

Soğuk Akan Post-Deşarj Plazma Reaktörlerinin Üretimi ve Bazı Özelliklerinin  
İncelenmesi

Erkan İlik

**DOKTORA TEZİ**

Fizik Anabilim Dalı

Ekim 2017

Production of Cold Flowing Post-Discharge Plasma Reactors and Investigation on  
Their Some Properties

Erkan Ilik

**DOCTORAL DISSERTATION**

Department of Physics

October 2017

Soğuk Akan Post-Deşarj Plazma Reaktörlerinin Üretimi ve Bazı Özelliklerinin  
İncelenmesi

Erkan İlik

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Lisansüstü Yönetmeliği Uyarınca  
Fizik Anabilim Dalı  
Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Bilim Dalında  
DOKTORA TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır

Danışman: Prof. Dr. Tamer Akan

Bu tez Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonu  
2013-326 no' lu proje çerçevesinde desteklenmiştir.

Ekim 2017

## ONAY

Fizik Anabilim Dalı Doktora öğrencisi Erkan İlik' in DOKTORA tezi olarak hazırladığı “Soğuk Akan Post-Deşarj Plazma Reaktörlerinin Üretimi ve Bazı Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, jürimizce lisansüstü yönetmeliğin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek oybirliği ile kabul edilmiştir.

**Danışman** : Prof. Dr. Tamer AKAN

**İkinci Danışman** : -

**Doktora Tez Savunma Jürisi:**

**Üye** : Prof. Dr. Tamer AKAN

**Üye** : Prof. Dr. Murat TANIŞLI

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Tefvik ÜNALDI

**Üye** : Prof. Dr. Güneş S. KÜRKCÜOĞLU

**Üye** : Yrd. Doç. Dr. Oğuz ERTUĞRUL

Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun ..... tarih ve  
..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Prof. Dr. Hürriyet ERŞAHAN  
Enstitü Müdürü

## ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Tamer AKAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Soğuk Akan Post-Deşarj Plazma Reaktörlerinin Üretimi ve Bazı Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 16/10/2017

Erkan İLİK

## ÖZET

Bu çalışmada, hem düşük hem de atmosferik basınçta deşarj ve post-deşarj plazma üretimine imkân sağlayan iki farklı soğuk akan post-deşarj plazma reaktörünün tasarımı ve üretimi Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Soğuk Plazma Laboratuvarı'nda gerçekleştirilmiştir. Düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma üretim reaktörü, birbirine bağlı üç ayrı vakum odasından oluşturulmuştur. Reaktörün içerisine gönderilen farklı gaz türleri için alternatif akım güç kaynakları kullanılarak, alüminyum elektrotlar arasında oluşturulan yüksek voltajla vakum odalarında plazma deşarjları oluşturulmuştur. Reaktörün ortasında yer alan etkileşim reaktöründe (post-deşarj odası) elektrik alan içerisinde üretilen deşarj plazmaların post-deşarjlarının etkileşimleri helyum, argon, oksijen ve atmosferik hava kullanılarak dört farklı gaz türü için optik olarak incelenmiştir. Elde edilen emisyon spektrumlarından, düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazmaların optik özellikleri ortaya konmuştur. Atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj (plazma jet) reaktöründe ise elektro-kimyasal sivriltme tekniği ile oluşturulmuş iğne elektrot ve toprak elektrotu arasından plazma deşarjının çıkarılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Tasarımı itibariyle maliyeti açısından oldukça ekonomik olan bu reaktörde uygulanan voltaj, frekans ve gaz akış hızı gibi parametreler ile optimum koşullar belirlenerek, insan vücuduna hem elektriksel hem de sıcaklık açısından herhangi bir zararı bulunmayan atmosferik basınç soğuk plazma jet üretimi gerçekleştirilmiştir. Helyum ve argon gazları kullanılarak üretilen soğuk akan atmosferik basınç post-deşarj (plazma jet) üzerinden alınan optik emisyon spektrumları ile post-deşarj plazma içerisinde yer alan nötr atom, uyarılmış atom ve moleküllerin optik özellikleri ortaya konmuştur. Deneysel çalışmalar sırasında, hem düşük hem de atmosferik basınçta üretilen deşarj ve post-deşarj plazmadaki değişimler voltaj, frekans, gaz türü ve gaz akış hızı gibi parametreler değiştirilerek gözlemlenmiştir. Bu gözlemler sonucunda iki farklı reaktördeki değişimler optik açıdan incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Deşarj plazma, post-deşarj plazma, plazma jet, soğuk akan plazmalar, optik emisyon spektroskopisi.

## SUMMARY

In this study, two different cold flowing post-discharge plasma reactors which allow to generate discharge and post-discharge plasma both low and atmospheric pressure were designed and produced in Cold Plasma Laboratory, Eskişehir Osmangazi University. The cold flowing post-discharge plasma production reactor at low pressure was formed by three separate vacuum chambers connected to each other. Plasma discharges were generated in the vacuum chambers with the high voltage generated between the aluminum electrodes using alternating current power supplies for different types of gas sent into the reactor. In the interaction reactor (post-discharge chamber) located in the middle of the reactor, the interactions of the post-discharges of discharge plasmas produced in the electric field were optically examined for four different gas species using helium, argon, oxygen and atmospheric air. The optical properties of cold flowing post-discharge plasmas at low pressure were determined from the obtained emission spectrums. In the cold flowing post-discharge plasma reactor at atmospheric pressure (plasma jet), the plasma discharge was removed between the electro-chemically sharpened needle electrode and the ground electrode. Optimum condition parameters such as applied voltage, frequency and gas flow rate of this reactor which is very economical in terms of cost and design were determined. Then atmospheric pressure cold plasma jet production without any electrical and thermal damage was carried out in the human body. The optical properties of neutrals, excited atoms and molecules in the post-discharge plasma were determined by optical emission spectrums of cold flowing atmospheric pressure post-discharge (plasma jet) produced using helium and argon gases. During the experimental studies, changes in the discharge and post-discharge plasmas produced at both low and atmospheric pressure were observed by changing parameters such as voltage, frequency, gas type and gas flow rate. As a result of these observations, the changes in two different reactors have been examined optically.

**Keywords:** Discharge plasma, post - discharge plasma, plasma jet, cold flowing plasmas, optical emission spectroscopy.

## TEŞEKKÜR

Pozitif kişiliğiyle öğrencilerini düşünmeye sevk eden, onlara taşıyabilecekleri sorumluluklar vererek kendine güvenen özgün bireyler yetiştiren, bazen bir eğitimci, bazense bir ağabey gibi hem bilimsel hem de insani açıdan yol gösteren değerli hocam Sn. Prof. Dr. Tamer AKAN' a gerek bilimsel gerekse beşeri hayatıma katkılarından ötürü çok teşekkür ederim.

Düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörünün oluşturulması sırasında sunduğu çözüm önerileri ve destekleri için Anadolu Üniversitesi Fen Fakültesi Fizik Bölümü Öğretim Üyesi Sn. Prof. Dr. Murat TANIŞLI' ya vermiş olduğu bilgiler ve yardımlarından ötürü çok teşekkür ederim.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi lisans laboratuvarlarında görev yapan İlhami ALTINSÖZ, Akif TUTGUN ve özellikle Halil Yasin ADIYAMAN' a reaktörlerde yer alan bazı parçaların oluşturulması işlemlerindeki teknik yardımları için, tez çalışmalarım sırasında, hem reaktör üretimi süreçlerinde hem de üretim sonrası alınan ölçümlerde gece gündüz kavramı olmadan bana yardımcı olan çalışkan, meraklı, özverili arkadaşım Çağrı DURMUŞ' a, tez yazım esnasındaki teknik desteği için Arş. Gör. Celal AŞICI' ya, reaktör üzerinden alınan UV ölçümleri ve yorumlamaları konusundaki destekleri için Arş. Gör. Dr. Gökhan KILIÇ ve Arş. Gör. Dr. Uğur Gökhan İŞSEVER' e, reaktör üretimi işlemi için sağladıkları finansal desteklerden ötürü Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Komisyonuna (ESOGÜ BAP, Proje No: 2013-326) ayrı ayrı teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde bana destek olan canım anneme, canım babama ve ağabeyime doğduğum günden bu güne kadar daima yanımda oldukları için çok teşekkür ederim.

Lisansüstü çalışmalarım süresince bana güç ve moral veren hayat arkadaşım, dostum, sevgili eşim Buse ÖZEN İLİK' e anlayışı, sabrı ve desteği için çok teşekkür ederim.



## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
<b>ÖZET</b> .....	vi
<b>SUMMARY</b> .....	vii
<b>TEŞEKKÜR</b> .....	viii
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	ix
<b>ŞEKİLLER DİZİNİ</b> .....	xi
<b>ÇİZELGELER DİZİNİ</b> .....	xv
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ</b> .....	xvi
<b>1. GİRİŞ VE AMAÇ</b> .....	1
<b>2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI</b> .....	21
<b>3. POST-DEŞARJ FİZİĞİ</b> .....	31
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM</b> .....	50
4.1. Düşük Basıncıta Soğuk Akan Post-Deşarj Plazma Reaktörü Tasarımı .....	50
4.2. Atmosferik Basıncıta Soğuk Akan Post-Deşarj Plazma (Plazma Jet) Reaktörü Tasarımı .....	55
4.3. Alternatif Akım Güç Kaynakları .....	59
4.4. Optik Emisyon Spektroskopisi (OES) .....	61
<b>5. BULGULAR VE TARTIŞMA</b> .....	66
5.1. Düşük Basıncıta Soğuk Akan Post-Deşarj Plazma Reaktöründeki Deneysel Çalışmalar .....	66
5.1.1. Düşük basınçta atmosferik havanın post-deşarj plazmasının üretimi ve karakterizasyonu .....	68
5.1.2. Düşük basınçta Helyum gazı post-deşarj plazma üretimi ve karakterizasyonu .....	73
5.1.3. Düşük basınçta Argon gazı post-deşarj plazma üretimi ve karakterizasyonu .....	77
5.1.4. Düşük basınçta Oksijen gazı post-deşarj plazma üretimi ve karakterizasyonu .....	83

**İÇİNDEKİLER (devam)**

	<b><u>Sayfa</u></b>
5.2. Atmosferik Basınçta Soğuk Akan Post-Deşarj Plazma (Plazma Jet)	
Reaktöründeki Deneysel Çalışmalar.....	87
5.2.1. Atmosferik basınçta Helyum gazı post-deşarj plazma üretimi ve karakterizasyonu.....	89
5.2.2. Atmosferik basınçta Argon gazı post-deşarj plazma üretimi ve karakterizasyonu.....	98
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>107</b>
<b>KAYNAKLAR DİZİNİ.....</b>	<b>116</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>125</b>

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1.	DC elektriksel gaz deşarjın akım-voltaj karakteristiği..... 7
1.2.	DC glow deşarjda elektrotlar arasındaki a) plazma b) elektrik c) potansiyel alan dağılımı ile d) yük ve e) akım yoğunlukları değişimi ..... 11
3.1.	a) Düşük basınçta b) atmosferik basınçta elektrotlar arasında oluşan deşarj plazmalar ..... 31
3.2.	a) Düşük basınçta b) Atmosferik basınçta elektrotlar dışında oluşan post-deşarj plazmalar ..... 31
3.3.	a) Düşük basınçta post-deşarj plazma üretimi. b) Düşük basınçta ayrı bir post-deşarj odasına akıtılarak post-deşarj plazma üretimi ..... 33
3.4.	Post-deşarj/puls plazma jet tarafından üretilen plazma atmalarının zamana bağlı değişimlerinin fotoğrafları ..... 34
3.5.	Plazma jetin farklı zaman dilimlerinde yayılım süreçleri ..... 36
3.6.	a) Townsend Ateşleme ve b) Işık huzmesi (streamer) Ateşleme oluşumunun şematik olarak gösterimi ..... 38
3.7.	a) Herhangi keyfi iki anda ışık huzmesi oluşumu b) alanın kuvvet çizgileri yöneliminin ışık huzmesi yönelimi ile yakın olduğu durum..... 39
3.8.	Post-deşarj plazma bölgesinin yatayda oluşturduğu farklı bölgelerin isimlendirilmesi..... 40
3.9.	a) Kuvars cam reaktör ile paslanmaz çelik reaktörde üretilen azot gazının atmosferik basınç plazma jet görünümü b) NO üretim mekanizması..... 41
3.10.	Işık huzmesi modelinin şematik gösterimi ..... 46
4.1.	Düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörünün şematik tasarımı .. 52
4.2.	Düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörü..... 54
4.3.	Elektro-kimyasal sivirtme yöntemi düzeneğinin hazırlanması..... 56
4.4.	Atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma (plazma jet) reaktörünün (a) şematik ve (b) iç tasarımının görünümleri..... 57
4.5.	Atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma (plazma jet) reaktörü..... 58
4.6.	AC güç kaynaklarının şematik gösterimi..... 59
4.7.	Deneysel düzende kullanılan AC güç kaynağı..... 59
4.8.	Yüksek voltaj trafo voltaj-frekans ölçümleri ..... 60
4.9.	Güç kaynağının çıkış gerilimi/1000 V ..... 61

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<b><u>Sekil</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
4.10. Optik spektroskopi cihazlarında kullanılan kısımlar: (a) Absorbsiyon spektroskopisi (b) Flüoresans ve saçılma spektroskopisi, (c) Emisyon spektroskopisi .....	62
4.11. Deneysel çalışmalarda kullanılan optik emisyon spektrometresi ve yazılımı ....	64
5.1. Düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörüne ait geçirgenlik eğrisi.....	67
5.2. Düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörüne ait absorban eğrisi.....	67
5.3. Tek bir güç kaynağı kullanılarak üretilen düşük basınçta atmosferik havanındeşarj ve post-deşarj plazmasının reaktör içerisindeki görünümü.....	69
5.4. İki güç kaynağı kullanılarak üretilen atmosferik havanındeşarj ve post-deşarj plazmasının reaktör içerisindeki görünümü.....	69
5.5. Atmosferik havanındeşarj odasında üretilen plazmasının optik emisyon spektrumu.....	71
5.6. Atmosferik havanın etkileşim odası üzerinden alınan optik emisyon spektrumu.....	71
5.7. İki güç kaynağı kullanılarak üretilen He gazınındeşarj ve post-deşarj plazmasının reaktör içerisindeki görünümü.....	74
5.8. Helyum gazınındeşarj odasında üretilen plazmasının optik emisyon spektrumu.....	75
5.9. Helyum gazının etkileşim odası üzerinden alınan optik emisyon spektrumu.....	75
5.10. Ar gazınındeşarj ve post-deşarj plazmasının bir güç kaynağı ile üretimi .....	78
5.11. İki güç kaynağı kullanılarak üretilen Ar gazınındeşarj ve post-deşarj plazmasının görünümü.....	78
5.12. Argon gazınındeşarj odasında üretilen plazmasının optik emisyon spektrumu.....	80
5.13. Argon gazının etkileşim odası üzerinden alınan optik emisyon spektrumu .....	80
5.14. Oksijen gazınındeşarj odasındadeşarj plazmasının üretimi .....	83
5.15. Oksijen gazının etkileşim odasında post-deşarj plazmasının üretimi .....	84
5.16. Oksijen gazınındeşarj odasında üretilen plazmasının optik emisyon spektrumu.....	85

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
5.17. Oksijen gazının etkileşim odası üzerinden alınan optik emisyon spektrumu.....	85
5.18. Atmosferik basınç post-deşarj plazmanın (plazma jet) insan tenine teması .....	87
5.19. Atmosferik basınç post-deşarj plazmanın (plazma jet) bir kâğıt üzerine teması .....	88
5.20. He gazının atmosferik basınç post-deşarj plazmasının karakteristik dalgaboyu şiddet grafiği (18 kV, 15 kHz) .....	90
5.21. He gazının soğuk akan atmosferik basınç post-deşarj plazmasının gaz akış hızına göre değişimi .....	92
5.22. Erken - Orta - Geç evrelerinde He gazının atmosferik basınç post-deşarj plazması emisyon spektrumları.....	93
5.23. He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazmasında (plazma jet) akış hızına bağlı şiddet değişimleri .....	94
5.24. He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazmasında (plazma jet) akış hızına bağlı olarak OH radikali ışınım konsantrasyonunun değişimi.....	95
5.25. He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazmasında (plazma jet) akış hızına bağlı olarak N <sub>2</sub> molekülü ışınım konsantrasyonunun değişimi .....	96
5.26. He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazmasında (plazma jet) akış hızına bağlı olarak N <sub>2</sub> <sup>+</sup> iyonu ışınım konsantrasyonunun değişimi .....	96
5.27. He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazmasında (plazma jet) akış hızına bağlı olarak O radikali ışınım konsantrasyonunun değişimi.....	97
5.28. Ar gazının atmosferik basınç post-deşarj plazmasının karakteristik dalgaboyu şiddet grafiği (18 kV, 15kHz) .....	99
5.29. Ar gazının soğuk akan atmosferik basınç post-deşarj plazmasının gaz akış hızına göre değişimi .....	101
5.30. Erken - Orta - Geç evrelerinde Ar gazının atmosferik basınç post-deşarj plazması emisyon spektrumları.....	102
5.31. Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma jetlerde akış hızına bağlı şiddet değişimleri .....	103
5.32. Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma jetlerde akış hızına bağlı olarak OH radikali ışınım konsantrasyonunun değişimi.....	104
5.33. Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma jetlerde akış hızına bağlı olarak N <sub>2</sub> molekülü ışınım konsantrasyonunun değişimi .....	105

**ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)****Sekil****Sayfa**

- 5.34. Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma jetlerde akış hızına bağlı olarak  $N_2^+$  iyonu ışınım konsantrasyonunun değişimi ..... 105
- 5.35. Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma jetlerde akış hızına bağlı olarak O radikali ışınım konsantrasyonunun değişimi ..... 106

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<b><u>Cizelge</u></b>	<b><u>Sayfa</u></b>
3.1. Farklı iyon sayıları için hesaplanan $r_2$ ve $r_0$ değerleri.....	48
4.1. Düşük basınç plazma üretim sistemi kurulumunda gerekli cihaz/sarf ve donanımlar ile sistemdeki görevleri.....	50
4.2. Atmosferik basınçta post-deşarj (plazma jet) üretim sistemi kurulumunda gerekli cihaz/sarf ve donanımlar ile sistemdeki görevleri .....	55
4.3. Deneysel çalışmalarda kullanılacak optik emisyon spektrumunun genel donanımı .....	65

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

### Simgeler

### Açıklama

kV	kilo Volt
kHz	kilo Hertz
eV	Elektron Volt
$E$	Elektrik alan
$p$	Basınç
$K$	Kelvin
$^{\circ}C$	Santigrat derece
$\lambda$	Dalgaboyu
$s$	Saniye
H	Hidrojen
He	Helyum
He*	Yarı-kararlı Helyum atomu
Ar	Argon atomu
O <sub>2</sub>	Oksijen molekülü
N <sub>2</sub>	Azot molekülü
N <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Azot iyonu
NO	Azot monoksit (Azot oksit) radikali
OH	Hidroksil radikali
H <sub>2</sub> O	Su molekülü
M	Herhangi bir atom/molekül
$T_e$	Elektron sıcaklığı
$T_i$	İyon sıcaklığı
$T_n$	Nötr türlerin sıcaklığı
$f_{He}$	Helyum gaz akış hızı
$f_{Ar}$	Argon gaz akış hızı

### Kısaltmalar

### Açıklama

AC	Alternatif Akım
DBD	Dielektrik Bariyer Deşarj



**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
DC	Doğru Akım
ESOGU BAP	ESOGÜ Bilimsel Araştırma Projesi Komisyonu
ICCD	Intensified Charge-Coupled Device
LCD	Sıvı Kristal Ekran (Liquid Crystal Display)
LTD	Lokal Termodinamik Denge
MW	Mikrodalga
NIST	National Institute of Standards and Technology
non-LTD	Lokal Termodinamik Dengeye olmayan
OES	Optik Emisyon Spektroskopisi
RF	Radyofrekans
TTD	Toplam Termodinamik Denge
UV	Ultraviyole
YV	Yüksek Voltaj

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

19. yüzyıldaki bilimsel gelişmelerle birlikte Geissler, Crookes ve Langmuir gibi bilim insanları gazlarda elektrik boşalması olayının temel mekanizmalarını aşamalı olarak detaylı bir biçimde incelemişlerdir. 1879 yılında Crookes, cam bir tüp içerisinde elektriksel olarak boşalan gaz deşarjın iyonlaşmış gaz olduğunu ifade etmiştir. 1926 yılında Irving Langmuir, maddenin dördüncü hali için “plazma” terimini kullanmıştır (Akan 2005). Bugün dünyamız gibi maddenin katı, sıvı ve gaz hallerinin bulunduğu gezegenler, büyük patlama sonrası plazma halinde olan bir ortamın, çeşitli süreçler ile zaman içinde sahip oldukları yüksek enerjilerini yitirmesi sonucu oluşmuştur. Bu nedenle Fizik bilminde maddenin dördüncü hali olarak bilinen plazmalar, evrenin oluşum sürecinde aslında ilk oluşan hallerden biridir. Hala çok sıcak olan yıldızlar ile galaksiler arasını oluşturan bulutsular da, düşük yoğunlukta da olsa büyük miktarda plazmalardır. Van Allen kuşakları, kutup ışıkları, iyonosfer ve şimşek dünyamıza yakın doğal olarak gözlemlenebilen plazmalara örnektir.

Plazmayı bazı özellikleri karakterize etmekte ve bu özellikleri sayesinde plazma; katı, sıvı ve gaz hallerinden ayrılmaktadır. Plazmanın diğer hallerden farklı olan en önemli özelliği, plazmayı oluşturan parçacıkların yüklü olması ve bu yüklü parçacıkların Coulomb kuvvetleri ile birbirleri ile sürekli olarak etkileşim içerisinde bulunmasıdır. Plazma içerisinde yer alan her bir parçacık, komşusu bulunan diğer parçacığa ve hatta kendisinden daha uzakta bulunan diğer parçacıklara da eş zamanlı olarak etki etmektedir. Bu nedenle plazma içerisindeki parçacıklar sürekli olarak birbirleriyle etkileşerek kolektif bir davranış eğilimi sergilemektedirler. Bundan dolayı plazma içerisindeki yüklü parçacıkların difüzyonu elektronların ve iyonların bireysel difüzyon katsayıları ile değil, ambipolar difüzyon katsayısı ile verilir (Krall ve Trivelpiece, 1973). Gaz ya da gaz karışımları kullanılarak oluşturulan plazma, çok sayıda nötral ve yüklü parçacıkları bünyesinde barındırır. Plazma içinde birbirinden ayırt edilebilen her bir parçacık grubu, türler olarak ifade edilir. Bu türlerden,  $n_e$ ; elektron yoğunluğu ve  $n_i$ ; iyon yoğunluğu olarak ifade edilir.

Plazma, yaklaşık olarak nötral özellik sergilediğinden,

$$n_i \cong n_e \cong n \quad (1.1)$$

plazma içerisindeki parçacık yoğunlukları yaklaşık olarak birbirine eşittir. Eşitlik (1.1)'deki  $n$ ; “plazma yoğunluğu” olarak tanımlanır (Grill, 1993). Plazma içerisindeki yüklü parçacık sayısını ifade eden parametre ise gazın iyonlaşma derecesi olup, gaz içindeki iyonlaşmış parçacık sayısı,

$$\alpha_{iz} = \frac{n_i}{n_i + N} \quad (1.2)$$

şeklinde ifade edilir. Burada  $N$ ; plazma içerisindeki nötral atomların yoğunluğudur. İyonlaşma derecesi  $\alpha_{iz} = 1$  olduğu durumda, plazma tümüyle iyonlaşmış demektir (Liebermann ve Lichtenberg, 2005). Bu duruma yıldızlar ve termonükleer füzyon reaktörlerinde rastlanır.

Termodinamik dengedeki bir nötral gaz halini tanımlayan en önemli parametre, sistem içindeki molekülün ortalama taşınım enerjisini ifade eden sıcaklıktır. Plazma içerisinde farklı elektrik yüklü ve kütleli parçacıkların bir karışımı bulunduğu için, her tür farklı sıcaklık terimleri ile ifade edilmektedir. Örneğin  $T_g$ ; nötral atomların yani plazması oluşturulan gazın sıcaklığını,  $T_u$ ; uyarılmış atomların sıcaklığını,  $T_i$ ; iyonların sıcaklığını,  $T_e$ ; elektronların sıcaklığını,  $T_a$ ; molekül durumundan atoma ayrılmış atomlar için ayrılmış atom sıcaklığını ve  $T_f$ ; fotonların enerjisini karakterize eden foton sıcaklığını ifade etmektedir. Eğer plazma içerisinde yer alan türlerin sıcaklıkları birbirlerine eşit ise,

$$T_g \cong T_u \cong T_i \cong T_a \cong T_f \cong T_e = T_p \quad (1.3)$$

bu plazma, “toplam termodinamik dengedeki (TTD) plazma” olarak isimlendirilir. Burada  $T_p$ ; “plazma sıcaklığı” olarak tanımlanır. Bu tip plazmalar, yalnızca güneşte ve yıldızlarda meydana gelmektedir.

Eğer plazma içerisinde foton sıcaklığı haricindeki diğer türlerin sıcaklıkları birbirlerine eşit ise,

$$T_g \cong T_u \cong T_i \cong T_a \cong T_e \neq T_f \quad (1.4)$$

bu plazma, “lokal termodinamik dengedeki (LTD) plazma” olarak isimlendirilir. Laboratuvar koşullarında atmosferik basınçlarda lokal termodinamik dengede olan plazmalar üretilebilir ve bunlar genellikle “termal plazmalar” olarak adlandırılırlar. Termal plazmalar yüksek basınçlarda meydana geldiği için yüksek basınç plazmaları olarak da adlandırılırlar. Plazma içerisinde, basıncın artmasıyla birlikte elektronlar ile nötral atomlar arasındaki çarpışmaların sayısı artar. Bu nedenle 1 atm civarındaki yüksek basınçlarda meydana gelen, elektriksel ark, plazmatron olarak adlandırılan plazma jetleri ve kontrol edilebilen termonükleer füzyon reaktörlerinde oluşturulan plazmalar, laboratuvar koşullarında üretilen LTD plazmalara örnek olarak verilebilir. Daha düşük basınçlarda elektronlar ile nötral atomlar ve iyonlar arasında termal dengeye ulaşamaz. Bu nedenle,  $T_e \gg T_i \cong T_g \cong T_u$  şeklinde, elektronların sıcaklığının diğer türlerden çok çok yüksek olduğu ve hiçbir tür arasındaki sıcaklığın eşit olmadığı plazmalar “lokal termodinamik dengede olmayan (non-LTD) plazmalar” olarak adlandırılır. Bilindiği gibi, elektronların kütlesi plazma içerisindeki diğer türlerin kütlelerinden görece çok daha küçüktür. Bu nedenle elektronlar, plazmanın oluşması için dışarıdan verilen elektrik alanı ya da enerjiyi diğer türlerden çok daha fazla absorbe ederler. Plazması elde edilen gazın basıncı düşük olduğu için elektronlar, diğer türlerle çok sayıda çarpışma yapamaz ve böylece diğer türlere sahip olduğu enerjisini aktaramaz. Bu nedenle düşük basınç plazmalarında elektronların sıcaklıkları, diğer türlerden her zaman çok çok daha büyük olmaktadır. Düşük basınç plazmaları olarak adlandırılan non-LTD plazmalarında nötral atomların sıcaklığı (gazın sıcaklığı olarak ta bilinir) çok düşük (yaklaşık olarak oda sıcaklığında) olduğu için, bu plazmalar aynı zamanda “soğuk plazmalar” olarak adlandırılır. Elektronların plazma içerisindeki dağılım fonksiyonu;

$$f(v) = \frac{4n_e}{\pi} \left( \frac{m_e}{2kT_e} \right)^{3/2} v^2 e^{-\frac{m_e v^2}{2kT_e}} \quad (1.5)$$

Maxwell dağılım fonksiyonu ile verilir (McDaniel, 1964). Burada  $m_e$ ; elektronların kütlesi ve  $k$  Boltzmann sabitidir.

Plazma ile ilişkili diğer bir özellik, plazma içindeki parçacıkların, plazma içerisindeki başka bir yüklü parçacık tarafından ya da dışarıdan oluşturulan bir elektrostatik alana karşı kalkan oluşturacak şekilde, kendilerini yeniden düzenleme eğiliminde olmalarıdır. Eğer plazma içerisinde bir elektrik alan oluşturulursa, plazma içerisindeki yüklü parçacıklar alanın etkisini azaltmak için tepki vereceklerdir. Bu tepki, daha hafif ve daha hızlı olan elektronlar tarafından, elektrik alanın etkisini azaltmak için plazma içindeki diğer türlere göre daha hızlı bir şekilde verilecektir. Plazma içerisindeki yüklü parçacıklar bu etkiyi azaltmak için verecekleri tepkiyi, bir titreşim hareketi şeklinde yaparlar. Bu titreşim hareketini düşük kütleleri nedeniyle elektronlar, diğer türlere nazaran daha şiddetli yaparlar. Elektronların bu etkiyi azaltmak için yaptıkları titreşim hareketinin frekansı “plazma frekansı” olarak adlandırılmaktadır. Diğer bir deyişle plazma içinde meydana gelen bir etki, plazma içinde plazma frekansı ile yayılır. Plazma frekansı Langmuir frekansı olarak da bilinir ve

$$v_L = \left( \frac{e^2 n_e}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} \quad (1.6)$$

$$v_L = 8,980 n_e^{1/2}$$

şeklinde verilir (Roth, 1995; Muraoka ve Maeda, 2001). Burada  $\epsilon_0$ ; boşluğun geçirgenliği  $n_e$ ;  $m^{-3}$  cinsinden elektron yoğunluğu ve  $e$ ; elektronun yüküdür.

Plazmaların lokal elektrik alanların etkisini azaltmak için yüklü parçacıklarının tepkisi “Debye kafeslemesi (Debye shielding)” olarak adlandırılır (Raizer, 1991). Debye kafesleme etkisi nedeniyle plazma içerisinde bölgesel elektriksel alanların oluşmasına izin verilmediği için, plazma sürekli olarak nötr halde kalmaya çalışır. Debye kafesleme etkisi ile plazmanın bu şekilde nötr halde kalma isteği yaklaşık olarak nötral (quasi-neutrality)” olarak adlandırılır.

Ancak plazma içerisinde,

$$\lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{1/2} \cong 7434 \left( \frac{T_e}{n_e} \right)^{1/2} \quad (1.7)$$

ile verilen ve ‘‘Debye uzunluğu’’ olarak adlandırılan uzunluk, plazma içerisindeki minimum nötraltenin sağlandığı bölgeye karşılık gelmektedir (Kunkel, 1966; Roth, 1995). Burada  $T_e$ ; eV cinsinden elektron sıcaklığı,  $n_e$ ;  $m^{-3}$  cinsinden elektron yoğunluğudur. Daha doğrusu plazma içinde  $\lambda_D$  yarıçaplı Debye küresi, plazma içindeki minimum nötral olan yani bölgesel elektrik alanların oluğu hacme karşılık gelmektedir. Plazma içerisine herhangi bir metal sokulursa, Debye kafesleme etkisi ile plazma içerisinde bir kılıf oluğu. Plazma içerisindeki elektronlar, iyonlardan daha büyük hızlara sahip olduğu için bu metale daha çabuk ulaşırlar. Böylece metal yüzeyi ile plazma arasında bir potansiyel fark oluğu. Bundan dolayı plazma, kendisi ile temasta olan herhangi bir yüzeye göre her zaman pozitif potansiyele sahip olur. Debye kafesleme etkisi nedeniyle yüzeyle plazma arasında oluğu potansiyel, birkaç Debye uzunluğundaki bir tabakayı kuşatır. Plazma ile temas halinde bulunan tüm yüzeyler arasında oluğu pozitif uzay yüklerinin bu tabakası ‘‘plazma kılıfı (plasma sheath)’’ olarak adlandırılır. Bu nedenle elektriksel deşarjlar için kullanılan elektrotlarda katot potansiyeli (katot düşümü) ve anot potansiyeli (anot düşümü) olarak adlandırılan pozitif ve negatif yükler için hızlandırıcı bir potansiyel her zaman bulunur. Plazma frekansı ile Debye uzunluğu arasındaki ilişki, Debye uzunluğu  $\lambda_D$  ile plazma frekansı  $\nu_L$ ’ nin çarpımı;

$$\lambda_D \cdot \nu_L = \left( \frac{\epsilon_0 k T_e}{n_e e^2} \right)^{1/2} \left( \frac{e^2 n_e}{m_e \epsilon_0} \right)^{1/2} = \left( \frac{k T_e}{m_e} \right)^{1/2} \approx \bar{v}_e \quad (1.8)$$

olarak bulunur. Burada,  $\bar{v}_e$ ; plazma içindeki elektronların ortalama termal hızıdır. Eşitlik (1.8), elektronların plazma titreşim periyodu süresince bir Debye uzunluğu mesafesince hareket edebileceğini göstermektedir. Debye uzunluğu plazma için çok önemli bir parametredir. Langmuir iyonlaşmış gaza plazma ismini vermesine rağmen, her iyonlaşmış gaz plazma değildir. İyonlaşmış bir gazın plazma olarak tanımlanabilmesi için üç şartın gerçekleşmesi gerekir. Bunlardan birincisi, plazma boyutları ( $L$ ), Debye uzunluğundan çok daha büyük olmalıdır. Yani iyonlaşmış bir gazın plazma olarak

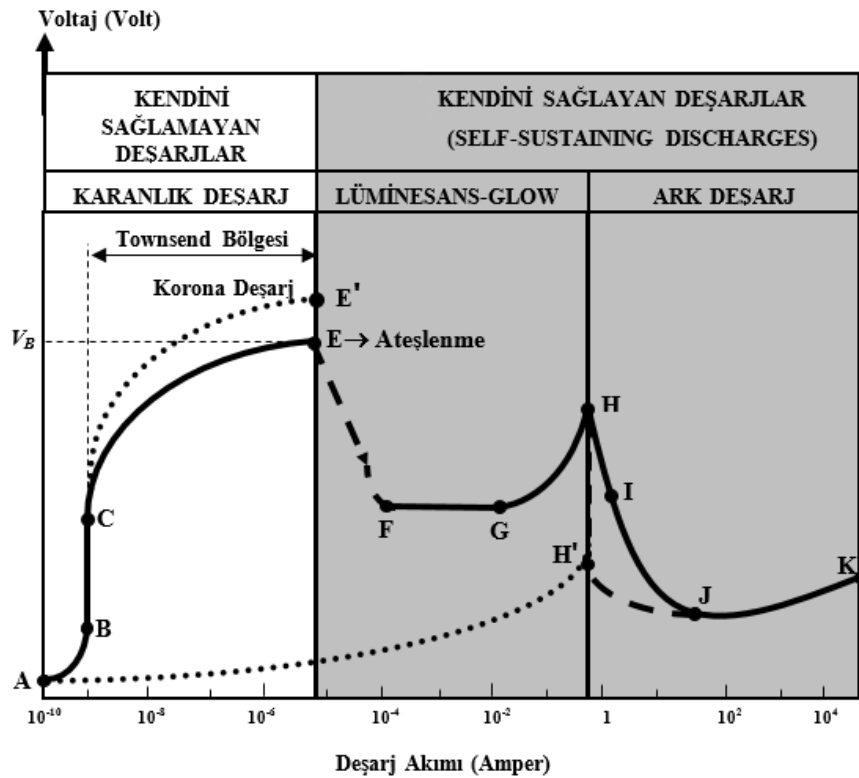
tanımlanması için  $L \gg \lambda_D$  olmalıdır. İkinci olarak  $\lambda_D$  yarıçaplı ve Debye küresi olarak adlandırılan hacim içerisindeki yüklü parçacık sayısının  $N_D \gg 1$  olması gerekir. Debye küresi içindeki yüklü parçacık sayısı;

$$N_D = \frac{4}{3} \pi n_e \lambda_D^3 = (1,37 \times 10^6) \frac{T_e^{3/2}}{n_e^{1/2}} \quad (1.9)$$

ile verilir ve  $1/N_D = \Lambda$ , plazma parametresi olarak tanımlanır (Tanenbaum, 1967). Üçüncü şart ise plazmadaki çarpışma frekansı ile ilgilidir. Eğer plazma içerisindeki yüklü parçacıklar, nötral atomlarla çok sık çarpışıyorsa, kolektif davranış şartı sağlanmaz ve gaz bir plazma olarak davranamaz.  $\tau$ ; nötral atomlarla yüklü parçacıkların çarpışmaları arasında geçen ortalama zaman ve  $\omega$ ; çarpışma frekansı olmak üzere, iyonlaşmış bir gazın plazma olabilmesi için  $\omega \cdot \tau > 1$  olmalıdır (Grill, 1993).

Laboratuvar koşullarında plazma üretmek için maddenin gaz haline iyonlaşmasına yetecek miktarda yüksek enerji vermek gerekmektedir. Bir katı madde, ısı enerjisi verilerek eritilip sıvı hale, daha fazla ısı enerjisi verilerek gaz hale getirilebilir. Bu durumda verilen ısı enerjisi, maddenin atom ya da molekülleri arasındaki bağları zayıflatarak maddenin hal değişimine neden olmaktadır. Gaz halinde maddeyi oluşturan atom ya da moleküller arasındaki bağlar oldukça zayıftır. Bu nedenle gaz halindeki maddeye ısı enerjisi verilmeye devam edilirse, verilen bu enerji gaz içinde bulunan atom ya da moleküllerin parçalanmasına harcanacaktır. Gaz halinde nötral olan atomlar/moleküller, alınan fazla enerjiyle parçalanarak atom/molekül yapılarından elektronların kopmasına, dolayısıyla iyonlaşmaya başlar. Bununla birlikte gaz içindeki çok sayıda atom ya da molekül, alınan enerji ile daha yüksek enerji seviyelerine uyarılıp daha sonra foton yayımlayabilir. Böylece gaz halindeki maddenin atom ya da molekülleri verilen ısı enerjisinin yeterli miktara ulaşması sonucu iyonlaşarak plazma haline geçerler. Maddenin plazma haline geçişi laboratuvar koşullarında maddeye ısı enerjisi, elektrik enerjisi ve foton enerjisi verilerek elde edilmektedir. Plazma halinde, maddenin atomları parçalanmıştır ve sürekli hareket halinde olan pozitif ve negatif yüklü iyonların ve elektronların oluşturduğu bir sistem haline gelmiştir. Plazma içinde aynı zamanda fotonlar, uyarılmış atomlar veya moleküller, radikaller, metastable atomlar, nötral atom veya moleküller de vardır (Tanenbaum, 1967).

Laboratuvar koşullarında plazma üretmek için tercih edilen en kolay yöntem, iki metal elektrot arasında bulunan bir gaz içinden elektrik akımı geçirilmesidir. Düşük basınçlarda daha düşük elektrik voltajı ile gaz deşarj plazması üretilebildiği için genelde iki metal elektrot, deşarj tüpü olarak adlandırılan cam tüp içine vakum sızdırmaz materyaller yardımıyla yerleştirilir. Deşarj tüpü içindeki metal elektrotların dışarıya vakum sızdırmaz materyaller ile elektriksel bağlantıları üretim aşamasında yapılır. Floresan lambalar, neon lambalar, şehir ve otoyol aydınlatmasında kullanılan sodyum lambalar plazma üretmek için kullanılan deşarj tüplerine birer örnektir. Deşarj tüpünün vakumlanması ve istenilen gazın istenilen basınçta yerleştirilmesi için vana sistemleri ve basınç kontrol sistemleri kullanılır. Deşarj tüpü vakumlanıp, istenilen basınçta gaz ya da gaz karışımları oluşturulduktan sonra tüm vanalar kapatılır. Metal elektrotlara, elektrik voltajı uygulanacak güç kaynağı, ampermetre, voltmetre ve oluşacak plazmanın güç kaynağından fazla akım çekmesini kontrol edecek dirençler bağlandıktan sonra elektrotlar arasına voltaj uygulanır. DC voltaj güç kaynağı ile voltaj uygulanarak ve bu sırada deşarj içinden geçen akımın ve deşarj üzerindeki voltajın ölçülmesi ile elde edilen akım-voltaj karakteristiği Şekil 1.1' de verilen grafiğe benzer olmaktadır (Akan, 2003). Grafik üzerindeki değerler, kullanılan gazın cinsine ve basıncına, elektrotlar arası uzaklığa, elektrotların cinsine ve yapısına göre farklılıklar gösterebilir.



Şekil 1.1. DC elektriksel gaz deşarjın akım-voltaj karakteristiği (Akan, 2003).



Şekil 1.1' de akım-voltaj karakteristiği değişimleri, deşarj tüpü içindeki yüklü parçacık sayısındaki artışa neden olan kaynakların değişmesinden kaynaklanmaktadır. Deşarj tüpü içindeki yüklü parçacıkların artışı, deşarjın kendisi tarafından sağlanıyorsa kendini sağlayan (self sustaining) deşarj, yük artışı bir dış kaynak tarafından sağlanıyorsa, kendini sağlamayan (non-self sustaining) deşarj olarak adlandırılır. Deşarj tüpü içinde, yüklü parçacıkların artışına sebep olan elektron emisyon kaynakları da değişmektedir. Örneğin karanlık deşarj bölgesinde doğal radyasyon (fotoelektrik emisyon) yoluyla, ışıldamalı (glow) deşarj durumunda ikincil elektron emisyonu yoluyla, ark deşarj bölgesinde termiyonik emisyon ve alan emisyonu yoluyla yüklü parçacık sayısında artış sağlanmaktadır. Karanlık deşarj olarak adlandırılan bölgede, yayımlanan radyasyon görünür bölgede olmadığı için karanlık deşarj olarak adlandırılır. Işıldamalı (glow) deşarj bölgesinde yayımlanan radyasyon, görünür bölgede olduğu için gözle görünür bir ışıldama meydana gelir. Deşarj tüpü içindeki elektrotlar arasına voltaj uygulanmadan önce, deşarj tüpü içine yerleştirilen gazda, her zaman bir miktar serbest elektron ve iyon vardır. Bunlar, güneşten gelen radyoaktif ışınlar ve uzaydan gelen kozmik ışınların gaz içindeki nötral atomları iyonlaştırması ve ayrıca doğada bulunan bu radyoaktif ışınların, deşarj cihazının elektrotlarından fotoelektrik emisyon yapmasıyla oluşurlar. Elektrotlar arasına uygulanan voltaj kademeli olarak arttırılırsa, gaz içinde doğal olarak bulunan elektronlar anoda, pozitif iyonlar katoda doğru hareket etmeye başlarlar ve bu yüklü parçacık hareketi nedeniyle deşarj içinden bir miktar akım geçer. Katot ile anot arasına uygulanan voltaj belli bir değere gelinceye kadar (B noktası) bu akım artar ve bu noktada birim zamanda üretilen tüm yükler elektrotlar tarafından toplanmıştır ve voltajın arttırılmaya devam edilmesiyle birim zamanda elektrotlar tarafından toplanan yük sayısında artış olmayacaktır. Sonuç olarak akım-voltaj karakteristiği doyuma ulaşacaktır. Burada yüklü parçacıklar elektrotlara doğru hareket ederken, çarpışmalarla iyonlaşma yapacak kadar enerjiye sahip değildirler. Buraya kadar deşarj tüpü içindeki tüm yükler doğal yollarla üretildiği için, (AB) bölgesi doğal radyasyon ile iyonizasyon bölgesi olarak adlandırılır. (B) noktasından sonra deşarj cihazı üzerine uygulanan voltaj arttırılsa dahi, akımın artmayıp sabit kaldığı satürasyon (doygunluk) bölgesi (BC) oluşur. Bu bölgede tüp içinde hala doğal olarak üretilen yükler mevcuttur. Ancak birim zamanda birim kesitten geçen yük miktarı sabit kaldığından, akım da değişmemektedir. Satürasyon rejiminde anot ile katot arasına uygulanan voltaj arttırılmaya devam ettikçe akım artmaz ancak deşarj içindeki yüklü parçacıklar giderek daha fazla enerji kazanırlar. Tam (C) noktasında, elektronlar artık gaz atomlarını iyonlaştıracak kadar enerji

kazanmışlardır ve deşarj tüpü içindeki yüklü parçacık sayısı aşağıdaki reaksiyonla giderek artacaktır. İyonizasyon, gaz deşarj plazmalarında yüklü parçacıkların üretilmesindeki en önemli olaydır ve iyonizasyon reaksiyonu;



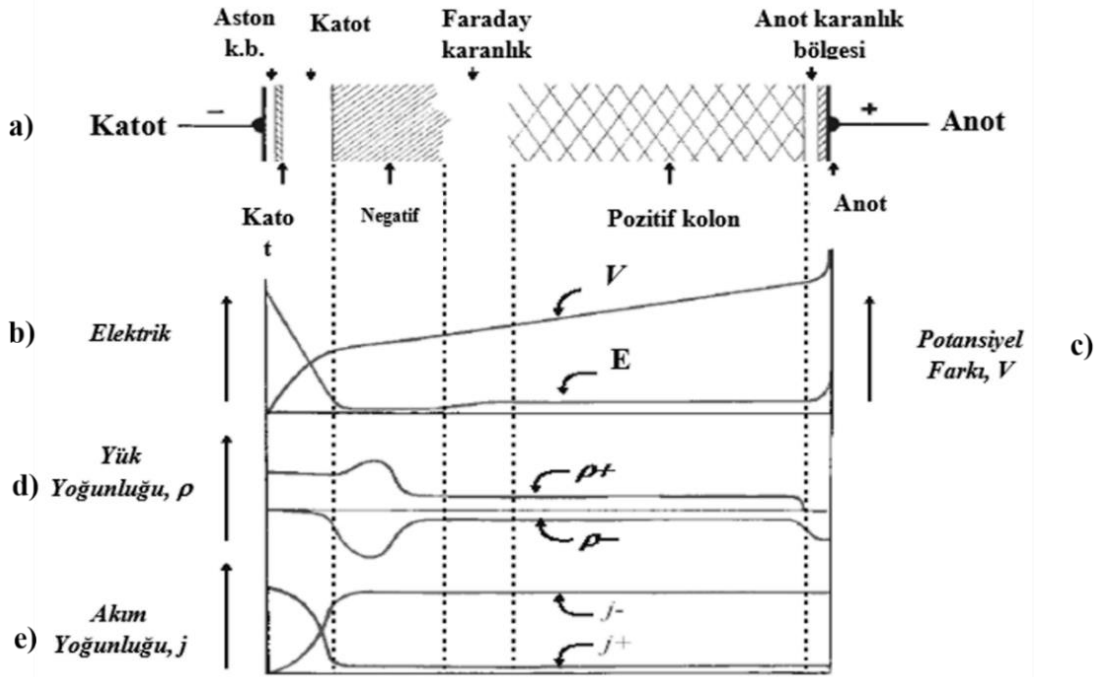
şeklindedir. Burada  $e^{-}$ ; elektron,  $A$ ; nötral gaz atomu ve  $A^{+}$ ;  $A$  atomunun iyonudur. İyonizasyon reaksiyonu sonucu yeni bir elektron-iyon çifti oluşur. Her elektron benzer reaksiyonu yapabilir ve böylece zincirleme yük artışı gerçekleşir. Bu artış (E) noktasında kritik bir değere ulaşır ve bu noktaya karşılık gelen voltaj  $V_B$ ; ateşleme (Breakdown) voltajı olarak adlandırılır. Ateşleme voltajından sonra deşarj üzerindeki voltaj birden azalarak ışıdamalı (glow) deşarj bölgesine geçilir. Işıdamalı (Glow) deşarj bölgesi; ışıdamalı (glow) deşarja geçiş bölgesi (EF), normal ışıdamalı (glow) deşarj bölgesi (FG) ve anormal ışıdamalı (glow) deşarj bölgesi (GH) olarak üçe ayrılır. Eğer elektrotlar üzerinde sivri ya da keskin uçlar varsa, uygulanan voltaj nedeniyle bu sivri ve keskin bölgelerdeki elektrik alan çok yüksek olacağından, alan elektron emisyonu nedeniyle korona deşarj oluşur (Nasser, 1971; Goldman ve Goldman, 1978; Roth, 1995; Musa vd., 2000). Bu nedenle ateşleme voltajı değeri daha yüksek bir değere çıkabilir (E'). Satürasyon rejimi ile ateşleme voltajı arasında kalan bölge Townsend rejimi olarak adlandırılır. Buraya kadar gaz içinden akım geçişinin anot ile katot arasındaki uzayda, dış kaynaklar nedeniyle üretilen iyonlara bağlı olduğu görülmektedir. Bu nedenle (A) noktası ile ateşleme voltajı arasındaki bölgeler kendini sağlamayan deşarj bölgeleri olarak adlandırılır. Aynı zamanda bu bölgede korona hariç hiçbir deşarj, görünür bölge dalga boyunda radyasyon (ışık) yayınlamaz. Bu nedenle bu bölge, karanlık deşarj olarak da adlandırılır. Ateşleme voltajından sonra yani karakteristik üzerinde (E) noktasından veya korona deşarjın oluştuğu özel durumda (E') noktasından sonra deşarj üzerine uygulanan voltaj birden azalır ve akım çok hızlı bir şekilde artar. Bu, deşarj içindeki yüklü parçacık sayısının çok hızlı bir şekilde artmasından dolayıdır. Bu artış, plazma içinde oluşan pozitif iyonların katota vurarak, katottan ikincil elektron emisyonu yapması nedeniyledir. Ateşleme voltajından sonra deşarj, ihtiyaç duyduğu yüklü parçacıkları artık kendisi üretmeye başladığı için bundan sonraki karakteristik üzerindeki bölgeler, kendini sağlayan deşarjlar olarak tanımlanır. Ateşleme öncesi, başka bir deyişle gaz içinde ışıdamalı deşarj oluşmadan önce, elektrotlar arası potansiyel dağılımı doğrusal dağılımdır ve elektrik alan  $E$  sabittir ve  $E = V/d$  eşitliği ile verilir. Bu elektrik alan ile elektronlar

anoda, pozitif iyonlar da katoda doğru hareket ederek deşarj içinden doğru akım geçişini sağlarlar. Bu sırada katoda gelen, başka bir deyişle katoda vuran pozitif iyonlar ikincil elektronları üretecektir (Raizer, 1991; Grill, 1993; Roth, 1995; Musa vd., 2000; Ekem vd., 2002). Bu ikincil elektronlar hemen katodun önüne düşer ve elektrotlar arasında var olan elektrik alan ile hızlanarak anoda doğru giderken yeni çarpışmalarla katoda doğru hızlanan iyonlar üretirler. Her iki işlem de, elektrotlar arası uzayın dışındaki elektron ve iyon kayıplarını karşılamak için, belirli bir oranda olmak zorundadır.

Işıldamalı (Glow) deşarjlar için ateşleme voltajının değeri,

$$V_B = \frac{A_1(pd)}{A_2 + \ln(pd)} \quad (1.11)$$

ile belirlenebilir. Burada  $A_1$  ve  $A_2$  deneysel olarak elde edilen birer sabit,  $p$ ; gaz basıncı ve  $d$ ; elektrotlar arası uzaklıktır. Ateşleme voltajı yalnızca gazın basıncı ve elektrotlar arası uzaklığın çarpımına ( $pd$ ) bağlıdır. Bu bağımlılık Paschen yasası olarak tanımlanır (Nasser, 1971; Goldman ve Goldman, 1978; Raizer, 1991; Grill, 1993; Roth, 1995; Bogaerts vd., 2002; Ekem vd., 2002; Akan, 2003; Remy vd., 2003). Işıldamalı deşarj oluşması için elektrotlar arasına uygulanan potansiyel farkı, deşarj oluştuktan sonra anot ile katot arasında eşit olarak dağılmaz ve Şekil 1.2' deki gibi kısımlara ayrılır. Çok güçlü bir elektrik alan ile karakterize edilen katoda bitişik olan bölge katot karanlık bölgesi-katot düşümü olarak veya kılıf (sheath) olarak adlandırılır. Negatif glow ve pozitif kolan olarak adlandırılan deşarjın en uzun parçasında potansiyel, neredeyse sabit çok küçük bir pozitif eğime sahiptir ve dolayısıyla düşük elektrik alan vardır ve plazma potansiyeli olarak adlandırılır. Diğer bölge anot düşümü olarak adlandırılır. Katot-anot arası uzaklık örneğin 1 - 10 cm ve argon gazı 1 mbar basınç için elektrotlar arasında ortaya çıkan ışık yayınlayan ve yayınlamayan bölgeler ile potansiyel ve elektrik alan dağılımı Şekil 1.2' deki gibi olacaktır.



Şekil 1.2. DC glow deşarjda elektrotlar arasındaki a) plazma b) elektrik c) potansiyel alan dağılımı ile d) yük ve e) akım yoğunlukları değişimi (Remy vd., 2003).

Şekil 1.2.c' den görüldüğü gibi, katot civarındaki potansiyel düşümü yani katot düşümü negatif glow' un bitiminden başlar. Katot civarındaki yüksek potansiyel düşümü yani katot düşümü deşarjı sağlamak için gereklidir. Katot düşümünde yüklü parçacıkların hareketi yönlendirilir ve bu yüklü parçacıklar bu potansiyel düşümünde oldukça yüksek enerji kazanırlar. Burada akım yoğunluğu,

$$j = j_e + j_p = en_e v_e + en_e v_i \quad (1.12)$$

eşitliği ile verilir ve toplam deşarj akımı korunur. Katot düşümü bölgesinde daha düşük yük yoğunluklarında dahi toplam deşarj akımı korunacaktır. Yük yoğunluklarının daha küçük değerleri, katot düşümündeki iyon ( $v_i$ ) ve elektronların hızlarının ( $v_e$ ) artmasıyla karşılanacaktır. Katot düşümü bölgesinde lokal termodinamik denge (LTD) olduğu kabul edilmez. Sonuç olarak klasik diagnostik metotlarını kullanmak güçtür. Gerçek bir plazma hali olan pozitif kolon bölgesinde plazma yoğunluğu oldukça yüksektir. Bu sebepten iletkenlik yüksektir. Negatif ve pozitif iyon yoğunluğu hemen hemen eşit olduğu için böyle bir plazma boyunca potansiyel düşümü düşüktür. Ayrıca, plazma yoğunluğu yüksek olduğu için, iyonizasyon oranı, düşük alanlarda dahi kayıpları karşılayabilecek ve plazma

yoğunluğunu koruyacak kadar yüksektir. Anottaki potansiyel düşümü, katotta meydana gelen işlemler nedeniyle elde edilen seviyede deşarj akımını korumak için kendini ayarlayan potansiyel düşümüdür. Şekil 1.2.a' da görüldüğü gibi ışıdamalı deşarj oluştuğunda, deşarj tüpü içinde anot ile katot arasında birçok bölge oluşmaktadır. “Aston Karanlık Bölgesi” olarak adlandırılan ilk bölge en temel haliyle “Katot Glow” a kadar olan bölge olarak açıklanabilir. Bu bölgede elektronların enerjisi (katot düşümünün elektrik alanı ile hızlandırılmasıyla elektronların kazandıkları enerji) deşarj tüpünün içini dolduran gazın atomlarını uyarıma yetmez. “Katot Glow” sınırı açıkça görünürdür ve gaz atomlarının uyarılma enerjisine karşılık gelir. Katota gelen iyonlar nedeniyle katottan yayınlanan ikincil elektronlar düşük enerjiye sahiptirler. Bu nedenle uyarıma veya iyonlaşma yapamazlar ve böylece “Aston Karanlık Bölgesi” oluşur. Katot’ tan, katot glow’ a kadar olan uzaklık, katot düşümü nedeniyle hızlanarak enerji kazanmak için elektronlar için gerekli uzaklığa karşılık gelir. Katot glow gaz atomlarının uyarılma enerjisine karşılık gelir ve bu bölge dardır. Çünkü uyarıma için enerjilerini kaybeden elektronlar daha fazla uyarıma yapmak için enerjiye sahip olamazlar. Diğer taraftan, elastik olmayan çarpışmalara sahip olmayan bu elektronlar, uyarıma için gerekli optimum değerden çok daha büyük enerjiyi “Anot Glow” un sonunda kazanırlar.

Katot Glow’ dan sonraki diğer karanlık bölge olan “Katot Karanlık Bölgesi” iki sebepten dolayı oluşur:

- i. Atomlarla elastik olmayan çarpışmalar yapan elektronlar uyarıma enerjisine denk bir enerjiyi kaybederler ve sonrasında herhangi bir atomu uyarıma veya iyonlaştırma işlemi yapamazlar.
- ii. Atomları uyarıma işlemi yapmamış olan elektronlar biraz daha fazla enerji kazanırlar; bu sebepten maksimum uyarıma ya da iyonlaşma enerjisini aşarlar. Bu durumda uyarıma veya iyonlaşma olasılığı maksimum değerlerden daha yüksek enerji değerlerinde aniden düşer.

Negatif Glow katot tarafında keskin bir sınıra sahiptir ve katot düşümü alanında hızlandırılan elektronların gaz atomlarını iyonlaştırmak için yeterli enerjiyi kazandığı nokta olarak ifade edilir. Negatif glow bölgesinde iki ilginç durum vardır:

- i. Bu bölgedeki elektrik alan neredeyse sıfır olacak kadar düşüktür ve ayrıca bu bölgede, iki grup elektron vardır. Bunlar  $T_e \leq 1 \text{ eV}$  olan çok soğuk elektronlar ve normal elektronlardır.
- ii. Bu bölgedeki nötralite sağlanmamıştır. Negatif glow her zaman negatif yük fazlalığına sahiptir. Bu bölge en yüksek şiddetli ışık yayınlayan deşarj bölgesidir. Burada yayınlanan ışıklar, çoğu elektron-iyon birleşmesiyle sonuçlanan uyarılmış atomların tekrar uyarılmadan önceki durumlarına dönerken yayınlanan ışıktır (Musa vd., 2000).

Negatif Glow bölgesinden sonra, düşük bir ışığa sahip “Faraday Karanlık Bölgesi” oluşur. Negatif Glow bölgesinde elastik olmayan çarpışmalarla enerjilerini kaybetmiş elektronlar, yeniden iyonlaştırma yapmak için “Faraday Karanlık Bölgesi” nde hızlanırlar. Ayrıca elektronlar Faraday karanlık uzayında pozitif kolonun içine girmek için fazla enerji kazanırlar ve gaz atomlarını iyonlaştırmaya veya uyarmaya başlarlar. “Pozitif Kolon” kısmında plazmanın yoğunluğu oldukça yüksektir ve elektrik alan düşüktür. Uzun mesafeli Coulomb etkileşimleri nedeniyle oluşan güçlü etkileşimler elektronların enerjisini (Maxwell dağılımlı bir gaz oluşturacak şekilde) ve elektron sıcaklığını eşitler. Hareketler küçük sürüklenme tipidir ve herhangi bir uniformsuzluk, difüzyon işlemleri (ambipolar difüzyon) ile aniden telafi edilir. Maxwell dağılımında iyonizasyonlar, uyarılmalar ve elektronlar lokal termodinamik dengededir. Sistemden sadece elektromanyetik radyasyon kaybı vardır. “Pozitif Kolon”un anot ucunda, anoda yük kayıplarından dolayı, “Anot Karanlık Bölgesi” diye adlandırılan bir karanlık bölge daha belirir. Burada hem elektronların hem de iyonların yoğunluğu azalır. Bu sebepten, deşarj akımını korumak için ( $j = n\vartheta$  eşitliğinden sabit  $j$  için,  $n$  azalırsa  $\vartheta$  artar) hızlanan elektron doğrudan anoda düşer. Bu hızlandırıcı alan nedeniyle elektronlar enerji kazanırlar ve gaz atomlarını iyonlaştırırlar. Bu sebepten anot yüzeyinde “Anot Glow” olarak adlandırılan bir ışıldama gözleriz. Bu belirtilen bölgeler  $10^{-1} - 10^{-2}$  mbar’lık gaz basınçlarında ancak tam olarak görülebilir. Bütün bu bölgelerin kalınlıkları gaz basıncının azalmasıyla artar, basıncın artmasıyla da azalır.

Sonuç olarak 1 mbar' dan daha yüksek basınçlarda deşarj tüpü tümüyle pozitif kolonla doldurulur.

Glow deşarj oluştuktan sonra anot ile katot arasına uygulanan voltaj arttırılmaya devam edilirse Şekil 1.1' de verilen karakteristik üzerindeki (G) noktasından sonra anormal glow deşarj başlar ve (H) noktasına kadar sürer. Bu bölgede (G) noktasından sonra ikincil elektron emisyonu ile akımın artışı, yavaş yavaş doyuma ulaşmaya başlar. Bu nedenle deşarj içindeki pozitif iyonlar katota vurarak ikincil elektron üretmekle birlikte, katotun aşırı ısınmasına neden olurlar ve voltaj giderek yükselmeye başlar. Katotun yeterince ısınması sebebiyle (H) noktasında artık termoelektronik emisyon başlar. Deşarj içindeki termoelektronik emisyon nedeni ile yüklü parçacık sayısı arttığı için deşarj üzerindeki voltaj yeniden düşmeye başlar. Böylece glow deşarjdan ark deşarja geçiş (HI) başlar. Glow deşarjdan elektriksel arka geçiş, yüksek erime noktalı ve anormal glow deşarj tarafından yüksek sıcaklıklara ısıtılabilen materyaller için düz ya da yavaşça değişen bir geçiş olabilir (HH'). Bu durum soğuk katot ark durumunda gözlenir. Dışarıdan ısıtılan katot ile ark deşarj durumunda ise glow deşarj bölgesi oluşmadan ark deşarja geçiş olur (AH'). Genelde ark deşarj, sıcak katot ark deşarj bölgesi (IK) şeklinde oluşur. Voltaj değeri, DC güç kaynağının iç direncine bağlı olarak bir (K) noktasına kadar önce azalır sonra yavaş yavaş artmaya başlar. (I) ile (K) arasında (J) noktasındaki yüksek akımlara ulaşmaya kadar voltaj azalırken akım artar ancak (J) noktasından sonra voltaj, akımın artmasıyla yavaşça artar. Bu değişim yine elektron emisyon mekanizmasının değişmesi sebebiyledir. (J) bölgesine kadar elektronlar termiyonik emisyon ile üretilirken, (J) noktasından sonra alan emisyonu ile üretilirler. Tungsten, molibden gibi erime sıcaklıkları yüksek ve zor eriyen metaller (refractory metals) için ark akımı katot üzerindeki çok sayıdaki spot tarafından sağlanır. (I) ile (J) arasındaki artan akımla voltajın azaldığı bölge elektron, iyon ve gazın sıcaklığının eşit olmadığı termal olmayan ark (non-thermal arc) rejimi, (J) ile (K) arasındaki pozitif eğimli bölge termal ark (thermal arc) rejimidir ve tüm türlerin sıcaklıklarının eşit olduğu termal denge halindeki plazmadır (Roth, 1995; Akan, 2003).

Elektrotlar arasına uygulanan voltajın miktarı, elektrotların cinsi ve gaz basıncına bağlı olan bu deşarj türlerinin her birinde plazma oluşum mekanizmaları da değişir. Elektrotlardan yayınlanan elektron (yayınlanma işlemine göre ikincil elektron emisyonu, termal emisyon ve alan emisyonu) plazmanın varlığını devam ettirmektedir. Bu işlemlerde

elektrot olarak kullanılan metal bir dielektrikle kaplanarak dielektrik bariyer deşarj (DBD) üretilir. Bu durumda elektrotlardan elektron emisyonu gerçekleşmezken sadece anot ve katot düşümleri ile plazma varlığını devam ettirir. Atmosferik basınç plazmaları, düşük basınç plazmalarından farklı olarak bir vakum odası, vakum ölçüm cihazları ve bir vakum odası kullanılmadan üretiltikleri için ekonomik olarak daha ucuz ve basit sistemler olmaktadır. Ancak atmosferik basınç plazmalarında daha yüksek voltaj güç kaynakları kullanılmaktadır. Yüksek basınçlarda çarpışma frekansını arttırmak için daha çok alternatif akım yüksek frekanslı güç kaynakları kullanılmaktadır. Bu nedenle atmosferik basınç plazmalarının oluşum mekanizmaları yukarıda açıklanan düşük basınç plazmalarından farklı olmaktadır. Bununla birlikte düşük basınçta oluşan gaz deşarj plazmalarındaki aydınlık ve karanlık bölgeler atmosferik basınçta oluşmaz.

Deşarj tüpü gibi cam ya da başka bir kapalı ortamda üretilen plazmalar düşük basınç plazmalarıdır. Bir vakum pompası ile deşarj tüpü içindeki basınç düşürülmektedir. Ancak bu tür kapalı ortamlarda üretilen plazmaların en belirgin karakteristiği **durağan** olmasıdır. Atmosferik basınçta da iki elektrot arasında duran bir gazdan oluşan plazma durağandır. Yani üretilen plazmanın elektrotlar arasında ve dolayısıyla kapalı ortamda olduğu gibi kalmasıdır. Burada kullanılan durağan ifadesi ile plazmanın bir katı gibi durduğu anlaşılmalıdır. Durağan plazmalarda elektrotlar arasındaki plazma içinde çok sayıda parçacık akışı ve parçacıklar arası reaksiyon sürekli olarak devam etmektedir. Ancak plazma yalnızca elektrotlar arasında kalmaktadır. Bununla birlikte gerek düşük basınçta gerekse atmosferik basınçta elektrotlar arasına gönderilen gaz sürekli akıtılabilir. Bu durumda elektrotlar arasına uygulanan potansiyel farkı ile deşarj oluşturulabilir. Bu şekilde oluşan deşarjlar “akan (flowing) deşarj” olarak adlandırılır. Akan deşarj; elektrotlar arasında gaz akışının olmadığı duruma göre son derece farklıdır. Elektrotlar arasında gazın sürekli aktığı durumda gaz içindeki iyonlaşma olayı tamamıyla değişmektedir. Bu durumda plazma içindeki iyonizasyon mekanizması değişmektedir ve sürekli akan nötral parçacıkların iyonlaşması ve uyarılması azalmaktadır. Bu nedenle katottan ikincil elektron ve termal emisyon miktarları azalmaktadır. Bununla birlikte plazma içi uyarılma sonucu oluşan fotonlar daha fazla iyonizasyona katkı sağlamaktadır. Akan deşarjlarda karanlık ve ışıdamalı bölgeler farklı yapıda oluşmaktadır.



Gaz deşarjların elektrotlar arasında akan gaz ile üretilip akan deşarj üretilmesinin yanında oluşan **plazmanın elektrotlar arasından çıkarılması** çok daha farklı bir işlemdir. Plazmaların üretildikleri kap içinden çıkarılması çok önemli bir gelişmedir. Aynı zamanda atmosferik ortamda elektrotlar arasında üretilen plazmanın, elektrotlar arasından çıkarılması çok daha önemli bir gelişmedir. Düşük basınçta plazma üretmek için 1000 - 2000 V elektrik voltajı uygulanırken yüksek basınçlarda 2 - 40 kV gibi yüksek voltajlar uygulanmaktadır. Plazma farklı materyaller üzerinde farklı etkiler yapmaktadır. Bu nedenle farklı amaçlar için kullanılmaktadır. Bu teknolojilerde uygulama yapılacak materyalin plazma ortamına sokulması gerekmektedir. Durağan plazmalarda bu aynı zamanda materyalin elektrotlar arasındaki yüksek voltaj içine de sokulmasıdır. Bu birçok uygulamada istenmeyen bir durum olabilir. Örneğin plazmaların malzeme üzerindeki bakterilerden sterilizasyon etkisi söz konusudur. Vücut içi kamera ve entegre devrelerin sterilizasyonu tıpta çokça istenmektedir. Çünkü üretimi maliyetli cihazlardır ve daha çok sayıda hastada kullanılmak istenmektedir. Bu tip elektronik cihazların yüksek ısı ile sterilizasyonu mümkün olmadığı gibi yüksek elektrik alan içinde de zarar görecektir. Ancak oda sıcaklığında plazmalar üretilip bunlar da elektrotlar arasından yani yüksek elektrik alan içinden çıkarılırsa elle dokunulabildiği gibi hassas materyaller üzerinde kullanımları da artırılabilir. Bununla birlikte vücut sıcaklığı civarındaki elektrotlar arasından uzaklaştırılmış plazmalar insan üzerinde dış, deri hatta damar ve diğer vücut içi uygulamalarında kullanılabilir.

Son 20 yıldır plazmalar **üretildikleri elektrotlar arasından çıkarılmaktadır**. Elektrotlar arasından uzaklaştırılan plazmalara en genel olarak “post-deşarj” veya “afterglow” ifadesi kullanılmaktadır. Ancak **atmosferik basınçta** elektrotlar arasından uzaklaştırılan plazmalara özel olarak “**plazma jet**” adı verilmektedir. Post-deşarjların oluşumu ve oluşum mekanizmalarının incelenmesi plazma fiziği açısından oldukça yenidir ve son dönemlerde gerçekleştirilen çalışmalar arasında yer almaktadır. Özellikle post-deşarj plazmaların oluşumu ve plazmanın sürekliliğini nasıl sağladığı olgusu halen anlaşılabilmiş değildir. Bununla birlikte söz konusu oluşum mekanizması için bazı modeller de geliştirilmiştir. Post-deşarj plazmalarının oluşum ve süreklilik mekanizmasına Bölüm 3’ te yer verilecektir.

Elektrotlar arasından çıkarılan post-deşarj plazmalar ilk olarak daha çok materyal teknolojisinde kesme-kaynak gibi işlemlerde kullanılan sıcak ark jetlerdir. Bu ark jetlerde

2000 - 3000 °C' den daha sıcak plazmalar atmosfer ortamına çıkarılmakta ve uygulama yapılacak materyal üzerine aktarılmaktadır. Ancak elektrotlar arasından çıkarılan post-deşarj plazmaların soğuk olması, özellikle oda sıcaklığı veya elle dokunulabilecek kadar soğuk olması, çığır açıcı bir gelişmedir. Soğuk plazmaların gram pozitif ve gram negatif bakteri, mantar, virüs, spor gibi farklı parazit ve patojen birçok mikroorganizmayı etkisiz hale getirici ve yok edici etkileri literatürde kanıtlanmıştır. Soğuk plazmalar oda sıcaklığı kadar düşük sıcaklıkta plazma ürettikleri için bakterilerin kendisine veya bakterilerin olduğu ortama sıcaklık etkisi aktarmamaktadırlar. Bu nedenle soğuk plazmalar ısıya hassas ortamların sterilizasyonunda önemli bir metot olmaktadır. Son yıllarda tıp biliminde kullanılan polimer tabanlı (çabuk eriyen) elektronik cihazların sterilizasyonu son derece önemlidir. Örneğin insan vücudu içinde hareket eden mikro kameralar, veya diğer pahalı tıbbi cihazlar bir hastada kullanıldıktan sonra diğer bir hasta üzerinde steril edilemediği için tekrar kullanılamamaktadır. Bu şekilde yüksek ısı fırınlarında steril edilemeyen pek çok tıbbi, askeri, biyomedikal cihazlar soğuk plazmalar ile steril edilebilmektedir. Öte yandan soğuk plazmaların canlı (ökaryot) hücreler üzerinde belirli bir doza kadar nekroz ve apoptozis yapmadığı gözlenmiştir. Bununla birlikte özellikle cilt üzerinde neredeyse hiçbir zararı bulunmamaktadır. Bu nedenle yukarıdaki bir çok bakteri insan üzerinde bulunduğu da steril edilebilir. Bu özellikle hastane, okul, kreş ve toplu taşıma araçlarında çok önemli bir uygulama olacaktır. Bununla birlikte yine üretilen plazma türü ve uygulama dozuna göre kan bankalarında depolanan kanlar ve insan vücudundaki kanın sterilizasyonu söz konusu olmaktadır. Organ naklinde kullanılan organların sterilizasyonu da benzer şekilde yapılabilir. Soğuk plazmalar diş çürüğü tedavisi, yara ve yanık tedavisi, cilt yenileme ve sivilce-leke temizleme, kan pıhtılaştırma ve yara kapatma işlemlerinde başarıyla uygulanmış ve uygulanmaktadır (Akan, 2014).

Atmosferik basınç plazma jetler özellikle oda sıcaklığı mertebesinde sıcaklıklarda üretildiğinde teknolojide yepyeni bir açılım yapmaktadır. Plazmaların bakteri sterilizasyonu ve canlı hücreler üzerine etkileri bilinmektedir. Bu etkileri ısı etkisi olmadan yapması çığır açııcıdır. Sterilizasyon teknolojileri açısından tıpta ısıya hassas bir çok materyal klasik yöntemlerle steril edilemezken, soğuk plazmalar ile herhangi bir kimyasal atık üretmeden kısa sürede sterilizasyon işlemi gerçekleştirilebilmektedir. Plazmaların ısıya hassas materyallerin sterilizasyonunda kullanımı artık teknolojide büyük ölçüde yer almaktadır. Ancak burada çığır açıcı olan plazmaların canlı özellikle insan üzerinde kullanımınıdır.

Genelde bir yüksek elektrik alan ile üretilen gaz deşarj plazmaları, iki elektrot arasında kalırken canlı ve insan üzerine uygulama yapabilmek mümkün değildir. Ancak **atmosfer ortamında plazmanın oda sıcaklığında ve elektrik alandan çıkarılması**, plazma jetlerin canlı ve insan üzerinde kullanımına neden olmuştur. Plazma jetler insan üzerinde sivilce tedavisi, diş çürüğü tedavisi, kırışıklık tedavisi, kahverengi leke tedavisi, vücut içi bölgesel iltihap tedavisi, kan ve organ nakli sterilizasyonu gibi son derece farklı uygulamalarda kullanılmaktadır. Materyal teknolojisinde de özellikle ısıya hassas materyallerin yüzey özelliklerinin iyileştirilmesinde kullanılmaktadır. Örneğin otomobil ve tekstil sektöründe boya ve yapıştırma işlemi öncesi polimer yüzeylerin yüzey gerilimlerinin artırılması işlemlerinde soğuk atmosferik basınç plazma jetler kullanılmaktadır.

Post-deşarj plazmaların özellikle atmosferik basınçta üretilen post-deşarj plazmaların kolayca taşınabilmesi ve istenilen yüzeye doğrudan ısı etkisi üretmeden kullanılabilmesi gelecekte teknolojiye çok daha fazla yer bulacağı gözükmektedir. Ancak post-deşarj plazmaların fiziğinin anlaşılması oldukça zordur. Çünkü post-deşarj plazmalarda; plazma sürekli akmaktadır. Bununla birlikte post-deşarj plazma bir elektrik alan içinde bulunmadığı için iyonizasyon ve plazma varoluş mekanizmaları tamamıyla klasik durağan gaz deşarjlardan çok farklı olmaktadır. Post-deşarj plazmaların iyonizasyon ve kendini devam ettirici mekanizmaları birkaç teori ortaya atılmasına rağmen henüz tam olarak anlaşılammıştır. Bu nedenle post-deşarj plazmaların yapılarının araştırılması ve anlaşılması, teknolojiye son derece yaygın kullanılması nedeniyle, uygulayıcının ön bilgi edinmesi açısından da son derece önemlidir. Post-deşarj plazmalar farklı bölgelerde farklı parçacık türleri barındırmaktadır. Bu farklı parçacık türleri farklı uygulamalarda avantaj ya da dezavantaj sağlayabilmektedir. Örneğin radikal oksijen post-deşarj plazmanın belirli bir bölgesinde var olabilmektedir. Diğer radikal parçacıklar veya metastable parçacıklar için de benzer durum geçerlidir. Bu parçacıkların yaşam sürelerinin farklı olması, post-deşarj plazma içerisindeki reaksiyon zincirleriyle ilgilidir. Herhangi bir radikal parçacık bir uygulamada avantaj olabilirken diğer bir uygulamada dezavantaj olabilir. Bu nedenle uygulayıcı hangi parçacık türü kendisi için avantaj oluşturuyorsa, uygulama yapacağı numuneyi post-deşarj plazmanın o bölgesine yerleştirir. Bu nedenle post-deşarj plazmanın hangi bölgesinde hangi parçacık türünün olduğunun tespiti uygulama açısından önemlidir. Ayrıca gaz akış hızı, uygulama voltajı ve frekansı gibi parametrelerle bu parçacık türleri

kontrol edilebilirse uygulayıcı istediği miktarda parçacık türünü numunesi üzerine aktarabilir.

Bu tez çalışmasının temel amacı; hem düşük basınçta hem de atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazmaların üretiminin yapılacağı reaktörlerin tasarlanması, imal edilmesi ve bu reaktörlerde üretilen düşük basınç ve atmosferik basınç soğuk akan post-deşarj plazmaların optik emisyonlarının incelenmesidir. Öncelikli olarak düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazmaları argon, helyum, oksijen ve atmosferik hava gazları için üretilecektir. AC voltaj kullanılarak bu gazlarındeşarj ve post-deşarjları üretilecektir. Üretilendeşarj ve post-deşarjlar içerdikleri yapıların anlaşılabilmesi bakımından optik emisyon spektroskopisi (OES) ile incelenecektir. Bununla birlikte plazma üretimindeki en önemli parametrelerden biri olan gaz akış hızının düşük basınç soğuk akan post-deşarj plazma yapısındaki değişimleri incelenecektir. İkinci olarak atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma (plazma jet) üretim reaktörü imal edilecektir. Elektro-kimyasal yöntemle sivriltilmiş tungsten iğne elektrot kullanılarak oluşturulan atmosferik basınç soğuk akan post-deşarj plazma reaktöründe helyum ve argon gazı post-deşarj plazmaları (plazma jet) üretilecektir. Üretilen atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazmalar (plazma jet), içerdikleri yapıların anlaşılabilmesi bakımından optik emisyon spektroskopisi (OES) ile incelenecektir. Farklı gazların aynı reaktörde ürettiği atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma yapıları optik özellikleri bakımından karakterize edilecektir. Kullanılan güç kaynağının voltaj ve frekans değişimlerinin atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazmaların (plazma jet) yapısında nasıl bir değişim yaptığı da belirlenecektir. Aynı zamanda atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazmada (plazma jet) gaz akış hızının post-deşarj plazma yapısını nasıl değiştirdiği de incelenecektir. Burada özellikle post-deşarj plazmanın optimum üretim koşulları ve fiziksel boyutlarının nasıl değiştiği ortaya konacaktır. Gerek düşük basınçta gerekse atmosferik basınçta üretilen soğuk akan post-deşarj plazmaların yapılarının tanımlanması adına elde edilen spektroskopik veriler yorumlanarak, soğuk akan post-deşarj fiziğine elde edilen veriler ışığında olası yorum ve model geliştirmesi önerilecektir.

Post-deşarj plazma reaktörlerinin tasarımı, üretimi ve oluşturulan post-deşarj plazmaların optik karakterizasyonlarının hem düşük hem de atmosferik basınçta karşılaştırmalı olarak belirlenmesi, kHz mertebesindeki alternatif akım güç kaynakları ile

post-deşarj plazmaların üretimi, etkileşen post-deşarj plazmaların düşük basınçlarda incelenmesi ve atmosferik basınçta optik emisyon spektrumlarından elde edilen atom/molekül/radikal ışınım konsantrasyonlarının gaz akış hızlarına bağlı değişimlerinin incelenmesi konularında eksikliklerin bulunduğu ve daha önce bu konularda çalışmaların gerçekleştirilmemiş olması sebebiyle bu tez çalışmasını orijinal yapan ve literatürde ilk kez kHz güç kaynakları ile hem düşük hem de atmosferik basınçta post-deşarj plazma üretimi gerçekleştirilecektir. Öte yandan düşük basınçta farklı gaz türleri ile post-deşarj plazmalar oluşturularak bir etkileşim odasında etkileşimleri optik açıdan incelenecektir. Ayrıca atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörünün tasarlanarak imal edilmesi ve çalışır hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Farklı gaz türleri için atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma eldesi sonucu oluşturulan plazmanın gaz akış hızına ve gaz türüne bağlı olarak fiziksel boyutlarının değişimleri incelenecektir. Atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma içerisindeki molekül, radikal ve iyon ışınım konsantrasyonlarının gaz akış hızına bağlı olarak değişimleri belirlenecektir. Genelde spektroskopik çalışmalar post-deşarj plazmalarda bütüncül olurken bu çalışmanın atmosferik basınçta üretim kısmında özel dalgaboylarının yani özel (radikal, molekül ve iyonlar) parçacıklara karşılık gelen dalgaboylarının değişimleri incelenecektir. Ar ve He gazları ile üretilen plazma jetinde NO, OH radikalleri, N<sub>2</sub> molekülleri ve N<sub>2</sub><sup>+</sup> iyonlarının gaz akış hızı değişiminde nasıl değişim gösterdiği belirlenecektir. Böylece plazma jet içerisinde özel olarak ilgilenilen parçacıkların değişimi ve dolayısıyla plazma jet içi reaksiyonlar incelenecektir. Bu konu hem gelecekte yapılabilecek post-deşarj plazma fiziği uygulamalarında, hem de post-deşarj fiziğinin anlaşılabilmesi bakımından büyük önem arz etmektedir.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Plazmada kollektif davranış gösteren parçacıklar sürekli olarak hareket halinde ve etkileşim içerisinde bulduklarından, plazma içerisinde enerji iletilirken bir dizi çarpışmalara maruz kalırlar. Her bir parçacık ailesi, çoğu zaman, çevrimsel enerjisine ilişkin bir sıcaklık ile karakterizedir. Plazma biliminde, parçacıkların sıcaklığı genellikle elektron volt (eV) birimi cinsinden ifade edilir ve bir dönüşüm faktörü kullanılarak sıcaklık Kelvin cinsinden belirlenebilir. Plazmayı oluşturan parçacıklar için, sıcaklık açısından potansiyel farklılıklara bağlı olarak, termal dengede ve termal dengede olmayan plazmalar olmak üzere iki ana sınıflandırma yapılabilmektedir (Grill, 1993). Birinci durumda, plazma içerisinde yer alan tüm parçacıkların sıcaklıkları birbirine eşittir. Buna karşılık, termal dengede olmayan plazmalar için elektron sıcaklığı, elektronun kütlesine kıyasla ağır parçacıklar olan iyonlar ve nötr atomların sıcaklığından oldukça yüksektir. Sonuç olarak, elektron sıcaklığı 1 - 10 eV değerleri arasında iken, iyon ve nötr atom sıcaklıkları oda sıcaklığına ( $0,025 \text{ eV} = 298 \text{ K}$ ) yakındır. Bu nedenle bu tür plazmalara genellikle soğuk plazmalar denir (Baumjohann ve Treumann, 1996; Dean, 2005; Fridman, 2008; Franz, 2009; Ochkin, 2009; Bonitz vd., 2010). Literatürde sıcak ve soğuk plazma kavramları, plazma içerisinde yer alan parçacık türlerinin sahip oldukları sıcaklıkların karşılaştırılması şeklinde tanımlanmaktadır. Soğuk plazma ifadesi parçacıklar arasındaki göreceli sıcaklık kıyaslamasına karşılık gelmektedir. Non-LTD plazmalarda elektron sıcaklığı ve ağır parçacıkların sıcaklığı şeklinde iki farklı sıcaklık modeli tanımlanmaktadır (Tendero vd., 2006). Elektron kütlesine kıyasla oldukça ağır kütleli parçacıklar (iyonlar) plazmanın sıcaklığını belirlemede etkin rol oynamaktadırlar. Plazmalarda elektron sıcaklığının hesaplaması işlemi için plazma içerisinde yer alan bir atom ya da molekülün optik emisyon spektrumlarındaki belirli dalgalardan elde edilen pikler ve bu pik değerlerine ait şiddet değerleri kullanılmaktadır. Bu sayede üretilen plazmada elektron sıcaklığı hesaplanabilmektedir. Uyarılmış türlerin kullanıldığı hesaplamalarda soğuk plazmaların gaz sıcaklığının 300 - 1175 K, elektron sıcaklığının ise  $10^3 - 10^5 \text{ K}$  sıcaklık değerleri arasında olabildiği görülmektedir (Tendero vd., 2006; Lo vd., 2014; Xu ve Doyle, 2016). Soğuk plazmalarda elektron sıcaklığı değeri optik emisyon ölçümü alınan noktanın değişimine göre de farklılık göstermekte olup, bu tip plazmalarda gaz sıcaklığı değeri genellikle oda sıcaklığındadır (Kolb vd., 2008; Lu vd., 2008; Pérez-Ruiz vd., 2012). Soğuk plazmalarda elektron

sıcaklığının yüksek olmasına rağmen düşük yoğunluk ve ısı kapasitesi, plazmayı çevreleyen yüzeylerin nispeten düşük sıcaklıklarda kalmasına izin vermektedir (Grill, 1993). Bu önemli özelliği sebebiyle sıcaklık etkisi ile negatif olarak etkileşen hassas materyallerin soğuk plazmalar kullanılarak işlenebilmesi ve oluşturulabilmesi, medikal anlamda canlı doku ve hücreler üzerine uygulamaların gerçekleştirilebilmesi mümkün olmaktadır (Vesel vd., 2014). Ayrıca soğuk plazmalar teknolojide; metalik yüzeylerin geometrik şekillerindeki esneklik özelliklerinin değiştirilmesinde (esneklik kazandırma ve ya sertleştirme), yüzeylerin gerilimi ve adezyon kuvvetlerinin artırılmasında, yüzey temizleme işlemlerinde, yüzey kaplama işlemlerinde, ince film üretiminde, polimer yapıların üretilmesi ve geliştirilmesinde, yapılar üzerinde elektriksel olarak iletken katmanların oluşturulmasında, polimer yüzeylerin aşındırılarak yüzey üzerinde pürüzlü veya şekilli özel yüzeylerin oluşturulmasında, metal destekli aktif katalizörlerin oluşturulmasında, nanomateryal sentezinde, metan ve oksijen karışımından metanol üretiminde, ozon üretiminde ve gaz sentezinde, zararlı gazların etkilerinin ortadan kaldırılmasında, reaktif türlerin elde edilebilmesi sonucu yüzeyler üzerinde bulunabilen bakteri türlerinin sterilizasyonu işlemlerinde, medikal alanda hücre ya da dokular üzerine uygulanarak kanın pıhtılaştırılmasında ve hatta kanser tedavisi gibi önemli alanlarda oldukça tercih edilen yöntemler arasında yer almaktadırlar (Boutonnet Kizling ve Järås, 1996; Moisan vd., 2001; Bogaerts vd., 2002; Laroussi, 2002; Liu vd., 2002; Denes ve Manolache, 2004; Anders, 2005; Laroussi, 2005; Tendero vd., 2006; Stoffels vd., 2008; Bárdos ve Baránková, 2010; Keidar vd., 2011).

Plazmaların kapalı bir vakum odasında üretilmeleri işleminde, ortamda bulunan yabancı gazların uzaklaştırılabilmesi için, ortamın sürekli olarak bir vakum pompası yardımıyla vakumlanması gerekmektedir. Vakumlama işlemi sonrasında vakum pompası kapatılarak, vakum odası içerisine plazması üretilecek herhangi bir gaz hapsedilebilir. Hapsedilen gazın bulunduğu vakum odasındaki elektrotlar arasına yüksek voltaj uygulandığında, o gazın “**durağan plazması**” elde edilebilmektedir. Eğer üretim işlemi sırasında vakum pompası sürekli olarak çalışıyor vaziyette iken, reaktör içerisine belirli akış hızlarında herhangi bir gaz gönderilir ve elektrotlar arasına yüksek voltaj uygulanırsa, bu durumda reaktörde oluşturulan plazmalara “**akan plazmalar**” adı verilmektedir (Ricard, 2003). Atmosferik basınç plazmalar için de benzer durum geçerlidir. Atmosfer ortamında reaktör içerisine gaz girişi kesintisiz olarak gönderildiği süre içerisinde elektrotlar

arasına yüksek voltaj uygulanırsa, gaz deşarj oluşumu gerçekleşmektedir. Reaktöre gönderilen gaz kesildiğinde atmosfer basıncında plazma oluşumu gözlemlenemez. Bu sebeple reaktör içerisinde sürekli bir gaz akışının bulunması gerekmektedir. Gaz akışı sürekli olduğunda, oluşan plazmalar durağan değil, atmosferik basınçta akan plazmalardır (Gougoussi vd., 1997; Levaton vd., 2002; Shelley vd., 2011). Durağan plazmalarda plazma içi reaksiyonlarda elektrotların etkisi önemlidir. Ancak akan plazmalarda daha çok plazma içi reaksiyonlar plazmanın sürekliliğini sağlamaktadır. Bu nedenle durağan plazmalar ile akan plazmaların, plazmanın devamlılığını sağlayan plazma içi reaksiyonları tümüyle farklıdır. Durağan plazmalarda plazma içerisinde sabit bölgeler oluşurken, akan plazmalarda kullanılan gaz türüne ve reaktör tasarımına da bağlı olarak tamamıyla değişken bölgeler oluşur. Ayrıca akan plazmalarda plazma içi homojenliğin bozulduğu daha fazla bölge bulunur.

Plazmalar, üretim yöntemlerine ve oluşturulma koşullarına göre farklı sınıflara ayrılabilirler gibi, reaktör içerisinde üretildikleri bölgelere göre de incelenmektedirler. İletken elektrotlar arasında oluşan plazmalar deşarj plazmaları olarak adlandırılmakta iken, elektrotlar arasından çıkarılan plazmalar “post-deşarj” plazmaları olarak adlandırılmaktadır (Ricard vd., 2008 a). Yani üretilen plazmanın post-deşarj plazması olarak adlandırılabilmesi için, üretildiği elektrotlar arasından tümüyle çıkarılmış olması gerekmektedir. Başka bir deyişle, üretilen plazmaların elektrotlar arasındaki yüksek voltaj bölgesinden uzaklaştırılması sonucu post-deşarj plazmaları elde edilir. Elektrotlar arasından çıkarılan post-deşarj plazmaların, deşarj plazmalara kıyasla, önemli avantajları vardır. Post-deşarj plazmalarda, deşarj plazmalardaki gibi elektrotlar arasında var olan yüksek elektrik alan yoktur. Bununla birlikte yüksek enerjili iyonlar da post-deşarj plazmalarda yoktur. Yüksek elektrik alan kullanıcı için tehlikeler yaratırken, yüksek enerjili iyonlar da uygulamanın yapıldığı yüzeye istenilmeyen zararlar verebilmektedir. Post-deşarj plazmaların oluşturulmasında kullanılan reaktörler ile post-deşarj plazma oluşum süreçlerinin genel hatlarına Bölüm 3’ te detaylı bir şekilde değinilecektir.

Post-deşarj plazmaları, üretildikleri ortamın basıncına göre düşük basınç post-deşarj plazmaları ve atmosferik basınç post-deşarj plazmaları (plazma jet) olarak iki farklı türde inceleyebilmek mümkündür. Atmosferik basınçta üretilen post-deşarj plazmaları ile düşük basınçta üretilen post-deşarj plazmaları arasındaki önemli fark, ürettikleri parçacık



yoğunluklarıdır. Kullanım amacına göre avantaj ve dezavantajları vardır. Örneğin düşük basınçta post-deşarj plazmalar, vakum ultraviyole ürettiği için bakteri sterilizasyonunda daha kısa zamanda ölümler yapmaktadır. Gerek atmosferik basınçta gerekse düşük basınçta üretilen post-deşarj plazmaların sıcaklık etkisi, elektrik alan etkisi ve yüksek enerjili iyon etkisi minimize edilmiş olmaktadır. Post-deşarj plazmalarda daha çok soğuk plazmaların aktif radikal (reaktif) parçacık ve ultraviyole etkisi kullanılmaktadır. Her iki etki, spektroskopik çalışmalarla tespit edilebilmektedir.

Post-deşarj plazmaların üretimi esnasında kullanılan güç kaynakları, üretilen plazmanın fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan değiştirebilme özelliğine sahiptir. Bu sebeple üretilen plazmaları, üretildikleri güç kaynaklarına göre sınıflandırabilmek te mümkündür. Post-deşarj plazma üretiminde yüksek voltaj değerlerinde doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) ile radyo frekans (RF) ve mikrodalga (MW) gibi çeşitli güç kaynakları kullanılmaktadır. DC elektrik voltajı ile hem düşük hem de atmosferik basınçta post -deşarj plazma üretilmek istendiğinde, yüksek akım çeken ve bununla birlikte görece daha sıcak plazmalar olan arkdeşarlara geçişler söz konusu olabilmektedir. Oluşan böyle bir problemin giderilmesi için ya katot elektrotunu oluşturan metalin dielektrik bir malzeme ile kaplanması ya da DC güç kaynağı yerine puls DC voltajı üreten bir güç kaynağı kullanılması gerekmektedir. Böylece katot yüzeyinde oluşabilecek ikincil elektron emisyonu ve termal emisyonu etkilerinin önüne geçilebilmesi mümkün olmaktadır. Kullanılan güç kaynağının türüne bağlı olarak üretilen plazmalar literatürde doğru akım (DC), atmalı doğru akım (puls DC), alternatif akım (AC), atmalı alternatif akım (puls AC), radyo frekans (RF) ve mikrodalga (MW) post-deşarj plazmaları olarak isimlendirilmektedir (Laroussi ve Akan, 2007).

Post-deşarj plazma üretimi için oluşturulan reaktörlerde, bir ya da iki adet elektrot ile oluşturulan tasarımların yer aldığı görülmektedir. Bu elektrotların sayısına göre post-deşarj plazma reaktörleri tek (single) elektrot olarak isimlendirilebildiği gibi ikili elektrot yapısı ile de pek çok farklı şekilde üretilmekte ve farklı isimler alabilmektedir. Bunları tek çubuk elektrot, iğne elektrot, iğne katot silindirik anot, çubuk-yüzük elektrot, çift yüzük elektrot, çift metal elektrot ve düzlem elektrot şeklinde sınıflandırabilmek de mümkündür (Dallı, 2013). Bu sınıflandırmada kullanılan elektrotların şekilsel görünümü, genellikle elektrot tasarımının adını oluşturmaktadır. Çalışma basıncına, kullanılan güç kaynağına ve

elektrot tasarımına göre farklı sınıflandırmaları bulunan post-deşarj plazmalar, ayrıca reaktörde kullanılan gaz türüne göre Ar, H, He, Ne, N<sub>2</sub>, vb. post-deşarj plazmaları olarak da sınıflandırılmaktadırlar. Reaktör içerisinde tek tip gazın post-deşarj plazmasının üretilmediği gibi, belirli oranlarda farklı gaz karışımlarının da kullanılabilmesi mümkündür.

Üretim yöntemlerine göre birçok farklı üretim tekniği bulunan post-deşarj plazmaların teknolojiye çok çeşitli alanlarda aktif ve etkin bir şekilde kullanımı söz konusudur. Literatürde soğuk akan post-deşarj plazmaların elektriksel ve optik karakterizasyonlarının gerçekleştirildiği çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalar, hem atmosfer basıncında hem de düşük basınçta elde edilen plazmaların özelliklerinin belirlenmesinde büyük önem taşımaktadır. Örneğin düşük basınçlarda üretilen plazmaların bazı parametrelerinin tayin edilebilmesi için en basit yöntem olan “Langmuir prop yöntemi” kullanılmaktadır. Bu yöntem sayesinde, plazma içerisindeki elektron sıcaklığı ve elektron yoğunluğu gibi parametreler belirlenebilmektedir. Ancak bu methodda prop olarak kullanılan bir elektrot, plazmanın üretildiği kısım içerisinde yer aldığından ve proplar arasına belirli bir potansiyel fark uygulandığından dolayı, üretilen plazmayı pertürbe etmektedir. Üretilen plazmanın özelliklerini korumak adına, plazma üzerinden alınacak optik emisyon spektrumlarından benzer parametreleri elde edebilmek de mümkündür (Zhu ve Pu, 2007). Böylece üretilen plazmaların pertürbe edilmesi önlenmektedir. “Boltzmann grafik yöntemi” olarak adlandırılan bu yöntemde, seçilen bazı dalgaboylarının göreceli şiddet değerlerinden yararlanarak elektron sıcaklığı ve elektron yoğunluğunu belirleyebilmek mümkündür (Mitic vd., 2010). Elde edilen post-deşarj plazmaların karakterizasyonu sonucunda üretilen reaktörlerin teknolojinin hangi alanlarında kullanılacağı ya da post-deşarj plazma içerisinde hangi türde atom, molekül ve radikallerin oluşabileceği bilgilerine de ulaşabilmek mümkün olmaktadır.

Öte yandan atmosferik basınçta oluşturulan plazma jet üretiminde kullanılan reaktörlerde genellikle alternatif akım (AC), radyo frekans (RF) ya da mikrodalga (MW) güç kaynakları kullanılmaktadır. Bu seçim, yapılacak uygulamanın türüne göre değişim gösterebilmektedir. Örneğin plazma jet reaktörlerinde tungsten, poliimid, tantal ve silikon dioksit gibi materyallerde aşındırma çalışmaları seçilecek güç kaynağının özelliğine bağlı olarak gerçekleştirilebilmektedir (Jeong vd., 1998). Plazma ile yüzey aktifleştirme çalışmalarında ise, günümüzde taşınabilirliğinin kolay olması ve maliyetinin düşük basınçta

üretilen reaktörlere göre oldukça ekonomik olması sebebiyle atmosferik basınç plazma jetler kullanılmaya başlanmıştır (Sherman vd., 1994). Özel bir uygulama olarak, güneş panellerinde kullanılan CdS (Kadmiyum sülfür) ince filmlerin yüzey temizleme işlemlerinin gerçekleştirilmesi ve adezyon özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla atmosferik basınç plazma jet reaktörlerine benzer tipteki reaktörler kullanılmaktadır (Lisco vd., 2017). Bu tipteki reaktörlerde genellikle halka biçimli tasarımlara sahip yüksek voltaj elektrotları tercih edilmektedir. Toprak elektrotu ise genellikle, plazmanın uygulaması gerçekleştirilecek malzemeye yönlendirilebilmesi için, malzemenin alt kısmına yerleştirilmesiyle oluşturulmaktadır. Reaktörün sahip olduğu yüksek voltaj ve oluşabilecek sıcaklıklara karşı bu tip reaktörler seramik borular içerisine yerleştirilmektedir. Gaz yollarının tasarımlarında ise kuvars ya da borosilikat malzemedan üretilmiş cam borular tercih edilmektedir.

Plazma teknolojilerinin geliştirilmesi sürecinde plazma kimyası, üretilen post-deşarj plazmaların temel karakteristiklerinin belirlenebilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Plazma kimyasında genellikle kuru, temiz ve yanıcı olmayan bir gaz olması sebebiyle azot gazı ve gaz karışımları kullanılmaktadır. Gaz karışımlarını kullanarak post-deşarj plazma ortamında yeni reaksiyonların oluşturulmaya çalışıldığı bu alanda, elektriksel özellikleri belirlenmiş reaktörlerdeki plazma ortamında, kimyasal süreçler sonucunda ortamda bulunmayan bazı moleküllerin sentezi ( $\text{NO}$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{HNO}_x$  ( $x = 1 - 3$ ), vb.) de gerçekleştirilebilmektedir (Moissev vd., 2014; Ricard vd., 2015). Öte yandan post-deşarj plazma içerisinde oluşturulan aktif radikaller ( $\text{NO}$ ,  $\text{OH}$ ,  $\text{O}$  vb.) ve türevleri ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ,  $\text{ONO}_2\text{H}$ ,  $\text{NO}_3\text{H}$  vb.) sayesinde kimyasal sıvı organik bileşiklerin rafine edilebilmesi işlemleri de plazma kimyasında sıklıkla çalışılan konular arasında yer almaktadır (Mountapbeme-Kouotou vd., 2013).

Öte yandan atmosferik basınçta üretimi gerçekleştirilen soğuk akan post-deşarj plazmaların önemli tasarımlarından biri olan plazma torch (fener) adı ilk kez Koinuma vd. (1992) tarafından yapılan çalışmalar sonucu literatüre kazandırılmıştır. Bu tipteki reaktörler, genel görünümü itibarıyla bir fenerin görünümünü andırıldığından, bu isimle literatürde kendine yer edinmiştir. Reaktörün oluşturulması işleminde kesit alanı oldukça küçük olan iğne tipte elektrotlar güç elektrotu olarak tercih edilmektedir. Isınma probleminin önlenmesi amacıyla elektrotlar arasına dielektrik malzeme yerleştirilmektedir. Bu sebeple soğuk plazma torchlar, DBD reaktörleri tasarımıyla da

benzerlik göstermektedir. Bu isimle anılan reaktörlerde RF güç kaynakları ve genellikle kuvars cam borular kullanılmaktadır. Literatürde güncel olarak kullanılan reaktör tiplerinden biri olan soğuk plazma torch' ların uygulama alanları oldukça geniştir. Plazmanın önemli bir alanını teşkil eden medikal plazmalarda bu ve buna benzer reaktör tipleri sıklıkla kullanılmaktadır (Laroussi vd., 2008; Akan ve Çabuk, 2014). Örneğin tıpta kullanılan damar içinde hareket eden hassas mikro kameralar, sıcaklık etkisi ile sterilize edilememektedir. Bu sebeple soğuk plazmaların sterilizasyon uygulamalarında kullanımı son yıllarda oldukça yaygındır. Bu tip polimer tabanlı ve elektronik cihazlar elektrotlar arasında üretilen plazmanın yüksek voltajından etkilenerek zarar görmektedir ve hatta kullanılamaz hale gelmektedirler. Bu nedenle soğuk plazmanın elektrotlar arasından çıkarılarak numune üzerine uygulanması ile özellikle elektronik materyallere zarar vermeden sterilizasyon işleminin gerçekleştirilebilmesi sağlanmaktadır. Ayrıca sıcaklık etkisine karşı duyarlı biyolojik sistemlerin bu etkiye maruz kalması plazmalar ile önlenerek, ziraat alanında yeni uygulama alanları ortaya çıkarmıştır. Post-deşarj plazmaların bitkiler ve temel besinler üzerinde oluşabilen patojenik bakterilerin olumsuz etkilerinin ortadan kaldırılması, gıda bileşenlerinin herhangi bir katkı maddesi kullanılmaksızın kalitesinin artırılması, sebze, meyve, süt vb. sıvı gıdaların sterilize edilmesi, fidelerin kuraklık stresinin neden olduğu hasara karşı çimlenmeyi artırmak ve fideyi korumak gibi pek çok uygulamaları bulunmaktadır (Misra vd., 2011; Surowsky vd., 2011; Gurol vd., 2012; Mráz vd., 2014; Ma ve Lan, 2015; Ling vd., 2015).

Post-deşarj plazmaların bir diğer kullanım alanı tekstil olup, bu alanda gerçekleştirilmiş pek çok çalışma yer almaktadır. Plazma jet ile yüzey modifikasyonu işlemlerinde su ve kimyasalların kullanımı gerekmediğinden, diğer yöntemlere göre daha ekonomik ve çevresel açıdan daha kullanışlı bir yöntemdir. Bu süreçlerinin tekstil alanındaki en önemli avantajı, yüzey modifikasyonu işlemlerinde kullanılan kirletici ve zararlı atıkların ortadan kaldırılması sonucu bu alanlarda çalışan insanların sağlığının korunmasıdır. Bu sayede tekstil alanında çalışan personelde meslek hastalıkları oluşumu büyük oranda önlenebileceğinden, iş gücü kaybına bağlı üretim maliyetlerinin artmasının da önüne geçilebilecektir. Bu yüzden post-deşarj plazmalar çevreye zarar vermeyen bir teknoloji olarak düşünülebilir. Literatürde kumaş yüzey gerilimlerinin ve sıvı temas açılarının artırılması, anti-mikrobiyal özelliklerinin geliştirilmesi, tekstil malzemesi üzerine baskı yapılabilmesi, malzemeye hidrofilik (suyu çeken) - hidrofobik (suyu iten) ve

süperhidrofobik (su tutmayan) özellikler kazandırılması gibi sonuçların elde edildiği çalışmalar yer almaktadır (Poll vd., 2001; Höcker, 2002; Canal vd., 2008; Morent vd., 2008; Navaneetha Pandiyaraj ve Selvarajan, 2008; Sousa vd., 2016).

Post-deşarj plazmaların optik karakteristiklerinin ortaya konması işlemleri farklı gaz/gaz karışımları için literatürde gerçekleştirilmiş olup, güncel olarak çalışılan önemli konular arasında da yer almaktadır. Bu alanda farklı gaz karışımları ve farklı güç kaynakları kullanılarak oluşturulan akan post-deşarj plazmaların erken post-deşarj bölgeleri üzerinden alınan spektrumlar yardımıyla optik karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmekte ve erken post-deşarj bölgesinden elde edilen bant şiddetlerinden yararlanılarak radikal atom ve molekül yoğunlukları belirlenmektedir (Bockel vd., 1996; Czerwec vd., 1998; Zerrouki vd., 2014; Ricard vd., 2015). Post-deşarj plazma üretiminde kullanılan güç kaynakları değiştirilerek, farklı gaz karışımlarından oluşturulan post-deşarj plazmaların oksijen gazı karışım oranına göre değişimlerinin incelendiği spektroskopik çalışmalar da yer almaktadır (Ricard vd., 2003; Dufour vd., 2012). OES çalışmalarında gaz karışımları kullanılabilirdiği gibi, tek bir gaz türü kullanılarak optik karakterizasyonların incelenmesi işlemleri de gerçekleştirilmiştir (Ricard vd., 1998; Ricard vd., 2008 b; Es-sebbar vd., 2009; Levaton vd., 2012; Levaton ve Amorim, 2014; Tanisli ve Sahin, 2016; Chen ve Li, 2017). Üretilen post-deşarj plazmaların farklı katot materyalleri üzerine gönderilerek elde edilen optik emisyonlarının incelendiği çalışmalar literatürde yer almaktadır (Lefèvre vd., 2000; Apetrei vd., 2006; Ricard, 2006). Post-deşarj plazmaların üretildikleri reaktörün iç bölgesi ve plazmanın atmosfer ortamına çıkan bölgesinin dış bölge olarak adlandırıldığı başka bir çalışmada ise H, OH ve O radikallerinin plazma ortamında bulunan su buharı içerisindeki reaktiflikleri OES yardımıyla incelenmiştir (Collette vd., 2016).

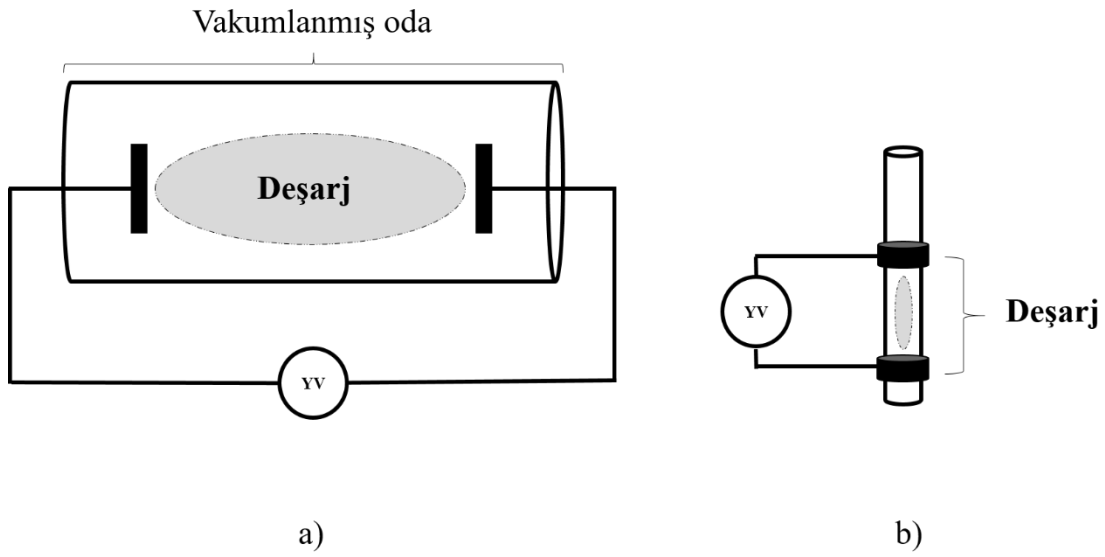
Post deşarj plazmalarla çalışmanın başlıca avantajları aşağıdaki gibi özetlenebilir (Moisan vd., 2001):

- i.** Puls mekanizmasının bulunmadığı mikrodalgalar ile üretilen yüksek yoğunluklu plazmalarda, deşarj plazmanın sıcaklığı birkaç yüz dereceye karşılık gelirken, post-deşarj plazmalarda 50 °C' den daha düşük sıcaklıklarda plazma üretimi sağlanabilmektedir. Bu ise ısıya duyarlı malzemeler ile yapılacak çalışmalar için son derece önemlidir.
- ii.** Doğrudan plazmanın uygulanmasında, uygulanan yüzeylerin plazma kılıfı içinde hızlanan pozitif iyonların etkisi ile deşirme şansı vardır. Kılıf, iyon yoğunluğunun elektron yoğunluğunu aştığı plazma ile uygulama yapılan yüzey arasında oluşan ara yüzey bölgesidir. Plazma içerisinde ise iyon ve elektron yoğunlukları birbirine eşittir. Nötralitenin sağlandığı bu durum plazma ile yüzey arasındaki potansiyel farktan kaynaklanmaktadır. Bu da iyonları uygulama yüzeyine doğru hızlandıracaktır. Post-deşarj plazmalarda ise plazma kılıfı yoktur.
- iii.** Son zamanlarda elde edilen sonuçlara göre, nötr türlerin sterilizasyon süreçlerinde önemli rol oynadığı görülmüştür (Khomich, 1997). Bu sebeple deşarj bölgesi içerisinde uygulamaların gerçekleştirilmesine gerek yoktur.
- iv.** Plazma oluşumunun devamlılığını sağlayan elektrik alanın uygulama bölgesinde dielektrik olmayan bazı hassas cihazların bulunması, cihazların lokal ya da tümüyle ısınmasını tetikleyebilmekte ve dolayısıyla onlara zarar verebilmektedir. Post-deşarj plazmalarda ise elektrik alan etkisi yoktur.
- v.** Post-deşarj plazmalar deşarj plazmalara göre daha düşük maliyetlerle üretilebilir ve daha büyük odalarda oluşturulabilirler. Ancak deşarj bölgesindeki sterilizasyon çalışmaları post-deşarj bölgesine göre daha kısa sterilizasyon zamanlarında gerçekleşebilmektedir. Gerek deşarj gerekse post-deşarj plazmaların oluşturulduğu çalışmalarda sterilize edilecek cihazların tüm kısımlarına aktif türlerin ulaştırılması gerektiği bilinmelidir.

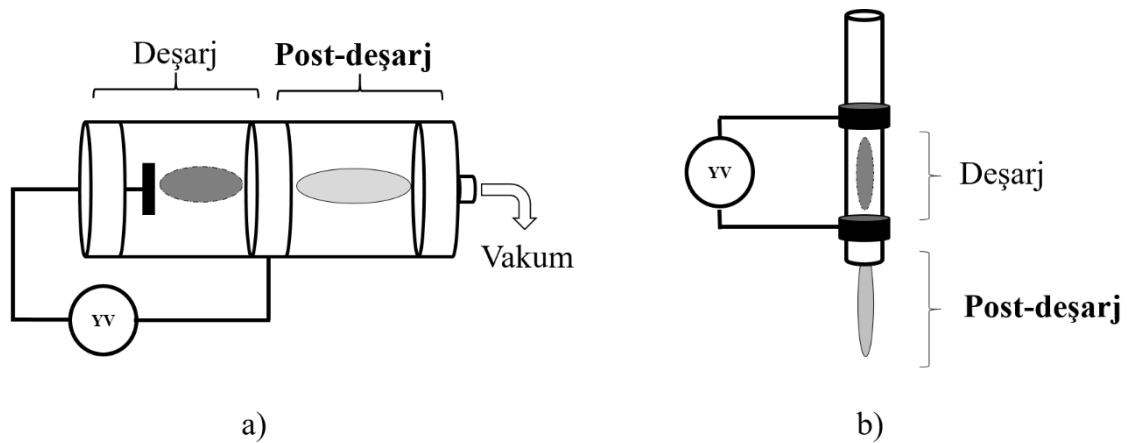
Literatür araştırması sonuçlarına göre, post-deşarj plazma reaktörlerinin tasarımı, üretimi ve oluşturulan post-deşarj plazmaların optik karakterizasyonlarının hem düşük hem de atmosferik basınçta karşılaştırmalı olarak belirlenmesi, kHz mertebesindeki alternatif akım güç kaynakları ile post-deşarj plazmaların üretimi, etkileşen post-deşarj plazmaların düşük basınçlarda incelenmesi ve atmosferik basınçta optik emisyon spektrumlarından elde edilen atom/molekül/radikal ışınım konsantrasyonlarının gaz akış hızlarına bağlı değişimlerinin incelenmesi konularında eksikliklerin bulunduğu ve daha önce bu konularda çalışılmadığı saptanmıştır. Bu sebeple bu tez çalışmasını orijinal yapan literatürde ilk kez kHz güç kaynakları ile hem düşük hem de atmosferik basınçta post-deşarj plazma üretiminin gerçekleştirilecek olmasıdır. Öte yandan düşük basınçta farklı gaz türleri ile post-deşarj plazmalar oluşturularak bir etkileşim odasında etkileşimleri optik açıdan incelenecektir. Ayrıca atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörünün tasarlanarak imal edilmesi ve çalışır hale getirilmesi amaçlanmaktadır. Farklı gaz türleri için atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma eldesi sonucu oluşturulan plazmanın gaz akış hızına ve gaz türüne bağlı olarak fiziksel boyutlarının değişimleri incelenecektir.

### 3. POST-DEŞARJ FİZİĞİ

Post-deşarj plazmaların farklı tip ve tasarımlara sahip reaktörlerde üretimi mümkündür. Şekil 3.1.' de düşük basınçta ve atmosferik basınçta deşarj plazmaların oluşumu, Şekil 3.2.' de ise düşük basınçta ve atmosferik basınçta post-deşarj plazmaların oluşumu şematik olarak gösterilmektedir.



**Şekil 3.1.** a) Düşük basınçta b) atmosferik basınçta elektrotlar arasında oluşan deşarj plazmaları.

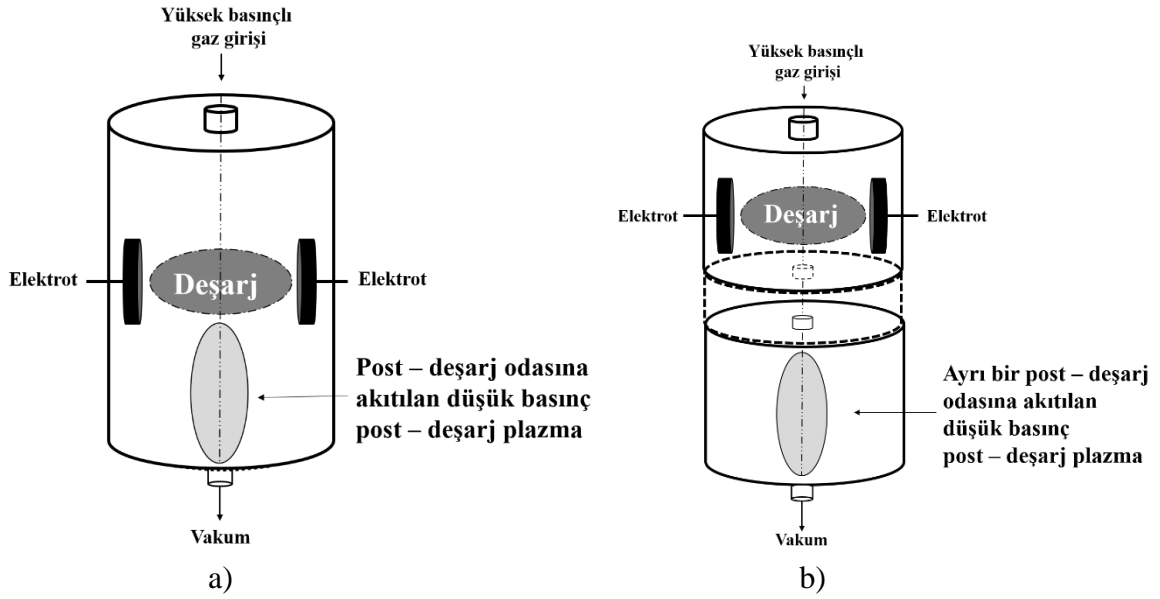


**Şekil 3.2.** a) Düşük basınçta b) Atmosferik basınçta elektrotlar dışında oluşan post-deşarj plazmaları.



Reaktörler içerisinde veya üzerinde yer alan elektrotlar arasında oluşturulan deşarj plazmaların, reaktör ortamının vakumlanma işleminin sürdürülmesi ya da reaktör içerisine gaz akışının sürekli hale getirilmesi sonucunda, plazmanın elektrik alansız bölgeye taşınarak post-deşarj plazmaların üretimi mümkün olabilmektedir. Bu sayede elektrotlar arasından çıkarılan ve farklı özelliklere sahip plazmaların üretimi de söz konusu olmaktadır. Doğrudan numune üzerine uygulama olanağı ve kolaylık sağlamaları bakımından deşarj plazmalar, son yıllarda üretildikleri elektrotlar arasından çıkarılmaktadır. Elektrotlar arasından çıkarılarak uzaklaştırılan bu türdeki plazmalara özel olarak post-deşarj plazma, afterglow plazma ve uzaklaşan plazma (remote plasma) gibi isimler verilmektedir. Post-deşarj plazmalar, üretildikleri elektrotlar arasından uzaklaştırıldıktan sonra akmaya devam ederlerse akan post-deşarj plazmalar, akan afterglow plazma, akan uzaklaşan plazma olarak adlandırılırken, özel olarak atmosferik basınçta üretilenler ise plazma jet olarak adlandırılmaktadırlar (Ricard vd., 2008 a; Ricard vd., 2008 b).

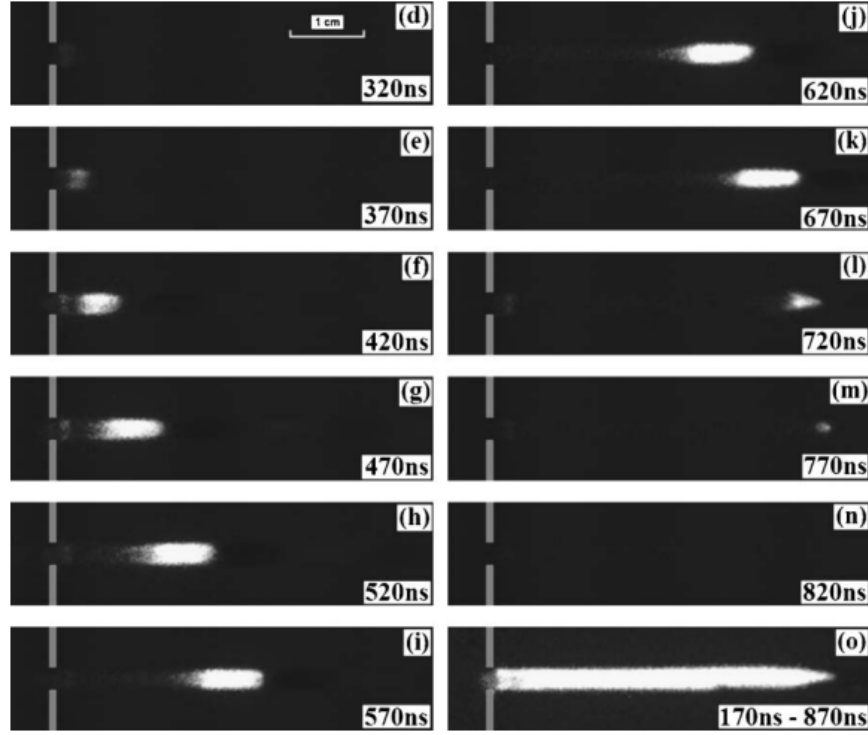
Akan post-deşarj plazmalarda, elektrotlar arasından plazma deşarjının uzaklaştırılması için genel olarak iki farklı yöntem sıklıkla kullanılmaktadır. Birinci yöntemde, gaz deşarjının oluşacağı elektrotlar arasına yüksek basınçta gaz gönderilerek akan post-deşarj plazma atmosfer ortamında üretilebilmektedir. Bu durumda elektrotlar arasında üretilen yüksek basınçtaki deşarj plazma, bir vakum odasına ya da atmosfere yüksek basınç gaz akışı ile itilir. Genelde atmosferik basınçlarda post-deşarj plazma (plazma jet) üretmek için bu yöntem kullanılmaktadır. Akan post-deşarj plazmanın oluşturulabileceği diğer bir yöntem, elektrotlar arasından uzaklaştırılan plazmanın farklı bir odaya akıtılmasıdır. İkinci yöntemde temel prensip, elektrotlar arasında üretilen deşarj plazmanın, deşarj ortamından uzaklaştırılmasıdır. Bunun için sistemdeki gaz akışı sürekli (akan plazma) olmalıdır. Ayrıca ikinci yöntem kullanılarak üretilen post-deşarj plazmalarda, ortamın sürekli olarak vakumlanması da gerekmektedir. Bu sayede elektrotlar arasından deşarj plazma çıkarılabilmektedir. Plazma deşarj üretim reaktöründe yer alan elektrotlar sistemi post-deşarj odası içerisine monte edilebileceği gibi, plazma deşarj ayrı bir odada üretilip diğer bir odaya (post-deşarj odası) akıtılabilir. Şekil 3.3' te söz konusu deşarj ve post-deşarj plazma oluşum mekanizmaları verilmektedir.



**Şekil 3.3.** a) Düşük basınçta post-deşarj plazma üretimi. b) Düşük basınçta ayrı bir post-deşarj odasına akıtılarak post-deşarj plazma üretimi.

Şekil 3.2 ve Şekil 3.3 ile şematik olarak verilen dört sistemde de farklı elektrot tasarımları, farklı gazlar, farklı gaz akış oranları ve farklı güç kaynakları kullanılarak sıcak ya da soğuk akan post-deşarj plazma ya da plazma jet üretebilmek mümkündür. Bu şekilde oluşan plazmalar üretim yöntemine göre 0 - 10 mm uzunluğunda olabildikleri gibi, 1 - 20 cm' ye kadar uzun bir şekilde oluşturulabilmektedir. Post-deşarj plazmaların daha büyük hacimlerde oluşturulabilmeleri teknolojide arzu edilen gelişmeler arasında olup, bu sayede yakın gelecekte önemli uygulamalara sahip olacaktır. Özellikle post-deşarj plazmanın oluşturulduğu bölgede elektrik alan bulunmadığından, canlı hücre ve dokular üzerine uygulamaları elverişli olacaktır.

Düşük basınç post-deşarj plazma ve atmosferik basınç post-deşarj plazma (plazma jet) reaktörlerinde plazma, elektrotlar arasındaki yüksek elektrik alandan çıkarıldığı için, oluşum mekanizması yapısal olarak deşarj plazma oluşumundan farklılıklar göstermektedir. Şekil 3.4 ile yoğunlaştırılmış yük-çiftli kamera (ICCD, Intensified charge-coupled device) yardımıyla bir post-deşarjın (plazma jet) nanosaniye mertebelerinde farklı zamanlarda çekilmiş fotoğrafları yer almaktadır.



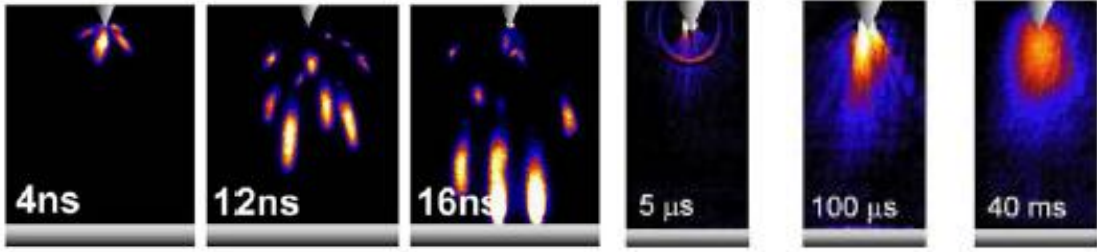
**Şekil 3.4.** Post-deşarj/puls plazma jet tarafından üretilen plazma atmalarının zamana bağlı değişimlerinin fotoğrafları (Lu ve Laroussi, 2006).

Elektrotlar arasında deşarj, elektrik alanda hızlanan yüklü ve nötr parçacıkların bir dizi çarpışmaları sonucu oluşturulurken, post-deşarj plazmaları (plazma jet) çığ (çoğalma, avalanche) mekanizması ile kendi kendini oluşturmaktadır. Elektrotlar arasından çıkan yüklü parçacıklar, kazandıkları enerji ile karşılıklarına çıkan gaz moleküllerini iyonlaştırırlar. İyonlaşan bu parçacıklar da iyonlaşma işlemi sürekli hale getirerek bir reaksiyon zinciri meydana getirirler. Elektrotlar arasından çıkarılan parçacıkların bulunduğu ortamda hızlandırıcı bir elektrik alan olmadığından, yüklü parçacıklar kazanmış oldukları enerjilerini zamanla kaybederler. Bunun sonucunda belirli bir mesafeden sonra oluşturulan plazma jet sona erecektir. Ancak uzun yaşama ömrüne sahip metastable atomlar, nötr atomlar ve reaktif türler gibi plazma parçacıkları ortamda bulunmaya devam ettiği için post-deşarj plazmaların, deşarj ile post-deşarj arası sınırlarını tam olarak belirleyebilmek mümkün olmamaktadır. Şekil 3.4' ten görüldüğü gibi 320 - 370 ns sonra elektrotların arasından çıkan plazma (plazma jet), 770 - 820 ns' den sonra kaybolmaktadır. Fakat bu durum nicel bir gözlemde (insan gözünün ayırma gücü yetmediği için) ancak Şekil 3.4 (o)' daki gibi 170 - 870 nm aralığında plazma jetinin tamamının gözle görülebilmesi şeklindedir.

Plazma jet, klasik elektrotlar arasında oluşan deşarj plazmalardan, fizik açısından ve özellikle de plazmanın ihtiyaç duyduğu yeterli iyonların üretimi açısından farklılıklar göstermektedir. Plazma jetler, elektrotlar arasından atmosfere çıkarılan plazmalar olduğu için, iki metal elektrot arasında değildir. Bu nedenle atmosfer ortamında devam eden iyonlaşma, elektrotlar arasına uygulanan yüksek voltaj ile gerçekleşmez. Ayrıca plazmanın sürekliliği de uygulanan yüksek voltaj ile sağlanmaz. Post-deşarj plazma bölgesinde iyon oluşumunun sürekliliğini sağlayabilecek herhangi bir elektrik alanın varlığı söz konusu değildir. Ancak elektrik alanın olmadığı bu bölgeye plazmanın nasıl çıkarılabildiği, iyonlaşma sürecinin nasıl gerçekleştiği ve sürekliliğini nasıl sağlayabildiği soruları hem teorik hem de deneysel olarak günümüzde halen açık problemler arasında yer almaktadır. Bu gibi soruların cevapları fiziksel açıdan pek çok açıklama beklemekte ve literatürde bahsi geçen konularla ilgili açıklamalar için yapılan çalışmalar güncel olarak devam etmektedir. Konu ile ilgili plazma fiziği alanında kabul gören en baskın açıklama, çığ (avalanche) tipi iyonizasyon mekanizmasıdır. Bu süreçte plazma jetin üretildiği elektrotlar arasında güçlü bir elektrik alan varlığından dolayı, ortamda bulunan gaz moleküllerinin hızlandırılan serbest elektronlar ile iyonlaştırılması söz konusudur. Bu iyonlar, elektrotların hemen üst kısmında ve jetin oluştuğu bölgenin hemen alt kısmına doğru iyonlaşma süreçlerini devam ettirmektedirler. Çığ denilen iyonlaşma süreci, elektrotların civarlarında devam etmektedir. Plazma içerisindeki parçacıklar sürekli birbirleriyle etkileşim içerisindeydirler. Bu nedenle difüzyonları ambipolar difüzyon şeklinde oluşurken, dışarıdan gelebilecek etkilere karşı Debye kılıfı ile kendisini korumaya almaktadır. Plazmanın yaklaşık olarak nötralitesinin ihlali plazma içinde güçlü elektrik alanları oluşturur. Elektronlar ve iyonlar arasındaki alan, çekici kuvvetlerle ilişkilendirilir ve onları bir arada hareket etmeye zorlarlar. Bir gazdaki plazma oluşumunun özel rejimi, elektronların iyonlardan daha yüksek bir hareketliliğinden kaynaklanmaktadır. Ancak bir gaz içerisindeki elektron ve iyonların ayrılması, elektronları yavaşlatan ve iyonları hızlandıran bir elektrik alanı yaratır. Bu, ambipolar difüzyon denilen kendinden tutarlı bir plazma hareketi rejimi oluşturur ve gaz deşarjı için tipiktir (Smirnov, 2012). Bu durumu açıklamak adına yalıtkan duvarlar arasında plazma üretimi gerçekleştirilmek istendiğinde, plazma içerisindeki diğer parçacıklara nazaran daha küçük kütleli elektronlar üretim yüzeyine ulaşarak, burada negatif yüklerin artmasını sağlarlar. Toplanan negatif yüklerin plazma içerisindeki pozitif yüklü iyonlarla etkileşebilecek düzeye gelmesine kadar bu süreç devam etmektedir. Yalıtkan duvarlar arasına gelen elektronlar ve iyonlar eşitlendiğinde, plazma kararlı hale geçmektedir. Kararlı durumun oluşumunu

sağlayan ambipolar difüzyon mekanizması plazma deşarj ve post-deşarjı içerisindeki parçacıkların etkileşimleri sonucunda ortaya çıkmaktadır. Bu mekanizmanın gerçekleşmesi için her iki yüklü parçacık türünün aynı hızla yayılması ve dolayısıyla yaklaşık olarak nötraltenin sağlanması gereklidir (Grill, 1993; Roth, 1995). Plazma içerisindeki elektronların ve iyonların sayı yoğunluklarının benzer olduğu ve atomların sayı yoğunluğuyla karşılaştırıldığında küçük olduğu zayıf derecede iyonize edilmiş bir gazda elektronların ve iyonların taşınmasını göz önünde bulundurduğunda, elektron ve iyonların ayırımına neden olan etki elektrik alan kuvvetidir. Elektrik alan kuvvetinin sahip olduğu yüke göre, elektronlara ve iyonlara farklı yönde etki ettiği bilinmektedir.

Şekil 3.5' te ns mertebelerinde görüntü alabilen kamera (ICCD) ile alınan görüntüde plazmaların (plazma jet) yayılımları görülebilmektedir (Ono, 2016).

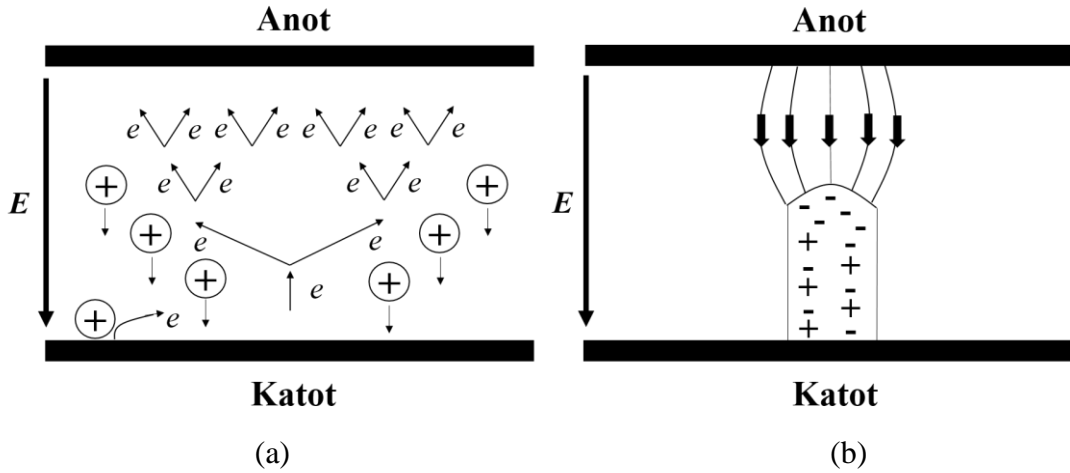


Şekil 3.5. Plazma jetin farklı zaman dilimlerinde yayılım süreçleri.

Doğada tıpkı şimşeğin oluşum mekanizması gibi, yüklü bir parçacık hemen önünde bulunan bir nötr atomu iyonlaştırdığında ortaya iki yüklü parçacık çıkmaktadır. Eğer bu iki yüklü parçacık yeterli düzeyde enerjiye sahipse, önüne gelen diğer nötr parçacıkları da iyonlaştırmaya devam edebilecektir. Oluşum mekanizması bir çığın oluşumunu andırdığından, post-deşarj plazmalarda da iyonlaşma süreçleri çığ mekanizması olarak adlandırılmaktadır. Ancak plazma jet, Şekil 3.5' te görüldüğü gibi, gazın çıkış noktasında yani gazın gönderildiği borunun hemen alt kısmına yakın noktalarda, daha çok çığ oluşumunu gerçekleştirebilmektedir. Bu bölgeler sürüklenme bölgesi (drift region) olarak ta isimlendirilmektedir (Schütze vd., 1998; Tendero vd., 2006). Gazın gönderildiği üst bölgeye bakıldığında, iyonlaşma çığının neredeyse hiç gerçekleşmediği görülmektedir. Bu durumu basınç farklılığı ile açıklayabilmek mümkündür. Yüksek basınç alanlarında gaz molekülleri, plazmanın oluşturulduğu borunun çıkış noktasının merkezinden dışarı doğru yönelim gösterecektir. Bu yönelimler, reaktöre gönderilen gaz akış hızı ile orantılı olarak değişimler

gösterebilmektedir. Ayrıca plazma ortamında gerçekleşen iyonlaşma reaksiyonları ortalama serbest yol (parçacıkların plazma ortamında hiç bir parçacığa rastlamadan serbestçe hareket edebildiği yol) ve tesir kesiti (parçacığın başka bir parçacık ile etkileşme ihtimali) mekanizmaları nedeniyle düşük basınçta daha kolay olabilmektedir. Plazmanın düşük basınçta oluşturulması, aynı zamanda ortamda bulunan yabancı parçacık sayısının azaltılması anlamına gelmektedir. Bu nedenle plazma jet, atmosferde yani yalıtkan borudan gazın çıktığı düşük basınç (reaktörün üst kısmına yüksek basınçlı gaz girişi meydana geldiğinden) bölgesinde meydana gelmektedir.

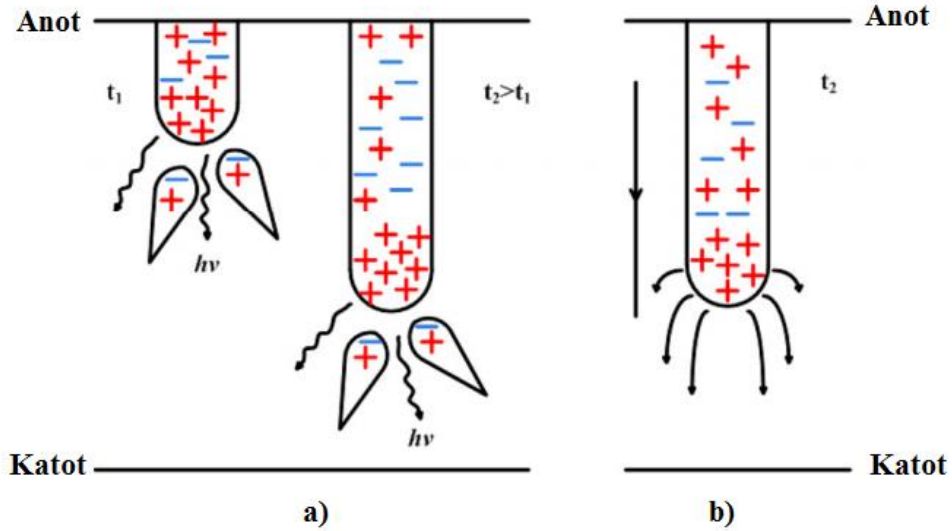
Düşük basınçta, yaygın deşarj mekanizması Townsend breakdown (Townsend Ateşleme) mekanizması olarak bilinir. Townsend ateşleme ya da Townsend çığ olayı, serbest elektronların düzgün bir elektrik alan tarafından hızlandırıldığı ve gaz molekülleri ile çarpışması sonucu serbest ek elektronlarla dolu bir gaz iyonlaşma sürecidir. Bu süreçte elektronlar elektrik alan etkisiyle hızlanırlar. Kazanmış oldukları kinetik enerjiyi bir dizi çarpışmalar sonucunda kaybederek, ortamda yeni serbest elektronların oluşmasını sağlarlar. Sonuç olarak, gaz içerisinde elektrik iletimine izin veren, elektrik ve manyetik alanlarla etkileşebilen bir yapı meydana gelmektedir. Deşarj oluşumu için serbest elektron kaynağı ile birlikte önemli bir elektrik alan varlığının da bulunması gerekmektedir. Bu iki fiziksel koşul sağlanmadan, plazma deşarj olayı gerçekleşemez (Flügge, 1956). Temel olarak Townsend ateşleme mekanizmasında da, çığ kavramı kullanılmaktadır. Elektron çığı olayı, ortamda yer alan serbest elektronların elektrik alan gücü ile ivmelenerek ortamda bulunan diğer parçacıkları (nötr atom ve moleküller) iyonlaştırdığı bir süreçtir. Bu süreçte elektronlar başka atomlarla hızlanan ve çarpışan ilave elektronları serbest bırakarak, daha fazla elektron salınımı sonucunda bir zincirleme reaksiyon oluştururlar. Gazlardan farklı olarak plazma ortamı, etkileşim bölgesinin elektriksel olarak iletken bir plazma haline gelmesine neden olmaktadır. Şekil 3.6' da elektrotlar arasında deşarj plazma oluşum mekanizmalarına ait şematik gösterimler yer almaktadır.



Şekil 3.6. a) Townsend Ateşleme ve b) Işık huzmesi (streamer) Ateşleme oluşumunun şematik olarak gösterimi.

Şekil 3.6' da çığ oluşumu, alandaki yük etkilerinin ihmal edildiği ve homojen olarak uygulanan bir elektrik alan içerisinde bulunan iki metal elektrot arasında gerçekleşmektedir. Bu işlem sırasında elektron yoğunluğu toplu iyonizasyon şeklinde oluşur ve ikincil elektron emisyonu elektrik alan etkisiyle katoda yönlenen iyonların katoda çarpması sonucunda oluşmaktadır (Şekil 3.6.a). Elektronlar, bir yüzeye çarparak daha önce kazanmış oldukları kinetik enerjilerini kaybetmeden önce, deşarjın sürekliliğini sağlamak için yeterli miktarda iyonlaştırıcı çarpışmaya maruz kalırlar. Böylece oluşan iyonların katoda yönlmesi sonucunda katot yüzeyine çarpan iyonlar, ikincil elektron emisyonuna sebep olurlar. Öte yandan, basıncın artması ile birlikte iyonlaşma çok daha küçük ölçeklerde oluşabilir. Bu durumda ise alan yükü etkileri ihmal edilemeyecek seviyede olabilir. Boşluktaki yük miktarı yeterli yük yoğunluğuna ulaştığında, homojen olarak uygulanan elektrik alana eşit olacak şekilde kendi elektrik alanını üretebilir. Deşarj bölgesinden çıkan plazmalar kendi iyonizasyon yönelimini, ipliksi kendiliğinden yayılan (filamentary self-propagation) iyonizasyon yönelimine geçişini etkin bir şekilde devam ettirebilir. Böyle bir durum ışık huzmesi (streamer) oluşumu olarak adlandırılmaktadır (Şekil 3.6.b). Plazmanın oluşturulmak istendiği ortam ya da odanın geometrisi ve iyonizasyon için gereken voltajın değiştirilmesi gibi öncelikli tekniklerden başka, iyonlaşma sürecini güçlü bir şekilde etkileyen iyi seçilmiş gaz karışımlarını kullanarak çığ iyonlaşmasını yavaşlatmak ve ışık huzmesi oluşumunu önlemek mümkündür. Yayılma yönelimine bağlı olarak ışık huzmeleri (streamer), pozitif (veya katot yönelimli) ve negatif (veya anot yönelimli) ışık huzmeleri olarak adlandırılır (Chu ve Lu, 2014).

Katottan anoda doğru elektronların sürüklenme yönündeki bir pozitif ışık huzmesi (streamer) mekanizması elektronların hareketi yönüne ters olarak oluşmakta olup, Şekil 3.7' de gösterilmektedir.

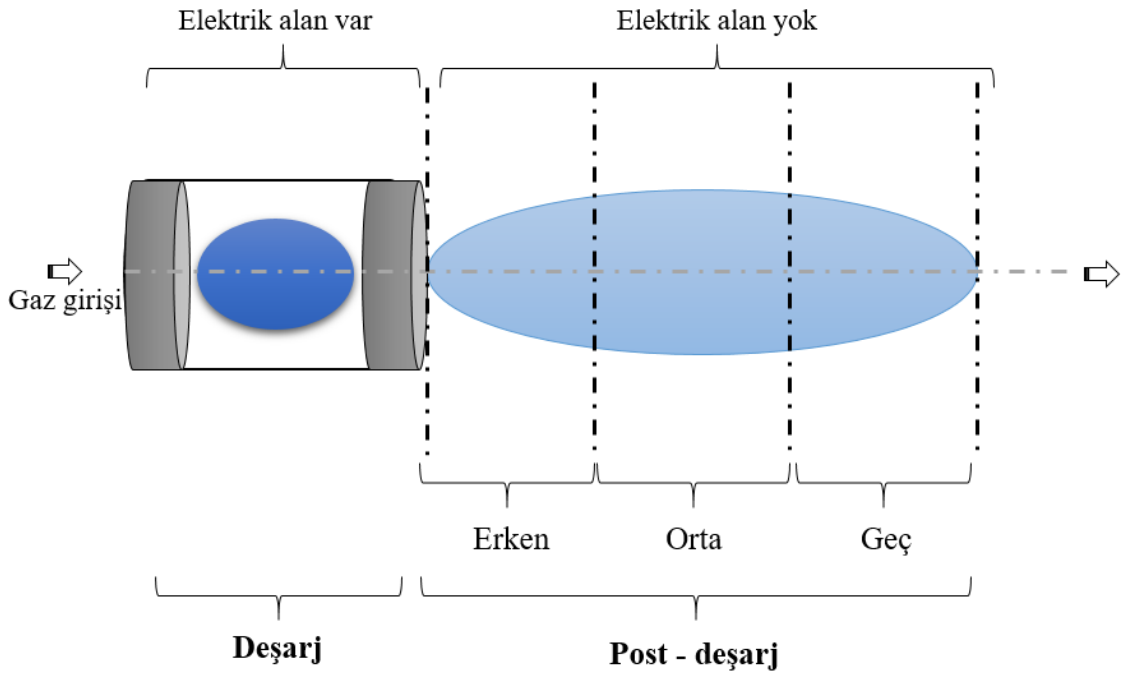


**Şekil 3.7.** a) Herhangi keyfi iki anda ışık huzmesi oluşumu b) alanın kuvvet çizgileri yöneliminin ışık huzmesi yönelimi ile yakın olduğu durum (Raizer, 1991).

Işık huzmesi önündeki kaynak elektronları, ışık huzmesi başlangıcındaki yüksek elektrik alan bölgesinden yayınlanan enerjistik fotonların ortamda bulunan türleri iyonlaştırması sonucu üretilirler. Işık huzmesi başlangıcına doğru hareket eden bu elektronlar, pozitif uzay yükünü ve dolayısıyla gelişen deşarj plazma kanalının önündeki elektrik alanını arttıran çığlar oluştururlar. Çığ benzeri bu topluluklar plazma deşarj kanalının uzamasına neden olur. Öte yandan, kaynak elektronları fotoiyonizasyondan başka, dış iyonizasyon kaynaklarıyla veya ışık huzmesi önündeki güçlü alan bölgesinde elektronların negatif iyonlardan ayrılması sonucu oluşturulan elektronegatif ortamların içinde üretilebilir. Aynı deşarj yolu boyunca tekrarlı bir biçimde yayılan ışık huzmesi durumunda, kaynak elektronları önceki ışık huzmeleri tarafından üretilebilir. Dielektrik yüzeyleri boyunca yayılım gösteren ışık huzmeleri için kaynak elektronları fotoemisyona da üretilebilir. Işık huzmesi yayılımı elektronların sürüklenme yönü ile aynı yönelime sahip ise, bu durumda oluşan yapıya negatif ışık huzmesi mekanizması adı verilir. Işık huzmesi başlangıcı öncesinde çığlar, önde bulunan elektronlar tarafından başlatılabilir. Işık huzmesi oluşumu  $10^{-8}$  s gibi çok kısa zamanlarda meydana gelmektedir (Nasser, 1971).



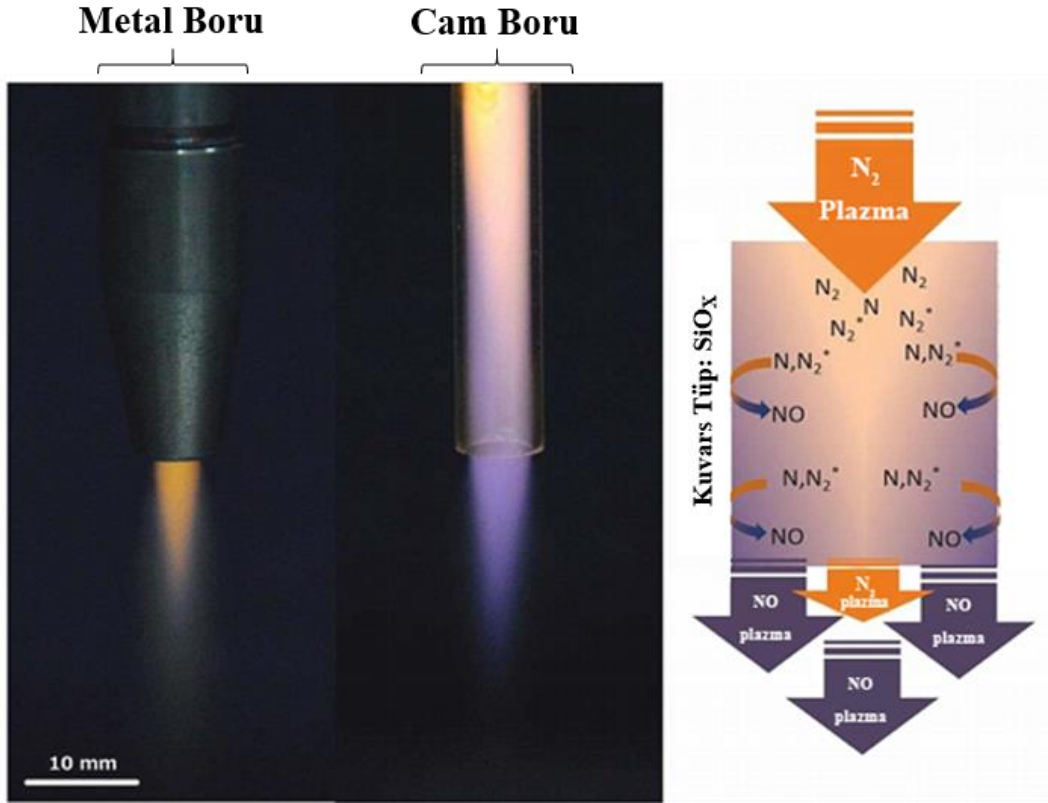
Bölüm 1’ de detaylarına değinilen DC deşarj plazmalarda farklı bölgelerin oluştuğu bilinmektedir. Bu bölgelerin kısmi incelemeleri sonucunda oluşan iyonizasyonların şiddetlerinde artış ya da azalışlar gözlenebilmektedir. Deşarj plazmalar gibi post-deşarj plazma bölgesinde de farklı bölgelerin oluştuğu görülmektedir. Dolayısıyla farklı bölgelerde farklı türlerin varlığından söz edebilmek mümkündür. Örneğin deşarj plazmanın oluşturulduğu bölgenin hemen dışında yer alan ve elektrotlar arasından çıkarılan plazmalar, iyonizasyon düzeyinin en yüksek seviyede gerçekleştiği bölge olarak gözlemlenebilmektedir. Şekil 3.8’ de post-deşarj bölgesinin farklı kısımları yer almaktadır.



**Şekil 3.8.** Post-deşarj plazma bölgesinin yatayda oluşturduğu farklı bölgelerin isimlendirilmesi.

Şekil 3.8’ de şematik olarak verilen post-deşarj plazmalarda görüldüğü gibi, post-deşarjın yayılımı doğrultusunda farklı iyonizasyon mekanizmalarının gerçekleştiği bölgeler bulunmaktadır. Bu bölgeler; erken post-deşarj (early afterglow, early post-discharges), orta post-deşarj (middle post-discharges) ve geç post-deşarj (late afterglow, late post-discharges) bölgeleri olarak sınıflandırılmaktadır (Vesel vd., 2014; Ricard vd., 2016). En yüksek seviyede iyonizasyon süreçlerinin gerçekleştiği bölge erken post-deşarj bölgesi iken, iyonizasyon süreçlerinin en aza indiği ve sonrasında iyonizasyon sürecinin sona ererek plazma oluşumunun sonlandığı bölge geç post-deşarj bölgesidir. Dolayısıyla her bir bölgenin farklı çerçevede değerlendirilmesi gerekmektedir. Bu durumun gözlenebildiği

Şekil 3.9’ da atmosferik basınçta farklı tipteki reaktörler ile üretilen post-deşarj plazmaların (plazma jet) aralarındaki farklar, post-deşarj üzerinden alınan optik emisyon spektrumları yardımıyla belirlenmiştir. Plazma üretimi esnasında, paslanmaz çelikten üretilen reaktör ile kuvars borudan oluşturulan iki farklı reaktör kullanılmıştır. Gaz akış hızının sabit tutulduğu (40 l/dk) bu çalışma post-deşarj plazma mekanizmasının farklı koşullarda üretildiğinde farklı davranışlar sergilediğini göstermekte ve bu konudaki önemini gözler önüne sermektedir.



Şekil 3.9. a) Kuvars cam reaktör ile paslanmaz çelik reaktörde üretilen azot gazının atmosferik basınç plazma jet görünümü b) NO üretim mekanizması (Léoment vd., 2014).

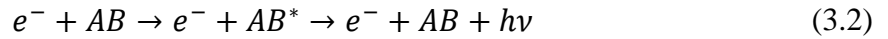
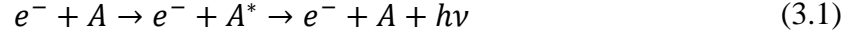
Langmuir plazmayı özel bir iyonlaşmış gaz türü olarak tanımladığında, bir gazdeşarj tüpündeki gazdeşarjını plazma ve plazma kılıfı olmak üzere iki katmana ayırmıştır. Plazma kılıflarıdeşarj plazmalarda elektrotların yakınında oluşmaktadır. Langmuir analizine göre, elektronlar negatif elektrottan itilirken, pozitif iyonlar ona doğru çekilirler. Her negatif elektrotun çevresinde, sadece pozitif iyonlar ve nötr atomlar içeren belirli bir kalınlıkta bir kılıf vardır. Deşarj plazma, elektronları ve iyonları içeren düzgün yaklaşık olarak nötral bir gazdır. Dolayısıyla dengeli iyonlar ve elektron yükleri içeren bu bölgeyi tanımlamak içindeşarj plazma adı kullanılmaktadır. Böylece, elektron ve iyonları içeren düzgün bir yaklaşık

olarak nötral deşarj plazma belirli bir uzaysal bölgede oluşursa, plazma sınırında nötr olmayan hale gelir (Smirnov, 2012). İşte bu noktada, Şekil 3.9' da verilen üretim mekanizmasında post-deşarj plazmaların bu dengeyi değiştirebileceği görülmektedir. Burada, azot gazının kullanıldığı atmosferik basınç plazma jet, kuvars cam boru ile üretilen reaktör içerisinden akarken nitrik oksit (NO) radikal türlerinde güçlü bir artışın olduğu belirlenmiştir. Post-deşarj plazma (plazma jet) ile gerçekleştirilen bu çalışmada deşarj plazma ile post-deşarj plazma üretimleri sonucunda ortaya çıkan plazma yapısında bazı kimyasal farklılıkların bulunduğu görülmektedir. Paslanmaz çelik kullanılarak oluşturulan reaktörlerde N<sub>2</sub> post-deşarj plazması turuncu renkli bir görünümde iken, kuvars boru reaktör tiplerinde NO emisyonu kuvars borunun çevresinde gerçekleştiğinden, oluşan post-deşarjın renginin maviye döndüğü görülmüştür. Post-deşarj plazmanın olduğu bölge içerisinde atomik ve moleküler ayrışmaların olduğu da Şekil 3.9' da görülmektedir. Sonuç olarak bu durumda; çalışma basıncı, gaz türü, gaz akış hızı, kullanılan güç kaynağı vb. gibi temel parametrelerin yanında, reaktörün üretildiği materyalin de post-deşarj plazma üretim mekanizması üzerine etkisinin bulunduğu açıktır. Ayrıca post-deşarj plazma oluşumlarının incelemesinde difüzyonun veya ışık huzmelerinin (streamer) olduğu yatayda yapılan sınıflandırmaların yanı sıra plazmanın düşeyde de incelenebilmesi olasıdır.

Elektrik deşarjlarda bir kural olarak, gaz hacminin büyük bir kısmı oldukça aydınlıktır. Bu durumda ilgilenilen bölgede bir ışımaya deşarjından söz edilebilir. Deşarj akan bir gazda gerçekleştiğinde, deşarj bölgesinde üretilen türlerden bazıları elektrik alansız bölgeye taşınabilmektedir. Deşarj plazmaların oluşum bölgesi ile kıyaslandığında, post-deşarj plazmanın oluşum bölgesinde nispeten daha az yüklü parçacıklar yer almaktadır. Buradaki yüklü parçacıkların nötr atomlardan, moleküllerden ve reaktif türlerden oluştuğu bilinmektedir. Bu bölgede ayrıca uyarılmış halde bulunan türler de yer almaktadır. Post-deşarj bölgesinde H, O ve N atomları ya da NO ve OH gibi radikallerin incelendiği çalışmalarda özel olarak kısa yaşam ömrüne sahip türlerin istenilen bölgelere taşınması amaçlanmaktadır. Bu nedenle kısa yaşam ömrüne sahip türlerin, gaz akış hızının minimum olduğu bir değerde, kullanım noktalarına kadar belirli bir hızla taşınması gerekmektedir.

Deşarj plazmalarda olduğu gibi post-deşarj plazmalarda plazma oluşumunun gerçekleşebilmesi için birtakım atomik ve moleküler reaksiyonların elektrik alansız bölgede oluşması gerekmektedir. Post-deşarj plazmalar içerisinde gerçekleşen bu reaksiyonları; ağır

parçacık türlerinin elektronlarla etkileşimi ve ağır parçacık türlerinin diğer ağır parçacık türleri ile etkileşimi olarak iki ana sınıfta toplayabilmek mümkündür. Elektronların ağır parçacık türleri ile etkileşimleri uyarılma, iyonlaşma, yeniden birleşme, ayrıştırıcı birleşme, ayrışma, tutunma ve sökülme reaksiyonları şeklinde gerçekleşebilmektedir. Atom ya da moleküller için uyarılma reaksiyonu,



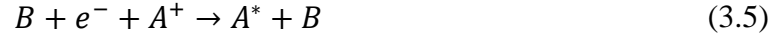
reaksiyonlarına benzer olarak gerçekleşebilir. Uyarılma sonucu atomların elektronik seviyelerinde değişimler gerçekleşebilmekte ve belirli bir zaman sonunda uyarılan atomlar taban enerji seviyelerine  $h\nu$  enerjili bir foton yayınlamaya dönmektedir. Uyarılmış enerji seviyelerinden taban enerji seviyesine geçişlerde yasaklı geçişlerin olduğu da unutulmamalıdır. Taban enerji seviyesine en yakın bir  $E_k$  enerji seviyesinden  $E_l$  enerji seviyesine, yani taban enerji seviyesine geçiş gerçekleşmez. Böyle bir durumda bulunan uyarılmış bir atom, diğer türlere kıyasla, görece daha uzun yaşama ömrüne sahiptir. Uyarılmış haldeki atomun taban enerji seviyesine tekrar geri dönebilmesi için post-deşarj plazma ortamında yer alan serbest elektronlarla çarpışarak daha üst enerji seviyelerine çıkıp, oradan taban enerji seviyesine dönmesi gerekir.

Post-deşarj plazmalar içerisinde yer alan yüksek enerjili elektronlar plazma ortamındaki molekülleri de iyonlaştırabilmektedir. Elektron ile molekül etkileşimi,



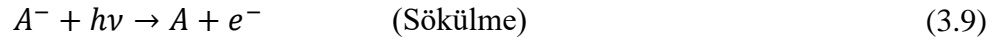
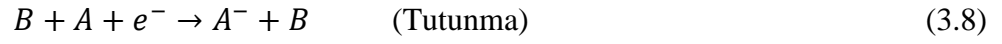
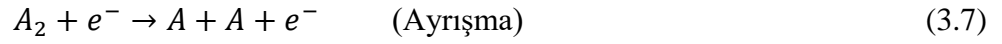
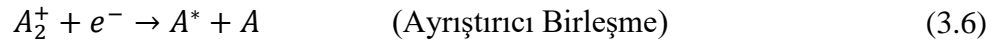
reaksiyonlarıyla gerçekleşebilir. Reaksiyon sonucunda ilgili molekülün pozitif ya da negatif iyonları post-deşarj plazma ortamına aktarılabilir. Post-deşarj plazmalar içerisindeki plazma yoğunluğu belirli bir oranda olduğunda, iyonlar elektronlar ile birleşebilirler.

Bunun için,



gibi bir reaksiyonun oluşması gerekmektedir. Bu gibi birleşme reaksiyonları sonucu atom uyarılmış durumda bulunabilir.

Elektronların neden olduğu diğer reaksiyonlar,



reaksiyonlarıdır. Öte yandan ağır parçacık türlerinin etkileşimleri olarak bilinen iyon-molekül ve radikal-molekül reaksiyonlarında,



gibi zıt yüklü atomlar yeni bir molekülü oluşturabilmekte iken, radikal atomların oluşturduğu



türündeki reaksiyonlarda ise iyon çiftlerinin oluşumu söz konusudur.

Ağır parçacıkların etkileşim reaksiyonlarında,

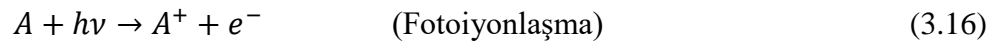
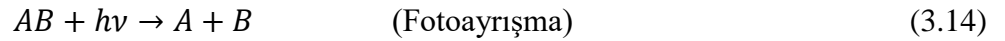
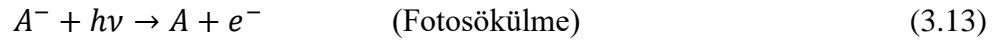


eşitliğinde verilen reaksiyon gerek deşarj, gerekse post-deşarj fiziği çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. Gaz karışımlarının yer aldığı çalışmalarda nötr molekül konsantrasyonunu azaltıcı, iyon konsantrasyonunu arttırıcı bir eğilim gösteren ve Eşitlik (3.12)' de verilen bu

reaksiyon, optik emisyon karakteristiklerinin ortaya konduğu çalışmalarda Penning-tipi iyonizasyon olarak adlandırılmaktadır (Tsukiji ve Wagatsuma, 2007). Penning-tipi iyonizasyon mekanizması özellikle helyum ve argon gaz karışımlarının çalışıldığı post-deşarj plazmalarda uzun yaşam ömrüne sahip metastable atomların durumlarının belirlenmesinde önemlidir (Grill, 1993).

Yukarıda post-deşarj plazma içerisinde gerçekleşen reaksiyonlardeşarj plazmalarda olduğu gibi post-deşarj plazmalarda da homojen reaksiyonlar olarak adlandırılmaktadır. Homojen reaksiyonlar gaz fazındaki türlerin elektron ve ağır parçacıklarla esnek olmayan çarpışmaları sonucu oluşmaktadır. Heterojen reaksiyonlar ise, plazma türlerinin temas ettiği katı bir yüzey ile etkileşimi sonucu meydana gelmektedir. Plazmanın elektrotlar arasından çıkarılması göz önünde bulundurulduğunda, post-deşarj plazmalarda katı bir yüzey ile etkileşim söz konusu olmadığından, ikincil elektron emisyonu, termal emisyon ve kinetik emisyon gibi reaksiyonlar gözlenemez ya da bu etkiler neredeyse ihmal edilebilecek seviyededir.

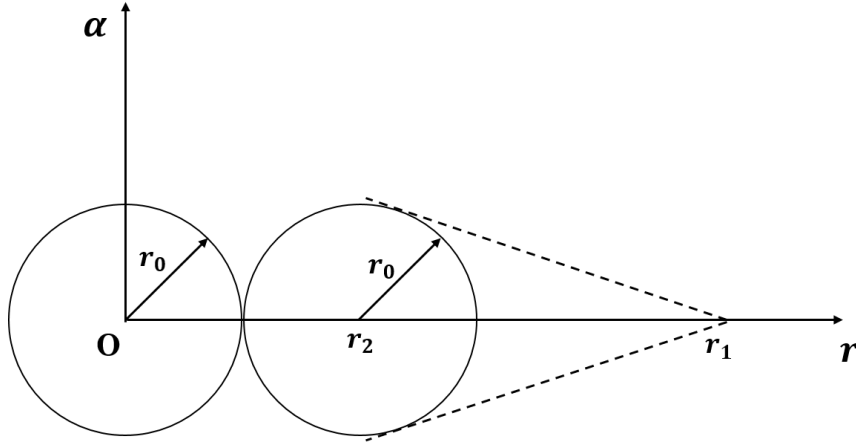
Öte yandan post-deşarj plazmalarda atom ya da moleküllerin fotonlarla sürekli olarak etkileşimleri söz konusudur. Bu etkileşimler,



reaksiyonları şeklinde gerçekleşmektedirler. Eşitlik (3.16)' da verilen fotoiyonizasyon süreçleri post-deşarj plazma çalışmalarından biri olan plazma jeti üzerinde önemli rol oynamaktadır. Dawson ve Winn (1965), fotoiyonizasyon varsayımına dayalı düşük elektrik alanlı ışık huzmesi yayılımı modeli ile bu olayın açıklamasını öne sürmüşlerdir. Bu modelde, katot yönelimli ışık huzmesi başlangıcının yarıçapı  $r_0$  olup, bu yarıçapın oluşturduğu bölge içerisinde pozitif iyonları içermektedir. Tanımlanmış bölgede plazma ilerledikçe düşük iletkenlikte yaklaşık olarak nötral iyonlaşmış kanallar geçilmektedir.

Bu varsayımdan hareketle plazmanın oluşturduğu emisyonlardan Lu ve Laroussi (2006), aşağıdaki modeli öne sürmüşlerdir:

Buna göre, herhangi bir belirlenen zaman aralığında ışık huzmesi, başlangıcı  $r_0$  yarıçaplı ve  $n^+$  pozitif yüke sahip küçük kürelerden oluşmaktadır. Işık huzmesindeki foton emisyonunda küre merkezinden  $r_1$  uzaklığında tek bir fotoelektronun üretildiği varsayılmıştır. Uzay yükü tarafından oluşturulan alanın etkisi altında elektron küreye doğru hızlandırılmakta ve böylece çığ mekanizması başlatılmaktadır. Şekil 3.10' da Lu ve Laroussi'nin (2006) öne sürdüğü ışık huzmesi modelinin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 3.10. Işık huzmesi modelinin şematik gösterimi.

Şekil 3.10' da  $r_2$  noktasından  $r_1$  noktasına hareket eden bir kürede, elektronların toplam parçacık sayısı,

$$n = \exp \int_{r_2}^{r_1} \alpha dr \quad (3.17)$$

eşitliği ile hesaplanabilmekte ve buradaki  $\alpha$ , Townsend' in birinci iyonizasyon katsayısı olarak adlandırılmaktadır.

Buradaki difüzyon yarıçapı ise,

$$r_0 = \left( 6 \int_{r_2}^{r_1} \frac{D}{\vartheta_d} dr \right)^{1/2} \quad (3.18)$$

olup,  $D$  difüzyon katsayısı,  $\vartheta_d$  ise elektronun sürüklenme hızıdır. Küre üzerine çarpan elektronlar yeterli miktarda ise, elektronlar küre içerisinde yer alan pozitif yükleri nötralize edecektir. Ancak arkasında yeni pozitif bir bölge bırakacaklardır.  $r_1$  değeri küreden yayınlanan fotonların tiplerinin de bilinmesi ile birlikte, absorpsiyon katsayısı ve iyonizasyon verimliliğinden yararlanılarak elde edilebilir. Buradaki tüm veriler mevcut olmadığından  $r_1$ , iyonlaşma ve bağlanma oranlarının eşit olması için elektrik alan şiddetinin olduğu mesafe olarak alınmıştır.

Dawson ve Winn (1965)' e göre düşük elektrik alanın bulunduğu ya da elektrik alanın bulunmadığı alanlar altında ışık huzmesi yayılımının gerçekleşebilmesi için aşağıdaki üç gereklilik yerine getirilmelidir:

- i. Çığ mekanizması tarafından oluşturulan yeni pozitif iyonların sayısı küredeki iyonların sayısına ( $n^+$ ) eşit olmalıdır.
- ii. Çığ başlangıç noktasının difüzyon yarıçapı  $r_0$  ' dan büyük olmamalıdır.
- iii. Çığ iki yük bölgesi çakışmaya başlamadan önce yeterli büyüklüğe ( $2r_0 \geq r_2$ ) ulaşmalıdır.

Bu koşullar sağlandığında  $r_2$  ve  $r_0$ , pozitif iyon yüklerinin farklı değerleri için hesaplanabilir. Bu hesaplamada ilk olarak  $n^+$  değeri, ikinci olarak ise elektrostatikte  $r$ ' nin bir fonksiyonu olan elektrik alan,

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (3.19)$$



eşitlikleri kullanılmalıdır. Burada kullanılan ana gaz helyum olmasına rağmen ana iyonlar helyum plazma jeti içerisindeki  $N_2^+$  iyonlarına aittir (Laroussi ve Lu, 2006).

Bağlanma reaksiyonları  $O_2$ ' nin atmosferik havada plazma yayılımı içerisindeki difüzyonu ile gerçekleşmektedir. Yayılım içerisindeki havanın yüzdesi tam olarak belirlenemeyeceğinden % 1 olarak,  $r_1$  uzaklığı ise  $E/p$  oranının  $30 V/(cm \cdot mmHg)$ ' ye eşit olduğu an için alınmıştır. Eşitlik (3.17)' de  $r_2$ ,  $n = n^+$  durumu için hesaplandığında Townsend' in birinci iyonizasyon katsayısı  $15 p \exp(-365p/E) cm^{-1}$  olup, buradaki  $p$  basınç değerini tanımlamaktadır. Hava basıncı, kullanılan gazın basıncı olarak alındığından ve iyonizasyon süreçlerinde helyum metastable atomlarının önemli rol oynaması dolayısıyla bu varsayım hatalı olarak kabul edilebilir.

Eşitlik (3.18)' den  $r_0$  değeri,

$$D = \frac{2 \times 10^5}{p(Torr)} cm^2/s \quad (3.20)$$

ve

$$\mu_e = \frac{0,86 \times 10^6}{p(Torr)} cm^2/V.s \quad (3.21)$$

eşitlikleriyle hesaplanmış ve Çizelge 3.1' de farklı iyon sayıları için aşağıdaki değerler elde edilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Farklı iyon sayıları için hesaplanan  $r_2$  ve  $r_0$  değerleri.

$n^+ (10^9)$	1	2	3	4	5
$r_2(cm)$	0,02	0,1	0,17	0,23	0,3
$r_0(cm)$	0,056	0,068	0,075	0,080	0,085

Bu hesaplamada helyum gazı için birinci durumda  $2r_0 < r_2$  koşulunun gerçekleştiği görülmektedir.  $n^+ = 2 \times 10^9$  olduğunda ise,  $2r_0 > r_2$  olduğu görülmektedir. Bu durumda ışık huzmesi başlangıcı kendiliğinden yayılım gerçekleştiremez. Ancak  $n^+ \geq 3 \times 10^9$  durumunda  $2r_0 < r_2$  olduğundan dış elektrik alanın çok düşük olduğu ya da bulunmadığı durumlarda ışık huzmesi başlangıcı kendiliğinden yayılım gerçekleştirebilir. Böylece

Dawson ve Winn (1965) tarafından, plazma bulutunun hızı  $10^6$  m/s' den daha yüksek değerlere ulaştığında, elektrik alanın olmadığı bölgelerde plazmanın deşarj ortamından birkaç cm çıkarılabildiği belirtilmiştir. Bu durumun deneysel gözlemlerle uyum sağladığı görülmektedir. Işık huzmesi kanalında yeni gaz hacminin iyonize olması için enerjinin gerektiği açıktır. Bu enerji ayrıca dış bir kaynak tarafından da sağlanabilir. Böylece kendiliğinden yayımlı ışık huzmesi (streamer) modeli kararlı değil anca yarı-kararlı durumlar oluşturur. Işık huzmesi, kürelerin iyonizasyon süreçlerinde sahip olduğu elektrostatik enerjiyi kaybetmesi sonucu yayılımını sonlandıracaktır (Lu ve Laroussi, 2006).

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, hem düşük hem de atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörlerinin tasarımı ve üretimi için gereken temel donanımlar, tez çalışmasındaki reaktör üretim süreçleri ve post-deşarj plazma üretiminde kullanılan güç kaynakları ile plazmanın optik karakteristiklerinin belirlenmesi için kullanılacak optik emisyon spektrometresinin özelliklerine ve tercih sebeplerine detaylı bir şekilde değinilecektir.

### 4.1. Düşük Basınçta Soğuk Akan Post-Deşarj Plazma Reaktörü Tasarımı

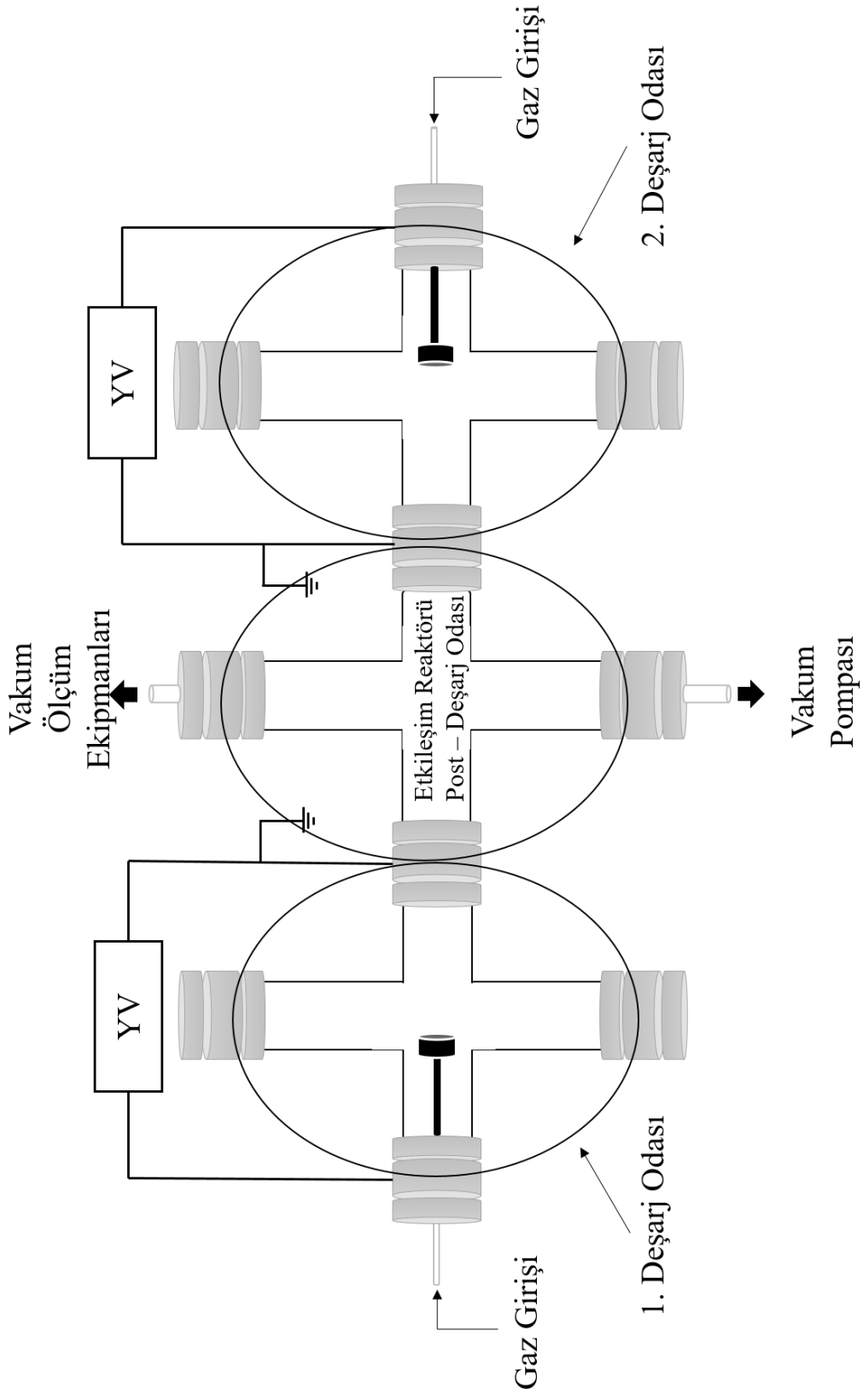
Çizelge 4.1’ de düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma üretim reaktörünün oluşturulmasında kullanılan cihaz/sarf malzemeler yer almaktadır.

**Çizelge 4.1.** Düşük basınç plazma üretim sistemi kurulumunda gerekli cihaz/sarf ve donanımlar ile sistemdeki görevleri.

Cihaz/Sarf Malzeme Adı	Sistemdeki Görevi
T şekilli borosilikat camlar	Düşük basınçlarda vakum odalarının oluşturulması
Flanşlar	Vakum odalarının birleştirilmesi ve toprak elektrotunun oluşturulması
Metalik Elektrotlar	Yüksek voltajın uygulandığı kısımlar
Demir borular	Gaz giriş ve çıkışlarının sağlanması
Merkezleme halkası ve O - halkalar	Vakum odaları ile flanşlar arası sızdırmazlığın sağlanması
Pnömatik hortum ve bağlantı uçları	Vakum sızdırmazlığın sağlanması
Seramik yapıştırıcı	Vakum sızdırmazlığın sağlanması
Hortum	Reaktördeki gazın ortamdaki uzaklaştırılması
Mekanik vakum pompası	Reaktörde düşük basıncın sağlanması
Vakum Ölçüm Bağlantısı	Reaktör ile basınçölçer arası ölçüm işleminin sağlanması
Dijital basınçölçer	Sistem basıncının ölçümü
AC Güç kaynakları	Yüksek voltajın uygulanması
Akış ölçer (flowmetre)	Reaktör içerisine giren gaz akış hızının belirlenmesi

Deşarj ve post-deşarj odaları (vakum odaları) için T şekilli cam borular tercih edilmiş olup, maliyeti açısından camın üretiminde (sıcaklık etkileri oluşmayacağından) kuvars cam yerine borosilikat (pyrex) malzemesi tercih edilmiştir. Bu camlar ısıl genleşme katsayısının düşük olması, kimyasal dayanımının yüksek olması ve kuvars camlara kıyasla maliyetinin daha düşük olması nedeniyle laboratuvar malzemeleri ve teknik ürünlerin yapımında kullanılmaktadır. Vakum odalarının üretiminde 250 mm ile 500 mm uzunluklarına sahip 2,2 mm et kalınlıklı, özel tasarıma sahip cam borular tercih edilmiştir. Cam vakum odalarının birleşim noktalarında, vakum sızdırmazlığının sağlanabilmesi için paslanmaz çelikten üretilmiş flanşlar kullanılmıştır. Bu flanşlar 60 mm iç çaplı, 80 mm dış çaplı ve 5 mm, 12 mm, 23 mm ve 30 mm et kalınlıklı paslanmaz çeliklerden üretilmiştir. Paslanmaz çelikten üretilmiş flanş setleri bağlanılacak uçlara göre isimlendirilmiştir. Altı adet üst flanş, iki adet orta flanş, vakum ekipmanlarının sisteme entegre edilebilmesi için iki adet NW-25 uyumlu flanş olmak üzere toplamda on adet flanş kullanılmıştır. Flanş setleri üzerindeki sanayi artıklarının giderilmesi ve deneysel çalışmada yabancı maddelerin ortamda bulunması istenmediğinden, her biri karbon tetra klorür ( $CCl_4$ ) ve etil alkol ( $C_2H_6O$ ) içerisine daldırılarak bekletilmiş ve yüzeyleri temizlenmiştir.

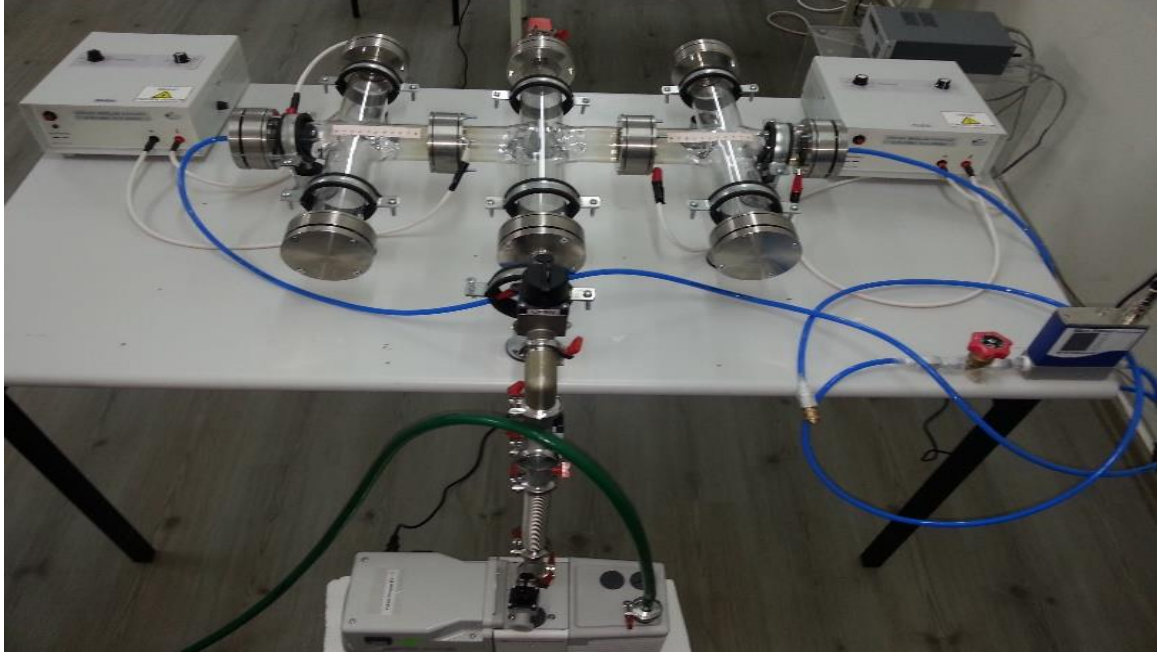
Şekil 4.1' de düşük basınçta soğuk akan post deşarj plazma reaktörünün şematik gösterimi yer almaktadır.



**Şekil 4.1.** Düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörünün şematik tasarımı.

Reaktörde yer alan vakum odaları; paslanmaz çelik flanşlar, orijinal o - halkalar ve merkezleme halkaları ile birbirlerine bağlanmıştır. O - halkalar cam ile flanşlar arasındaki vakum kaçaqlarını önlerken, merkezleme halkaları flanşlar arası vakum kaçaqlarını önlemektedir. 60 mm iç çapa sahip bu parçalar yardımıyla vakum ortamının sağlanması ve kaçaqların önemli ölçüde önlenmesi işlemi sağlanmıştır. Birinci ve ikinci deşarj odasının arasına üçüncü bir post-deşarj odası/etkileşim odası yerleştirilmiştir. İki deşarj odasının ortasına bağlanan etkileşim odası, çekiş gücü 9,7 - 11,7 m<sup>3</sup>/saat olan ve 10<sup>-4</sup> mbar basınca kadar vakumlama yapabilen mekanik vakum pompasına (Edwards RV-8) bağlanmıştır. Reaktör içi basınç ölçümlerinin gerçekleştirilebilmesi için etkileşim odasındaki NW-25 girişli bir uç 10<sup>-4</sup> mbar basınca kadar ölçüm yapabilen basınç ölçüm cihazına (Edwards Gauge, APG100-XM) bağlanmıştır. Etkileşim reaktörünün her iki yanında bulunan deşarj plazma odalarına elektrotlar sistemi yapılmıştır. Alüminyum disk elektrotlar arasından bakır borularla reaktör içerisine gaz girişi sağlanmaktadır. Reaktör iç basıncının ölçüldüğü cihaz ve kontrol cihazı (Edwards, Active Gauge Controller 3 port) vakum ölçüm ekipmanları kısmında yer almaktadır. Deneysel çalışmalar sırasında anlık gaz basıncı ölçümleri bu kısımdan yapılabilmektedir. Mekanik vakum pompası ve atık gazların çalışma ortamından uzaklaştırıldığı tahliye bölümü, vakum pompası kısmında NW-16 uyumlu flanş girişleri ile birlikte yer almaktadır. Ayrıca mekanik vakum pompası deneysel çalışmalar sırasında deşarj plazmanın elektrotlar arasından çıkarılarak post-deşarj odasına yönlendirilmesini sağlamaktadır. Bu sayede iki post-deşarjın etkileşiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Reaktör içerisine yerleştirilecek elektrotlar için alüminyum malzemesi tercih edilmiştir. Bu işlem için çapı 30 mm, et kalınlığı 10 mm olan iki alüminyum parça dairesel olarak kesilmiştir. Dairesel elektrotun içerisinden demir boruların geçirilebilmesi için alüminyum plaka torna tezgahı üzerindeki fener miline bağlanarak, plaka merkezine gezer punta yardımıyla 6 mm çaplı delikler açılmıştır. Deneysel çalışmalarda yabancı maddelerin ortamda bulunması istenmediğinden, elektrotların her biri karbon tetra klorür (CCl<sub>4</sub>) ve etil alkol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) içerisine daldırılarak, yüzeyleri sanayi artıklarından temizlenmiştir. Dairesel elektrotların reaktör içerisine sabitlenebilmesi için 6 mm dış çaplı, 1 mm et kalınlıklı demir borular dilimlenerek kullanılmıştır. Bahsi geçen demir borular üzerindeki sanayi artıklarının giderilmesi ve deneysel çalışmada yabancı maddelerin ortamda bulunması istenmediğinden, boruların her biri benzer şekilde karbon tetra klorür (CCl<sub>4</sub>) ve etil alkol (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O) içerisine sırasıyla daldırılarak yüzeyleri sanayi artıklarından temizlenmiştir.

Şekil 4.2' de üretimi gerçekleştirilen düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörünün fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 4.2. Düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörü.

Reaktörün vakum kaçaklarını önlemek adına, düşük basınçta çalışmaya imkân sağlayacak özel pnömatik elemanlar kullanılmıştır. Bu sayede reaktör içerisinde oluşabilecek olası vakum kaçakları minimum düzeye indirilmiştir. Düşük basınca karşı dayanıklı pnömatik hortum ve bağlantı uçları deşarj odası girişlerine demir borular ile bağlanmıştır. Pnömatik hortumların gaz giriş ve çıkış yolları, alüminyumdan üretilmiş LCD ekrana sahip akış ölçere (Mass-Stream, M+W Instruments 0 - 6,5 l/dk) bağlandığı noktalar arasına T şekilli bakır bir boru yerleştirilerek, reaktörün her iki deşarj odasına eşit miktarda gaz gönderilmesi sağlanmıştır. Gaz regülatörlerinde yaşanabilecek kaçakların önlenmesi için özel giriş bağlantı uçları gaz tüpü girişlerinde kullanılmıştır.

Sistemin düşük basınçta kalması ve soğuk akan plazma üretilmesi gerektiğinden, mekanik vakum pompası deneysel çalışmalar süresince sürekli olarak çalıştırılmış ve istenen düşük basınç ve soğuk akan plazma ortamı oluşturmuştur. Ayrıca reaktörün yatay bir şekilde masa üzerine sabitlenmesi için 150 mm yüksekliğe sahip dokuz adet krom kaplı plastik sabitleyici ayak kullanılmıştır. Bu sayede vakum odaları arası flanş bağlantılarında oluşabilecek olası vakum kaçakları, reaktör dengelenerek minimum düzeye getirilmeye çalışılmıştır.

## 4.2. Atmosferik Basıncıta Soğuk Akan Post-Deşarj Plazma (Plazma Jet) Reaktörü Tasarımı

Çizelge 4.2' de atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma (plazma jet) üretim reaktörünün oluşturulmasında kullanılan cihaz/sarf malzemeler yer almaktadır.

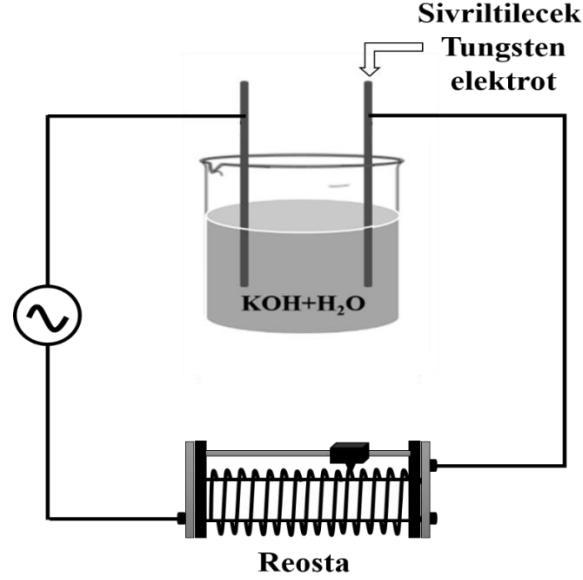
**Çizelge 4.2.** Atmosferik basınçta post-deşarj (plazma jet) üretim sistemi kurulumunda gerekli cihaz/sarf ve donanımlar ile sistemdeki görevleri.

Cihaz/Sarf Malzeme Adı	Sistemdeki Görevi
Kuvars cam borular	Düşük basınçlarda vakum odalarının oluşturulması
Tungsten iğne elektrot	Yüksek voltajın uygulandığı kısım
Mika	Gaz giriş ve çıkışlarının sağlanması
Seramik yapıştırıcı	Vakum sızdırmazlığın sağlanması
Pnömatik Hortum	Reaktöre gazın gönderilmesi
Ahşap Stant	İş sağlığı ve güvenliği talimatlarına göre sistemin koruyucu ekipmanlarının oluşturulması
Karartılmış cam pencereler	Reaktörün izole edilmesi, ölçüm alınması
AC Güç kaynağı	Yüksek voltajın uygulanması
Akış ölçer (flowmetre)	Reaktöre gönderilen gaz akış hızının ölçülmesi

Plazma jet oluşumunun gerçekleştirileceği atmosferik basınç soğuk akan post-deşarj reaktöründe yüksek sıcaklık ve hassas ışık geçirgenliği özelliklerini bünyesinde barındırdığı için kuvars cam borular kullanılmıştır. Cam borular reaktörde elektrot girişi ve gaz girişinin gerçekleştiği gaz giriş yollarını oluşturmaktadır. Cam borulardan ilki elektrot girişinin sağlanacağı yol olup, 6,2 mm dış çaplı 1,5 mm et kalınlıklı ve 120 mm uzunluğa sahiptir. İkinci boru ise 6,2 mm dış çaplı 1,5 mm et kalınlıklı ve 60 mm uzunluğa sahip olup, reaktör içerisine gazın gönderileceği yolu oluşturmaktadır. Gaz ve elektrot girişi yolları, malzeme işlenebilirliğinin oldukça kolay olması sebebiyle, 100 × 50 × 50 mm ebatlarına sahip dikdörtgen prizma şekilli mika malzeme üzerine sabitlenmiştir. Reaktörün ana kısmını oluşturan mika parçanın orta noktası merkez alınarak, parçanın üst ve yan orta noktalarından kuvars boruların yerleştirilebilmesi için 6,5 mm çaplı giriş yolları açılmıştır. Bu sayede mika parçanın merkezinden gaz girişi sağlanmıştır. Üst noktada açılan delik içerisinden 0,5 mm çaplı 150 mm uzunluğunda tungsten tel kuvars borunun çıkış noktasına kadar geçirilerek sıvı seramik yapıştırıcı (Varian Torr-Seal) ile üst noktasından sabitlenmiştir. Tungsten tel, reaktörde yüksek voltaj elektrotu görevi görmektedir. Sabitleme öncesinde tungsten telin



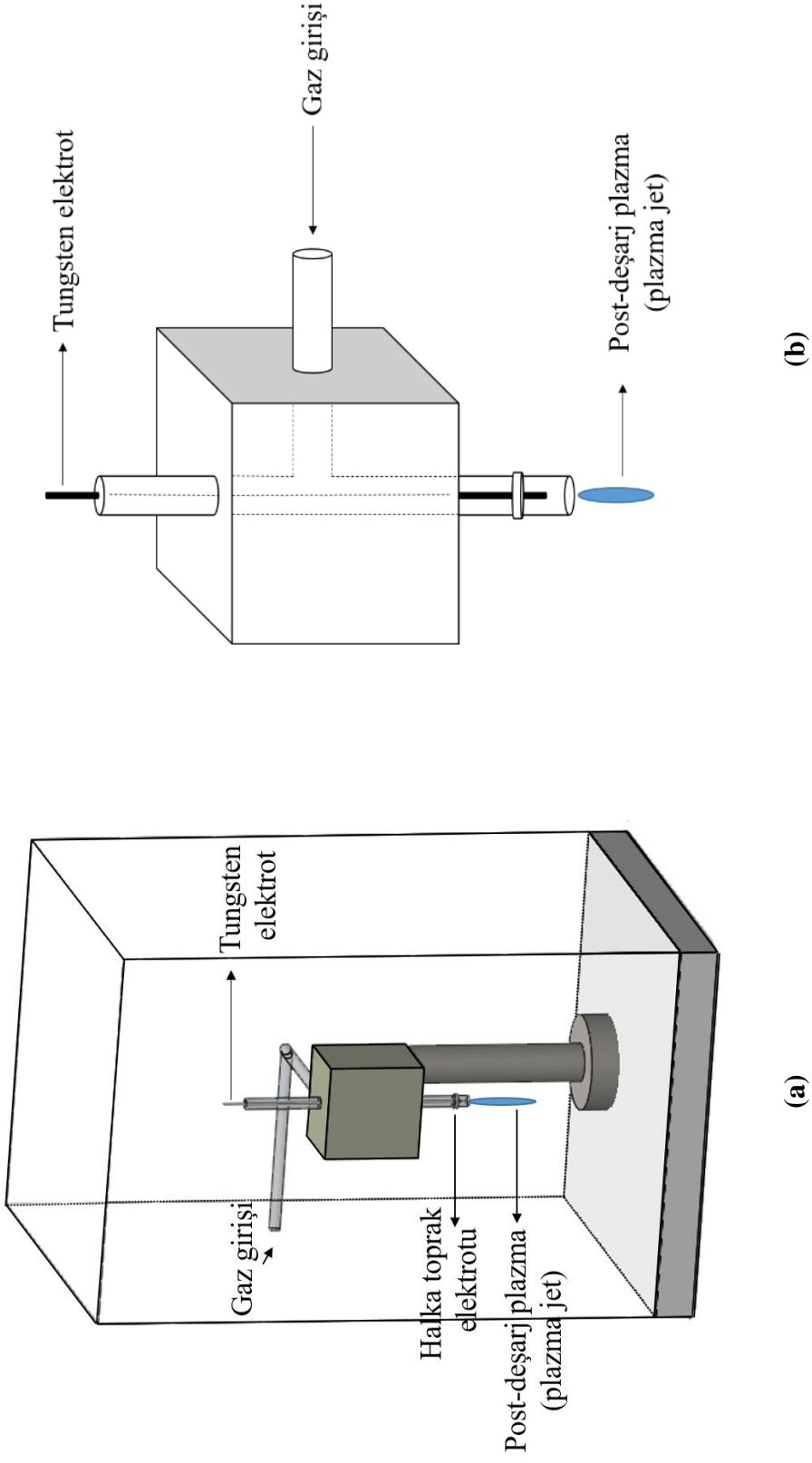
reaktör ucuna uzanan kısmı, Şekil 4.3' te şematik gösterimi verilen elektro-kimyasal sivriltme yöntemiyle sivriltmiştir.



**Şekil 4.3.** Elektro-kimyasal sivriltme yöntemi düzeneğinin hazırlanması.

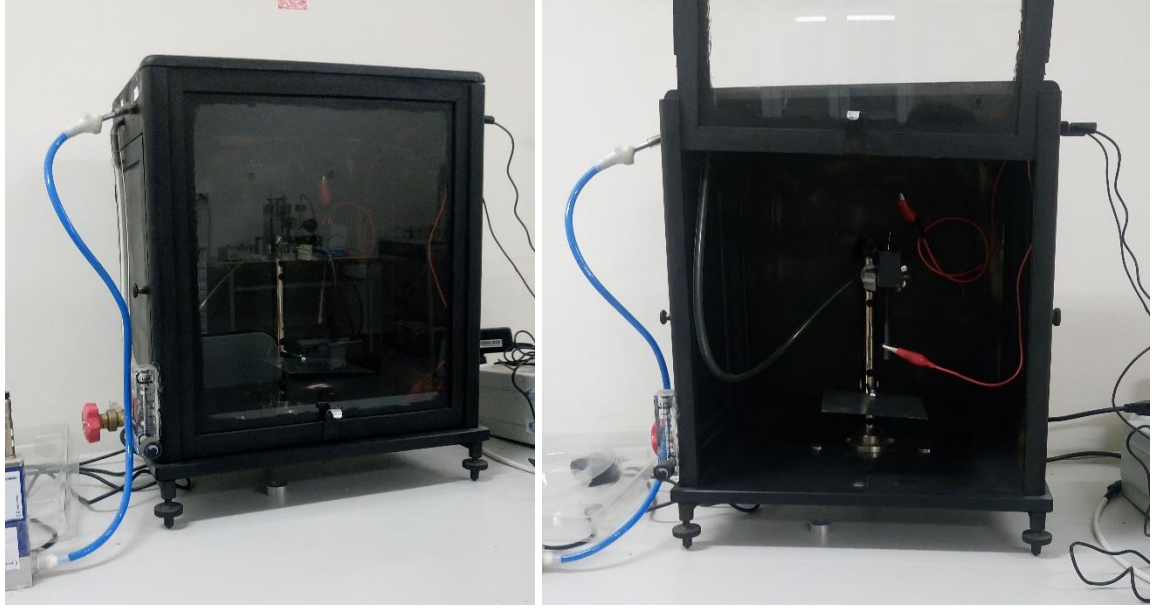
Elektro-kimyasal sivriltme yöntemi için şehir şebekesi gerilimi kullanılmıştır. 0,5 mm çaplı 150 mm uzunluğundaki iki tungsten tel, oda sıcaklığında hazırlanan çözelti içerisine daldırılmıştır. Sivriltilmek olan tungsten tel ucu şehir şebekesinin yüksek gerilim ucuna, diğer tungsten tel ise toprak ucuna bağlanmıştır. 10 dk' lık süre boyunca gerilim uygulanan tellerden birinin çözelti ile temas ettiği nokta 0,2 mm çap kalınlığına kadar sivriltmiştir. Bu telin kalın olan diğer uç kısmı cam boru içerisinden çıkarılarak güç kaynağının yüksek voltaj bağlantı noktası oluşturulmuştur. Cam borunun dışındaki ağız kısmına yakın bir noktadan, toprak elektrotu bağlantısı gerçekleştirilmiştir.

Plazma jet reaktörü stant tutucusu ve demir çubuk yardımıyla sabitlenmiştir. Plazma jet uzunluğunun belirlenebilmesi için standın yanına reaktörün ağız ucu ile paralel olacak şekilde yalıtkan bir malzemeden üretilen cetvel yerleştirilmiştir. Reaktör çalışır hale geldiğinde, standın yanında bulunan bu cetvel sayesinde, post-deşarj (plazma jet) uzunluğunun anlık değişimleri gözlenebilmektedir. Şekil 4.4' te verilen reaktörün üretimi sonrasında, yüksek voltajla çalışmaların gerçekleştirilmesi sebebiyle, iş sağlığı ve güvenliği açısından tümüyle yalıtılması gerektiğinden reaktörün, Şekil 4.5' teki gibi bir kapalı bir oda içerisine yerleştirilmesi planlanmıştır.



**Ŗekil 4.4.** Atmosferik basınca soğuk akan post-deşarj plazma (plazma jet) reaktörünün (a) şematik ve (b) iç tasarımının görünümüleri.

Tasarlanan odanın herhangi bir noktasında elektriksel iletimin bulunmaması gerektiğinden, reaktörün yerleştirileceği odanın oluşturulması işlemlerinde ahşap ve cam malzemeler kullanılmıştır. Reaktör odasının taban materyali için cam, dikdörtgen prizma şekilli mika reaktörün sabitleneceği stant materyali için ise galvanizli demir boru tercih edilmiştir. Stant ile reaktör arası, elektrik iletimi bakımından olası kaçakların önlenmesi için izole edilmiştir. Tasarlanan reaktörün iki farklı açıdan görünümü Şekil 4.5 ile verilmektedir.

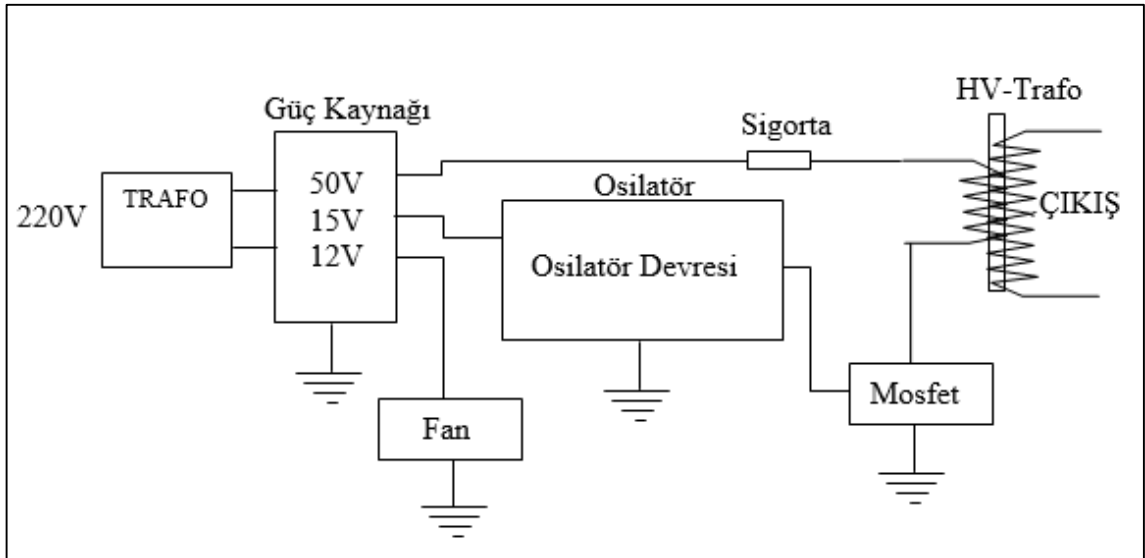


**Şekil 4.5.** Atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma (plazma jet) reaktörü.

Şekil 4.5' te reaktörün uygulama ve ölçüm alınan ön paneli, sürgülü bir cam muhafaza kısmı ile kapatılmıştır. Ortamda bulunan elektromanyetik radyasyonun etkilerinin minimize edilmesi için, reaktörün yan ve arka kısımlarında yer alan cam, mat siyah bir boya ile boyanarak dış ortamdan gelebilecek ışıklara karşı yalıtılmıştır. Bu sayede optik emisyon ölçümleri alındığı sırada, gün ışığının oluşturduğu istenmeyen dalgalıların spektrumunda yer alması büyük ölçüde engellenmiştir. Reaktörün içerisine yerleştirildiği odanın tabanında 250 mm - 400 mm ebatlarına sahip 20 mm et kalınlıklı cam ve diğer yan yüzlerinde ise kolay işlenebilirliği ve elektriksel iletkenliği bulunmaması sebebiyle ahşap malzemenin oluşturulmuştur. Reaktörde çalışma yapılacağı sırada reaktörün ön ve yan kısımlarında bulunan cam pencereler açılabilir. Bu sayede reaktör üzerindeki herhangi bir nokta üzerinden optik emisyon ölçümleri alınabilmektedir.

### 4.3. Alternatif Akım Güç Kaynakları

Bu çalışmada tasarımı tümüyle tarafımızdan yapılan alternatif akım güç kaynakları kullanılmaktadır. Plazma üretiminin gerçekleştirilebilmesi için tasarlanan, yüksek frekans ve yüksek voltaj üretebilen ayarlanabilir alternatif akım güç kaynağının şematik gösterimi Şekil 4.6' da, güç kaynağının fotoğrafları ise Şekil 4.7' de yer almaktadır.

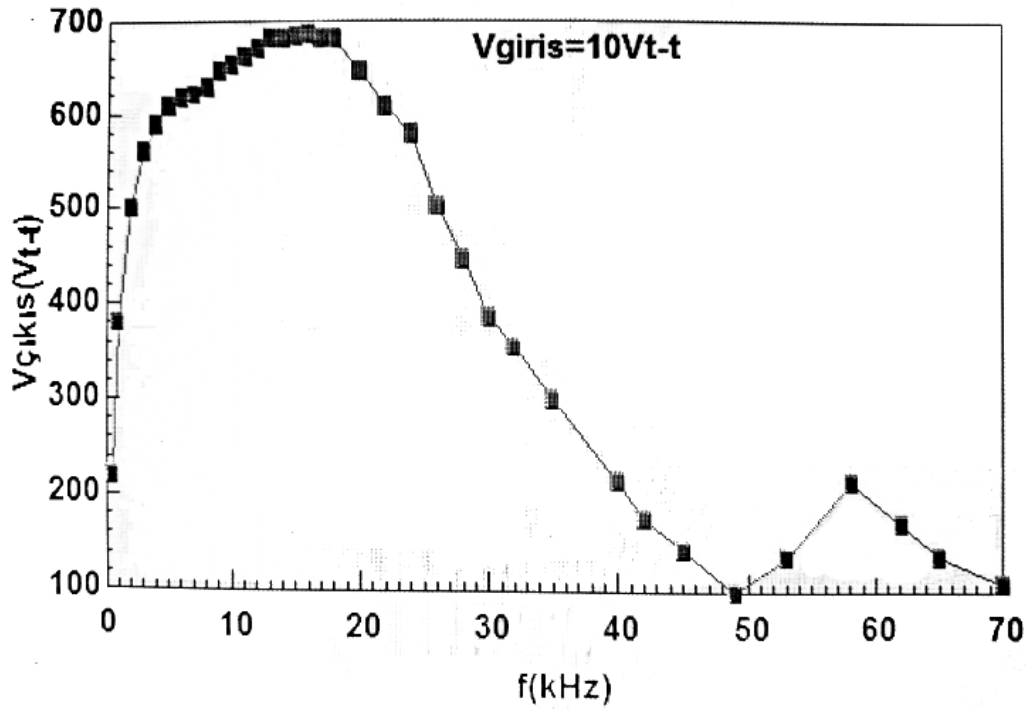


Şekil 4.6. AC güç kaynaklarının şematik gösterimi.



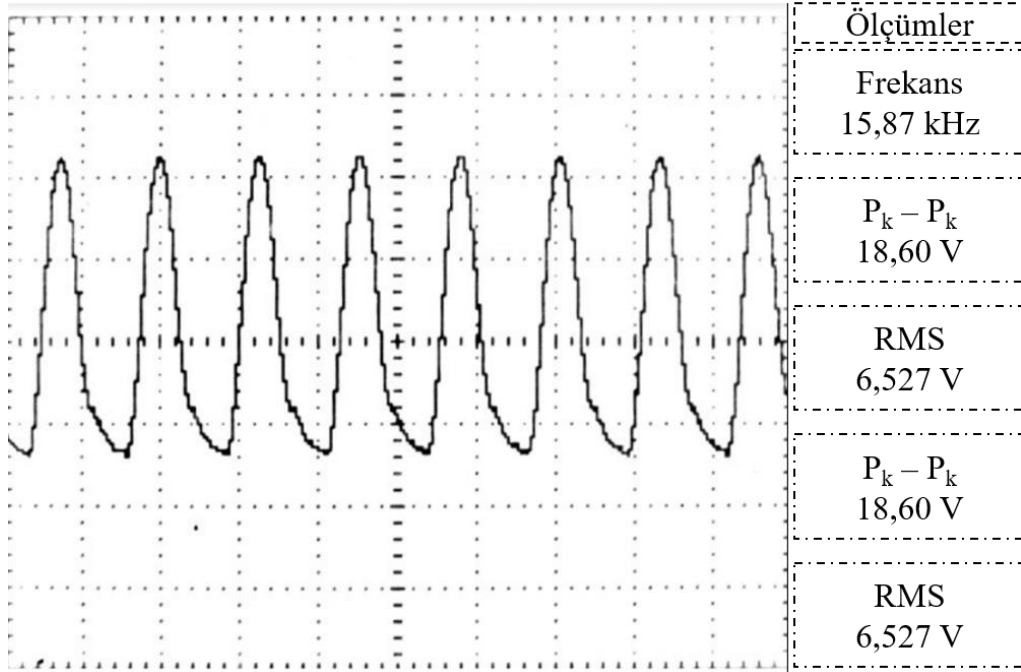
Şekil 4.7. Deneysel düzenekte kullanılan AC güç kaynağı.

Şekil 4.6' ya göre 220 V alternatif akım ile beslenen ve  $-5 - 50$  °C ortam sıcaklığında çalışabilen güç kaynağı, gücü 80 W olan bir trafoya iletilmektedir. Yüksek voltajın üretimi sırasında soğutucu fan ile birlikte güç kaynağının yüksek akım çekmesini önleyebilmek için 1 A akım değerine sahip sigorta direnci kullanılmaktadır. Bu güç kaynağı ile 13 - 20 kHz çıkış frekansı ve 6 - 18 kV çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Güç kaynağı alternatif akımı yükselten bir trafo içermekte olup,  $280 \times 220 \times 100$  mm ebatlarına sahiptir. Şekil 4.8' deki grafikte trafo çıkış voltajının frekansa bağlı değişimleri yer almaktadır.



Şekil 4.8. Yüksek voltaj trafo voltaj-frekans ölçümleri.

Burada elde edilebilecek maksimum frekans değerinin 18 kHz olduğu görülmektedir. Güç kaynaklarının optimum değerlerinde alınan çıkış gerilimi yüksek voltaj probu ile ölçülmüş olup, ölçüm sonuçları Şekil 4.9 ile verilmektedir.



Şekil 4.9. Güç kaynağının çıkış gerilimi/1000 V.

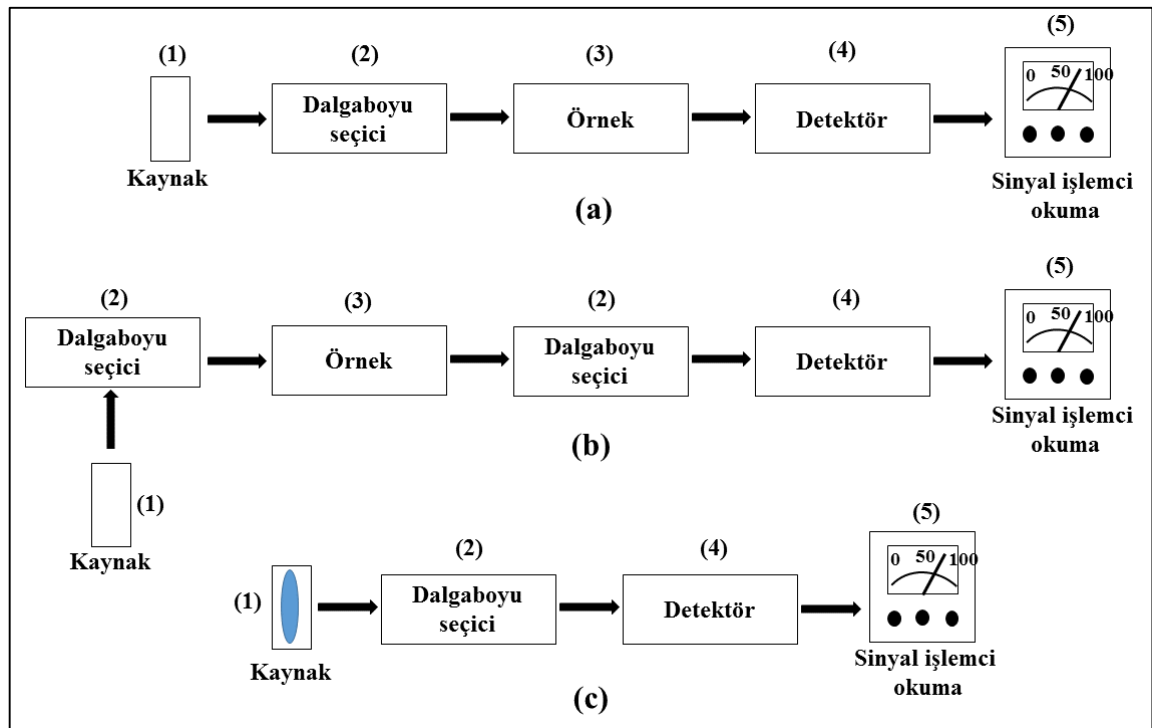
Yüksek voltaj probu ile alınmış ölçüm sonuçlarına göre, güç kaynaklarından elde edilen frekans ve voltaj ölçüm değerleri bu çalışmada optimum değerler olarak kullanılacak ve ölçümler bu aralıklarda gerçekleştirilecektir.

#### 4.4. Optik Emisyon Spektroskopisi (OES)

Plazma içerisinde yer alan atom ve moleküllerin uyarılmaları için gereken enerji, plazmanın üretileceği ortamda oluşturulan elektrik alan sayesinde kinetik enerji kazanan parçacıkların bu atom ve moleküllerle çarpışması sonucu elde edilir. Uyarılma sonucunda atom veya molekül kararlı halden kararsız hale geçeceğinden, taban enerji durumuna dönmek için kendiliğinden bir foton yayınlayacaktır. Yayınlanan fotonlar topluluğu sayesinde plazma içerisinde yer alan atom, molekül, uyarılmış atom ve kimyasal reaksiyonlarda büyük öneme sahip radikaller gibi temel bileşenlerin varlığı hakkında bilgi edinebilmek mümkündür. Spektroskopik çalışmalarda plazma, yapısı gereği, atomik emisyon kaynağı görevi görmektedir. Kararsız halde bulunan atom ya da moleküllerin temel duruma geçişleri süresince yayınladıkları fotonlar, üretilen plazmanın optik karakterizasyonu hakkında önemli bilgileri bünyesinde barındırmaktadır.

Optik emisyon spektroskopisinde kullanılan cihazlar elektromanyetik spektrumun ultraviyole (UV), görünür ve infrared (IR) bölgelerini kapsamaktadırlar. Spektroskopik yöntemler emisyon (yayılım), absorpsiyon (emilim), flüoresans veya saçılma olaylarına dayanmaktadır. Bunlardan her biri için kullanılan optik cihazın yapılandırılmasının diğerlerinden farklı olmasına karşın, temel kısımları birbirine oldukça benzerlik göstermektedir (Beşergil, 2015).

Şekil 4.10' da çeşitli optik spektroskopi cihazlarında kullanılan kısımlar şematik olarak yer almaktadır.



**Şekil 4.10.** Optik spektroskopi cihazlarında kullanılan kısımlar: (a) Absorpsiyon spektroskopisi (b) Flüoresans ve saçılma spektroskopisi, (c) Emisyon spektroskopisi.

Şekil 4.10' da görüldüğü gibi optik emisyon spektrometrelerinde en genel anlamda beş farklı kısım yer almaktadır. Bunlar;

- i. Kararlı bir ışın kaynağı (1)
- ii. Bir dalgaboyu seçici (2)
- iii. Örnek kabı (3)
- iv. Işın enerjisini kullanılabilir bir sinyale dönüştüren ışın detektörü (4)
- v. Sinyal işlemci ve okuma (5)

kısımları olarak sınıflandırılabilir. İlk dört kısmın özellikleri, kullandıkları dalgaboyu bölgesine göre farklılıklar gösterebilmektedir. Öte yandan cihazın temel kullanım ilkeleri (parça tasarımı, atomik ya da moleküler spektrumları belirleyebilmesi, kalitatif ya da kantitatif olarak kullanılması gibi) baz alındığında, bazı değişikliklerin olabilmesi de mümkündür. Flüoresans ve saçılma spektroskopilerine benzer olarak absorpsiyon spektroskopisinde de bir dış ısı enerjisi kaynağı yer almaktadır. Kaynak tarafından üretilen farklı dalgaboylarına sahip ışınlar örnek üzerine gönderilir ve örnekten geçebilen ışınlar ise detektör yardımı ile tayin edilir. Flüoresans ve saçılmada kaynaktan gelen farklı dalgaboylarına sahip ışın demeti, önce örneğe girer ve örnekten özel flüoresans veya saçılmış ışın yayınlanmasını sağlar. Bu sayede çıkan ışın kaynağa göre belli bir açıda ölçülür (Beşergil, 2015).

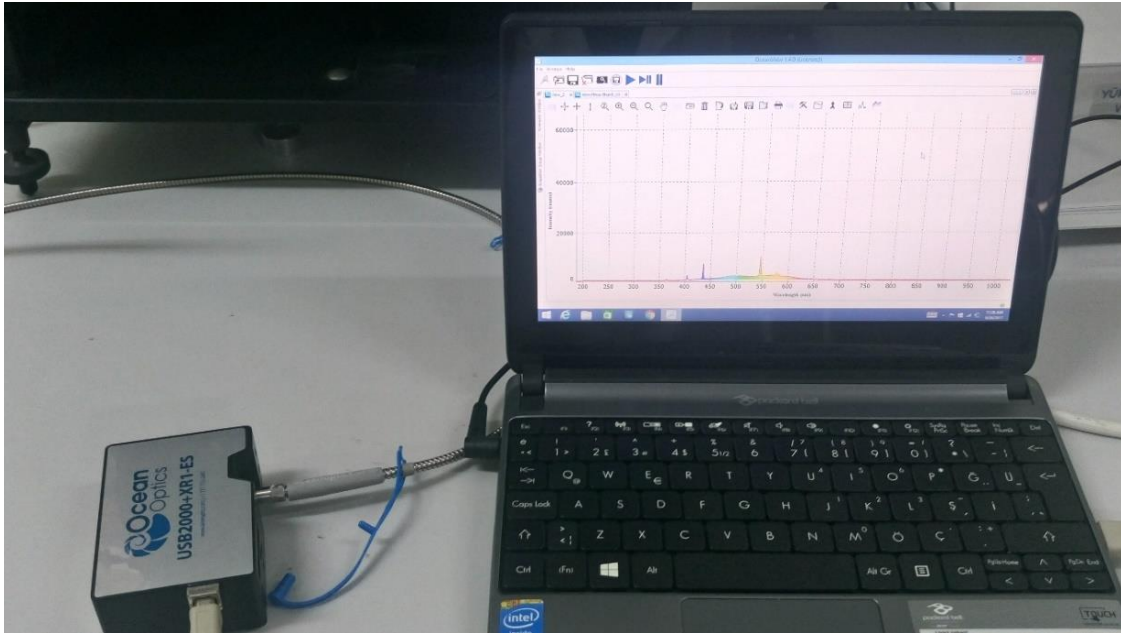
Atomik emisyon spektroskopisi, özellikle plazma ile gerçekleştirilen çalışmaların elementel analizleri işlemlerinde sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde bir dış ışın kaynağına gereksinim yoktur. Dolayısıyla bu özelliği diğer spektroskopik yöntemlerden farklılık gösterir. Çünkü ışın kaynağı yerine kullanılan örnek, kendiliğinden ışın yayma özelliğine sahiptir. İncelenen örnek üzerinden ölçüm alındığından, kaynak bu ölçümlerde incelenen örnek olmaktadır. Burada kaynak, gaz fazı içerisindeki taneciklerin elektronik uyarılmaları için gereken enerjiye sahip olmalıdır. Optik emisyon spektrometresinin kısımlarında verilen örnek kabı için emisyon spektroskopisinde bir ark, kıvılcım ya da gaz deşarjı kullanılır. Örnek kabı yerine kullanılan yapı hakkındaki bilgilere, bu yapının yapmış olduğu ışınımlar sonucunda ulaşılabilmektedir. Ayrıca atomik emisyon spektroskopisinde bilgisayar kontrollü oluşan pikler üzerinden yayınlanan ışınların dalgaboyu belirlenebilmekte, bu sayede örnek içerisinde hangi atom/atımlar, moleköl/moleküller ve iyon/iyonların bulunduğu literatür ve diğer emisyon spektrumu veri tabanlarından yararlanılarak belirlenebilmektedir. Bu tip cihazlarla örnek üzerinden alınacak ölçümlerde, dakikada yaklaşık olarak on farklı elementin konsantrasyonunu eş zamanlı olarak belirleyebilmek mümkündür (Beşergil; 2015).

Laboratuvar ortamında üretilen plazmalar, içerisinde milisaniye ile mikrosaniye mertebeleri arası değişen çok küçük yaşam sürelerine sahip kararsız yapıları içerdiğinden, kontrol altında tutulmaları oldukça zordur. Böyle bir sistemin fiziksel özelliklerinin incelenmesi ile plazma tarafından absorblanan ya da yayınlanan elektromanyetik



radyasyonun belirlenmesi gerekmektedir. Plazma spektroskopisi çoğunlukla özel bir alt araştırma bilimi olarak bilinmesine rağmen, aynı zamanda disiplinler arası çalışmaları da gerektirmektedir (Griem, 1997). Her elementin karakteristik emisyon spektrumu olduğundan, atomik emisyon spektroskopisi kimyasal analizleri (nitel ve nicel) gerçekleştirmekte kullanılmaktadır. Nicel analizde piklerin şiddeti standartla karşılaştırılır ve konsantrasyon hakkında bilgi edinilebilir (Yurdakul, 2010). Bu sebeple bu tez çalışmasında elde edilecek emisyon spektrumları üzerinden plazma deşarjı ve post-deşarj plazma içerisinde yer alan nötr atom/atamlar molekül/moleküller, iyon/iyonlar ve radikal/radikallerin uygulanan voltaja, frekansa, gaz türüne ve gaz akış hızı değişimleri üzerine incelemeler gerçekleştirilecektir.

Şekil 4.11’ de ise bu tez çalışmasında kullanılacak optik emisyon spektrometresinin fotoğrafı yer almaktadır.



Şekil 4.11. Deneysel çalışmalarda kullanılan optik emisyon spektrometresi ve yazılımı.

Çizelge 4.3' te, Şekil 4.11' de verilen optik emisyon spektrometresinin özellikleri yer almaktadır. Deneysel çalışmalar esnasında 2,1 nm optik çözünürlüğe sahip optik emisyon spektrometresi, fiber kablosu yardımıyla dizüstü bilgisayara bağlanarak anlık emisyon değişimlerini milisaniye ve saniye mertebelerinde bilgisayar ekranında gösterebilmektedir. Bu cihaz ebatları itibariyle taşıma kolaylığı sağlamakta ve ölçüm alınacak bölge üzerindeki elektromanyetik spektrumun 200 - 1100 nm dalgaboyu aralığındaki ışınları toplayarak elde ettiği verileri mevcut yazılımı yardımıyla analiz edebilmektedir. Ayrıca ışın toplayıcı kısmın belirli periyotlarda ölçüm alabilme özelliği sayesinde, birleştirme süresi değiştirilerek ölçüm sonuçları daha da hassaslaştırılabilmektedir. Bu tez çalışmasında her bir ölçüm işlemi, birleştirme süresi 1 s olacak şekilde ayarlanmıştır.

**Çizelge 4.3.** Deneysel çalışmalarda kullanılacak optik emisyon spektrumunun genel donanımı.

<b>Spektrometre Türü</b>	Atomik emisyon spektrometresi
<b>Marka - Model</b>	Ocean Optics - USB 2000+
<b>Detektör Tipi ve Ölçüm Aralığı</b>	Lineer Silikon CCD, 200 – 1100 nm
<b>Giriş Sliti</b>	25 µm
<b>Piksel Sayısı ve Boyutu</b>	2048 – 14 µm x 200 µm
<b>Optik Çözünürlük</b>	2,1 nm
<b>Hassaslık</b>	400 nm'de 75 foton/sayım, 600 nm'de 41 foton/sayım
<b>Odak Uzaklığı</b>	42 mm giriş, 65 mm çıkış
<b>Integration Time (Birleştirme Süresi)</b>	1 ms - 60 s

## 5. BULGULAR VE TARTIŞMA

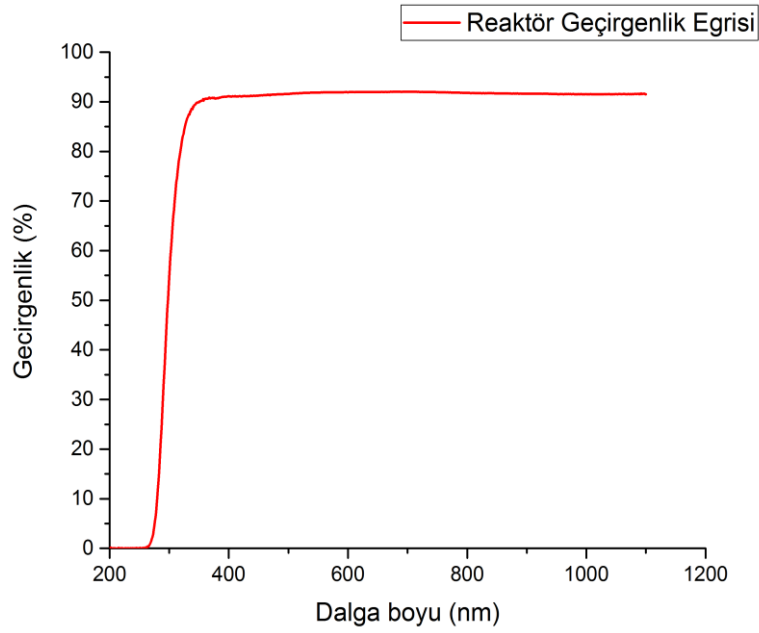
Bu bölümde, Bölüm 4' te detaylarına değinilen ve üretimi gerçekleştirilen iki farklı reaktör içerisinde, farklı gazların deşarj ve post-deşarj plazmalarının oluşturulması işlemleri alt başlıklar halinde verilecektir. İlk olarak, düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörünün özellikleri belirlenerek, içerisinde sırasıyla atmosferik hava, helyum, argon ve oksijen gazlarının deşarj ve post-deşarj plazmalarının üretilmesi işlemleri gerçekleştirilecektir. Düşük basınçta deşarj odaları içerisinde oluşturulan deşarj plazmaların, bu odalardan gaz akış hızı ve reaktör basıncına bağlı olarak akıtılması sonucunda, etkileşim reaktörü içerisinde post-deşarj plazmasının oluşturulması ve her iki deşarj bölgesinden gelen post-deşarjların etkileştirilmesi planlanmaktadır. Böylece deşarj ve etkileşen post-deşarj plazma bölgelerinde oluşan farklı tipteki plazmaların emisyon spektrumları yardımıyla temel optik karakteristiklerinin belirlenmesi işlemleri gerçekleştirilecektir. İkinci olarak, atmosferik basınçta helyum ve argon gazları ile soğuk akan post-deşarjların (plazma jet) üretimi gerçekleştirilecektir. Farklı gaz akış hızları oluşturularak, soğuk akan post-deşarj plazmaların (plazma jet) atmosfer ortamındaki fiziksel boyutları belirlenecektir. Atmosferik basınca çıkarılan plazma jetlerin farklı bölgelerinden optik emisyon spektrumları alınarak, farklı gaz akış hızlarındaki temel farklılıklarının belirlenmesi amaçlanmaktadır.

### 5.1. Düşük Basınçta Soğuk Akan Post-Deşarj Plazma Reaktöründeki Deneysel Çalışmalar

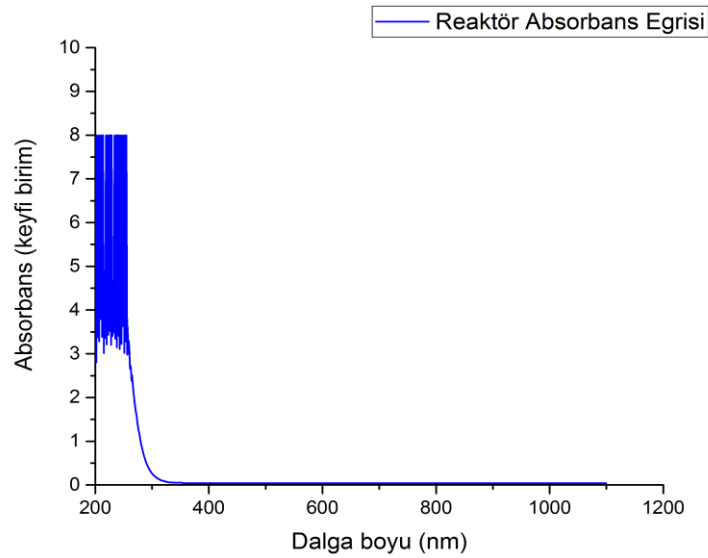
Optik emisyon spektrometresi ile alınacak optik emisyon spektrumlarını yorumlama işlemine geçmeden önce, çalışılan reaktörün üretildiği malzemenin elektromanyetik spektrumda hangi dalgaboyu aralıklarını geçirdiğinin, hangilerinin ise absorbe edildiğinin bilinmesi gerektiğinden, reaktörün imal edildiği borosilikat (pyrex) cam malzeme üzerinden spektrofotometre (Specord 210 Plus, 200 - 1200 nm) yardımıyla geçirgenlik ve absorbans grafikleri elde edilmiştir. Reaktörün üretildiği borosilikat cam malzemede geçirgenliğin başladığı noktayı tespit edebilmek için, yarı genişlik (geçirgenliğin yüzdece maksimum olduğu seviyenin yarısı kadarlık kısmının dalgaboyunu kestiği nokta) veya kesme dalgaboyu (alınan teğet eğrisinin dalgaboyu değerini kestiği nokta) yaklaşımları kullanılabilir.

Malzeme üzerinde geçirgenliğin artış gösterdiği dalgalıboyları üzerine çizilen teğetin eğrisinin oluşturduğu alanlar yaklaşık olarak eşit kabul edilebilir. Bu sebeple maksimum dalgalıboyu tespit edilerek geçirgenliğin başladığı dalgalıboyu maksimum dalgalıboyunun yarısı olarak belirlenebilir.

Reaktöre ait geçirgenlik ve absorbands eğrisi Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 ile verilmektedir.



Şekil 5.1. Düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörüne ait geçirgenlik eğrisi.

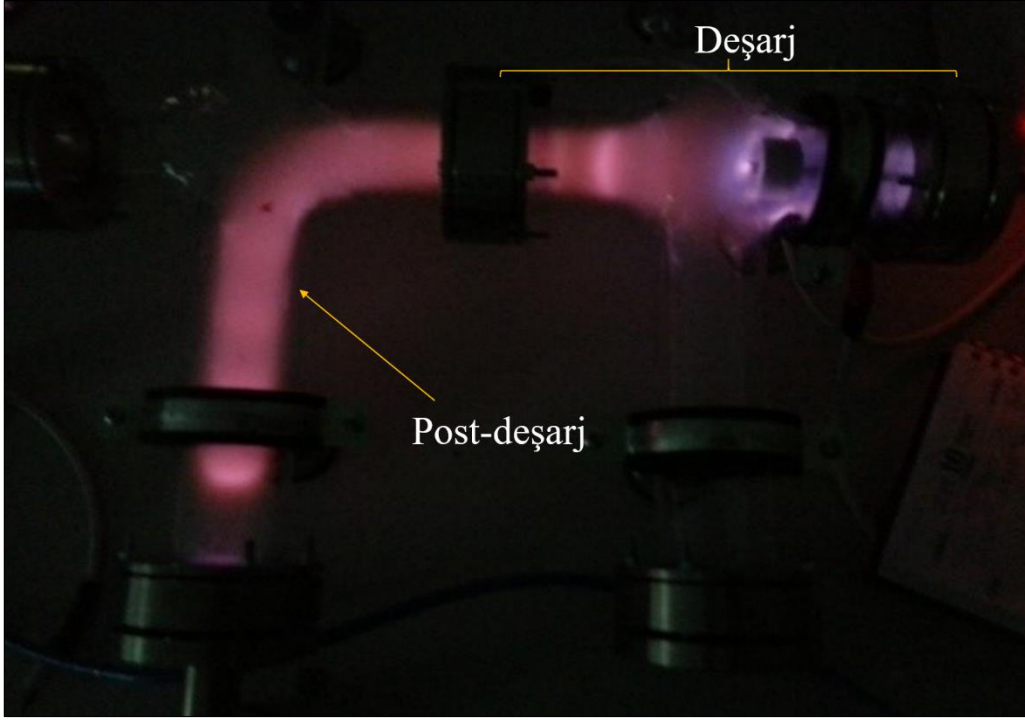


Şekil 5.2. Düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörüne ait absorbands eğrisi.

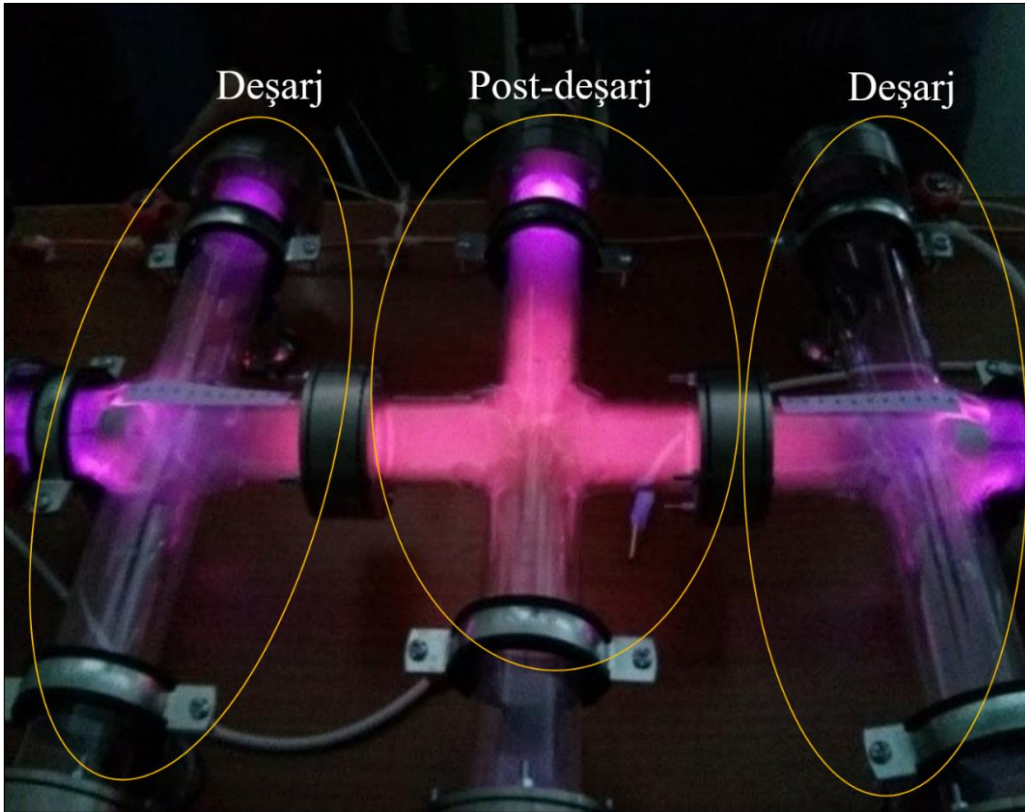
Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’ de görüldüğü gibi reaktörün spektral geçirgenliği 225 nm’ de başlayan, yaklaşık % 91 - 92 oranında düzgün bir geçirgenliğe sahip, morötesi bölgeyi absorbe etmiş, insan gözünün algılayabildiği 300 - 400 nm ile 900 nm’ lik görünür bölgedeki ışığı geçirebilen bir yapıya sahip olduğu söylenebilir. 900 nm’ den sonraki yakın-infrared bölgede de aynı oranda yüksek geçirgenliğe sahip olduğu görülmektedir. Bu grafiklere göre, plazma ortamında oluşacak elektromanyetik ışınların % 8’ lik bir kısmı absorbe olacağından, düşük basınçta gerçekleştirilecek çalışmalarda ölçülecek elektromanyetik ışınların şiddet değerlerinde düşmenin oluşması beklenen sonuçlar arasında olacaktır. Deneysel çalışmalarda kullanılacak reaktör camının dayanıklı olması hedeflendiği için, içeriğindeki elementlerin çokluğu geçirgenlikte % 8’ lik bir düşüşe sebep olmaktadır. % 8’ lik absorbe edilen kısımda şiddetin net değerleri için yaklaşık olarak yüzdeler cinsinden hesaplamalar yapılabilir. Geçirgenliği tespit edilen borosilikat cam reaktör ile gerçekleştirilecek deneysel çalışmalarda atmosferik hava, helyum, argon ve oksijen gazları kullanılarak üretilen deşarj ve post-deşarj plazmaların temel özelliklerine bu kısmın alt başlıklarında yer verilecektir.

### **5.1.1. Düşük basınçta atmosferik havanın post-deşarj plazmasının üretimi ve karakterizasyonu**

Sistemde yer alan gaz giriş vanası çok çok küçük gaz akış hızları için açılarak reaktör vakumlandığında, reaktörde sürekli olarak atmosferik havanın vakumlanmış bir bölümü bulunmaktadır. Bu işlem sırasında reaktör içi basıncın görece düşük mertebelerde tutulması istendiğinden, atmosferik hava ortamına açılan vanadan  $f_{hava} = 0,001$  l/dk hızında atmosferik hava gönderimi gerçekleştirilmiştir. Reaktör içerisinde atmosferik havanın deşarj ve post-deşarj plazmalarının üretimi esnasındaki görünümü Şekil 5.3 ve Şekil 5.4 ile verilmektedir. Şekil 5.3’ te tek bir güç kaynağı kullanılarak deşarj ve post-deşarj plazmaların oluşumu gerçekleştirilmiştir. Yüksek voltaj elektrotunun bulunduğu alüminyum elektrota yakın deşarj bölgesinde kesikli yapıların oluştuğu, elektrotlar arasından çıkarılan post-deşarj plazmanın ise sürekli yapıda olduğu görülmektedir. Şekil 5.4’ te ise reaktörün her iki kısmında bulunan deşarj odalarında deşarj plazma üretimi gerçekleştirilerek plazmanın post-deşarj odasına akıtılması işlemi görülmektedir.

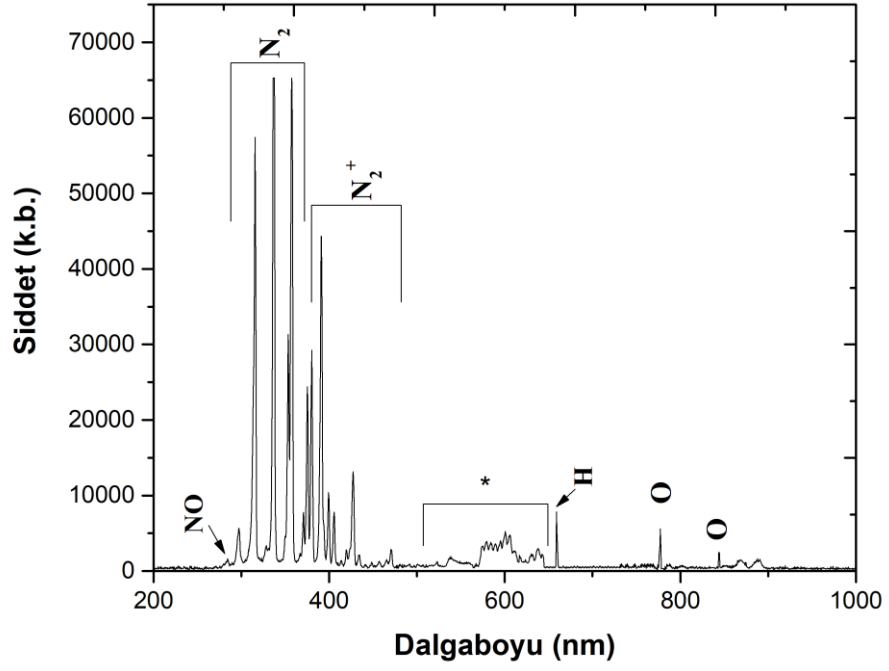


**Şekil 5.3.** Tek bir güç kaynağı kullanılarak üretilen düşük basınçta atmosferik havanın deşarj ve post-deşarj plazmasının reaktör içerisindeki görünümü.

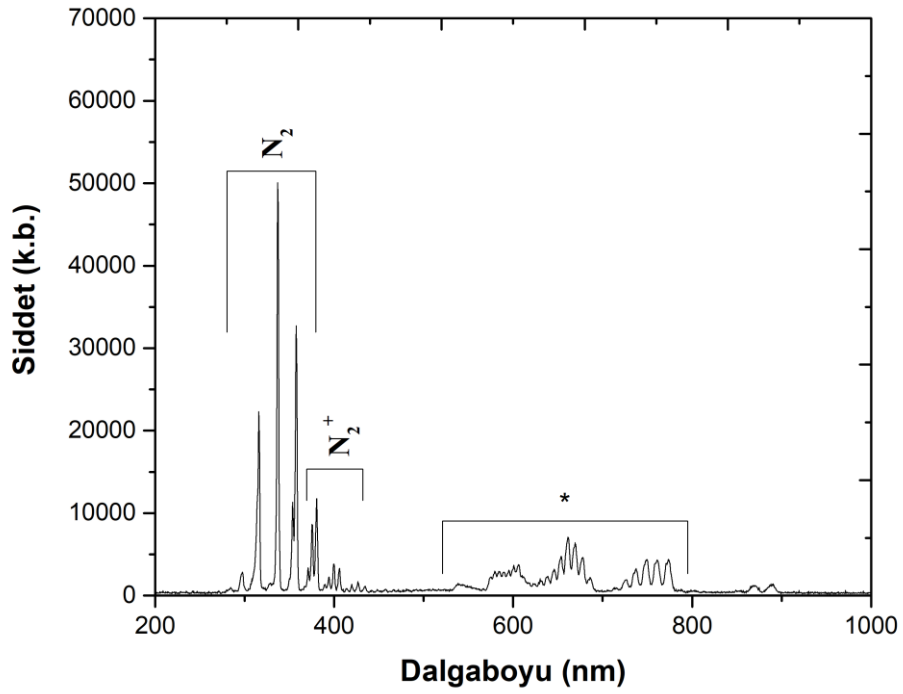


**Şekil 5.4.** İki güç kaynağı kullanılarak üretilen atmosferik havanın deşarj ve post-deşarj plazmasının reaktör içerisindeki görünümü.

Burada, soğuk akan post-deşarj plazma reaktörüne gönderilen atmosferik hava içerisinde yer alan gazların iyonizasyonu sonucu, plazma oluşturma işlemi düşük basınçta gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.4' te görüldüğü gibi atmosferik havanın post-deşarj plazması, nicel olarakdeşarj bölgesinden daha yoğun bir şekilde gözlenmektedir. Öte yandan reaktör içi basınç ve gaz akış hızı sabit tutularak ( $p_{hava} = 1,0 \times 10^{-2}$  mbar,  $f_{hava} = 0,001$  l/dk) üretilen atmosferik havanındeşarj plazmasına ait optik emisyon spektrumları (reaktör ile prop arası  $90^\circ$  açı yapacak şekilde) Şekil 5.5 ile, atmosferik havanın etkileşim odasında yer alan optik emisyon spektrumları ise Şekil 5.6' ile verilmektedir.



**Şekil 5.5.** Atmosferik havanın deşarj odasında üretilen plazmasının optik emisyon spektrumu.



**Şekil 5.6.** Atmosferik havanın etkileşim odası üzerinden alınan optik emisyon spektrumu.



Şekil 5.5 incelendiğinde, 283 nm' de oldukça düşük ışınım konsantrasyonlarda NO radikalının deşarj plazma içerisinde yer aldığı görülmektedir. 297 - 357 nm aralığında yer alan şiddetli pikler, atmosferik havada büyük oranda bulunan azot moleküllerinin yüksek voltaj etkisi ile iyonlaşması sonucu meydana gelmektedir. Bu bölgedeki uyarılmış ve iyonlaşmış azot molekülü grupları, plazma içerisinde yer alan serbest elektronların bu grupla etkileşimleri sonucunda oluşmaktadır. Moleküler yapısından bir elektronunu kaybeden azot molekülleri, optik emisyon spektrumunda literatürle uyumlu olarak 375 - 470 nm dalgaboyu aralıklarında gözlemlenmektedir (Itikawa, 2007). Öte yandan atmosferik havada bulunan hidrojenin 656 nm' de, oksijenin ise 777 ve 844 nm dalgaboyu değerlerindeki uyarılmaları da tespit edilmiştir. 777 nm ve 844 nm dalgaboyu değerlerine sahip oksijen atomları, tespit edilen radikal oksijen atomlarıdır (NIST, 2017).

Şekil 5.6' da atmosferik havanın etkileşim odasındaki post-deşarj plazmasının spektrumları incelendiğinde, deşarj bölgesindeki pik şiddetlerine göre bir azalışın olduğu görülmektedir. 290 - 450 nm aralığında görece şiddetli piklerin gözlemlendiği, deşarj plazma bölgesine benzer şekilde görünür bölgedeki ışığın (520 - 780 nm) etkilerinin olduğu görülmektedir. Atmosferik havada yer alan gazların ( $N_2$ ,  $O_2$  ve diğerleri) atomik enerji seviyeleri arasındaki geçişleri literatürde araştırıldığında belirlenen bölge üzerinde, NO (296 nm) ve OH (308 nm) radikalleri,  $N_2$  (337 nm, 357 nm, 380 nm) molekülleri ile  $N_2^+$  (391 nm, 427 nm) iyonlarına ait pikler tespit edilmiştir (NIST, 2017). 300 - 470 nm aralığındaki bölgede, uyarılmış ve iyonlaşmış azot molekülü grupları plazma içerisinde yer alan serbest elektronlarla etkileşimler sonucunda oluşmaktadır. Moleküler yapısından bir elektronunu kaybeden azot molekülleri, deşarj bölgesine benzer şekilde optik emisyon spektrumunda 375 - 470 nm dalgaboyu aralıklarında gözlemlenmektedir (Itikawa, 2007). Deşarj bölgesinde üretilen radikal oksijen atomlarının post-deşarj plazma bölgesinde gözlemlenemediği görülmüştür. Bu durum deşarj plazma içerisindeki yüksek enerjili atom ve molekül gruplarının post-deşarj bölgesine geçişi sırasında enerjilerini kaybettikleri ve radikal O atomlarını üretilmediği anlamına gelmektedir.

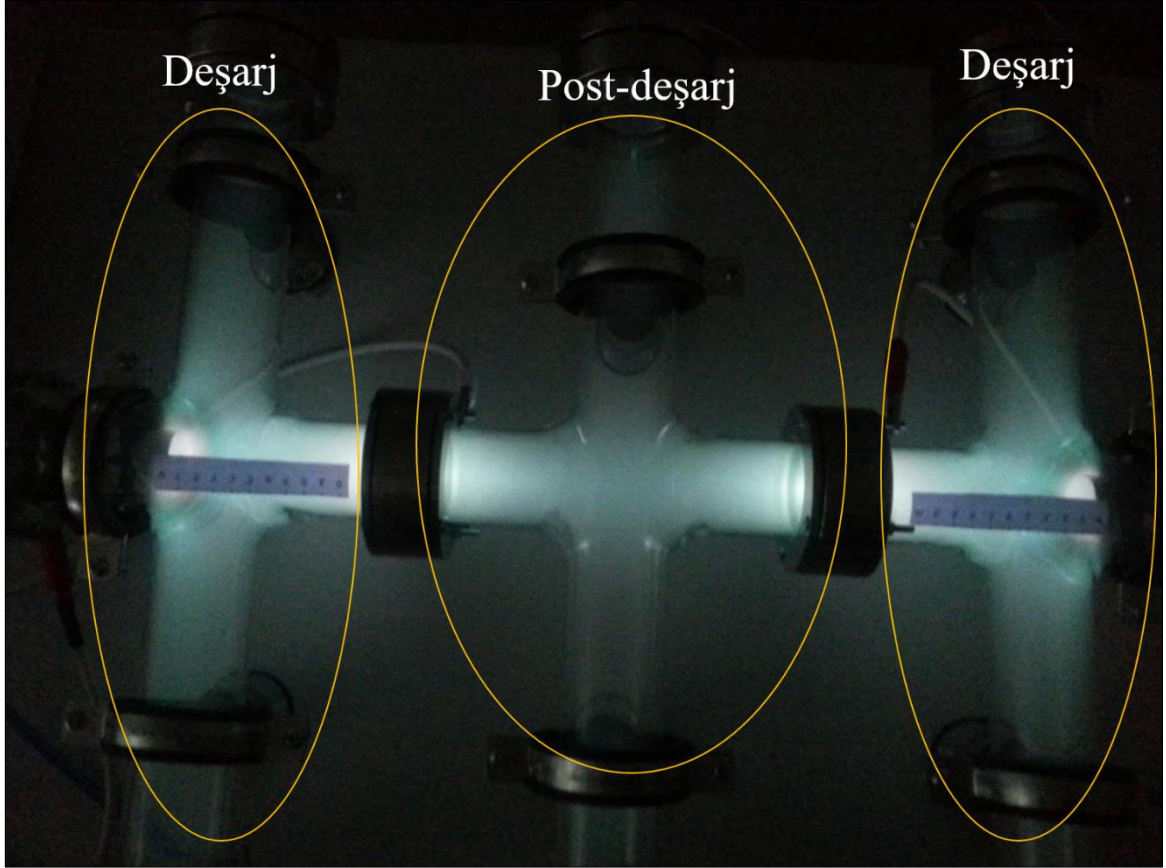
Şekil 5.5 ve Şekil 5.6' da yıldız (\*) ile işaretlenmiş kısım, elektromanyetik spektrumun görünür bölgesine karşılık gelen gün ışığının etkilerini temsil etmektedir. Bu bölge deneysel çalışmalarda ihmal edilebilir bir bölgedir. Plazmaların üretildiği ortam ışık

almayan bir ortam olduğunda, belirlenen dalgalarda piklerin bulunmayacağı edinilen bilgiler arasındadır.

Öte yandan güç kaynağının frekansına bağlı olarak, frekans arttırıldığında belirlenen dalgalarda değerlerinde ölçülen şiddetin belirgin bir düzeyde azaldığı belirlenmiştir. Bu durum uygulanan yüksek frekansın, iyonlaşma süreçlerini kritik düzeyde etkilediğini göstermektedir.

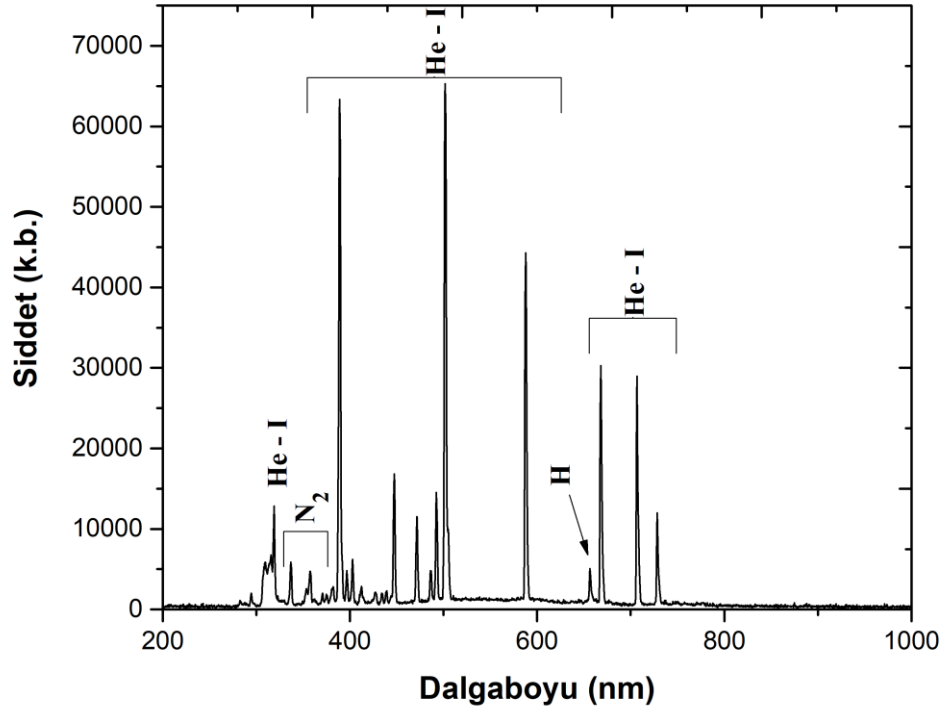
### 5.1.2. Düşük basınçta Helyum gazı post-deşarj plazma üretimi ve karakterizasyonu

Bu kısımda, düşük basınçta helyum gazının (Habaş, % 99,999 saflıkta)deşarj ve post-deşarj plazmalarını elde edebilmek amaçlanmıştır. Reaktör içerisindeki en düşük basınç değeri  $p = 5,0 \times 10^{-2}$  mbar civarındadır. Öncelikle oluşturulan bu reaktördekideşarj ve post-deşarj plazmaların üretiminde zamanın etkin bir faktör olup olmadığının belirlenebilmesi amacıyla, He gazınındeşarj ve post-deşarj plazmaları üzerinden, optik emisyon spektrometresinin fiber kablosu reaktör üzerinde  $90^\circ$  lik açı yapacak şekilde emisyon spektrumları alınmıştır. Farklı akış hızlarında yapılan deneysel çalışmalar için seçilen He gaz akış hızları sırasıyla; 0,050, 0,100, 0,150 ve 0,200 l/dk olarak belirlenmiştir. Belirlenen akış hızları için 1 - 20 dk'lık periyotlarla oluşturulan Hedeşarj ve post-deşarj plazmalarının optik emisyon spektrumları gözlemlenmiştir. Şekil 5.7' de  $f_{He} = 0,1$  l/dk akış hızında He gazının reaktörde üretilendeşarj ve post-deşarj plazmalarının fotoğrafları yer almaktadır. Reaktör içerisine He gazı gönderildikten sonra, AC güç kaynakları çalıştırılarak reaktör içerisinde bulunan He gazının iyonize olması sonucunda, sistem basıncında küçük dalgalanmalar olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun reaktör içerisinde bulunan yabancı gazların buharlaşması sonucu olduğu düşünülmektedir. Üretilendeşarj ve post-deşarj plazmalarda zamana bağlı değişimler incelendiğinde, He gazının spektral analiz verilerinde bir değişimin söz konusu olmadığı (emisyonların sürekli olarak aynı nokta üzerinden alınması kaydıyla) tespit edilmiştir. Öte yandan gaz akış hızının değişmesi durumunda ise elde edilen optik emisyon spektrumlarında konsantrasyon farklılıkları meydana gelmektedir. Bu sebeple zamana bağlı olmayan sabit gaz akış hızlarının sağlandığı durumların incelenmesi işlemine geçiş yapılmıştır.

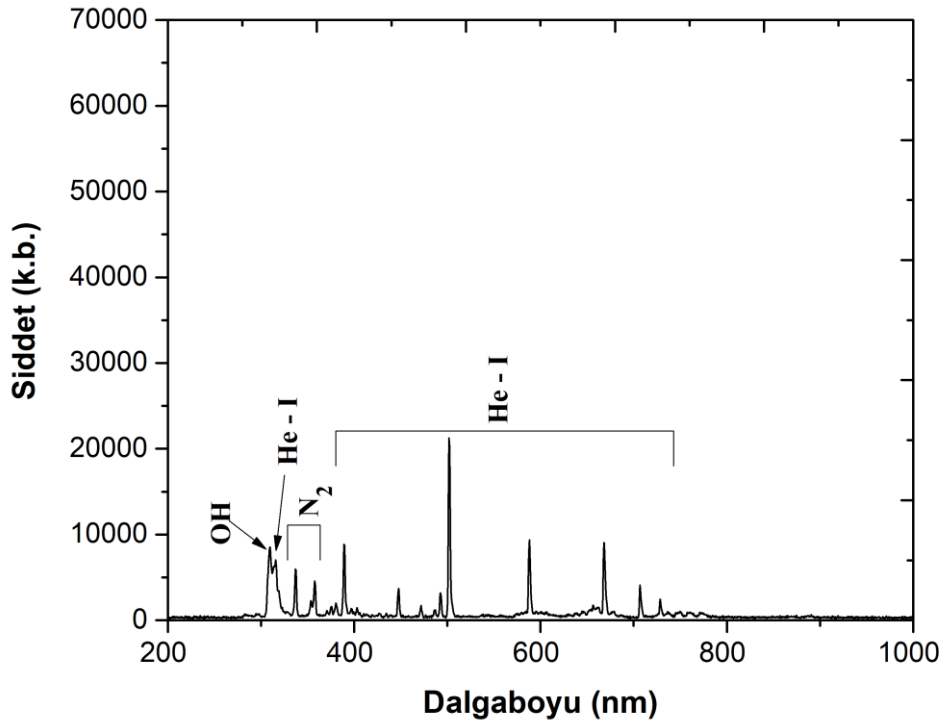


**Şekil 5.7.** İki güç kaynağı kullanılarak üretilen He gazının deşarj ve post-deşarj plazmasının reaktör içerisindeki görünümü.

Bölüm 5.1.1.' de detaylarına değinilen benzer prosedürler He gazı için uygulanarak, He gazının deşarj ve post-deşarj plazma odaları üzerinden optik spektrumlar optik emisyon spektrometresinin fiber kablosu yardımıyla (reaktör ile prop arası  $90^\circ$  açı yapacak şekilde) elde edilmiştir. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9' da deşarj ve post-deşarj bölgesindeki optik emisyon spektrumları yer almaktadır. Şekil 5.8' de yer alan He gazının deşarj plazmasına ait emisyon spektrumları incelendiğinde, 300 - 750 nm dalgaboyu aralığına sahip emisyon bölgesinde He gazının uyarılmış atomlarına ait piklerin yoğunlukta olduğu görülmektedir. Reaktör içinin tümüyle vakumlanmamış olması sebebiyle, deşarj ortamında bulunan yabancı gazların etkileri He gazının yüksek derecede iyonizasyonu sebebiyle optik emisyon spektrumunda perdelenmiştir. Öte yandan deşarj plazma içerisinde He gazının uyarılmış atomlarına kıyasla görece daha düşük konsantrasyonlarda  $N_2$  (337 nm) ve uyarılmış H atomları (656 nm) tespit edilmiştir (NIST, 2017).



Şekil 5.8. Helyum gazının deşarj odasında üretilen plazmasının optik emisyon spektrumu.



Şekil 5.9. Helyum gazının etkileşim odası üzerinden alınan optik emisyon spektrumu.

Şekil 5.9' da elektrik alan içerisinde çıkarılarak etkileştirilen post-deşarj plazmalarda uyarılma süreçlerinin ışınım konsantrasyonlarında azalış olduğu görülmektedir. He gazının etkileşim noktası üzerinden alınan optik emisyon spektrumları incelendiğinde, 308 nm' de etkileşen post-deşarjların oluşturduğu OH radikallerine rastlanmıştır. Deşarj bölgesine benzer şekilde He gazının uyarılmış atomlarına ait piklerin, ortamdaki yabancı gazların ( $N_2$ ,  $N_2^+$  vb.) etkilerini perdelediği görülmektedir.

Öte yandan He gazının post-deşarj plazmasının oluşumu esnasında frekans değeri sabit tutulup (15 kHz), uygulanan voltaj kademeli olarak değiştirildiğinde aşağıdaki olaylar gözlemlenmiştir:

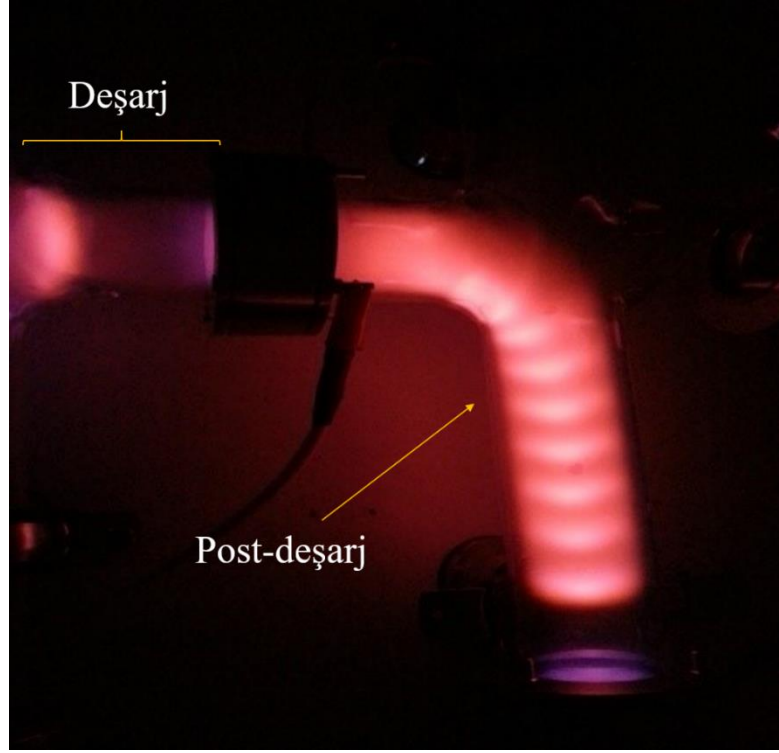
- i.** Elektrotlar arasına 6 kV voltaj uygulandığında,  $9,5 \times 10^{-1} - 8,0 \times 10^{-2}$  mbar basınç değerleri arasında post-deşarj plazmanın oluşabildiği gözlemlenmiştir.
- ii.** Elektrotlar arasına 12 kV voltaj uygulandığında,  $1,6 \times 10^0 - 3,6 \times 10^{-1}$  mbar basınç değerleri arasında post-deşarj plazmanın oluşabildiği gözlemlenmiştir.
- iii.** Elektrotlar arasına 18 kV voltaj uygulandığında,  $2,7 \times 10^0 - 1,6 \times 10^{-1}$  mbar basınç değerleri arasında post-deşarj plazmanın oluşabildiği gözlemlenmiştir.
- iv.** Güç kaynağı ile elektrotlar arasına uygulanan potansiyel fark arttırıldığında, deşarj bölgesinde nicel olarak birden fazla renk gözlemlenebilirken (açık mavi, mor, kırmızı, yeşil), post-deşarj bölgesinde ise beyaza yakın bir rengin hâkim olduğu görülmektedir.

Buna göre post-deşarj plazmaların oluşumunda deşarj bölgesine uygulanan voltaj değeri arttırıldığında, etkileşim bölgesindeki post-deşarjın oluştuğu ve uygulanan voltaj ile reaktör iç basıncı arasında bir orantı olduğu görülmektedir. Bu durum beklenen bir sonuç olup, uygulanan voltaj azaltıldığında oluşturulan elektrik alan içerisinde gazların uyarılma ve iyonlaşmasına yetecek kadar enerjinin sağlanamaması olarak açıklanabilir. Post-deşarj oluşumu için düşük voltaj değerlerinde ortamın vakum değerinin de düşürülmesi gereklidir. Aksi takdirde, reaktörün etkileşim bölgesinde post-deşarj plazma oluşumu gözlenemez.

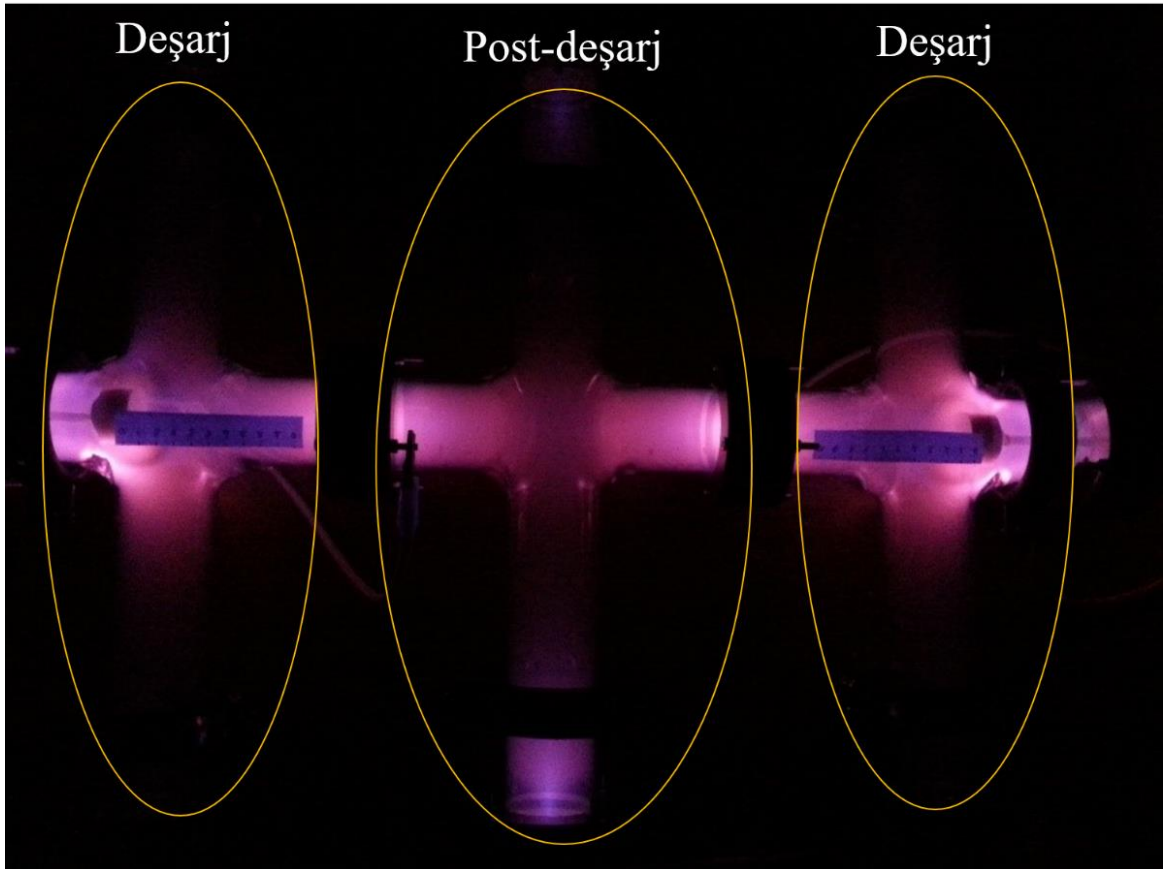
Öte yandan güç kaynağının frekansına bağlı olarak, frekans arttırıldığında belirlenen dalgaboyu değerlerinde ölçülen şiddetin belirgin bir düzeyde azaldığı belirlenmiştir. Bu durum uygulanan yüksek frekansın, iyonlaşma süreçlerini kritik düzeyde etkilediğini göstermektedir.

### 5.1.3. Düşük basınçta Argon gazı post-deşarj plazma üretimi ve karakterizasyonu

Bu kısımda düşük basınçta argon gazının (Habaş, % 99.999 saflıkta)deşarj ve post-deşarj plazmalarını düşük basınçlarda elde edebilmek amaçlanmıştır. Reaktör içerisinde inilebilen en düşük basınç değeri  $p = 5,0 \times 10^{-2}$  mbar olup, bu değer dijital basınçölçer ve vakum ölçüm bağlantısı yardımıyla ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarda zamanındeşarj ve post-deşarj plazma üzerinde etkin bir faktör olup olmadığının belirlenebilmesi amacıyla Ar gazınındeşarj ve post-deşarj plazmaları üzerinden, optik emisyon spektrometresinin fiber kablosunun probu reaktör üzerinde  $90^\circ$  lik açı yapacak şekilde emisyon spektrumları alınmıştır. Farklı akış hızlarında yapılan deneysel çalışmalar için seçilen Ar gaz akış hızları sırasıyla 0,050, 0,100, 0,150, 0,200 l/dk olarak belirlenmiştir. Belirlenen akış hızları için 1 - 20 dk'lık periyotlarla oluşturulan Ardeşarj ve post-deşarj plazmalarının optik emisyonları gözlemlenmiştir. Deneysel çalışmalar süresince reaktördeki basınç değişimleri incelendiğinde, plazma oluşumu esnasında çalışma basıncının neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Bu çalışma sonucundadeşarj ve post-deşarj plazmalarında optik emisyon verileri bakımından bir değişim olmadığı görülmüştür. Öte yandan Ardeşarj ve post-deşarj oluşumunda gaz akış hızı arttığında,deşarj plazmanın uniform yapısının bozularak ark yapısına doğru bir yönelim oluşturduğu gözlemlenmiştir.  $p_{Ar} = 4,0 \times 10^{-1}$  mbar basınçta ve  $f_{Ar} = 0,050$  l/dk' da Ar gazınındeşarj post-deşarj plazmasına ait fotoğrafları Şekil 5.10 ve Şekil 5.11' deki gibidir.



Şekil 5.10. Ar gazının deşarj ve post-deşarj plazmasının bir güç kaynağı ile üretimi.

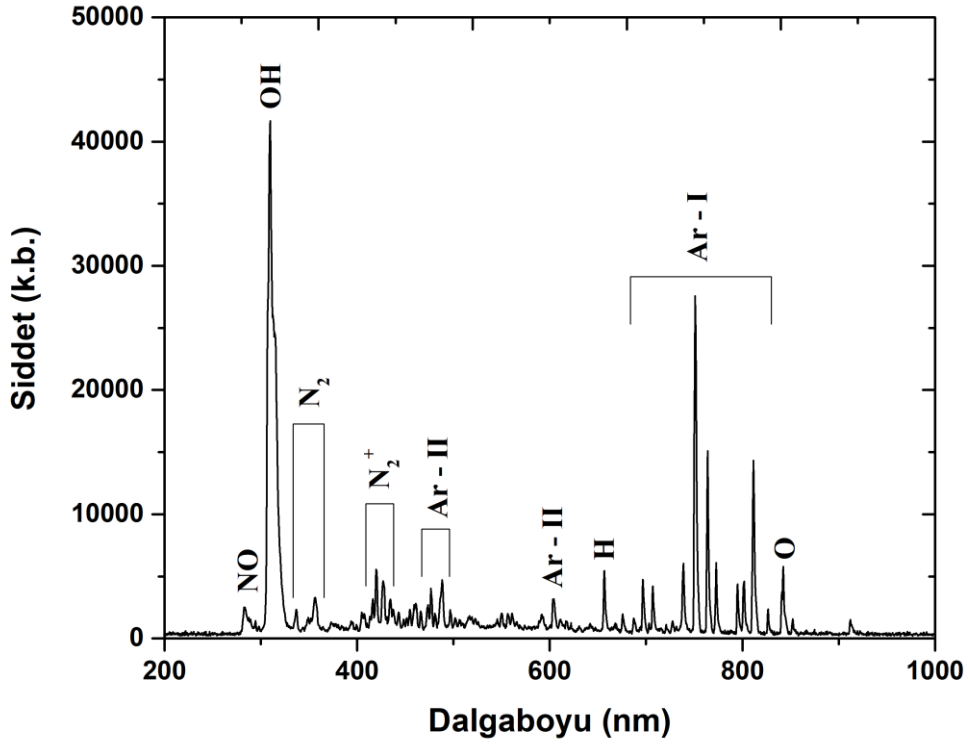


Şekil 5.11. İki güç kaynağı kullanılarak üretilen Ar gazının deşarj ve post-deşarj plazmasının görünümü.

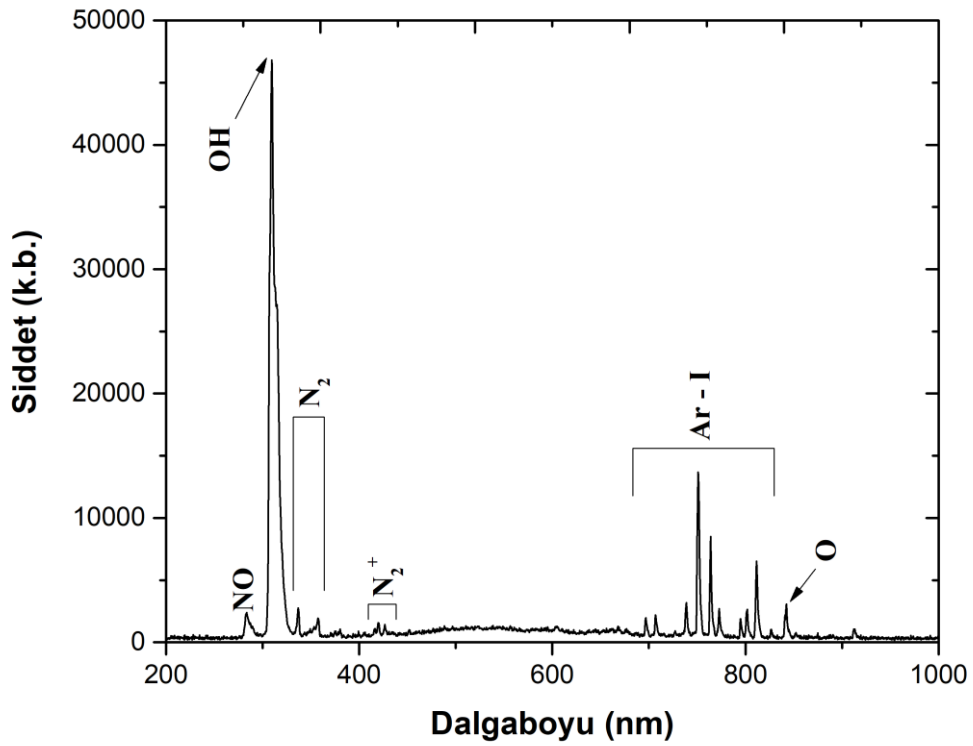
Şekil 5.10' da, tek bir güç kaynağı kullanılarak oluşturulan Ar gazı deşarj ve etkileşim reaktörü içerisindeki post-deşarj plazması görülmektedir. Burada, post-deşarj plazmanın akıtıldığı bölgede DC güç kaynakları ile oluşturulan plazmalara benzer şekilde alternatif akım güç kaynağı kullanıldığında plazma içerisinde kesikli bir yapının oluştuğu görülmektedir. Oluşan bu yapılar üzerinden alınan ölçümlerde diğer bölgelere nazaran görece yüksek şiddetler tespit edilmektedir. Şekil 5.11' de ise Ar gazı kullanılarak üretilmiş deşarj ve etkileşim reaktörü içerisindeki post-deşarj plazmaların fotoğrafı yer almaktadır. Burada deşarj ve post-deşarj bölgelerinin oluşumu açıkça görülmektedir. Ayrıca iki deşarjın üretimi esnasında kesikli yapıların oluşmadığı edinilen gözlemler arasındadır.

Reaktörün deşarj bölgesi üzerinden alınan optik emisyon spektrumu Şekil 5.12' de, Ar gazının etkileşim odasında yer alan post-deşarj plazmasına ait optik emisyon spektrumu ise Şekil 5.13' te yer almaktadır.





Şekil 5.12. Argon gazının deşarj odasında üretilen plazmasının optik emisyon spektrumu.



Şekil 5.13. Argon gazının etkileşim odası üzerinden alınan optik emisyon spektrumu.

Ar gazının deşarj plazmasına ait karakteristik piklerin 476 nm, 488 nm, 604 nm, 696 nm, 706 nm, 738 nm, 750 nm, 763 nm, 772 nm, 795 nm, 801 nm, 811 nm ve 826 nm' de gözlenebildiği görülmektedir. Belirlenen dalgalıboylarında yapılan spektral analizler sonucunda 696 nm, 706 nm, 738 nm, 750 nm, 763 nm, 772 nm, 795 nm, 801 nm, 811 nm ve 826 nm dalgalıboylarında uyarılmış Ar atomlarına (Ar-I) rastlanmıştır. Öte yandan 476 nm, 488 nm ve 604 nm dalgalıboylarında görülen piklerin iyonlaşmış Ar atomları (Ar-II) olduğu da edinilen bilgiler arasında yer almaktadır. Her iki deşarj odası üzerinden alınan spektrumlarda 280 - 400 nm aralığında Ar gazına ait olmayan bazı elektronik geçişlerin olduğu da görülmektedir (NIST, 2017). Ayrıca deşarj plazma içerisinde 656 nm dalgalıboyunda uyarılmış H atomlarına rastlanmıştır. Bu durum reaktör içerisinde tümüyle vakumlanmamış olmasından kaynaklanmakta olup, 283 nm' de NO radikalleri, 308 nm' de OH radikalleri ile 320 - 480 nm aralığında N<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub><sup>+</sup> iyonlarına rastlanmaktadır.

Şekil 5.13' e göre Ar gazının etkileşim odasındaki post-deşarj plazmasına ait karakteristik piklerin şiddetlerinin azaldığı ve hatta bazı dalgalıboylarının ise hiç gözlemlenemediği görülmektedir. Deşarj bölgesinde 476 nm, 488 nm ve 604 nm dalgalıboylarında görülen iyonlaşmış Ar atomlarının (Ar-II) post-deşarj bölgesinde bulunmadığı görülmektedir. Bu durum plazma içerisindeki yüksek enerjili türlerin (serbest elektronlar) post-deşarj plazma odasına geçişi sırasında Ar atomlarını iyonlaştıramayacak kadar enerjilerini kaybetmelerinden kaynaklanmaktadır. Bu sebeple optik emisyon spektrumunda yalnızca uyarılmış Ar atomlarına (Ar-I) rastlanmaktadır. Öte yandan Ar gazının post-deşarj plazması üzerinden alınan bu spektrumda, Ar gazının deşarj plazması spektrumlarına benzer şekilde, 280 - 400 nm dalgalıboyları aralığında Ar gazına ait olmayan bazı elektronik geçişlerin olduğu da görülmektedir (NIST, 2017). Bu durum reaktör içerisinde tümüyle vakumlanmamış olmasından kaynaklanmakta olup, 283 nm' de NO radikalleri, 308 nm' de OH radikalleri, 330 - 470 nm' de ise N<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub><sup>+</sup> iyonlarına rastlanmaktadır. Deşarj bölgesi ile karşılaştırıldığında OH radikali konsantrasyonunun post-deşarj plazması içerisinde görece düşük bir artış gösterdiği de görülmektedir.

Deneysel çalışmalar süresince reaktördeki basınç değişimleri incelendiğinde plazma oluşumu esnasında çalışma basıncının neredeyse sabit kaldığı görülmektedir. Reaktör içerisine gaz gönderildikten sonra, AC güç kaynakları çalıştırılarak reaktör içerisinde bulunan Ar gazını iyonize etmesi sonucunda sistem basıncında anlık küçük dalgalanmalar

olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun ise, reaktör içerisinde bulunan yabancı gazların buharlaşması sonucu oluştuğu düşünülmektedir.

Oluşturulan deşarj ve post-deşarj plazmalarda zamana bağlı değişimler incelendiğinde, Ar gazının spektral analiz verilerinde bir değişimin söz konusu olmadığı (emisyonların sürekli olarak aynı nokta üzerinden alınması kaydıyla) edinilen bilgiler arasındadır. Gözlemler neticesinde spektroskopik ölçümlerin alınma sıklığı ne kadar değişse de, oluşturulan deşarj ve post-deşarj plazmaların (uygulanan voltaj, frekans sabit kalmak kaydıyla) karakteristiğinin yalnızca sistem basıncına bağlı olduğu tespit edilmiştir. O halde, farklı gaz akış hızları ile oluşturulan plazmaların optik karakteristiğinin değiştiği anlaşılmaktadır.

Öte yandan Ar gazının post-deşarj plazmasının oluşumu esnasında frekans değeri sabit tutulup (15 kHz), uygulanan voltaj kademeli olarak değiştirildiğinde aşağıdaki olaylar gözlemlenmiştir:

- i.  $2,4 \times 10^{-1} - 6,5 \times 10^{-2}$  mbar basınç değerleri arasında post-deşarj plazmanın oluştuğu gözlemlenmiştir (6 kV - 15 kHz).
- ii.  $3,6 \times 10^{-1} - 4,4 \times 10^{-2}$  mbar basınç değerleri arasında post-deşarj plazmanın oluştuğu gözlemlenmiştir (12 kV - 15 kHz).
- iii.  $4,0 \times 10^{-1} - 4,2 \times 10^{-2}$  mbar basınç değerleri arasında post-deşarj plazmanın oluştuğu gözlemlenmiştir (18 kV - 15 kHz).
- iv.  $2,4 \times 10^{-1} - 6,5 \times 10^{-1}$  mbar basınç değerleri arasında deşarj plazma ile post-deşarj plazmanın nicel gözlemi sırasında renk farklılıkları görülmektedir. Deşarj plazma mavi ve lacivert renklerini alırken post-deşarj plazma ise pembe ve kırmızı gibi renklerde gözlemlenmektedir.
- v. Güç kaynağı ile elektrotlar arasına uygulanan potansiyel fark arttırıldığında, deşarj bölgesinde nicel olarak birden fazla renk gözlemlenebilirken (mavi, mor, pembe), post-deşarj bölgesinde ise tek rengin (kırmızı) hâkim olduğu görülmektedir.

Öte yandan güç kaynağının frekansına bağlı olarak, frekans arttırıldığında belirlenen dalgaboyu değerlerinde ölçülen şiddetin belirgin bir düzeyde azaldığı belirlenmiştir. Bu durum yüksek frekansın iyonlaşma süreçlerini kritik düzeyde etkilediğini göstermektedir.

#### 5.1.4. Düşük basınçta Oksijen gazı post-deşarj plazma üretimi ve karakterizasyonu

Bu kısımda, düşük basınçta oksijen gazının (Habaş, % 99,999 saflıkta)deşarj ve post-deşarj plazmalarını elde edebilmek amaçlanmıştır. Deneysel çalışma öncesi reaktör içerisinde inilebilen en düşük basınç değeri  $p = 5 \times 10^{-2}$  mbar civarındadır. Reaktör içerisinde  $O_2$  gazının  $p = 2,0 \times 10^{-1}$  mbar basınç ve  $f_{O_2} = 0,001$  l/dk gaz akış hızındadeşarj ve post-deşarj plazmalarının görünümü Şekil 5.14 ve Şekil 5.15' teki gibidir.



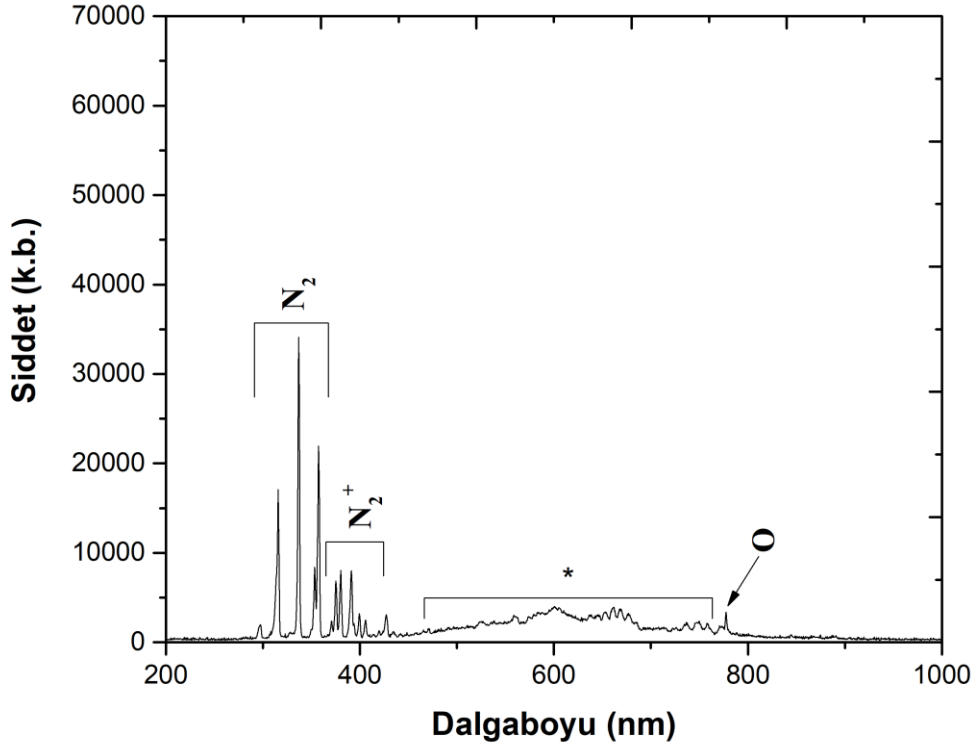
Şekil 5.14. Oksijen gazınındeşarj odasındadeşarj plazmasının üretimi.



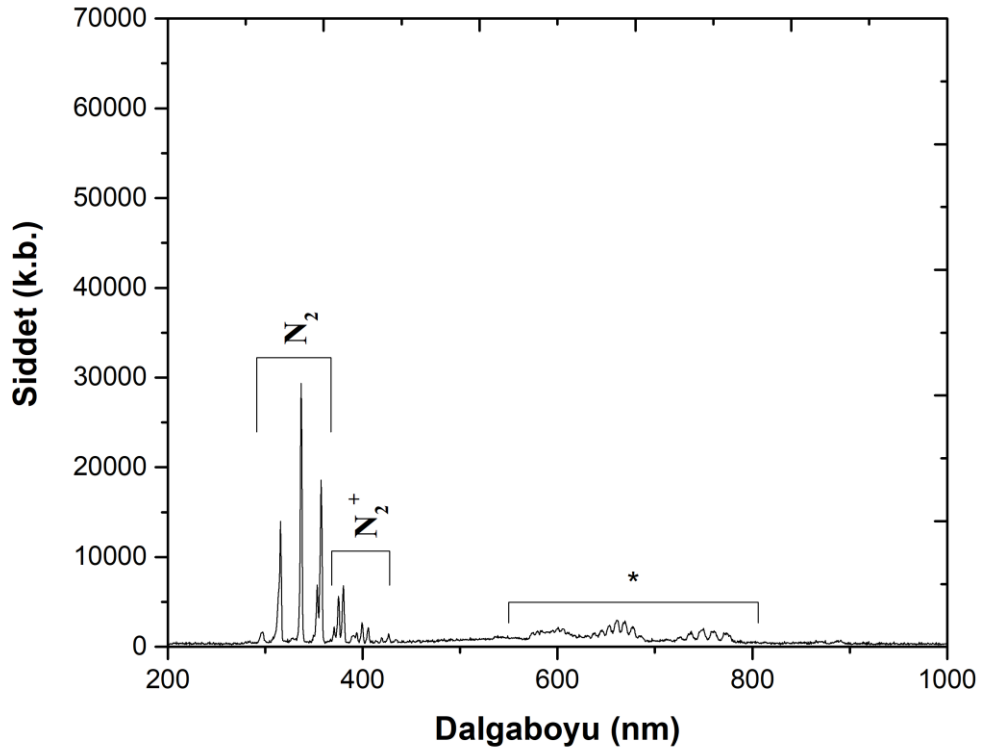
**Şekil 5.15.** Oksijen gazının etkileşim odasında post-deşarj plazmasının üretimi.

Şekil 5.14 ve Şekil 5.15' te  $O_2$  gazı kullanılarak üretilmiş deşarj ve post-deşarj plazmada, nicel olarak plazmanın tespitinin oldukça zor olduğu görülmektedir. Öte yandan çok çok küçük gaz akış hızlarında,  $O_2$  gazının deşarj ve post-deşarj plazmasının üretilmediği de edinilen bilgiler arasında yer almaktadır.

Şekil 5.16' da  $O_2$  gazının elektrotlar arasında üretilen deşarjı üzerinden alınan optik emisyon spektrumu, Şekil 5.17' de ise  $O_2$  gazının etkileşim odası içerisindeki post-deşarj plazmasına ait optik emisyon spektrumu yer almaktadır.



Şekil 5.16. Oksijen gazının deşarj odasında üretilen plazmasının optik emisyon spektrumu.



Şekil 5.17. Oksijen gazının etkileşim odası üzerinden alınan optik emisyon spektrumu.

Şekil 5.16 incelendiğinde, literatürde yer alan spektroskopik çalışmalarda O<sub>2</sub> gazına ait en çok karşılaşılan karakteristik dalgaboyu 777 nm’ de görece düşük şiddetli pik değerlerinin yer aldığı görülmektedir. Bu dalgaboyu değerinde O-I ya da uyarılmış O atomlarının olduğu bilinmektedir. Ancak yalnızca O<sub>2</sub> gazı ile plazma oluşturulmak istendiğinde, bu gazın iyonlaşması için gereken enerjinin deneysel çalışmalarda kullanılan güç kaynaklarından çok daha fazla olması gerektiği açıktır. Bu sebeple oluşturulan bu reaktörde O<sub>2</sub> gazının deşarj ve post-deşarj plazması üretilmek istendiğinde, bu gazın diğer gazların yanında çok düşük yüzdeleri karışımlarının kullanılması gerektiği görülmektedir.

Etkileşim odasındaki O<sub>2</sub> gazı post-deşarj plazması üzerinden alınan emisyon ölçümleri ile karakteristik pik değerinin tam olarak gözlenemediği Şekil 5.17’ den görülmektedir. Deneysel çalışmalar esnasında yapılan nicel gözlemlerde post-deşarj plazmanın beyaz renge yakın bir bulutsu şeklinde oluşabildiği görülmektedir. Ayrıca gaz akış hızı arttırıldığında, post-deşarj plazmanın oluşmadığı edinilen bilgiler arasında yer almaktadır. Akış hızı daha da arttırdığında, sistem basıncı atmosfer basıncına yaklaştığından deşarj odasında ark oluşumları görülmektedir. Bu işlemler sonucunda O<sub>2</sub> gazının post-deşarj plazmasının bireysel olarak oluşturulamayacağı, bunun yerine O<sub>2</sub> gazının sistemlerde karışım gazı olarak kullanılabileceği belirlenmiştir.

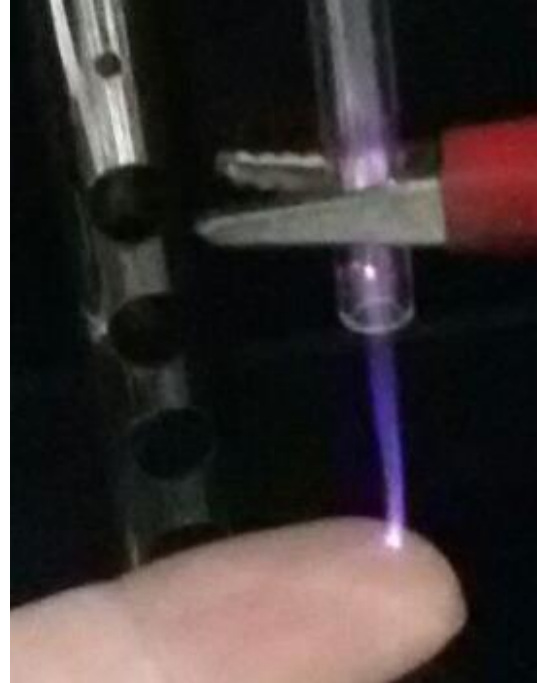
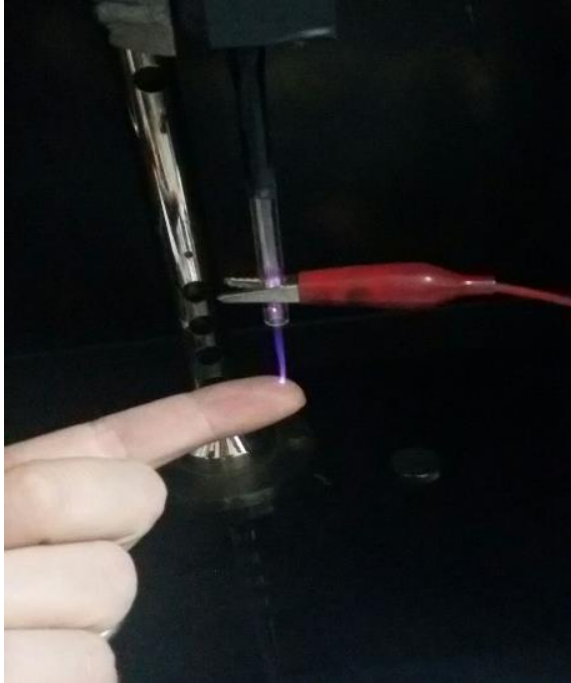
Öte yandan O<sub>2</sub> gazının post-deşarj plazmasının oluşumu esnasında aşağıdaki olaylar gözlemlenmiştir:

- i.** Gözle görünür bölgede nicel olarak deşarj ve post-deşarj plazmalar neredeyse yok gibidir. Yalnızca elektrot çevresinde gözlenebilmektedir.
- ii.** Deşarj plazma beyaz ve buz mavisi renklerini alırken, post-deşarj plazma ise renksiz olarak gözlemlenmektedir. Dolayısıyla post-deşarj plazma ancak OES sonuçlarından belirlenebilmektedir.
- iii.** Güç kaynağı ile elektrotlar arasına uygulanan potansiyel fark arttırıldığında, deşarj ve post-deşarj bölgesinde nicel olarak tek bir renk (beyaz) gözlemlenebilmektedir.

Öte yandan güç kaynağının frekansına bağlı olarak, frekans arttırıldığında belirlenen dalgaboyu değerlerinde ölçülen şiddet değerlerinin belirgin bir düzeyde azaldığı ve post-deşarjın oluşumunun sonlandığı belirlenmiştir. Bu durum, uygulanan yüksek frekansın iyonlaşma süreçlerini kritik düzeyde etkilediğini göstermektedir.

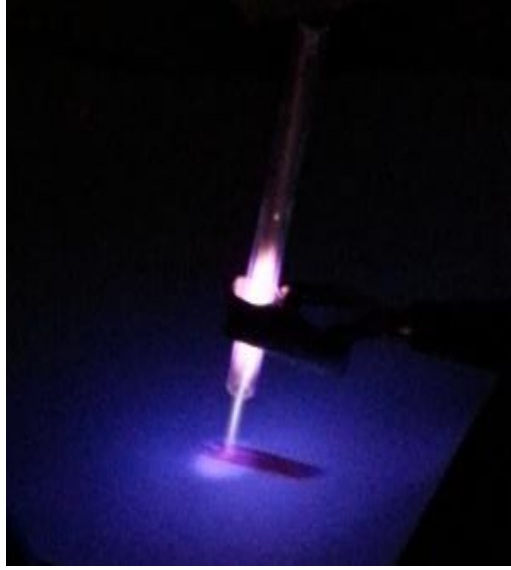
## 5.2. Atmosferik Basıncıta Soğuk Akan Post-Deşarj Plazma (Plazma Jet) Reaktöründeki Deneysel Çalışmalar

Üretilen atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma (plazma jet) reaktörü, reaktöre uygulanan voltaj ve frekansın optimum değerleri belirlenerek insan vücudu üzerine uygulanabilir hale getirilmiştir. Bu işlem sırasında, deneysel ölçümler süresince alternatif akım (AC) güç kaynağının voltaj ve frekansı sırasıyla 6 kV ve 13 kHz değerlerinde sabit tutulmuştur. Bu sayede Şekil 5.18 ve Şekil 5.19’ da Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Soğuk Plazma Laboratuvarı’ nda oluşturulan atmosferik basınç post-deşarj plazmanın insan vücuduna teması ve bir kâğıt üzerine uygulaması görülmektedir.



**Şekil 5.18.** Atmosferik basınç post-deşarj plazmanın (plazma jet) insan tenine teması.





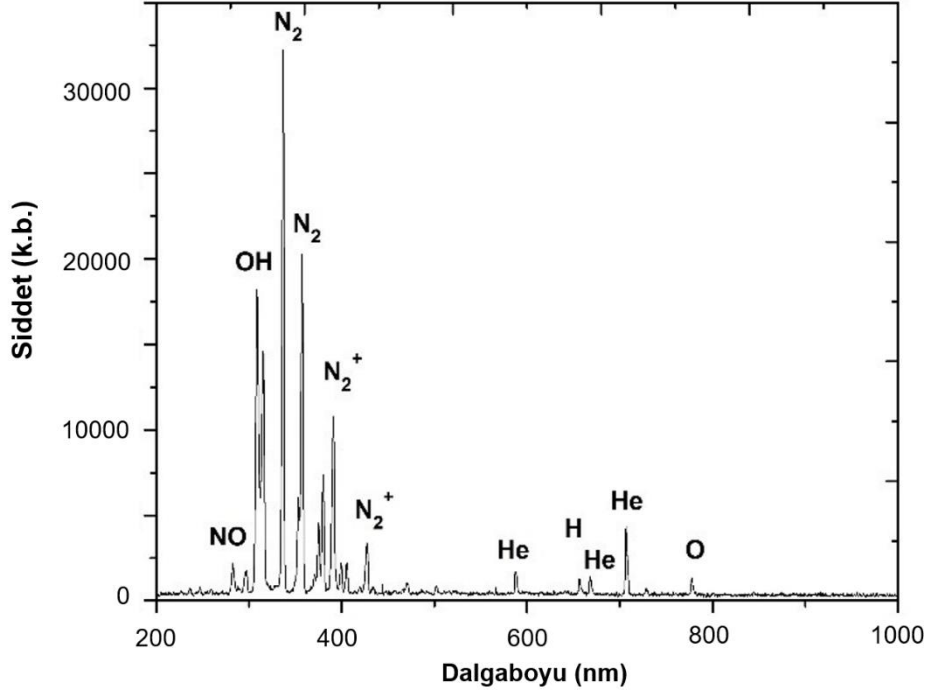
**Şekil 5.19.** Atmosferik basınç post-deşarj plazmanın (plazma jet) bir kâğıt üzerine teması.

Üretilen plazma jetin oda sıcaklığında olduğu ve uygulandığı yüzeye zarar vermediği (sıcaklık etkisiyle) gözlemler arasında yer almaktadır. Bu durumun belirlenebilmesi için üretilen plazma jet bakır metali üzerine uygulanarak belirli periyotlarla metal üzerinden sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta bakır metalinin yüzey sıcaklığı ve laboratuvar sıcaklığı IR termometre (Benetech, GM320) yardımıyla 20 °C olarak belirlenmiş ve metal yüzeyi ile atmosferik basınç post-deşarj plazmanın/plazma jetin temas işlemi gerçekleştirilmiştir. 5 dakikalık uygulama sonunda plazma (ya da gaz) sıcaklığının 20 - 38 °C aralığında değiştiği görülmektedir. Uygulama süresi arttırıldığında sıcaklık değerinin sabit kaldığı da alınan ölçümler sonucu belirlenmiştir. Şekil 5.18 ve Şekil 5.19' dan da görüldüğü gibi, atmosferik basınç post-deşarj plazmanın elektriksel ya da sıcaklık yönünden olumsuz etkileri, gelecekte canlı doku ve organizmalar üzerine yapılması muhtemel çalışmalar için ortadan kaldırılmıştır.

### 5.2.1. Atmosferik basınçta Helyum gazı post-deşarj plazma üretimi ve karakterizasyonu

Bu kısımda, deneysel ölçümler süresince alternatif akım (AC) güç kaynağının voltaj ve frekansı sırasıyla 18 kV ve 15 kHz değerlerinde sabit tutulmuştur. Reaktör alternatif akım güç kaynağı ile çalıştırıldığında, atmosferik basınç post-deşarj/plazma jet üretimi sırasında Helyum gaz akış hızı  $f_{He} = 0,1$  l/dk değerine artırıldığında reaktörde bulunun elektrokimyasal yöntemle sivriltilmiş iğne elektrot ile topraklama görevi gören bakır halka elektrot arasında parlak bir ışığa görülmektedir. Elektrotlar arasında kalan bu parlak kısım,deşarj plazma olarak adlandırılmaktadır. Gaz akış hızının artırılması ile ( $f_{He} \geq 0,6$  l/dk durumunda) plazma, silindirik şekillideşarj yolu içerisinden akarak, toprak bakır halka elektrotu doğru genişlemektedir. Görünür bölgede nicel olarak ta gözlenebilen He plazması, akış hızının artması ile birlikte elektrotlar arasından çıkmaktadır. Gaz akış hızı daha da artırıldığında atmosfer basıncına post-deşarj plazma/plazma jetin çıktığı görülmüştür. Bu süreçte elektrotlar arasından çıkarılan He gazı post-deşarj plazmasının atmosfer ortamında kendine bir koridor oluşturarak atmosfer ortamını iyonlaştırdığı ve ışık huzmesi oluşumunu gerçekleştirdiği görülmektedir.

Post-deşarj plazmalardaki değişim parametrelerin (elektrot tipi, elektrotun üretildiği malzeme, elektrotun şekli, kullanılan akımın türü, voltaj, frekans, gaz türü, gaz akış hızı gibi) yeterince fazla olması sebebiyle, değişim parametresi olarak yalnızca gaz akış hızı tercih edilmiştir. Spektroskopik ölçümler aynı koşullarda üç kez tekrarlanarak ortalama şiddet değerleri belirlenmiştir. Anlık şiddet değişimlerinin etkisini en az seviyeye indirebilmek için optik emisyon spektrometresinin integration time (birleştirme süresi) değeri 1 s' de sabitlenmiştir. Optik emisyon spektrumları plazma jetin oluşturulduğu bölgeden 10 cm uzaklığa sabitlenmiş bir kamera ayaklığı yardımıyla, her ölçümün aynı nokta üzerinden alınması sağlanmıştır. Plazma jet ile spektrometrenin probu arasındaki açı her bir ölçüm işlemi sırasında 90° olacak şekilde ayarlanmıştır. Böylece optik emisyon spektrometresinin fiber kablosu ile üretilen plazma jetin etkileşmesi önlenmiştir. He gazı ile üretilen atmosferik basınç post-deşarj plazma/plazma jeti üzerinden 200 - 1000 nm dalgaboyu aralığında alınan optik emisyon spektrumu Şekil 5.20' deki gibi elde edilmiştir.



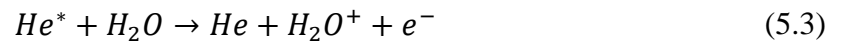
**Şekil 5.20.** He gazının atmosferik basınç post-deşarj plazmasının karakteristik dalgaboyu şiddet grafiği (18 kV, 15 kHz).

Şekil 5.20’ de görüldüğü gibi He gazının atmosferik basınç post-deşarjı üzerinden alınan optik emisyon spektrumunda 283 nm’ de NO, 308 nm’ de OH, 337 nm, 357 nm ve 380 nm’ de N<sub>2</sub>, 391 nm ve 427 nm’ de N<sub>2</sub><sup>+</sup>, 501 nm, 587 nm, 667 nm ve 706 nm’ de He piklerinin literatürle uyumlu olarak bulunduğu görülmektedir (Anghel vd., 2009; Horvatic vd., 2015). NO molekülünün elde edilmesi atmosferik havadaki N<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> moleküllerinin dönüşümünden kaynaklanmaktadır. OH radikalleri ise atmosferik havada bulunan su buharının plazma içerisinde bulunan uzun yaşam süreli türler ve hızlandırılmış elektronların çarpışmalarıyla ayrışmasından kaynaklanmaktadır (Kieft, vd., 2004; Laroussi, vd., 2006). Elde edilen optik emisyon spektrumları incelendiğinde, He gazının atmosferik basınç post-deşarj plazma oluşumu sırasında plazma ortamında yüksek oranda N<sub>2</sub> molekülleri ile N<sub>2</sub><sup>+</sup> iyonlarının iyonize bir biçimde bulunduğu görülmektedir. Atmosfer ortamında gaz yüzdesi bakımından büyük bir oranda bulunan azot moleküllerinin He gazı post-deşarjı ile iyonizasyon sürecine önemli ölçüde dâhil olduğu görülmektedir. Bu durum, He gazı kullanılarak üretilen atmosferik basınç post-deşarj plazma içerisinde Penning-tipi iyonizasyonunun gerçekleştiğini göstermektedir (Tsukiji ve Wagatsuma, 2007). Jet oluşum ortamında atmosferik gazlar yer aldığından, ortamda bulunan herhangi bir M atom ya da

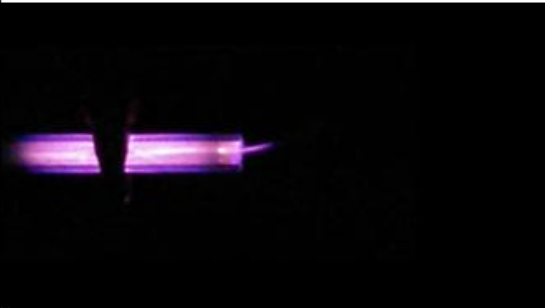
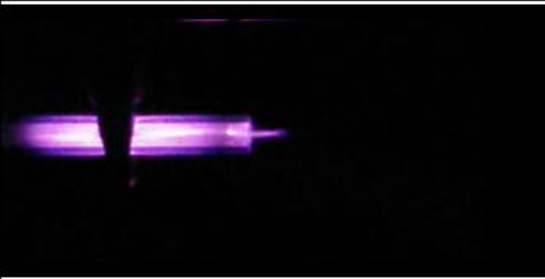
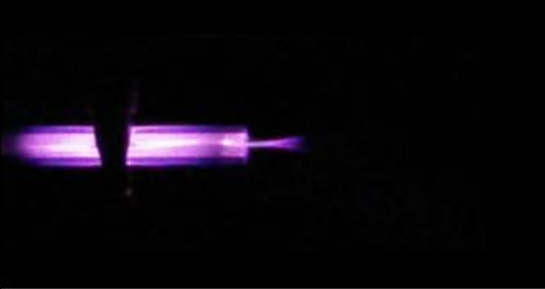
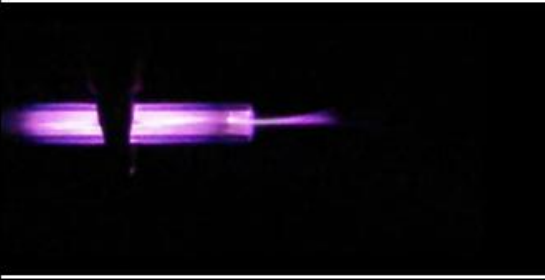
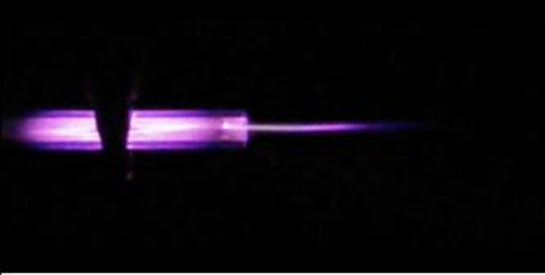
molekülü ile metastable He atomlarının etkileşimi sonucunda aşağıdaki reaksiyon gerçekleşmektedir:



Atmosfer ortamında bulunan  $N_2$  molekülleri ile laboratuvar ortamında bulunan su buharının metastable He atomlarının etkileşim reaksiyonları aşağıdaki gibidir:



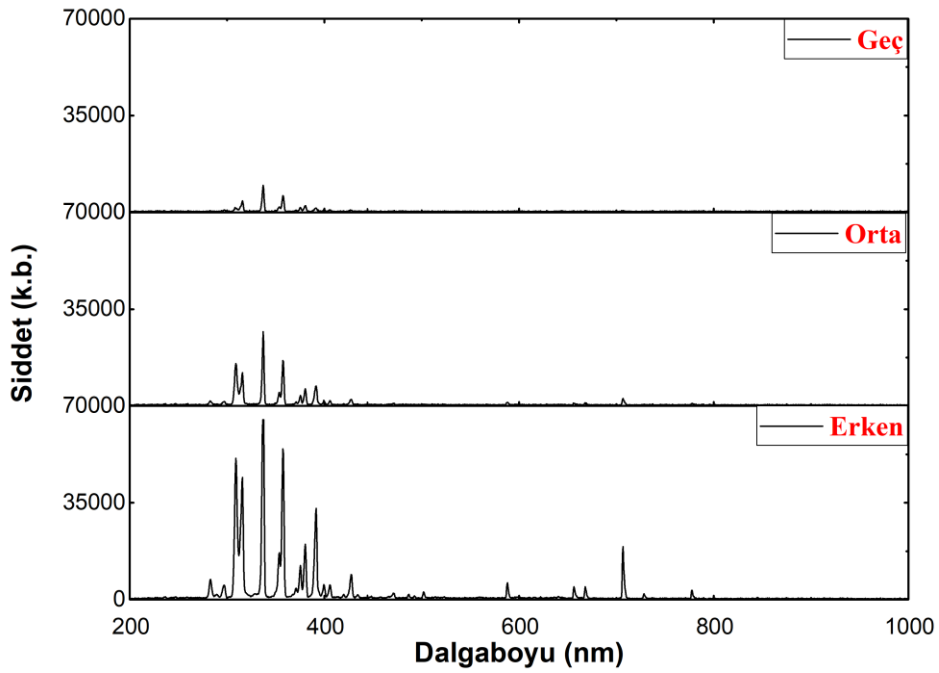
Şekil 5.21' de farklı He gazı akış hızlarında oluşturulan atmosferik basınç post-deşarjın fiziksel boyutlarının değişimleri yer almaktadır.

Gaz Akış Hızı	1 l/dk	2 l/dk	3 l/dk	4 l/dk	5 l/dk
Sistem görünümü					

**Şekil 5.21.** He gazının soğuk akan atmosferik basınç post-deşarj plazmasının gaz akış hızına göre değişimi.

Reaktörde He gazı akış hızı 5 l/dk' ya ayarlandığında, post-deşarj plazmanın atmosfer basıncı ortamındaki uzunluğunun 50 mm' ye kadar çıkabileceği görülmüştür (Ilik ve Akan, 2016). Şekil 5.21' de atmosfer ortamına çıkan post-deşarj plazma Bölüm 3' te detaylarına değinilen ve literatürle uyumlu olarak üç farklı bölgeye ayrılmış olup, bu bölgeler erken, orta ve geç post-deşarj bölgesi olarak sınıflandırılmıştır.

Şekil 5.22' de erken, orta ve geç post-deşarj bölgelerinden sabit voltaj, sabit frekans ve sabit gaz akış hızında alınan emisyon spektrumları yer almaktadır.

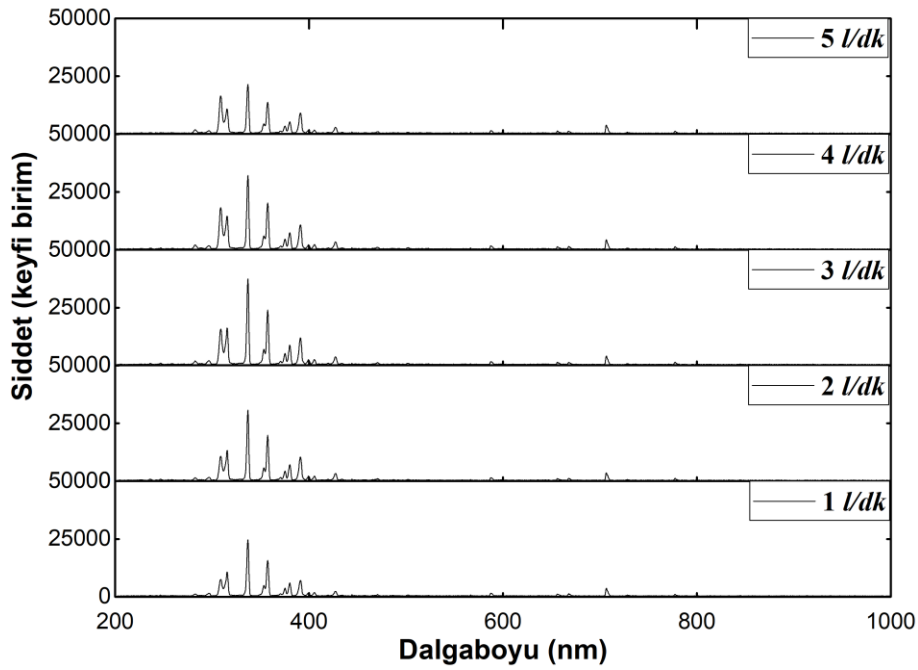


**Şekil 5.22.** Erken - Orta - Geç evrelerinde He gazının atmosferik basınç post-deşarj plazması emisyon spektrumları.

Üç farklı post-deşarj bölgesinden alınan optik emisyon spektrumlarına göre erken post-deşarj bölgesi post-deşarj plazmanın elektrotlar arasından çıkarılarak atmosfer ortamına çıktığı ilk kısımdır. Geç post-deşarj bölgesi, plazmanın ipliksi bir yapı (filamentous pattern) oluşturduğu son kısmı olup, iyonizasyon sürecinin tamamlandığı kısımdır. Arada kalan kısım ise orta post-deşarj bölgesidir. Optik emisyon spektrumlarına göre, üretilen post-deşarj plazmanın elektrotları arasına en yakın olan erken post - post deşarj bölgesinde iyonizasyonun daha fazla gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca He gaz akış hızı arttırıldığında, orta post-deşarj bölgesinin uzunluk bakımından artış gösterdiği görülmüştür. Öte yandan, atmosfer basıncına çıkan post-deşarj bölgesindeki plazmanın (jet) fiziksel

boyutlarının erken ve geç post-deşarj bölgelerinde sabit bir değerde kaldığı alınan optik emisyon spektrumları ile tespit edilmiştir.

Şekil 5.23’ te farklı He gaz akış hızlarında üretilen atmosferik basınç post-deşarj plazmaların optik emisyon spektrumları yer almaktadır. Burada He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma çalışmaları için optimum gaz akış hızı değerinin 4 l/dk olduğu edinilen veriler arasındadır. Yani belirlenen bu akış hızı değerinde, emisyon şiddetleri maksimum oranda gözlemlenmektedir.



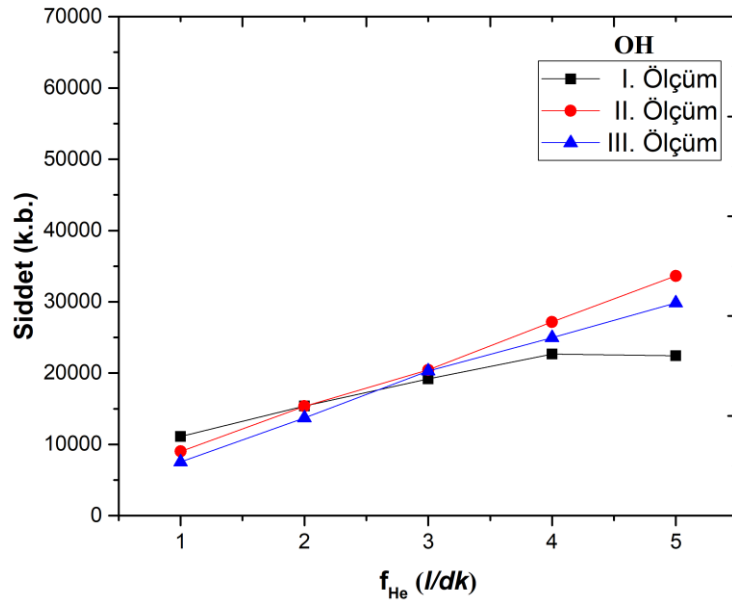
**Şekil 5.23.** He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazmasında (plazma jet) akış hızına bağlı şiddet değişimleri.

Şekil 5.24’ te ise, He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma içerisinde oluşan OH radikallerinin gaz akış hızına bağlı ışınım konsantrasyon değişimleri, farklı akış hızlarında alınan ölçüm sonuçları ile birlikte verilmektedir. He gaz akış hızının artışıyla birlikte 308 nm’ de gözlemlenen OH radikallerinin post-deşarj plazma içerisinde ışınım konsantrasyonunu arttırdığı görülmektedir (Wang vd., 2016).

Bu durum atmosfer ortamında bulunan su buharının plazma ortamında elektrik alan tarafından hızlandırılan serbest elektronlarla



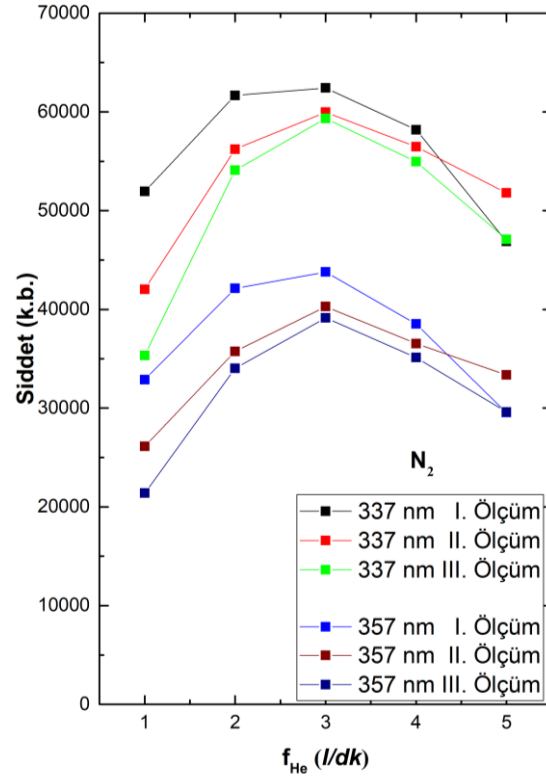
türündeki reaksiyonlara girdiğini göstermektedir.



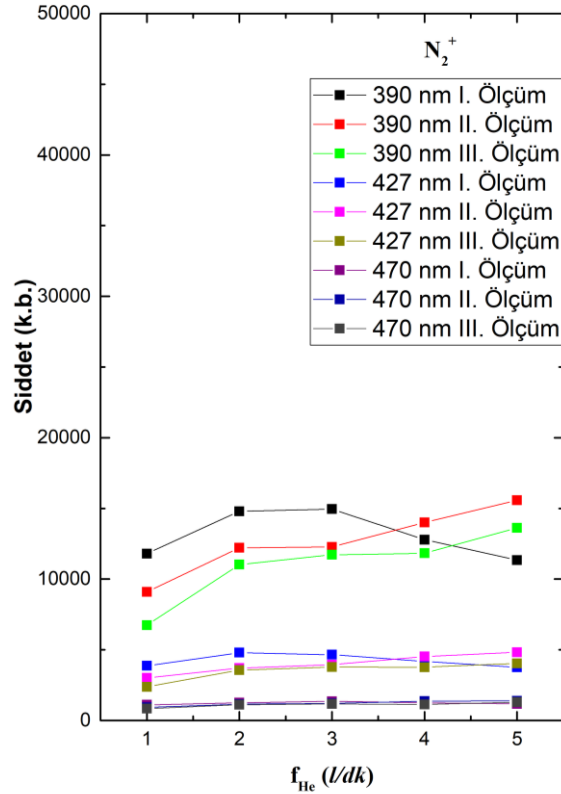
**Şekil 5.24.** He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazmasında (plazma jet) akış hızına bağlı olarak OH radikali ışınım konsantrasyonunun değişimi.

Şekil 5.25 ve Şekil 5.26' da, He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazması içerisinde uyarılan ve iyonize olan N<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub><sup>+</sup> moleküllerinin gaz akış hızına bağlı değişimleri farklı zamanlarda alınan ölçüm sonuçları ile birlikte verilmektedir.





Şekil 5.25. He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazmasında (plazma jet) akış hızına bağlı olarak  $N_2$  molekülü ışınım konsantrasyonunun değişimi.



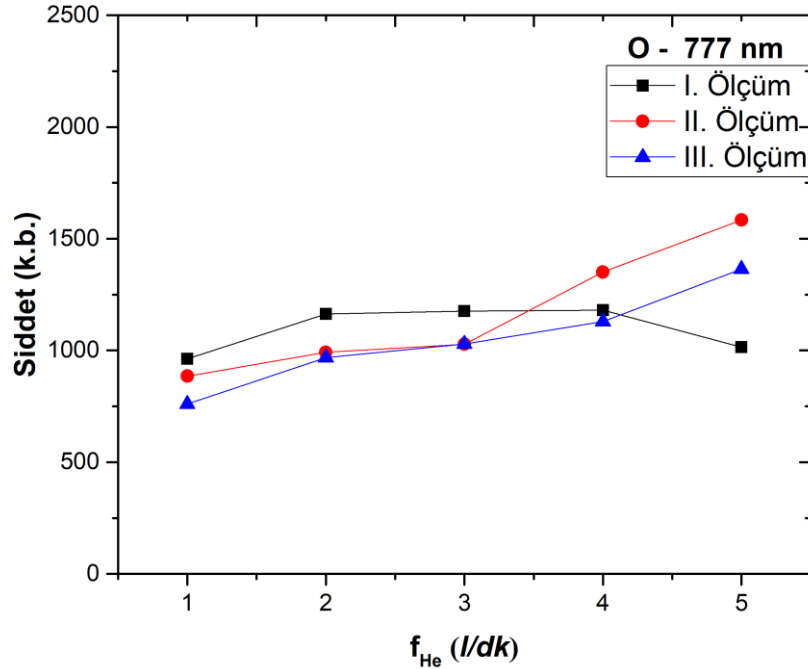
Şekil 5.26. He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazmasında (plazma jet) akış hızına bağlı olarak  $N_2^+$  iyonu ışınım konsantrasyonunun değişimi.

He gaz akış hızı  $f_{He} \leq 3$   $l/dk$  değerine kadar arttırıldığında, He gazının atmosferik basınç post-deşarj plazma (plazma jet) içerisinde yer alan  $N_2$  molekülü ışınım konsantrasyonunun arttığı, akış hızı  $f_{He} > 3$   $l/dk$  olduğu durumda ise  $N_2$  molekülü ışınım konsantrasyonunun azaldığı belirlenmiştir. Öte yandan,  $N_2^+$  iyonlarının ışınım konsantrasyonu  $N_2$  molekülü ışınım konsantrasyonu davranışıyla  $f_{He} \leq 3$   $l/dk$  akış hızlarına kadar doğru,  $f_{He} > 3$   $l/dk$  akış hızlarında ise ters orantılı olarak sürekli bir artış göstermektedir. Bu durum Eşitlik (5.1)' de genel formu verilen reaksiyonun özel bir halidir. Yani üretilen plazma içerisinde,



reaksiyonu ile verilen Penning-tipi reaksiyonunun gerçekleştiği tespit edilmiştir.

Farklı He gaz akış hızlarında soğuk akan atmosferik basınç post-deşarj plazma içerisindeki O radikallerinin ışınım konsantrasyonu Şekil 5.27' de gösterilmiştir.



**Şekil 5.27.** He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazmasında (plazma jet) akış hızına bağlı olarak O radikali ışınım konsantrasyonunun değişimi.

Şekil 5.27' ye göre, O radikallerinin post-deşarj plazma içerisindeki ışınım konsantrasyonlarının gaz akış hızı ile orantılı bir biçimde artış gösterdiği görülmektedir. Bu artışın sebebinin post-deşarj plazma ortamında bulunan yüksek enerjili serbest elektronlardan kaynaklandığı ve aşağıdaki türden reaksiyonların plazma içerisinde gerçekleştiği düşünülmektedir:



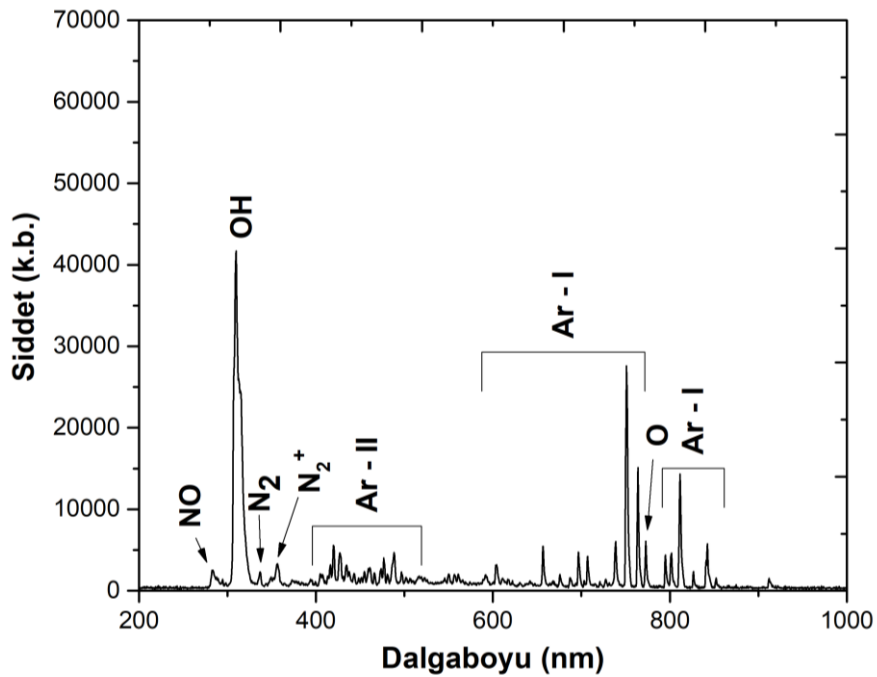
Atmosfer ortamında serbest halde bulunan O<sub>2</sub> moleküllerinin post-deşarj plazma içerisinde yer alan yüksek enerjili elektronlarla esnek olmayan çarpışmaları sonucu O radikallerinin oluşturduğu ışınımın arttığı görülmektedir.

### 5.2.2. Atmosferik basınçta Argon gazı post-deşarj plazma üretimi ve karakterizasyonu

Bu kısımda, deneysel ölçümler süresince AC güç kaynağının voltaj ve frekansı sırasıyla 18 kV ve 15 kHz değerlerinde sabit tutulmuştur. Reaktör alternatif akım güç kaynağı ile çalıştırıldığında atmosferik basınç post-deşarj/plazma jet üretimi sırasında Argon gaz akış hızı  $f_{Ar} = 0,2$  l/dk değerinde, reaktörde bulunun elektro-kimyasal yöntemle sivriltilmiş iğne elektrot ile topraklama görevi gören bakır halka elektrot arasında parlak bir ışımaya görülmektedir. Elektrotlar arasında kalan bu parlak kısım,deşarj plazma olarak adlandırılmaktadır. Gaz akış hızının artırılması ile ( $f_{Ar} \geq 0,8$  l/dk durumunda) plazma, silindirik şekillideşarj yolu içerisinde akarak, toprak bakır halka elektrota doğru genişlemektedir. Görünür bölgede nicel olarak ta gözlenebilen Ar plazması, akış hızının artması ile birlikte elektrotlar arasından çıkmaktadır. Gaz akış hızı daha da artırıldığında atmosfer basıncına post-deşarj plazmanın çıktığı görülmüştür. Bu süreçte elektrotlar arasından çıkarılan Ar gazı post-deşarj plazmasının atmosfer ortamında kendine bir koridor oluşturarak atmosfer ortamını iyonlaştırdığı ve ışık huzmesi oluşumunu gerçekleştirdiği görülmektedir.

Ar post-deşarj plazmaların oluşturulması esnasında Kısım 5.1.1' deki işlemler tekrarlanmıştır. Spektroskopik ölçümler aynı koşullarda üç kez tekrarlanarak ortalama şiddet değerleri belirlenmiştir. Bu sebeple değişim parametresi olarak yalnızca gaz akış hızı tercih

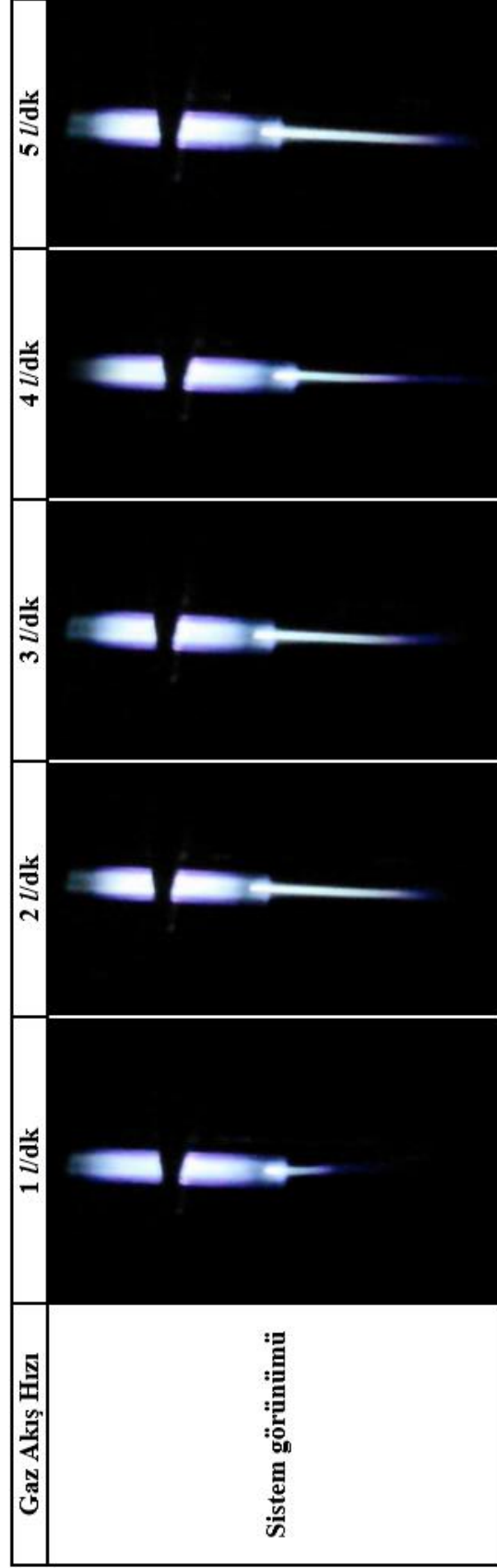
edilmiştir. Optik emisyon spektrumları plazma jetin oluşturulduğu bölgeden 10 cm uzaklığa sabitlenmiş bir kamera ayaklığı yardımıyla, her ölçümün aynı nokta üzerinden alınması sağlanmıştır. Plazma jet ile spektrometrenin probu arasındaki açı her bir ölçüm işlemi sırasında  $90^\circ$  olacak şekilde ayarlanmıştır. Böylece optik emisyon spektrometresinin fiber kablosu ile üretilen plazma jetin etkileşmesi önlenmiştir. Ar gazı ile üretilen atmosferik basınç post-deşarj plazma/plazma jeti üzerinden 200 - 1000 nm dalgaboyu aralığında alınan optik emisyon spektrumu Şekil 5.28' deki gibi elde edilmiştir.



**Şekil 5.28.** Ar gazının atmosferik basınç post-deşarj plazmasının karakteristik dalgaboyu şiddet grafiği (18 kV, 15kHz).

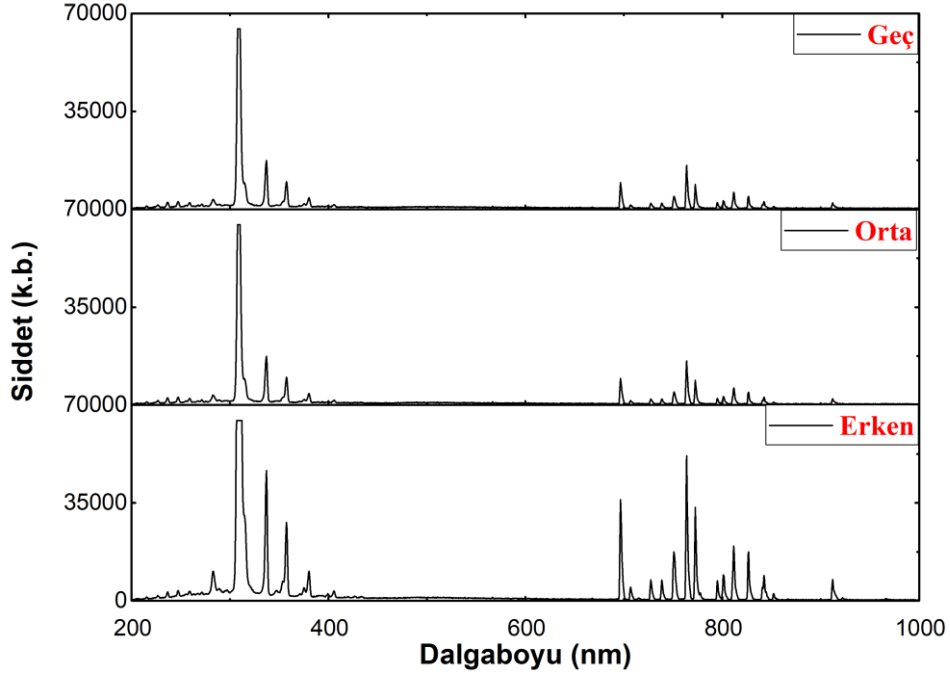
Şekil 5.28' de verilen spektrum incelendiğinde, 283 nm' de çok düşük konsantrasyonlarda NO radikallerinin, 308 nm' de ise OH radikallerinin Ar gazı post-deşarj plazmasında maksimum yoğunlukta bulunduğu literatürle uyumlu olarak görülmektedir (Lin ve Keidar, 2016). 700 - 850 nm aralığında uyarılmış Ar (Ar-I) atomuna ait piklerin bulunduğu bölgede 777 nm' de O radikallerinin oluştuğu, 844 nm' de ise O radikallerin oluşmadığı görülmektedir (Wattiaux vd., 2013). Atmosferik basınç plazmalarda, kullanılan gaz türü ne olursa olsun, ana iyonlar N<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub><sup>+</sup> olarak tespit edilebilmektedir (Laroussi ve Akan, 2007).

Ar gazının farklı gaz akış hızlarına göre üretilen post-deşarj plazmaların fiziksel boyutlarının değişimleri Şekil 5.29' da yer almaktadır. Reaktörde Ar gazı akış hızı 5 l/dk olacak şekilde kademeli olarak arttırıldığında, post-deşarj plazmanın atmosfer basıncı ortamındaki uzunluğunun 65 mm uzunluğa kadar çıkabildiği görülmüştür. Ar gazı için, He gazı post-deşarj plazmasına benzer şekilde plazmanın uç kısmının ipliksi bir yapıya dönüştüğü görülmektedir.



**Şekil 5.29.** Ar gazının soğuk akan atmosferik basınç post-deşarj plazmasının gaz akış hızına göre değişimi.

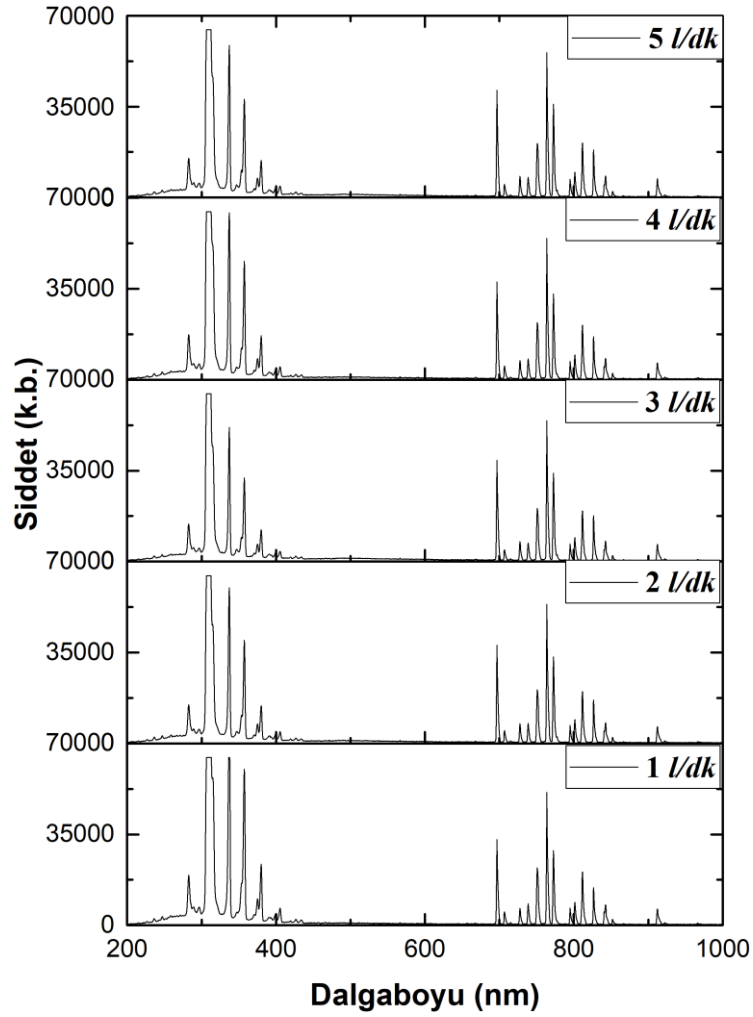
Şekil 5.30' da atmosfer basıncı ortamına çıkan post-deşarj plazma benzer şekilde erken, orta ve geç post-deşarj bölgesi olarak sınıflandırılmıştır. Şekil 5.30' da erken, orta ve geç post-deşarj bölgelerinden sabit voltaj, sabit frekans ve sabit gaz akış hızında alınan emisyon spektrumları yer almaktadır.



**Şekil 5.30.** Erken - Orta - Geç evrelerinde Ar gazının atmosferik basınç post-deşarj plazması emisyon spektrumları.

Şekil 5.30' da yer alan optik emisyon spektrumlarına göre, üretilen Ar gazı post-deşarj plazmanın elektrotları arasına en yakın olan erken post - post deşarj bölgesinde iyonizasyon süreçlerinin daha fazla gerçekleştiği görülmektedir. Ayrıca Ar gaz akış hızı artırıldığında, orta post-deşarj bölgesinin uzunluk bakımından artış gösterdiği görülmüştür. Öte yandan, post-deşarj bölgesindeki plazmanın (jet) fiziksel uzunluğunun erken ve geç post-deşarj bölgelerinde sabit bir değerde kaldığı alınan optik emisyon spektrumları ile tespit edilmiştir.

Şekil 5.31' de farklı Ar gaz akış hızlarında üretilen atmosferik basınç post-deşarj plazmasının optik emisyon spektrumları yer almaktadır.

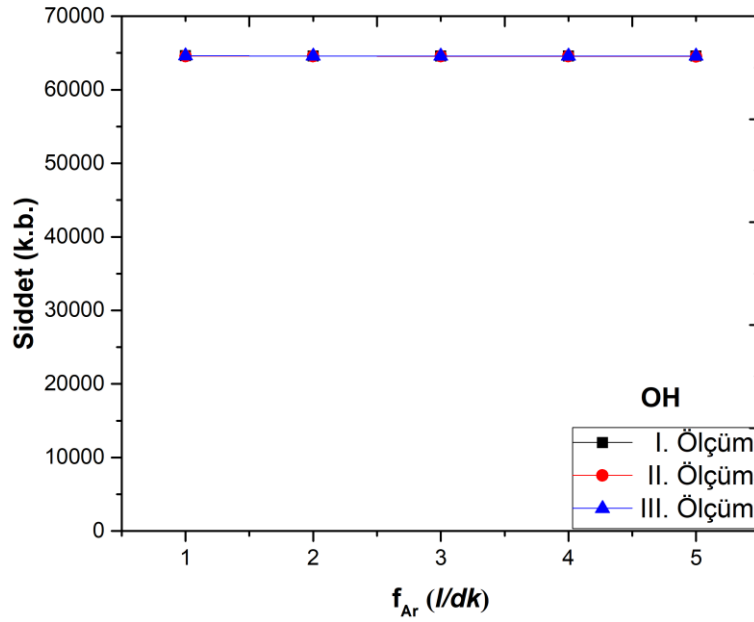


**Şekil 5.31.** Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma jetlerde akış hızına bağlı şiddet değişimleri.

Burada Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma çalışmaları için optimum değer  $4 \text{ l/dk}$  olduğu edinilen bilgiler arasındadır. Yani belirlenen bu akış hızı değerinde, emisyon şiddetleri maksimum oranda gözlemlenmektedir. Şekil 5.31’ de Ar gaz akış hızı arttırıldığında ölçülen şiddet değerlerinde  $4 \text{ l/dk}$ ’ ya kadar bir artışın gerçekleştiği, bu akış hızı değerinden sonra şiddet değerlerinin azalış gösterdiği görülmektedir.

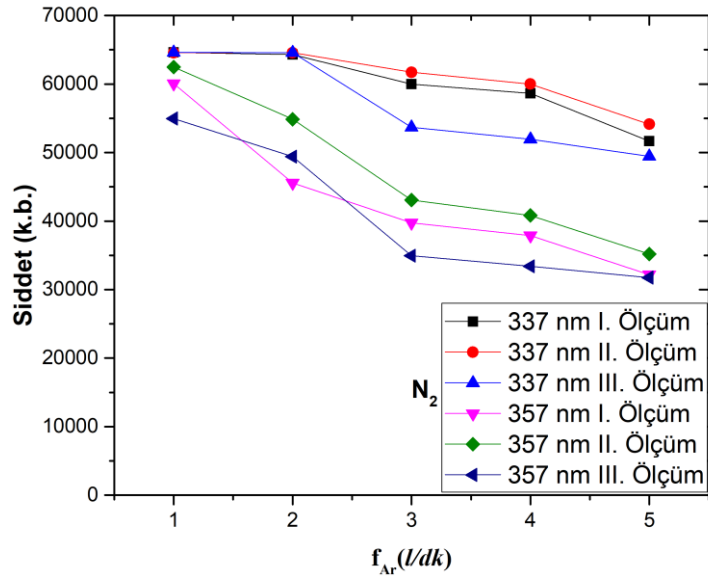


Şekil 5.32’ de yer alan grafikte ise, Ar gazının atmosferik basınç post-deşarj plazması içerisinde oluşan OH radikallerinin gaz akış hızına bağlı değişimleri farklı zamanlarda alınan ölçüm sonuçları ile birlikte verilmektedir. Buna göre Ar atmosferik basınç post-deşarj plazması içerisinde OH radikali ışınım konsantrasyonunun artışı gaz akış hızından bağımsızdır.

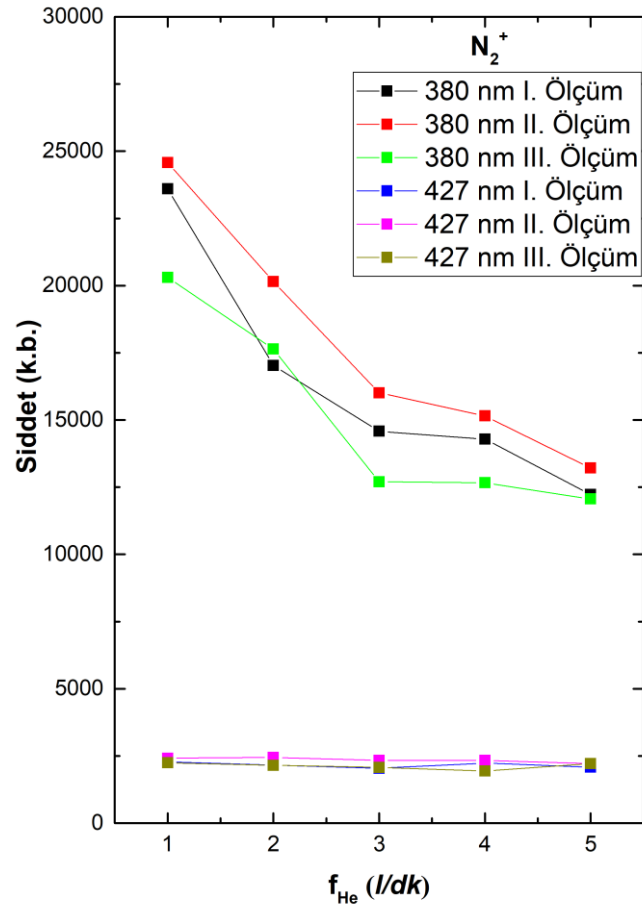


**Şekil 5.32.** Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma jetlerinde akış hızına bağlı olarak OH radikali ışınım konsantrasyonunun değişimi.

Şekil 5.33 ve Şekil 5.34’ te, Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazması içerisinde iyonize olan  $N_2$  ve  $N_2^+$  moleküllerinin gaz akış hızına bağlı değişimleri farklı zamanlarda alınan ölçüm sonuçları ile birlikte verilmektedir.



Şekil 5.33. Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma jetlerde akış hızına bağlı olarak N<sub>2</sub> molekülü ışınım konsantrasyonunun değişimi.



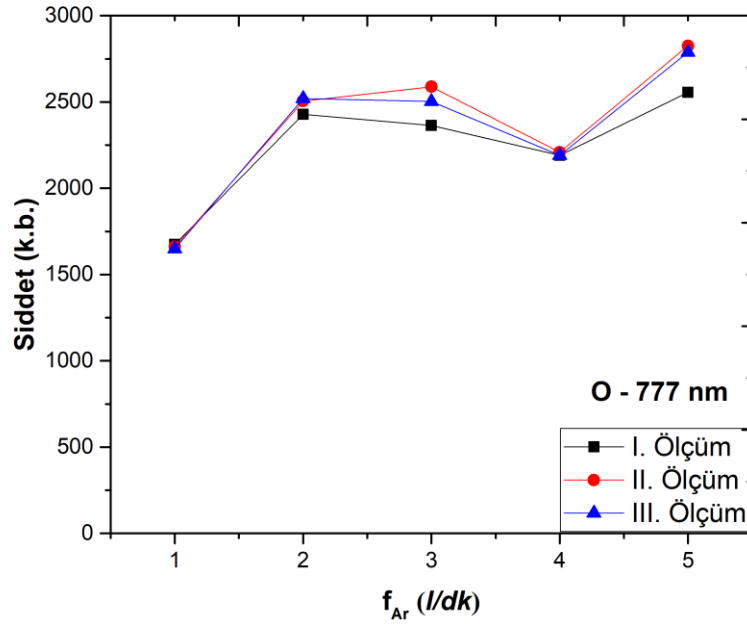
Şekil 5.34. Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma jetlerde akış hızına bağlı olarak N<sub>2</sub><sup>+</sup> iyonu ışınım konsantrasyonunun değişimi.

Ar gaz akış hızının artmasına bağlı olarak,  $N_2$  ve  $N_2^+$  moleküllerinin ışınım konsantrasyonlarında azalışın olduğu görülmektedir. İyonizasyon süreçlerinde uyarılmış Ar atomlarının  $N_2$  molekülleri ile etkileşim reaksiyonu



olup bu reaksiyonun gaz akış hızı ile ters orantılı olarak değiştiği görülmektedir (Takhizadeh vd., 2015).

Son olarak farklı gaz akış hızlarında soğuk akan atmosferik basınç post-deşarj plazması içerisindeki O radikallerinin ışınım konsantrasyonu Şekil 5.35’ te gösterilmiştir.



**Şekil 5.35.** Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma jetlerde akış hızına bağlı olarak O radikali ışınım konsantrasyonunun değişimi.

O radikallerinin Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazması içerisindeki şiddet değerlerine göz atıldığında, gaz akış hızı arttırıldığından ilk olarak radikal konsantrasyonunun 3 l/dk gaz akış hızı değerine kadar artış gösterdiği, 4 l/dk gaz akış hızlarına kadar azaldığı ve maksimum konsantrasyonun 5 l/dk akış hızı değerinde elde edilebildiği görülmektedir.

## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Deşarj plazmalarında daha çok helyum, argon ve neon gibi gazlar, soygaz olmaları sebebi ile sıklıkla tercih edilmektedir. Soygazlar iyonlaşma enerjilerinin nispeten düşük olması, diğer gaz türlerine göre karmaşık plazma etkileşimlerinin olmaması ve üretildikleri ortamda farklı reaksiyonları üretmemesi nedeniyle gaz deşarj plazmalarında sıklıkla kullanılmaktadırlar. Bu sayede gaz deşarj plazmalarının oluşum mekanizmaları hakkında detaylı bilgiye sahip olabilmek mümkündür. Gaz deşarj plazmalarda dahi karmaşık plazma reaksiyonları üzerine gerekli açıklamaların henüz tam olarak yapılamamış olması sebebiyle, deşarjın ötesinde oluşan post-deşarjın fiziğinin anlaşılabilmesi adına gerçekleştirilen bu öncü çalışmada hem düşük basınçta hem de atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörlerinin tasarımı, üretimi ve optik karakterizasyonu işlemleri gerçekleştirilmiştir. Bu işlemler için ilk olarak, düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörünün tasarımı gerçekleştirilmiştir. Deşarj ve post-deşarj odaları için borosilikat camdan üretilmiş T şekilli cam borular kullanılarak reaktörün üretim maliyeti düşürülmüştür. Cam vakum odalarının birleşim noktalarında paslanmaz çelikten üretilmiş flanşlar kullanılmaktadır. Cam borular ve flanşlar arasına vakum kaçaklarının önlenmesi için özel vakum sızdırmaz elemanlar yerleştirilmiştir. Deşarj oluşumunun gerçekleştirileceği vakum odalarının giriş kısımlarına, reaktöre farklı türdeki gazların gönderilebilmesi için gaz bağlantı noktaları açılmıştır. Reaktörün içerisine alüminyum malzemedan dairesel olarak üretilmiş alüminyum elektrotlar yerleştirilmiştir. Reaktör içi basıncın ölçülebilmesi için reaktörün orta kısmında bulunan T şekilli cam borunun bir ucuna vakum pompası, diğer ucuna ise dijital basınçölçer ve vakum ölçüm cihazı özel vakum sızdırmaz elemanlar yardımıyla bağlanmıştır. Deneysel çalışmalara başlamadan önce reaktörün üretildiği malzemenin elektromanyetik spektrumda hangi dalgaboyu aralıklarılarını geçirdiğinin hangilerinin ise absorbe edildiğinin bilinmesi gerektiğinden, reaktörün üretildiği camın optik yapısı spektrofotometre yardımıyla incelenmiş ve 225 - 1200 nm dalgaboyları aralığında % 91 - 92 oranında geçirgen olduğu tespit edilmiştir. Reaktör üzerinde yer alan gaz giriş vanası çok çok küçük gaz akış hızları için açılarak vakumlanan reaktör içerisine çalışılacak gazın iletim işlemi gerçekleştirilmiştir. Vakumlama ve gaz gönderimi işlemleri devam ederken, deşarj plazmaların oluşturulacağı bölgede AC güç kaynakları kullanılarak elektrotlar arasında yer alan gazların iyonlaştırılması sonucu deşarj plazma oluşumu

sağlanmıştır. Atmosferik hava ile üretilen deşarj ve etkileşim odası üzerinden alınan post-deşarj plazma optik emisyon spektrumlarına göre iyonizasyonun 283 - 470 nm dalgaboyu aralığında en yüksek ışınım konsantrasyonlarında olduğu tespit edilmiştir. Belirlenen dalgaboyu aralığında, radikal NO ve OH ile N<sub>2</sub> ve N<sub>2</sub><sup>+</sup> iyonlarının plazma içerisinde olduğu elde edilen emisyo sonuçlarından görülmüştür. Öte yandan radikal O atomlarının yalnızca deşarj bölgesinde oluşturulabildiği sonucuna ulaşılmıştır. Çalışmanın ikinci aşamasında reaktör içerisine He gazı gönderilerek ( $f_{He} < 0,1$  l/dk) elektrotlar arasında He deşarj plazmaları üretilmiştir. He gazı için akış hızı değeri  $f_{He} = 0,1$  l/dk değerine sabitlendiğinde, üretilen deşarj plazmaların elektrotlar arasından çıkarılarak post-deşarj (etkileşim odası) bölgesine geçişi sağlanmıştır. Belirlenen sabit gaz akış hızı değerinde He gazı deşarjı ve etkileşim odasına akıtılan post-deşarj üzerinden optik emisyon spektrumları alınmıştır. Etkileşim noktasındaki post-deşarjın emisyon spektrumları incelendiğinde, deşarj bölgesinde kısmen daha düşük ışınım konsantrasyonlarında oluşan OH radikallerinin post-deşarj bölgesinde artış gösterdiği, uyarılmış He atomlarının ve plazma ortamı içerisinde bulunan N<sub>2</sub> moleküllerinin ışınım konsantrasyonlarının azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durumun enerjili He atomlarının post-deşarj bölgesine geçişi esnasında enerjilerini kaybetmelerinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan frekans ve gaz akış hızı sabit tutulup voltaj değeri kademeli olarak arttırıldığında, post-deşarj plazmanın olduğu basınç değerinin değiştiği sonucuna ulaşılmıştır. Buna göre düşük voltaj uygulanarak oluşturulacak post-deşarj plazmalarda daha düşük basınç değerlerine inilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Ayrıca güç kaynağının frekansı arttırılıp uygulanan voltaj değeri sabit tutulduğunda, optik emisyon spektrumlarından elde edilen şiddet değerlerinin belirgin bir düzeyde azaldığı belirlenmiştir. Çalışmanın üçüncü aşamasında reaktör içerisine Ar gazı gönderilerek ( $f_{Ar} < 0,050$  l/dk), elektrotlar arasında Ar gazı deşarj plazmaları üretilmiştir. Ar gazı için akış hızı değeri  $f_{Ar} = 0,050$  l/dk değerine sabitlendiğinde üretilen deşarj plazmalar elektrotlar arasından çıkarılarak etkileşim reaktörü içerisinde post-deşarj plazmaların akıtılması işlemi gerçekleştirilmiştir. Belirlenen sabit gaz akış hızı değerinde Ar gazı deşarjı ve etkileşim odasındaki post-deşarjı üzerinden optik emisyon spektrumları alınmıştır. Elde edilen veriler sonucunda Ar gazının karakteristik pik değerlerine rastlanırken oldukça yüksek ışınım konsantrasyonlarında OH radikallerine rastlanmıştır. OH radikallerinin etkileşim bölgesinde yer alan post-deşarj plazma emisyon spektrumlarındaki ışınım konsantrasyonlarında önemli derecede bir artış olduğu tespit edilmiştir. Bu durumun deşarj bölgesinde yer alan iyonlaşmış Ar atomlarının ortamda

bulunan hava buharını iyonlaştırmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan deşarj ve post-deşarj plazmanın oluşumu esnasında frekans değeri sabit tutulup uygulanan voltaj kademeli olarak arttırıldığında, post-deşarj plazmanın oluştuğu basınç değerinin neredeyse sabit kaldığı belirlenmiştir. Ayrıca güç kaynağının frekansı arttırılıp uygulanan voltaj sabit tutulduğunda, optik emisyon spektrumlarından elde edilen şiddet değerlerinin belirgin düzeyde azaldığı belirlenmiştir. Düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktöründe gerçekleştirilen son çalışmada, O<sub>2</sub> gazının deşarj ve post-deşarj plazmalarının eldesi işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu işlem için O<sub>2</sub> gazı gaz akış hızının oldukça düşük olması gerektiği ( $f_{O_2} \leq 0,001$  l/dk) tespit edilmiştir. Aksi takdirde post-deşarjın kaybolarak, elektrotlar arasında ark oluşturduğu görülmüştür. Post-deşarjın etkileşim odasında oluşturulabildiği gaz akış hızı değerinde O<sub>2</sub> deşarj ve post-deşarjının beyaz renkte oluştuğu ve dolayısıyla nicel olarak güçlkle gözlemlenebildiği görülmüştür. Deşarj ve etkileşim odasındaki post-deşarjın emisyon spektrumları incelendiğinde, O<sub>2</sub> gazının karakteristik piklerinden biri olan 777 nm dalgaboyu değerine yalnızca deşarj bölgesinde rastlanmıştır. Post-deşarj bölgesinde ise yalnızca reaktör içerisinde yer alan yabancı gazların emisyonlarına rastlanmıştır. Bu durum O<sub>2</sub> gazının post-deşarj plazmasını oluşturmak için ya çok düşük basınç değerlerine inilmesi gerektiği ya da uygulanacak voltajın arttırılması sonucunu doğurmaktadır. Reaktör içerisine gönderilen gazın akış hızı arttırıldığında sistem basıncı atmosfer basıncına yaklaştığından, elektrotlar arasında ark oluşumları görülmüştür. Voltaj sabit tutulup frekans arttırıldığında ise belirlenen dalgaboyu değerlerinde ölçülen şiddet değerlerinin belirgin bir düzeyde azaldığı sonucuna ulaşılmıştır. Uygulanan voltaj değeri kademeli olarak azaltıldığında ise, reaktör içerisinde deşarj plazmanın dahi oluşmadığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasının ikinci aşamasında atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma (plazma jet) reaktörünün tasarımı ve üretimi gerçekleştirilmiştir. Plazma jet oluşumunun gerçekleştirileceği atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörü için kuvars cam borular tercih edilmiştir. Cam borular ile reaktörde elektrot girişi, gaz girişi ve çıkışınının gerçekleştiği yollar oluşturulmuştur. Gaz ve elektrot giriş yolları malzeme işlenebilirliğinin kolay oluşu ve düşük maliyeti nedeniyle dikdörtgen prizma şekilli mika malzeme üzerine sabitlenmiştir. Mika malzemenin alt noktası ise post-deşarj plazmanın oluşturulacağı kısımdır. Mika malzemenin üst ucunda bulunan gaz girişi içerisine elektro-kimyasal sivriltme yöntemi ile sivriltmiş tungsten elektrot sabitlenmiştir. Mika

malzeme içerisine sabitlenen borunun dışından halka biçimli toprak elektrotu bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Mika malzeme üzerine sabitlenen parçalar bir laboratuvar standı üzerine yerleştirilerek reaktör imal edilmiştir. Yüksek voltajla post-deşarj plazma üretim işlemleri gerçekleştirildiğinden, reaktör kapalı bir oda içerisine sabitlenmiştir. Post-deşarj oluşumu esnasında ortamda bulunan elektromanyetik radyasyonun etkilerini minimize edebilmek için, reaktörün iç kısmı siyah renge boyanarak dış ortamdan gelebilecek ışınlarla karşı yalıtılmıştır. Atmosferik basınç soğuk akan post-deşarj plazma üretimi esnasında AC güç kaynağının voltajı ve frekansı sabit bir değerde (18 kV, 15 kHz) tutulmuştur. Bu reaktörde gerçekleştirilen ilk çalışmada He gazı kullanılmıştır. Gaz akış hızının kademeli olarak artırılması sonucu ilk olarakdeşarj plazmanın ( $f_{He} < 0,6$  l/dk), daha sonra ise post-deşarjın oluştuğu ( $f_{He} \geq 0,6$  l/dk) gözlemlenmiştir. Bu çalışmada değişim parametrelerinin herbirinin post-deşarj plazma oluşumu üzerine etki ettiği bilindiğinden, değişim parametresi olarak yalnızca gaz akış hızı tercih edilmiştir. He gazının atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktörü üzerinden alınan optik emisyon spektrumundan karakteristik dalgalı boyları belirlenmiştir. He plazma jet oluşumunda, atmosferik hava içerisinde 200 - 427 nm dalgalı boyları arasında yer alan gazların yüksek ışınım konsantrasyonlarında uyarıldığı ve iyonlaştığı tespit edilmiştir. Bu bölgedeki NO radikalleri, atmosferik havadaki N<sub>2</sub> ve O<sub>2</sub> moleküllerinin dönüşümünden kaynaklanmaktadır. OH radikalleri ise atmosferik havada bulunan su buharının plazma içerisinde bulunan uzun yaşam süreli türler ve hızlandırılmış elektronların çarpışmaları sonucu ayrışmasından kaynaklanmaktadır. He gazının atmosferik basınç post-deşarj plazma oluşumu sırasında ortamda yüksek ışınım konsantrasyonlarında N<sub>2</sub> molekülleri ile N<sub>2</sub><sup>+</sup> iyonlarının iyonize bir biçimde bulunduğu tespit edilmiştir. Bu durum He gazı kullanılarak üretilen atmosferik basınç post-deşarj plazma içerisinde Penning-tipi iyonizasyonun gerçekleştiğini göstermektedir. Gaz akış hızına bağlı olarak atmosfer ortamına çıkarılan post-deşarj plazmanın fiziksel boyutları belirlenerek gaz akış hızı 5 l/dk iken jet uzunluğunun 50 mm' ye kadar atmosfer ortamına çıkabildiği görülmüştür. Literatürle uyumlu olarak atmosfer ortamına çıkan post-deşarj plazma bölgesi erken, orta ve geç post-deşarj bölgesi olarak adlandırılmıştır. Sabit voltaj, sabit frekans ve sabit gaz akış hızları için belirlenen bu üç bölge üzerinden alınan optik emisyon spektrumlarında elektrotlar arasına en yakın bölgede oluşan erken post-deşarj bölgesinde uyarılma ve iyonizasyon süreçlerinin en yüksek seviyede gerçekleştiği görülmüştür. Gaz akış hızı arttırıldığında, orta post-deşarj bölgesinin uzunluk bakımından artış gösterdiği de edinilen bilgiler arasındadır. Öte yandan atmosfer basıncına çıkarılan

plazmanın fiziksel boyutlarının erken ve geç post-deşarj bölgesinde sabit bir uzunluk değerinde kaldığı da belirlenmiştir. He gaz akış hızı arttırılarak erken post-deşarj bölgesi üzerinden alınan emisyon spektrumlarında, He gazı plazmasının karakteristik dalgaboyları arasında bulunan OH radikallerinin gaz akış hızı ile doğru orantılı olarak ışınımında artış gösterdiği görülmüştür. Bu durum atmosfer ortamında bulunan su buharının plazma ortamında elektrik alan tarafından hızlandırılan serbest elektronlarla reaksiyona girdiğini göstermektedir. He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma emisyonlarında uyarılan ve iyonize olan  $N_2$  ve  $N_2^+$  iyonlarının gaz akış hızına bağlı değişimleri farklı zamanlarda incelenmiştir. Gaz akış hızı  $f_{He} < 3$  l/dk değerine kadar arttırıldığında  $N_2$  molekülü ışınım konsantrasyonunun arttığı,  $f_{He} \geq 3$  l/dk olduğu durumda ise  $N_2$  molekülü ışınım konsantrasyonunun azaldığı belirlenmiştir. Öte yandan  $N_2^+$  iyonu ışınım konsantrasyonu  $f_{He} < 3$  l/dk akış hızlarına kadar  $N_2$  molekülü ışınım konsantrasyonu ile doğru,  $f_{He} \geq 3$  l/dk akış hızlarında ise ters orantılı olarak değişim gösterdiği görülmüştür. Bu durum uyarılmış He atomlarının ortamda bulunan  $N_2$  molekülleri ile Penning-tipi reaksiyona girdiğini göstermektedir. Son olarak He gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma emisyonlarında O radikallerinin akış hızına bağlı değişimleri incelendiğinde, gaz akış hızı ile radikal ışınım konsantrasyonunun doğru orantılı olarak değiştiği sonucu elde edilmiştir. Bu durumun serbest elektronlarla  $O_2$  moleküllerinin reaksiyonu sonucu oluştuğu öngörülmektedir.

Atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktöründe gerçekleştirilen ikinci ve son çalışmada, Ar gazı soğuk akan post-deşarj plazma üretimi gerçekleştirilmiştir. Gaz akış hızının kademeli olarak arttırılması sonucu ilk olarak deşarj plazmanın ( $f_{Ar} < 0,8$  l/dk), daha sonra ise post-deşarj plazmanın oluştuğu ( $f_{Ar} \geq 0,8$  l/dk) gözlemlenmiştir. He gazı için belirlenen parametreler Ar gazı soğuk akan post-deşarj plazması için tekrarlanmıştır. Ar gazı soğuk akan post-deşarj plazma reaktörü üzerinden alınan optik emisyon spektrumundan karakteristik dalgaboyları belirlenmiştir. 200 - 370 nm dalgaboyları arasında atmosferik hava içerisinde yer alan gazların post-deşarj plazması içerisinde yüksek ışınım konsantrasyonlarında uyarıldığı ve iyonlaştığı tespit edilmiştir. Reaktör içerisine gönderilen Ar gazının farklı gaz akış hızlarına göre atmosfer ortamına çıkarılan post-deşarj plazmanın fiziksel boyutları belirlenerek, gaz akış hızı 5 l/dk iken jet uzunluğunun 65 mm uzunluğa kadar çıkabildiği görülmüştür. Literatürle uyumlu olarak atmosfer ortamına çıkarılan post-deşarj plazma erken, orta ve geç post-deşarj bölgesi adlandırılmıştır. Sabit voltaj, sabit frekans ve sabit gaz akış hızında belirlenen bu üç bölge



üzerinden alınan optik emisyon spektrumlarında elektrotlar arasına en yakın bölgede oluşan erken post-deşarj bölgesinde uyarılma ve iyonizasyon süreçlerinin diğer bölgelere kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Gaz akış hızı arttırıldığında orta post-deşarj bölgesinin uzunluk bakımından artış gösterdiği tespit edilmiştir. Öte yandan atmosfer basıncına çıkarılan plazmanın uzunluğunun erken ve geç post-deşarj bölgelerinde sabit bir değerde kaldığı da alınan emisyon ölçüm sonuçları ile belirlenmiştir. Ar gazı atmosferik basınç soğuk akan post-deşarj plazma reaktöründe gaz akış hızının 5 l/dk olduğu durumda uyarılma ve iyonizasyonun maksimum seviyede olduğu görülmüştür. Ar gazı atmosferik basınç soğuk akan post-deşarj plazmasının optik emisyon sonuçlarına göre spektrumda en yüksek ışınım konsantrasyonlarında görülen OH radikalleri olup, bu gaz türü için ışınım konsantrasyonu akış hızının artışından bağımsızdır. Uyarılan ve iyonlaşan  $N_2$  ve  $N_2^+$  molekül gruplarının gaz akış hızına bağlı değişimleri farklı zamanlarda incelenmiştir. Buna göre akış hızının artışına bağlı olarak  $N_2$  ve  $N_2^+$  iyonu ışınım konsantrasyonlarında azalışın olduğu tespit edilmiştir. Uyarılmış Ar atomlarının bu sürece etki ettiği düşünülmektedir. Son olarak Ar gazı atmosferik basınç post-deşarj plazma emisyonlarında O radikallerinin gaz akış hızına bağlı değişimleri incelendiğinde, gaz akış hızı ile radikal ışınım konsantrasyonunun 3 l/dk' ya kadar artış gösterdiği, 3 - 4 l/dk aralığında kısmen bir azalış gösterdiği, 4 l/dk' dan sonra ise artışına devam ettiği sonucuna ulaşılmıştır. Atmosferik basınçta yapılan çalışmalara göre, soğuk akan post-deşarj plazma üretimi için kullanılan gazın türü ne olursa olsun ana iyonlar  $N_2$  ve  $N_2^+$  olarak tespit edilebilmektedir. Son olarak atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktöründe  $O_2$  gazı kullanılarak jet üretilmek istendiğinde hem deşarj hem de post-deşarj plazmanın oluşturulamadığı görülmüştür. Bu durumun güç kaynağının  $O_2$  gazını iyonlaştırmaya yetecek düzeyde elektrik alan oluşturamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Öte yandan Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Soğuk Plazma Laboratuvarı' nda üretimi gerçekleştirilen bu reaktörde, uygulanan voltajın ve frekansın optimum değeri belirlenerek, oluşturulan plazma jetin insan vücuduna ya da canlı üzerine uygulanabilirliği sağlanmıştır. Post-deşarj plazma üretimini sağlayan güç kaynağının voltaj ve frekansı sırasıyla 6 kV ve 13 kHz değerlerinde sabit tutulduğunda canlı doku ve diğer uygulamalar için elverişli hale geldiği de tespit edilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda belirlenen akış hızlarında moleküler reaksiyonların daha çok gerçekleşmesi sebebiyle optik emisyon spektrometresinin optik çözünürlüğünün bu reaksiyonları belirleyebilmek için düşük kaldığı görülmüştür. Yeni

piklerin yani yeni parçacık türlerinin ortaya çıkmaması, kullanılan optik emisyon spektroskopisinin optik ölçüm yeteneğiyle ilgili olabilir. Tercih edilen optik çözünürlük aralığı atomik reaksiyonların elektronik enerji düzeyleri için uygundur. Oysaki moleküllerin elektronik, dönme ve titreşim enerji düzeylerinin optik emisyon spektroskopisinde tespitinin daha yüksek çözünürlükteki spektroskopi cihazları ile yapılabileceği elde edilen sonuçlar arasında yer almaktadır. Bilindiği gibi moleküler spektroskopi son derece detaylı analizlere ve pahalı cihazlara ihtiyaç duymaktadır. Bu sebeple moleküler dönme ve titreşim enerji düzeyleri gözlemlenememiştir. Bununla birlikte Ar ve He soygazlardır ve bu gazların post-deşarj plazmaları içinde yeni moleküler birleşimlerin olmaması kısmen beklenen bir sonuç olarak da kabul edilebilir.

Bu tez çalışmasında ayrıca post-deşarj plazmaların oluşum süreçleri için aşağıdaki öngörülerde bulunulmuştur:

- i.** Deşarj plazmaların oluşumu esnasında elektrotlar arasında uyarılmış atom/moleküllerin taban duruma geçişi esnasında oluşan fotonların sahip oldukları enerjilerini post-deşarj bölgesine dek koruyarak elektrik alanın bulunmadığı bölgede iyonizasyon sürecini sürdürmesi,
- ii.** Deşarj bölgesinde iyonlaşan atom ya da moleküllerin iyonizasyonu (fotosökülme ve fotoiyonizasyon) sonucu oluşan serbest elektronların, enerjilerini post-deşarj bölgesine dek koruyarak elektrik alanın bulunmadığı bölgede iyonizasyon sürecini sürdürmesi,
- iii.** Deşarj plazma içerisinde yer alan metastable (yarı-kararlı) atomların elektrik alanın bulunmadığı bölgede iyonizasyon sürecini belirli bir noktaya kadar sürdürmesi,
- iv.** Deşarj plazma içerisinde gerçekleşen kimyasal reaksiyonlar sonucu optik emisyon spektrumlarında gözlenemeyecek kadar kısa yaşam süresine sahip yeni türdeki parçacıkların iyonizasyon sürecini belirli bir noktaya kadar elektrik alanın bulunmadığı bölgede sürdürmesi,

- v. Deşarj plazmanın elektrotlar arasından çıkarılarak akıtıldığı nötral bölgeyi polarize etmesi sonucu alan emisyonu oluşturması,
- vi. Deşarj plazma içerisinde üretilen radikal (reaktif) türlerin enerjilerini elektrik alanın bulunmadığı post-deşarj bölgesinde yitirmeleri sonucu iyonizasyon sürecinin belirli bir noktaya kadar devam etmesi,

gibi sebeplerden ötürü post-deşarj plazmaların oluşum sürecindeki çığ mekanizmasını tetiklenmesi sonucu ışık huzmesi oluşumunun elektrik alansız bölgede gerçekleşebileceği ileri sürülebilir.

Sonuç olarak bu tez çalışmasında, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi komisyonunca desteklenen 2013-326 kodlu proje kapsamında; farklı gazlarının soğuk akan post-deşarj plazmalarının düşük ve atmosferik basınçlarda üretilebileceği reaktörler Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Soğuk Plazma Araştırma Laboratuvarı' nda başarıyla çalışır hale getirilmiştir. Üretim aşamalarının tümü Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Soğuk Plazma Laboratuvarı' nda gerçekleştirilmiş, aktif olarak çalışabilen ve gelecekte yapılabilecek farklı uygulamalara elverişli iki yeni sistem kazandırılmıştır. Bu tez çalışmasında üretilen reaktörlerin aşağıda belirtilen alanlarda pek çok uygulamasının yapılabileceği düşünülmektedir. Soğuk akan post-deşarj plazmalar oda sıcaklığı mertebesinde sıcaklıklarda üretildiğinde, teknolojiye yepyeni bir açılım yapacağı öngörülmektedir. Plazmaların bakteri sterilizasyonu ve canlı hücreler üzerine etkileri bilinmektedir. Bu etkileri sıcaklık etkisi olmadan gerçekleştirebilmesi çığır açabilecek cinstendir. Sterilizasyon teknolojileri açısından tıpta sıcaklığa karşı hassas bir materyal klasik yöntemlerle steril edilemezken, soğuk plazmalar ile herhangi bir kimyasal atık üretmeden kısa sürede sterilizasyon işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu bağlamda soğuk akan post-deşarj plazmaların çığır açacak yönü, uygulamanın doğrudan canlılar ve özellikle de insanlar üzerine uygulanabiliyor olmasıdır. Genellikle yüksek bir elektrik alan ile üretilen gaz deşarj plazmaları iki elektrot arasında kaldığından, canlı ve insan üzerine uygulamaların gerçekleştirilebilmesi mümkün olmamaktadır. Ancak üretilen gaz deşarj plazmasının elektrotlar arasından çıkarılabilmesi ve özellikle de atmosfer basıncına çıkarılması sonucunda plazmaların canlılar üzerine uygulaması mümkün hale gelmektedir. Öte yandan materyal teknolojisinde, özellikle de sıcaklığa karşı hassas materyallerin yüzey özelliklerinin

iyileştirilmesinde soğuk akan post-deşarj plazmaların kullanılabilceği düşünölmektedir. Örneğin otomobil ve tekstil sektörlerinde boya ve yapıştırma işlemleri öncesi polimer yüzey gerilimlerinin arttırılması işlemlerinde deşarj plazmaların yerine soğuk akan atmosferik basınç plazma jetler kullanılabilir. Bu sayede post-deşarj plazmaların yüzeye zarar vermeksizin bazı özelliklerinin iyileştirilmesi gerçekleştirilebilir. Düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktöründe katı bakteri sterilizasyonu, yüksek sıcaklık etkilerinin istenmediği materyallerde yüzey aktifleştirme, hidrofobik ve hidrofilik materyal oluşturma gibi alanlarda gelecekte çalışmalar gerçekleştirilebilir. Atmosferik basınçta soğuk akan post-deşarj plazma reaktöründe ise düşük basınçta soğuk akan post-deşarj plazmalardan farklı olarak katı ve sıvı bakteri sterilizasyonu, canlı hücre ve doku üzerine doğrudan uygulamalar yapılabilir. Post-deşarj plazmaların bakterileri hangi özelliğinden dolayı öldürdüğü halen açık problemler arasında yer almaktadır. Literatüre göre özellikle radikal O atomu ve OH hidroksili molekülünün bu ölümleri yaptığına dair sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Bu iki yapı da post-deşarjın belirli uzaklıklarına kadar var olabilmektedir. Bu açıdan post-deşarjın hangi uzaklıklarda ölümlere sebep olduğu ve bu süreçte aktif O ve OH etkileri incelenebilir. Böylece bilim dünyasına post-deşarj plazmaların bakteriler üzerinde kimyasal etkisi üzerine açıklama getirilebilir. Bu nedenle geleceğin kimya ve tıp teknolojisinde bu çalışmanın ve öne sürölen post-deşarj oluşum süreci mekanizmalarının önemli etkilerinin olabileceği umulmaktadır.

## KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akan, T., 2003, Termiyonik Vakum Ark'ın temel özelliklerinin incelenmesi, DR Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 147s.
- Akan, T., 2005, Maddenin 4. hali plazma ve temel özellikleri, İstanbul Üniversitesi, <http://nucleus.istanbul.edu.tr/~cfe/dorduncu/mak1/> Erişim Tarihi: 28.01.2016.
- Akan, T., 2014, Plazma Teknolojileri (Editör: B. İbrahimoglu), Ürün Yayınları, Ankara, 199–213.
- Akan, T., Çabuk, A., 2014, Indirect plasma inactivation by a low temperature atmospheric pressure plasma (LTAPP) system, *Journal of Electrostatics*, 72(3): 218–221.
- Anders, A., 2005, Plasma and ion sources in large area coating: a review, *Surface&Coatings Technology*, 200: 1893–1906.
- Anghel, S.D., Simon, A., Radu, A.I., Hidi, I.J., 2009, Spectroscopic characterisation of a cross-flow plasma jet, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 267: 430–433.
- Apetrei, R., Alexandroaei, D., Luca, D., Balan, P. Ionita, C.,Schrittwieser, R., Popa, G., 2006, Optical emission spectroscopy diagnostic of discharge plasma in a hollow-cathode sputtering source, *Japanese Journal of Applied Physics, Part 1-Regular Papers Brief Communications & Review Papers*, 45(10B): 8128–8131.
- Bárdos, L., Baránková, H., 2010, Cold atmospheric plasma: Sources, processes, and applications, *Thin Solid Films*, 518: 6705–6713.
- Baumjohann, W. Treumann, R.A., 1996, *Basic Space Plasma Physics*, Imperial College Press, London, 73.
- Beşergil, B., 2015, Enstrümantal Analiz Temel İlkeler, Gazi Kitabevi, Ankara, s. 125–198.
- Bockel, S., Amorim, J. Baravian, G., Ricard, A., Stratil, P., 1996, A spectroscopic study of active species in DC and HF flowing discharges in N<sub>2</sub> - H<sub>2</sub> and Ar - N<sub>2</sub> - H<sub>2</sub> mixtures, *Plasma Sources Science and Technology*, 5(3): 567–572.
- Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R., van der Mullen, J., 2002, Gas discharge plasmas and their applications, *Spectrochimica Acta Part B*, 57: 609–658.
- Bonitz, M., Horing, N., Ludwig, P., 2010, *Introduction to complex plasmas*, Springer-Verlag, New York, pp. 267–297.
- Boutonnet Kizling, M., Järås, S.G., 1996, A review of the use of plasma techniques in catalyst preparation and catalytic reactions, *Applied Catalysis A: General*, 147: 1–21.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Canal, C., Villeger, S., Cousty, S., Rouffet, B., Sarrette, J.P., Erra, P., Ricard, A., 2008, Atom-sensitive textiles as visual indicators for plasma post-discharges, *Applied Surface Science*, 254(18): 5959–5966.
- Chen, C.J., Li S.Z., 2017, Investigation of a nitrogen post-discharge of an atmospheric pressure microwave plasma torch by optical emission spectroscopy, *Physics of Plasmas*, 24(3): 033512.
- Chu, P. K., Lu, X-P., 2014, *Low Temperature Plasma Technology: methods and applications*, CRC Press, pp. 33.
- Collette, S., Dufour, T., Reniers, F., 2016, Reactivity of water vapor in an atmospheric argon flowing post-discharge plasma torch, *Plasma Sources Science and Technology*, 25(2): 025014.
- Czerwiec, T., Gavillet, J.; Belmonte, T., Michel, H., Ricard, A., 1998, Determination of O atom density in Ar-O<sub>2</sub> and Ar-O<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> flowing microwave discharges, *Surface and Coatings Technology*, 98(1-3): 1411–1415.
- Dallı, E., 2013, Atmosferik basınç soğuk plazma jetler, YL Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 130s.
- Dawson, G.A., Winn, W.P., 1965, A model for streamer propagation, *Zeitschrift für Physik*, 183(2): 159–171.
- Dean, J.R., 2005, *Practical inductively coupled plasma spectroscopy*, John Wiley&Sons, West Sussex, pp. 109–112.
- Denes, F.S., Manolache, S., 2004, Macromolecular plasma-chemistry: an emerging field of polymer science, *Prog. Polym. Sci.*, 29: 815–885.
- Dufour, T., Hubert, J., Vandencastele, N., Reniers, F., 2012, Chemical mechanisms inducing a dc current measured in the flowing post-discharge of an RF He-O<sub>2</sub> plasma torch, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 21: 045013.
- Ekem, N., Musa, G., Akan, T., 2002, Düşük Sıcaklık ve Düşük Basınç Plazma Parametrelerinin İncelenmesi, Osmangazi Üniversitesi Araştırma Fonu Proje Sonuç Raporu.
- Es-sebbar, Et., Benilan, Y., Jolly, A., Gazeau, M-C., 2009, Characterization of an N<sub>2</sub> flowing microwave post-discharge by OES spectroscopy and determination of absolute ground-state nitrogen atom densities by TALIF, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 42: 135206.
- Flügge, S., 1956, *Encyclopedia of Physics Vol. XXI Electron-Emission Gas Discharges I.*, Berlin-Heidelberg-New York City: Springer-Verlag. pp. 574.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Franz, G., 2009, *Low Pressure Plasmas and Microstructuring Technology*, Springer-Verlag, New York, pp. 47.
- Fridman, A., 2008, *Plasma Chemistry*, Cambridge University Press, New York, pp. 292.
- Griem, H.R., 1997, *Principles of Plasma Spectroscopy*, Cambridge University Press, pp. 1-4.
- Grill, A., 1993, *Cold Plasma in Materials Fabrication*, IEEE Press, New York, pp. 7-8, 19-22.
- Goldman, M., Goldman, N., 1978, *Corona discharges in gaseous electronics*, vol. 1, edited by Hirsh M.N., Oskam H. J., Academic Press, New York, pp. 219-290.
- Gougousi, T., Golde, M.F., Johnsen, R., 1997, *Electron-ion recombination rate coefficient measurements in a flowing afterglow plasma*, *Chemical Physics Letters*, 265(3-5): 399-403.
- Gurol, C., Ekinci, F.Y., Aslan, N., Korachi M., 2012, *Low Temperature Plasma for decontamination of E. coli in milk*, *International Journal of Food Microbiology*, 157: 1-5.
- Horvatic, V., Michels, A., Ahlmann, N., Jestel, G., Vadla, C., Franzke, J., 2015, *Time-resolved line emission spectroscopy and the electrical currents in the plasma jet generated by dielectric barrier discharge for soft ionization*, *Spectrochimica Acta Part B.*, 113: 152-157.
- Höcker, H., 2002, *Plasma treatment of textile fibers*, *Pure and Applied Chemistry*, 74(3): 423-427.
- Ilik, E., Akan, T., 2016, *Optical properties of the atmospheric pressure helium plasma jet generated by alternative current (a.c.) power supply*, *Physics of Plasmas*, 23: 053501, 1-5.
- Itikawa, Y., 2007, *Molecular Processes in Plasmas collisions of charged particles with molecules*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, pp. 1-7, 104 - 109.
- Jeong, J.Y., Babayan, S.E., Tu, V.J., Park J., Hicks, R.F., Selwyn G. S., 1998, *Etching materials with an atmospheric-pressure plasma jet*, *Plasma Source Sci. Technol.*, 7(3): 282-285.
- Keidar, M., Walk, R., Shashurin, A., Srinivasan, P., Sandler, A., Dasgupta, S., Ravi, R., Guerrero-Preston, R., Trink, B., 2011, *Cold plasma selectivity and the possibility of a paradigm shift in cancer therapy*, *British Journal of Cancer*, 105: 1295-1301.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Khomich, V.A., 1997, Cold sterilization of medical devices and materials by plasma DC glow discharge, Proc. 12th Int. Conf. Gas Discharge and Their Applications, Greiswald, Germany, 2: 740–744.
- Kieft, I.E., Laan, E.P.V.d., Stoffels, E., 2004, Electrical and optical characterization of the plasma needle, New J. Phys., 6(149): 1–14.
- Koinuma, H., Ohkubo, H., Hashimoto, T., Inomata, K., Shiraishi, T., Miyanaga, A., Hayashi, S., 1992, Development and application of a microbeam plasma generator, Appl. Phys. Lett., 60(7): 816–817.
- Kolb, J.F., Mohamed, A.-A.H., Price, R.O., Swanson, R.J., Bowman, A., Chiavarini, R.L., Stacey, M., Schoenbach, K.H., 2008, Cold atmospheric pressure air plasma jet for medical applications, Applied Physics Letters, 92(24): 241501, 1–3.
- Krall, N.A. ve Trivelpiece, A. W., 1973, Principles of plasma physics, McGraw-Hill book company, New York, pp. 494.
- Kunkel, W.B., 1966, Plasma Physics in Theory and Application, McGraw – Hill Book Company, USA, pp. 4, 15–16.
- Laroussi, M., 2002, Nonthermal decontamination of biological media by atmospheric-pressure plasmas: review, analysis, and prospects, IEEE Transactions on Plasma Science, 30(4): 1409–1415.
- Laroussi, M., 2005, Low Temperature Plasma-Based Sterilization: overview and State-of-the-Art, Plasma Process. Polym., 2: 391–400.
- Laroussi, M., Akan, T., 2007, Arc-Free Atmospheric pressure cold plasma jets: a review, Plasma Process. Polym., 4: 777–788.
- Laroussi, M., Tendero, C., Lu, X., Alla, S., Hynes, W.L., 2006, Inactivation of bacteria by the plasma pencil, Plasma Processes Polym. 3: 470–473.
- Laroussi, M, Hynes, W., Akan, T., Lu, X., Tendero, C., 2008, The plasma pencil: a source of hypersonic cold plasma bullets for biomedical applications", IEEE Transactions on Plasma Sciences, 36(4): 1298–1299.
- Lefèvre, L., Belmonte, T., Czerwiec, T., Ricard, A., Michel, H., 2000, Study of late argon-nitrogen post-discharge interactions with oxidized iron surfaces, Applied Surface Science, 153(2-3): 85–95.
- Léoment, S., Salem D.B., Carton, O., Pulpytel, J., Arefi-Khonsari, F., 2014, Influence of the nozzle material on an atmospheric pressure nitrogen plasma jet, IEEE Transactions on Plasma Science, 42(10): 2480–2481.



**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Levaton, J., Amorim, J., Souza, A.R., Franco, D., Ricard, A., 2002, Kinetics of atoms, metastable, radiative and ionic species in the nitrogen pin afterglow, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35(7): 689–699.
- Levaton, J., Amorim, J., Ricard, A., 2012, The local dissociation phenomenon in a nitrogen afterglow, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 45: 505203.
- Levaton, J., Amorim, J., 2014, The density profiles of  $N_2(A^3\Sigma_u^+)$  and  $N_2(a\Sigma_u^-)$  in the pink afterglow of the DC nitrogen flowing discharge, *Chemical Physics*, 435: 1–8.
- Lieberman, M.A., Lichtenberg, A.J., 2005, *Principles of plasma discharges and materials processing*, John Wiley & Sons, New Jersey, pp. 6–22, 131–132, 143–145, 572.
- Lin, L., Keidar, M., 2016, Cold atmospheric plasma jet in an axial DC electric field, *Physics of Plasmas*, 23(8): 083529.
- Ling, L., Jiangang, L., Minchong, S., Chunlei, Z., Yuanhua, D., 2015, Cold plasma treatment enhances oilseed rape seed germination under drought stress, *Scientific Reports*, 5: 13033, DOI: 10.1038/srep13033.
- Lisco, F., Shaw, A., Wright, A., Walls, J.M., Iza, F., 2017, Atmospheric-pressure plasma surface activation for solution processed photovoltaic devices, *Solar Energy*, 146: 287–297.
- Liu, C., Vissokov, G.P., Jang, B.W.-L., 2002, Catalyst preparation using plasma technologies, *Catalysis Today*, 72: 173–184.
- Lo, A., Cessou, A., Boubert P., Vervisch, P., 2014, Space and time analysis of the nanosecond scale discharges in atmospheric pressure air: I. gas temperature and vibrational distribution function of  $N_2$  and  $O_2$ , *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 47: 115201, 1–14.
- Lu, X., Laroussi, M., 2006, Dynamics of an atmospheric pressure plasma plume generated by submicrosecond voltage pulses, *Journal of Applied Physics* 100: 063302, 1–6.
- Lu X., Jiang, Z., Xiong, Q., Tang, Z., Pan, Y., 2008, A single electrode room-temperature plasma jet device for biomedical applications, *Applied Physics Letters*, 92: 151504, 1–3.
- Ma, T.J., Lan, W.S., 2015, Effects of non-thermal plasma sterilization on volatile components of tomato juice, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, 12: 3767–3772.
- McDaniel, E.W., 1964, *Collision phenomena in ionized gases*, John Wiley&Sons, USA, pp. 512–518.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Misra, N.N., Tiwari, B.K., Raghavarao, K.S.M.S., Cullen, P.J., 2011, Nonthermal plasma inactivation of food-borne pathogens, *Food Engineering Reviews*, 3(3-4): 159–170.
- Mitic, S., Klumov, B.A., Pustyl'nik M.Y., Morfill, G.E., 2010, Determination of electron temperature in low pressure plasmas by means of optical emission spectroscopy, *JETP Letters*, 91(5): 231–235.
- Moisan, M., Barbeau, J., Moreau, S., Pelletier, J., Tabrizian, M., Yahia, L'H., 2001, Low-temperature sterilization using gas plasmas: a review of the experiments and an analysis of the inactivation mechanisms, *International Journal of Pharmaceutics*, 226: 1–21.
- Morent, R., De Geyter, N., Verschuren, J., De Clerck K., Kiekens, P., Leys, C., 2008, Non-thermal plasma treatment of textiles, *Surface and Coatings Technology*, 202(14): 3427–3449.
- Mountapbeme-Kouotou, P., Laminsi, S., Acayanka, E., Brisset, J.-L., 2013, Degradation of palm oil refinery wastewaters by non-thermal gliding arc discharge at atmospheric pressure, *Environmental Monitoring and Assessment*, 185(7): 5789–5800.
- Mráz I., Beran, P., Šerá, B., Gavril, B., Hnatiuc, E., 2014, Effect of low-temperature plasma treatment on the growth and reproduction rate of some plant pathogenic bacteria, *Journal of Plant Pathology*, 96(1): 63–67.
- Muraoka, K., Maeda, M., 2001, *Laser-aided diagnostics of plasmas and gases*, IOP Publishing, Bristol and Philadelphia, pp. 295.
- Musa, G., Ekem, N., Akan, T., 2000, *Plazma Fiziği Ders Notları*, Osmangazi Üniversitesi, 143 s.
- Navaneetha Pandiyaraj, K., Selvarajan, V., 2008, Non-thermal plasma treatment for hydrophilicity improvement of grey cotton fabrics, *Journal of Materials Processing Technology*, 199: 130–139.
- Nasser, E., 1971, *Fundamentals of gaseous ionization and plasma electronics*, Wiley-Interscience, Canada, pp. 173–175, 254.
- NIST, 2017, National Institute of Standards and Technology, [http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines\\_form.html](http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html), erişim tarihi: 15.03.2017
- Ochkin, V.N., 2009, *Spectroscopy of Low Temperature Plasma*, Wiley – VCH, Mörlenbach, pp. 1–5.
- Ono, R., 2016, Optical diagnostics of reactive species in atmospheric – pressure nonthermal plasma: topical review, *J. Phys. D. Appl. Phys.*, 49: 083001, 1–34.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Pérez-Ruiz, V.H., Pěa-Eguiluz, R., López-Callejas, R., Mercado-Cabrera, A., Muñoz-Castro, A.E., Barocio, S.R., Valencia-Alvarado, R., De La Piedad Beneitez, A., Rodríguez-Méndez, B.G., 2012, Deactivation of *Escherichia coli* in a post-discharge chamber coupled to an atmospheric pressure multi-electrode DBD plasma source, *Journal of Physics: Conference Series*, 370(1): 012026, 1–4.
- Poll, H.U., Schladitz, U., Schreiter, S., 2001, Penetration of plasma effects into textile structures, *Surface and Coatings Technology*, 142–144: 489–493.
- Raizer, Y.P., 1991, *Gas Discharge Physics*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Germany, pp. 335, 449.
- Remy, J., Biennier, L., Salama, F., 2003, Plasma Structure in a Pulsed Discharge Environment, *Plasma Sources Science and Technology*, 12: 295–301.
- Ricard, A., Belmonte, T., Bockel, S., Michel, H., 1998, Emission spectroscopy detection of  $N_2$  active species in plasma nitriding process, *Czechoslovak Journal of Physics*, 48(10): 1253–1260.
- Ricard, A., Monna, V.; Mozetic, M., 2003, Production of O atoms in Ar-O<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> microwave flowing post-discharges, *Surface & Coatings Technology*, 174: 905–908.
- Ricard, A., 2006, Optical spectroscopy on processing plasmas: cathode magnetron sputtering and flowing post-discharges for elastomer activation and medical sterilization, *Thin Solid Films*, 475(1-2): 1–5.
- Ricard, A., Canal, C., Villeger, S., Durand, J., 2008 a, Transmission of nitrogen atoms through porous membranes for nitrogen flowing post-discharge sterilization processes, *Plasma Processes and Polymers*, 5(9): 867–873.
- Ricard, A., Gaboriau, F., Canal, C., 2008 b, Optical spectroscopy to control a plasma reactor for surface treatments, *Surface and Coatings Technology*, 202 (22-23): 5220–5224.
- Ricard, A., Oh, S.-G., Jang, J., Kim, Y. K., 2015, Quantitative evaluation of the densities of active species of N<sub>2</sub> afterglow of Ar-embedded N<sub>2</sub> RF plasma, *Current Applied Physics*, 15: 1453–1462.
- Ricard, A., Sarrette, J.-P., Oh, S.-G., Kim, Y.K., 2016, Comparison of the active species in the RF and microwave flowing discharges of N<sub>2</sub> and Ar-20 % N<sub>2</sub>, *Plasma Chem. Plasma Process*, 36: 1559–1570.
- Roth, J.R., 1995, *Industrial Plasma Engineering vol. 1: principles*, Institute of Physics Publishing, London, pp. 142–143, 538.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Schütze, A., Jeong, J.Y., Babayan, S.E., Park, J., Selwyn, G.S., Hicks, R.F., 1998, The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 26(6): 1685–1694.
- Shelley, J.T., Wiley, J.S., Hieftje, G.M., 2011, Ultrasensitive ambient mass spectrometric analysis with a pin-to-capillary flowing atmospheric-pressure afterglow source, *Analytical Chemistry*, 83(14): 5741–5748.
- Sherman, R., Hirt, D., Vane, R., 1994, Surface cleaning with the carbon dioxide snow jet, *J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film*, 12: 1876–1881.
- Smirnov, B.M., 2012, *Fundamentals of Ionized Gases*, Wiley-VCH, Singapore, pp. 1–4, 353–254.
- Stoffels, E., Sakiyama, Y., Graves, D.B., 2008, Cold atmospheric plasma: charged species and their interactions with cells and tissues, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 36(4): 1441–1457.
- Sousa, S., Gaiolas, C., Costa, A.P., Baptista, C., Amaral, M.E., 2016, Cold plasma treatment of cotton and viscose fabrics impregnated with essential oils of *lavandula angustifolia* and *melaleuca alternifolia*, *Cellulose Chem. Technol.*, 50(5–6): 711–719.
- Surowsky, B., Zülicke, F., Schlüter, O., Knorr, D., 2011, Impact of non-thermal atmospheric pressure plasma on quality relevant food ingredients, 11. International Congress on Engineering and Food, May 22–26, 2011, Athens/GREECE (Full Paper), <http://www.icef11.org/content/papers/nfp/NFP758.pdf>, Erişim Tarihi: 23.03.2017.
- Takhizadeh, L., Brackman, G., Nikiforov, A., van der Mullen, J., Leys, C., Coenye, T., 2015, Inactivation of biofilms using a low power atmospheric pressure argon plasma jet ; the role of entrained nitrogen, *Plasm. Process. Polym.*, 12: 75–81.
- Tanenbaum, B.S., 1967, *Plasma Physics*, McGraw–Hill Book Comp., USA, pp. 117–122, 494.
- Tanisli, M., Sahin, N., 2016, Optical characteristics for capacitively and inductively radio frequency discharge and post-discharge of helium, *Physics of Plasmas*, 23(1): 03513.
- Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J., Leprince, P., 2006, Atmospheric pressure plasmas: a review, *Spectrochimica Acta Part B*, 61: 2–30.
- Tsukiji, M., Wagatsuma, K., 2007, Emission characteristics of Grimm-style glow discharge plasmas with helium matrix plasma gas containing small amounts of nitrogen, *Microchemical Journal*, 87(2): 175–179.
- Xu, K.G., Doyle, S.J., 2016, Measurement of atmospheric pressure microplasma jet with Langmuir probes, *J. Vac. Sci. Technol. A*, 34(5): 051301-1–051301-10.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

- Vesel, A., Kolar, M., Recek, N., Kutasi, K., Stana-Kleinschek, K., Mozetic, M., 2014, Etching of blood proteins in the early and late flowing afterglow of oxygen plasma, *Plasma Processes and Polymers*, 11: 12–23.
- Wang, R., Shen, Y., Zhang, C., Yan, P., Shao, T., 2016, Comparison between helium and argon plasma jets on improving the hydrophilic property of PMMA surface, *Applied Surface Science*, 367: 401–406.
- Wattiaux, G., Yousfi, M., Merbahi, N., 2013, Optical emission spectroscopy for quantification of ultraviolet radiations and biocide active species in microwave argon plasma jet at atmospheric pressure, *Spectrochimica Acta Part B*, 89: 66–76.
- Yurdakul, Ş., 2010, Spektroskopi ve Grup teorisinin temelleri ders notları, Gazi Kitabevi, Ankara, s. 107.
- Zerrouki, H., Ricard, A., Sarrette, J.P., 2014, Determination of N and O-atoms and N<sub>2</sub>(A) metastable molecule densities in the afterglow of N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>, Ar-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> and Ar-N<sub>2</sub>-O<sub>2</sub> microwave discharges, *Contributions to Plasma Physics*, 54(10): 827–837.
- Zhu, X.-M., Pu, Y.-K., 2007, Using OES to determine electron temperature and density in low-pressure nitrogen and argon plasmas, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 17: 024002-1–024002-6.

## ÖZGEÇMİŞ

28.01.1986 tarihinde Eskişehir/TÜRKİYE’ de doğdu. İlkokulu Cumhuriyet İlkokulu’ nda, ortaokulu Eskişehir Atatürk İlköğretim Okulu’ nda, liseyi ise Eskişehir Kılıçoğlu Anadolu Lisesi’ nde okudu. Lisans eğitimini, 2005 - 2010 yılları arasında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’ nde tamamladı. 2010 yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Bilim Dalı’ nda Yüksek Lisans eğitimine başladı. 2013 yılında Yüksek Lisans eğitimini tamamlamasının ardından, aynı yıl Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fizik Anabilim Dalı Yüksek Enerji ve Plazma Fiziği Bilim Dalı’ nda Doktora eğitimine başladı ve 2017 yılında mezun oldu. 2010 yılından beri Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümü’ nde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Evlidir.