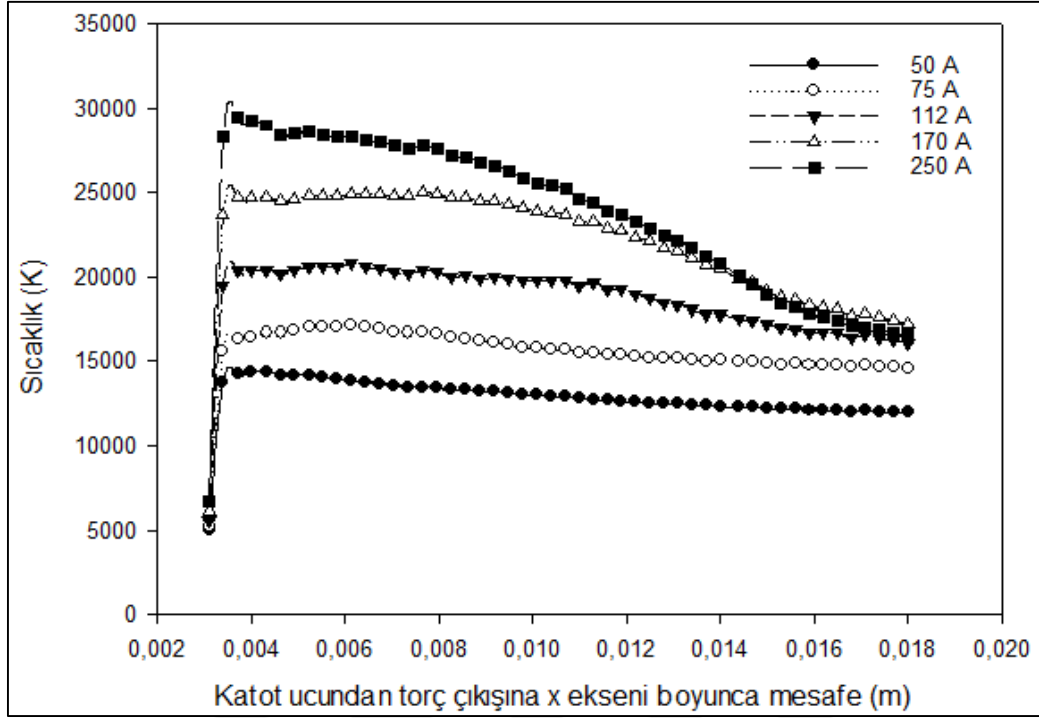


Şekil 5.22. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma sıcaklığı dağılımı (a: 50 A, b: 75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)



Şekil 5.22. (devam) Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma sıcaklığı dağılımı (a: 50 A, b: 75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)

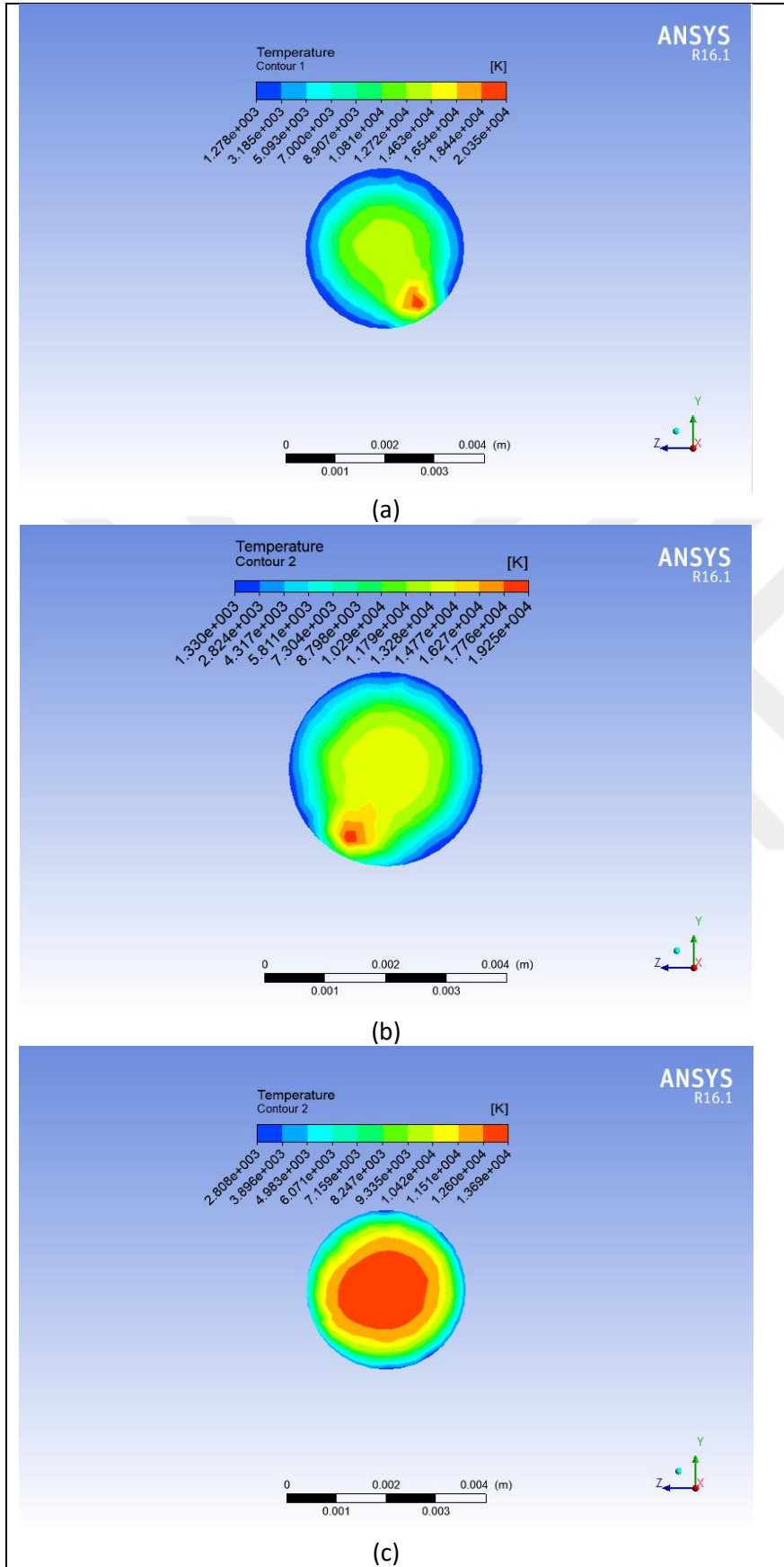
Şekil 5.23 sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için x eksenı boyunca katot ucundan plazma tabancası çıkış kesıtine doğru 50 noktadan alınmış plazma sıcaklığı değişimini göstermektedir. Katot ucuna yakın yerlerde maksimum plazma sıcaklıklarının oluştuğu görülmektedir. Plazma tabancasının çıkış kesıtine değru plazma sıcaklıkları azalmaktadır. Doğrusal alınan noktalardan elde edilen plazma sıcaklığının tabanca çıkış kesıtine değru değru yaklaşık olarak 12 000 K’nin altına düşmediği görülmektedir. Lineer bir azalışın görülmemesi ark kökü bağlantı noktasından kaynaklanmaktadır. Akımla hacimsel debi kıyaslandığı zaman akımın plazma sıcaklığı üzerine daha etkili olduğu görülmektedir.



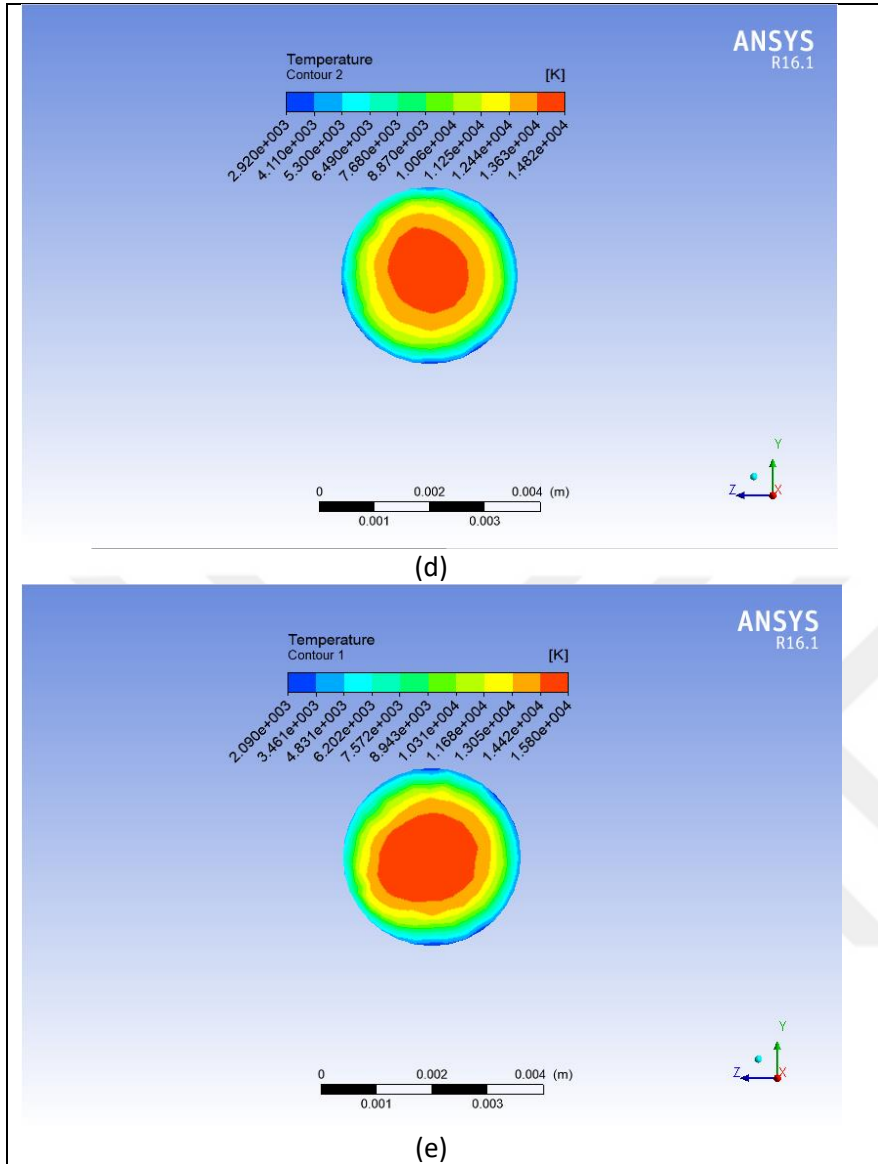
Şekil 5.23. x eksenı boyunca katot ucundan plazma tabancası çıkış kesıtine doğru 50 noktadan alınmış plazma sıcaklığı değişimi

5.4.2. Plazma tabancası çıkış kesıtinde oluşan plazma sıcaklığı dağılımları

Şekil 5.24 sabit 48 SLPM’de farklı akım değerleri için tabancası çıkış kesıtindeki sıcaklık dağılımlarını göstermektedir. Çıkış kesıtindeki maksimum plazma sıcaklığı farklı akım değerleri için 13 690 K ile 20 035 K arasında değişmektedir. Plazma jetinin dalgalanmalarını tabanca çıkış kesıtindeki gaz akışı belirlemektedir. Bu nedenle tabanca çıkış kesıtindeki gaz akışını anlamak önemlidir. Ark oluşumundan dolayı tabanca çıkış kesıtinde oluşan sıcaklık konturleri simetrik değildir. Düşük akım değerlerinde ark oluşum noktasının plazma tabancası çıkış kesıtine yakın olmasından dolayı plazma tabancası çıkış kesıtinde oluşan sıcaklık konturleri çok dalgalıdır. Akım değerlerinin artmasıyla plazma tabancası çıkış kesıtinde oluşan sıcaklık konturleri daha simetrik hale geldiği görülmektedir. Düşük akım değerlerinde soğuk sınır tabaka (anodu saran soğuk gaz tabakası) fazla olduğu görülmektedir. Akımın artmasıyla soğuk sınır tabakanın azaldığı görülmüştür.



Şekil 5.24. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitinde plazma sıcaklığı dağılımı (a: 50 A, b: 75 A, c:112 A, d:170 A, e: 250 A)



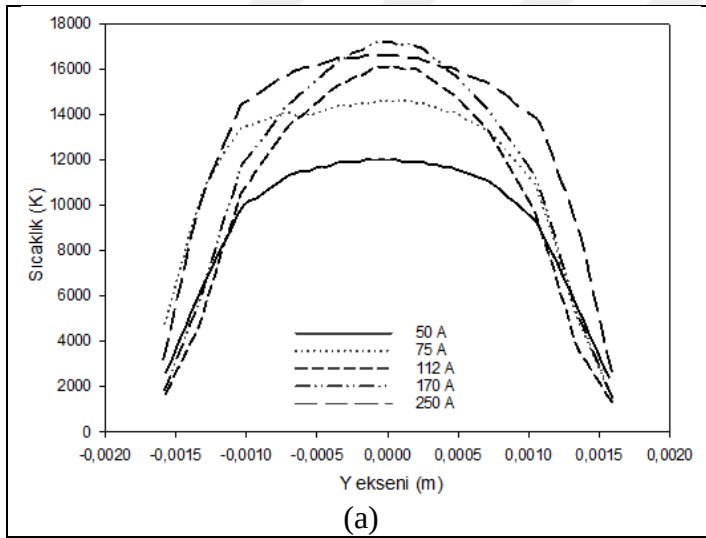
Şekil 5.24. (devam) Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitinde plazma sıcaklığı dağılımı (a: 50 A, b: 75 A, c:112 A, d:170 A, e: 250 A)

Çizelge 5.7. sabit 48 SLPM’de farklı akım değerleri için plazma tabancası çıkış kesitindeki ortalama ve maksimum plazma sıcaklığı değerlerini göstermektedir. Ortalama sıcaklık değerleri çıkış kesitinde yer alan 107 noktanın sıcaklık değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığı 8 688 K ile 12 032 K arasında değiştiği görülmektedir. Çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığı en yüksek 250 A’de görülmüştür.

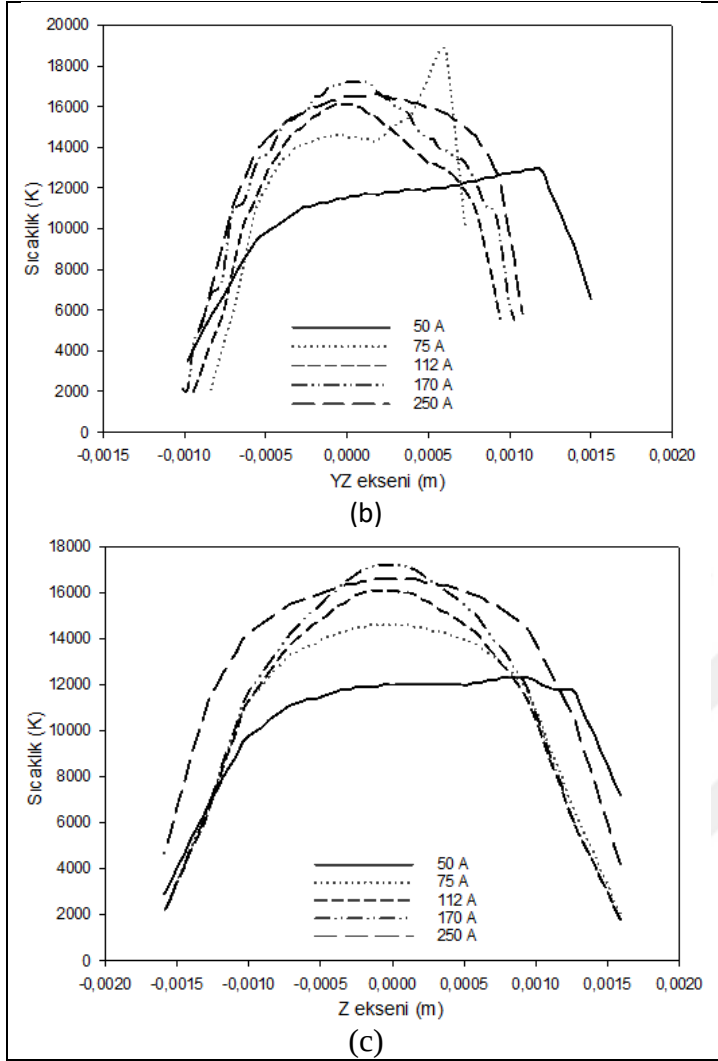
Çizelge 5.7. Sabit hacimsel debide farklı akımlar için çıkış kesitindeki plazma sıcaklıkları

Akım (A)	50	75	112	170	250
Çıkış kesitinde ortalama plazma sıcaklığı (K)	8 688	8 810	8 265	8 742	12 032
Çıkış kesitinde maksimum plazma sıcaklığı (K)	13 276	19 754	16 494	17 793	16 533

Şekil 5.25 sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitinde farklı eksenlerde yer alan çap üzerindeki 70 noktadan alınmış plazma sıcaklıklarını göstermektedir. Ark oluşumundan dolayı sıcaklık çıkış profilleri simetrik değildir. Fakat akım değerlerinin artmasıyla sıcaklık profilleri ark oluşumundan daha az etkilendiği görülmektedir ve sıcaklık profilleri daha simetrik olduğu görülmektedir. Çıkışta düzgün bir sıcaklık dağılımı elde edilmek isteniyorsa büyük akım değerlerinde çalışmak gerektiği gözükmektedir.



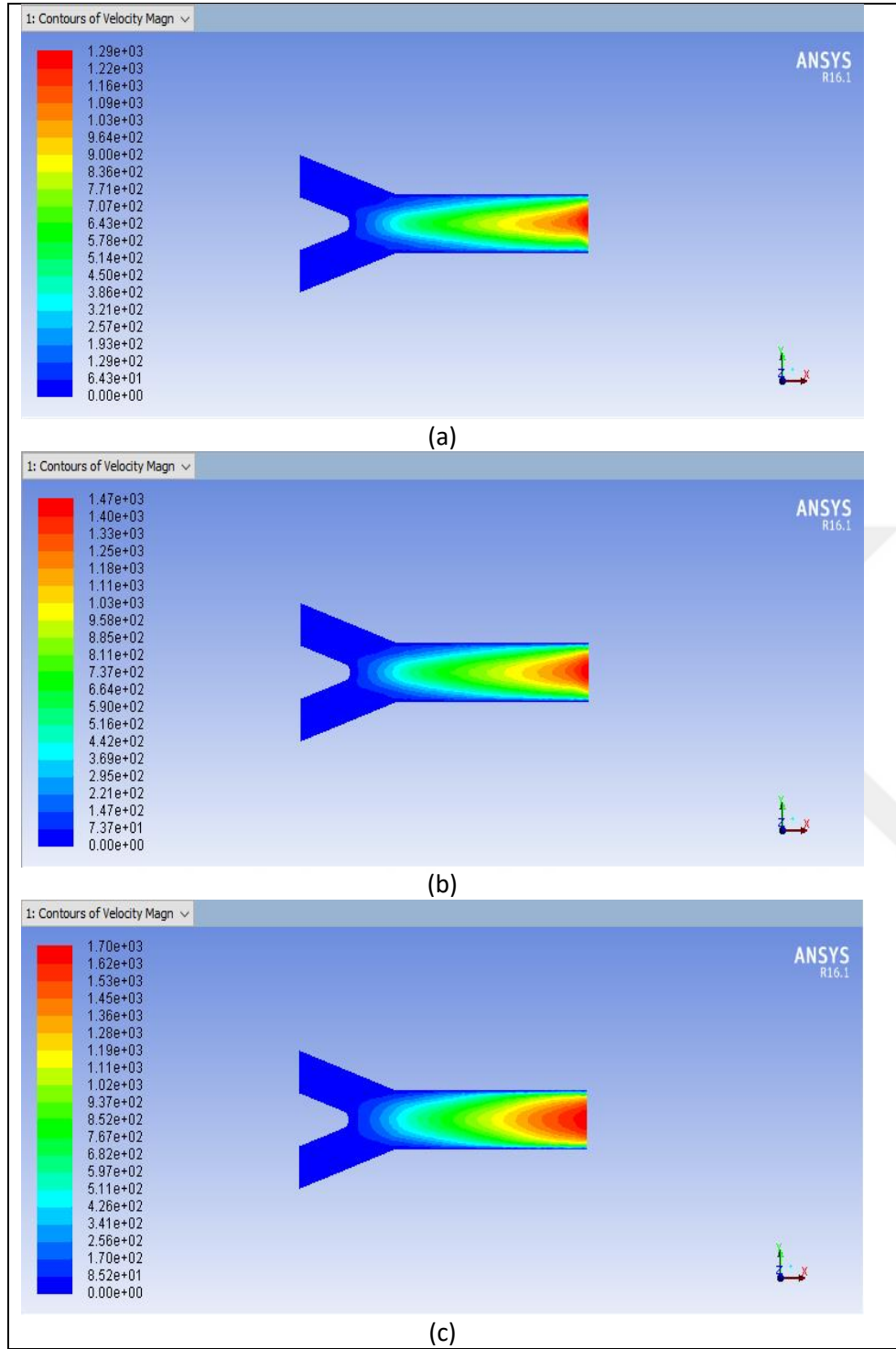
Şekil 5.25. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitinde farklı eksenlerden alınmış plazma sıcaklığı (a: y eksen, b: yz eksen, c: z eksen)



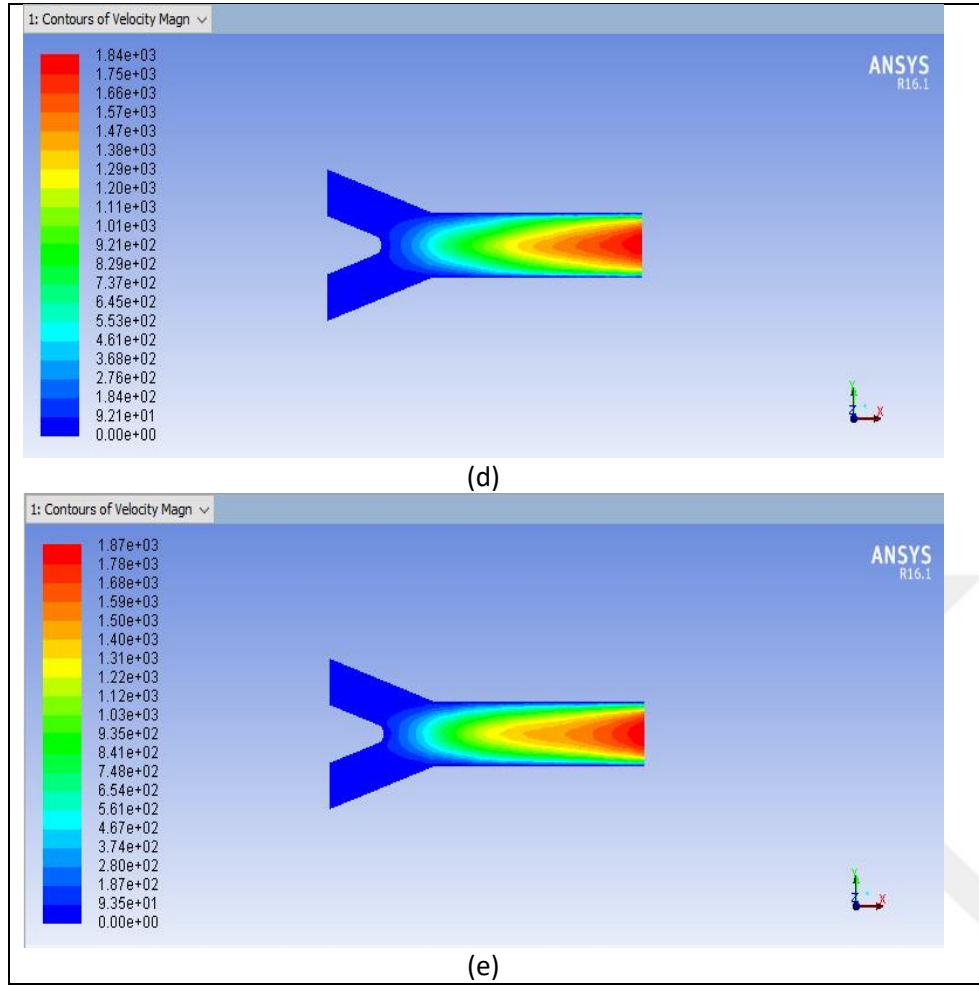
Şekil 5.25. (devam) Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitindeki farklı eksenlerden alınmış plazma sıcaklığı (a: y eksen, b: yz eksen, c: z eksen)

5.4.3. Plazma tabancası içinde oluşan plazma hızı dağılımı

Şekil 5.26 sabit 48 SLPM’de farklı akım değerleri için tabanca içerisindeki plazma hızı 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. Ayrıca, ark akımı kendi indüklenen manyetik alanıyla etkileşime girer ve ortaya çıkan Lorentz kuvveti, gazı hızlandırır. Akışkan dinamiği, ısı akışı ve elektromanyetik etkiler, tabancanın voltaj-akım oranına karşı akış hızı özelliklerini vermek üzere etkileşime girer [15]. Maksimum plazma hızı 1 290 m/s ile 1 980 m/s arasında değiştiği görülmektedir.

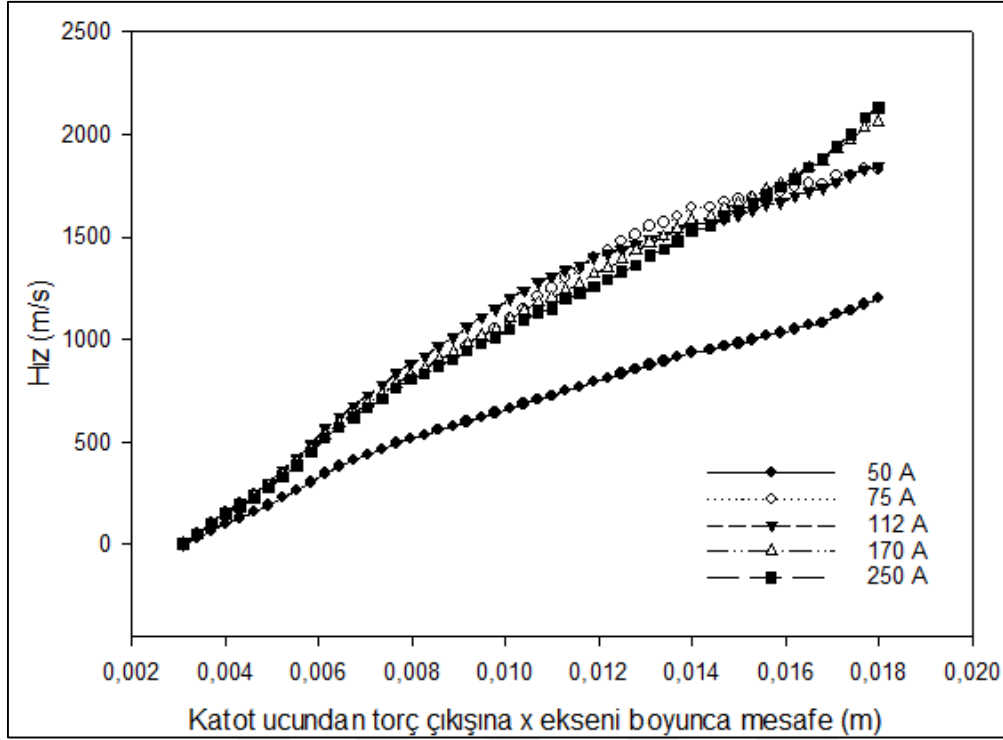


Şekil 5.26. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma hızı dağılımı (a: 50 A, b:75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)



Şekil 5.26. (devam) Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma hızı dağılımı (a: 50 A, b:75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)

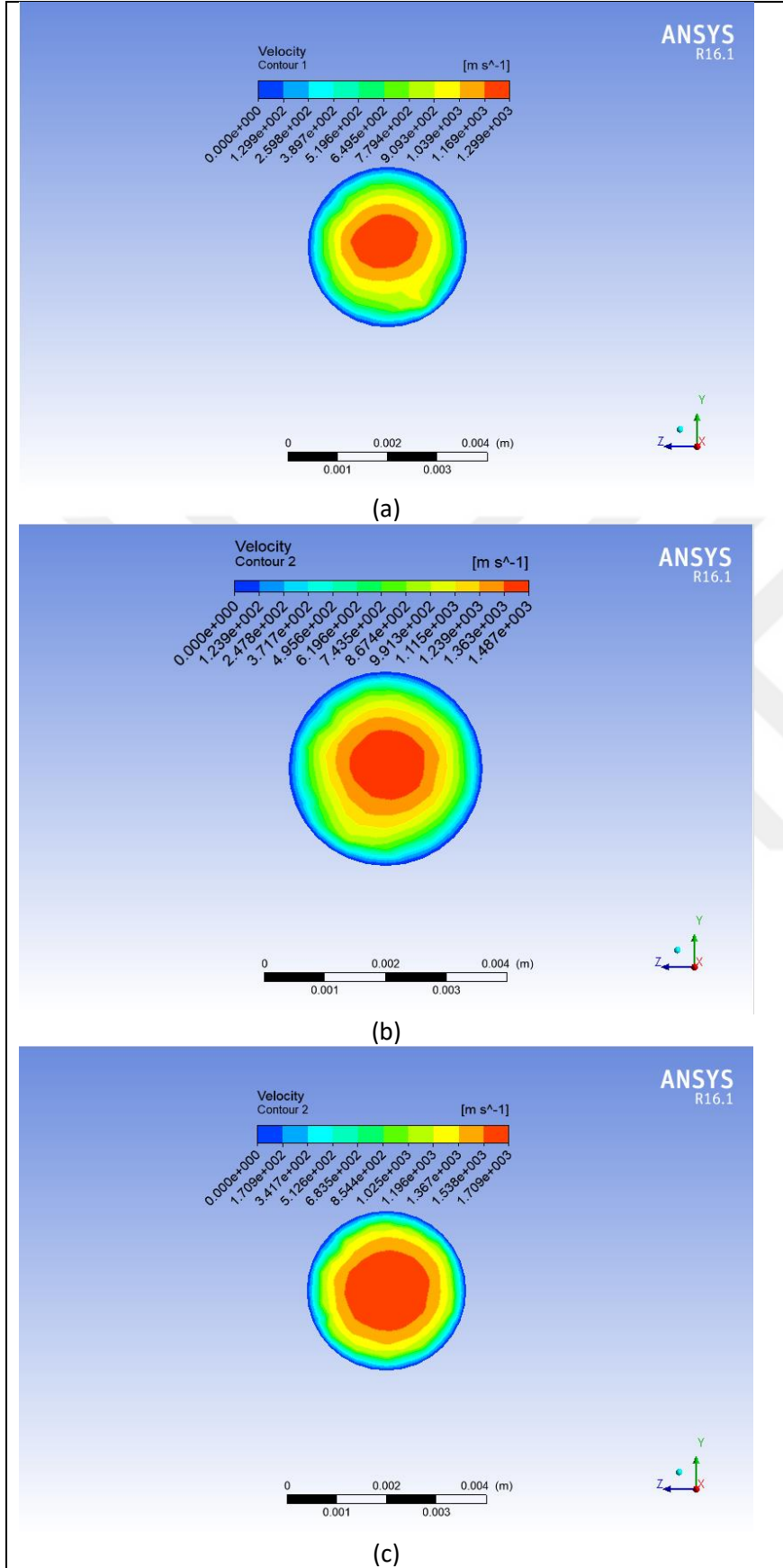
Şekil 5.27 48 SLPM’de farklı akımlar için x eksenı boyunca katot ucundan plazma tabancası çıkış kesıtine doğru 50 noktadan alınmış plazma hızı değışimini göstermektedir. Akımın artırılmasıyla plazma hızları x eksenı boyunca arttığı görölmektedir. Ark oluşumundan dolayı lineer bir artış yoktur.



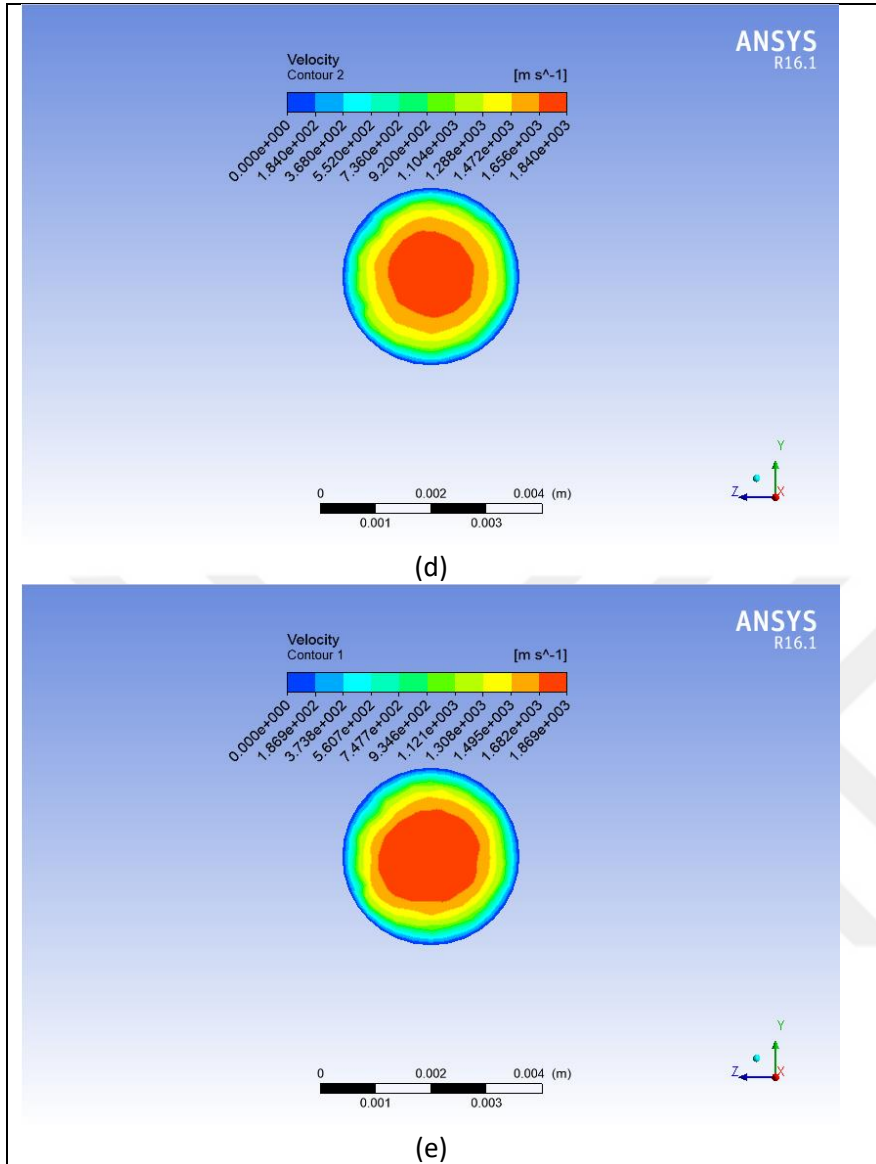
Şekil 5.27. x eksenini boyuncu katot ucundan plazma tabancası çıkış kesitine doğru 50 noktadan alınmış plazma hızı değişimi

5.4.4. Plazma tabancası çıkış kesitinde oluşan plazma hızı dağılımı

Şekil 5.28 sabit 48 SLPM’de farklı akım değerleri için plazma tabancası çıkış kesitindeki plazma hızı dağılımını göstermektedir. Çıkış kesitindeki maksimum plazma hızı değişen akım değerleri için 1 299 m/s ile 1 840 m/s arasında değişmektedir. Çıkış kesitindeki maksimum plazma hızı 1 860 m/s olarak 250 A değerinde görülmüştür. Ark oluşumundan dolayı plazma tabancası çıkış kesitinde oluşan hız konturleri simetrik değildir. Çıkış kesitinde oluşan hız konturları çıkış kesitinde oluşan sıcaklık konturlarıyla karşılaştırıldıklarında daha simetrik oldukları görülmektedir.



Şekil 5.28. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitindeki plazma hızı dağılımı (a: 50 A, b:75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)



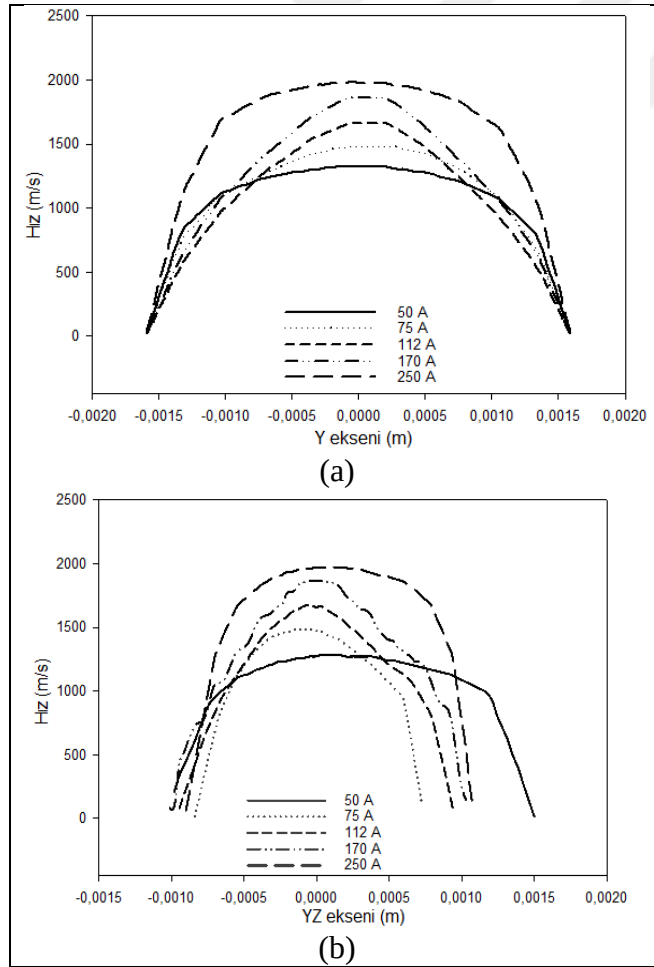
Şekil 5.28. (devam) Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitindeki plazma hızı dağılımı (a: 50 A, b:75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)

Çizelge 5.8 sabit 48 SLPM’de farklı akım değerleri için plazma tabancası çıkış kesitindeki ortalama ve maksimum plazma hız değerlerini göstermektedir. Plazma tabancası çıkış kesitindeki ortalama plazma hızı 107 noktanın hız değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Çıkış kesitindeki ortalama plazma hızı 1 042 m/s ile 1 774 m/s arasında değiştiği görülmektedir. Çıkış kesitindeki ortalama plazma hızı olarak en yüksek 250 A’de olduğu görülmektedir.

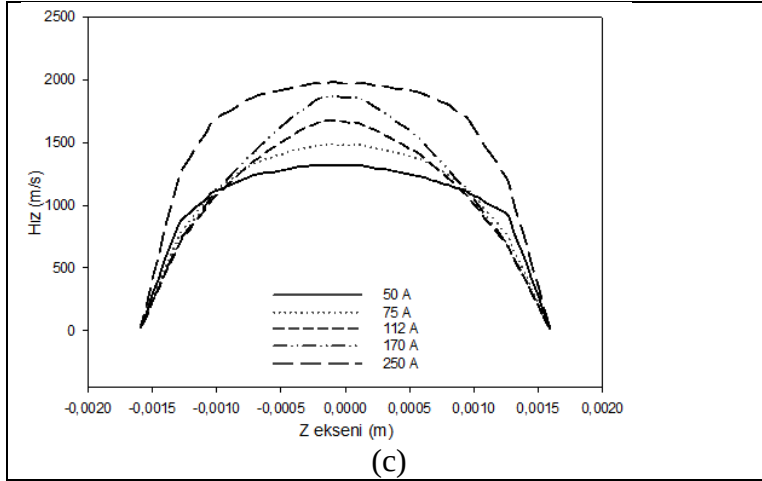
Çizelge 5.8. Sabit hacimsel debide farklı akımlar için çıkış kesitindeki plazma hızları

Akım (A)	50	75	112	170	250
Çıkış kesitindeki ortalama plazma hızı (m/s)	1 042	1 043	1 017	1 560	1 774
Çıkış kesitindeki maksimum plazma hızı (m/s)	1 299	1 487	1 703	1 840	1 860

Şekil 5.29 sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitinde farklı eksenlerde yer alan çap üzerindeki 70 noktadan alınmış plazma hızlarını göstermektedir. Hız grafikleri ark oluşum noktasından dolayı eksenel olarak simetrik değildir. Çıkış kesitinde oluşan hız profilleri çıkışta kesitindeki sıcaklık profilleriyle karşılaştırıldığında çıkış hız profillerinin daha düzgün olduğu görülmektedir. Akım değerlerinin artmasıyla hız profilleri daha kararlı hale geldiği görülmektedir.



Şekil 5.29. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitinde farklı eksenlerden alınmış plazma hızı (a: y eksen, b: yz eksen, c: z eksen)



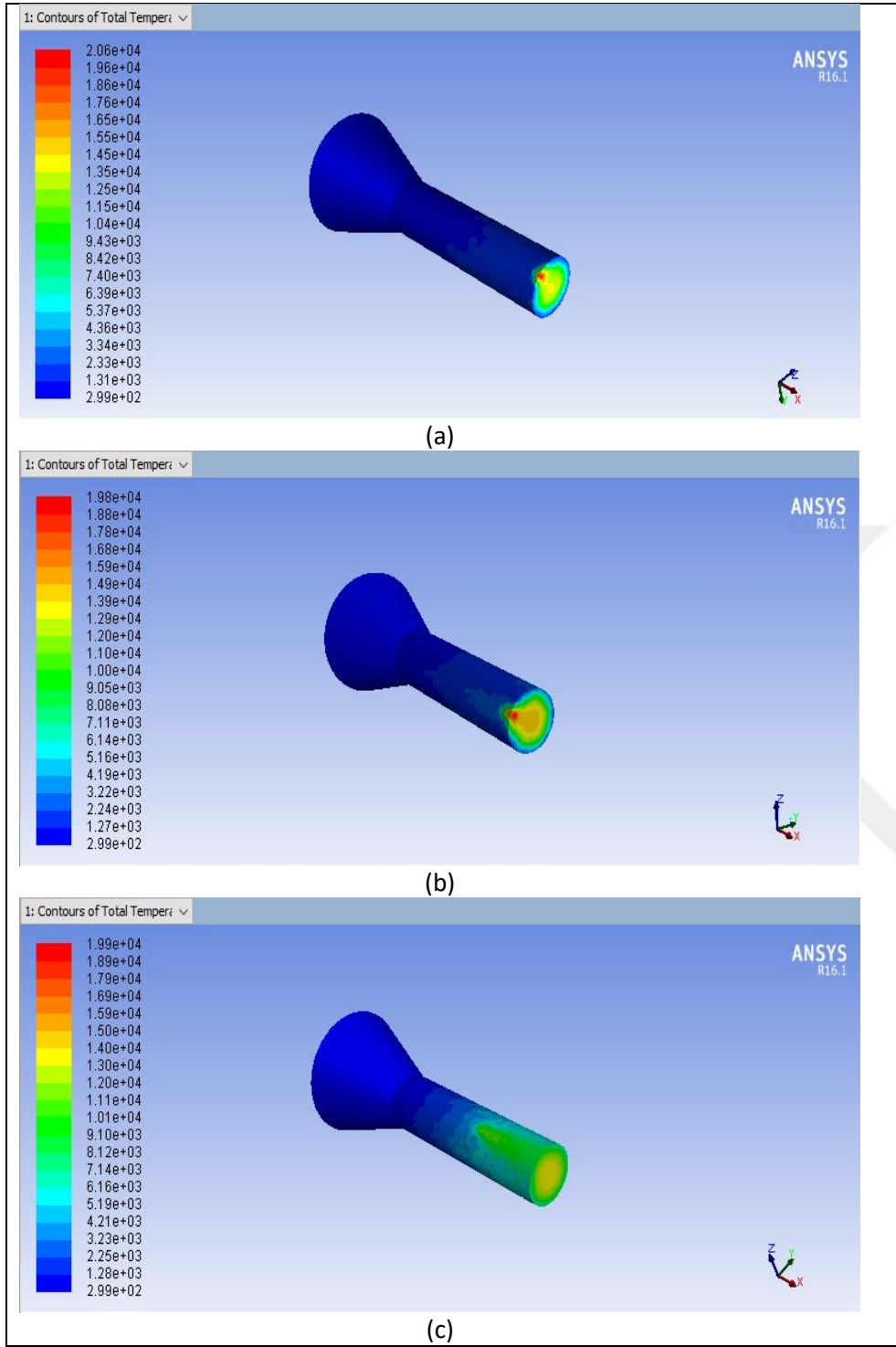
Şekil 5.29. (devam) Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası çıkış kesitinde farklı eksenlerden alınmış plazma hızı (a: y eksen, b: yz eksen, c: z eksen)

5.4.5. Ark kökü bağlantı noktası

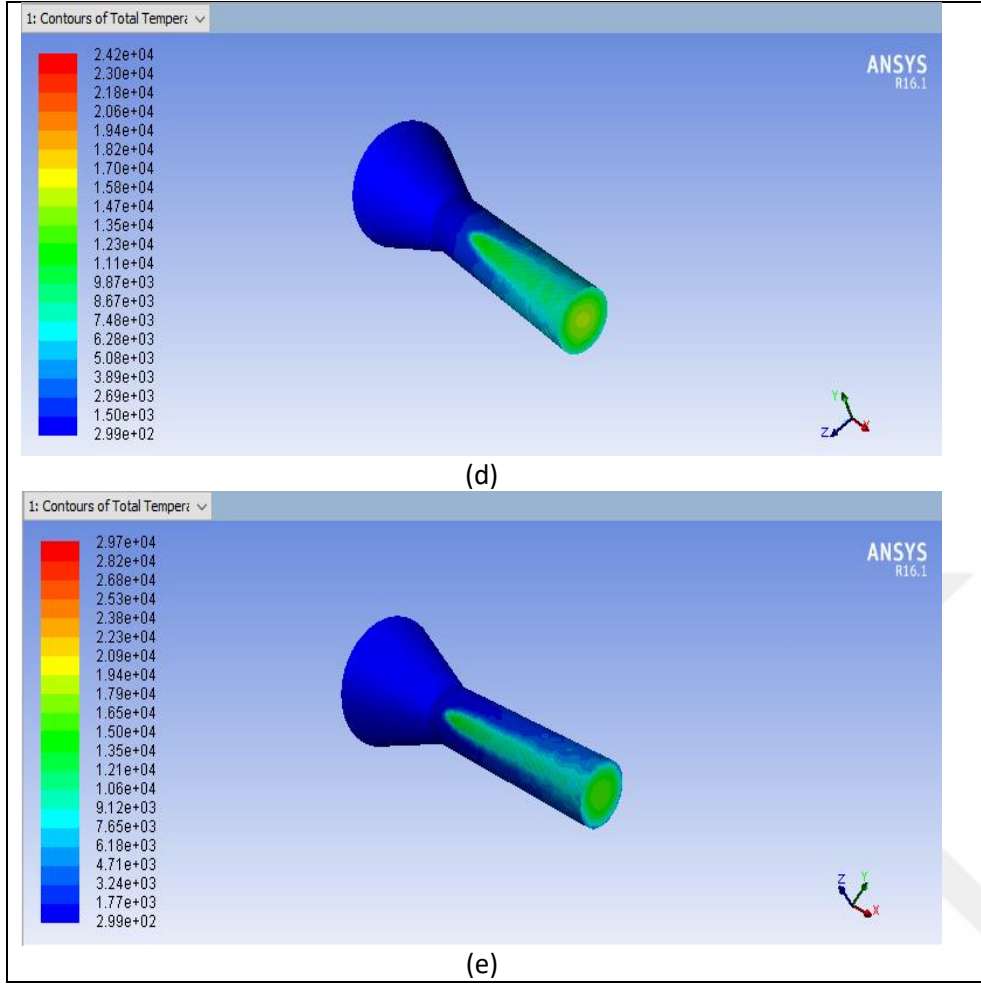
Şekil 5.30 sabit 48 SLPM’de farklı akım değerleri için ark kökü bağlantı noktasını göstermektedir. Anot ve katoda uygulanan voltaj farkından dolayı anot ve katot arasında ark oluşumu sağlanmıştır. Ark yapısı gereği anot ve katot arasında en kısa yolu izlemektedir [22]. Şekil 5.30’da görüldüğü gibi katot ucundan uygulanan akım değerinin artmasıyla ark boyu kısalmaktadır. Artan akım anot üzerindeki ark oluşum noktasını tabanca giriş kesitine doğru kaydırmaktadır [28, 30]. Anot ark kökü elektromanyetik kuvvet nedeniyle anot yüzeyinde tabanca giriş kesitine doğru hareket etmesine rağmen, sonunda sabit bir duruma gelir. Anot ark kökünün son konumu, gaz dinamik sürüklenme ve Lorentz kuvvetleri arasındaki kuvvet dengesi ile belirlenir. Bu sayısal simülasyonda, anot ark kökü için kararlı hal elde edildiğinde katot ucundan girilen 50, 75, 112, 170, 250 A değerleri için ark uzunlukları sırasıyla yaklaşık olarak 14,9; 14,7; 10,1; 7,3; 4,7 mm olarak elde edilmiştir. Literatürde verilen Eş. 5.2 ark uzunluğunun artan akımla kısılacığını göstermektedir [26]:

$$L \sim \rho^{\frac{5}{4}} \frac{V}{I} \quad (5.2)$$

Ark uzunluğu L , yoğunluk ρ , potansiyel fark V , akım I ile gösterilmiştir.



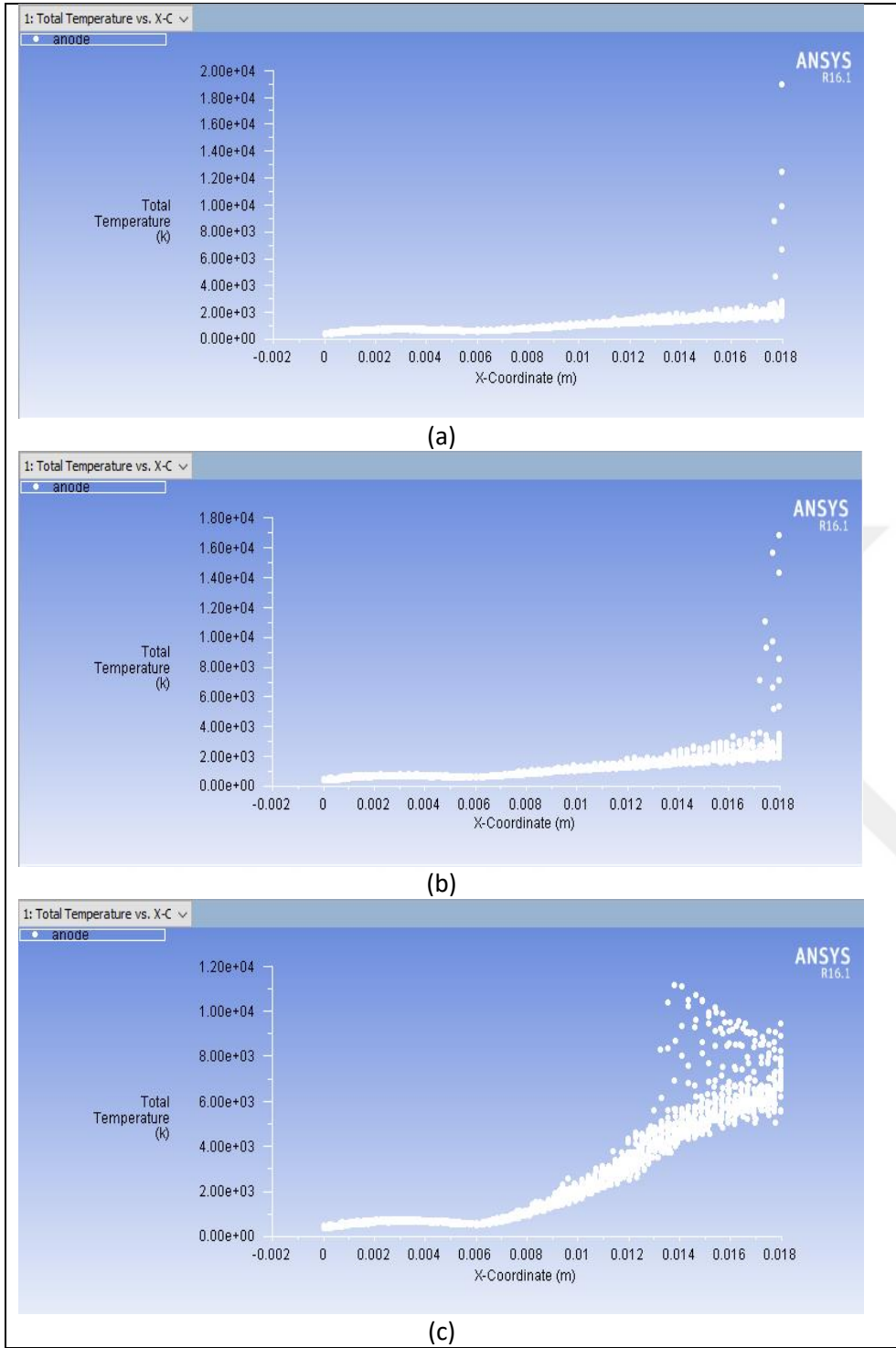
Şekil 5.30. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için ark oluşum noktaları (a: 50 A, b: 75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)



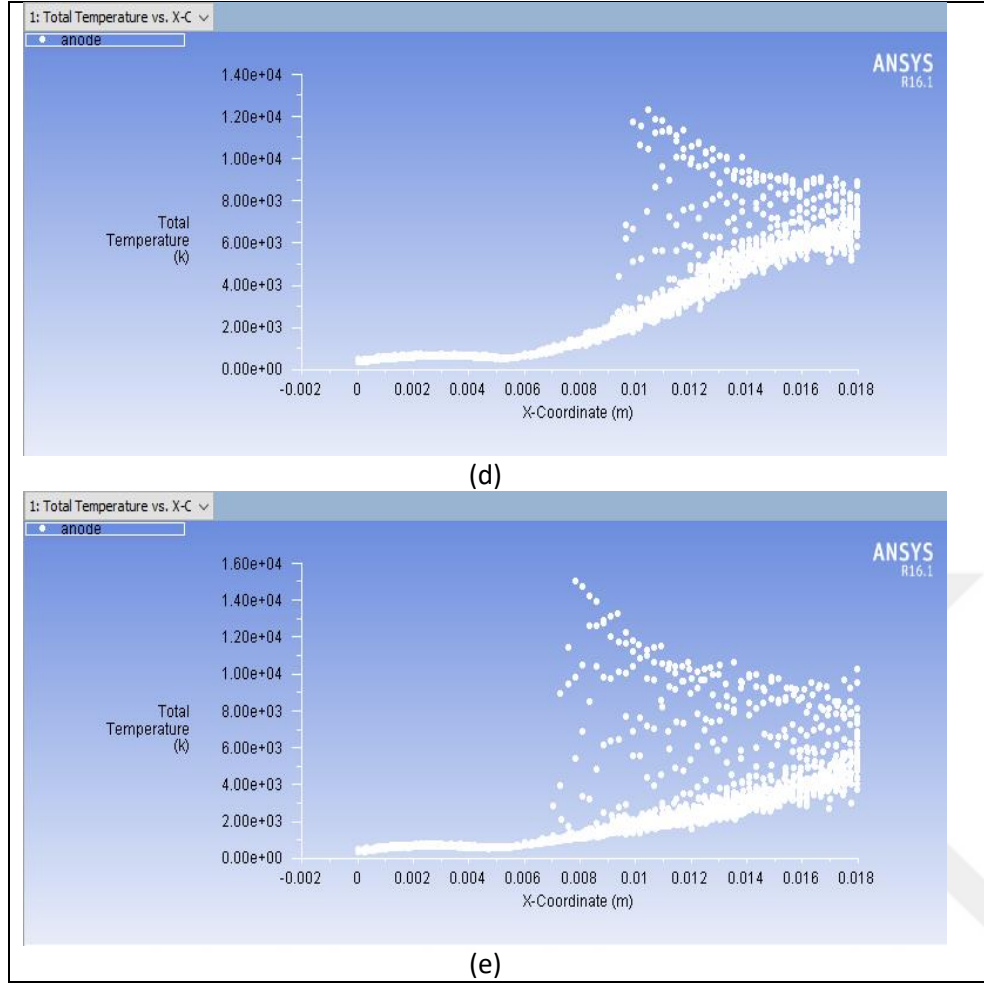
Şekil 5.30. (devam) Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için ark oluşum noktaları (a: 50 A, b: 75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)

5.4.6. Anot cidarı sıcaklığının x eksenı boyunca dağılımı

Şekil 5.31 sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için x eksenı boyunca anot cidarında oluşan sıcaklık dağılımını göstermektedir. Joule ısınma etkisinden dolayı anot cidarında oluşan maksimum sıcaklık ark oluşum noktasında meydana gelmektedir. Anot cidarındaki sıcaklık dağılımı, artan akım değerleriyle ark oluşum noktasının plazma tabancası giriş kesitine doğru kaymasından dolayı sıcaklık dağılımıda tabanca giriş kesitine doğru kaymaktadır. Anot duvarı aşınmasını azaltmak için ark oluşum bölgesinin anot duvarı ile olan teması azaltılabilir. Bunun için ark oluşum noktasının istenen çalışma koşullarını etkilemeyecek şekilde (plazma çıkış sıcaklığı, hızı ve çıkış sıcaklık, hız profili gibi) plazma tabancası çıkış kesitine doğru kaydırılmasıyla anot duvarının daha az sıcaklığa maruz kalması sağlanabilir.



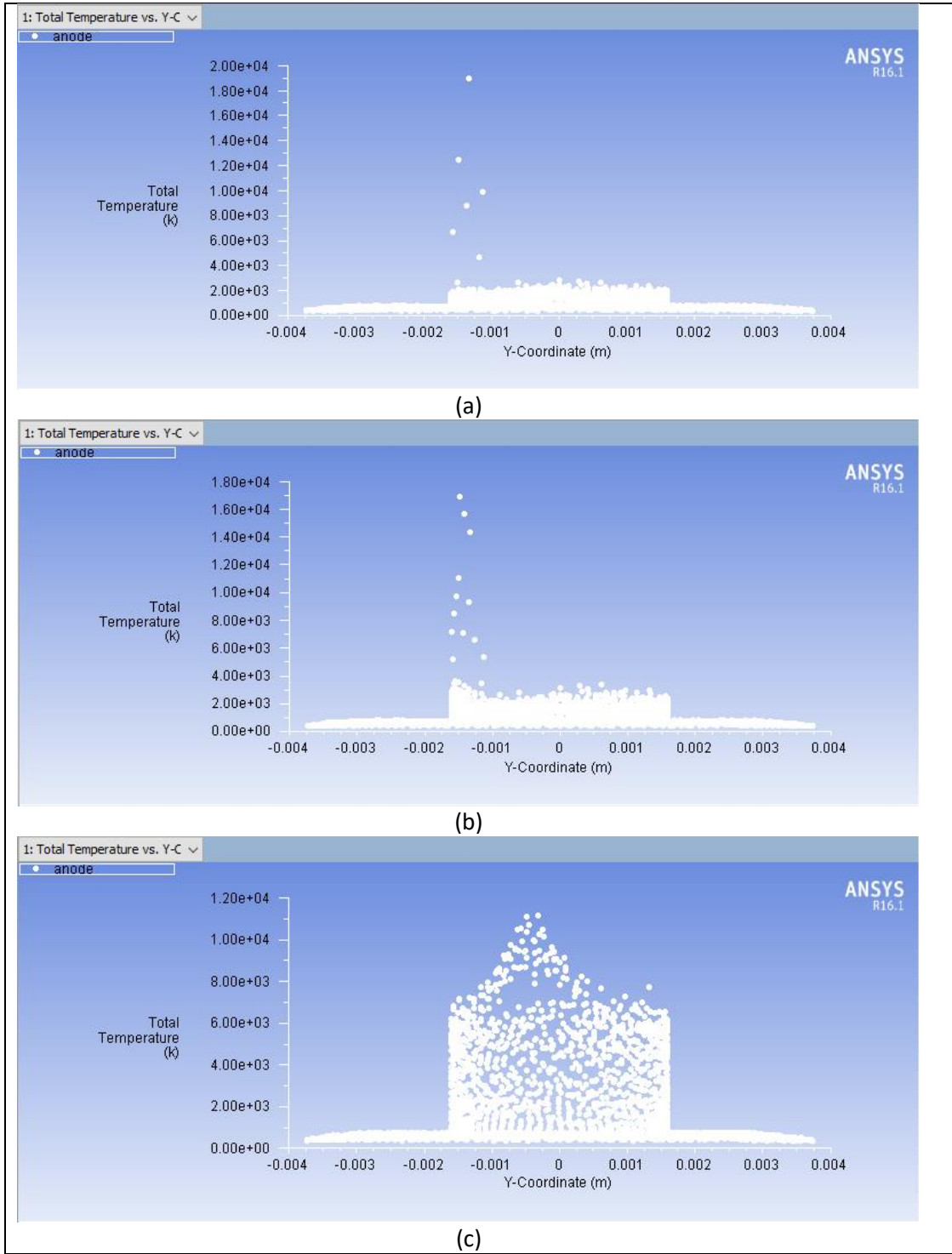
Şekil 5.31. Sabit 48 SLPM debi değeri için anot cidarı sıcaklığının x eksenı boyunca dağılımı
(a: 50 A, b: 75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)



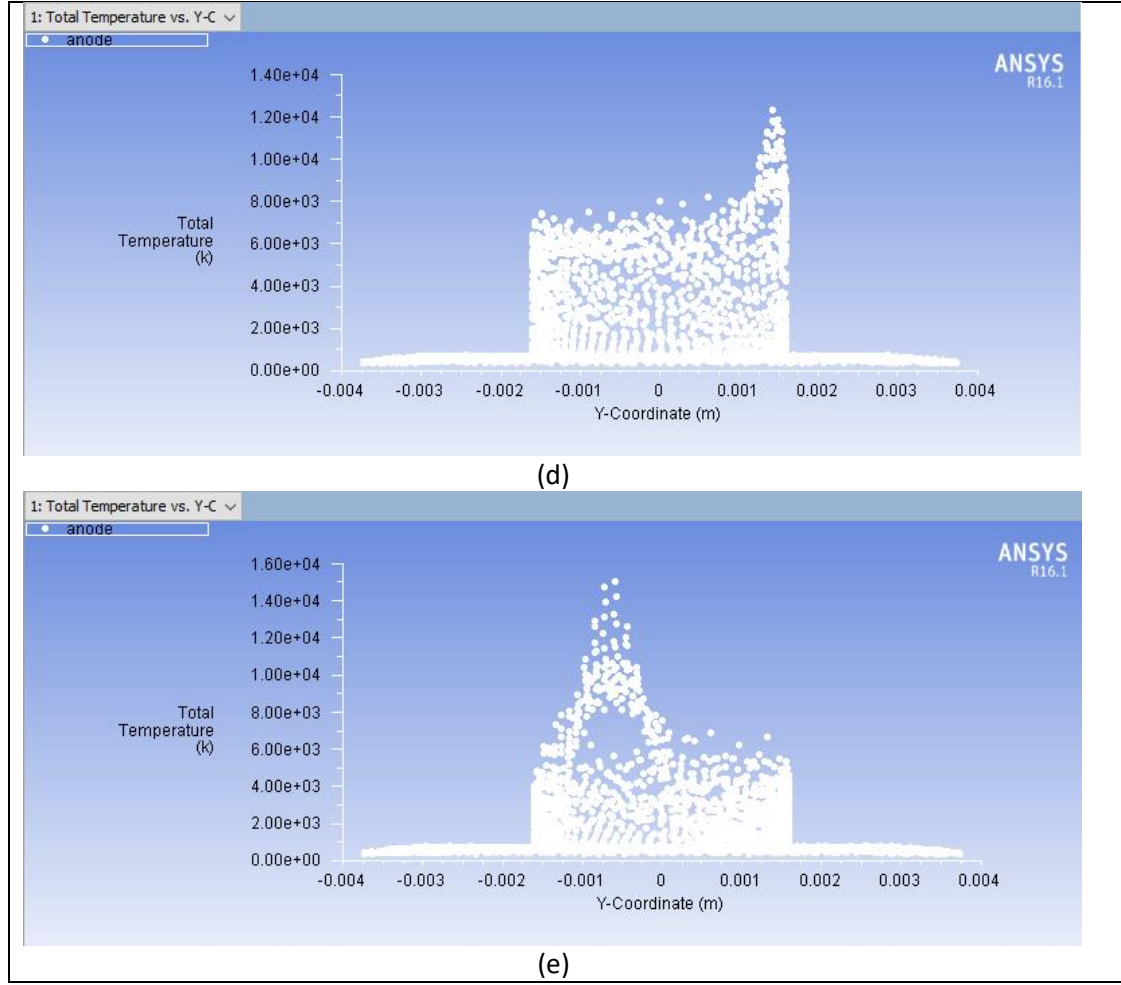
Şekil 5.31. (devam) Sabit 48 SLPM debi değeri için anot cidarı sıcaklığının x eksenı boyunca dağılımı (a: 50 A, b: 75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)

5.4.7. Anot cidarı sıcaklığının y eksenı boyunca dağılımı

Şekil 5.32 sabit 48 SLPM’de farklı akım değeri için y eksenı boyunca anot cidarı sıcaklık dağılımını göstermektedir. Akım değeri artırılmasıyla anot cidarında oluşan yoğun sıcaklık aralığının artma eğiliminde olduğu görülmektedir.



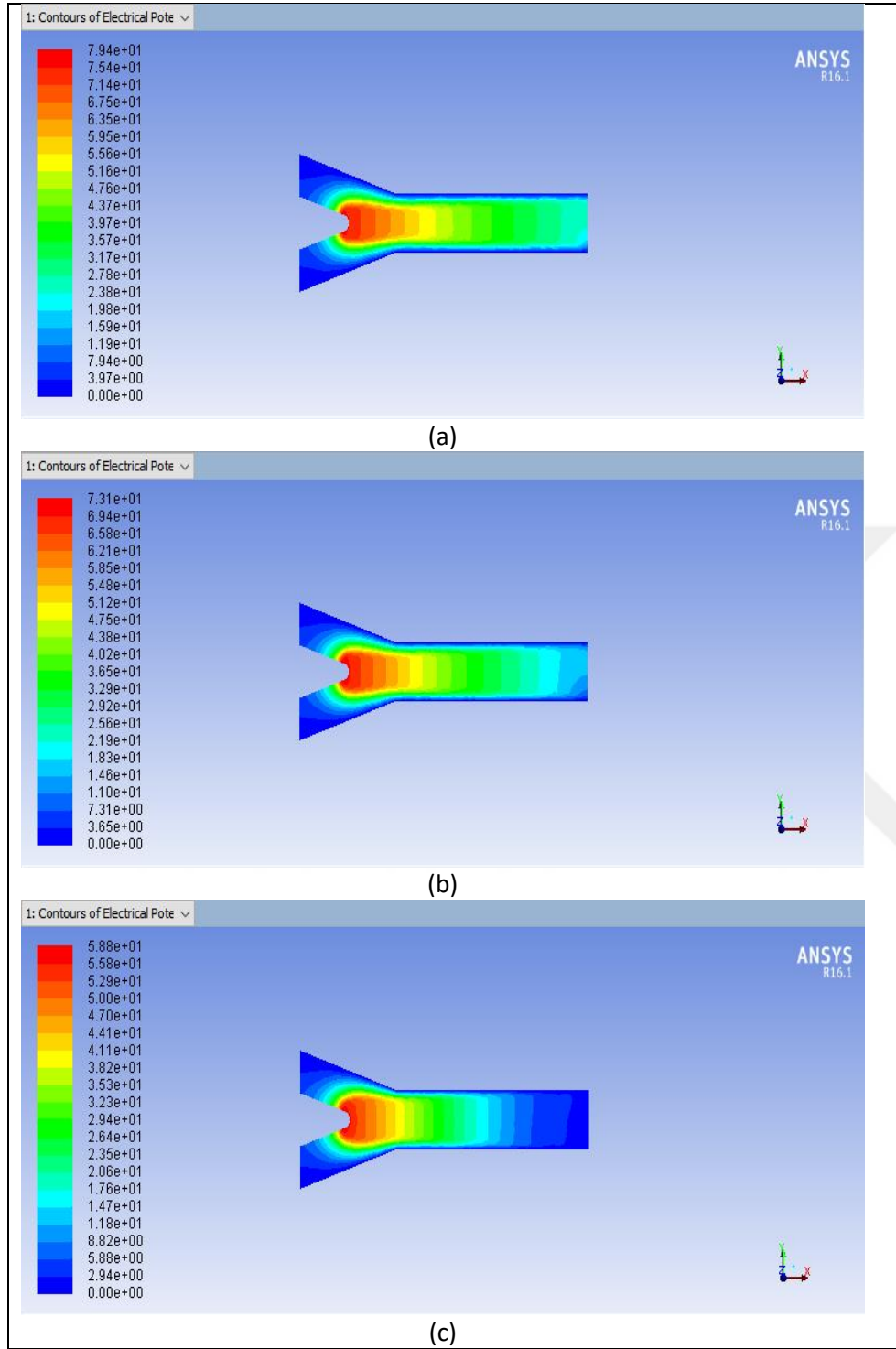
Şekil 5.32. Sabit 48 SLPM debi değeri için anot cidarı sıcaklığının y eksenı boyunca dağılımı
(a: 50 A, b: 75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)



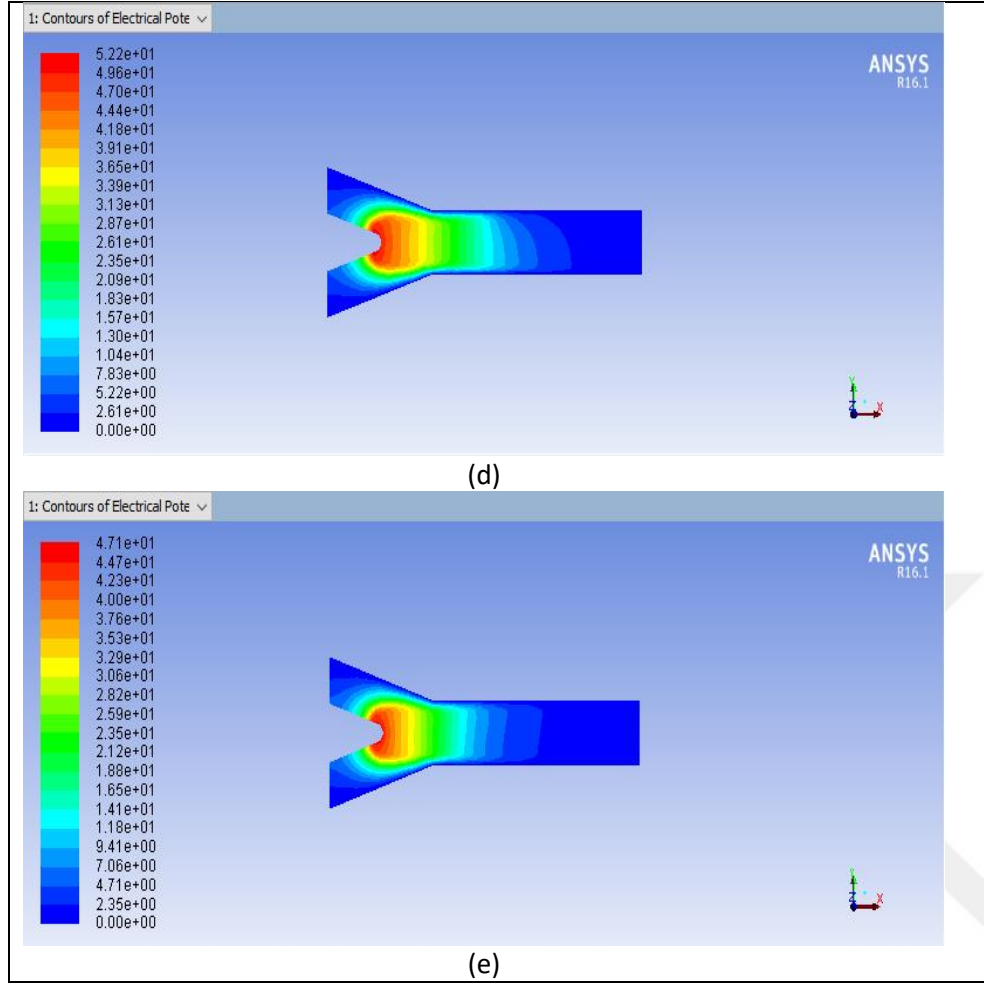
Şekil 5.32. (devam) Sabit 48 SLPM debi değeri için anot cidarı sıcaklığının y eksenı boyunca dağılımı (a: 50 A, b: 75 A, c: 112 A, d: 170 A, e: 250 A)

5.4.8. Ark voltajının ark uzunluğu ile ilişkisi

Şekil 5.33 plazma tabancası içerisinde sabit 48 SLPM hacimsel debide farklı akım değeri için plazma elektriksel potansiyellerini göstermektedir. Artan akımla ark boyu kısalmakta ve buna bağlı olarak plazma elektrik potansiyeli azalmaktadır [15]. Elektrik potansiyeli maksimum olarak katotada yakın yerlerde oluştuğu görülmektedir. Anot duvarı üzerinde elektrik potansiyeli sıfırdır. Artan akım ile plazma tabancası çıkış kesatine doğru olan elektrik potansiyelinin katot duvarına yaklaştığı görülmektedir.



Şekil 5.33. Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası içerisindeki elektrik potansiyeli dağılımı (a: 50 A, b:75 A, c:112 A, d:170 A, e:250 A)



Şekil 5.33. (devam) Sabit 48 SLPM’de farklı akımlar için plazma tabancası içerisindeki elektrik potansiyeli dağılımı (a: 50 A, b:75 A, c:112 A, d:170 A, e:250 A)

Çizelge 5.9 sabit 48 SLPM’de farklı akım değerleri için plazma tabancası gücünü ve tabanca verimini göstermektedir. Akım değerlerinin artırılmasıyla plazma tabancası gücü ile beraber tabanca verimi de artmıştır. Artan akım değerleriyle ark boyu kısalmaktadır. Bu durum ark voltajını düşürücü etki yapmaktadır. Buna bağlı olarak tabanca gücünde düşüş beklenir. Fakat burda ark voltajı düşmesine rağmen akım değerinin artırılması tabanca gücünü artırmıştır. Bu durum dikkate alınarak bu çalışma koşullarında tabanca gücünün değişmesi üzerine akım değerinin ark uzunluğundan daha etkili olduğu görülmüştür. Artan akım değerleriyle plazma tabancası çıkış kesitine ulaşan enerji değerlerinin de artış gösterdiği görülmektedir.

Çizelge 5.9. Sabit hacimsel debide farklı akımlar için analiz sonuçları

Akım (A)	Çıkış kesiti ısı geçişi (W)	$V_{ark}I$ (W)	Plazma tabancası verimi (%)
50	3 720	6 066	61,3
75	5 097	7 727	66,0
112	5 584	7 922	70,0
170	7 280	10 453	69,6
250	9754	13 826	71,0

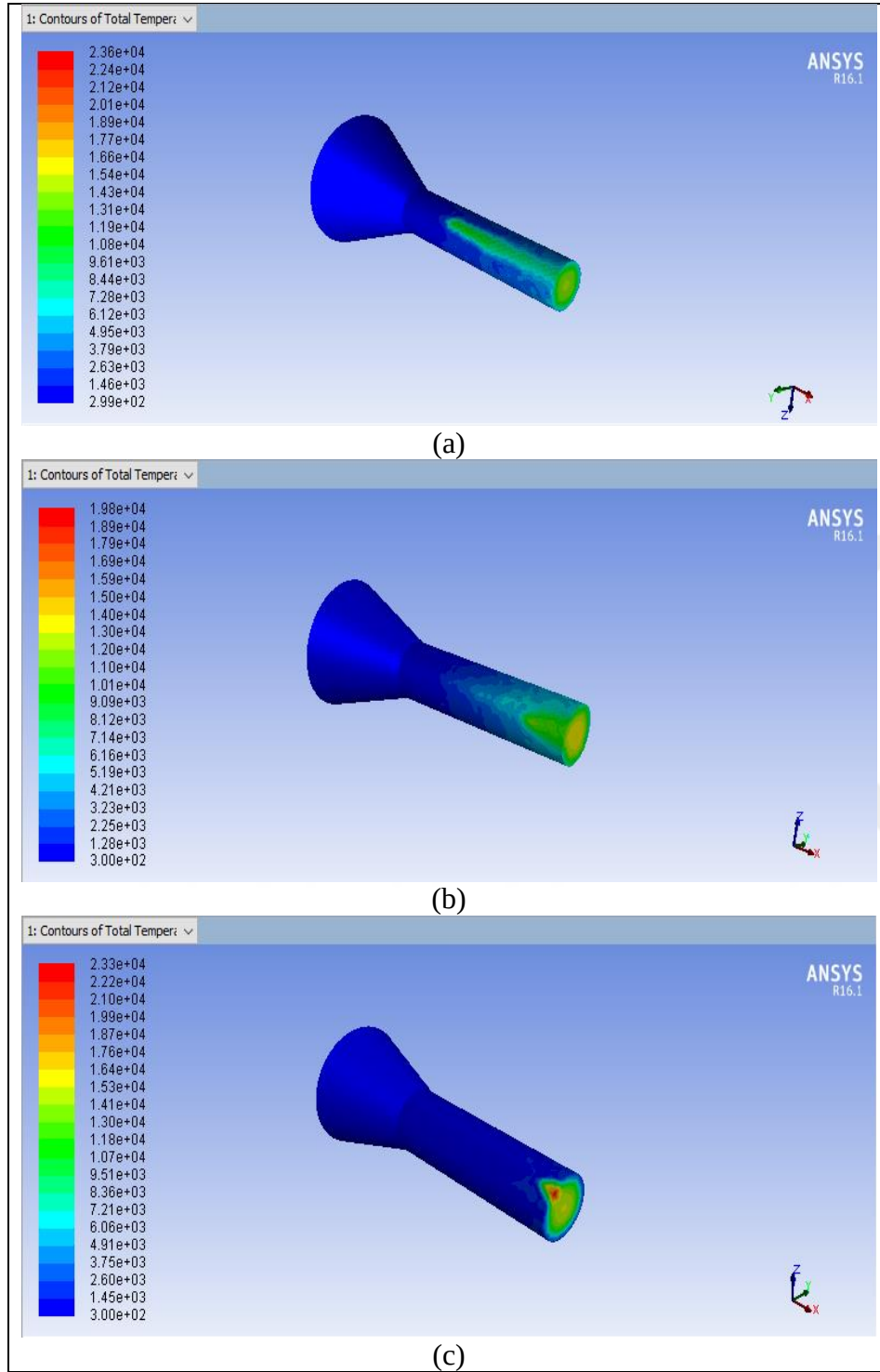
5.5. Sabit Hacimsel Debi ve Sabit Akımda Yapılan Analizler

Çalışmanın bu bölümünde akım ve hacimsel debi sabit tutularak plazma tabancasının çıkış çapı ve anot duvar uzunluğu değiştirilmiştir. Tabanca çıkış çapının ve anot duvar uzunluğunun ark oluşum noktası, plazma sıcaklığı, plazma hızı, tabanca verimi ve anot duvarı sıcaklığı üzerine etkileri incelenmiştir.

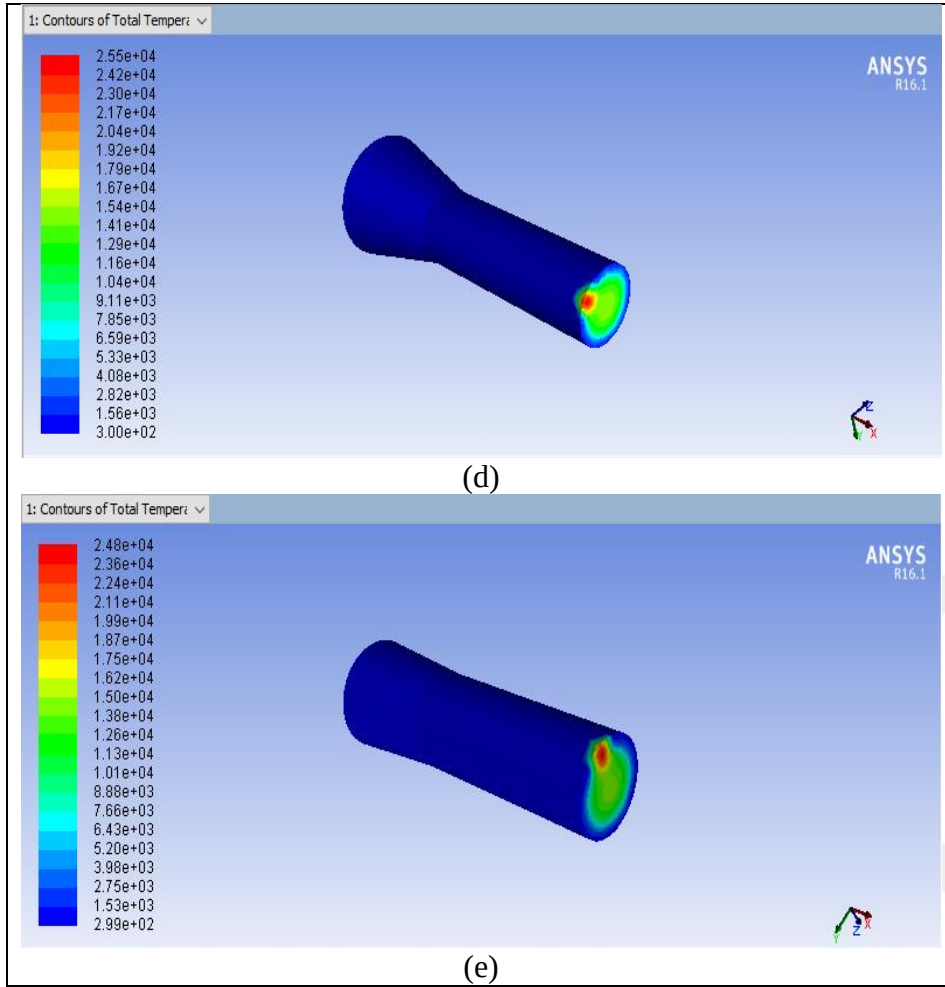
5.5.1. Plazma tabancası çıkış çapının plazma akış alanı üzerine etkisi

Çalışmanın bu bölümünde tabanca çıkış çapı değiştirilerek elden edilen sonuçlar verilmiştir. Akım değeri 112 A, hacimsel debi değeri 60 SLPM’de tutularak çözümlemeler yapılmıştır. Anot duvarında sınır şartı olarak konveksiyon tanımlanmıştır. Soğutma suyunun ısı taşınım katsayısı ve giriş sıcaklığı literatür [25, 24] dikkate alınarak $10^5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, 300 K olarak alınmıştır. Anot duvarının uzunluğu 12 mm alınmıştır. Plazma tabancasının çıkış çapı 2,6; 3,2; 3,6; 4,0; 5,0 mm olarak seçilmiştir.

Şekil 5.34 60 SLPM 112 A’de plazma tabancasının çıkış çapı değiştirilmesiyle ark oluşum noktasının değişimini göstermektedir. Plazma tabancasının çıkış çapı artmasıyla ark oluşum noktası plazma tabancası çıkış kesitine doğru hareket ettiği görülmüştür.

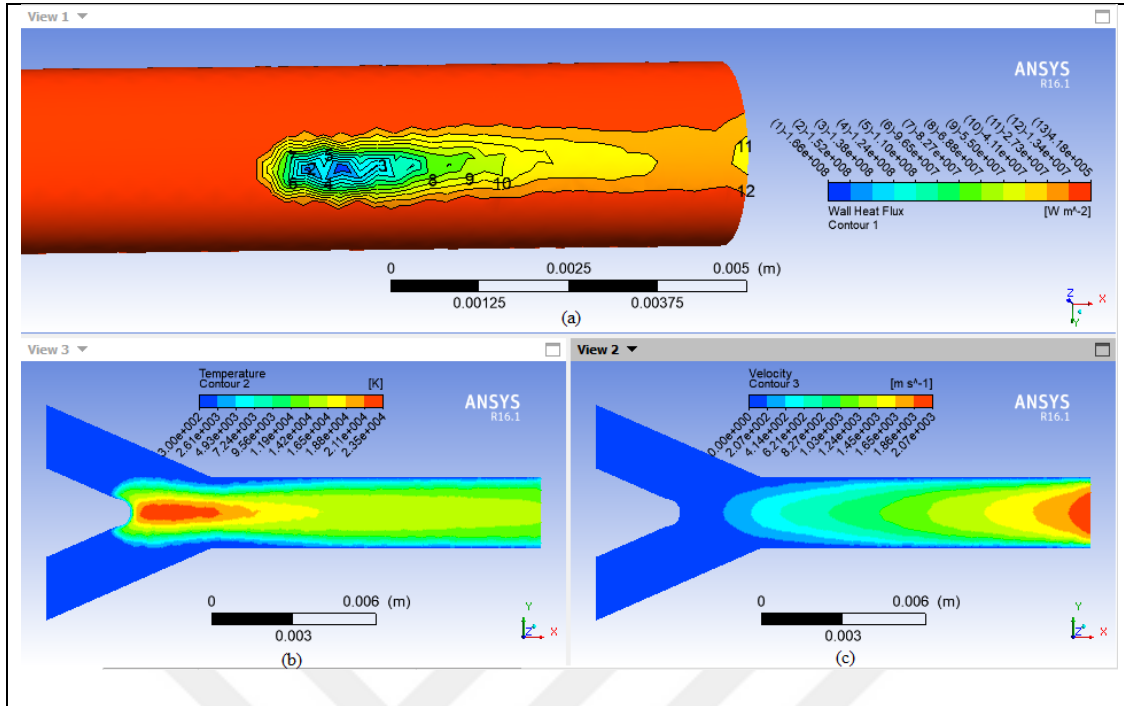


Şekil 5.34. 60 SLPM 112 A’de farklı çıkış çapları için ark oluşum noktaları (a: 2,6 mm; b: 3,2 mm; c: 3,6 mm; d: 4,00 mm; e: 5,00 mm)



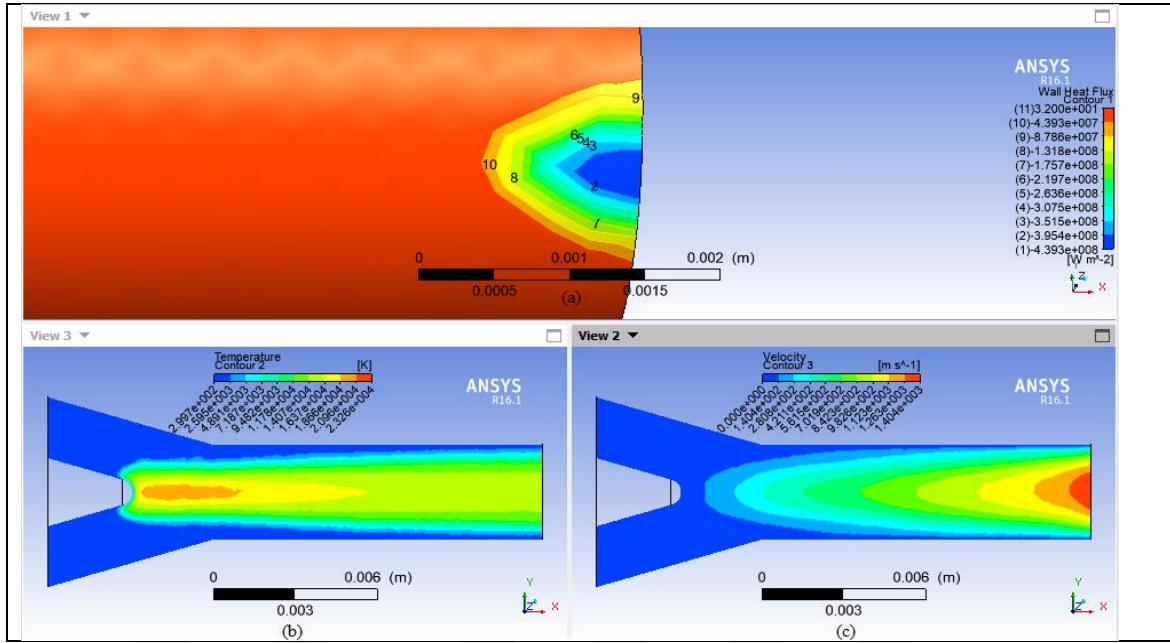
Şekil 5.34. (devam) 60 SLPM 112 A’de farklı çıkış çapları için ark oluşum noktaları (a: 2,6 mm; b: 3,2 mm; c: 3,6 mm; d: 4,00 mm; e: 5,00 mm)

Şekil 5.35 60 SLPM 112 A’de plazma tabancası çıkış çapının 2,6 mm olduğu durumdaki analiz sonuçlarını göstermektedir. Ark oluşum noktasının olduğu yerde ısı geçişinin maksimum olduğu görülmektedir. Plazma tabancasında oluşan maksimum sıcaklık ve hız sırasıyla 23 500 K ve 2 070 m/s’dir.



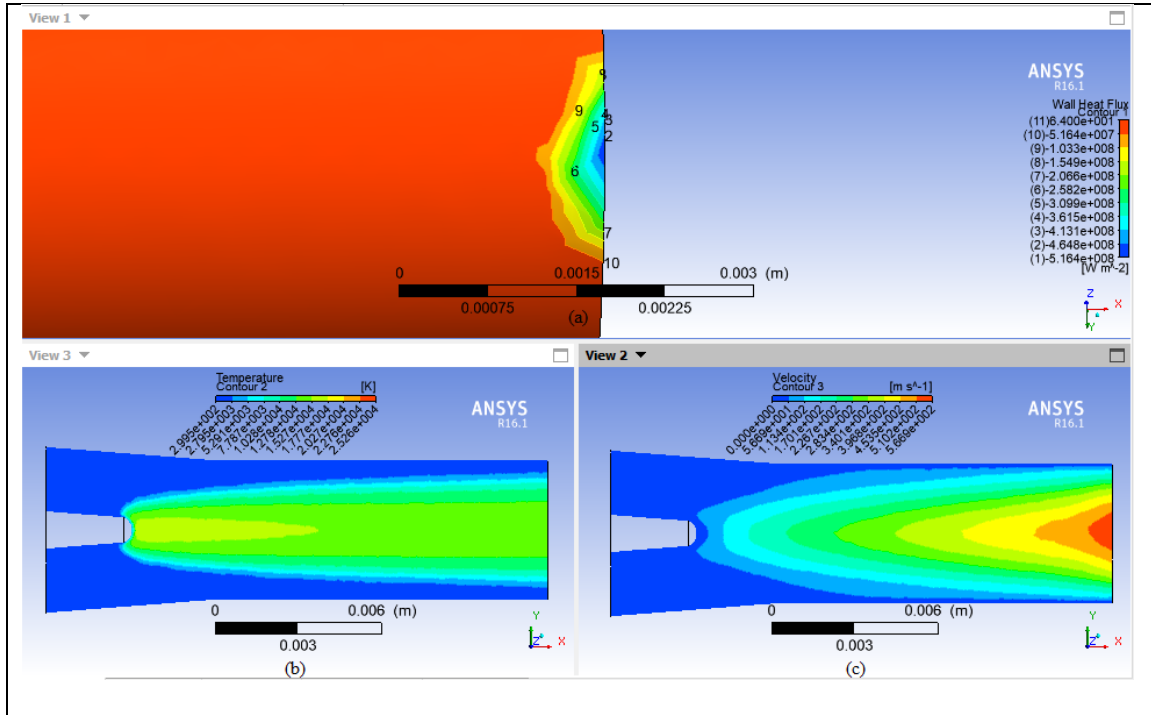
Şekil 5.35. 60 SLPM 112 A’de plazma tabancası çıkış çapı 2,6 mm için analiz sonuçları (a: ark bölgesindeki ısı akısı, b: sıcaklık dağılımı, c: hız dağılımı)

Şekil 5.36 60 SLPM 112 A’de plazma tabancası çıkış çapının 3,6 mm olduğu durumdaki analiz sonuçlarını göstermektedir. Plazma tabancasında oluşan maksimum sıcaklık ve hız sırasıyla 23 260 K ve 1 404 m/s’dir.



Şekil 5.36. 60 SLPM 112 A’de plazma tabancası çıkış çapı 3,6 mm için analiz sonuçları (a: ark bölgesindeki ısı akısı, b: sıcaklık dağılımı, c: hız dağılımı)

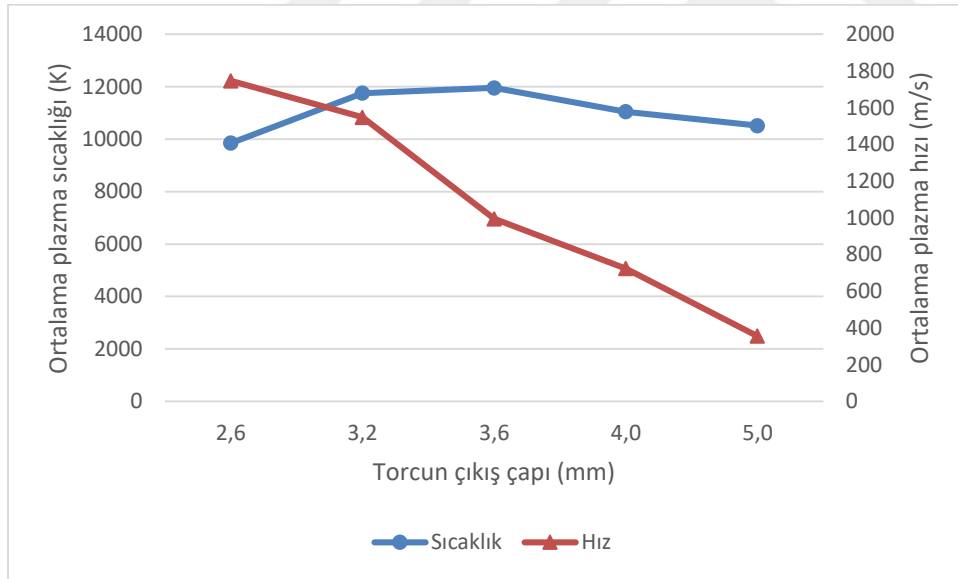
Şekil 5.37 60 SLPM 112 A’de plazma tabancası çıkış çapının 5,00 mm olduğu durumdaki analiz sonuçlarını göstermektedir. Plazma tabancasında oluşan maksimum sıcaklık ve hız sırasıyla 25 260 K ve 567 m/s’dir.



Şekil 5.37. 60 SLPM 112 A’de plazma tabancası çıkış çapı 5,00 mm için analiz sonuçları (a: ark bölgesindeki ısı akısı, b: sıcaklık dağılımı, c: hız dağılımı)

Plazma tabancası çıkış çapı için yapılan analiz sonuçlarında tabanca çıkış çapının artmasıyla ark oluşum noktasının plazma tabancasının çıkış kesitine doğru kaydığı gözlemlenmiştir. Anot duvarında oluşan soğuk sınır tabakanın arttığı ve ark boyunun uzadığı görülmüştür. Plazma kolonu artan çapla daha simetrik bir durum aldığı görülmüştür. Çapın artmasıyla plazma hızının düştüğü görülmekte ve anot duvarı yüzeyinden dışarıya yapılan toplam ısı geçişi azalmaktadır.

Şekil 5.38 farklı çıkış çapları için çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklık ve hızlarını göstermektedir. Ortalama plazma sıcaklığı ve hızı tabanca çıkış kesitinde yer alan noktaların değerleri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Ortalama plazma sıcaklığı 3,6 mm çıkış çapına kadar artmış olup daha sonra düşüş göstermiştir. Ortalama plazma hızı ise çıkış çapı arttıkça düşüş göstermektedir. Ortalama plazma çıkış sıcaklığı en fazla 3,2 mm ve 3,6 mm çıkış çaplarında görülmektedir. Çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığının ve hızının yüksek olması istenirse çıkış çapının 3,2 mm olması uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 5.38. Farklı tabanca çıkış çapları için çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklık ve hız değişimi

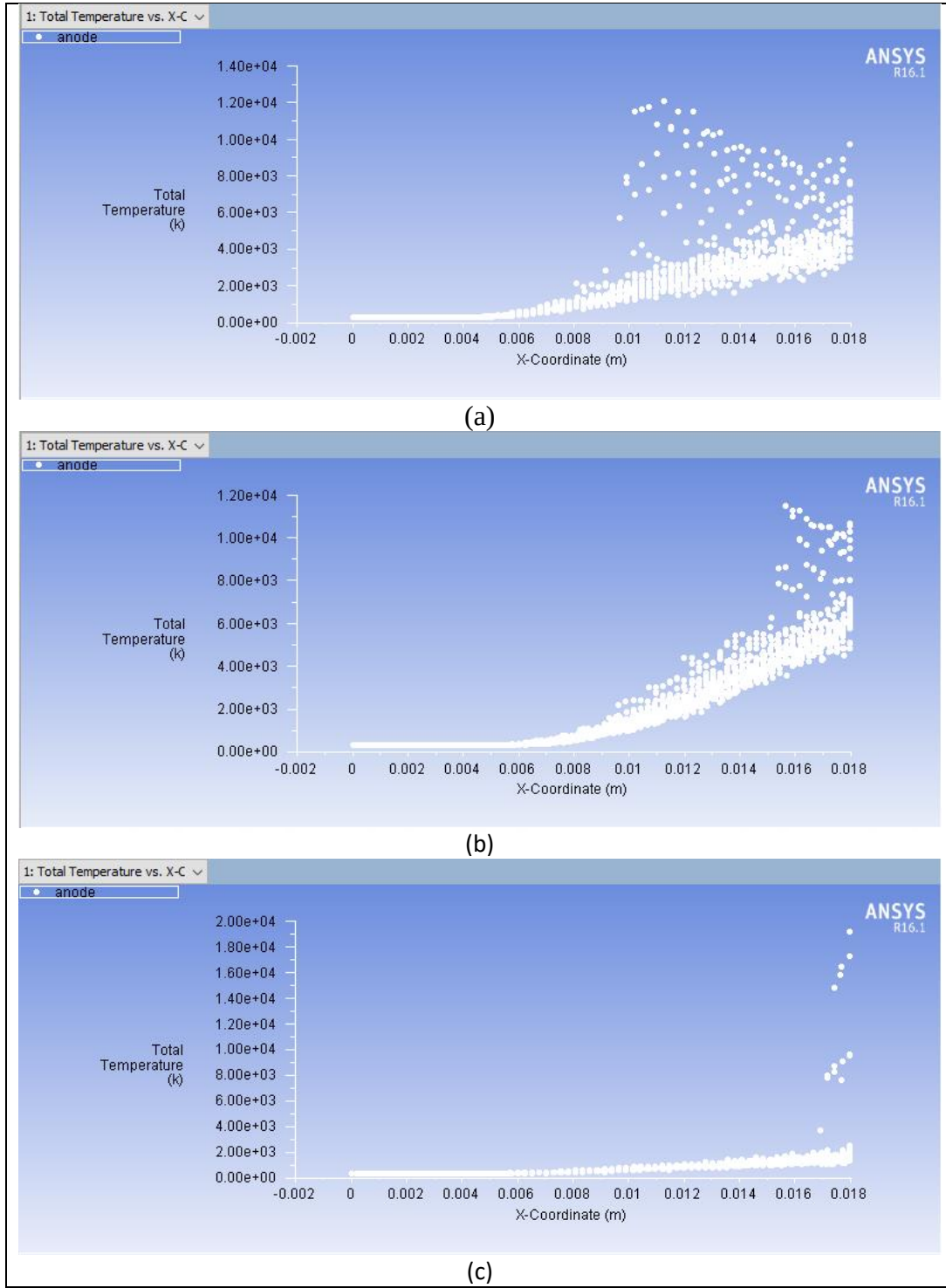
Çizelge 5.10 plazma tabancasının farklı çıkış çapları için analiz sonuçlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere plazma tabancası çıkış çapı plazma tabancasının verimi üzerine etkilidir. Plazma tabancasının çıkış çapı artmasıyla verimin düştüğü ve plazma tabancası çıkış kesitine taşınan toplam enerjinin de azaldığı görülmektedir. Soğuk sınır tabakanın artması ve ark oluşum noktasının tabanca çıkış kesitine doğru kaymasıyla anot yüzeyinden olan ısı

geçişinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca çapın artırılması plazma oluşturulması için kaynaktan çekilen gücün 4.00 mm çapa kadar artmasına yol açtığı görülmüştür.

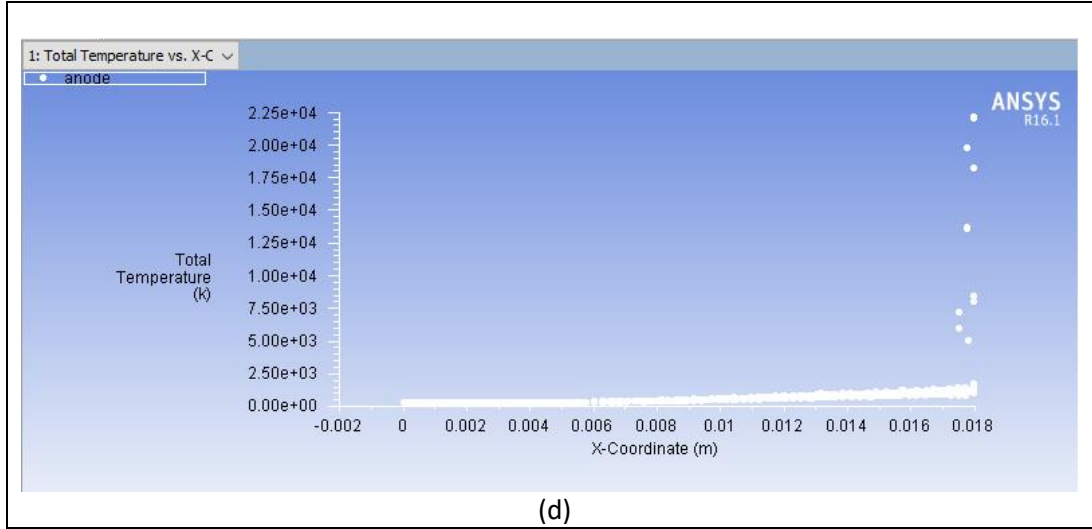
Çizelge 5.10. Farklı çıkış çapları için analiz sonuçları

Plazma tabancası çıkış çapı (mm)	Anottan ısı geçişi (W)	Katottan ısı geçişi (W)	Çıkış bölgesi ısı geçişi (W)	Giriş bölgesi ısı geçişi (W)	$V_{ark}I$ (W)	Plazma tabancası verimi (%)
2,6	- 544	-288	-7 356	0,552	8 390	87
3,2	-521	-233	-6 938	0,544	9 713	71
3,6	-257	-199	-6 627	0,541	11 430	57
4,0	-208	-192	-5 696	0,569	11 648	48
5,0	-152	-146	-3 644	0,558	9921	36

Şekil 5.39 60 SLPM 112 A’de plazma tabancasının çıkış çaplarının değiştirilmesiyle x eksenı boyunca anot cidarında oluşan sıcaklık dağılımını göstermektedir. Plazma tabancası çıkış çaplarının artmasıyla anot ark bağlantı bölgesi plazma tabancası çıkış kesitine doğru hareket ettiğinden anot yüzeyinde arkdan dolayı oluşan sıcaklık bölgeside tabanca çıkış kesitine doğru kaymaktadır.

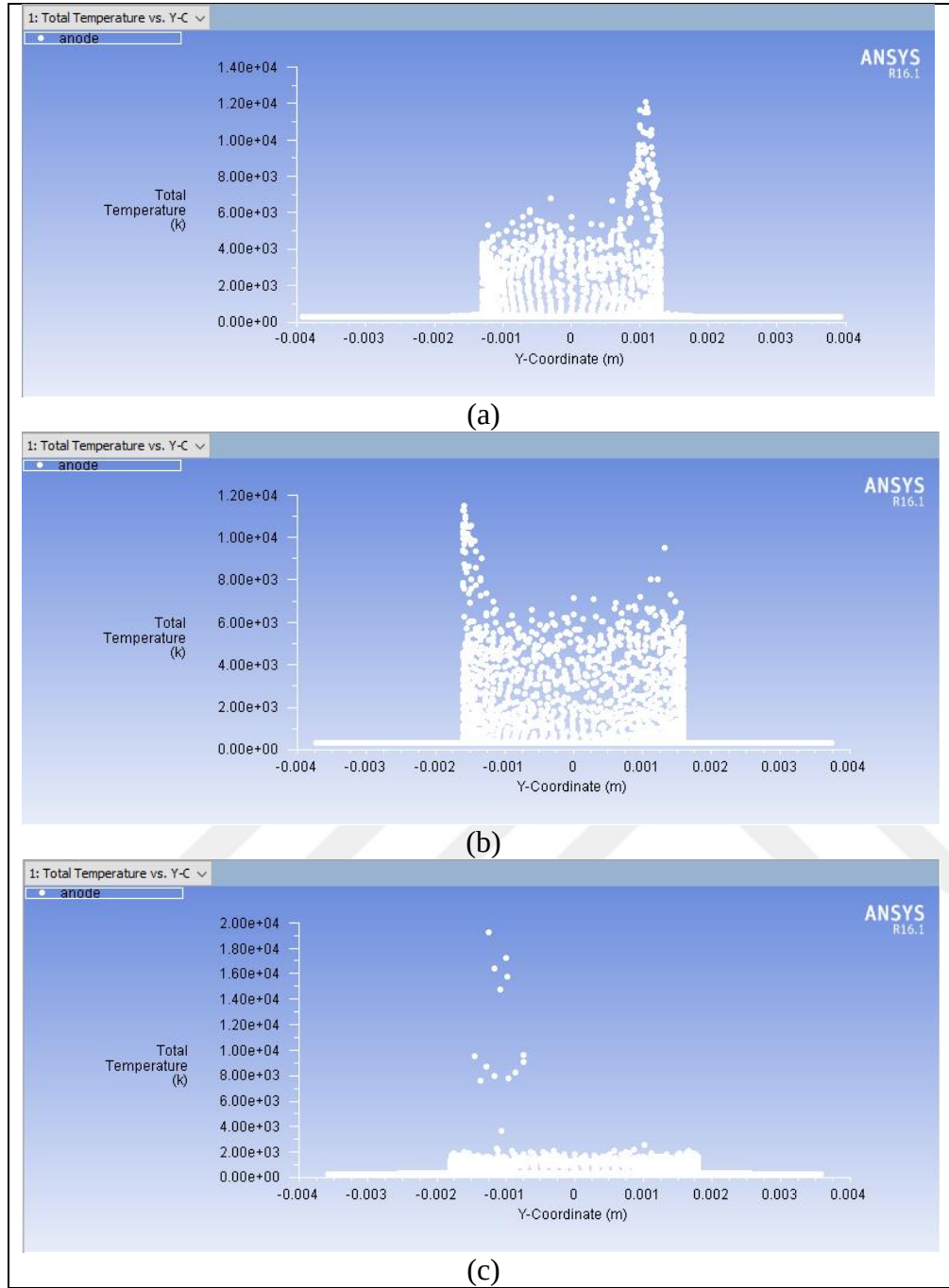


Şekil 5.39. 60 SLPM 112 A’de farklı tabanca çıkış çapları için x eksenı boyunca anot cıdarı sıcaklığı dağılımı (a: 2,6 mm, b: 3,2 mm, c: 3,6 mm, d: 4,00 mm)

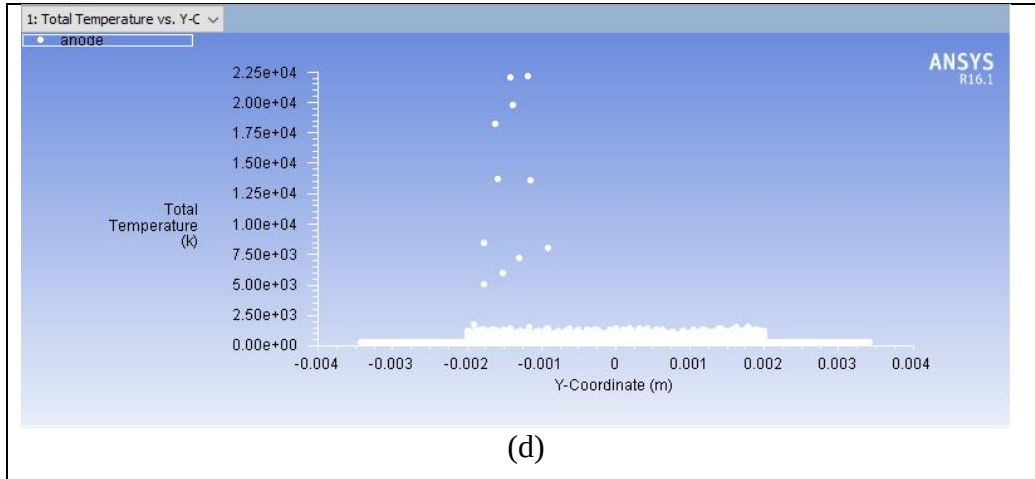


Şekil 5.39. (devam) 60 SLPM 112 A’de farklı tabanca çıkış çapları için x eksenı boyunca anot cidarı sıcaklığı dağılımı (a: 2,6 mm, b: 3,2 mm, c: 3,6 mm, d: 4,00 mm)

Şekil 5.40 60 SLPM 112 A’de farklı plazma tabancası çıkış çapları için y eksenı boyunca anot cidarı sıcaklığı dağılımını göstermektedir. Plazma tabancasının çıkış çapı artmasıyla anot cidarında oluşan yoğun sıcaklık aralığı düşme eğilimi gösterdiği görülmektedir. 2,6; 3,2 mm plazma çıkış çapları için anot cidarında oluşan sıcaklık aralığı 1000 K ile 6500 K arasında yoğunlaştığı görülmektedir. 3,6; 4,0 mm plazma çıkış çapları için anot cidarında oluşan sıcaklık aralığı 1000 K ile 2400 K arasında yoğunlaştığı görülmektedir. Anot çapının artırılması anot cidarında oluşan plazma sıcaklık aralığını düşürdüğünden anot aşınmasının azalmasına yardımcı olur. Bu durum plazma tabancasını soğutmak için kullanılan enerjiyi düşürür. Plazma çıkış çapı kullanım amacına uygun olarak optimum büyüklükte tutulması gerektiği görülmektedir.



Şekil 5.40. 60 SLPM 112 A'de farklı tabanca çıkış çapları için y eksenı boyunca anot cidarının sıcaklık dağılımı (a: 2,6 mm, b: 3,2 mm, c: 3,6 mm, d: 4,00 mm)

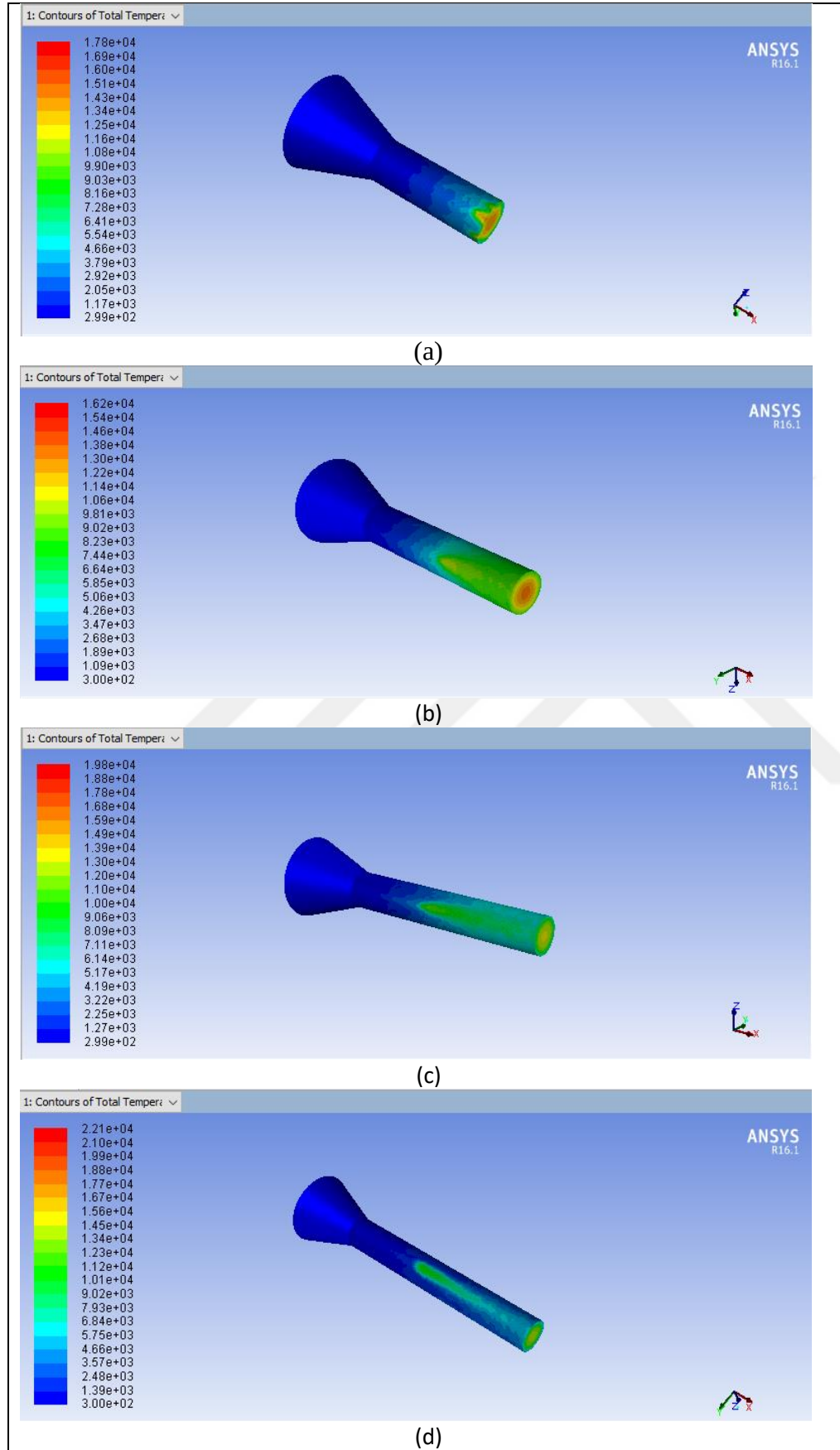


Şekil 5.40. (devam) 60 SLPM 112 A’de farklı tabanca çıkış çapları için y eksenı boyunca anot cidarının sıcaklık dağılımı (a: 2,6 mm, b: 3,2 mm, c: 3,6 mm, d: 4,00 mm)

5.5.2. Plazma tabancası anot duvarı uzunluğunun plazma akış alanın üzerine etkisi

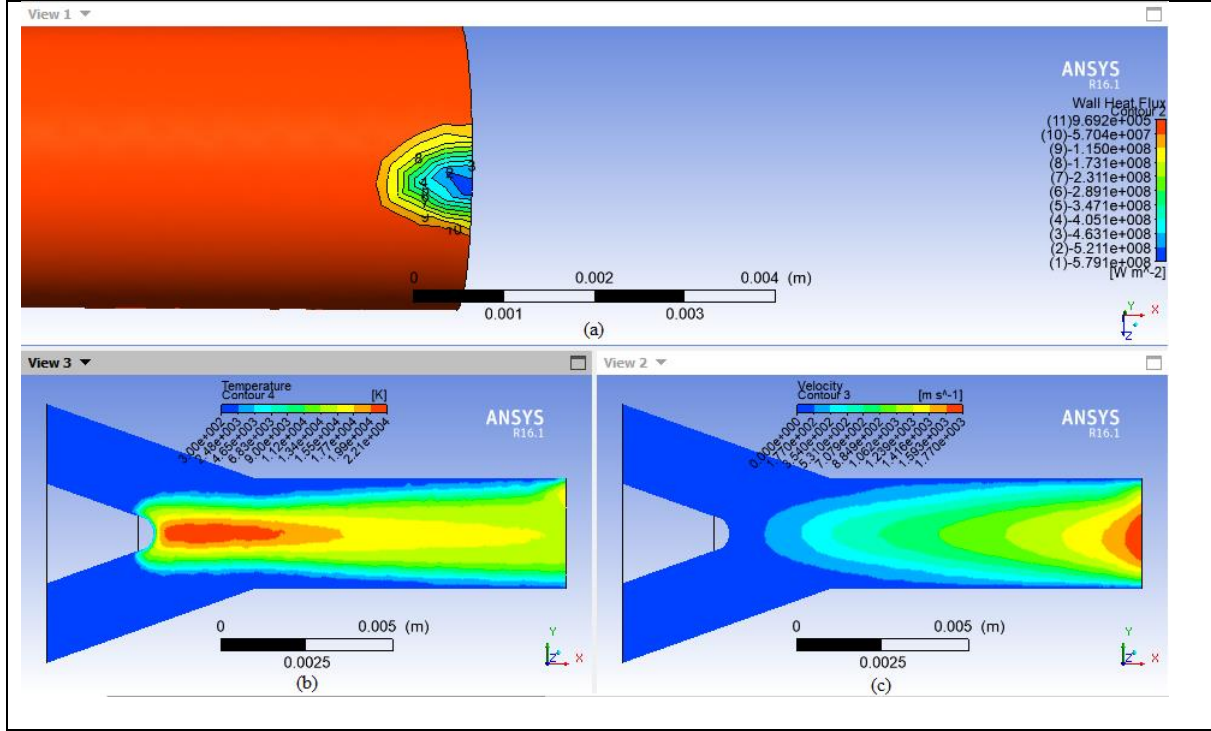
Çalışmanın bu bölümünde anot duvar uzunluğu değiştirilerek elde edilen sonuçlar verilmiştir. Akım değeri 112 A’de hacimsel debi 60 SLPM’de sabit tutularak çözümler yapılmıştır. Anot duvarı sınır şartı olarak konveksiyon tanımlanmıştır. Soğutma suyunun ısı taşınım katsayısı ve giriş sıcaklığı literatür [25, 24] dikkate alınarak $10^5 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$, 300 K olarak alınmıştır. Tabancanın çıkış çapı 3.2 mm alınmıştır. Anot duvarının uzunluğu 9 mm, 15 mm, 18 mm, 22 mm olarak seçilmiştir.

Şekil 5.41 60 SLPM 112’de farklı anot duvarı uzunlukları için ark oluşum noktalarını göstermektedir. Ark oluşum bölgesinin artan anot duvarı uzunluğuyla plazma tabancası girişi kesitine doğru hareket ettiği görülmüştür. 9 mm, 15 mm, 18 mm, 22 mm anot duvarı uzunlukları için sırasıyla ark uzunluğunun 12 mm, 11,15 mm, 10,65 mm, 9,4 mm olduğu görülmüştür. Ark uzunluğu artan anot duvarı uzunluğuyla kısaldığı görülmüştür.



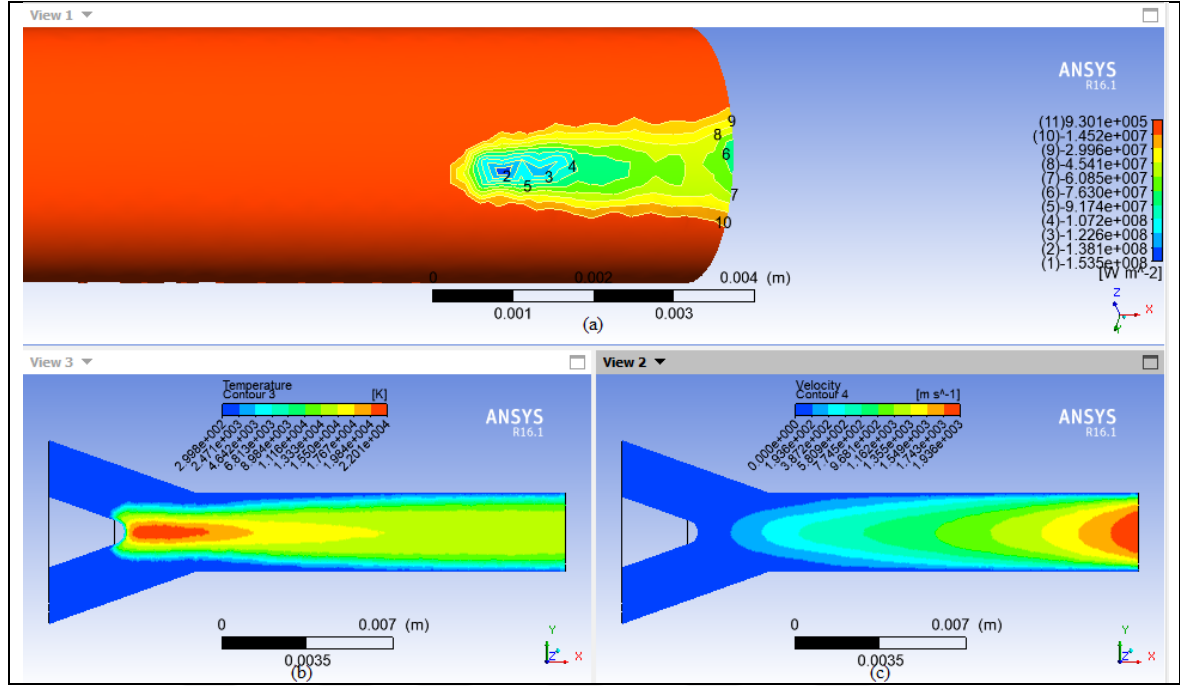
Şekil 5.41. 60 SLPM 112 A’de farklı anot duvarı uzunlukları için ark oluşum noktaları (a: 9 mm; b: 15 mm; c: 18 mm; d: 22 mm)

Şekil 5.42 60 SLPM 112 A’de plazma tabancası anot duvarı uzunluğunun 9 mm olduğu durumdaki analiz sonuçlarını göstermektedir. Ark oluşum noktasının olduğu yerde ısı geçişinin maksimum olduğu görülmektedir. Plazma tabancasında oluşan maksimum sıcaklık ve hız sırasıyla 22 100 K ve 1 770 m/s olduğu görülmektedir.



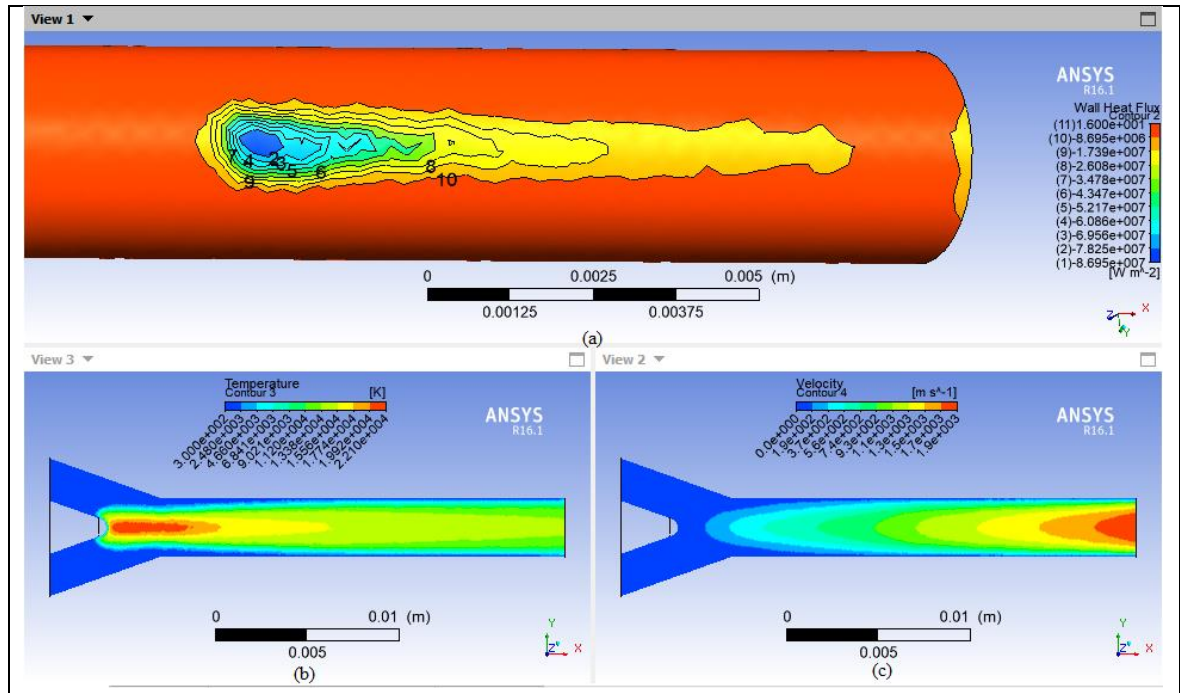
Şekil 5.42. 60 SLPM 112 A’de plazma anot duvar uzunluğunun 9 mm’deki analiz sonuçları (a: ark bölgesindeki ısı akısı, b: sıcaklık dağılımı, c: hız dağılımı)

Şekil 5.43 60 SLPM 112 A’de plazma tabancası anot duvarı uzunluğunun 15 mm olduğu durumdaki analiz sonuçlarını göstermektedir. Plazma tabancasında oluşan maksimum sıcaklık ve hız sırasıyla 22 010 K ve 1 936 m/s olduğu görülmektedir.



Şekil 5.43. 60 SLPM 112 A’de plazma anot duvar uzunluğunun 15 mm’deki analiz sonuçları (a: ark bölgesindeki ısı akısı, b: sıcaklık dağılımı, c: hız dağılımı)

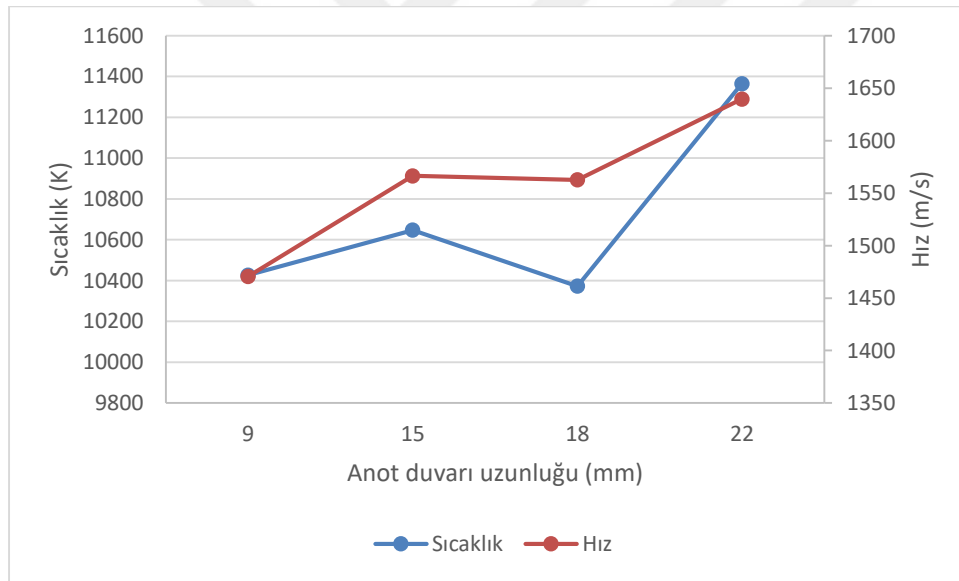
Şekil 5.44 60 SLPM 112 A’de plazma tabancası anot duvarı uzunluğunun 22 mm olduğu durumdaki analiz sonuçlarını göstermektedir. Plazma tabancasında oluşan maksimum sıcaklık ve hız sırasıyla 22 100 K ve 1 900 m/s olduğu görülmektedir.



Şekil 5.44. 60 SLPM 112 A’de plazma anot duvar uzunluğunun 22 mm’deki analiz sonuçları (a: ark bölgesindeki ısı akısı, b: sıcaklık dağılımı, c: hız dağılımı)

Anot duvarı uzunluğu için yapılan analiz sonuçlarında anot duvarı uzunluğunun artmasıyla ark oluşum yeri plazma tabancası giriş kesitine doğru hareket ettiği görülmüştür. Maksimum plazma sıcaklığında, maksimum plazma hızında ve anot duvarında oluşan soğuk sınır tabakada dikkate değer bir değişim görülmemiştir.

Şekil 5.45 farklı anot duvar uzunlukları için çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklık ve hız değerlerini göstermektedir. Ortalama plazma sıcaklık ve hız değerleri plazma tabancası çıkış kesitinde yer alan noktaların sıcaklık ve hız verileri dikkate alınarak hesaplanmıştır. Anot duvarı uzunluğu artmasıyla ortalama plazma hızının şekil 5.45'e bakarak fazla olmasa bile arttığı söylenebilir. Çıkış kesitindeki ortalama plazma sıcaklığı ise artan anot duvarı uzunluğu ile dikkate değer bir düşüş göstermeyip çok fazla olamasa da artış gösterdiği görülmektedir.



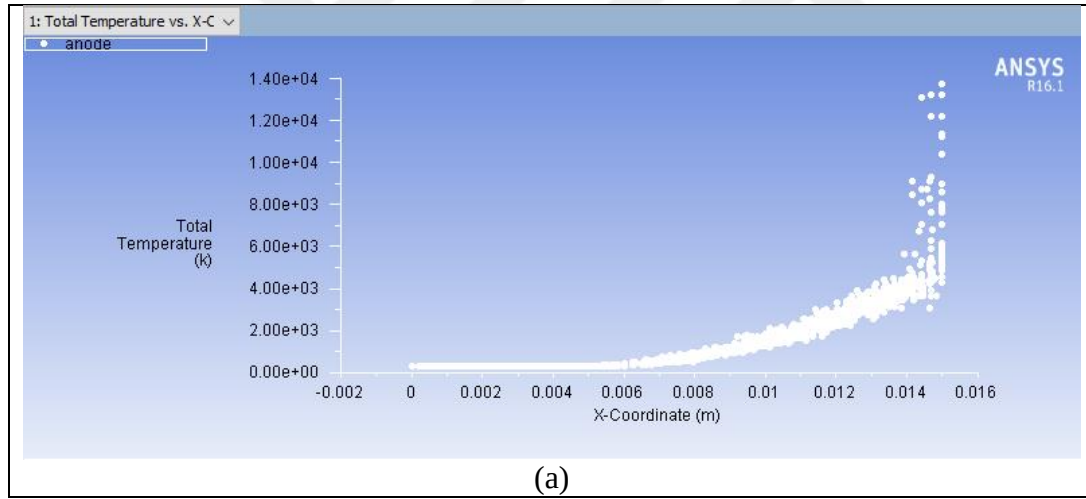
Şekil 5.45. Farklı anot duvar uzunlukları için sıcaklık ve hız değişimi

Çizelge 5.11'de plazma tabancasının farklı anot duvarı uzunlukları için analiz sonuçlarını göstermektedir. Görüldüğü üzere anot duvarı uzunlukları plazma tabancasının verimi üzerinde etkilidir. Artan anot duvarı uzunluklarıyla tabanca verimi düşmektedir. Ayrıca duvar uzunluğunun arttırılması ile plazma gücünün azaldığı görülmüştür.

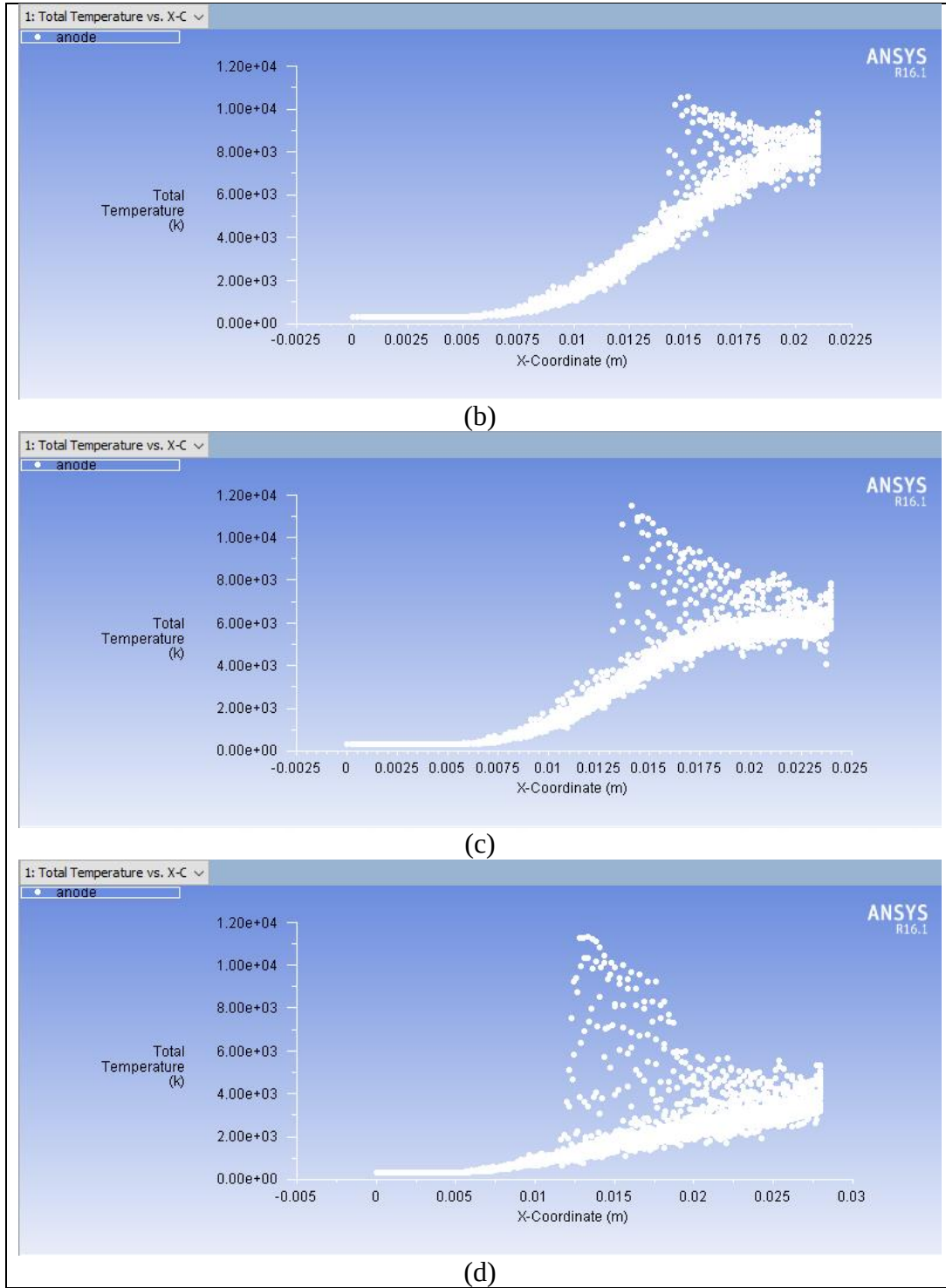
Çizelge 5.11. Farklı anot duvarı uzunlukları için analiz sonuçları

Plazma tabancası anot duvarı uzunluğu (mm)	Anottan ısı geçişi (W)	Katottan ısı geçişi (W)	Çıkış bölgesi ısı geçişi (W)	V_{arkI} (W)	Plazma tabancası verimi (%)
9,00	-150	-36	-7 108	10 024	71
15,00	-1244	-223	-5 730	8 322	69
18,00	-1117	-244	-5 567	8 098	68
22,00	-620	-242	-5 287	7926	59

Şekil 5.46 60 SLPM 112 A’de farklı anot duvarı uzunlukları için x eksenı boyuna anot cidarı sıcaklık dağılımını göstermektedir. Anot duvarı uzunluğu artmasıyla ark oluşum bölgesi plazma tabancası giriş kesitine doğru kaydığı görülmüştür (Bkz. Şekil 5.41). Bu sebeple anot cidarında oluşan sıcaklık bölgeside plazma tabancası giriş kesitine doğru hareket etmektedir ve anot yüzeyinde oluşan sıcaklık yoğunluğunun arttığı görülmektedir.

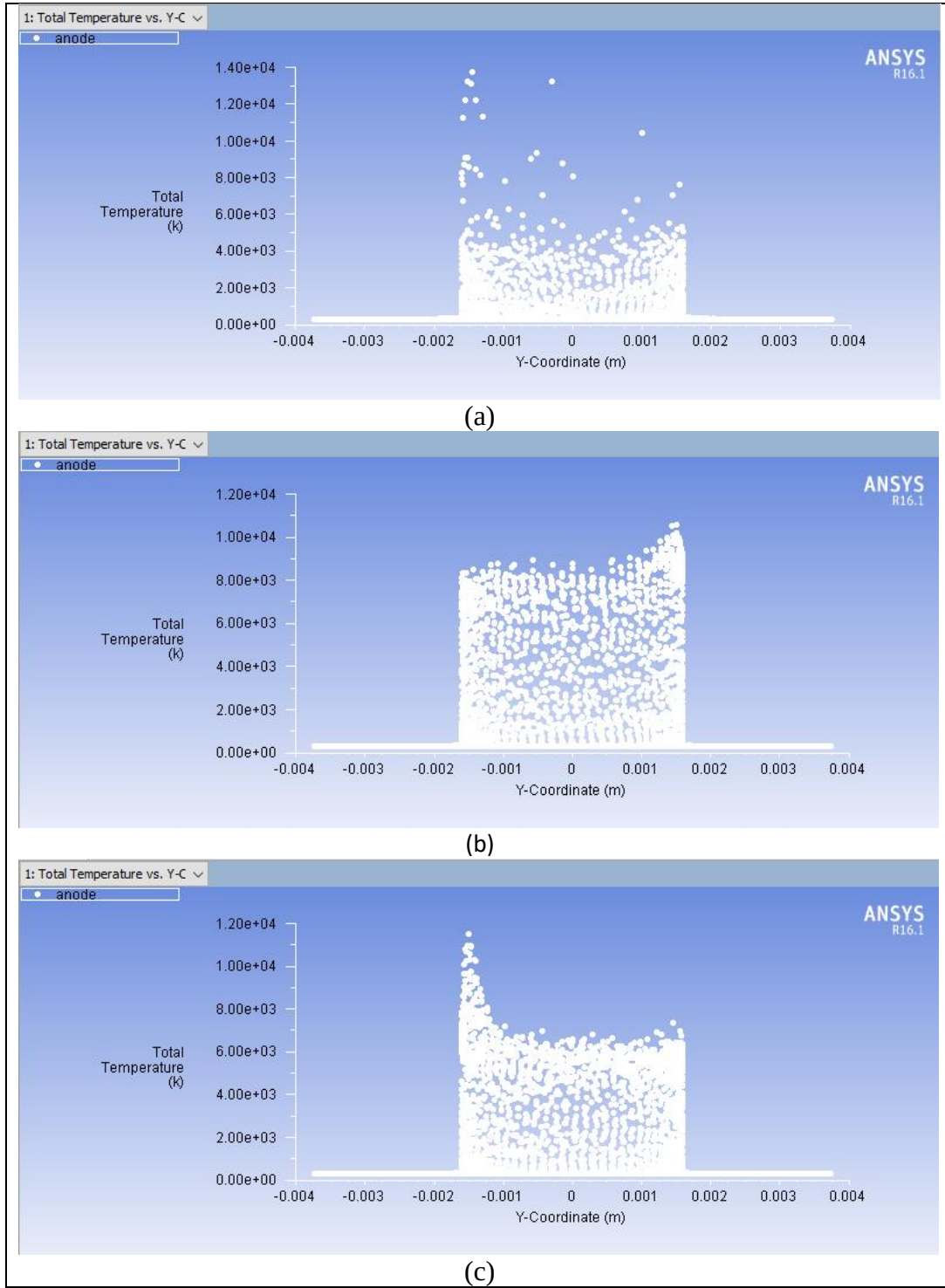


Şekil 5.46. 60 SLPM 112 A’de farklı anot duvarı uzunlukları için x eksenı boyuna anot cidarının sıcaklık dağılımını (a: 9 mm, b: 15 mm, c: 18 mm, d: 22 mm)

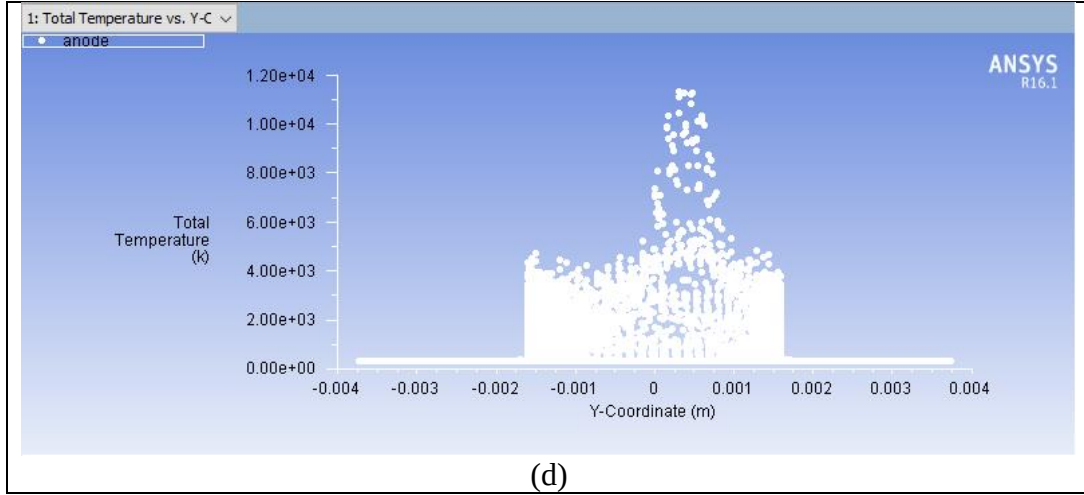


Şekil 5.46. (devam) 60 SLPM 112 A’de farklı anot duvarı uzunlukları için x eksenı boyunca anot cidarının sıcaklık dağılımı (a: 9 mm, b: 15 mm, c: 18 mm, d: 22 mm)

Şekil 5.47 60 SLPM 112 A’de farklı anot duvarı uzunlukları için y eksenı boyunca anot cidarının sıcaklık dağılımı göstermektedir. Anot cidarında oluşan sıcaklık aralığı anot duvarı uzunluğunun artmasıyla arttığı söylenebilir.



Şekil 5.47. 60 SLPM 112 A’de farklı anot duvarı uzunlukları için y eksenı boyunca anot cidarının sıcaklık dağılımı (a: 9 mm, b: 15 mm, c: 18 mm, d: 22 mm)



Şekil 5.47. (devam) 60 SLPM 112 A’de farklı anot duvarı uzunlukları için y eksenini boyunca anot cidarının sıcaklık dağılımı (a: 9 mm, b: 15 mm, c: 18 mm, d: 22 mm)

Anot duvar uzunluğu ile plazma tabancası çıkış çapının anot duvarı yüzey sıcaklığı üzerine etkilerine bakıldığında plazma tabancası çıkış çapı artışıyla anot yüzey sıcaklığı üzerinde yoğunlaşan sıcaklık aralığının düştüğü, anot duvarı uzunluğu arttırıldığında ise anot yüzey sıcaklığı üzerinde yoğunlaşan sıcaklık aralığının arttığı görülmektedir.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, aktarımsız DC ark plazma tabancası ANSYS FLUENT yardımıyla modellenerek plazma tabancası içerisindeki akış incelenmiştir. ANSYS FLUENT programı ile birlikte MHD (manyetohidrodinamik) modülü tanımlanarak gaz akışı ve manyetik alan arasında olan etkileşim dikkate alınmıştır. Çözümlemeler yapılmadan önce literatürde yapılmış olan sayısal ve deneysel çalışmalar detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Plazma tabancalarının uygulamada detaylı analizi (plazma sıcaklığı, plazma hızı, ark kökü oluşum noktası, ark anot bağlantı sıcaklığı, plazma elektrik potansiyeli gibi verilerin) gerek yüksek sıcaklıklara ulaşılması gerek plazma tabancası içindeki bölgelere ulaşmanın sınırlı olmasından dolayı zordur. Bu gibi nedenlerden dolayı alternatif yöntem olarak sayısal modelleme, sistemin bu tür özelliklerini elde edebilmek için simülasyonu avantajlı kılmaktadır.

Bu çalışmada plazma tabancası 3B olarak modellenmiştir. Problem hem zamana bağlı hem de zamandan bağımsız olarak çözülmüştür. İki analiz sonuçları karşılaştırıldığında aralarında çok büyük bir fark olmadığı görülmektedir. Bu nedenle çözümlere, analiz süresini kısaltmak için zamandan bağımsız (steady-state) olarak devam edilmiştir. Çalışma akışkanı olarak kolay plazma haline geçebilen argon gazı kullanılmıştır.

Çalışmada gazın hacimsel debisinin, akımın, plazma tabancası çıkış çapının, anot duvar uzunluğunun değerleri değiştirilerek tabanca içindeki plazma sıcaklığı, plazma hızı, plazma çıkış sıcaklığı, plazma çıkış hızı, ark kökü oluşum noktası, ark anot bağlantı noktası sıcaklığı, anot cidarı sıcaklığı, ark uzunluğu, plazma elektrik potansiyeli, plazma tabancası verimi gibi plazma tabancası karakteristikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Anot üzerinde aşınmanın en fazla olduğu bölge yüksek sıcaklıktan dolayı ark oluşum noktasıdır. Bu bağlantı noktasındaki sıcaklık ile anot cidarında oluşan sıcaklık dağılımına bakılarak aşınmanın azaltılıp anot ömrünün uzatılabilmesi için anot malzemesi seçimi ve anot yüzeyi soğutulması hakkında veriler elde edilmiştir.

Buna göre akım değeri sabit tutulup, plazma gazının hacimsel debisi artırılarak yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar:

1. Plazma tabanca içerisinde oluşan plazma sıcaklığı ile çıkış kesitinde oluşan plazma sıcaklığında çok fazla bir değişiklik olmadığı görülmüştür.
2. Artan hacimsel debiyle plazma kolonun daraldığı, ark boyunun uzadığı görülmektedir.
3. Ark boyunun uzamasından dolayı ark voltajı ile plazma voltajının arttığı görülmüştür.
4. Anot ark bağlantı noktasının, artan hacimsel debiyle plazma tabancasının çıkışı kesitine doğru kaydığı görülmektedir.
5. Ark bağlantı noktasıyla birlikte anot cidarında yoğunlaşan sıcaklık bölgesi de plazma tabancası çıkış kesitine doğru hareket etmiştir.
6. Hacimsel debi artışı tabanca içindeki plazma hızını artırdığı gibi tabanca çıkış kesitindeki plazma hızını da artırmıştır.
7. Ark oluşumundan dolayı tabanca içinde ve çıkış kesitinde plazma sıcaklığı ve hızında dalgalanmalar görülmektedir.
8. Anot cidarında oluşan yoğun sıcaklık aralığının, artan hacimsel debiyle dikkate değer bir değişim göstermediği görülmektedir.

Plazma gazının hacimsel debisi sabit tutulup, akımın artırılmasıyla yapılan analizlerde elde edilen sonuçlar:

1. Tabanca içerisinde oluşan plazma sıcaklığı ile çıkış kesitinde oluşan plazma sıcaklığında artmalar görülmüştür.
2. Akımın artmasıyla, ark boyunun kısaldığı görülmektedir.
3. Ark boyunun kısılmasına bağlı olarak ark voltajı ile plazma voltajında azalmalar görülmüştür.
4. Anot ark bağlantı noktası artan akım değeriyle plazma tabancasının giriş kesitine doğru kaydığı görülmektedir.
5. Ark bağlantı noktasıyla birlikte anot cidarında oluşan yoğun sıcaklık bölgesi de plazma tabancası giriş kesitine doğru hareket etmiştir.
6. Akım artışı tabanca içindeki plazma hızını artırdığı gibi tabanca çıkış kesitindeki plazma hızını da artırmıştır.
7. Anot cidarında oluşan yoğun sıcaklık aralığının, artan akımla arttığı görülmektedir.

Sabit akım ve hacimsel debide, tabanca çıkış çapı ve anot duvarı uzunluğunun değiştirilmesiyle elde edilen sonuçlar:

1. Artan çıkış çapı ile anot ark bağlantı noktasının tabanca çıkış kesitine doğru kaydığı görülmüştür.
2. Artan çapla anot yüzeyinde yoğunlaşan sıcaklık bölgesi de plazma tabancası çıkış kesitine doğru hareket etmiştir.
3. Artan çapla birlikte tabanca veriminin düştüğü görülmüştür.
4. Artan çapla birlikte plazma tabancası çıkış kesitinde oluşan ortalama sıcaklığın 2,6 mm çapa kadar arttığı daha sonra azaldığı görülmektedir.
5. Artan çapla birlikte plazma tabancası çıkış kesitinde oluşan ortalama hızın azaldığı görülmektedir.
6. Artan çapla anot duvarını kaplayan soğuk sınır tabakasının arttığı görülmüştür.
7. Artan çapla anot cidarında oluşan yoğun plazma sıcaklık aralığının düştüğü görülmüştür.
8. Anot duvar uzunluğunun artmasıyla anot ark bağlantı noktasının, plazma tabancası giriş kesitine kaydığı görülmektedir.
9. Anot duvar uzunluğunun artmasıyla anot cidarında oluşan yoğun sıcaklık bölgesi de plazma tabancası giriş kesitine doğru hareket etmiştir.
10. Artan anot duvarı uzunluğuyla anot cidarında oluşan yoğun plazma sıcaklık aralığının arttığı görülmektedir.
11. Anot duvar uzunluğunun artmasıyla anot duvarını saran soğuk sınır tabakasında dikkate değer bir değişim görülmemiştir.
12. Artan anot duvarı uzunluğuyla plazma tabancası veriminin düştüğü görülmüştür.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda farklı tabanca geometrileri kullanılabilir. Katot duvarının geometrisi değiştirilerek akış üzerine etkileri incelenebilir. Katot ve anot duvarı malzemeleri farklı seçilerek anlizler gerçekleştirilebilir. Çalışmada farklı plazma gazları ve birden fazla plazma gazı kullanılarak çözümlemeler yapılabilir. Anot duvarını soğutmak için kullanılan akışkan değiştirilerek aşınmanın azaltılması için çalışmalar yapılabilir.



KAYNAKLAR

1. Fauchais, P., Vardelle, A. and Dussoubs, B. (2001). Quo vadis thermal spraying. *Journal of Thermal. Plasma Spray Technology*, 10(1), 44–66.
2. Trelles, J. and Chazelas, C. (2009). Arc plasma torch modeling. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18(5-6), 728-752.
3. Ardakani, E., Fujino, T. and Mostaghimi, J. (2013, July). *Predicting arc root attachment point in a CFD modelling of argon DC plasma*. Paper presented at the International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Granada, Spain.
4. Kutlu, E., Monno, M. ve Bini, R. (2005). Plazma ile kesme metoduna genel bir bakış. *Mühendis ve Makina*, 46(541), 21–29.
5. Boulos, M.I. and Fauchais, P. (1994). *Thermal plasmas* (First edition). New York: Springer, 647-651.
6. İnternet: Anadolu Plazma Teknoloji Enerji Merkezi. URL: <http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fanadoluplazma.com%2FPlazma.aspx&date=2016-09-27>, Son Erişim Tarihi: 27.09.2016.
7. Venkatramani, N. (2002). Industrial plasma torches and applications. *Current Science*, 83(3), 254-262.
8. Sunjuq, W. (2015). *Argon Dc Taşınımsız Ark Plazma Torçunun Üç Boyutlu Simülasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 17-19.
9. Ghorui, S. and Das, A. K. (2013). Arc plasma devices: Evolving mechanical design from numerical simulation. *Pramana Journal of Physics*, 80(4), 685-699.
10. Engel, A. and Cozens, J. (1976). *Flame plasma in advances in electronics and electron physics* (First edition). New York: Academic Press, 99-144.
11. Wutzke, S., Pfender, E. and Eckert, E. (1967). Study of electric arc behaviour with superimposed flow. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 5(4), 707-713.
12. Coudert, J. F., Planche, M. P. and Fauchais, P. (1995). Characterization of DC plasma torch voltage fluctuations. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 16(1), 211-227.
13. 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.
14. Janisson, M. E., Vardelle, A., Coudert, J. F. and Fauchais, P. (1999). Analysis of the stability of DC plasma gun operating with Ar–He–H₂ gas mixtures. *Annals of New York Academy of Science*, 891, 407-416.

15. Westhoff, R. and Szekely, J. (1991). A model of fluid, heat flow and electromagnetic phenomena in a nontransferred arc plasma torch. *Journal of Applied Physics*, 70(7), 3455-3466.
16. 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.
17. Milli Eğitim Bakanlığı. (2011). *DA güç kaynakları ve motorları*. Ankara: Milli Eğitim Bakanlığı, 3-18.
18. 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.
19. Paik, S., Huang, P. C., Heberlein, J. and Pfender, E. (1993). Determination of the arc-root position in a DC plasma torch. *Plasma Chemistry and Plasma Processing Journal*, 13(3), 379-397.
20. Ramachandran, K., Marqu'es, J. L., Vaben, R. and Stover, D. (2006). Modelling of arc behaviour inside a F4 APS torch. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(15), 3323-3331.
21. Park, J., Heberlein, J., Pfender, E., Candler, G. and Chang, C. H. (2008). Two-dimensional numerical modeling of direct-current electric arcs in nonequilibrium. *Plasma Chemistry Plasma Process*, 28(2), 213-231.
22. Park, J. M., Kim, K. S., Hwang, T. H. and Hong, S. H. (2004). Three-dimensional modeling of arc root rotation by external magnetic field in nontransferred thermal plasma torches. *IEEE Transactions On Plasma Science*, 32(2), 479-487.
23. Lago, F., Gonzalez, J. J., Freton, P. and Gleizes. (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.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. Bauchire, J. M., Gonzalez, J. J. and Gleizes. (1997). Modeling of a DC Plasma Torch in Laminar and Turbulent Flow. *Plasma Chemistry Plasma Processing*, 17(4), 409-432.
28. Trelles J. P. (2017). Finite Element Methods for Arc Discharge Simulation. *Plasma Process. Polymers*, 14(1-2), 1-20.

29. Goyal V., Ravi G., Bandyopadhyay P., Banerjee S., Yuges V. and Mukherjee S. (2017). Study of dynamical behaviour of the plasma in a dc non-transferred plasma torch using fast imaging. *Physics Plasmas*, 24(3), 1-11.
30. 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.
31. Murphy, A. B. and Kovitya, P. (1993). Mathematical model and laser-scattering temperature measurements of a direct-current plasma torch discharging into air. *Journal of Applied Physics*, 73(10), 4759-4769.
32. İspir, M. A. (2014). *Kritik Alti Açık Kanal Akiminin Deneysel ve K-E Türbülans Modelleri İle Sayısal Analizi*. Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana, 30-33
33. Yang, Z., Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A. (1995) A new k- ϵ eddy viscosity model for high: reynolds number turbulent flows. *Computers & Fluids*, 24(3), 227-238.
34. İblikçi, N. (2013). *Güneş rüzgarlarının iki boyutlu manyetohidrodinamik modellenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Çanakkale On Sekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Çanakkale, 25-28.
35. Davidson, P. A. (2001). *An Introduction to Magnetohydrodynamics* (First Edition). New York: Cambridge University Press, 3-18.
36. 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.
37. ANSYS, “Ansys Fluent Users Guide Version 15.0”, ANSYS (2015).
38. ANSYS, “Ansys Fluent Theory Guide Version 15.0”, ANSYS (2015).



ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DEMİR, Fatih
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 27.07.1990, ANKARA
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 446 224 00 88/43171
 e-mail : fdemir@erzincan.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi/ Makine Mühendisliği	2018
Lisans	ESOGÜ Üniversitesi/ Makine Mühendisliği Mühendisliği	2014
Lise	Prof. Dr. Şevket Raşit Hatipoğlu Lisesi Anadolu Lisesi	2008

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2016-Halen	Erzincan Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Demir, F., Yurtkuran. E., Unal, R. and Ozsunar, A. (2017). *3D Modelling of DC non-transferred arc plasma torch and investigation of creation of arc root in the torch*. Paper presented at the The Porous and Powder Materials Symposium and Exhibitions, Aydın, Turkey.
2. Demir, F., Yurtkuran. E., Unal, R. and Ozsunar, A. (2017). *3D CFD modelling of argon non-transferred plasma torch*. Paper presented at the 7th International Advances in Applied Physics and Materials Science Congress, Muğla, Turkey.

Hobiler

Kitap okuma, yüzme





GAZİ GELECEKTİR...