

**LABORATUVAR PLAZMALARININ
İTKİ GÜCÜNÜN DENEYSEL SONUÇLARI**

Sercan MERTADAM

Eskişehir, 2016

**LABORATUVAR PLAZMALARININ
İTKİ GÜCÜNÜN DENEYSEL SONUÇLARI**

Sercan MERTADAM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Matematiksel Fizik Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Eskişehir

Anadolu Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Ağustos, 2016

Bu Tez Çalışması BAP Komisyonunca kabul edilen 1505F420 no.lu proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Sercan MERTADAM'ın "Laboratuvar Plazmalarının İtici Gücünün Deneysel Sonuçları" başlıklı tezi 04/08/2016 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği"nin ilgili maddeleri uyarınca, Matematiksel Fizik Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Unvanı-Adı Soyadı

İmza

Üye (Tez Danışmanı) : Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Üye : Doç. Dr. Suat PAT

Üye : Prof. Dr. Süleyman DEMİR

Prof. Dr. Nedim DEĞİRMENCİ

Enstitü Müdürü

ÖZET

LABORATUVAR PLAZMALARININ İTKİ GÜCÜNÜN DENEYSEL SONUÇLARI

Sercan MERTADAM

Matematiksel Fizik Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ağustos, 2016

Danışman: Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Kısaca maddenin dördüncü hali olarak tanımlanabilecek olan plazma, bilimsel çalışmalarda kullanıldığı gibi elde edilen sonuçlar doğrultusunda endüstride de kullanılmaktadır. Düşük basınç ve atmosferik basınç plazmalar farklı güç kaynakları ile ve farklı deşarj tasarımları içerisinde üretilerek karakterize edilmektedir. Tek gaz veya çoklu gaz karışımları ile elde edilebilen plazmalar, alternatif akım, doğru akım, radyo frekans veya mikrodalga güç kaynakları ile oluşturulabilmektedir ve bu doğrultuda farklı kullanım alanları için hangi plazma çeşidinin uygun olduğu araştırılmaktadır. Kullanım alanları arasında, ince filmlerin temizliği, yarı iletken ürünlerin işlenmesi, bakteri, maya ve mantarlar gibi mikroorganizmaların sterilizasyonu ve malzemelerin su itici kaplanması sayılabilir. Bir diğer örnek ise plazma kullanılarak elde edilen uzay araçları itki sistemleridir. Bu sistemler bir süredir özellikle ABD ve Rusya gibi ülkelerin ilgisini çekmekte ve bu ülkeler bahsedilen itki sistemleriyle ilgili çalışmalar yürütmektedir (ABD, NASA; NEXT ve Rusya; VASIMR). Bu sistemlerde genellikle xenon gazı seçilmektedir ve elde edilen itki değerleri şimdilik ancak uzay boşluğunda nispeten hafif uzay araçlarını ve uyduları dengede tutmak için kullanılmaktadır. Bu çalışmada ise laboratuvar şartlarında, nispeten çok daha düşük maliyetlerle elde edilen ve atmosferik basınç altında, alternatif akım güç kaynağı kullanılarak üretilen dielektrik bariyer deşarj-benzeri (DBD-like) bir sistemin itki özellikleri incelenmeye çalışılmıştır. Bunun için yeni bir deşarj sistemi tasarlanmış ve elde edilen plazmanın optik emisyon spektrumları alınarak karakterizasyonu yapılmaya çalışılmıştır. Buradan elde edilen verilerle itki değerleri hesaplanmış ve bir terazi sistemi kurularak bu değerlerin doğruluğu test edilmeye çalışılmıştır.

Anahtar Sözcükler: Plazma, Atmosferik basınç plazma, Dielektrik bariyer deşarj-benzeri, Plazma itki sistemleri, Plazma optik emisyon spektroskopisi

ABSTRACT

THE RESULTS OF THRUST POWER OF LABORATORY TYPE PLASMAS

Sercan MERTADAM

Department of Mathematical Physics

Anadolu University, Graduate School of Science, August, 2016

Supervisor: Prof. Dr. Murat TANIŞLI

Plasma which can be defined as fourth state of matter is used in scientific studies and in the industry with obtained results. Low pressure and atmospheric pressure plasmas are obtained using different power supplies and in different discharge designs and characterized. Generated plasmas using single gas or multiple gas mixtures can be obtained with alternative current, direct current, radio frequency or microwave power supplies and in this way it is researched that which plasma is suitable for different application areas. Thin film cleaning, semiconductor products' processes, bacteria, yeast and fungi sterilization and water repellent coating of any product can be counted for plasma applications. Another example is that spacecraft thrust systems which are produced using plasma. Some countries like USA and Russia interest of these systems and they carry out some studies about plasma thrust systems (USA, NASA; NEXT and Russia; VASIMR). Xenon gas is preferred for these systems generally and obtained thrust values can be used for stabilize the relatively light spacecraft and satellites in the space for now. In this study, thrust properties of the relatively cheaper dielectric barrier discharge-like (DBD-like) plasma system which is obtained at atmospheric pressure and generated using alternative current power supply are researched. A newly discharge system is designed and the plasma characterized using optical emission spectra for this aim. Thrust values are calculated using with obtained data and the values are tested using the created scale system.

Keywords: Plasma, Atmospheric pressure plasma, Dielectric barrier discharge-like, Plasma thrust systems, plasma optical emission spectroscopy

TEŞEKKÜR

Bu alıőmanın ve beraberindeki projenin yürütücülüğünü üstlenerek ve bana destek olarak zamanını ve emeğini ayıran değerli danışman hocam sayın Prof. Dr. Murat TANIŞLI'ya, çalışma sürecinde benden hem bilimsel hem de manevi anlamda desteğini esirgemeyen değerli hocam Uzm. Neslihan ŞAHİN'e, çalışmada kullanılan tasarımlarla ilgili hem fikri hem de fiili olarak bana yardımda bulunan değerli Anadolu Üniversitesi Atölyeleri çalıőanlarına içten teőekkürlerimi sunarım.

Sercan MERTADAM, 2016

15/08/2016

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmamın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Sercan MERTADAM

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI	ii
ÖZET	iii
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	vi
TABLolar DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
GÖRSELLER DİZİNİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
1. GİRİŞ	1
2. PLAZMA REAKSİYONLARI	3
2.1. Elektron – Ağır Parçacık Etkileşimi	3
2.2. Ağır Parçacık – Ağır Parçacık Etkileşimi	5
3. GAZ KARIŞIMLARININ PLAZMASI İÇİN REAKSİYONLAR	9
4. PLAZMA OPTİK EMİSYON SPEKTROSKOPİSİ	12
5. PLAZMA KARAKTERİZASYONU	15
5.1. Elektron Sıcaklığı	16
5.2. Elektron Yoğunluğu	17
5.3. Atmosferik Basınç Termodinamik Denge de Olmayan (Non-LTE) Plazmalar	18
5.3.1. Atmosferik basınçta termodinamik denge de olmayan plazmaların oluşumu için kullanılan güç kaynakları	20
5.3.3. Atmosferik basınçta termodinamik denge de olmayan plazmaların bazı uygulama alanları	25
5.4. Termodinamik Denge de Olmayan Plazma Jetlerin Etkileşimleri	27
6. İYON VE PLAZMA İTKİ SİSTEMLERİ	29
6.1. Elektrik Roket Motoru İçin Optimum Özgül İtme	30
6.2. İyon İtici Temelli Elektrik Roket Motorları	32
6.3. Elektro-Termal Plazma İtçiler	33
6.4. Elektrostatik Plazma İtçiler	34
6.5. Manyeto-Plazma-Dinamik İtçiler	35
6.6. Atmalı (Darbeli) Plazma İtçiler	36

7. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR.....	38
7.1. Deneylerde Kullanılacak Plazma Çeşidinin Seçimi	38
7.2. Düzenegın Tasarlanması Ve Plazmanın Oluşturulması	38
7.3. Optik Emisyon Spektrumu Ölçümleri	39
7.4. Deneysel İtke Ölçümleri	45
8. HESAPLAMALAR.....	49
9. SONUÇ.....	57
KAYNAKÇA	60
ÖZGEÇMİŞ.....	68

TABLULAR DİZİNİ

Sayfa

Tablo 2.1. Plazma içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar.....	3
Tablo 7.1. Deneyde kullanılan gazlarla oluşturulan plazmaların ölçülen itki değerleri.....	48
Tablo 8.1. Helyum gazına ait, dalga boylarına göre enerji değerleri, Einstein katsayılar ve hesaplanan $\ln(p)$ değerleri.....	52
Tablo 8.2. Neon gazına ait, dalga boylarına göre enerji değerleri, Einstein katsayılar ve hesaplanan $\ln(p)$ değerleri.....	52
Tablo 8.3. Argon gazına ait, dalga boylarına göre enerji değerleri, Einstein katsayılar ve hesaplanan $\ln(p)$ değerleri.....	53
Tablo 8.4. Deneyde kullanılan gazlarla oluşturulan plazmaların hesaplanan itki değerleri.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

- Şekil 7.1.** 1 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, helyum gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.....39
- Şekil 7.2.** 2 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, helyum gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.....40
- Şekil 7.3.** 3 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, helyum gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.....40
- Şekil 7.4.** 1 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, neon gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.....41
- Şekil 7.5.** 2/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, neon gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.....41
- Şekil 7.6.** 3 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, neon gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.....42
- Şekil 7.7.** l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, argon gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.....42
- Şekil 7.8.** 2 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, argon gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.....43
- Şekil 7.9.** 3 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, argon gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.....43
- Şekil 8.1.** $\ln\left(\frac{I_{ki}\lambda_{ki}}{g_k A_{ki}}\right) - E_k$ grafiği50
- Şekil 8.2.** $\ln\left(\frac{I_{ki}\lambda_{ki}}{g_k A_{ki}}\right) - \ln(p)$ grafiği.....51
- Şekil 8.3.** 1, 2 ve 3 l/dk. akış oranlarındaki helyum gazının deşarjına ait hesaplanan itki değerlerinin ölçülen itki değerlerine göre karşılaştırma grafiği.....56
- Şekil 8.4.** 1, 2 ve 3 lt/dk. akış oranlarındaki neon gazının deşarjına ait hesaplanan itki değerlerinin ölçülen itki değerlerine göre karşılaştırma grafiği.....56
- Şekil 8.5.** 1, 2 ve 3 l/dk. akış oranlarındaki helyum gazının deşarjına ait hesaplanan itki değerlerinin ölçülen itki değerlerine göre karşılaştırma grafiği.....56

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

Görsel 6.1. NASA'nın geliştirdiği NEXT (NASA Evulation Xenon Thruster) isimli iyon itici.....	33
Görsel 6.2. NASA'nın tasarladığı manyeto-plazma-dinamik itici (MPD thruster).....	36
Görsel 6.3. NASA'ya ait atmalı plazma itici (Pulsed Plasma Thruster – PPT).....	37
Görsel 7.1. İtke değerini deneysel olarak gözlemlemek için kurulan deney düzeneği.....	45
Görsel 7.2. Helyum gazına ait oda sıcaklığında atmosferik basınç plazma.....	46
Görsel 7.3. Neon gazına ait oda sıcaklığında atmosferik basınç plazma.....	46
Görsel 7.4. Argon gazına ait oda sıcaklığında atmosferik basınç plazma.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

e⁻	: Elektron
X⁺	: Pozitif yüklü iyon
X⁻	: Negatif yüklü iyon
X*	: Uyarılmış atom
h	: Planck sabiti
ν	: Frekans
α	: Yeniden birleşme tesir kesiti (alfa)
ρ	: Radyasyon yoğunluğu (ro)
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
eV	: Elektronvolt
OES	: Optik emisyon spektrumu
LTE	: Local thermodynamic equilibrium (yerel termodinamik denge)
Non-LTE	: Non-local thermodynamic equilibrium (yerel termodinamik olmayan denge)
LEL	: Low energy loading (düşük enerji yüklemeli)
HEL	: High energy loading (yüksek enerji yüklemeli)
DC	: Direct current (doğru akım)
AC	: Alternative current (alternatif akım)
RF	: Radio frequency (radyo frekans)
MWa	: Microwave (mikrodalga)
DFE	: Dielectric free electrode (dielektrik serbest elektrot)
DBD	: Dielectric barrier discharge (dielektrik bariyer deşarj)
DBD-like	: Dielectric barrier discharge-like (dielektrik bariyer deşarj-benzeri)
SE	: Single electrode (tek elektrot)
W	: Watt
lt	: Litre
dk	: Dakika
kHz	: Kiloherz

MHz	: Megahertz
kOhm	: Kiloohm
kV	: Kilovolt
mm	: Milimetre
km	: Kilometre
m	: Metre
Hz	: Hertz
MW	: Megawatt
kA	: Kiloamper
kW	: Kilowatt
USB	: Universal Serial Bus
N	: Newton
s	: Saniye
He	: Helyum
Ne	: Neon
Ar	: Argon
g	: Gram
kg	: Kilogram

1. GİRİŞ

Plazma terimini 1927 yılında ilk olarak kullanmaya başlayan Irving Langmuir, 31 Ocak 1881 yılında Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'de doğmuş ve 1932 yılında yüzey kimyası konusundaki çalışmaları sebebiyle Nobel Kimya Ödülü'ne layık görülmüştür. Plazma terimini, iyonlaşmış gazların yüksek hızlarda parçacıkları taşıma yönteminin, kan plazmasının akyuvarları ve alyuvarları taşıma sistemine benzediği için tercih etmiştir.

Plazma, Lieberman'a göre [1]; rastgele yönlerde hareket eden yüklü serbest parçacıkların bir toplamıdır ve ortalamada elektriksel olarak yüksüzdür. F. Chen [2] de plazmayı, atomları pozitif iyon ve elektronlarına ayrılmış elektrik alan içindeki gaz olarak tanımlamaktadır.

Genel bir tanımla plazma, ısı veya elektriksel yöntemlerle gaz atomlarının uyarılması sonucu oluşturulan, maddenin 4. halidir. Evrendeki plazma oranı %90'dan fazladır. Yaşadığımız dünyada plazma sınıfına dâhil olabilecek ve en çok karşılaşılan örnek ateş olmakla beraber, iyonlaşmış gazlardan floresan lamba da plazma haline yakın olabilecek bir örnektir. Endüstriyel alanda plazma hali oldukça yoğun bir kullanım alanına sahip olduğu gibi, insan hayatını büyük ölçüde etkileyen ve alışlagelmiş enerji kaynaklarının temelini oluşturan Güneş de sıcak plazmalara en güzel örnektir.

Plazmanın farklı çeşitleri vardır. Birçok parametre değiştirilerek farklı plazmalar oluşturulabilmektedir. Soğuk plazmalar ve sıcak plazmalar olarak temelde iki sınıftan söz edilebilir. Daha öce bahsedildiği gibi Güneş, sıcak plazmalara bir örnektir. Bu çeşit plazmalar aynı zamanda yerel termodinamik dengeye sahip plazmalardır. Yerel termodinamik dengeye sahip plazmalarda radyasyon sıcaklığı hariç tüm sıcaklıklar birbirine eşittir. Eğer radyasyon sıcaklığı da bu eşitliğe dâhilse plazma bu kez tam termodinamik dengeye sahip olmuş olur. Kontrollü termonükleer füzyon elde etmek için üretilen plazmalar yerel termodinamik dengeye sahip plazmalardır. Soğuk plazmalar ise genellikle yerel termodinamik dengeye sahip değildir. Düşük basınçta üretilen plazmalar buna örnektir. Aynı zamanda laboratuvar ortamında üretilen plazmaların çoğu bu sınıfa girer. Böyle plazmaların içerisindeki ağır

parçacıkların sıcaklığı elektronların sıcaklığından çok düşüktür. Bu yüzden termodinamik denge sağlanmamış olur.

Plazmalar oluşturulma şekillerine göre de farklılık gösterirler. Elde edilen plazmaların karakterini değiştiren parametreler, basınç (düşük basınç, atmosferik basınç veya yüksek basınç), kullanılan gaz çeşidi veya gaz karışımı, reaktör tasarımı, elektrot tasarımı (silindirik, dairesel, tel vb.), elektrot için kullanılan iletken (bakır, tungsten alüminyum vb.) ve güç kaynağıdır (alternatif akım, doğru akım, radyo frekans veya mikrodalga). Bu parametreler içerisinde de kullanılan gaz veya gaz karışımının miktarı ile güç kaynağından sağlanan enerji değeri plazmanın özelliklerini değiştirebilmektedir.

Plazmalar kullanılarak çeşitli inceleme ve uygulamalar yapılabilir. Buna materyal işleme, biyolojik uygulamalar ve itki oluşturabilen sistemler örnektir. Bu uygulamalardan olan itki sistemleri ABD ve Rusya gibi ülkelerin ilgisini çekmiş ve bu ülkeler kendi uzay araştırma laboratuvarlarında ve üniversitelerinde konuyla ilgili çalışmalara yönelmişlerdir. Türkiye de henüz bir ürün elde edilmemiş olsa da hem devlet eliyle hem de özel kanallardan plazma itki sistemleri hakkında araştırmalar yapmaktadır. Bu çalışmada ise laboratuvar şartlarında üretilen plazmanın itki yetenekleri incelenmeye çalışılmıştır.

2. PLAZMA REAKSİYONLARI

İlk bölümde bahsedildiği gibi plazma, gazların enerji verilerek uyarılmasıyla oluşturulabilen maddenin dördüncü halidir. İyonlar ve serbest elektronlar bu reaksiyonlar sonucu ortaya çıkmaktadır. Grill [3], bu reaksiyonları **homojen** ve **heterojen reaksiyonlar** olarak ikiye ayırmıştır. Tablo 2.1’de bu reaksiyonlar tanımlanmıştır.

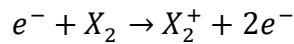
Tablo 2.1. Plazma içerisinde gerçekleşebilen reaksiyonlar [3].

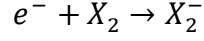
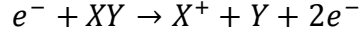
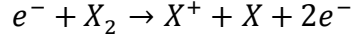
Homojen reaksiyonlar		Heterojen reaksiyonlar
Elektron - ağır parçacık etkileşimi	Ağır parçacık - ağır parçacık etkileşimi	
		*Adsorbsiyon *Yeniden Oluşma *Kararlı Hale Geliş *Püskürtme *Plimerizasyon
*İyonizasyon *Uyarılma Ayrışma *Ayrıştırıcı Reaksiyonlar *Yeniden Birleşme	İyon Molekül Reaksiyonları	Radikal Molekül Reaksiyonları
	*İyonların Birleşmesi *Yük Transferi *Ağır Reaktant Transferi *Birleştirici Ekleme	*Elektron Transferi *İyonizasyon *Penning İyonizasyonu *Atom Birleşmesi *Radikallerin yeniden birleşmesi *Kimyasal Lüminesans

Burada bahsedilen reaksiyonlardan birinin oluşabilme olasılığına **tesir kesiti** denir.

2.1. Elektron – Ağır Parçacık Etkileşimi

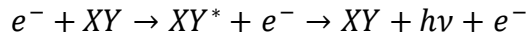
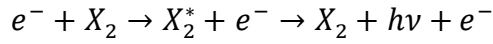
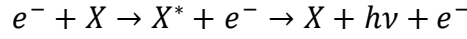
Elektronlar ile ağır parçacıkların etkileşmesi 5 farklı şekilde ortaya çıkabilir. **İyonizasyon**, elektronların moleküllerle çarpışması sonucunda iyonların oluşması olayıdır. Bu olay,





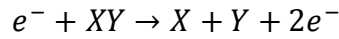
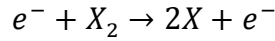
kimyasal reaksiyonlarından biri ile gerçekleşebilir. İyonizasyon (iyonlaşma), ağır parçacıkların elastik olmayan çarpışmalar sonucunda kazandığı enerji, atom ve moleküllerin iyonlaşma enerjisinden fazla olduğunda gerçekleşir. Soğuk plazmalarda ortalama elektron enerjisi iyonizasyon potansiyelinden düşüktür.

Uyarılma, yeteri kadar enerjiye sahip elektronlarla ağır parçacıkların çarpışması sonucuyla ortaya çıkan bir reaksiyon çeşididir. Bu reaksiyonlar sonucunda her birinde farklı bir foton yayımlanır [3].



Yayımlanan fotonların farklı olması sonucunda oluşan plazmanın rengi kullanılan gaz çeşidine göre değişmektedir.

Ayrışma, ağır parçacık ile elektronun esnek olmayan çarpışması sonucu meydana gelebilir. Örnek olarak,



reaksiyonları gösterilebilir. Burada reaksiyonun gerçekleşmesini sağlayan, molekülün, eşik değerinden daha yüksek bir enerjiyle uyarılmasıdır.

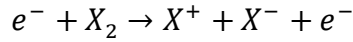
Bir diğer reaksiyon çeşidi de **ayrıştırıcı eklenmedir**. Elektronegatif gazların kullanılmasıyla plazma oluşturulduğunda moleküler gazın atomlarından birine, düşük enerjili elektronlar ($< 1\text{eV}$) ilave olabilir.

Moleküller, bu reaksiyonun elektronik itki etkisiyle yaklaşık 10^{-13} s sürede ayrışabilir. Reaksiyonun ürünleri arasında negatif iyonlar mevcuttur. Yani;

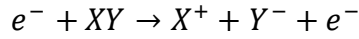


şeklinde dir.

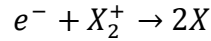
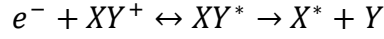
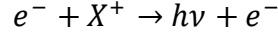
Negatif iyonlar **ayrışmalı iyonizasyon reaksiyonu** sayesinde de aşağıda gösterildiği gibi oluşabilir:



(İyon çifti reaksiyonları)

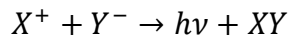


Yükleri farklı olan parçacıklar, **yeniden birleşme reaksiyonları** vasıtasıyla deşarj içerisinde kaybolabilirler [3]. Bu duruma örnek reaksiyonlar aşağıda verilmiştir:

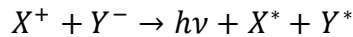


2.2. Ağır Parçacık – Ağır Parçacık Etkileşimi

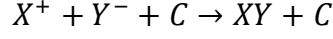
Adından da anlaşılacağı üzere bu etkileşimler, nispeten daha büyük olan atom, molekül, radikaller ve iyonlar (yükli parçacıklar) arasında gerçekleşir. Bu etkileşimlerden ilki **iyonların birleşmesidir**. Elastik olmayan bir çarpışma gerçekleştiren yükleri farklı iki iyon, bir foton ve bir molekülü oluşturabileceği gibi,



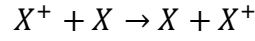
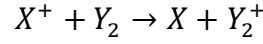
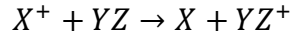
bir foton ve iki atom da oluşturabilir,



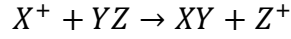
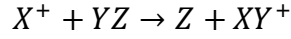
Bu reaksiyonlar iyonları nötr hale getirir. Uyarılmış nötrallerin enerjileri, tekrar birleşen iyonların toplam enerjilerinden küçüktür ve bu enerji reaksiyonda radyasyon olarak yayımlanır. İlave bir parçacıkla (C) reaksiyon şöyle denkleştirilebilir:



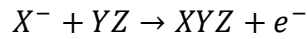
Yüksüz parçacık ile iyon eşleşmesi, iyondaki yükün yüksüz parçacığa eklenmesiyle sonuçlanırsa bu **yük transferidir** ve



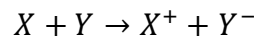
şeklinde farklı reaksiyonlar yük transferine örnektir. Yeni atomların oluşumuyla sonuçlanan **ağır reaktantların transferi reaksiyonu** sırasında isminden de anlaşılacağı üzere yük aktarımı da gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlar



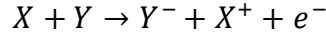
olarak örneklendirilebilir. **Birleştirici ekleme reaksiyonu** olarak isimlendirilen birleşmede serbest bir radikalın, negatif yüklenmiş bir iyonla reaksiyona girmesi durumunda yeni bir moleküle ek olarak serbest bir elektron oluşmuş olur ve buna örnek olarak,



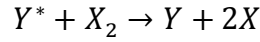
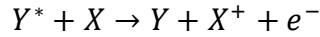
reaksiyonu gösterilebilir. Yüksüz radikallerin etkileşmesiyle pozitif ve negatif iyonlar ortaya **elektron transferi** çıkar. Kinetik enerjisi yüksek olan atomlar plazma içinde yer aldığında gerçekleşen reaksiyon aşağıdaki gibi örneklendirilebilir.



Yeterli kinetik enerjiye sahip olan yüksüz radikaller birbirleriyle etkileştiğinde **iyonizasyonu** aşağıdaki gibi oluşturur:

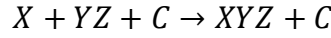


Yarı kararlı ve enerjisi yüksek atomların çarpışması durumunda **Penning reaksiyonu** oluşur. Bu reaksiyonda, yarı kararlı olan uyarılmış atomun fazla olan enerjisi ayrışma veya iyonlaşma yoluyla yayılır. Bu reaksiyonun önemi gaz karışım plazmalarında oldukça yüksektir ve

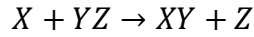


şeklinde dir.

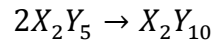
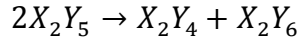
Reaksiyon sonunda fazla enerjileri üçüncü bir parçacık tarafından (C) alınan yüksüz bir molekül ve yüksüz bir atom arasındaki reaksiyonlardan biri de **atom birleşmesi** reaksiyonudur yani,



olarak bilinir. Moleküldeki bir atomun, yüksüz bir atom ile yer değiştirmesi reaksiyonuna **atomların yer değiştirmesi** reaksiyonu denir.

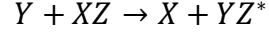
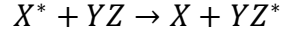


Aktif serbest radikaller reaksiyona girerek molekül oluşturabilme potansiyelindedir. Monoatomik radikaller, enerji ve momentumun korunduğu bu reaksiyonu gerçekleştirebilmek için plazma içerisinde ilave bir parçacığa veya yüzeyle etkileşmeye ihtiyaç duyarlar ve bu reaksiyon **radikallerin yeniden birleşmesi** olarak adlandırılır.

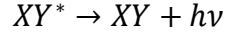


Yukarıda sırasıyla, radikallerin yeniden birleşmesi reaksiyonunun iki çeşidi olan yer değiştirme ve birleşme reaksiyonları örneklendirilmiştir. Burada verilen X_2 ve Y_5 farklı moleküllerin temsilidir.

Uyarılmanın kimyasal reaksiyon olmadan gerçekleştiği,

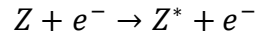


gibi tepkimelere **kimyasal lüminesans** denir. Kimyasal lüminesanslar, Penning tipi reaksiyonlar olarak da tanımlanabilmektedir. Aşağıdaki gibi gösterilebilen reaksiyon çeşidinde, uyarılmış radikal, taban durumuna radyasyon yayımlayarak döner. Buradaki foton kimyasal lüminesansı göstermektedir [3].



3. GAZ KARIŞIMLARININ PLAZMASI İÇİN REAKSİYONLAR

Deşarj gerçekleştirilebilmek için tek çeşit gaz kullanılabileceği gibi ikili ya da çoklu (ikiden fazla) gazın karışımı da kullanılabilir. Bunu gibi plazmalarda bazı reaksiyonlar meydana gelir. Enerji verilen gazların elektronları, ortamdaki molekül ve/veya atomlarla etkileşime geçerler. Enerji alan elektronlar eski enerji durumlarına geçerler. Bu olayın gerçekleşmesi, iki seviye arasındaki geçişin izinli olmasına bağlıdır ve seviyelerin aynı paritede olmaması gerekir. Örnek bir reaksiyon aşağıda verilmiştir [4] :



Yükleri farklı olan parçacıkların yüksüz hale geçişini sağlayan **yeniden birleşme** reaksiyonu, iki iyon arasında (iyon-iyon) veya bir iyon ile elektron arasında (iyon-elektron) olabilir. Bu reaksiyonun gerçekleşme ihtimali α ile isimlendirilen **yeniden birleşme katsayısı**yla gösterilir. Yeniden birleşme reaksiyon sayısı;

$$R = \alpha n^{-} n^{+} \quad (3.1)$$

ile ifade edilir. Burada n^{-} birim zaman ve hacimdeki negatif iyon yoğunluğunu, n^{+} ise pozitif iyon yoğunluğunu göstermektedir. α 'nın birimi cm^3/s 'dir. Asla negatif değer vermez ve

$$\alpha = \int_0^{\infty} v_0 q_r(v_0) f(v_0) dv_0 \quad (3.2)$$

ifadesinde $q_r(v_0)$ terimi **yeniden birleşme tesir kesiti** ifadesidir. Yukarıdaki ifadede yer alan $f(v_0)dv_0$ ifadesi ise, **çarpışma tesir kesitini** göstermektedir [5].

Yükleri farklı olan iyonların azalma miktarları dengedeysen plazmadaki difüzyon kayıpları ihmal edilebilir. İyon-iyon **yeniden birleşme** reaksiyon katsayılarının aynı kaldığı sistemlerde aşağıdaki denklem kullanılabilir:

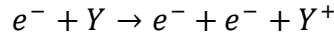
$$\frac{dn^{-}}{dt} = \frac{dn^{+}}{dt} = -\alpha n^{-} n^{+} \quad (3.3)$$

İlk andaki $n = n_0$ olarak alındığında $n^- = n^+ = n$ şeklinde difizyon kayıpları yazılıp,

$$\frac{1}{n} = \frac{1}{n_0} + \alpha t \quad (3.4)$$

denkleminde ulaşılır. Burada α zamanla lineer değişir [5].

İyonlaşma ise,



gibi genel bir denklemlerle gösterilebilir. Taban seviyesinde bulunan hidrojen ve hidrojene benzeyen atomlar için iyonizasyon enerjisinin ifadesi,

$$U_i = -\frac{ke^2}{2a_0} \left(\frac{Z}{n}\right)^2 \quad (3.5)$$

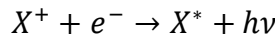
ile verilir. Denklem (3.5)'de Z atom numarası, m elektron kütlesi, a_0 Bohr yarıçapı, n baş kuantum sayısıdır. Bu eşitlik hidrojen benzeri atomlarda iyonlaşma enerjisini (U_i) verir. İyonlaşma tesir kesiti;

$$Q_i \sim \frac{n^4}{Z^2} \quad (3.6)$$

ile hesaplanır.

İç enerjinin azaldığı bir reaksiyon olan **iyon-iyon yeniden birleşme** reaksiyonları, bahsedilen azalma sebebiyle yüksüz bir üçüncü parçacığın kinetik enerjisini artırır. Buna, azalmanın pozitif yüklü parçacığın iyonlaşma enerjisiyle negatif yüklü parçacığın elektron çekiciliği arasındaki farka eşit olması sebep olur [5].

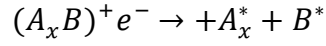
Pozitif yüklü iyon ile elektronun, **iyon-elektron yeniden birleşme** reaksiyonu, **eklemeli radyasyon** reaksiyonu ve **radyasyonlu yeniden birleşme** reaksiyonu ile gerçekleşebilir.



Eklemeli radyasyon reaksiyonunda, atoma yaklaşan bir pozitif yüklü iyon, atomdan elektron yakalayarak uyarılmış duruma geçer. **Radyasyonlu**

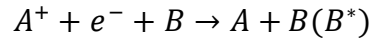
yeniden birleşme reaksiyonunda ise radyasyonun sürekli olan spektrumu yeniden birleşme spektrumu olarak isimlendirilir.

Bir molekül olarak pozitif iyon bir elektron ile **yeniden birleşme** reaksiyonuna girdiğinde molekül, atomlarına ayrışabilir. Bunun sonucunda atomlar uyarılmış seviyeye geçerler ve bu durum,



genel ifadesiyle tanımlanır. Burada A_x bir molekülü, A_x^* ise uyarılmış bir molekül yapısını temsil etmektedir.

Bir de **üç parçacıklı çarpışmayla yeniden birleşme** reaksiyonu mevcuttur ve aşağıdaki gibi



bir ifadeyle örneklenebilir [6].

4. PLAZMA OPTİK EMİSYON SPEKTROSKOPİSİ

Farklı yöntemlerle oluşturulan plazma, daha önceki bölümlerde kısaca bahsedilen reaksiyonların gerçekleştiği bir ortamdır. Bu sebeple, gerçekleşen reaksiyonlar sonucu optik emisyon spektrumu (OES) gözlenebilir. Optik emisyon spektrumu, plazmanın karakterizasyonu için oldukça önemli bir veridir. Plazma oluşumunda kullanılan gaz veya gaz karışımlarındaki atom ve moleküllerin enerji alması, uyarılmaları anlamına gelir. Uyarılan bu bileşenler, serbest atomlar veya iyonlar haline geçer. Gerçekleşen tepkimeler sonucunda uyarılmış (enerji almış) parçacıklar enerjilerini ışına yoluyla yayımlarlar. Bu şekilde ortaya çıkan enerji geçişleri sırasında farklı enerjili fotonlar yayımlanır. Optik emisyon spektrumu sayesinde yayımlanan bu fotonlardan çeşitli dalga boylarında ve farklı şiddetlerde grafikler elde edilir. Elde edilen grafikler de plazma içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar hakkında bilgi vererek karakterizasyona olanak tanır çünkü bu grafiklerdeki piklerin dalga boyu ve şiddetleri yardımıyla elektronların enerjileri hesaplanabilmektedir.

OES'in alınabilmesi için gerekli olan fotonlar, **lüminesans** ve **elektrolüminesans** olayları sayesinde açığa çıkar.

Molekül ve atomlar, çarpışmalar sonucunda kinetik enerji kazanırlar. Kazanılan bu enerjiyle uyarılarak kararsız hale gelen atomlar ve moleküller taban durumuna geçebilmek için ışına yaparlar ve bu olay yaklaşık 10^{-8} s içerisinde gerçekleşir. Bu olayda elde edilen radyasyon **sıcaklık radyasyonudur** [7]. **Elektrolüminesans** olayı tüm plazmalarda gerçekleşen bir olaydır. Elektron ve iyonların elektrik alan içerisinde hızlanırlar ve iyonlaşmış gaz ortaya çıkar. Bu durum da fotonların oluşmasını sağlar [7]. Ortaya çıkan bu fotonları yakalayan detektörlerle OES grafikleri elde edilir.

Optik emisyon spektroskopisi detaylandırılmadan önce **Einstein katsayılarının** tanımlaması faydalıdır. Kısaca; ışın - madde etkileşimi kuramında söz konusu olan ve belli bir frekansta soğurulma, yapay yayım ve kendiliğinden yayım oranlarını belirleyen katsayılar olarak tanımlanabilen Einstein katsayıları, farklı gazlar ve elde edilen OES grafiğindeki farklı dalga boyları için değişiklik göstermektedir.

Model olarak dışarıyla bağlantısı kesilmiş kapalı bir vakum sistemi alınabilir. Enerji seviyeleri arasında $\rho(\nu)$ radyasyon yoğunluklu geçişlerin gerçekleşmesi esnasında $h\nu_{12}$ (1. seviye \rightarrow 2. seviye) fotonun emilimi gerçekleşirse, bu olayın saniye başına gerçekleşme olasılığına $B_{12}\rho(\nu)$ denilebilir. 2 seviyesindeki atomun $h\nu_{12}$ fotonu yayınlamaya 1 seviyesine dönme olasılığı da A_{21} şeklinde isimlendirilirse aşağıdaki bağıntılar (4.1 ve 4.2) yazılabilir [6].

$$\rho(\nu)B_{12}N_1 = A_{21}N_2 \quad (4.1)$$

$$\rho(\nu) = \frac{A_{21}g_2}{B_{12}g_1} \exp\left[-\frac{h\nu_{12}}{k_B T}\right] \quad (4.2)$$

Burada T sıcaklığı, g_1 ve g_2 sırasıyla 1 ve 2 seviyelerinin istatistiksel ağırlığı, h Planck sabiti ($6,626 \times 10^{-34}$), N enerji seviyesi, ν_{12} 1. seviyeden 2. seviyeye geçişin frekansıdır. T(K) sıcaklığında dengede olan atomlar için $\rho(\nu)$ enerji yoğunluğu **Planck kara cisim ışıması** yasası ile elde edilir [6].

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \left[\exp\left(\frac{h\nu_{12}}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (4.3)$$

Ayrıntılı dengenin ilkeleri bu denkleme uygulandığında,

$$\rho(\nu)B_{12}N_1 = A_{21}N_2 + B_{21}\rho(\nu)N_2 \quad (4.4)$$

sonucuna varılır.

$$\rho(\nu) = \frac{\frac{A_{21}}{B_{21}}}{\frac{g_1 B_{12}}{g_2 B_{21}} \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]} \quad (4.5)$$

$$g_1 B_{12} = g_2 B_{21} \quad (4.6)$$

durumunda, 2 seviyesindeki atomun $h\nu_{12}$ fotonu yayınlamaya 1 seviyesine dönme olasılığı da A_{21} ;

$$A_{21} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} B_{21} \quad (4.7)$$

denklemleri ile verilir.

Ayrıntılı dengenin ilkeleri ise bir sistem üzerinden tanımlanabilir. Termal atom uyarılması gerçekleşen, dışarıyla ilişkisi kesilmiş bir vakum

düzenli atom sistemi T sıcaklığıyla dengededir. ν ile $\nu + d\nu$ frekans aralığındaki radyasyonun yoğunluğu $\rho(\nu)$ ile tanımlıdır. Planck yasasına ρ sadece T sıcaklığına bağlıdır.

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \left[\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1 \right]^{-1} d\nu \quad (4.8)$$

1 ve 2 seviyelerindeki atomların sayıları $E_1 < E_2$ olduğunda,

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left[-\frac{h\nu_{12}}{kT}\right] \quad (4.9)$$

sonucuna varılır. Kuantum hipotezi gereğince Planck yasası, istatistiksel yöntemlerin radyasyon için uygulanmasıyla elde edilir. Dinamik dengede olan atom grupları ortamdaki radyasyonu emerler ve enerji seviyelerinde farklılıklar meydana gelir [6].

Emilim veya yayımlama etkileşimleri tersiyle dengelenirse toplam parçacık dengesi bozulmamış olur.

5. PLAZMA KARAKTERİZASYONU

Plazmanın özelliklerinin tanımlanabilmesi ve belirli hesaplamalar yapılabilmesi için karakterizasyonunun yapılması gereklidir. Bunun sonucunda plazma hakkında detaylı bilgiye sahip olunarak, örneğin yapılacak uygulama için hangi gazın veya hangi basıncın seçileceğine karar verilebilir çünkü daha önceki bölümlerde anlatıldığı üzere plazmalar oluşturulma şartlarına göre farklı reaksiyonlara ev sahipliği yapabilmektedir. Farklı plazmalar farklı işlemlerde kullanılabilir.

Plazma karakterizasyonunda **optik emisyon spektroskopisinin** (OES) önemi büyüktür. Optik emisyon spektrumu için atomların serbest hale gelmesi gereklidir. Bu da gaz haliyle mümkündür. OES yöntemi ile plazmanın bütün çeşitlerinde karakterizasyon yapılabilir [8]. Optik emisyon spektrumu ile karakterizasyon yapılırken plazmayı pertürbe etmeden farklı türde parçacıkların yoğunlukları hakkında bilgi edinilir. OES genelde atomların serbest elektronları yakalamasından ve iyonlar ile atomların çarpışmalarından açığa çıkan optik radyasyonun analiziyle gerçekleşir.

Plazmanın karakter analizi sonucunda, hangi gazın veya gaz karışımının kullanıldığı, plazma ve parçacık sıcaklığı, parçacık yoğunluğu, viskozite, termal ve elektriksel iletkenlik gibi özellikler için veriler elde edilebilir [9]. Optik emisyon spektroskopisi mavi ötesi ile görünür bölgede serbest atomların ve iyonların elektromanyetik ışınlarla etkileşmesi şeklinde tanımlanabilir [8]. Sistem önceki bölümlerde bahsedilen reaksiyonlar sonucunda yayımlanan fotonları algılayarak plazmanın karakterine göre değişkenlik gösteren farklı şiddetteki piklerin olduğu bir spektrum gösterir. Bu spektrumu bağlı bilgisayardaki yazılıma gönderir ve spektrum bu bilgisayar üzerinden izlenir. Optik emisyon spektroskopisinin kullanım yönünden de avantajları vardır. Bu çalışmada uygulanan yöntemde de OES cihazı sisteme dışarıdan yöneltilecek, iş gücünden ve zamandan kazanç sağlayan bir karakterizasyon yöntemi olarak kullanılmaktadır.

Plazma karakterizasyonunda elde edilen verilerden iki tanesi oldukça önemlidir. Bunlar, **elektron sıcaklığı** ve **elektron yoğunluğu** değerleridir.

5.1. Elektron Sıcaklığı

Bu noktada elektron sıcaklığına dair ilk olarak söylenmesi gereken, plazmanın çeşidine göre farklı tanımlara ihtiyaç duyulduğu, dolayısıyla farklı şekilde hesaplanması gerektiğidir. Bunun için plazmanın iki farklı tanımından bahsedebiliriz, **yerel termodinamik denge (local thermodynamic equilibrium – LTE)** ve **yerel termodinamik olmayan denge (non-local thermodynamic equilibrium – non-LTE)**.

Termodinamik model yani LTE, yalıtılmış bir sistemdeki tersinir reaksiyonlar için uygulanabilir. Yüksek yoğunluklu, ısımanın çarpışmaya göre önemsiz sayılabileceği plazmalar için bu modelde çarpışmalar hakkında detaylı bir denge bulunmaktadır.



Yukarıdaki reaksiyon, her bir iyonlaşma seviyesi için tanımlanabilir genel bir denklemdir ve yalnızca çarpışma reaksiyonlarını içermektedir. Her yerde aynı toplam yoğunluğa, sıcaklığa ve kimyasal dağılıma sahip bir **LTE** sistemde her bir kuantum seviyesindeki elektron yoğunluğu, sistem tam bir termodinamik dengede olmasıyla alakalıdır [10]. Bu tür bir sistemde elektron sıcaklığı, sadece sıcaklık olarak tanımlanabilir. Bunu sistemin her yerde eşit termal özellik göstermesi sağlar.

Konuyu detaylandırmak gerekirse, çarpışma reaksiyonlarıyla iyonlaşmış bir plazmada, Joule yasasına göre, elektronların ve yüksüz ağır parçacıkların sıcaklıkları arasındaki fark, elektrik alanın basınca olan oranının karesiyle orantılıdır. Bu oranın küçük değerleri için sıcaklıklar birbirine yaklaşabilir. **LTE** plazma için en temel şart bu şekildedir. Plazmanın **LTE** olarak belirlenmesi için kimyasal olarak da denklik gereklidir. **LTE** plazmalar termodinamiğin temel ilkeleriyle uyumludur [11]. Bu tür plazmalar için Maxwell-Boltzmann dağılım fonksiyonu ile hesaplamalar yapılabilir. **LTE** plazmaların laboratuvar şartlarında oluşturulması nispeten daha zordur.

Plazma için bahsedilen ikinci tanım da **yerel termodinamik olmayan** plazmalardır. En sık rastlanan plazma çeşidi de budur. **Termodinamik**

dengede olmayan plazmalar, adından da anlaşılacağı üzere LTE olma şartlarını sağlayamayan plazmalardır.

Termodinamik dengede olmayan plazmalarda, serbestlik derecesi ve sıcaklık birçok yerde ve farklı parçacıklar için farklıdır. Bu türde elektron sıcaklığı belirgin bir şekilde ağır parçacıklardan fazladır ($T_e \gg T_0$) [11]. Burada T_e elektron sıcaklığı, T_0 yüksüz ağır parçacıkların (yani gazın) sıcaklığıdır.

Termodinamik dengede olmayan plazmalarda iyonlaşma ve kimyasal süreç, termal süreç ve gaz sıcaklığı çok hassas olmadığından, direk olarak hesaplanabilir. Kutup ışıkları (Aurora Borealis) **termodinamik dengede olmayan** plazmalara örnektir [11].

Termodinamik dengede olmayan plazmalar için Boltzmann dağılımı tek başına doğru sonuç vermez. Bunun için modifiye edilmiş bir hesaplama ihtiyacı vardır. Boltzmann dağılımını kullanarak yapılan bu yöntemde, bir grafik hazırlanarak eğri üzerinden hesap yapılmalıdır [6]. Bunun için,

$$\left(\frac{I_{pq} \lambda_{pq}}{A_{pq} g_p} \right) = \left(\frac{h c_0}{z(T)} \right) \exp \left[- \frac{E_p}{k T_e} \right] \quad (5.2)$$

eşitliğinin her iki tarafının e ($2,7182818284590...10$) tabanında logaritması;

$$\ln \left(\frac{I_{pq} \lambda_{pq}}{A_{pq} g_p} \right) = - \frac{E_p}{k T_e} + C \quad (5.3)$$

denklemine ulaşılır. Buna göre, $\ln \left(\frac{I_{pq} \lambda_{pq}}{A_{pq} g_p} \right)$ ve E_p arasında grafik çizilir. Grafiğin eğrisinden **uyarılma sıcaklığı** elde edilir. Burada I_{pq} dalga boyunun şiddeti, λ_{pq} dalga boyu, $A_{pq} g_p$ Einstein katsayısı, E_p ise üst enerji seviyesi, k Boltzmann sabiti, T_e elektron sıcaklığı ve C ise sabittir. NIST'in (National Institute of Standards and Technology) hazırladığı tablodan, dalga boylarına göre spektral geçişleri ve Einstein katsayıları elde edilebilir [12].

5.2. Elektron Yoğunluğu

Elektron yoğunluğu, elektron sıcaklığıyla ilişkili olan bir parametredir. Elektron sıcaklığı gibi plazma karakterizasyonunda önemli rol oynar.

Örneğin, yapılan çalışmalarda, RF güç kaynağı ile kapasitif helyum deşarjı için 10^{-3} torr mertebesindeki basınç altında $7,55 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ile $18,08 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$, indüktif olanı içinse $2,27 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ ile $12,15 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ elektron yoğunlukları elde edilmiştir [13]. Buna karşın mikrodalga güç kaynağı ile yapılan deneylerde 10^{13} cm^{-3} mertebesinde elektron yoğunlukları 200 ile 300 torr basınç altında elde edilmiştir [11].

Özete elektron yoğunluğu, plazmanın karakterizasyonu ve farklı özelliklerinin hesaplanması için oldukça önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

Elektron sıcaklığı ve **elektron yoğunluğu** değerleri, plazma karakterizasyonunda oldukça önemli bir yere sahip olduğu gibi özellikle **plazma itki sistemlerinde** yapılan hesaplarda da doğal olarak kullanılmaktadır.

5.3. Atmosferik Basınç Termodinamik Dengede Olmayan (Non-LTE) Plazmalar

Herhangi bir gazda olduğu gibi plazmada da sıcaklık, plazmanın parçacıklarının ortalama enerjisi kullanılarak hesaplanır. Böylece çok bileşenli bir sistem olarak plazma birden fazla sıcaklık değeri gösterebilir. Laboratuvarlarda üretilen plazmalar için yaygın olarak kullanılan elektriksel deşarjlarda, elektrik alandan gelen enerji ilk olarak elektronların çarpışmalarından ve elektronların ağır parçacıklara aktardığı enerjiden açığa çıkar. Elektronlar ve yüksüz ağır parçacıklar arasındaki sıcaklık farkı Joule yasasına göre çarpışmalı zayıf iyonlaşmış plazmada klasik olarak elektrik alanın basınca bölümünün karesi ile orantılıdır $(E/P)^2$. Bu durumda sadece E/p oranı çok küçük değerli elektronların ve ağır parçacıkların sıcaklıklarını birbirine yaklaştırır. Bu, **termodinamik plazmaların** en temel gerekliliğidir. Termal olmaktan çok uzak çok sayıda plazma bulunmaktadır. Bu tür plazmalar kendi içinde farklı parçacıklar için çoklu sıcaklık değerlerine sahiptir (farklı parçacıklar için farklı sıcaklıklar). Sıklıkla, elektron sıcaklığı yüklü parçacıkların sıcaklığından çok çok büyük olmaktadır. Bu tür (dengede olmayan) plazmalarda iyonlaşma ve kimyasal süreçler elektron sıcaklığıyla

doğrudan hesaplanır ve bu nedenle ısı süreçlere ve gaz sıcaklığına göre çok hassas değildir. Bu tür plazmalara da **termodinamik dengede olmayan plazmalar** denir [11].

Termodinamik dengede olmayan plazma kaynaklarıyla atmosferik basınçta plazma üretimi, plazma fizikçilerinin günümüzde ilgilendikleri bir konudur. Bu alanda ilerlemeler oldukça çabuk gerçekleşmektedir. Dengede olmayan plazma oluşturmanın şartları değişkendir ve bu tip plazmaları üreten cihazların çeşitliliği oldukça geniştir. Yüzlerce yıldır bilinen çeşitleri, dielektrik bariyer deşarj (DBD) ve corona deşarjdır. Günümüzde, atmosferik basınçta termodinamik dengede olmayan deşarjlar üretmek için farklı tekniklere sahip cihazlar geliştirilmiştir [15].

Önceleri, uygulama alanlarını sınıflandırmak için maksimum enerji girişi yeterli olarak görülmekteydi. Ancak daha kesin bir tanımlama için uygulama bazında **termodinamik dengede olmayan plazmalar iki sınıfta incelenebilir; düşük enerji yüklemeli (low energy loading – LEL) ve yüksek enerji yüklemeli (high energy loading – HEL)**. Bu duruma göre yüksek gaz akış miktarına sahip deşarjlar düşük enerji yüklemeli uygulamalar için iyi bir adaydır. Örnek olarak, çevre koruma amaçlı plazma teknolojileri ve polimer filmler ile kumaşlara uygulanması gibi endüstriyel alanlar gösterilebilir. Bu tür uygulamalar için, düşük enerji yüklemeli termodinamik dengede olmayan plazmalar genelde düşük maliyet sebebiyle istenir [15].

Atmosferik basınç için termodinamik dengede olmayan plazmalarda elektron sıcaklığı, ağır parçacıkların sıcaklıklarından çok çok fazladır. Termodinamik dengede olmayan plazmalarda ortalama elektron sıcaklığı 2 eV ile 5 eV aralığında bulunmaktadır ve ortalama enerjinin 2/3'ü olarak tanımlanmaktadır. Elektronlar ve ağır parçacıklar arasındaki yüksek çarpışma frekansından ötürü elektronlar kısa sürede enerjilerini kaybederler. Eğer moleküler bir gaz (H_2 - hidrojen veya O_2 oksijen gibi) kullanılırsa elektronlar enerjilerini çabuk bir şekilde dairesel ve titreşimli moleküler düzeylere aktarırlar çünkü elektronların uyarılma ve iyonlaşma enerji seviyeleri çok daha fazladır. Bu durum, atmosferik basınçta termodinamik dengede olmayan plazmaların yüksek elektron enerjisiyle elde edilmesini zorlaştırmaktadır.

Böylece iyonlaşma verimi daha düşük olur. Ek olarak O₂ gibi elektronegatif gazlar kullanıldığında elektronlar gaz tarafından nanosaniyeler içinde absorblanır ve bu yüzden elektronegatif gazlarla atmosferik basınç termodinamik dengede olmayan plazma elde etmek oldukça zordur. Yine de geleneksel yöntemlerle, break-down (plazmaya haline geçiş) oluşturmaya yetecek büyüklükte bir deşarj boşluğunda elektrik alan boyunca plazma oluşturulabilir. Buna karşın 1 atmosfer basınç altında deşarj oluşturmak için gerekli elektrik alan bir miktar fazladır. Örneğin hava kullanılarak oluşturulan bir deşarjın oluşması için ilk anda gereken elektrik alan 30 kVcm⁻² civarındadır. Bu sebeple atmosferik sistemlerde deşarj boşluğunun büyüklüğü birkaç mm ile birkaç cm arasında değişmektedir. Diğer yandan uygulama noktasında kısa deşarj boşlukları, eğer direk uygulama (nesne deşarj boşluğunun arasına yerleştirilir) isteniyorsa, uygulama yapılacak nesnelerin boyutunu belirgin derecede kısıtlar. Eğer dolaylı uygulama (nesne deşarj boşluğun sonuna yerleştirilir ve plazmaya ait aktif radikaller akan gazla nesneye ulaşır) yapılırsa aktif radikallerin kısa yaşam ömrü ve yüklü parçacıkların uygulama yapılacak nesneye ulaşmadan yok olması söz konusu olur. Geleneksel **termodinamik dengede olmayan plazmaların** bu tür eksikliklerinin üstesinden gelmek için plazmanın deşarj boşluğu yerine açık bir boşlukta üretilmesine ihtiyaç vardır. Plazma, elektrik alanın zayıf olduğu geniş bir açıklıkta oluşturulduğu zaman, oluşturulan plazmayı kalıcı tutmak imkânsız denecek kadar zordur [15 - 20].

5.3.1. Atmosferik basınçta termodinamik dengede olmayan plazmaların oluşumu için kullanılan güç kaynakları

Termodinamik dengede olmayan plazmaların üretiminde, amaca yönelik farklı güç kaynakları kullanılabilir.

- **Doğru akım (DC) deşarjlar**, kararlı durumu (steady-state) da içerir ve periyodik pulslu (atmalı) deşarjlar için kullanılır.
- **Alternatif akım (AC) deşarjlar**, geleneksel olarak 100 kHz frekans değerine kadar uygulanabilir ve micro-delikli-cathode deşarjlar için kullanılır.

- **Radyo frekans (RF) deşarjlar**, 100 kHz ile 100 MHz frekans değerlerine ulaşabilir.
- **Mikrodalga (MWA) deşarjlar**, 100 MHz frekanstan sonrasının uygulandığı deşarjlardır [15].

DC deşarjlar, corona deşarj, denge durumunda parıldamalı deşarj ve periyodik pulslu deşarjları kapsar. Denge durumunda deşarj termodinamik dengede olmayan plazma sınıfına dahil edilmez. RF atmosferik deşarjlar, günümüzde yüzey elektrotları kullanılarak üretilmektedir, kaplama, depozisyon, aşındırma gibi uygulama alanları vardır [15 – 22].

Frekansı 2,45 GHz olan mikrodalga deşarjlarda farklı teknikler kullanılmaktadır; Surfatron isimli bir cihaz yüzey yönelimleri için kullanılmıştır [15, 23 -25].

5.3.2. Atmosferik Basınçta Termodinamik Denge Olmayan Plazmaların Oluşum Şekilleri

Atmosferik jetler genellikle soygazlarla çok küçük yüzde değerlerinde oksijen gibi reaktif gazların karışımıyla oluşturulur. Soygazlarla oluşturulan bu tip plazmalar **4 farklı kategoride** incelenebilir; **dielektrik serbest elektrot** (dielectric free electrode - DFE), **dielektrik bariyer deşarj** (DBD), **DBD-benzeri** (DBD-like) ve **tek elektrot** (single electrode - SE) [16].

DFE deşarj sistemi genellikle 13,56 MHz RF güç kaynağıyla oluşturulmuştur [26, 27]. Güç kaynağına bağlı bir iç elektrot (tel) ve dielektrik malzemeyi saran bir toprak elektrottan oluşur. Bir reaktif gazla, helyum karışımı ile denenmiştir. Bu tip bir sistemde sıvı soğutma sistemine ihtiyaç vardır ve RF gücüne dayalı olarak **50 ile 300 °C** arasında değişen gaz sıcaklıklarına sahip olabilir. RF gücü **50-500 W** aralığında değişmektedir. Ark oluşmadan sistemin dengede çalışabilmesi için 25 l/dk değerinden daha büyük akış oranları kullanılmaktadır. Denge durumu sağlanmadığında elektriksel ark önlenemez. DBD ve DBD-benzeri sistemlerle karşılaştırıldığında plazmaya aktarılan güç DFE sistemlerde çok daha fazladır. Yüksek güç aktarmı nedeniyle gaz sıcaklığı biyomedikal uygulamalar için kabul edilebilir değerlerin üzerindedir. RF güç kaynağı

kullanılarak üretilen DFE jet için pikten pike voltaj değeri **birkaç yüz volt** mertebesindedir, bu yüzden deşarj boşluğundaki elektrik alan nispeten daha düşüktür ve **yönelimi daireseldir** (gaz akış yönüne diktir). Plazmanın oluşum bölgesinde elektrik alan, özellikle de plazmanın yayılım yönü boyunca, düşüktür. Sonuç olarak, plazma yayılımı boyunca elektrik alan çok düşük seviyededir ve plazmanın üretimi elektrik alanın kontrolüyle değil, gaz akış yönünün kontrolüyle sağlanmaktadır. Öte yandan görelî olarak daha yüksek değerlerde güç plazmaya aktarılabilir ve gaz sıcaklığı nispeten daha yüksektir, yani plazma daha reaktiftir. Bu tür bir plazmadan elde edilen jet, sıcaklığa karşı çok hassas olmayan materyallerin işlenmesinde kullanılmak için oldukça uygundur.

DBD, için farklı elektrot ve deşarj boşluğu tasarımları vardır. Dielektrik tüp üzerinde iki dış halka elektrot, dielektrik üzerine tek bir halka elektrot, dielektrik içerisinde ayrı bir dielektrik tüple sarılmış bir tel elektrot ile dışında bir halka elektrot, dielektrik içerisinde, yine bir dielektrik tüple sarılı bir tel elektrot tasarımları en çok kullanılanlardır. Bunun dışında farklı tasarımlarla DBD jetler oluşturulabilir.

Dielektrik tüp üzerinde iki dış halka elektrot tasarımında, helyum ve argon gazıyla çalışılırken kHz mertebesinde frekanslar ve yüksek voltaj güç kaynakları kullanılır ve havanın çevrelediği soğuk plazma jet elde edilebilir. Bu tip bir plazma jet sadece birkaç watt güç harcamaktadır. Plazmanın gaz sıcaklığı oda sıcaklığına yakın değerlerdedir ve gaz akış hızı 20 m/s değerlerinden daha küçüktür. Çıplak gözle bakıldığında homojen gözüken plazma jet aslında mermi-benzeri (öbek öbek) bir durumdadır ve yayılma hızı 10 kms^{-1} değerinden daha fazladır. Bu tür bir plazmada uygulanan elektrik alanın, plazma merminin yayılımında önemli rol oynadığına inanılmaktadır.

Tek bir halka elektrot tasarımında, ikinci elektrot saf dışı edildiği için dielektrik tüp içerisindeki deşarj zayıflar. Bir iç tel elektrot ve bir dış halka elektrotla kurulan sistemde, elektrik alan plazma boyunca ilerler. Bu sistemde de yüksek voltaj güç kaynağı kullanılır. Yapılan çalışmalar göstermiştir ki plazma boyunca ilerleyen yüksek değerli bir elektrik alan, daha aktif ve daha uzun plazma oluşumuna elverişlidir [16, 28].

Tek bir iç tel elektrot sisteminde ise tek halka elektro sisteminde olduğu gibi tüpün içerisindeki deşarj zayıflar. Tüpün içinde güçlü bir deşarj oluşması daha reaktif parçacık oluşmasına yardımcı olur (çift halka ve halka – tel elektrot sistemlerindeki gibi). Gaz akışıyla, reaktif parçacıklar görece daha fazla yaşam ömrüne sahip olurlar ve bu durum birçok plazma uygulamasında önemli rol oynar.

Bahsedilen tüm DBD jet cihazları **kHz mertebesindeki frekanslara sahip ac** veya **pulslu dc güç kaynakları** kullanılarak beslenmektedir. Oluşturulan termodinamik dengede olmayan plazmaların jet uzunlukları kolaylıkla birkaç cm değerlerine erişebildiği gibi bazı çalışmalarda 10 cm ‘den uzun olduğu dahi bildirilmiştir [16, 29]. Sistemin bu özelliği, uygulamaları daha kolay ve pratik hale getirmektedir. DBD jetin önemli iki **avantajı** bulunmaktadır. Öncelikle, plazmaya **düşük güç yoğunluğu** aktarılması sebebiyle plazmanın gaz sıcaklığı oda sıcaklığına yakın seviyelerde kalır. İkinci olarak, dielektrik malzeme kullanımını sayesinde, uygulama yapılan nesnenin, deşarj tüpünün ucuna yakın veya uzak olmasına bakmaksızın **ark riski** yok denecek kadardır. Bu iki karakteristik, **sağlık alanı** gibi sıkı güvenlik önlemlerinin olduğu uygulamalarda oldukça önem taşımaktadır [16].

DBD-benzeri, sistemlerde tasarımlar, dielektrik içerisinde tek bir tel elektrot ve dielektrik dışında bir halka elektrot ile dielektrik içerisinde aralıklı iki tel elektrot ve dielektrik dışında bir halka elektrot şeklindedir. Bu tip (DBD-benzeri) deşarjların **temelinde yatan şudur**; plazma herhangi bir nesne veya yüzeyle temas etmediğinde DBD gibi davranmaktadır. Buna rağmen, plazma elektriksel iletkenliğe sahip bir nesneyle temas ettiğinde, özellikle toprak bağlantılı iletken, deşarj yüksek voltaj elektrotla uygulama yapılan nesne arasında hareket etmeye başlar. Bu tip sistemler, DBD sistemler kadar uzun süre çalıştırılamamaktadır. **Güç kaynağı olarak kHz frekanslı ac, pulslu dc ve RF** beslemeler kullanılabilir. Yüksek voltaj elektrot olarak tek yerine aralığa sahip çift tel kullanılmasının **avantajı** cihaz içerisinde iki gazın karışımının kullanılabilmesidir. Genelde, reaktif gaz olarak oksijen ve karışım dâhil edilen bir soygaz kullanılmaktadır. Aynı

yüzelik orana sahip ve önceden karıştırılarak sisteme gönderilen gaz karışımına göre böyle bir gaz kontrolü kullanılarak oluşturulan plazmanın daha uzun olduğu tespit edilmiştir [30]. Burada dıştaki halka elektrotun görevi DBD sistemlerdeki avantajı sunabilmektir.

DBD-benzeri sistemler sağlık alanında kullanıldığında, uygulama yapılacak olan nesne hücre veya tüm doku olabilir. Bu durumda, ark riski sebebiyle bu tip cihazlar çok dikkatli şekilde kullanılmalıdır. Diğer yandan, eğer iletken maddelere uygulama yapılacaksa, dielektrik kullanılmadığı için daha fazla güç kolaylıkla plazmaya iletilebilmektedir. Bu sebeple, ark konusuna dikkat edildiği sürece DBD-benzeri sistemlerin, bahsedildiği gibi kendi **avantajları** mevcuttur.

SE, sistemlerde, dielektrik içerisinde tek tel elektrot, dielektrik içerisinde aralığa sahip iki (her ikisi de yüksek voltaj) tel elektrot ve dielektrik kullanılmadan, pulslu dc **güç kaynağına** bağlı, aralığa sahip iki tel elektrot tasarımları mevcuttur. Bu sistemlerde dielektrik tüpün tek amacı gaz akışı için bir yol sağlamaktır. Bahsedilen sistemlerde ilk ikisi dc, kHz frekanslı ac, RF ve pulslu dc **güç kaynaklarıyla** beslenebilmektedir. Ark riskinden ötürü ilk iki sistem biyomedikal uygulamalarda, güvenlik sebebiyle, uygun değildir [31]. Bu problemin üstesinden gelmek için bahsedilen üçüncü sistem tasarlanmıştır [32]. Bunun için 50 pF civarında kapasiteli kondansatör ile 60 kohm civarında bir direnç kullanılmıştır. Bu devre elemanları, akım ve voltajı kontrol etmek amacıyla kullanılmaktadır. Aralıklı elektrotlar (iğne) bu elemanlara bağlıdır. Bu sistem pulslu dc **güç kaynağı** ile beslenmektedir. Kaynağın puls periyodu 500 ns, tekrarlama frekansı 10kHz ve gerilimi 8kV değerindedir. Sistemin **avantajı** elektrotlara ve plazmaya dokunmanın hiçbir riski olmamasıdır ve bu sebeple de sağlık alanında kullanıma uygundur. Potansiyel uygulama alanlarından birisi ağız ve diş sağlığıdır. Kök kanal tedavisinde bu sistem kullanıma uygundur. Kök kanalın dar yapısı sebebiyle (genellikle birkaç cm genişlikli ve 1 mm'den küçük çaplı) plazmanın reaktif parçacıkları, dezenfektasyon için kanala ulaşacak kadar verimli olamaz. Bu nedenle, daha fazla dezenfektasyon verimi için, plazmanın kök kanalının içerisinde oluşumuna ihtiyaç vardır. Buna göre kısa yaşam ömürlü

parçacıkları ve yüklü parçacıkları da içeren reaktif parçacıklar bakterilerin öldürülmesinde rol oynayabilirler [16].

5.3.3. Atmosferik basınçta termodinamik dengede olmayan plazmaların bazı uygulama alanları

Termodinamik dengede olmayan plazmaların kirlilik konsantrasyonunu seyreltme çalışmalarında etkili olduğu gösterilmiştir. Bu tip plazmalarla hava emisyon kontrolü yapılabilmektedir. Termodinamik dengede olmayan plazmalar NO_x tipindeki birleşikleri, yüksek miktarda oksijen içeren gaz karışımlarından temizlemekte de kullanılmaktadır. Bazı deneylerde, nanosaniye pulslu dielektrik bariyer deşarjlar, N_2 , O_2 , NO , H_2O ve C_3H_6 kullanılarak termodinamik dengede olmayan plazmalar oluşturulmuş ve $20\text{ }^\circ\text{C}$ ile $300\text{ }^\circ\text{C}$ arasındaki sıcaklık değerlerinde bu konuda uygulamalar yapılmıştır. Sonuçlara göre NO_x uzaklaşma oranı, artan spesifik depozisyon enerjisiyle birlikte belirgin derecede artmıştır. Örneğin $100\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklıkta ve 27 J/l depozisyon enerji değerinde, NO moleküllerinin %92'si maddeden uzaklaşmıştır. Bu deneyde %43'lük bir NO_x uzaklaştırma verimi elde edilmiştir [33 - 35].

Atmosferik basınç altındaki termodinamik dengede olmayan plazmalar materyal işleme alanında, uygunlukları, etkili olmaları ve düşük maliyetli olmaları bakımından büyük ilgi görmektedir. Yapılan çalışmaların birinde, cam yüzeyin su iticiliğini geliştirmek amacıyla dielektrik bariyer corona deşarj kullanılmıştır. Bu çalışmanın sonucunda, cam üzerinde dielektrik bariyer corona deşarj uygulamasıyla hidrofobik bir katman olduğu ve hidrofobik özelliğin gelişiminin plazma uygulama miktarına (dozuna) bağlı olduğu rapor edilmiştir. Ayrıca yüzey uygulaması için optimum bir plazma dozu olduğu görülmüştür. Termal ve kimyasal eskime test sonuçlarına göre hidrofobik katman oldukça stabil bir karakteristik göstermektedir [36].

Termodinamik dengede olmayan atmosferik basınç plazmalar aynı zamanda bakteri ve mayalar üzerinde sterilizasyon amacıyla da kullanılmaktadır. Bununla ilgili yapılan çalışmalarda, sterilizasyon için deşarj oluşturmak amacıyla; hava, argon, helyum, helyum – oksijen karışımı ve

helyum – azot karışımı denenmiştir [37-47]. Son zamanlarda yapılan çalışmalarda, neon gazına ait atmosferik basınç dielektrik bariyer deşarj sistemiyle mikroorganizma sterilizasyonu da literatüre eklenmiştir [48]. Bununla birlikte günümüzde bataryalı sistemler de sterilizasyon uygulamalarına dahil edilmiştir [49].

Atmosferik basınçta termodinamik dengede olmayan plazmanın direk uygulanması yöntemiyle kanın pıhtılaşma mekanizması da yapılan çalışmalar arasında yer almaktadır. Bu çalışmalar sonucunda, plazma uygulaması sırasında kanda belirgin derecede pH ve Ca^{2+} konsantrasyon değişimi gözlenmemiştir. Termal ve elektriksel etkilerde yok sayılabilecek seviyededir. DBD plazma uygulaması albümine (kan plazmasında bulunan insan ve memelilerdeki en yaygın protein çeşidi) zarar vermeden kanın pıhtılaşmasını sağlamıştır [50].

RF atmosferik sistem ile karbon nanotüplere uygulama yapılarak yüksek saflıkta nanotüpler elde edilmiş [51].

Termodinamik dengede olmayan plazmalar, kanın pıhtılaşmasıyla ilgili bir çalışmada da kullanılmıştır. Bu deşarj yüksek voltaj ve DBD sistem ile sağlanmıştır [50].

Su itici cam kaplamada yüksek voltaj ve DBD atmosferik plazma kullanılmıştır [36].

Uçucu organik bileşiklerin yok edilmesinde, kirlilik kontrolünde, otomobillerin egzoz emisyon kontrollerinde ve polimerlerin yüzey uygulamalarında kullanılmaktadır.

Çevre kirliliğinin kontrolünde kullanımı oldukça umut vericidir ancak DBD uygulamalarının en büyük beklenti yaratan alanı geniş yüzeyli düz ekran televizyonlar için plazma ekran panelleriyle alakalıdır. Güçlü termodinamik olarak termodinamik dengede olmayan durumda olması ve basit tasarımı DBD'nin belirgin özelliklerindedir ve bu **avantajları** sayesinde geniş kapsamlı uygulamaların planlanması için cesaretlendiricidir. CO ve NO_x gazlarıyla uçucu organiklerin temizliğinde kullanılabilir [52 - 53].

Bu tip deşarj endüstride ozon üretimi, CO₂ lazerler ve excimer lambalarda UV kaynağı olarak uygulanır. Ek olarak, hava için DBD genelde, ticari olarak corona deşarj ağ dönüşüm endüstrisinde işlemi olarak bilinen, ağ dönüşüm endüstrisinde kullanılır. Polimer yüzeylere, ıslanabilirlik, yazılabilirlik, yapışkanlık özelliklerini desteklemek için DBD hava uygulaması yapılır [54].

5.4. Termodinamik Denge de Olmayan Plazma Jetlerin Etkileşimleri

Atmosferik basınçta oluşturulan plazma jetler uzak mesafelere erişebilir ancak yarıçapları birkaç mm mertebesinde sınırlıdır. Bu sebeple geniş yüzeylere uygulama yapmak için uygun değildirler. Diğer yandan tek bir plazma jet uygulama yapılan yüzey üzerinde hareket ettirilebilir ancak bu durumda da çok fazla zaman kaybı yaşanmaktadır. 1 ve 2 boyutta daha verimli bir plazma organizasyonu için deşarj tek bir güç kaynağı ile beslenir. Bu tasarım, RF ve kHz mertebesindeki pulslu güç kaynakları kullanılarak doğrulanmıştır [55 - 64]. Ancak tüm bu konfigürasyonlarda sıklıkla, farklı jetler arasında kontrol edilemeyen güçlü etkileşimler oluşur ve bunlar kararlı bir teknikte, iyi bir stabilite için, minimize edilmelidir. Diğer yandan, iki ya da daha fazla sayıda, küçük yarıçaplı plazma jetlerin birbiriyle etkileşimi, farklı gaz karışımlarıyla beslenen her bir jet için plazma dozunu artırmak veya reaktif parçacıkların kompozisyonunu daha iyi düzenlemek amacıyla aynı bölgeye etki ettirilir. Bu durumda, plazma jetler arasındaki etkileşimi anlamak daha değerli olabilir ve karşılıklı iki plazma jetin etkileşimi konusuna özel yapılmış deneyler mevcuttur. Bir deneyde T şeklinde tüp kullanılarak ve helyum gazıyla beslenen DBD jetler karşılıklı kollarda oluşturulmuştur [65 - 67]. Oluşumdan 150 ns sonra jetler dikey durumdaki tüpün içine yönelmiştir. Zamanla iki jet tek bir plazma öbeği olarak birleşmiş ve 500 ns sonra azalan parlaklıkla yayılıma başlamıştır. Bir başka çalışmada çember şeklinde bir reaktör kullanılmıştır. İki tarafa yerleştirilen yatay borular ortada bir çember içinde birleşmektedir. Reaktör içerisine sürekli olarak neon gazı gönderilmektedir. Özel kameralarla çok sık aralıklarla çekilen fotoğraflardan alınan verilere göre çemberin girişinde ilk plazma öbeği iki farklı öbek şeklinde ayrılmakta ve simetrik olarak çemberin her iki

yönünde yayılmaktadır. Bu süreçte plazmanın ilerleme hızı ve parlaklığı azalmaktadır. Öbekler düz olan çıkış borusuna ulaştığında tel bir öbek olarak birleşir ve ortaya çıkan yoğunluk ayrı iki öbeğin tek başına sahip olduğundan daha fazladır. Bu davranış, yapıcı iyonizasyon dalga karışım yoluyla güçlü enerji birleşiminin bir kanıtı olarak yorumlanır [16, 65, 66]. Bunun yanında, simülasyon çalışmaları da bu deneysel sonuçlarla uyum göstermektedir [68, 69].

Ayrı ayrı iki plazma jetin birleştirilmesiyle ilgili bir çalışma da literatürde mevcuttur. Bu çalışmada sistem, iki koaksiyel dielektrik bariyer plazma jetin birkaç cm mesafe arayla birbirlerine dönük olarak kurulmasından oluşmaktadır. 20 kHz tekrarlama frekansı ile elektrotlara yüksek voltaj uygulanmıştır. Yine özel bir kamer kullanılarak çekimler yapılmış ve incelenmiştir. İlk olarak helyum gazı her iki tüpe de gönderilmiştir. Yalnızca soldaki deşarj oluşturulduğunda, fotoğraflardan açıkça helyum-hava-helyum karışım bölgesindeki jette dairesel ve kesin olmayan yönlerde dallanma oluşmuştur. Her iki deşarj da oluşturulduğunda plazma jetlerin karşılıklı yayılımı söz konusu olmuştur. Birbirlerine doğru olabildiğince yayılmışlardır ve her iki plazma öbeği etkileşime girmiş ve görelî hızları azalmıştır. Plazma öbekleri arasındaki mesafe 1 mm seviyesine geldiğinde ikinci plazma öbeği ortaya çıkmıştır. Bu davranış, plazmanın radyal genişlemesinin bir sonucu olarak açıklanmıştır [16, 67].

6. İYON VE PLAZMA İTKİ SİSTEMLERİ

Bir roketin çalıştırılması ve yörüngeye yerleştirilmesi için yüksek itkiye sahip katı veya akaryakıt tabanlı güçlü motorlara ihtiyaç duyulur. Bunun yanında, konum kontrolü, hassas denge kontrolü ve düşük itkili manevralar içinse iyon ve plazma itki sistemleri kullanılabilir [11, 70-73]. Bir uzay aracının yakıtı çok dikkatli harcanmalıdır zira 2008 yılı verilerine göre 10000 ile 20000 \$/kg civarında ücretler karşılığında satın alınmaktadır. Elektrikli itki sistemleri uzay araçlarının ihtiyacı olan itmeyi tam olarak istenilen ölçüde sunabilme yeteneğine sahiptir. İtme, momentumdaki değişim olarak ifade edilebilir ve birim kütle başına itki demektir. İtme, ağırlık başına itki olarak da tanımlanabilmektedir ve bu durumda $9,8 \text{ ms}^{-2}$ kat daha küçük olacaktır.

İtme (I_p), itki sisteminin verim ölçüsü olarak kullanılır. Uygulamada, motorların itmesi, itki ve dengeye göre biraz değişkendir. Buna rağmen I_p ölçüsü, klasik motorlarla karşılaştırma için faydalı bir değerdir, tıpkı otomobillerdeki l/km ölçüsü gibi. Katı ve akaryakıtlarla çalışan motorların itme değerleri, yüksek sıcaklıklardaki gazların doğal limitlerinden ötürü, $4500 - 5000 \text{ ms}^{-1}$ (kütle başına değer için) aşamaz. Çok daha yüksek çıkış hızları, yakıtın elektromanyetik hızlandırma zorlamasıyla elde edilebilir ve bunun için yüklü parçacık hızlandırıcısı veya plazma kullanılır. Birçok elektrik itme prensibi iyon oluşturma mantığına dayanır ve plazma iticiler yüksek değerlerde itme sunarlar. Plazma ve iyon iticilerin yüksek itki değerleri, uzay araçlarının yüklerindeki artışa izin vermiş olur. Elektrik itki motorlarının en belirgin sorunu, özel olarak tasarlanmış ve motorun toplam itkisi için hesaplama yapabilen bir güç kaynağına ihtiyaç duymasıdır. Örnek olarak, 100 N itki kuvveti için gereken üreticinin gücü 2 MW civarında bir değerde olmalıdır ve 2,8 MW güç üreten bir güç kaynağının ağırlığı 86 ton gibi kabul edilemez bir değerdir [11, 74]. Bu sebeple elektrik roket motorları genellikle, 10^{-4} ile 10^{-2} ms^{-2} aralığına ulaşmak için kullanılmaktadır. Elektrik roket motorları, geleneksel uzay araçları için uygun olan iki basamaklı kilometre değerlerinde hıza ulaşmak için binlerce saatlik çalışmaya ihtiyaç duyarlar [11, 17].

6.1. Elektrik Roket Motoru İçin Optimum Özgül İtme

Özgül itme, gerekli itki değerine ve hıza ulaşmak için ihtiyaç duyulan değerde ayarlanmış itme miktarı (impuls) olarak tanımlanabilir.

Elektrik roket motorlu uzay aracıyla yapılan her bir uçuşun, roketin birincil kütesini ve yörüngeye oturtma maliyetini en aza indirgeyecek kendine has bir optimum itmesi vardır. Daima verimi artıran bu durum, iyon veya plazma itici tabanlı elektrik motorlarını, geleneksel katı ve akaryakıtlı çalışan sistemlerden ayırır. **Optimum özgül itmeyi** bulmak için elektrik roket motorlu uzay aracına göre bir kütle modeli varsayımı gerekmektedir. Dünya'nın yakınındayken uzay aracının birincil kütlesi m_0 için gerekli yükün miktarı m_g , yakıt olarak kullanılan akışkanın kütlesi m_y , elektrik enerjisi için kullanılan güç kaynağının kütlesi m_k , yakıt deposunun ağırlığı m_d ve sabit kalan aracın aksamının ağırlığı m_a olmak üzere;

$$m_0 = m_g + m_k + m_y + m_d + m_a \quad (6.1)$$

denklemini elde edilir [11].

Bir elektrik roket motorunun kütlesi, harcanan toplam motor gücüyle (P_e) doğrusal olarak artar ve (γ_e) katsayısı ile doğru orantılıdır. Bu katsayı birim elektriksel güç başına düşen kütle değerini gösterir ve günümüzde yaklaşık olarak 0,03 kg/W değerindedir.

$$m_e = \gamma_e \cdot P_e \quad (6.2)$$

Yakıtın kütlesi, itkiye (F) bağlı olarak, uygulama süresi (T) ve özgül itme (I_i) kullanılarak,

$$m_y = \left(\frac{F \cdot T}{I_i} \right) \quad (6.3)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Motordan çıkan yakıtın jet gücü (P_j) ise,

$$P_j = \frac{F I_i}{2} \quad (6.4)$$

olmalıdır.

Yakıtın jet gücü (P_j), elektrik motorunun harcadığı toplam güç (P_m) ve itki verimiyle (η_i) ilişkilidir. İtke verimi genelde sayısal olarak yaklaşık 0,7 gibi bir değerdedir ve bu değerler arasında aşağıdaki gibi bir bağıntı vardır.

$$P_m - P_j = \eta_i \cdot P_m \quad (6.5)$$

Yakıt ve yakıt deposu arasındaki ilişki, yakıt deposunun göreceli kütleini karakterize eden γ_d katsayısı kullanılarak tanımlanabilir.

$$m_y - m_d = \gamma_d \cdot m_y \quad (6.6)$$

Denklem (6.2) – (6.6) kullanılarak, denklem (6.1) tekrar yazılırsa aşağıdaki hale dönüşür:

$$m_0 = m_g + \frac{\gamma_e F I_i}{2 \eta_i} + \frac{F T}{I_i} (1 + \gamma_d) + m_a \quad (6.7)$$

Denklem (6.7), yüksek hassasiyetli özgül itmenin, az miktarda yakıt kullanılmasına ve dolayısıyla uzay aracının birincil kütleinin azalmasına izin verir. Diğer yandan, yüksek hassasiyetli özgül itme daha ağır güç kaynağı gerektirdiğinden aracın birincil kütleini artırmaktadır. Buna rağmen, belirli bir optimum özgül itme değeri (I_i^{opt}), dm_0/dI_i değerini minimize eder. Buna göre aracın birinci kütleisiyle alakalı,

$$I_i^{\text{opt}} = \sqrt{\frac{2 \eta_i T (1 + \gamma_d)}{\gamma_e}} \quad (6.8)$$

denklemini yazılabilir [11]. Bu denkleme göre, özgül itmenin optimum değeri itkiden bağımsızdır ve genellikle elektrik roket motorunun çalışma zamanıyla veya uzay aracının uçuş süresi kullanılarak hesaplanır. Örnek olarak yapılan hesaplara göre $T \approx 1 \text{ yıl}$ olan Mars'a uçuş için gerekli $I_i^{\text{opt}} \approx 40 \text{ kms}^{-1}$ olarak belirlenmiştir. Bunun yanında, Dünya'nın yakınlarındaki uçuşlar ve yörünge düzeltmeleri için gereken optimum özgül itme yaklaşık olarak $I_i^{\text{opt}} \approx 15 - 30 \text{ kms}^{-1}$ değerlerindedir. Özetle, iyon ve plazma iticilerin yakıt hızının $15 - 100 \text{ kms}^{-1}$ mertebesinde olması beklenmektedir [11, 74].

6.2. İyon İtici Temelli Elektrik Roket Motorları

Yakıt olarak, sabit elektrik alanda hızlandırılmış pozitif iyonların kullanıldığı elektrik roket motorlarına **iyon iticiler** denir. İyon iticiler, tarihsel açıdan plazma iticilerden daha önce geliştirilmiştir. Bu tip motorlar, plazma iticilere göre imal edilme açısından daha basittir. İyon iticiler temel olarak, iç kısımda bir katot ve etrafını saran anot, bu sistemi çevreleyen bir deşarj odası, en dışta elektromanyetik bobin, yakıt girişi ve dış elektrottan oluşur. Dış elektrot ve nötrleyici (katot düzenleyici) uzay aracının dışından topraklanır. İyon kaynağı sürekli pozitif, hızlandırıcı olarak kullanılan elektrot ise sürekli negatif potansiyel altındadır. Dış elektrot sıfır potansiyeldedir (topraklanmıştır). Böyle bir dağılıma sahip elektriksel potansiyel, nötrleyiciden gelen elektronların hızlandırıcı ve iyon kaynağına ulaşmasını önler. Hızlandırılan iyonlar, nötrleyiciden gelen sürükleyici elektronlarla birlikte iticiden uzaklaşır ve çevreye dağılır. Bu nedenle, hızlandırılmış iyonlar iticiden ayrılmasına rağmen, uzay aracının elektriksel potansiyeli büyümmez ve iyon demetinin yükü nötralize olmaz. İyon iticilerde iyon kaynağı olarak farklı sistemler kullanılabilir. Günümüz sistemlerinde genelde iyon kaynağı olarak gaz deşarjları kullanılır. Gaz deşarjlarında elektron darbeleri yerine iyonlaşma meydana gelir [11]. Görsel 6.1.'de NASA'nın (National Aeronautics and Space Administration), NEXT (NASA Evaluation Xenon Thruster – NASA Evrimsel Xenon İtici) isimli iyon iticisi görülebilir.



Görsel 6.1. NASA'nın geliştirdiği, NEXT (NASA Evolutionary Xenon Thruster) isimli iyon itici [75].

6.3. Elektro-Termal Plazma İtici

Quasi-nötral, yani yüklü parçacıkları da barındıran ancak toplamda nötral olan plazma, plazma iticilerde yakıt olarak kullanılır ve %90-95 oranında iyonlaşmış durumdadır. Elektronlar, hızlandırma kanalında, iyonların pozitif yükünü nötralize eder ve böylece iticinin karakteristiği geliştirilmiş olur. Plazma iticideki hem elektronlar hem iyonlar 100 km s^{-1} değerine kadar hızlandırılırlar. Bu durum için enerjinin çoğu iyonlarda birikir ve aynı hıza hızlandırılmış bir elektronun enerjisi yaklaşık olarak $0,03 \text{ eV}$ civarında olacak kadar küçüktür. Bu sebepler doğrultusunda plazma iticinin asli görevi, iyon iticilere benzer şekilde **iyon hızlandırmaktır**. Tamamen iyonlaşmış saf plazmada iyon hareketi,

$$m_i \frac{d\vec{v}_i}{dt} = e\vec{E} - \frac{\nabla p_i}{n_{e,i}} - \frac{1}{\sigma} \vec{j} + e(\vec{v}_i \times \vec{B}) \quad (6.9)$$

denklemleri ile tanımlanır. Burada m_i , \vec{v}_i ve e sırasıyla iyonun kütlesi, hızı ve yükü, $n_{e,i}$ ve σ plazmanın yoğunluğu ve iletkenliği olarak tanımlanır. \vec{E} ve \vec{B} ise elektrik ve manyetik alanı göstermektedir. ∇p_i ve \vec{j} , iyonik basıncın gradyenti ile akım yoğunluğudur.

Denklemler (6.9) için, eşitliğin sağ tarafındaki ilk üç kuvvet iyonun enerjisini, hızlandırmak için artırır. İyonların, $e\vec{E}$ kuvvetiyle hızlandırılması elektrostatik, $\frac{\nabla p_i}{n_{e,i}}$ kuvvetiyle hızlandırılması termal, $\frac{1}{\sigma}\vec{j}$ kuvvetiyle hızlandırılması ohmik olarak isimlendirilir. İyon hızlandırmanın farklı mekanizmaları hesaba katıldığında, plazma iticiler üç farklı kategoriye ayrılmıştır; elektro-termal plazma iticiler, elektrostatik plazma iticiler ve manyeto-plazma-dinamik iticiler [11, 76].

Elektro-termal plazma iticilerde, yakıt olarak kullanılan plazma, genellikle arc deşarj veya RF indüktif sistem kullanılarak, termal gaz deşarjyla oluşturulur ve geleneksel roket motorlarındakine benzer bir nozzle (ağızlık) kullanılarak hızlandırılır. Geleneksel sistemlere göre avantajları, yakıt olarak hidrojen gibi hafif gazlar kullanılması ve ısıtma için geleneksel sistemlere nazaran çok çok büyük sıcaklıklara ihtiyaç duyulmamasıdır. Bu tip bir sistemle ilgili yapılan çalışmalardan elde edilen veri ve hesaplamalar doğrultusunda, sistemin tasarımı ve plazmanın bu durumdaki davranışı ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır [11, 77].

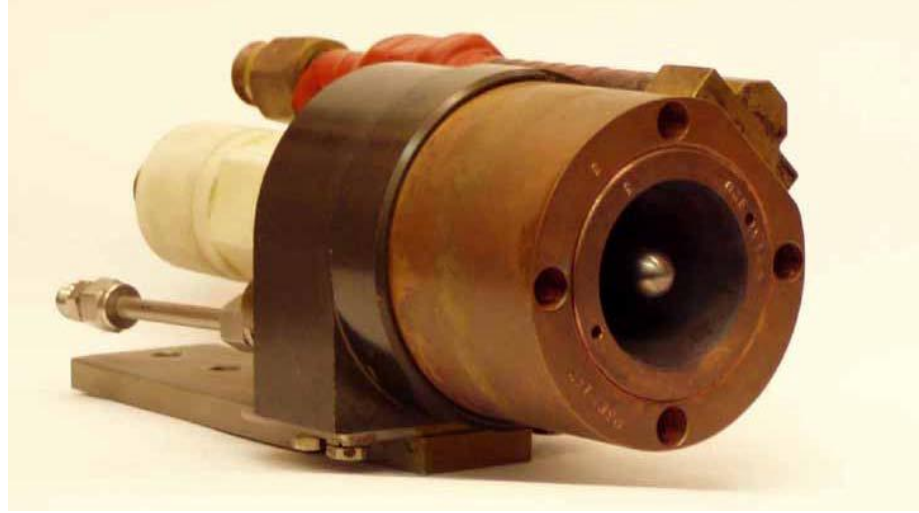
6.4. Elektrostatik Plazma İticiler

Elektrostatik plazma iticilerdeki iyon hızlandırma, manyetik alandaki enine keskin elektron mobilite azalması nedeniyle, mıknatıs kutupları arasındaki dairesel boşluktaki plazma içerisinde bulunan elektrik alan tarafından oluşturulur. İtici içerisindeki manyetik alan, manyetize olmuş plazma elektronlarıyla tutulur ancak manyetize olmamış iyonlar sistemden uzaklaşır. Anot elektrot, tipik potansiyel değerlerine (0,3-3 kV) sahip olduğunda ve mıknatıs ile katot elektrot düzenleyici sürekli sıfır potansiyel altında tutulduğunda, elektrik alan etkisiyle dairesel boşlukta simetrik bir deşarj oluşur. İyonlar, manyetik alan etkisiyle zorlanmadan ve eksenel yönlerde hızlandırılmış durumdayken, manyetize elektronların

sürüklenmesi teğet yönlerde olur. Elektronlar, iyon hızlandırma esnasında yakalandığı ve iyonlarla birlikte sistemden çıkamadığı için katot düzenleyici iyon hızlandırma kanalının çıkış kısmına yerleştirilebilir. Elektronların bir bölümü, iyon iticilerdekine benzer şekilde, katot düzenleyicide, iyon demeti biçiminde düzenlenir. Elektronların diğer bir bölümü iyon hızlandırma kanalına gider ve elektrik deşarjını devam ettirir. Yakıtın nötral atomları hızlandırma kanalına gönderilir ve orada dairesel hareket yapan manyetize elektronlar tarafından iyonlaştırılır. Elektronların ağır parçacıklarla çarpışması, teğet sürüklenme yönlerini bozar ve elektronların anoda karşı yönde hareket etmesine sebep olur. İyonlar, yakıtın iyonlaşmasıyla oluşur ve elektrik alanda hızlandırılarak itki sisteminde çıkar. Buna göre **elektrostatik plazma iticiler**, yakıtı iyonlaştıran ve hızlandıran her iki katmana da sahip bir sistemdir. İyon iticilerin aksine, elektrostatik plazma iticilerde iyon hızlandırma elektron bulutu içerisinde gerçekleşir. Bu sistemler iyonların yükünü dengeler ve motorun karakteristiğini geliştirir. Elektrostatik plazma iticiler, yapısal olarak iki farklı şekilde imal edilebilir. **Yerleşik itici** olarak adlandırılan versiyon uzun iyonlaştırma ve hızlandırma katmanlarına sahiptir. Diğer bir versiyonu da **anot katmanlı itici** olarak adlandırılır ve anoda çok yakın iyonlaştırma ve hızlandırma katmanlarına sahiptir [11].

6.5. Manyeto-Plazma-Dinamik İticiler

Manyeto-plazma-dinamik iticilerde iyonlar, elektron-iyon sürtünmesi sayesinde elektronlar tarafından hızlandırılır. Her bir iticideki manyetik alan ya dış manyetik sistem tarafından ya da dahili deşarj akımı tarafından indüklenir. İticinin kendi deşarj akımı tarafından indüklenen manyetik alanla birlikte iticideki iyon hızlandırmanın etkisi yüksek elektron akışının olduğu seviyelerde oldukça büyüktür (1-10 kA). Bu nedenle bu tür iticiler genelde **yüksek-akım iticiler** olarak adlandırılmaktadır. İticideki elektronlar, sistemden iyonlarla birlikte ayrılır ve bu yüzden özel tasarlanmış bir nötralleştirici katoda ihtiyaç duyulmaz. NASA'nın tasarladığı 200 kW değerindeki manyeto-plazma-dinamik itici **Görsel 6.2'**de görülebilir [11, 78].



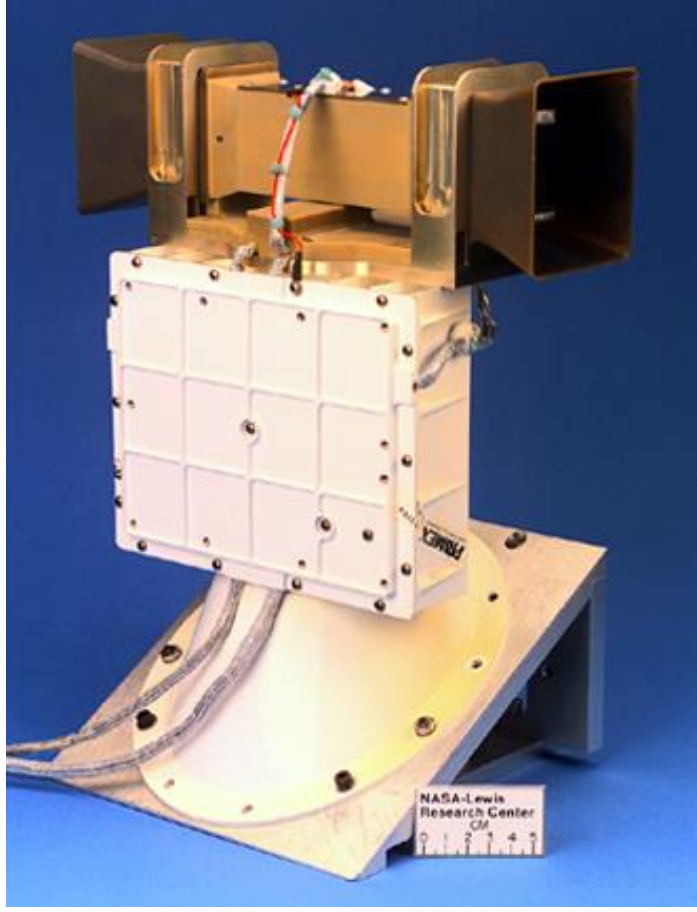
Görsel 6.2. NASA'nın tasarladığı manyeto-plazma-dinamik itici (MPD thruster) [77].

İtici, yakıt olarak kullanılan gazın motora geldiği yol boyunca bir termoiyonik katot, dış kısımda bir halka elektrot ve yalıtıcıdan oluşur. Yüksek-akım iticilerde katot anottan daha küçüktür. Bu nedenle plazma iticinin istenen kısmında hapsolür ve daha etkili şekilde elde edilebilir.

6.6. Atmalı (Darbeli) Plazma İticiler

Bu tür iticilerde, elektrik enerjisi ve yakıt, itici içerisine sürekli olarak değil milisaniyelik aralıklarda ayrı ayrı atmalar şeklinde aktarılır. Atmalı (pulsed – pulslu) iticiler yeterli enerjiyi toplamak için kapasitörlere sahiptir. Bunu yanında bu tip iticiler periyodik olarak ateşleme yapmak için de bir sistemi içerisinde barındırır. Yakıt, itici içerisinde anot ve katot arasında katı veya macunumsu yapıdaki dielektrik kısımda yer alır ve ayrıca yalıtıcı olarak görev yapar. Atmalı plazma iticilerin çalıştırılması ilave bir kapasitörle başlatılır. Üretilen plazma ana anot ve katot arasındaki hızlandırma boşluğuna gider. Bu anot ve katot, kapasitörün voltaj ve enerjisinin depolandığı yerdir. Bu yolu izledikten sonra plazma deşarjı hazır duruma gelir. Dielektrik yakınlarındaki plazma üretimi, dielektriğin yüzey deşarjına ve buharlaşmasına sebep olur. Deşarj akımı ve kendi oluşturduğu teğetsel manyetik alanın etkileşimi ortak eksenli sistemde plazma hızlandırılmasına katkıda bulunur. Kapasitörlerin enerji deposu boşaldığında buharlaşmış

yakıtın oluşumu otomatik olarak durur ve atmalar durur. NASA'ya ait bu tip bir sistem **Görsel 6.3.**'de gösterilmiştir [11, 79].



Görsel 6.3. NASA'ya ait atmalı plazma itici (Pulsed Plasma Thruster – PPT) [79].

7. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmanın amacı doğrultusunda, daha basit yöntemler ve daha düşük maliyetlerle, laboratuvar ortamında üretilen plazmaların itki özellikleri incelenmeye çalışılmıştır. Buna göre, farklı ölçülere sahip, farklı elektrot ve reaktör tasarımlarıyla deneyler yapılmış ve ölçümler alınmıştır. Elde edilen değerler vasıtasıyla hesaplamalar yapılarak sonuçlar yorumlanmaya çalışılmıştır.

7.1. Deneylerde Kullanılacak Plazma Çeşidinin Seçimi

İtki özellikleri incelenecek olan sistem seçilirken, tamamen itki oluşturmak için hazırlanan sistemlerin aksine, laboratuvar ortamında elde edilmesi nispeten daha hızlı olan bir sistem olmasına karar verilmiştir. Buna göre, **bölüm 5.3.2.**'de bahsedilen **DBD-benzeri** sistem seçilmiştir. Bunun sebeplerinden biri de yine aynı bölümde bahsedildiği gibi gaz karışımları için de uygun bir sistem olmasıdır. Diğer yandan, önceden tanımlandığı gibi oluşan plazmanın, deşarj tüpü dışında bir metal ile temas etmediği sürece DBD deşarj gibi davranan bir sistem olması, ekstra bir dielektrik malzeme kullanılmadan, itki amacıyla DBD yerine bu sistemin kullanılabileceğini göstermektedir. Diğer avantaj da bu sistemle oluşturulan plazma jetin, DBD sistemle oluşturulandan daha uzun olduğunun gözlenmiş olmasıdır [16].

7.2. Düzeneğin Tasarlanması Ve Plazmanın Oluşturulması

Oluşturulacak plazmanın seçilmesinden sonra sistemin tasarlanması kısmına geçilmiştir. Bunun için, dielektrik malzeme olarak **kuartz tüp** seçilmiştir. İç elektrotta **%2 toryum katkılı tungsten tel**, dış elektrotta dairesel şekilde **alüminyum** kullanılmıştır. Gaz giriş için bağlanan hortumlar **pnömatik** özellikte olup, gaz akışının kontrolü **M+W Instruments Mass-Stream D6300 Serisi** akış metreyle sağlanmıştır.

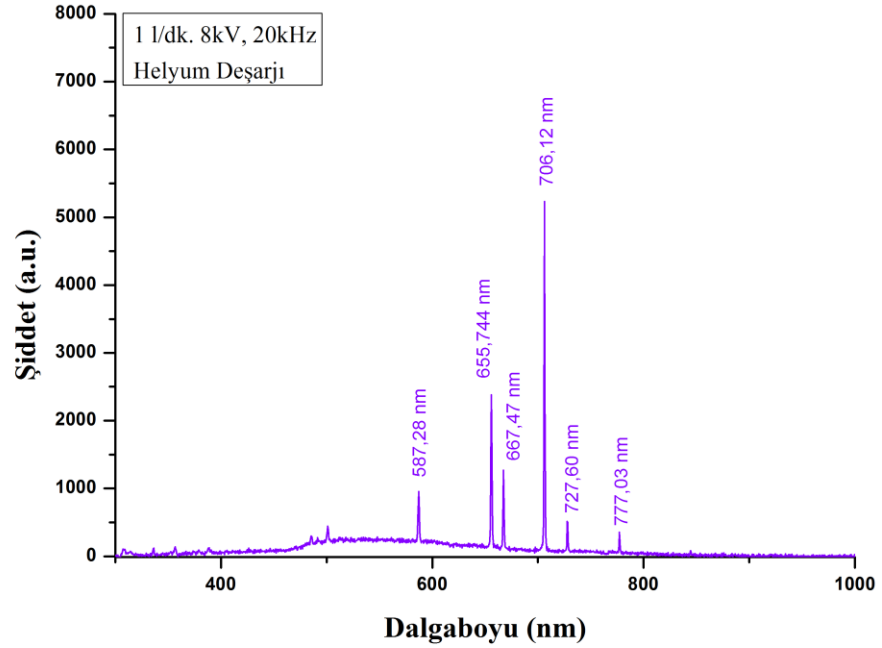
Güç kaynağı olarak seri üretime sahip olmayan bir alternatif akım (ac) güç kaynağı kullanılarak, plazmanın oluşması için yeterli olan en az potansiyel değeriyle, stabil kalabileceği en düşük frekans değeri tercih edilmiştir. Bu şartlarda güç kaynağında plazmanın oluşumuna yetecek ve ayarlanabilen potansiyel değeri 8kV değeridir. En düşük 7 kHz en yüksek 24

kHz frekans değerine sahip olan güç kaynağında plazmanın minimum değişkenlikle oluşması için tercih edilen en düşük değer, denemeler sonucunda 20 kHz olmuştur. Bu değerlerde plazma jet saçılmadan, odaklı ve stabil bir hal alabilmektedir.

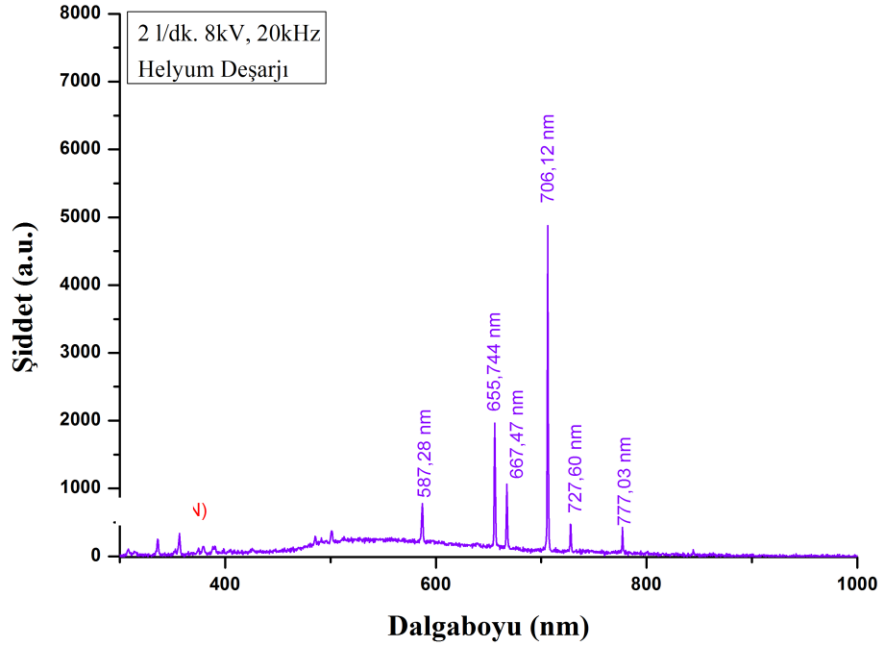
7.3. Optik Emisyon Spektrumu Ölçümleri

Plazma karakterizasyonunda ve hesaplamalarda kullanılan verileri elde etmede önemli bir yere sahip olan optik emisyon ölçümlerini yapmak için Ocean Optics'e ait HR 2000+ marka OES cihazı kullanılmıştır. Bu cihaz USB bağlantı yöntemiyle bilgisayara bağlanarak veriler Spectra Suite programıyla görüntülenmiş ve analizler için işlenmiştir.

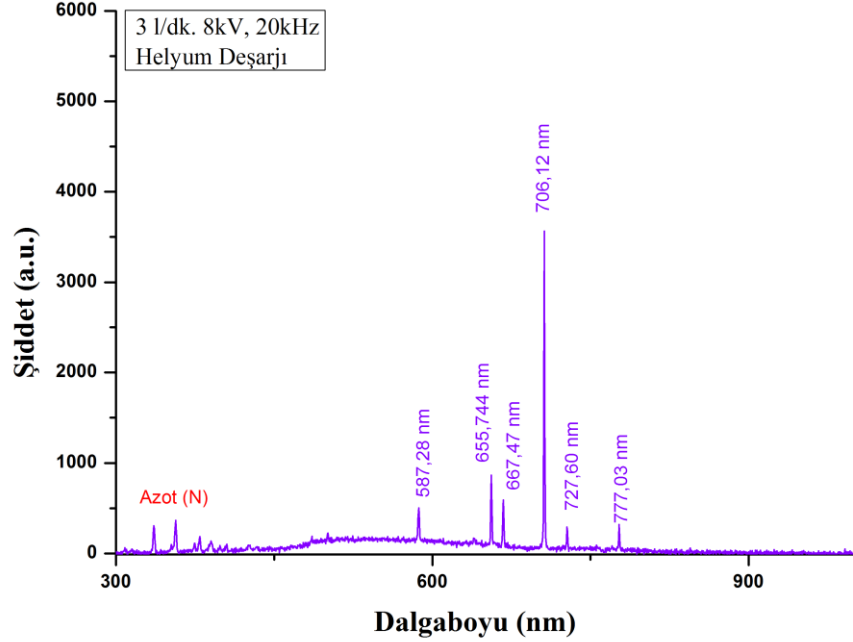
Şekil 7.1 – Şekil 7.9 da helyum, neon ve argon gaz deşarjlarına ait spektrumlar açıklamalarıyla verilmektedir.



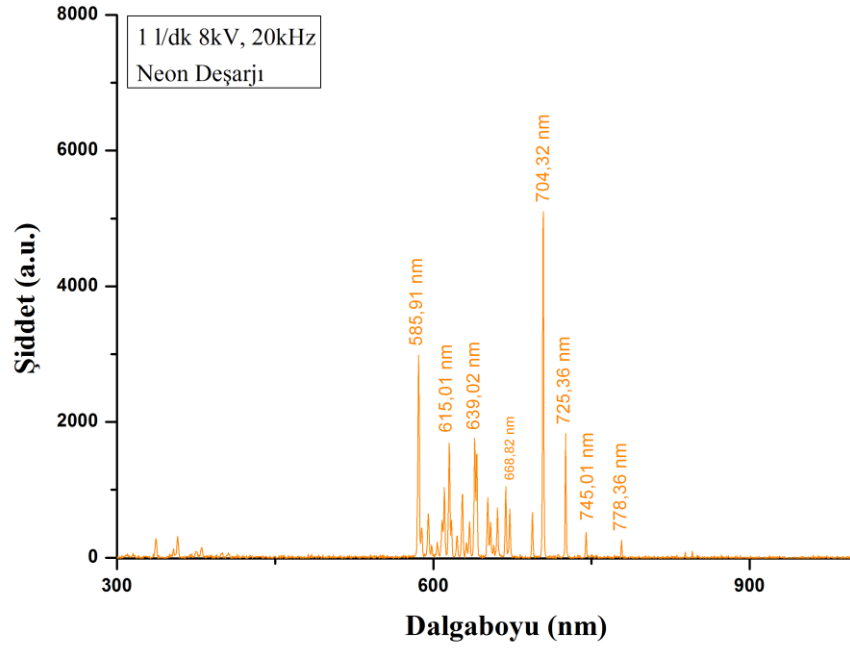
Şekil 7.1. 1 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, helyum gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.



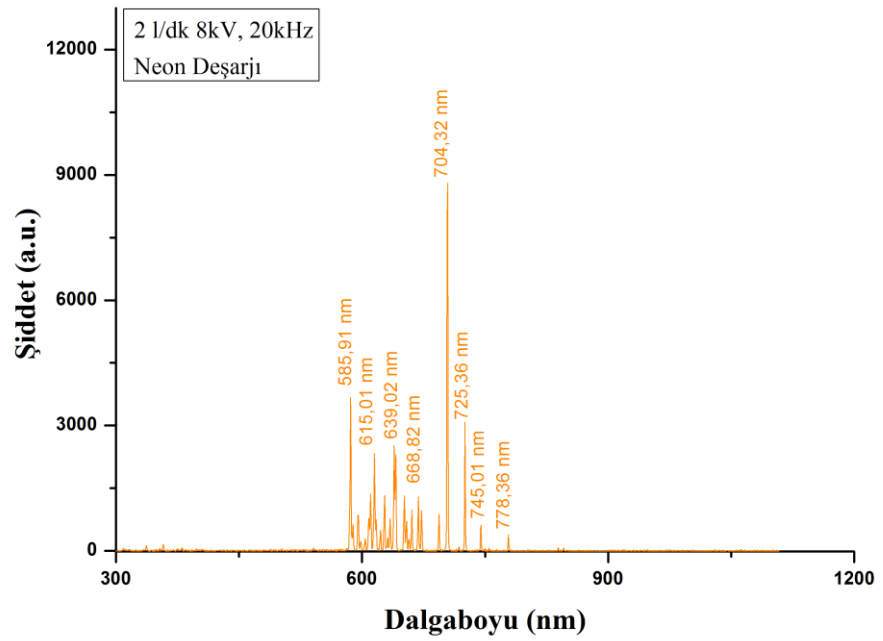
Şekil 7.2. 2 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, helyum gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.



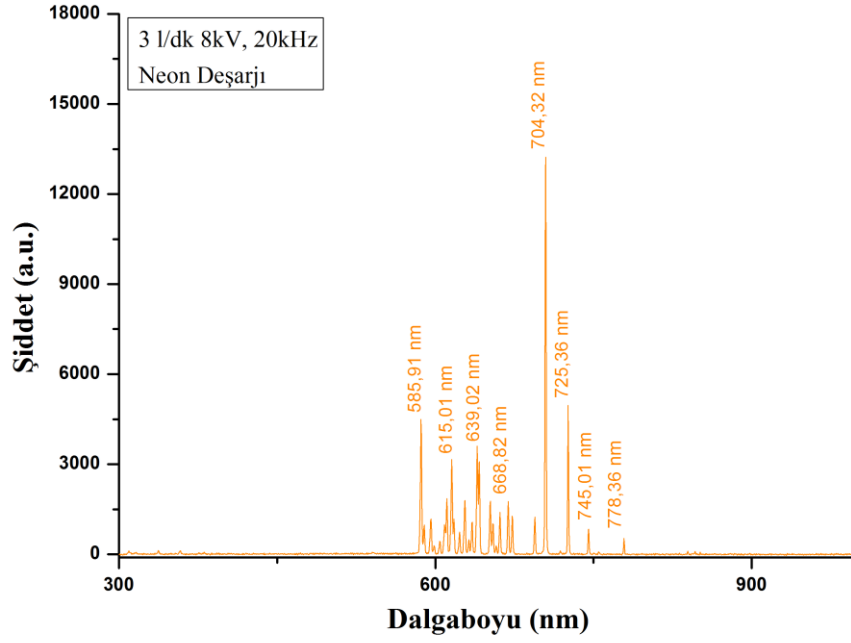
Şekil 7.3. 3 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, helyum gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.



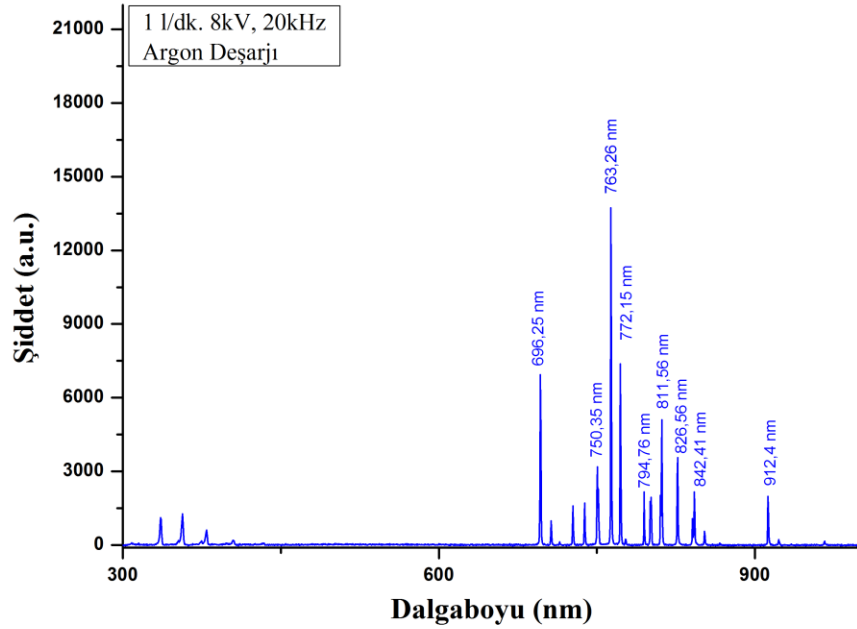
Şekil 7.4. 1 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, neon gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.



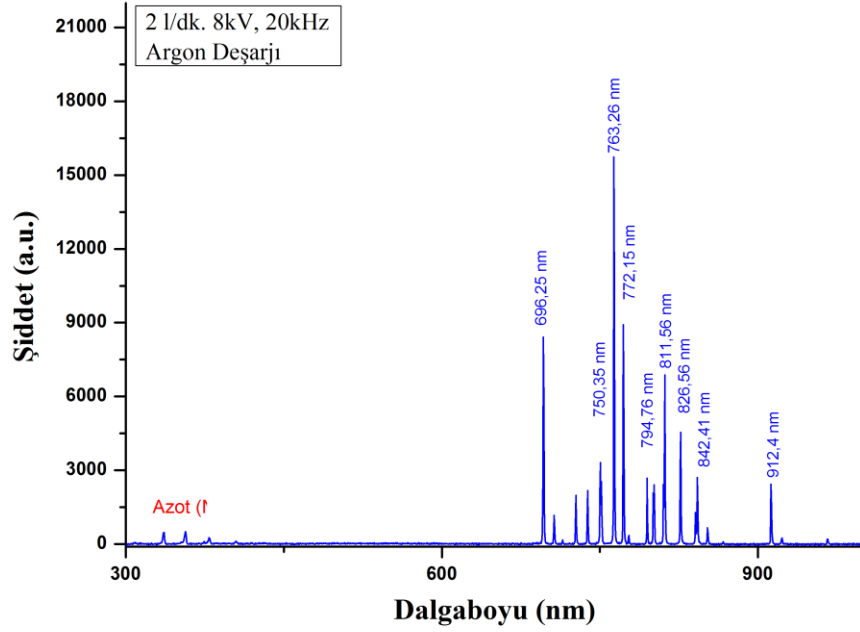
Şekil 7.5. 2 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, neon gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.



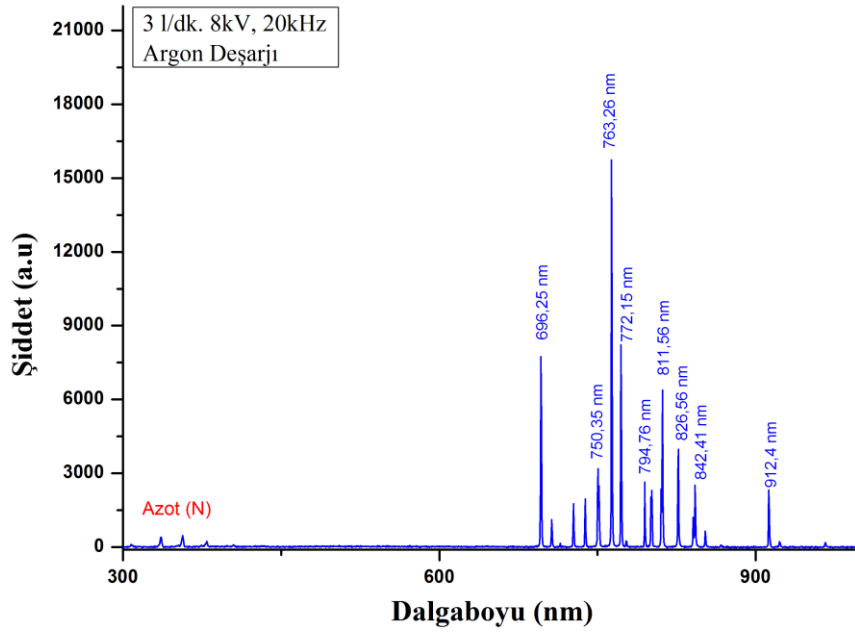
Şekil 7.6. 3 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, neon gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.



Şekil 7.7. 1 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, argon gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.



Şekil 7.8. 2 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, argon gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.



Şekil 7.9. 3 l/dk. gaz akış oranında, oda sıcaklığında, argon gazına ait, 8 kV, 20 kHz güç değerlerinde optik emisyon spektrumu.

OES verilerinden çizdirilen grafikler incelendiğinde, her bir gaza ait plazmanın farklı dalga boylarında ve farklı şiddetlerde pikler verdiği görülebilmektedir.

Neon plazmasına ait OES grafiklerinde en yüksek şiddete sahip pik 704,77 nm dalga boyundadır. Bu noktadaki pikin şiddeti, artan gaz akış oranıyla birlikte artmaktadır. Argon plazmasına ait 763,26 nm dalga boyundaki en yüksek şiddetli pikin şiddeti de gaz akış oranıyla artmıştır. Argon plazması için OES piklerinin şiddeti genel olarak akış oranıyla artmakla birlikte, 1 l/dk akış oranından 2 l/dk akış oranına geçişte OES piklerindeki şiddet artışları nispeten daha büyük değerlerde olmuştur. Helyum gazına ait plazmanın en şiddetli OES piki 706,12 nm dalga boyundadır ve şiddeti gaz akış oranıyla ters orantılı olarak değişmiştir. Optik emisyonlardan elde edilen görelî pik şiddetleri, parçacık konsantrasyonu için nitel bir gösterge sunar [80]. Bu durumda gaz akış oranındaki artış parçacık konsantrasyonunu artırarak pik şiddetlerinde artışa sebep olmuştur. Helyumun iyonlaşma kesit alanı nispeten küçüktür ve bu durumda helyum gazının akış oranındaki artış elastik olmayan çarpışmaların azalmasına sebep olur [81]. Dolayısıyla helyum gazına ait OES pik şiddetlerindeki gaz akış oranına ters orantılı bu azalma, iyonlaşmanın azalmasıyla ilgili olabilir. Pik şiddetlerindeki bu değişimler gaz akışına göre elektron sıcaklıklarının farklılık göstereceğinin işareti sayılabilir çünkü farklı pik şiddetleri farklı elektron sıcaklıkları ortaya koymaktadır.

OES grafiklerinin, neon plazmasına ait 2 l/dk. ve 3 l/dk. gaz akış oranları hariç tamamında net bir şekilde gözlenen azot pikleri ise yalnızca 300 nm ile 400 nm arasında yer almaktadır. Bunun nedeni, atmosferik basınç altında oluşturulan plazmanın havayla etkileşiyor olması olabilir. Kullanılan gaz, kartz cam borunun tamamını doldursa da cam borunun bitiminde havayla temas gerçekleşmektedir. Cam borunun bitim noktasından (jet bölgesi) alınan OES verilerinde azot piklerinin görülmesi, bu sebeple normal sayılabilir.

Grafiklerde gösterilen helyumun düşük basınçta atomik geçişleri 388,87 nm ile 728,13 nm dalga boylarındadır. 728,13 nm dalga boyundaki karakteristik pik atmosferik basınçta görünür durumdayken, 388,87 nm dalga boyundaki pik nispeten oldukça küçük şiddette görünmüştür [13].

Argon plazmasına ait OES grafiğinde ise 750,4 nm dalga boyu işaretlenmiştir. Paschen 2p seviyesi, görelî elektron uyarılma oranının

hesaplanmasını kullanılır, argon için bu ışımada $2p_1$ seviyesinde gerçekleşir ve 750,4 nm dalga boyunda yayınlanır.

7.4. Deneysel İtki Ölçümleri

İtki değerini newton (N) birimiyle $\left(\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2}\right)$ tanımlanır. Ağırlık, kütleyle yer çekimi ivmesinin çarpımıyla elde edilir ve bir kuvvettir. Buna göre itki de oluşturulacak ağırlık etkisi düşüncesinden yola çıkılarak bir terazi yardımıyla hesaplama yoluna gidilebilir. Bu fikirden yola çıkılarak itkiyi deneysel olarak ölçmek için **Görsel 7.1**'deki düzenek kurulmuştur.

Düzenek için kullanılan kuartz camın dış çapının ölçüsü 5 mm, iç çapının ölçüsü ise 3 mm değerindedir. Gücün aktarıldığı tungsten telin kalınlığı ise 1,6 mm'dir. Toprak için kullanılan elektrotun çapı 40 mm, kalınlığı ise 7 mm değerine sahiptir.



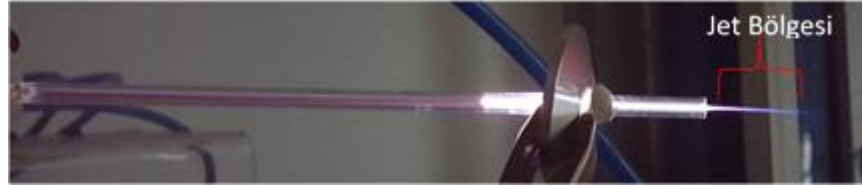
Görsel 7.1. İtki değerini deneysel olarak gözlemlemek için kurulan deney düzeneği.

Bölüm 7.1'de tanımlanan sistemle, terazi kullanılarak itki değeri, farklılık soy gazların atmosferik basınç plazma jetleri için hesaplanmaya. Burada elektronik hassas terazinin elektriksel etkilerden ve sıcaklıktan

etkilenmemesi için toprak bağlantısına sahip küçük bakır bir levha plazma ile terazi arasına konulmuştur. Öncelikle terazinin düz bir zeminde olmasına ve sıfır değerini gösteriyor olmasına yani kalibrasyonuna dikkat edilmiştir. Ardından gaz akışı başlatılarak istenen değere ayarlandıktan sonra hem gaz akışının dengeli hale gelmesi hem de terazinin sabitlenmesi beklenmiştir. Okunan değer not edilmiştir. Bu adımdan sonra güç kaynağı çalıştırılarak plazma elde edilmiş ve terazideki değişim gözlenmiştir. Yine gaz akışı sağlandıktan sonra yapıldığı gibi plazmanın dengeli hale gelmesi ve terazinin sabitlenmesi beklenmiştir ve yine teraziden okunan değer not edilmiştir. Son olarak, plazmanın oluşumu sonrası okunan değer newton birimi cinsinden elde edilmiştir.

Bu deneylerde gaz akış oranı olarak 1 l/dk, 2 l/dk, 3 l/dk değerleri seçilmiştir. Gaz seçiminde, periyodik tabloda soy gazların ilk sırasında yer alan helyum, ikinci sıradaki neon ve **laboratuvar plazmalarında** en çok kullanılan gaz olan yüksek safılıkta argon tercih edilmiştir.

Helyum (He), neon (Ne) ve argon (Ar) gazlarına ait deşarjların fotoğrafları sırasıyla **Görsel 7.1, 7.2 ve 7.3'**de yer almaktadır.



Görsel 7.2. Helyum gazına ait oda sıcaklığında atmosferik basınç plazma.



Görsel 7.3. Neon gazına ait oda sıcaklığında atmosferik basınç plazma.



Görsel 7.4. Argon gazına ait oda sıcaklığında atmosferik basınç plazma.

Oluşturulan plazmalar, görsellerden de anlaşılacağı üzere farklı renklere sahiptir. Helyum deşarjı pembe, neon deşarjı turuncu ve argon deşarjı mavi renkte bir oluşum göstermiştir. Bunun sebebi, her gazın farklı atomik yapıda olması ve verilen enerji miktarına göre uyarılan elektronların farklı enerji seviyelerine çıkmalarıdır. Bu durumda elektron kendi enerji seviyesine dönerken, çıktığı enerji seviyesi farklı olduğu için, yayınladığı fotonun enerjisi de farklı olur. Her enerji seviyesinin yayınladığı renk farklıdır.

Plazmanın karakterizasyonu için her bir gazın, tüm akış değerlerindeki optik emisyon spektrum grafikleri alınmış ve bunlar **elektron sıcaklığının** hesaplanmasında kullanılmıştır.

İlk olarak **argon** gazının 1, 2 ve 3 l/dk akış oranlarındaki itki hesaplamaları yapılmıştır. Terazide yer alan topraklanmış bakır levhanın kütlesi düşüldükten sonra okunan değerler sırasıyla 1, 2 ve 3 l/dk. için 0,0442 g, 0,1021 g, 0,1341 g değerleridir. **Helyum** gazıyla yapılan deneyde yine aynı akış değerlerinde sırasıyla 0,0199 g, 0,0359 g ve 0,0369 g değerleri gözlenmiştir. **Neon** gazının deşarjında 1, 2 ve 3 l/dk akış değerlerinde 0,0108 g, 0,0205 g ve 0,0550 g değerleri ölçülmüştür. Bunun sonucunda, hassas terazi için 1 g kütlenin karşılığı olan ağırlık eşdeğeri olan 0,00980665002864 N değeri kullanılarak **Tablo 7.1** oluşturulmuştur.

Tablo 7.1. Deneyde kullanılan gazlarla oluşturulan plazmaların ölçülen itki değerleri.

Ölçülen İtki Kuvveti (μN)			
Gaz çeşidi	Akış oranı		
	1 l/dk	2 l/dk	3 l/dk
Helyum	395,15	752,06	961,86
Neon	105,91	201,04	539,37
Argon	433,455	1001,262	1315,074

Ölçülen ağırlık değerlerinden yapılan dönüşümlerle elde edilen itki değerleri göstermektedir ki farklı gazlarla oluşturulan deşarjların itki değerleri birbirlerine göre oldukça farklılık göstermektedir. Buradan anlaşılan, gazların plazmaları için itki değerleriyle ilgili tahmin yapmak gerekseydi, yalnızca bu gazlara ait atom numaralarından tahmin yapılamazdı.

8. HESAPLAMALAR

İtke değerlerine ulaşmak için yapılan deneysel itke ölçümlerinin yanında, teorik hesaplamalar ve deneysel verilerin de eklendiği bazı hesaplamalar yapılmıştır. Bu değerler, deneysel verilerle karşılaştırılarak, hesapların doğruluğu ve deney düzeneğinin uygunluğu tartışılmıştır.

Kuvveti hesaplamak için enerji değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Plazma için yaklaşık ortalama enerji değeri, **elektron sıcaklıkları** (T_e) kullanılarak $2T_e = E_K$ denklemiyle hesaplanabilir [82]. Bunun için gereken elektron sıcaklığı ise termodinamik dengede olmayan plazmalar için **Alt bölüm 5.1**'de bahsedildiği gibi **modifiye-Boltzmann yöntemiyle** elde edilebilir.

Öte yandan plazmaya ait elektron sıcaklığı hesaplamak için tek yöntem modifiye-Boltzmann yöntemi değildir. Modifiye edilmemiş Boltzmann metodu ve çarpışmalı-ışınım modeli (collisional - radiative model – CRM) de elektron sıcaklığı hesaplanırken kullanılabilir [83].

Atmosferik basınç altındaki bu çalışmadakine benzer DBD ve DBD-benzeri sistemlerde AC, DC veya RF güç kaynaklarıyla oluşturulan plazmaların elektron sıcaklıkları 0,9 eV ile 10 eV aralığında elde edilebilmektedir [84, 85, 86].

Modifiye-Boltzmann yönteminde, plazması oluşturulan gaza ait bazı sabit değerlere ihtiyaç vardır. Bunlar, elektronun uyarıldıktan sonra çıktığı üst enerji seviyesi E_k ve Einstein katsayısı $g_k A_{ki}$. Bu değerler, plazmadan ölçülen optik emisyon spektrumlarındaki piklerden alınan dalgalılarına (λ) göre seçilir. Seçilen dalgalılarına ait optik emisyon spektrumundaki şiddet değerleri (I) de hesaba katılarak,

$$\ln\left(\frac{I_{ki}\lambda_{ki}}{g_k A_{ki}}\right) \quad (8.1)$$

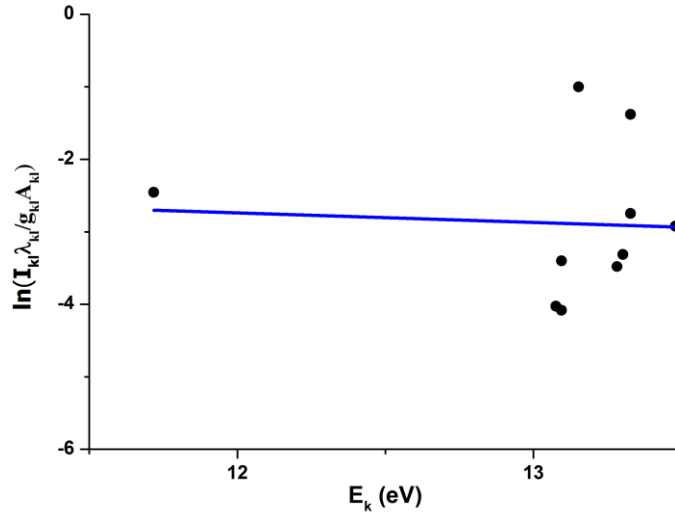
işlemi, her bir dalga boyu için yapılır. Elde edilen verilerin, her bir dalgalıının kendisine ait üst enerji seviyesi E_k değerine karşılık grafiği çizilerek eğim değeri okunur. Bu eğim değeri (m) kullanılarak,

$$T_u = -\left(\frac{1}{m}\right) \quad (8.2)$$

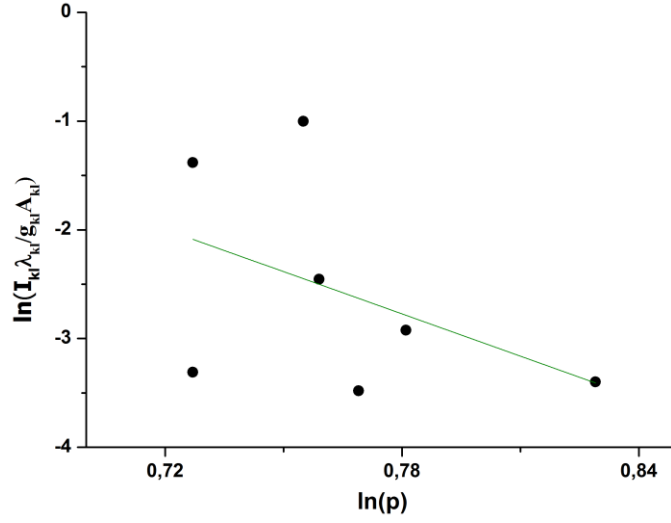
yaklaşık ortalama **uyarılma sıcaklığı** (T_u) değerine ulaşılır. Buradan sonra Boltzmann hesabının modifiye edildiği kısma geçilir. Fujimoto' ya [81] göre eğim (m) değeri yaklaşık 6 olduğunda plazma çarpışmalarla oluşmaktadır ve Boltzmann eğrisi modifiye edilmelidir. Bunun için $\ln\left(\frac{I_{ki}\lambda_{ki}}{g_k A_{ki}}\right)$ ve $\ln(p)$ arasındaki çizilecek bir grafikte elektron sıcaklığı değerine ulaşılabilir. Bu işlemin doğru sıcaklığı verebilmesi için, tekrarlanması gerekmektedir ve bu tekrar iki hesabın sonucu arasındaki fark %10'dan daha küçük olana kadar devam ettirilir. Burada $\ln(p)$ değeri,

$$p_i = \sqrt{\frac{E_H}{E_i - E_k}} \quad (8.3)$$

denklemini kullanılarak elde edilir. E_H , E_i ve E_k sırasıyla Rydberg sabiti (13,605693 eV), iyonlaşma enerjisi ve uyarılma enerjisidir [87]. İyonlaşma enerjisi; helyum için 24,5874 eV, neon için 21,57 eV, argon için 15,8 eV alınmaktadır [12].



Şekil 8.1. $\ln\left(\frac{I_{ki}\lambda_{ki}}{g_k A_{ki}}\right) - E_k$ grafiği.



Şekil 8.2. $\ln \left(\frac{I_{ki}^{\lambda_{ki}}}{g_{ki}^{A_{ki}}} \right) - \ln(p)$ grafiği.

İtki hesabı için öncelikle gaz akış oranına göre atomların sayısı hesaplanmaya çalışılmıştır. Bunun için [82]'deki hesaplama yönteminden yararlanılmıştır.

$$0,037106 \left[\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right] \quad (1 \text{ mol gaz için}) \quad (8.4)$$

$$0,00033 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (1 \text{ l/dk gaz akışı için}) \quad (8.5)$$

$$0,00033 \left[\frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \times \frac{1}{0,037106} \left[\frac{\text{kg}}{\text{mol}} \right] = 0,88934 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right] \quad (8.6)$$

$$0,88934 \left[\frac{\text{mol}}{\text{s}} \right] \times 6,022 \cdot 10^{23} \left[\frac{\text{atom}}{\text{mol}} \right] = 5,356 \cdot 10^{19} \left[\frac{\text{atom}}{\text{s}} \right] \quad (8.7)$$

Helyum, neon ve argon gazlarının karakteristik dalga boylarına ait enerji ve Einstein katsayılarıyla beraber hesaplanmış olan ln(p) değerleri Tablo 8.1, 8.2 ve 8.3'de verilmiştir.

Tablo 8.1. *helyum gazına ait, dalga boylarına göre enerji değerleri, Einstein katsayıları ve hesaplanan $\ln(p)$ değerleri.*

İyon	Dalgaboyu (nm)	$g_k A_{ki}$ (s⁻¹)	E_k (eV)	$\ln p$
He	501,568	4,012e+07	23,087	1,102
He	587,56	8,837e+07	23,0737	1,097
He	667,82	3,19e+08	23,074	1,098
He	706,52	4,64e+07	22,7185	0,992
He	728,14	1,83e+07	22,9203	1,049

Tablo 8.2. *Neon gazına ait, dalgaboylarına göre enerji değerleri, Einstein katsayıları ve hesaplanan $\ln(p)$ değerleri.*

İyon	Dalgaboyu (nm)	$g_k A_{ki}$ (s⁻¹)	E_k (eV)	$\ln p$
Ne	585,24	6,82e+07	18,966	0,829
Ne	614,3	1,41e+08	18,637	0,769
Ne	640,22	3,60e+08	18,555	0,755
Ne	650,65	1,50e+08	18,576	0,759
Ne	667,83	1,16e+08	18,704	0,781
Ne	703,24	7,59e+07	18,382	0,727
Ne	724,52	2,80e+07	18,382	0,727

Tablo 8.3. Argon gazına ait, dalgalıboylarına göre enerji değerleri, Einstein katsayıları ve hesaplanan $\ln(p)$ değerleri.

İyon	Dalgalıboyu (nm)	$g_k A_{ki}$ (s ⁻¹)	E_k (eV)	$\ln p$
Ar	696,54	1,92e+07	13,3279	0,860
Ar	706,56	1,90e+07	13,3022	0,855
Ar	727,07	7,70e+05	14,7805	1,315
Ar	750,39	4,45e+07	13,4799	0,893
Ar	763,51	1,22e+08	11,718	0,606
Ar	772,38	1,55e+07	13,1531	0,826
Ar	794,82	5,58e+07	13,2826	0,851
Ar	801,48	4,64e+07	13,0949	0,815
Ar	811,53	2,32e+08	13,0757	0,811
Ar	826,45	4,59e+07	13,3279	0,860
Ar	842	1,08e+08	13,0949	0,815
Ar	852,07	4,17e+07	13,2826	0,851
Ar	912,3	5,67e+07	12,907	0,781

Yapılan bu hesaplamalardan sonra her bir gazın, tüm akış oranlarında ayrı ayrı, alınan optik emisyon spektrumlarından modifiye-Boltzmann yöntemiyle **elektron sıcaklıkları** (T_e) kullanılmış ve denklem (8.7) kullanılarak enerji değerinden itki hesabına geçilmiştir.

$$2T_e = E_K \quad (8.8)$$

olarak elde edilir [82].

Bu noktada klasik kinetik enerji teriminden yararlanılarak, mikro hareketin makro sonuçları incelenmeye çalışılmıştır. Enerji için $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ joule dönüşümü kullanıldığında,

$$E_K = \frac{1}{2}mv^2 \quad (8.9)$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \times 2 T_e \times 1,6.10^{-19}}{2 \times 1,67.10^{-27}}} \quad (8.10)$$

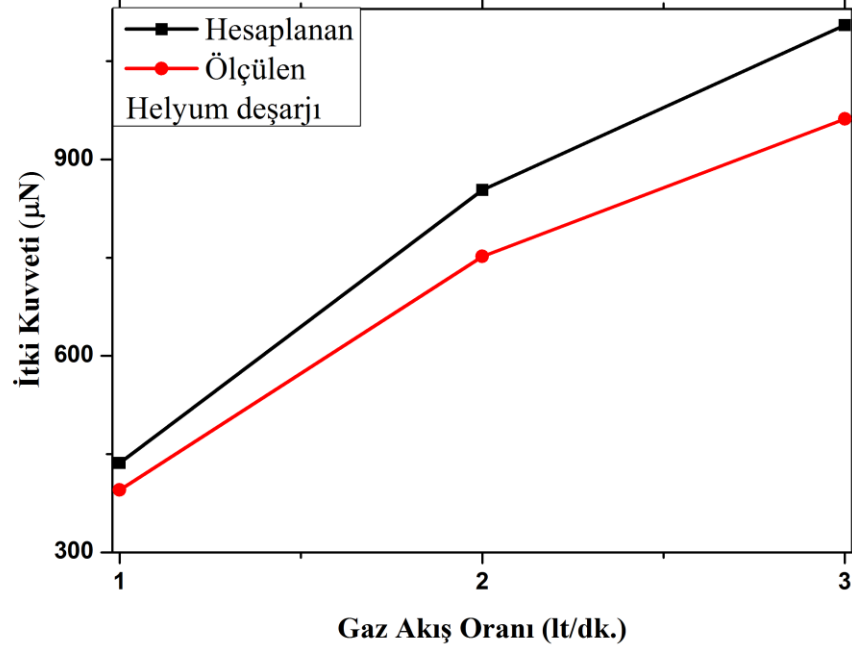
elde edilir. Denklem (8.4)'den denklem (8.10)'ye kadar yazılan denklemler kullanılarak, deneylerden alınan enerji verileriyle yapılan teorik hesaplamalar sonucunda **Tablo 8.4**'deki sonuçlara ulaşılmıştır.

Tablo 8.4. Deneyde kullanılan gazlarla oluşturulan plazmaların hesaplanan itki değerleri.

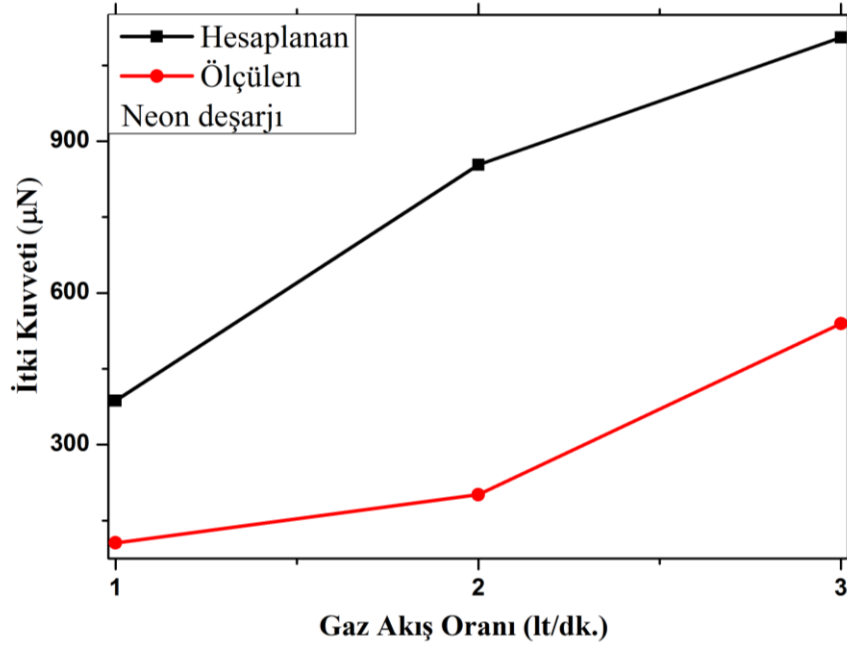
Hesaplanan İtki Kuvveti (µN)			
Gaz çeşidi	Akış oranı		
	1 l/dk	2 l/dk	3 l/dk
Helyum	436,17	853,61	1105,1
Neon	386,65	832,29	1318,41
Argon	598,3	916,8	1370,1

Şekil 8.1, 8.2 ve 8.3'de helyum, neon ve argon gazlarına ait deşarjların, 1 l/dk. 2 l/dk. ve 3 l/dk. akış oranlarındaki hesaplanan ve ölçülen itki değerlerine ait grafikler verilmiştir. Grafiklerden de izlenebileceği gibi gaz akış oranının artması, parçacık sayısının artışına sebep olarak itki değerini artırmıştır. Hesaplanan itki değerleri genelde ölçülen değerlerden büyük çıkmıştır. Bunun nedeni, hesaplamalarda göz ardı edilen kayıplardır. Örneğin, hesaplamalarda gaz akışını sağlayan parçacıkların tamamı göz önüne alınırken, deneylerde terazi yüzeyine etkiyen parçacık sayısı teoridekinden daha az olabilir çünkü atmosferik basınç altında yapılan bu deneylerde terazi ile sistem arasında, plazma içerisindeki parçacıkların bir kısmı havaya karışarak itki kuvvetinin tam değeriyle ölçülmesine engel olabilmektedir. Ölçümlerdeki sapmaların bir diğer sebebi de gaz çeşidindeki farklılıklar olabilir. Örneğin neon deşarjının itki kuvveti için deneysel ve matematiksel değerler arasındaki fark, diğer iki gaz deşarjınınkinden daha fazla olmuştur. Ayrıca enerji değerini hesaplarken kullanılan elektron sıcaklığında, termodinamik dengede olmayan plazmalarda yerel olarak farklılıklar oluşabilir. Dolayısıyla plazmaya ait enerji değerinde küçük değişikliklere sebep olabilmektedir. Hesaplanan ve ölçülen değerlerdeki farkların sebeplerinden biri de iyonlaşmayla ilgilidir. Hesaplamalarda iyonlaşma

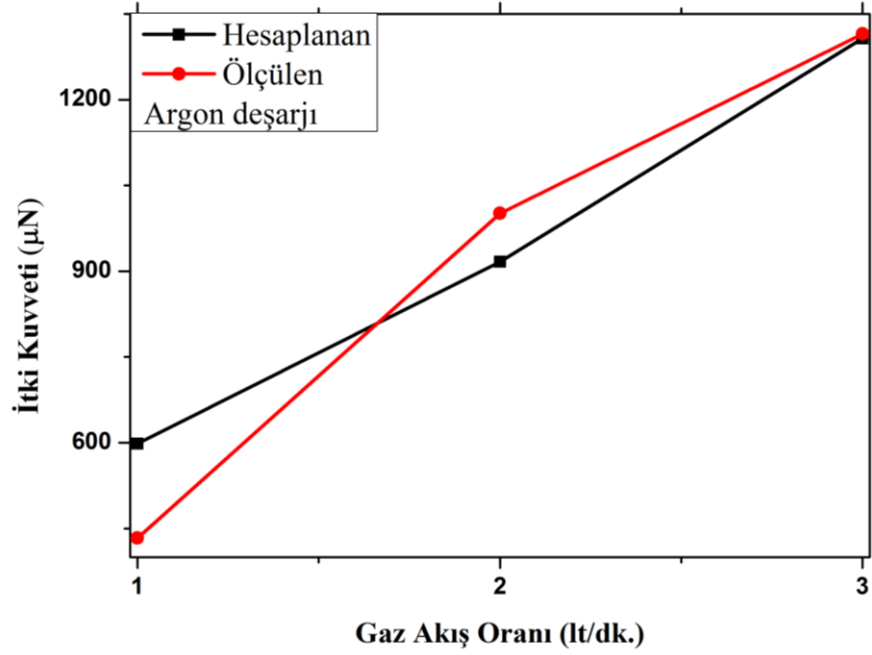
tamamen gerekleŒmiŒ gibi dŒŒnŒlŒrken, uygulamada bu ideal duruma ulaŒılamayabilir. Bu nedenle yine enerji değeri beklenenden dŒŒk olabilir.



Œekil 8.3. 1, 2 ve 3 l/dk. akıŒ oranlarındaki helyum gazının deŒarjına ait hesaplanan itki değerlerinin ölŒlen itki değerlerine göre karŒılaŒtırma grafiği.



Şekil 8.4. 1, 2 ve 3 lt/dk. akış oranlarındaki neon gazının deşarjına ait hesaplanan itki değerlerinin ölçülen itki değerlerine göre karşılaştırma grafiği.



Şekil 8.5. 1, 2 ve 3 l/dk. akış oranlarındaki argon gazının deşarjına ait hesaplanan itki değerlerinin ölçülen itki değerlerine göre karşılaştırma grafiği.

9. SONUÇ

Laboratuvar ortamında oluşturulabilen plazmaların, itki yeteneklerinin incelendiği bu çalışmada, farklı gazlarla atmosferik basınçta plazmalar oluşturulmuştur. Bunun için atmosferik basınçta tek gaz dielektrik bariyer deşarj benzeri (DBD-like) bir deşarj sistemi hazırlanmıştır. Sistem hazırlanırken, toryum katkılı tungsten tel, alüminyum alaşım dairesel elektrot ve kuartz cam tüp kullanılmıştır. Jet uzunluğunu artırmak ve kararlı bir deşarj oluşturmak için, silindirik şeklindeki kuartz tüpün çap değerleri olabildiğince küçük tutulmaya çalışılmıştır. Böylelikle gaz akış yoğunluğunun artışı sağlanmış ve artan basınçla hem itki kuvvetinde hem de jet uzunluğunda artış elde edilmiştir.

Bu çalışmanın asıl amacı, laboratuvar ortamında, nispeten çok daha düşük maliyetlerle elde edilen atmosferik basınç plazmaların itki değerlerini araştırmaktır. Plazma veya iyon iticiler üzerinde araştırmalar devam etmektedir ancak elde edilen kuvvet değerleri şimdilik yalnızca uzay araçlarını dengede ve yörüngede tutmak için kullanılabilir. Geleneksel yakıtlardan elde edilen itki değerlerini plazma iticilerle elde etmek için gereken güç kaynaklarının ağırlıkları kabul edilebilir değerleri oldukça aşmaktadır. Bu yüzden bu ağırlık gereksinimi azaltılana kadar, düşük güçlerle üretilen plazmalar, manyetik alanlarla desteklenerek güçleri bir miktar daha artırılmaya çalışılmaktadır. Yine de maliyet oranına bakıldığında, geleneksel fosil yakıtların yerine plazmanın kullanılabilmesi maddi kayıpları önemli ölçüde azaltacaktır.

Bu çalışmada elde edilen plazmaların itki değerleri, 105,91 – 1315,074 μN aralığındadır. Bu değerler bir uzay aracını boşlukta dengede tutabilmek için yeterli olabilir ancak yapılan deneylerde 1 l/dk, 2 l/dk, 3 l/dk gaz akış oranları kullanılmıştır. Bu akış oranlarının yüksek olmasının nedeni, deneylerin atmosferik basınçta yapılmış olmasıdır. Bu akış oranlarından daha düşük değerlerde atmosferik basınç plazmanın jet oluşumu oldukça küçük olmaktadır. Böylelikle, deneylerden elde edilen ilk sonuç, yeryüzünden havalanacak olan bir uzay aracı için plazmanın itki değerinin günümüz şartlarında yetersiz olacaktır.

Çalışmadan elde edilen sonuçlardan bir diğeri de hesaplamalarda kullanılan yöntemle atomik boyutlarla, klasik kinetik enerjideki hesapların bir arada kullanılabilmesidir. Teorinin, deneysel verilerle uyum göstermesi bu

durumu desteklemektedir. Gaz atomlarının her biri ayrı ayrı düşünülerek, toplam üzerinden yapılan hesaplara, elektron sıcaklığından faydalanılarak hesaplanan yaklaşık ortalama enerji değerinin eklenmesiyle, hız değerine ulaşılmış ve itki denklemi için sayısal değerler elde edilmiştir.

Deneylelerin ve hesaplamaların sunduğu üçüncü sonuç, teorik itki değerlerinin, deneysel sonuçlardan genellikle yüksek çıkmasıyla ilgilidir. Konuyla ilgili akla ilk gelen, terazi sistemindeki küçük kayıpların etkisidir. Atomik boyutlarda parçacıkların toplamı üzerinden modellenen sistem için hesaplamalarda, oluşan tüm iyonların ve parçacıkların deşarja dâhil olarak itki oluşturduğu göz önüne alınmıştır. Uygulamada ise hem plazmadaki iyonların ve diğer parçacıkların tamamı düzenli bir oluşum gösteremeyebilir hem de terazi düzeneğine tamamı ulaşamamış olabilir. Bu tür sebeplerle hesaplarla deneysel veriler arasında bir miktar farklılıklar oluşmuştur.

Elektron sıcaklığının hesaplanma yönteminin (modifiye Boltzmann denklemi) deneysel verilerle uyumu da yöntemin uygunluğu açısından çalışmanın sonuçlarındandır. Bu yöntem düşük basınçta hem kapasitif hem de indüktif sistemlerde oluşturulan plazmaların ortalama yaklaşık elektron sıcaklığının hesaplanmasında daha önce kullanılmıştır [13]. Yöntemin atmosferik basınçta kullanılması ve ortalama enerjinin hesaplanmasında bu elektron sıcaklığı değerlerinden faydalanılması, bu yöntemin elektron sıcaklığını hesaplamada geniş bir basınç aralığında kullanılabileceğini göstermektedir. Ayrıca enerji hesabına geçişte kullanıldığında, teorik sonuçlar deneysel verilerle uyduğundan, doğru sonuçları verebileceği görülmüştür. Enerjiyi hesaplamak için ise farklı çalışmalarda elektron sıcaklığından faydalanılmıştır [15, 16 – 19, 82]. Bu çalışmada da enerji hesabı için elektron sıcaklığından faydalanmanın doğru olacağı, sonuçlardan izlenebilmektedir.

Plazma itki sistemlerinin geliştirilmesi açısından bakıldığında çalışmaya gelecekte gaz karışımlarıyla yapılacak deneyler eklenebilir. Buradaki sorun gaz karışımlarıyla yapılacak deneylerden alınacak OES grafikleri yardımıyla ortalama yaklaşık elektron sıcaklığını ve dolayısıyla ortalama enerji değerini hesaplamak için geçerli doğru bir yöntem bulabilmektir. Modifiye-Boltzmann yönteminin gaz karışımları için kullanılıp kullanılmayacağı denenebileceği gibi yörünge hareketi

sınırlamalı (orbital motion limited – OML) hesaplama yöntemiyle de hesaplama yapılarak gaz karışımlarına ait plazmaların ortalama yaklaşık elektron sıcaklıkları hesaplanabilir. OML metodu, girişte bahsedildiği gibi plazmaya ismini de veren Irving Langmuir'in ortaya çıkardığı ve günümüzde oldukça gelişmiş olan Langmuir probunun da çalışma prensibiyle uyduğundan, Langmuir probuna uygun bir atmosferik basınç deşarj sistemi vasıtasıyla plazmaya ait elektron sıcaklığı sonucu yaklaşık olarak elde edilebilir.

Bu çalışmada standart ve uygun maliyetli bir plazma düzeneğinin itki özellikleri incelenmiştir. Gelecekte sisteme manyetik alan kaynakları eklenerek itki kuvvetine faydası olup olmadığı incelenebilir. Manyetik alan ile odaklanabilecek olan plazma jet, daha yüksek itki kuvveti oluşturabilir ancak burada önemli olan fayda maliyet oranıdır.

Bu çalışmada laboratuvar ortamında standart sayılabilecek bir atmosferik basınç deşarj düzeneği üzerinde deneyler yapılmıştır. Atmosferik basınç altında yapılan bu deneyler, düşük basınç vakum sistemlerine adapte edilerek, uzay ortamındaki verimi de gelecekte ayrıca tespit edilebilir.

Bu çalışmada ise elde edilen bu sonuçlar doğrultusunda, laboratuvar ortamında oluşturulan atmosferik basınç altındaki ve termodinamik dengede olmayan, helyum, neon ve argon gazlarına ait soğuk plazmaların itki özellikleri incelenmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] Lieberman, M.A. ve Lichtenberg, A.J. (2005). *Principles of Plasma Discharge and Materials Processing (Second Edition)*. Amerika Birleşik Devletleri: Wiley-Interscience
- [2] Chen, F.F. (1974). *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion (Second Edition) Volume 1: Plasma Physics*. Amerika Birleşik Devletleri: Plenum Press
- [3] Grill, A. (1993). *Cold Plasma in Materials Fabrication*. New York, Amerika Birleşik Devletleri: IEEE Press
- [4] Köksal, F. ve Gümüş, H. (1999). *Atom ve Molekül Fiziği*. Ankara, Türkiye: Bilim Yayıncılık.
- [5] McDaniel, E.W. (1964). *Collision Phenomena in Ionized Gases*. New York, Amerika Birleşik Devletleri: Wiley Sons Inc.
- [6] Marr, G.V. (1968). *Plasma Spectroscopy*. Amerika Birleşik Devletleri: Elsevier Publishing Company.
- [7] Herzberg, G. (1967). *Molecular Spectra & Molecular Structure*. New York, Amerika Birleşik Devletleri: D. Van Nostrand Company
- [8] Pat, S. (2007). *Çoklu Gaz Karışımı Plazmaların Optik Emisyon Spektroskopisi*. Doktora Tezi: Eskişehir Osmangazi Üniversitesi
- [9] Lochte-Holtgreven, W. (1968). *Plasma Diagnostics*. Amsterdam, Hollanda: North-Holland Publishing
- [10] Cooper, J. (1966). *Plasma Spectroscopy*. Reports on Progress in Physics. 29, 35, Birleşik Krallık: IOP Science
- [11] Fridman, A. (2008). *Plasma Chemistry*. New York, Amerika Birleşik Devletleri: Cambridge University Press
- [12] http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html, 24.02.2016-09.55
- [13] Tanışlı, M. ve Şahin, N. (2016). *Optical Characteristics for Capacitively and Inductively Radio Frequency Discharge and Post-Discharge of Helium*. Phys. Plas. 23, 013513.
- [15] Napartovich, A. P. (2001). *Overview of Atmospheric Pressure Discharges Producing Nonthermal Plasma*. Plasma and Polymers, 6 (1/2), 1-14.

- [16] Lu, X. Laroussi, M. and Puech, V. (2012) *On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets*. Plasma Sources Sci. Technol., 21 (3), 034005.
- [17] Raizer, Y. P. (1991). *Gas Discharge Physics*. Berlin: Springer.
- [18] Lieberman, M. A. (1994). *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*. New York: Wiley.
- [19] Fridman, A. and Kennedy L. A. (2004). *Plasma Physics and Engineering* New York: Taylor and Francis.
- [20] Becker, K. H. Kogelschatz, U. Schoenbach, K. H. and Barker, R. J. (2005). *Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure*. Bristol: Institute of Physics Publishing.
- [21] Park, J. Henins, I. Herrmann, H. W. Selwyn, G. S. Jeong, J. Y. Hicks, R. F. Shim, D. and Chang, C. S. (2000). *An atmospheric pressure plasma source*. Appl. Phys. Lett., 76 (3), 288-290.
- [22] Barankova, H. and Bardos, L. (2000). *Fused hollow cathode cold atmospheric plasma*. Appl. Phys. Lett., 76 (3), 285-287.
- [23] Moisan, M. and Zakrzewski, Z. (1991). *Plasma sources based on the propagation of electromagnetic surface waves*. J. Phys. D. Appl. Phys., 24 (7), 1025-1048.
- [24] Moisan, M. Sauve, G. Zakrzewski, Z. and Hubert, J. (1994). *An atmospheric pressure waveguide-fed microwave plasma torch: the TIA design*. Plasma Sources Sci. Technol. 3 (4), 584-592.
- [25] Calzada, M. D. Saez, M. and Garcia, M. C. (2000). *Characterization and study of the thermodynamic equilibrium departure of an argon plasma flame produced by a surface-wave sustained discharge*. J. Appl. Phys. 88 (1), 34-39.
- [26] Babayan, S. E. Jeong, J. Y. Tu, V. J. Park, J. Selwyn, G. S. and Hicks, R. F. (1998). *Deposition of silicon dioxide films with an atmospheric-pressure plasma jet*. Plasma Sources Sci. Technol. 7, 286-288.
- [27] Jeong, J. Y. Babayan, S. E. Tu, V. J. Park, J. Henins, I. Hicks, R. F. and Selwyn, G. S. (1998). *Etching materials with an atmospheric-pressure plasma jet*. Plasma Source Sci. Technol. 7, 282-285.

- [28] Walsh, J. L. and Kong, M. G. (2008). *Contrasting characteristics of linear-field and cross-field atmospheric plasma jets*. Appl. Phys. Lett. 93 (11), 111501.
- [29] Lu, X. Jiang, Z. Xiong, Q. Tang, Z. Hu, X. and Pan, Y. (2008). *An 11cm long atmospheric pressure cold plasma plume for applications of plasma medicine* Appl. Phys. Lett. 92 (), 081502.
- [30] Leveille, V. and Coulombe, S. (2005). *Design and preliminary characterization of a miniature pulsed RF APGD torch with downstream injection of the source of reactive species*. Plasma Sources Sci. Technol. 14 (3), 467.
- [31] Stoffels, E. Kieft, I. E. and Sladek, R. E. J. (2003). *Superficial treatment of mammalian cells using plasma needle*. J. Phys. D: Appl. Phys. 36, 2908-2913.
- [32] Lu, X. Cao, Y. Yang, P. Xiong, Q. Xiong, Z. Xian, Y. Pan, Y. (2009). *An RC Plasma Device for Sterilization of Root Canal of Teeth*. IEEE Trans. Plasma Sci. 37 (5), 668-673.
- [33] Penetrante, B. M. Hsiao, M. C. Bardsley, J. N. Merritt, B. T. Vogtly, G. E. Kuthiz, A. Burkhart, C. P. and Bayless, J. R. (1997). *Identification of mechanisms for decomposition of air pollutants by non-thermal plasma processing*. Plasma Sources Sci. Technol. 6 (3), 251–259.
- [34] Penetrante, B. M. and Schultheis, S. E. (eds) (1993). *Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control: Part A Overview, Fundamentals and Supporting Technologies* (Berlin: Springer) and Penetrante, B. M. and Schultheis, S. E. (eds) (1993). *Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control: Part B Electron Beam and Electrical Discharge Processing* (Berlin: Springer). A collection of papers on various types of non-thermal plasma reactor being investigated for VOC abatement
- [35] Khacef, A. Cormier, J. M. and Pouvesle, J. M. (2002). *NOx remediation in oxygen-rich exhaust gas using atmospheric pressure non-thermal plasma generated by a pulsed nanosecond dielectric barrier discharge*. J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (13), 1491–1498.

- [36] Fang, Z. Qiu, Y. and Kuffel, E. (2004). *Formation of hydrophobic coating on glass surface using atmospheric pressure non-thermal plasma in ambient air*. J. Phys. D: Appl. Phys. 37 (16), 2261–2266.
- [37] Fridman, G. Brooks, A. D. Balasubramanian, M. Fridman, A. Gutsol, A. Vasilets, V. N. Ayan, H. Fridman, G. (2007). *Comparison of Direct and Indirect Effects of Non-Thermal Atmospheric-Pressure Plasma on Bacteria*. Plasma Process. Polym., 4 (4), 370–375.
- [38] Feng, H. Sun, P. Chai, Y. Tong, G. Zhang, J. Zhu, W. and Fang, J. (2009). *The Interaction of a Direct-Current Cold Atmospheric-Pressure Air Plasma With Bacteria*. IEEE Transactions on Plasma Science, 37 (1), 121-127.
- [39] Pompl, R. Jamitzky, F. Shinizu, T. Steffes. B. Bunk, W. Schmidt, H. U. Georgi, M. Ramrath, K. Stolz, W. Stark, R. W. Urayma, T. Fujii, S. and Morfill, G. E. (2009). *The effect of low-temperature plasma on bacteria as observed by repeated AFM imaging*. New Journal of Physics, 11, 115023.
- [40] Lackmann, J. W. Schneider, S. Edengeiser, E. Jarzina, F. Brinckmann, S. Steinborn, E. Havenith, M. Benedikt, J. Bandow, J. E. (2013). *Photons and particles emitted from cold atmospheric-pressure plasma inactivate bacteria and biomolecules independently and synergistically*. J. R. Soc. Interface, 10, 20130591.
- [41] Vleugels, M. Shama, G. Deng, X. T. Greenacre, E. Brocklehurst, T. and Kong, M. G. (2005). *Atmospheric plasma inactivation of biofilm-forming bacteria for food safety control* IEEE Transactions on Plasma Science, 33 (2), 824-828.
- [42] Lu, X. Ye, T. Cao, Y. Sun, Z. Xiong, Q. Tang, Z. Xiong, Z. Hu, J. Jiang, Z. Pan, Y. (2008). *The roles of the various plasma agents in the inactivation of bacteria*. Journal of Applied Physics 104, 053309.
- [43] Cheng, C. Peng, L. Lei, X. Li-Ye, Z. and Ru-Juan, Z. (2006). *Development of a new atmospheric pressure cold plasma jet generator and application in sterilization*. Chin. Phys., 15, 1544.
- [44] Laroussi, M. Minayeva, O. Dobbs, F. C. and Woods, J. (2006). *Spores Survivability After Exposure to Low-Temperature Plasmas*. IEEE Trans. on Plas. Sci., 34, 4 (2), 1253-1256.

- [45] Guimin, X. Guanjun, Z. Xingmin, S. Ning, M. Y. W. Yuan, L. (2009). *Bacteria Inactivation Using DBD Plasma Jet in Atmospheric Pressure Argon*. *Plas. Sci. and Techn.*, 11 (1), 17.
- [46] Laroussi, M. Tendero, C. Lu, X. Alla, S. Hynes, W. L. (2006). *Inactivation of Bacteria by the Plasma Pencil*. *Plas. Proc. Polym.* 3 (6-7), 470–473.
- [47] Cheng, C. Peng, L. Lei, X. Li-Ye, Z. and Ru-Juan, Z. (2006). *Development of a new atmospheric pressure cold plasma jet generator and application in sterilization*. *Chin. Phys. Soc.*, 15 (7), 1544.
- [48] Tanışlı, M. Mertadam, S. Poyraz, N. Şahin, N. Demir, S. (2016). *Inactivation of microorganisms with neon plasma jet at atmospheric pressure*. *Journal of Pure & Applied Microbiology*, 10 (3).
- [49] Pei, X. Liu, J. Xian, Y. and Lu, X. (2014). *A battery-operated atmospheric-pressure plasma wand for biomedical applications*. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 47 (14) 145204.
- [50] Kalghatgi, S. U. Fridman, G. Cooper, M. Nagaraj, G. Peddinghaus, M. Balasubramanian, M. Vasilets, V. N. Gutsol, A. F. Fridman, A. (2007). *Mechanism of Blood Coagulation by Nonthermal Atmospheric Pressure Dielectric Barrier Discharge Plasma*. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 35 (5), 1559 – 1566.
- [51] Nozaki, T. Ohnishi, K. Okazaki, K. Kortshagen, U. (2007). *Fabrication of vertically aligned single-walled carbon nanotubes in atmospheric pressure non-thermal plasma CVD*. *Carbon* 45 (2), 364–374.
- [52] Fridman, A. Chirokov, A. ve Gutsol, A. (2005). *Non-thermal atmospheric pressure discharges*. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 38 (2), R1–R24.
- [53] Penetrante, B. M. Brusasco, R. M. Merritt, B. T. and Vogtlin, G. E. (1999) *Environmental applications of low-temperature plasmas*. *Pure Appl. Chem.* 71 (10), 1829.
- [54] Hood, J. L. (1980). *International Conference on Gas Discharges and Their Applications (Edinburgh)* p 86
- [55] Hubicka, Z. Cada, M. Sicha, M. Churpita, A. Pokorny, P. Soukup, L. and Jastrabik, L. (2002). *Barrier-torch discharge plasma source for surface*

- treatment technology at atmospheric pressure.* Plasma Sources Sci Technol. 11 (2), 195
- [56] Lu, X. Xiong, Q. Tang, Z. Jiang, Z. and Pan, Y. (2008) *A Cold Plasma Jet Device With Multiple Plasma Plumes Merged.* IEEE Trans. Plasma Sci. 36 (4 Part1) 990-991.
- [57] Cao, Z. Nie, Q. Bayliss, D. L. Walsh, J. L. Ren, C.S. Wang, D. Z. and Kong, M. G. (2010). *Spatially extended atmospheric plasma arrays.* Plasma Sources Sci Technol. 19 (2), 025003.
- [58] Koretzky, E. and Kuo, S. P. (1998). *Characterization of an atmospheric pressure plasma generated by a plasma torch array.* Phys. Plasmas 5 (10), 3774.
- [59] Kuo, S. P. Koretzky, E. and Orlick, L. (1999). *Design and electrical characteristics of a modular plasma torch.* IEEE Trans. Plasma Sci. 27 (3), 752-758.
- [60] Foest, R. Kindel, E. Ohl, A. Stieber, M. And Weltmann, K. D. (2005). *Non-thermal atmospheric pressure discharges for surface modification.* Plasma Phys. Control. Fusion 47 (12B), B525.
- [61] Chichina, M. Hubicka, Z. Churpita, O. and Tichy, M. (2005). *Measurement of the Parameters of Atmospheric-Pressure Barrier-Torch Discharge.* Plasmas Process. Polym. 2 (6), 501-506.
- [62] Hong, Y. C. Shin, D. H. Lee, S. C. and Uhm, H. S. (2006). *Generation of large-volume plasma by making use of multi-needle plasma at low-pressure.* Thin Solid Films. 506–507, 474-478.
- [63] Hong, Y. C. Cho, S. C. and Uhm, H. S. (2007). *Twin injection-needle plasmas at atmospheric pressure.* Appl. Phys. Lett. 90 (14), 141501.
- [64] Tang, D. Ren, C. Wang, D. and Nie, Q. (2009). *The Interactions of Two Cold Atmospheric Plasma Jets.* Plasma Sci. Technol. 11 (3), 293.
- [65] Algwari, Q. T. Neill, C. O. and O’Connell, D. (2009). 62nd Gaseous Electronics Conf. (Saratoga Springs, NY) p 69.
- [66] Robert, E. Sarron, V. Ries, D. Dozias, S. Vandamme, M. and Pouvesle, J. M. (2012). *Characterization of pulsed atmospheric-pressure plasma streams (PAPS) generated by a plasma gun.* Plas. Source. Sci. Tech. 21 (3), 032001-035020.

- [67] Douat, C. Fleury, M. Laroussi, M. and Puech, V. (2011). *Interactions Between Two Counterpropagating Plasma Bullets*. IEEE Trans. Plasma Sci. 39 (11), 2298.
- [68] Xiong, Z. Takashiman. K, Adamovich, I. and Kushner, M. (14-18 November 2011). Simulation of high pressure ionization waves in straight and circuitous dielectric channels 64th Gaseous Electronics Conf.: Salt Lake City.
- [69] Kushner, M. (28 August-2 September 2011). Interaction of high pressure plasmas with their boundaries: channels, tubes, liquids and tissue 30th Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases: Belfast, UK.
- [70] Grishin, S.D., Leskov, L.V., Kozlov, N.P. (1975). *Electric-Propulsion Rocket Engines, Machinery*. Moscow, Rusya: Mashinostroenie.
- [71] Morozov, A.I. (1978). *Physical Basis of the Space Electric-Jet Engines*. Moscow. Rusya: AtomIzdat.
- [72] Tajmar, M. (2004). *Advanced Space Propulsion Systems*. Berlin, Almanya: Springer.
- [73] Jahn, R.G. (2006). *Physics of Electric Propulsion*. New York, Amerika Birleşik Devletleri: Dover Publications.
- [74] Grishin, S.D. (2000). *Ion and Plasma Rocket Engines* (Fortov, V. D. Encyclopaedia of Low-Temperature Plasma). 4, 291. Moskova, Rusya: Nauka.
- [75] <https://www.grc.nasa.gov/WWW/ion/past/90s/images/nstar.jpg>
29.06.2016 - 10:54
- [76] Fridman, A. ve Kennedy, L.A. (2004). *Plasma Physics and Engineering*. New York, Amerika Birleşik Devletleri: Taylor & Francis.
- [77] Edamitsu, T. Tahara, H. (2006). *Experimental and Numerical Study of an Electrothermal Pulsed Plasma Thruster for Small Satellites*. 1223-1228. *Surface Engineering, Surface Instrumentation & Vacuum Technology*. Pensilvanya, Amerika Birleşik Devletleri: Elsevier Publishing
- [78] NASA (2004). NASA Facts, *Magnetoplasma-dynamic Thrusters*. Amerika Birleşik Devletleri, Cleveland, Ohio: NASA Glenn Research Center.
- [79] <http://www.nasa.gov/centers/glenn/about/fs23grc.html> - 09.03.2016 -
11:51

- [80] Donnelly, V. M. (2004). *Plasma electron temperatures and electron energy distributions measured by trace rare gases optical emission spectroscopy*. J. Phys. D: Appl. Phys. 37, R217-R236.
- [81] Naveed, M. A. Rehman, N. U. Zeb, S. Hussain, S. Zakauallah, M. (2008). *Langmuir probe and spectroscopic studies of RF generated helium-nitrogen mixture plasma*. Eur. Phys. J. D. 47, 395-402.
- [82] Palaia, J. E. (2006). *Empirical Aspects of a Mini-Helicon Plasma Thruster Experiment (mHTX@MIT)*. Yüksek Lisans Tezi: Master Of Science In Nuclear Science & Engineering, Massachusetts Institute Of Technology
- [83] Fujimoto T. (1979), *Kinetics of Ionization-Recombination of a Plasma and Population Density of Excited Ions. I. Equilibrium Plasma*. J. Phys. Soc. Jpn., 47, 265.
- [84] 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 Sources*. IEEE Trans. Plasma. Sci., 26 (6), 1685-1694.
- [85] Walsh, J. L. Kong, M. G. (2008). *Contrasting characteristics of linear-field and cross-field atmospheric plasma jets*. Appl. Phys. Lett. 93, 111501.
- [86] Park, J. Hennis, I. Herrmann, H. W. Selwyn, G. S. Hicks, R. F. (2001). *Discharge phenomena of an atmospheric pressure radio-frequency capacitive plasma source*. Journal of Applied Physics, 89 (1), 20-28.
- [87] Tian-Ye N, Jin-Xiang C, Lei L, Jin-Ying L, Yan W, Liang W and You L 2007 Chinese Physics 16, 2757-2763.