

Kilohertz Plazma Kalem

Ece Şahin

DOKTORA TEZİ

Fizik Anabilim Dalı

Kasım 2021

Kilohertz Plasma Pencil

Ece Şahin

DOCTORAL DISSERTATION

Department of Physics

November 2021

Kilohertz Plazma Kalem

Ece Şahin

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

Danışman: Prof. Dr. Tamer Akan

Kasım 2021

ETİK BEYAN

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre, Prof. Dr. Tamer AKAN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Kilohertz Plazma Kalem” başlıklı DOKTORA tezimin özgün bir çalışma olduğunu; tez çalışmamın tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallarına uygun davrandığımı; tezimde verdiğim bilgileri, verileri akademik ve bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olarak elde ettiğimi; tez çalışmamda yararlandığım eserlerin tümüne atıf yaptığımı ve kaynak gösterdiğimi ve bilgi, belge ve sonuçları bilimsel etik ilke ve kurallara göre sunduğumu beyan ederim. 22/11/2021

Ece ŞAHİN

ÖZET

Literatürde plazma kalem olarak bilinen atmosferik basınç soğuk plazma jet sisteminin benzer elektrot yapısına, 18 kV-15 kHz alternatif akım güç kaynağı ile elektromanyetik alan uygulayarak farklı özelliklere sahip yeni bir atmosferik basınç soğuk plazma jet cihazı ve plazma türü üretilmiştir. Bu cihaz “Kilohertz Plazma Kalem” olarak adlandırılmıştır. Kilohertz plazma kalem ile helyum ve argon gazında atmosferik basınç plazma jetler üretilmiş ve üretilen jetlerin özelliklerinin gaz akış hızı ile değişimi incelenmiştir. Bununla birlikte kilohertz plazma kalem farklı boyutlarda üretilerek özellikleri incelenmiş ve özellikle çıkış ağzı (nozzle) çapı farklı kilohertz plazma kalemler üretilerek optimum çalışma koşullarında plazma jet elde edilmiştir. Argon ve helyum gazları ile çalıştırılan kilohertz plazma kalemin ürettiği atmosferik basınç plazma jetlerin elektriksel ve spektroskopik özellikleri incelenmiştir. Sıcaklık ölçümleri ile kilohertz plazma kalemin ürettiği plazma jetin oda sıcaklığında olduğu ve uzun süre insan cildine uygulandığında zarar vermediği görülmüştür. Elektriksel ve spektroskopik analizler ile literatürde bilinen plazma kalemden farklı özelliklerde bir atmosferik basınç plazma jet üretildiği gösterilmiştir. Kilohertz plazma kalemin ürettiği plazma jet, farklı yüzeylere uygulanmış ve uygulama sonrası yüzeylerin aktifleştiği görülmüştür. Bunun için metal, plastik, cam, kâğıt ve bez yüzeylere kilohertz plazma kalem ile uygulama yapıldıktan sonra su damlası testi gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte helyum ve argon gazı ile üretilen kilohertz plazma kalem jetleri *Pseudomonas Aeruginosa* planktonik bakterileri üzerine uygulanmış, inkübasyon süresi sonunda bakteri azalımı (inaktivasyonu) gözlenmiştir. Böylece kilohertz plazma kalemin sterilizasyon uygulamalarında kullanılabileceği gösterilmiştir. İnsan vücuduna zarar vermeyen kilohertz plazma kalem gelecekte canlı üzerinde enfeksiyona sebep olan bakterilerden arındırma işlemlerinde, yara ve yanık tedavisi, kan pıhtılaştırma ve kanser tedavisi gibi birçok tıbbi uygulamalarda kullanılabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Soğuk plazma, plazma jet, post deşarj plazma, atmosferik basınç plazma, plazma kalem.

SUMMARY

A new atmospheric pressure cold plasma jet device with different properties and a new plasma type has been produced by applying electromagnetic field with an 18 kV-15 kHz alternating current power source to the electrode structure of the atmospheric pressure cold plasma jet system, known as plasma pencil. This new device is named as “Kilohertz Plasma Pencil”. Atmospheric pressure plasma jets were produced in helium and argon gases with kilohertz plasma pencil and the variation of the properties of the produced jets with respect to the gas flow rate was investigated. In addition, kilohertz plasma pencil was produced in different sizes and its properties were examined, and especially by producing with different nozzle diameters, plasma jets were obtained under optimum working condition. The electrical and spectroscopic properties of the atmospheric pressure plasma jets produced by kilohertz plasma pencil, which have been operated with argon and helium, have been investigated. By the temperature measurements it has been recorded that the plasma jet produced by the kilohertz plasma pencil was under room temperature and no harmful effects on human skin, when applied for a long period, have been observed. With the electrical and spectroscopic analyzes, it has been shown that a different type of atmospheric pressure plasma jet has been produced than the plasma pencil known in the literature. The plasma jet produced by the kilohertz plasma pencil has been applied on various surfaces subsequently the activation of these surfaces have been observed. For this purpose, a water drop test was performed right after the application of kilohertz plasma pencil on metal, plastic, glass, paper, and cloth surfaces. In addition to that, kilohertz plasma pencil produced by helium and argon gases, has been applied on the *Pseudomonas Aeruginosa* planctonic bacterias, and at the end of the incubation period an inactivation of bacterias have been observed. In that way, it has been shown that kilohertz plasma pencil can be used in sterilization applications. It is expected to use kilohertz plasma pencil, which has been shown to be harmless to human skin, in the future in many different medical areas such as; cleansing the infectious bacteria from the skin, curing wounds and burns, coagulating the blood and cancer treatment.

Key Words: Cold plasma, plasma jet, post discharge plasma, atmospheric pressure plasma, plasma pencil

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	vi
SUMMARY	vii
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM	38
3.1. Kiloherzt Plazma Kalem Tasarımı.....	38
3.2. Alternatif Akım Güç Kaynağı.....	41
3.3. Yüksek Voltaj Probu ve Akım Probu	43
3.4. Osiloskop	45
3.5. Akış Ölçer	46
3.6. Optik Emisyon Spektrometresi	47
3.7. Kızılötesi Termometre	48
4. BULGULAR VE TARTIŞMA	50
4.1. Helyum Kiloherzt Plazma Kalem	50
4.1.1. Helyum kiloherzt plazma kalem jet uzunluğunun gaz akış hızı ile değişimi.....	52
4.1.2. Helyum kiloherzt plazma kalem jet uzunluğunun çıkış ağız çapı ile değişimi..	59
4.1.3. Helyum kiloherzt plazma kalem jet sıcaklık analizi	61
4.1.4. Helyum kiloherzt plazma kalem spektroskopik analizi	64
4.1.5. Helyum kiloherzt plazma kalem elektriksel analizi	70
4.2. Argon Kiloherzt Plazma Kalem.....	75
4.2.1. Argon kiloherzt plazma kalem jet uzunluğunun gaz akış hızı ile değişimi	76
4.2.2. Argon kiloherzt plazma kalem sıcaklık analizi.....	78

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
4.2.3. Argon kilohertz plazma kalem spektroskopik analizi	79
4.2.4. Argon kilohertz plazma kalem elektriksel analiz	85
4.4. Kilohertz Plazma Kalemin Farklı Boyutlarda İncelenmesi	86
4.5. Kilohertz Plazma Kalemin Jetinin Bir İletken Varlığında Davranışı	87
4.6. Kilohertz Plazma Kalemin Jetinin Harici Bir Elektrik Alanda Davranışı	90
4.7. Kilohertz Plazma Kalemin Jetinin Harici Bir Manyetik Alanda Davranışı.....	92
4.8. Kilohertz Plazma Kalemin Teknolojik Uygulanması	93
4.8.1. Kilohertz plazma kalem ile yüzey aktifleştirme.....	93
4.8.2. Kilohertz plazma kalem ile bakteri sterilizasyonu	98
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	101
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	106

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
1.1. Atmosferik basınç plazma jet şeması	3
1.2. Helyum plazma jet ile açık yara tedavisi.....	5
1.3. a) Deney düzeneğinin şeması (b) Farklı argon gaz akış hızlarındakideşarj fotoğrafları (c) Bir delik varlığında ve yokluğunda türlerin emisyon spektrumu	9
2.1. Elektrot tasarımlarına göre plazma jet tasarımlarından bazıları	21
2.2. Puls güç kaynağı ile üretilen atmosferik basınç plazma jet ve iki farklı konumdaki plazma atması (siyah-beyaz)	23
2.3. Işık huzmesi modelinin şematik gösterimi	27
2.4. Birincil plazmanın oluşturduğu ikincil plazma görseli ve deney düzenekleri a) gaz bir tüp içerisinde b) gaz açık havada	31
3.1. Kiloherertz plazma kalem sisteminin üretim aşamasında kullanılan parçalar.....	39
3.2. Kiloherertz plazma kalem sisteminin şematik çizimi.....	39
3.3. Kiloherertz plazma kalem düzeneği a) şematik gösterim b) laboratuvar ortamında kurulmuş hali	40
3.4. AC güç kaynağının şematik gösterimi	41
3.5. Trafo voltaj-frekans ölçümleri.....	42
3.6. Alternatif akım güç kaynağına ait osiloskop çıktısı	43
3.7. Çalışmalarda kullanılan AC güç kaynağı	43
3.8. Yüksek voltaj probu	44
3.9. Akım ölçümlerinde kullanılan pensampermetre.....	45
3.10. Elektriksel ölçümlerde kullanılan osiloskop.....	46
3.11. Gaz akış ölçer	46
3.12. Optik emisyon spektrometresi ve çalışma bilgisayarına yüklenmiş yazılımı.....	47
3.13. Sıcaklık ölçümü için kullanılan kızılötesi termometre	48
4.1. a) Kiloherertz plazma kalem sistemi b) Kiloherertz plazma kalem.....	51
4.2. Kiloherertz plazma kalem yandan fotoğrafı	51
4.3. Kiloherertz plazma kalem alttan fotoğrafı.....	52

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

4.4. Kilohertz Plazma kalemin çıkış ağzı seramik ile kaplı.....	54
4.5. 1,5 mm çıkış ağızlı kilohertz plazma kalemin gaz akış hızı ile jet uzunluğu değişim .	54
4.6. 2,5 mm çıkış ağızlı kilohertz plazma kalemin gaz akış hızı ile jet uzunluğu değişimi	55
4.7. 3,5 mm çıkış ağızlı kilohertz plazma kalem ile farklı gaz akış hızlarında jet uzunluğu değişimi	56
4.8. 4,5 mm çıkış ağızlı kilohertz plazma kalemin farklı gaz akış hızlarında jet uzunluğu değişimi	58
4.9. Helyum gazı için a) 3,5 mm b) 4,5 mm c) 5,5 mm d) 6,5 mm delik çaplarına göre kilohertz plazma jet değişimi.....	60
4.10. Helyum kilohertz plazma jet sıcaklık ölçümü	61
4.11. Termoçift kilohertz plazma jetin farklı uzaklıklarına getirildiğinde sıcaklık değişimi	63
4.12. Kızılötesi termometre ile kilohertz plazma jetin sıcaklık ölçümü.....	64
4.13. Kilohertz plazma kalem jetine a) ve b) yaygın modda c) iplikli modda çıplak elle temas.....	64
4.14. Kilohertz plazma kalem spektroskopik ölçüm sistemi	65
4.15. Kilohertz plazma kalem spektroskopik ölçümünde prob yerleşimi	65
4.16. Helyum kilohertz plazma kalemin deşarj bölgesinden “jet oluşmadan” alınan spektrum	66
4.17. Helyum kilohertz plazma kalemin “jet oluştuğunda” deşarj bölgesinden spektrumu	67
4.18. Helyum kilohertz plazma kalemin jet (post-deşarj) bölgesinden spektrumu	67
4.19. Kilohertz plazma kalem elektriksel ölçümler için kullanılan sistem.....	70
4.20. Kilohertz plazma kalemin çalışma sırasında osiloskop görüntüleri.	71
4.21. a) Kilohertz plazma kalemin ürettiği akımın 1 k Ω direnç üzerinden geçirilmesi b) şematik gösterim	72
4.22. 1 k Ω direnç üzerindeki voltajın jete uzaklık grafiği.....	72
4.23. Kilohertz plazma kalem akım değişimi	73

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

4.24. Sabit uygulama voltajı frekansında (15 kHz) uygulama voltajı ile kilohertz plazma kalem jet uzunluğu değişimi.....	74
4.25. Sabit uygulama voltajı (18 kV) değerinde uygulama voltajı frekansı ile kilohertz plazma kalem jet uzunluğu değişimi	75
4.26. Argon gazı ile üretilen kilohertz plazma jet	76
4.27. Argon gazı ile kilohertz plazma kalem jet uzunluğunun gaz akış hızı ile değişimi ...	77
4.28. Argon gazı kilohertz plazma kalem jet uzunluğunun biyolojik uygulamalarda artışı	78
4.29. Argon kilohertz plazma jet sıcaklık ölçümü.....	78
4.30. Argon gazı kilohertz plazma kalemin a) deşarj bölgesinden b) jet (post-deşarj) bölgesinden alınan spektrumlar	80
4.31. Argon gazı kilohertz plazma kalem direnç üzerinden akım geçişi.....	85
4.32. Argon gazının 1 kiloohm'luk direnç üzerinden geçişi ile elde edilen akım değişimi	86
4.33. Plazma jet karşısına yerleştirilmiş topraklanmış konik çelik	87
4.34. Helyum plazma jet: (a) Plazma jetin açık havada yayılması (b) topraklanmış konik bir iletkenin plazma jete yakın bir noktaya konumlandırılması durumunda plazma jet yayılımının sonlanması.....	88
4.35. Helyum kilohertz plazma jetin bakır plakaya yönelimi a) plazma jetin açık havada yayılımı b) bakır plaka varlığında plazma jetin davranışı	89
4.36. Helyum plazma jetin bakır plakaya yönelimi a) Gaz akış hızı 2-3 l/dk b) Gaz akış hızı 8 l/dk.....	90
4.37. Plazma jetin toprak elektrotuna yönelimi.....	91
4.38. Puls DC Plazma Kalem ile elde edilen plazma jetin pozitif yöne eğilimi.....	91
4.39. Kilohertz plazma kalem civarında elektromanyetik alan	92
4.40. Helyum kilohertz plazma kalem jetine manyetik alan uygulanması.....	93
4.41. a) kilohertz plazma kalemin polietilen plastik üzerine uygulanması b) Plazma uygulanan ve uygulanmayan bölgeye su damlatılması c) Damlatma işlemi sonrası su damlalarının eğik yapıda hareketi.....	95

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
4.42. a) Kilohertz plazma kalemin cam üzerine uygulanması, b) Plazma uygulanan ve uygulanmayan bölgeye su damlatılması, c) Damlatma işlemi sonrası su damlalarının eğik yapıda hareketi.....	96
4.43. a) Kilohertz plazma kalemin bakır plaka üzerine uygulanması b) Plazma uygulanan ve uygulanmayan bölgeye su damlatılması	96
4.44. Kilohertz plazma kalemin gözlük temizleme bezi üzerine uygulanması sonrası plazma uygulanan ve uygulanmayan bölgeye su damlatılması.....	97
4.45. Kilohertz plazma kalemin su emici kâğıt üzerine uygulanması sonrası plazma uygulanan ve uygulanmayan bölgeye su damlatılması	97
4.46. Uygulama öncesi <i>Pseudomonas aeruginosa</i> bakterilerin petri kabında görünümü ...	98
4.47. Helyum kilohertz plazma kalem ile <i>Pseudomonas aeruginosa</i> bakterileri üzerine uygulama	98
4.48. Helyum kilohertz plazma kalem ile <i>Pseudomonas aeruginosa</i> bakterileri üzerine uygulama sonrası petri kabının görünümü	99
4.49. Helyum kilohertz plazma kalem ile <i>Pseudomonas aeruginosa</i> bakterileri üzerine uygulama sonrası değişim	99
4.50. <i>Pseudomonas aeruginosa</i> bakterileri üzerine argon kilohertz plazma kalem uygulaması a) Uygulama öncesi petri kabının görünümü b) Argon kilohertz plazma jet uygulaması c) İnkübasyon sonrası petri kabının görünümü.....	100

ÇİZELGELER DİZİNİ

Cizelge

Sayfa

1.1. Atmosferik basınçta helyum plazmasında meydana gelebilecek önemli reaksiyonlar	11
2.1. Farklı iyon sayıları için hesaplanan r_2 ve r_0 değerleri	29
3.1. Kilohertz plazma kalem üretiminde kullanılan malzemeler ve cihazlar	38
3.2. AC güç kaynağının teknik özellikleri	41
3.3. Yüksek voltaj probunun teknik özellikleri	44
3.4. Pensampermetrenin teknik özellikleri	45
3.5. Optik emisyon spektrometresinin teknik özellikleri	47
3.6. Kızılötesi termometrenin teknik özellikleri	49
4.1. Helyum gazı plazmasında gözlemlenen atomik geçişlere ait bilgiler	68
4.2. Helyum gazı plazmasında gözlemlenen moleküler geçişlere ait bilgiler	68
4.3. Sabit uygulama frekansı (15 kHz) ve gaz akış hızında (6 l/dk) uygulama voltajı ile kilohertz plazma kalem akım değişimi	73
4.4. Sabit uygulama voltajı (18 kV) ve gaz akış hızında (6 l/dk) uygulama voltajı frekansı ile kilohertz plazma kalem akım değişimi	73
4.5. Argon gazı plazmasında gözlemlenen atomik geçişlere ait bilgiler	81
4.6. Argon gazı plazmasında gözlemlenen moleküler geçişlere ait bilgiler	82
4.7. Argon gazında meydana gelen temel reaksiyonlar	82

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
kV	kilo Volt
kHz	kilo Hertz
eV	Elektron Volt
E	Elektrik alan
K	Kelvin
°C	Santigrat derece
A	Amper
I	Akım
V	Volt
W	Watt
kW	Kilo Watt
λ	Dalgaboyu
s	Saniye
e-	Elektron
H	Hidrojen
He	Helyum
He [*]	Yarı-kararlı Helyum atomu
He ₂ [*]	Yarı-kararlı Helyum molekülü
He ₂ ⁺	Helyum molekülü iyonu
Ar	Argon atomu
O	Oksijen radikali
O ⁻	Oksijen radikali iyonu
O ⁺	Oksijen radikali iyonu
O ₃	Ozon molekülü
O ₃ ⁻	Ozon molekülü iyonu
O ₂	Oksijen molekülü

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Simgeler

Açıklama

O_2^-	Oksijen molekülü iyonu
N_2	Azot molekülü
N_2^+	Azot iyonu
NO	Azot monoksit (Azot oksit) radikali
NO^+	Azot oksit iyonu
NO^-	Azot oksit iyonu
OH	Hidroksil radikali
H_2O	Su molekülü
X; Y	Herhangi bir atom/molekül

Kisaltmalar

Açıklama

ABSPJ	Atmosferik Basınç Soğuk Plazma Jet
AC	Alternatif Akım
DC	Doğru Akım
MW	Mikrodalga
RF	Radyofrekans
DBD	Dielektrik Bariyer Deşarj
ICCD	Intensified Charge-Coupled Device
OES	Optik Emisyon Spektroskopisi
UV	Ultraviyole
YV	Yüksek Voltaj
CVD	Chemical Vapor Deposition

1. GİRİŞ

Ateşin keşfi, insanlık tarihini büyük ölçüde değiştirmiştir. İlk çağlarda ateş, ısınmada, yiyecekleri pişirmede, toprağı pişirerek daha sert malzemelerin üretiminde ve en önemlisi çeşitli metalleri eriterek gerek avlanmada gerekse hayatın diğer alanlarında kullanılmak üzere çeşitli alaşımların üretiminde kullanılmıştır. Sanayi devrimi ile ateş, buharlı makineler ve daha yüksek teknoloji malzemelerinin üretiminde kullanılmıştır. Ateş, bakteriyel sterilizasyon gibi çeşitli tıp uygulamalarında da önemli yer bulmuştur.

Maddenin katı, sıvı ve gaz halleri de insanlık tarihinde çok önemli teknolojik gelişmeler için kullanılmıştır. Ancak maddenin dördüncü hali plazma, bugün insanlığın geldiği düzeyde çok daha yüksek teknoloji ürünlerinin üretimini sağlamaktadır. Maddenin katı, sıvı ve gaz halleri nötr atom ya da moleküllerden oluşurken maddenin plazma hali, nötr atom ya da moleküller, iyonlar, elektronlar, uyarılmış atom ya da moleküller, radikal parçacıklar ve fotonlardan oluşmaktadır. Ateş, maddenin plazma halidir. Evrenin %99'u da halen plazma halinde bulunmaktadır. Yıldızlar, yıldızlar arası uzay, şimşek, iyonosfer doğada bulunan doğal plazmalara örnek verilebilir. Floresan ve neon lambalar gibi gaz deşarjlar ise yapay olarak üretilen plazmalardır. Doğal plazmalar son derece sıcak iken laboratuvar koşullarında üretilen plazmalar nispeten daha soğuktur. Bu nedenle laboratuvar koşullarında üretilen bilhassa soğuk plazmalar aslında ateşin özelliğine sahiptirler. Başka bir deyiş ile soğuk plazmalar, soğuk ateş olarak nitelendirilebilirler.

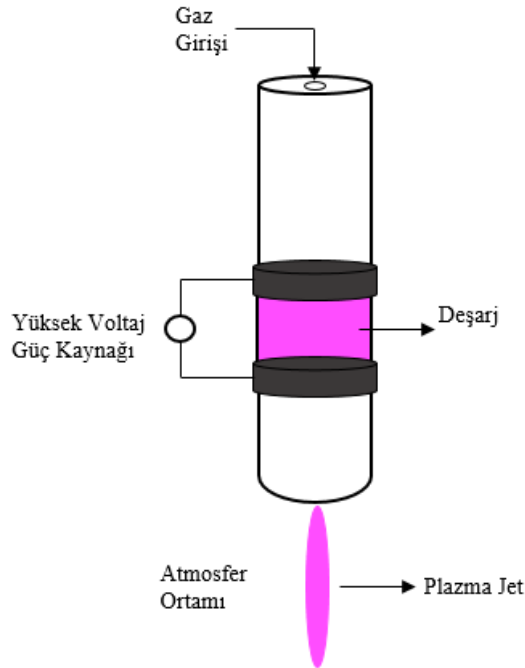
Termodinamik dengedeki bir nötral gaz halini tanımlayan en önemli parametre, sistem içindeki moleküllerin ortalama taşınım enerjisini ifade eden sıcaklık olduğu için plazmalar en genel halde sıcak plazmalar ve soğuk plazmalar olarak ikiye ayrılmaktadırlar. Plazma içerisinde farklı kütleli ve yüklü birçok parçacık türü bulunmaktadır. Bu nedenle plazma için bir sıcaklıktan bahsederken tek bir sıcaklık ele alınamaz. Bunun yerine her bir türün sıcaklığı ayrı ayrı değerlendirilir. T_g ; nötral atomların yani plazması oluşturulan gazın sıcaklığını, T_u , uyarılmış atomların sıcaklığını; T_i , iyonların sıcaklığını, T_e , elektronların sıcaklığını; T_a , molekül durumundan atoma ayrılmış atomlar için ayrılmış atom sıcaklığını

ve T_f , fotonların enerjisini karakterize eden foton sıcaklığını ifade etmektedir. Plazma içinde bulunan bu farklı türdeki parçacıkların enerjileri eşitse, yani $T_g \cong T_u \cong T_i \cong T_a \cong T_f \cong T_e = T_p$ ise bu plazmalar sıcak plazmalar olarak adlandırılmaktadır. Burada T_p “Plazma Sıcaklığı” olarak tanımlanmaktadır. Ancak plazma içinde bulunan elektronların sıcaklıkları diğer parçacıkların sıcaklıklarından çok daha yüksek ise ve diğer parçacıkların sıcaklıkları plazması üretilen gazın nötral parçacıklarının sıcaklıklarına (gaz sıcaklığına) yakınsa, yani $T_e \gg T_i > T_g > T_u$ ise bu plazmalar soğuk plazmalar olarak adlandırılmaktadır. Soğuk plazmalarda elektronlar ile nötral atomlar ve iyonlar arasında termal dengeye ulaşılamaz. Bu nedenle hiçbir türün sıcaklığı birbirine eşitlenemez. Soğuk plazmalarda elektron sıcaklığı çok yüksek değerlere ulaşırken üretildiği gazın sıcaklığı oda sıcaklığı mertebesinde kalmaktadır.

Plazmalar; kağıt, ahşap ve cam endüstrisinde, uzay teknolojilerinde, materyal işleme (aşındırma, sertleştirme, kaplama, kesme, kaynak, yeni tür malzeme üretimi) teknolojilerinde, tekstil endüstrisinde, elmas yapımında, yarıiletken teknolojisinde, elektronik çip yapımında, iletişim teknolojisinde, yüzey kaplama ve dekorasyon teknolojilerinde, sterilizasyon ve su arıtma sistemlerinde, gıda endüstrisinde, tehlikeli ve zararlı atık (nükleer, çöp ve tıbbi atık) arıtmada, güneş enerjisi ve optikte, otomobil ve uçak endüstrisinde, yeni teknoloji inşaatlarda, savunma sanayinde, kristal büyütmede, radar ve füzyon araştırmalarında ve daha birçok alanda kullanılmaktadırlar. Flüoresan lambalar, şehir aydınlatma lambaları, plazma televizyonlar, plazma klimalar da günlük hayatımıza giren plazma teknolojileridir. Plazmaların tıp ve biyomedikalde uygulamaları da başta sterilizasyon olmak üzere oldukça yaygındır (Akan, 2014).

Plazmalar daha çok bir vakum odasında ve iki elektrot arasında üretilmektedirler. Düşük basınçta kaplama gibi uygulamalarda vakum ortamında gerçekleştirilen plazma çalışmaları önemli teknolojiler geliştirmiştir. Mikro elektronikte çip üretiminden nano karbon kaplamaya kadar son derece üst teknolojilerde vakumda plazma çalışmaları yapılmıştır. Ancak yüzey temizleme, yüzey sterilizasyonu ve canlı doku üzerinde plazma uygulamaları gibi “soğuk plazma” uygulamalarında önemli bir sorunla karşılaşmaktadır. Örneğin; soğuk plazma ile bakteri sterilizasyonunda bakterilerin, plazmanın üretildiği elektrotlar arasına yerleştirilmesi gerekmektedir. Böyle bir uygulamada sterilizasyon

yapılacak alan, elektrotlar arası uzaklık ile sınırlı kaldığı gibi kullanıcı da elektrotlar arasındaki yüksek voltaj ile karşı karşıya kalmaktadır. Aynı zamanda böyle bir sistemi uygulama sahasına taşımak da kolay olmamaktadır. Bu dezavantajlardan dolayı özellikle atmosferik basınçta post-deşarj plazmaları üretilmeye başlanmıştır. Post-deşarj plazma; plazmanın, üretildiği elektrotlar arasından çıkarılmış halidir. Postdeşarjlar elektrotlar arasından herhangi bir ayrı ve kapalı bir hacime çıkarılabilecekleri gibi doğrudan atmosfer ortamına da çıkarılabilmektedirler (İlik vd., 2017). Atmosfer ortamına çıkarılan plazmalar en genellikle “plazma jet” olarak adlandırılmaktadırlar (İlik ve Akan, 2016). Şekil 1.1.’de en temel haliyle bir atmosferik basınç plazma jet şeması verilmiştir. Burada en genel halde bir dielektrik tüp içinde, iki metal elektrot arasındadeşarj plazması oluşturulur. Bu elektrotlar arasındaki plazma, elektrik alanının olmadığı atmosfer ortamına çıkarılır. Plazma jet olarak bilinen bu sistemler ark jet gibi çeliği kesebilen sıcaklıkta olabildikleri gibi elle dokunulabilecek kadar da soğuk olabilmektedirler.



Şekil 1.1. Atmosferik basınç plazma jet şeması

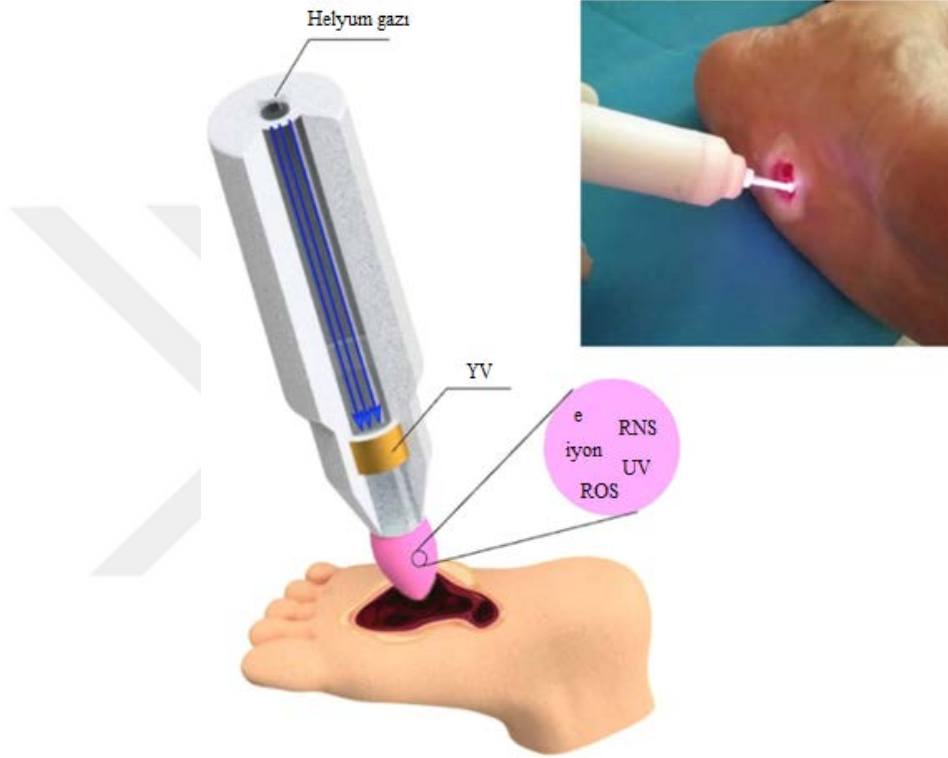
Elektrotlar arasından atmosfer ortamına çıkarılan plazma jetlerin oldukça önemli avantajları vardır. Bunlardan en önemlisi herhangi bir vakum ortamında üretilmemeleri ve

dolayısıyla pahalı vakum ekipmanlarına ihtiyaç duymamalarıdır. Bununla birlikte basit sistemler olmaları nedeniyle maliyetleri düşüktür ve kolayca uygulama yapılmak istenilen yere taşınabilirler. Plazma jetlerde, elektrotlar arasında var olan yüksek elektrik alan yoktur. Bununla birlikte yüksek enerjili iyonlar da yoktur. Yüksek elektrik alan kullanıcı için tehlike yaratırken yüksek enerjili iyonlar da uygulamanın yapıldığı yüzeye zarar verebilmektedir. Bununla birlikte plazma jetler ile daha geniş alanlarda, hatta silindir gibi iç yüzeyi olan hacimlerde uygulama yapılabilmektedir. Dahası bu tür sistemler, özellikle soğuk plazma jetler, sivilceleri, cilt lekelerini, cilt kırışıklıklarını, deri yanık ve yaralarını tedavi için kullanılabildikleri gibi ağız içinde diş eti ve diş çürüğü tedavisinden bazı endoskopik cihazlar yardımıyla vücut içinde pek çok iltihap tedavisine kadar ve hatta onkolojik uygulamalarda kanser ve tümör hücrelerinde kullanılabilmektedirler.

Soğuk plazma jetlerde ısı ve yüksek enerjili iyon etkisinin olmaması, bu sistemlerin özellikle çağımızın materyali polimer tabanlı (ısıya hassas) cihazlarda uygulama imkânını arttırmaktadır. Bu özellik aynı zamanda canlı hücreye zarar vermeden uygulama şansı da vermektedir. Bundan dolayı plazma jetler kan bankasındaki kanların sterilizasyonundan endoskopik cihazlarla vücut içi sterilizasyona kadar birçok uygulamada kullanılabılır. Soğuk plazma jetler aynı zamanda robotik birçok ameliyatta kanın pıhtılaştırılması işleminde de kullanılmaktadırlar.

Literatürde yer alan çalışmalarda soğuk plazmaların hiç ısı üretmeden pek çok tür bakteriyi öldürdüğü gibi mantar ve biyofilm gibi farklı mikro-organizmalar üzerinde de etkin olduğu görülmüştür (Shintani vd., 2010; Akan ve Çubuk, 2014). Plazma klimalar ile hava sterilize edildiği gibi kuvöz, hastane, okul, kreş, alışveriş merkezi, uçak gibi toplu yaşam alanlarındaki hava plazma haline getirilerek zararlı mikro-organizmalardan arındırılabilir. Bununla birlikte canlılar üzerinde soğuk plazma uygulamaları çok önemlidir. Bakteri ve virüsler sebebi ile meydana gelen pek çok hastalık, kimyasal ilaç kullanmadan doğrudan soğuk plazma ile tedavi edilebilecektir. Plazmalar endoskopik cihazlarla insan vücudu içine sokularak da kanın sterilizasyonunu sağlanmakta ve vücut içindeki pek çok enfeksiyon tedavi edilmektedir. Bununla birlikte yanık ve yara tedavisinde, kırışıklık ve kahverengi leke gibi çeşitli dermatolojik işlemlerde, ağız-diş sağlığı ve diş çürüğü tedavisinde, pek çok ülser tedavisinde, dikişsiz ameliyat için kanın pıhtılaştırılmasında ve birçok kanser türü

tedavisinde kullanılmaktadır. Şekil 1.2.' de helyum plazma jet ile gerçekleştirilen açık yara tedavisine örnek verilmiştir. Soğuk plazmaların, kök hücre, protein, lökositler, hücre mutasyonu, üreme hücreleri ve nöroloji gibi uygulamaları da çok yeni sonuçlar ortaya koymaktadır (Akan, 2014).



Şekil 1.2. Helyum plazma jet ile açık yara tedavisi (Mirpour vd., 2020)

Plazmaların ziraat ve gıda uygulamalarında da çok farklı sonuçlar ortaya çıkmıştır. Soğuk plazmalar tohum üzerine uygulandığında, kök uzunluğunda ve filizlenmede çok ciddi gelişmeler görülmektedir. Yetişen ürünlerde de ciddi verim artışları olmaktadır (Ito vd., 2017). Soğuk plazmaların gıda üzerindeki bakterileri de yok ederek ürünlerin raf ömürlerini arttırdığı görülmektedir. Sebze, et, balık, süt, peynir gibi pek çok gıda üzerinde soğuk plazma uygulamaları ile daha uzun süre saklanabilen gıdalar elde edilmektedir (Pankaj vd., 2018).

Soğuk plazma, gıda muhafazasında geleneksel yöntemlere göre düşük sıcaklıkta etkili olması, güçlü antimikrobiyal etki sağlaması, toksik yan ürünler üretmemesi, gıda

ürünlerinde önemli hasara yol açmaması ve düşük maliyetli oluşu gibi avantajları nedeniyle güçlü bir alternatif vadetmektedir (Misra ve Jo, 2017). Ayrıca, plazma herhangi bir kimyasala ihtiyaç göstermemekte, toksik kalıntı bırakmamakta ve farklı gıdalarda yüksek kalite sağlayabilen zararsız/çevre dostu nitelik taşımaktadır (Gavahian vd., 2018).

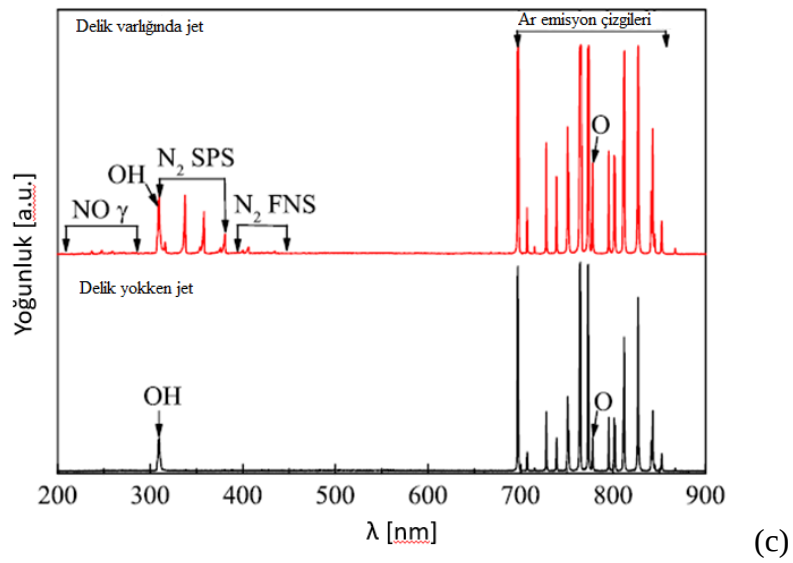
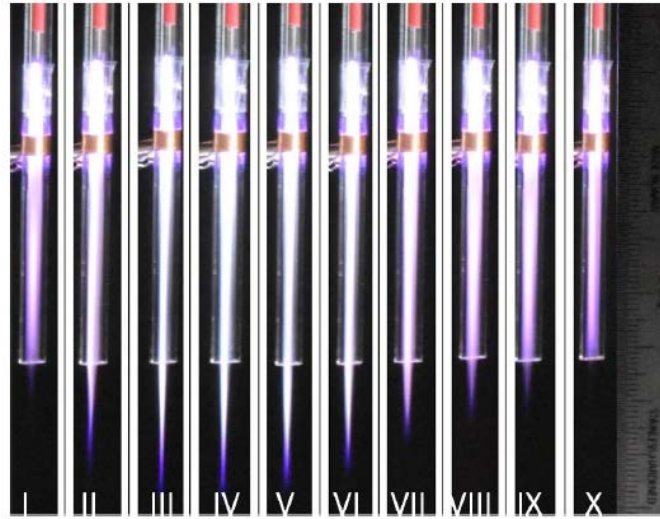
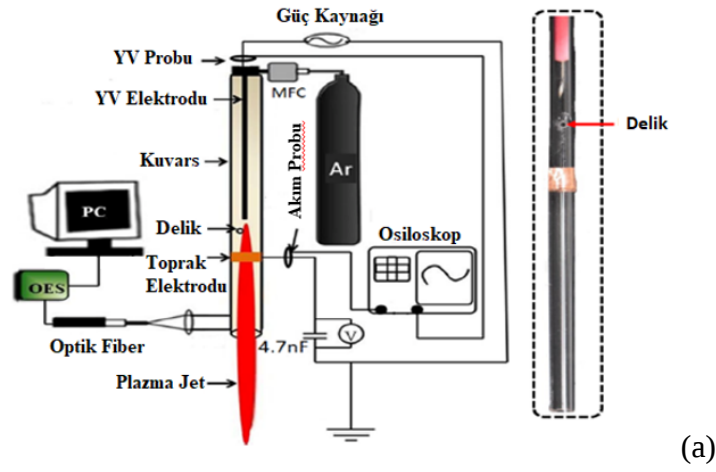
Soğuk plazmaların insan, hayvan ve bitki patajonik virüsleri inaktivasyonunda, plazma içindeki oksijen ve azot radikallerinin, UV ışınımın ve yüklü parçacıkların etkisi olduğu görülmüştür. Soğuk plazmaların virüsün viral protein ve nükleik asitlerine saldırdığı görülmektedir. Soğuk plazma uygulaması sonucu virüs yapısının ve nükleik asitlerinin, konakladığı insan ya da hayvana zarar veremeyecek şekilde kısmen ya da tamamen bozunduğu görülmüştür. Şimdiye kadar bakteriyofaj lamda, MS2 ve T4, hayvan taşıyıcı FCV, hayvansal NDV ve AIV, bitkisel TMV ve PVY ve insanda olabilen Adenovirüs, İnfluenza A ve B, RSV, HIV, SARS-CoV-2 gibi pek çok virüs üzerinde soğuk plazma inaktivasyonu gerçekleştirilmiştir (Filipić vd., 2020). Plazmanın COVID-19 üzerine uygulanması konusunda da çalışmalar da aktif ve hızlı bir şekilde yürütülmektedir (Chen vd., 2020).

Soğuk plazmaların su üzerine uygulanması ile üretilen “plazma uygulanmış su (plasma treated water)” çok farklı özellikler ortaya koymaktadır (İlik vd., 2019). Plazma uygulaması ile su, öncelikle arıtmakta ve steril edilebilmektedir. Bununla birlikte plazma uygulanmış suyun pH değeri, redoks potansiyeli, iletkenliği, hidrojen peroksit oranı, nitrit ve nitrat iyon konsantrasyonu değiştirilerek çok farklı özellikte su üretilmektedir. Plazma uygulanmış suyun bakterileri öldürdüğü gösterilmiştir. Bu nedenle plazma uygulanmış su, gerek ağız gerekse serum yoluyla hastaya verilerek enfeksiyon mücadelesi yapılabilir. Yeni tür ilaç üretiminde katalizör olarak da kullanılabilir. Plazma uygulanmış su ile beslenen bitkilerin hem yaprakları hem de ürünlerinin çok daha gelişkin olduğu gösterilmiştir. Plazma uygulanmış suyun virüsleri yok edici etkisi olduğunu gösteren çok sayıda araştırma yapılmıştır. Bu nedenle plazma uygulanmış su ile el ve yüz yıkanması ile virüslerden korunmak mümkün olabilir. Bununla birlikte tekstil ürünleri, maskeler, gıdalar ve yaşam alanları da plazma uygulanmış su ile yıkanarak bakteri ve virüslerden arındırılabilir (Barjasteh vd., 2021).

Plazma jetler üzerine yapılan çalışmalar ve uygulamalar son on yılda çok fazla yol almıştır. Ancak önemli en önemli eksiklik, plazma jetlerin henüz yeterince karakterize edilememesidir. Örneğin plazma jetler ile sterilizasyon uygulamalarında hala jet içindeki hangi parçacık türünün bakterilerin ölümüne neden olduğu araştırma konusudur. Atomik oksijen (O) ve hidroksillerin (OH gibi) bakteriler üzerinde öldürücü etkisi olduğu üzerine çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar henüz tam olarak ispat ortaya koymadıysa da bu tür parçacıklar, bakterinin hücre zarına mı zarar veriyor, protein yapısını mı bozuyor yoksa DNA zincirini mi bozuyor gibi sorular plazma aktifleme, polimerizasyon gibi diğer plazma jetlerle yüzey uygulamalarında da sorulmaktadır.

Plazma jetler atmosfer ortamına çıkarıldığı ve elle dokunulabilecek kadar soğuk oldukları için genel olarak “Atmosferik Basınç Soğuk Plazma Jet (ABSPJ)” olarak adlandırılmaktadırlar. En genel halde böyle bir jet bir 0.5-2 cm çapında bir cam boru içine 0.2-1 mm kalınlığında iğne elektrot yerleştirilerek üretilmektedir. İğne elektrota yüksek voltaj verilerek ve cam borunun dış kısmına toprak uygulanarak üretilirler. Cam borunun üst kısmından helyum veya argon gibi soy gazlar gönderilerek cam borunun çıkış ucunda 1-5 cm uzunluğunda, el ile temas edilebilecek sıcaklıkta bir plazma üretilir. Bu sırada cam boru içinde de plazma oluşur. Cam boru içindeki plazma, deşarj plazması olarak isimlendirilirken cam borunun ağzından dışarı çıkan plazma post-deşarj veya ABSPJ olarak adlandırılır. Cam borunun çapı ve uzunluğu değiştirilebileceği gibi seramik veya başka malzemelerde kullanılabilir. Elektrot olarak borunun içinde veya dışında farklı metal elektrotlar kullanılabilir. Gönderilen gaz veya gaz karışımı değiştirilebilir. Gaz akış hızı da değiştirilebilir. Bununla birlikte bu basit elektrot tasarımlarına farklı türde elektrik voltajları uygulanabilir. Doğru akım, alternatif akım ve puls voltaj gibi güç kaynakları kullanılabilir. Alternatif akım güç kaynağının frekansı kHz ve MHz olabildiği gibi mikrodalga güç kaynakları da kullanılabilir. Puls voltaj DC veya AC olabilirken puls süresi, puls bekleme süresi, puls çıkış süresi milisaniyeden mikro saniyeye değişebilir. Esasında son derece basit tasarımları olan plazma jetler yukarıda verildiği gibi birbirinden farklı özelliklerde üretilirler. Bu farklı üretimlerin her biri birbirinden farklı özellikte plazma jetler üretmektedir. Her birinin sıcaklığı, ürettiği parçacık türlerinin yoğunluğu ve plazma dinamiği tamamıyla farklı olmaktadır. Bununla birlikte plazma jetlerin özellikleri ve yapısı hala inceleme aşamasındadır. Aynı elektrot yapısındaki bir sisteme farklı türde bir güç

kaynağı uygulandığında, farklı özelliklerde plazma jetler üretilmektedir. Dolayısıyla plazma jet sisteminde en ufak değişim, elde edilen plazma jetin karakteristiklerini değiştirmektedir. Bu değişimler üretilen jetin boyutunda ve kimyasal içeriğinde meydana geldiği gibi fiziksel oluşum mekanizmalarını da etkilemektedir. Son yıllarda yürütülen çalışmalar, plazma jetlerde elektrik alan olmayan bölgede iyonizasyon süreçlerinin nasıl meydana geldiği üzerinedir. Yani son yıllarda plazma jetlerin fiziksel dinamiğinin nasıl olduğu daha çok araştırma konusu olmaktadır. Bu nedenle bazı modeller de ortaya konmaya başlanmıştır. Bunlardan birincisi; elektrotlar arasında oluşan plazmanın ürettiği fotonların atmosfer bölgesinde yeni iyonlaşma reaksiyonlarını başlattığı şeklinde iken ikinci model; elektrotlar arasında oluşan plazma içindeki elektronların atmosfere çıkıştaki gazı iyonlaştırdığı yönündedir. ABSPJ' lerin özellikleri kullanılan gaz, gaz karışımı, gaz akış hızı, elektrot tasarımı ve boyutları ve kullanılan güç kaynağı (güç kaynağının elektromanyetik dalga yapısı) ile büyük ölçüde değişmektedir. Örneğin, Ghimire vd.nin (2018) yaptığı çalışmada üretilen jet sisteminde, jetin üretildiği kuvars cam üzerine sadece 0.46 mm çapında bir delik açıldığında tamamıyla farklı özellikte bir plazma jet gözlenmiştir. Şekil 1.3.'den görüldüğü gibi cam boru üzerinde küçücük bir delik açılması sonucu plazma jetin uzunluğu ve karakteristiği değişmiştir.



Şekil 1.3. a) Deney düzeneğinin şeması (b) Farklı argon gaz akış hızlarındaki deşarj fotoğrafları (c) Bir delik varlığında ve yokluğunda türlerin emisyon spektrumu (Ghimire vd., 2018)

Şekil 1.3.(c)'den görüldüğü gibi özellikle spektroskopik veriler tamamıyla değişmiştir. Optik veriler incelendiğinde, delik yokken jet, yalnızca OH radikali üretirken delik oluştuktan sonra OH radikalının yanında NO ve N₂ SPS (second positive system) ve N₂ FNS (first negative system) üretildiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada sisteme yalnızca küçük bir delik açmakla yepyeni ve farklı özellikte atmosferik basınç plazma jet elde edildiği gösterilmiştir. Oysaki aynı elektrot tasarımı, aynı gaz ve aynı güç kaynağı ile daha önce de birçok plazma jet üretilmiştir. Şekil 1.3. sonuçları atmosferik basınç plazma jetlerde yapılacak çok küçük bir değişimin, jet karakteristiğini değiştireceğini göstermektedir.

Atmosferik havanın plazmasında 500'e yakın kimyasal reaksiyonla 75'ten fazla kimyasal ürün ortaya çıkmaktadır. Gordillo-Vazquez (2008)'in yaptığı bir çalışmada atmosferik havanın plazmasında meydana gelen 486 adet reaksiyon tek tek verilmiştir. Herhangi bir plazma üretim sisteminde atmosferik basınçta helyum gazında Çizelge 1.1.'de verilen temel kimyasal reaksiyonlar meydana gelir ve verilen parçacık türleri üretilir. Bu reaksiyonların hangisinin meydana geldiği, reaksiyon oranı katsayılarından bilinebilirse de plazma sisteminin özelliklerine göre farklılıklar gösterebilir. Bu nedenle üretilen plazmadan spektroskopik ölçümler almak plazma sistemindeki reaksiyonlar hakkında belirleyici bilgileri verir.

Çizelge 1.1. Atmosferik basınçta helyum plazmasında meydana gelebilecek bazı önemli reaksiyonlar (Stalder vd., 2006; Kelly ve Turner, 2014; Li vd., 2021)

Etkileşim	Reaksiyon
Helyum atomu etkileşimleri	$e^- + \text{He} \rightarrow \text{He} + e^-$
	$e^- + \text{He} \rightarrow \text{He}^* + e^-$
	$e^- + \text{He} \rightarrow \text{He}^+ + 2e^-$
Helyum uyarılmış atomu etkileşimleri	$e^- + \text{He}^* \rightarrow \text{He} + e^-$
	$\text{He}^* + e^- \rightarrow \text{He}^+ + 2e^-$
	$\text{He}^* + 2\text{He} \rightarrow \text{He}_2^* + \text{He}$
	$\text{He}^* + \text{He}^* \rightarrow \text{He}_2^+ + e^-$
	$\text{He}^* + \text{He}^* \rightarrow \text{He}^+ + \text{He} + e^-$
	$\text{He}_2^* + \text{M} \rightarrow 2\text{He} + \text{M}$
	$2\text{He}^* \rightarrow \text{He}_2^+ + e^-$
	$2\text{He}_2^* \rightarrow \text{He}_2^+ + 2\text{He} + e^-$
Helyum iyonu etkileşimleri	$e^- + \text{He}^+ \rightarrow \text{He}^*$
	$e^- + \text{He}^+ \rightarrow \text{He}$
	$\text{He}^+ + e^- + e^- \rightarrow \text{He} + e^-$
	$\text{He}^+ + e^- + e^- \rightarrow \text{He}^* + e^-$
	$\text{He}_2^+ + e^- + e^- \rightarrow \text{He} + \text{He} + e^-$
	$\text{He}_2^+ + e^- \rightarrow \text{He}^* + \text{He}$
	$\text{He}_2^+ + e^- \rightarrow \text{He} + \text{He}$
Azot etkileşimleri	$\text{N}_2 + e^- \rightarrow \text{N}_2^+ + 2e^-$
	$e^- + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^* + e^-$
	$e^- + \text{N} \rightarrow \text{N}^+ + 2e^-$
	$\text{N}_2^+ + e^- \rightarrow \text{N}_2$
	$\text{He}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}^+ + \text{N} + \text{He}$
	$\text{He}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{He}$
	$\text{He}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{He} + \text{He}$
	$\text{He}^* + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{He} + e^-$
	$\text{He}_2^* + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+ + 2\text{He} + e^-$
	$\text{He}_2^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{N}_2^+ + \text{He}_2^*$
	$\text{N}^+ + e^- + \text{He} \rightarrow \text{N} + \text{He}$

Çizelge 1.1. Atmosferik basınçta helyum plazmasında meydana gelebilecek önemli reaksiyonlar (Stalder vd., 2006; Kelly ve Turner, 2014; Li vd., 2021) (devam)

Oksijen etkileşimleri	$e^- + O_2 \rightarrow 2e^- + O_2^+$
	$e^- + O_2 \rightarrow e^- + 2O$
	$e^- + O_2 \rightarrow e^- + O + O (^1D)$
	$e^- + O_2^+ \rightarrow 2O$
	$e^- + O_2 + He \rightarrow O_2^- + He$
	$O^- + O_2 + He \rightarrow O_3^- + He$
	$O^+ + N_2 + He \rightarrow NO^+ + N + He$
	$O + O + He \rightarrow O_2 + He$
	$He^+ + O_2 \rightarrow O^+ + O + He$
	$He^+ + O_2 \rightarrow O_2^+ + He$
	$O + O_2 + He \rightarrow O_3 + He$
	$O^+ + e^- + He \rightarrow O + He$
NO etkileşimleri	$NO^- + He \rightarrow NO + He + e^-$
	$NO^+ + O_3^- + He \rightarrow NO + O_2 + O + He$
Su etkileşimleri	$H_2O + e^- \rightarrow H + OH + e^-$
	$H_2O + O^* \rightarrow 2OH$
	$He^* + H_2O \rightarrow OH^* + H + He$
	$He^* + H_2O \rightarrow O^* + H_2 + He$
	$He^* + H_2O \rightarrow OH + H^* + He$

Çizelge 1.1.'de ve Gordillo-Vazquez (2008)'de verilen plazma reaksiyonlarının hangisinin bir plazma jet sisteminde meydana geldiğini ve hangi tür parçacıkların oluştuğunu tespit etmek çok kolay değildir. Plazma jet sistemlerinde kullanılan güç kaynağının frekansı yalnızca 1 kHz değiştiğinde dahi plazma jetin özellikleri ve ürettiği parçacık türleri değişmektedir.

Plazma jetler ile ilgili detaylı çalışmalara ihtiyaç vardır. Özellikle elektrotlar arasında üretilen aktif parçacıkların, elektrotlar arasından çıkarıldıktan sonra hangi mesafelere kadar var olabildikleri araştırma konusudur. Birçok parçacık rekombinasyon işlemi ile yaşam

süresini tamamlayacağı için plazmadan farklı uzaklıklarda yapılan spektroskopik çalışmalar ne tür parçacıkların varlıklarının devam ettiğine cevap bulacaktır. Böylece plazma jet uygulamalarında, uygulama yapılmak istenen numune (örneğin bakteri veya canlı hücre) daha kısa zamanda ve bulunduğu yüzeye zarar vermeden plazmadan hangi uzaklığa konulması gerektiği hakkında ön bilgilere sahip olunacaktır.

Yürütülen tez çalışmasında, literatürde var olan ve tez danışmanın da çalışmalar yaptığı (Laroussi vd., 2008) “plazma kalem (plasma pencil)” olarak bilinen plazma jet sistemine benzer bir plazma jet üretilmiştir. Plazma kalem sisteminde, iki yüzük elektrot yalıtılarak aralarında oluşan plazma atmosfer ortamına çıkarılmaktadır. Şimdiye kadar üretilen plazma jetlerden oldukça farklı bir tasarımıdır. Bu nedenle de özel olarak “plazma kalem” ismiyle anılmaktadır. Plazma kaleminde elektrotlar arasına puls DC voltaj uygulanmaktadır. Bu nedenle elektrotlar arasındaki plazma, puls DC plazma olmaktadır. Bununla birlikte atmosfere çıkan jetin varlığını sürdürmesi, foto-iyonizasyon modeli ile açıklanmaktadır. Bu tez çalışmasında plazma kalemin elektrot tasarımına benzer elektrotlara, 18 kV-15 kHz frekansta alternatif gerilim uygulanmıştır. Bu tür plazma jetlerde uygulama voltajı frekansı 1 kHz bile değişse plazma jet özellikleri değiştiği için puls DC voltaj yerine kHz voltaj uygulanması sonucunda çok farklı özellikte plazma elde edilmesi öngörülmüştür. Gerçekten de tez çalışması kapsamında yürütülen deneylerde elde edilen plazma jet, puls DC plazma kalemin ürettiği jetten farklı özelliklerde ve farklı dinamiklerde meydana gelmiştir. Bu nedenle üretilen sisteme “kilohertz plazma kalem” ismi verilmiştir. Kilohertz plazma kalem, puls DC plazma kalemden farklı özelliklerde olmasının yanında daha az maliyetli bir sistemdir. Kilohertz güç kaynakları puls DC güç kaynaklarından çok daha ucuzdur. Bununla birlikte plazma kalem argon gazında jet üretememişken kilohertz plazma kaleminde argon gazında da jet üretilmiştir.

Kilohertz plazma kalem ortaya çıkan özellikleri açısından incelendiğinde, literatürde yer alan puls DC plazma kalemden farklı olduğu görülmüştür. Esasında kilohertz plazma kalem üretilirken puls DC plazma kalemin elektrot yapısına benzer elektrot yapısı kullanıldığı ifade edilmişti. Oysaki önemli bir noktadan dolayı kilohertz plazma kalemin elektrot yapısı, puls DC plazma kalemin elektrot yapısından farklıdır. Puls DC plazma kalem iki dielektrik disk üzerine iki bakır yüzük elektrot kullanmakta ve bunları yalıtılmamaktadır.

Bu tez çalışmasında puls DC plazma kalemin elektrot yapısına, yani çıkış ağzında bulunan yalıtılmamış elektrotlara kilohertz alternatif voltaj uygulandığında plazma jet oluşmamıştır. Bu nedenle yüzük bakır elektrotlar yalıtkan sıvı seramik malzeme ile kaplanmıştır. Bu açıdan tez çalışması kapsamında üretilen kilohertz plazma kalem yalnızca özellikleri açısından değil, aslında elektrot yapısı açısından da puls DC plazma kaleminden farklıdır.

Bu tez çalışmasının ikinci bölümünde literatür özeti verilmiştir. Bu literatür özeti ile farklı türde ve özellikte plazma jetler üretilebildiği ortaya konmuştur. Üçüncü bölümde tümüyle orijinal ve tamamıyla Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Soğuk Plazma Laboratuvarı'nda üretilen kilohertz plazma kalem ile ilgili tasarım, kullanılan materyal ve metotlar açıklanmıştır. Dördüncü bölümde kilohertz plazma kalemin fiziksel analizleri yapılarak özellikle puls DC plazma kaleminden farklı bir plazma ürettiği olduğu ortaya konmuştur. Beşinci ve son bölümde sonuçların kısaca tartışılması yapılmıştır.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Plazma halini ilk olarak Langmuir, eşit sayıda iyon ve elektron içeren bir ortam olarak tanımlamıştır (Tonks ve Langmuir, 1929). Klasik gaz, elektrik yükü sıfır olan parçacıklardan oluşurken plazma, pozitif iyonları, elektronları, nötr ve uyarılmış halde bulunan atom/moleküllerden oluşan bir yeni haldir. Bu sebeple klasik gaz serbest yüklü parçacıkları içermediğinden elektriksel olarak kötü bir iletkenidir. Gazı oluşturan parçacıkların hareketleri ne elektromanyetik bir alan yaratır ne de böyle bir alandan etkilenir. Bir plazma ortamında ise durum bunun tam aksi şeklindedir. Birden fazla farklı ve yüklü tür içeren plazma ise iyi bir iletkenidir. Ancak ilginç olan, plazmanın büyük ölçekte elektriksel olarak nötral olmasıdır (Akan, 2005).

Plazma halinin evrendeki varlığı uzun yıllardır bilinmektedir. Plazma hali, evrenin oluşumundan yalnızca birkaç saniye sonra ortaya çıkmış olup halen daha görünür evrenin %99'unu oluşturmaktadır. Dünyayı saran iyonosfer tabakası bir plazma tabakası olup bu tabaka, evrenden gelen radyasyonların etkisi ile oluşmuştur. İyonosferdeki elektronların yoğunluğu 10^4 - 10^7 m⁻³ kadardır. Plazma tabakaları bu şekilde foto-iyonizasyon ile meydana gelebileceği gibi şimşeklerin taşıdıkları son dereye yüksek elektrik alanların ve şok dalgalarının veya yüksek sıcaklıkların etkisiyle de oluşabilmektedir (Yeniçay, 1970).

Plazmalar daha çok bir vakum odasında ve iki elektrot arasında üretilmektedirler. Düşük basınçta kaplama gibi uygulamalar için vakumda plazma çalışmaları adına önemli teknolojiler geliştirilmiştir. Mikro elektronikte çip üretiminden nano karbon kaplamaya kadar son derece üst teknolojilerde vakumda plazma çalışmaları yapılmıştır (National Research Council, 1991). Plazma çalışmalarında vakum uygulamalarının maliyet ve kullanım açısından bazı dezavantajları bulunmaktadır. Vakum pompası, basınçölçer ve sızdırmaz vakum odası gibi aparatlar, vakum uygulamalarında maliyeti arttırmaktadır. Kullanım açısından da teknolojik uygulamalarda özellikle seri imalatla pratik değildir. Her numune uygulaması için sistemin açılıp kapanması ve tekrar vakumlanması zordur. Ayrıca numunenin bir hazne içine yerleştirilmesi zorunluluğu bazı uygulamalara kısıtlama

getirmektedir. Bu nedenle vakum gerektirmeyen atmosferik uygulamalar tercih edilmeye başlanmıştır. Atmosfer ortamında üretilen plazmalar vakum gerektirmediği için pratik ve ucuzdur. Numuneye uygulanması açısından da kolaydır. Atmosfer ortamında üretilen plazmaların önemli avantajı da atmosferdeki havanın taşıyıcı gaz olarak kullanılabilmesidir. Böyle bir plazma üretim sistemi ekstra gaz için maliyet ve aparat gerektirmediğinden endüstride tercih edilen bir yöntem olmaktadır. Vakum ortamında olduğu gibi atmosferik ortamlarda da plazma üretmek için en genel anlamda iki metal elektrot ve bir güç kaynağı gerekmektedir. Atmosfer basıncı vakum ortamına oranla yüksek olduğu için daha yüksek voltajlarda güç kaynaklarına ihtiyaç duyulmaktadır. Atmosferik basınç plazmaları son derece yaygın olarak kullanılmasına rağmen yüksek voltaj gereksiniminden dolayı bazı kullanım zorlukları vardır. Uygulamak istenilen numunenin yüksek voltaj elektrotları arasına girmesi numuneye zarar verebildiği gibi kullanıcılar için de bazı tehlikeler oluşturmaktadır. Bu nedenle atmosferik basınç plazmalarında plazmanın elektrotlar arasından çıkarılması denenmiş ve post-deşarj plazmaları üretilmiştir.

Harici uygulanan elektrik alan dışına çıkarılmış plazmalar post-deşarj plazmaları olarak adlandırılmaktadır. Post-deşarj plazmalar sıcaklık, çalışma basıncı, elektrot tasarımı gibi parametrelere göre “plazma torch”, “plazma jet”, “afterglow plazma”, “plazma kalem” gibi isimlerle de anılabilmektedir. Her post-deşarjın, oluşturulduğu elektrotlar arası hacimden dışarı çıkarılması gerektiği için bu plazmalar aynı zamanda akan plazmalar olarak da adlandırılmaktadırlar. Elektrotlar arasından çıkarılan post-deşarj plazmaların önemli avantajları vardır. Post-deşarj plazmalarda, elektrotlar arasında var olan yüksek elektrik alan yoktur. Bununla birlikte yüksek enerjili iyonlar da yoktur. Yüksek elektrik alan kullanıcılar için tehlikeler yaratırken, yüksek enerjili iyonlar da uygulamanın yapıldığı yüzeye zarar verebilmektedir. Ek olarak post-deşarj plazmalarıyla daha geniş alanlarda uygulama yapılabilmektedir.

Post-deşarj plazmaları, üretildikleri ortamın basıncına göre düşük basınç post-deşarj plazmaları ve atmosferik basınç post-deşarj plazmaları olarak iki sınıfa ayrılabilirler. Atmosferik basınçta üretilen post deşarj plazmalar genel olarak “plazma jet” olarak adlandırılmaktadır. Atmosferik basınç plazma jetlerin neredeyse elli yılı aşkın bir geçmişi bulunmaktadır. Bu süre boyunca birbirinden farklı tasarımlar ve üretim mekanizmaları

geliştirilmiş olup birbirinden farklı teknolojik ve endüstriyel alanda uygulanmıştır. 1950'lerin sonlarına doğru, daha sonradan plazma torç olarak da adlandırılan atmosferik basınç ark plazma jetler üzerine çalışmalar yapılmış ve bu tip plazma üreteçleri ticari olarak kullanıma sunulmuştur. Bu çalışmaların öncülerinden biri Gabriel Gianinni'dir. Gabriel Gianinni 1957 yılında yüksek sıcaklı plazma üreteçlerinin itki (propulsion) (Giannini, 1957) ve kesme (Gianinni ve Ducati, 1960) amaçlı kullanımına uygun olabileceğini düşünmüştür. Takip eden yıllarda, gaz sıcaklığı 1000 K üzerinde olan termal jetlerin fiziksel özelliklerinin ortaya konması için çalışmalar yapılmıştır (Freeman, 1968; Boffa vd., 1970). 1980'lerin sonlarına doğru, pahalı vakum ekipmanlarından kurtulmak için düşük basınç plazma proseslerinin atmosfer basıncında gerçekleştirilebilmesi için çokça çalışma yapılmıştır. 1988 yılında Kurihara vd., elmas sentezi için klasik plazma kimyasal buhar biriktirme yöntemlerinde (Chemical Vapor Deposition; CVD) alttaşın (substrate) fazlaca ısındığını ve dolayısıyla yüksek oranda grafit ve amorf karbon oluştuğunu açıklamış ve geleneksel plazma CVD yöntemleri yerine, 100-499 Torr basınçta doğru akım uygulayarak plazma jet üreterek elmas sentezi gerçekleştirmişlerdir (Kurihara vd., 1988). Akabinde Lu vd., atmosfer basıncında argon ve hidrojen gaz karışımı kullanarak her biri yaklaşık 12 kW (300-350 A, 40-45 V) güç girişine sahip üç özdeş DC plazma jeti birleştirerek elmas sentezi gerçekleştirmişlerdir (Lu vd., 1991). Düşük basınçtan atmosfer basıncına başarılı bir diğer geçişe örnek uygulama ise 1992 yılında yapılan DC plazma jet ile fulleren sentezidir (Yoshie vd., 1992). Tüm bu çalışmalar incelendiğinde, Akatsuka ve Suzuki'nin (1993) de belirttiği, gibi mühendislik alanında gerçekleştirilen çalışmalarda plazmalar, sahip oldukları karakteristiklerinin kullanımından ziyade çoğunlukla birer ısı kaynağı olarak kullanılmışlardır. Akatsuka ve Suzuki (1993), atmosferik basınç plazma jetlerini düşük basınçta normal kimyasal işlemlerde elde edilemeyecek farklı materyallerin üretimi için bir radikal tür kaynağı olarak kullanımını önermişlerdir. Takip eden yıllarda termal plazma jetler oksit seramik spreyleme, atık bertarafı, optik fiber üretimi için silika çubukların aşındırılması (etching) gibi pek çok alanda kullanılmışlardır.

1990'ların sonlarına doğru, atmosfer basıncında ark oluşmadan nasıl plazma jet üretilbileceği üzerine çalışmalar başlamıştır. Yapılan çalışmalarda pek çok farklı metot denenmiştir. Korona deşarjına benzer sivri elektrotlar kullanmak, en az bir elektrotu bir yalıtkan ile kaplamak, deşarj bölgesinin boyutlarını küçültmek, puls uygulamak ve alternatif

voltaj sinyalleri kullanmak bu metotlara örnek verilebilir (Schütze vd., 1998; Schoenbach vd., 2003; Kolb vd., 2008). Ancak uygulanan her bir farklı metotta, elde edilen plazmanın da karakteristiği değişmiştir. Termal plazma jetler, lokal termal dengededirler. Bir başka deyişle, elektron sıcaklığı ağır türlerin sıcaklıklarına eşittir. Bu nedenle, elektron yoğunlukları 10^{21} m^{-3} mertebesinde ve tamamen iyonlaşma düzeyine çıkabilirler. Bu durumun aksine, literatürde soğuk plazmalar olarak da bilinen termal dengede olmayan plazmalarda ağır türlerin sıcaklıkları 300-1000 K aralığındadır ve elektron yoğunlukları genellikle 10^{19} m^{-3} 'ün altındadır (Tendero vd., 2006). Bu yeni gelişen termal dengede olmayan, diğer bir deyişle soğuk plazma jetlerin üretimi ile ilgili detaylı bir çalışma 2007 yılında Laroussi ve Akan (2007) tarafından yapılmıştır. Düşük gaz sıcaklıklarında atmosfer basıncında çalıştırılan, ancak yine de yüksek plazma kimyasal aktiviteye sahip plazma jetlerinin üretimi, çok sayıda ilginç uygulamayı da beraberinde getirmiştir. Biyolojik olarak tolere edilebilir gaz sıcaklıklarında yüklü parçacıklar, nötr metastabil türler, radikaller ve UV radyasyonu üretme yeteneği atmosferik basınç plazma jetleri, ısıya duyarlı yüzeylerde bakterilerin inaktivasyonu, yara iyileşmesi veya kanser tedavisi gibi biyomedikal uygulamalar ve hassas yüzey işlemleri için önemli hale getirmiştir. Bu uygulamaların yanı sıra, yüzey aktivasyonu, modifikasyonu ve ince filmlerin biriktirilmesi alanında da atmosferik basınç soğuk plazma jetler büyük bir potansiyele sahiptir. Yeni uygulama alanlarının çeşitliliği nedeniyle, atmosferik basınç plazma jetleriyle ilgili araştırmalar son 10-15 yılda büyük ölçüde artmıştır. Winter vd. nin 2015'te yayınladıkları detaylı çalışmada, 2003 ve 2014 yılları arasında yıllık yayın sayısının on kattan fazla artarak yılda 15'ten 211'e çıktığını belirtilmiştir. Plazma jetler ve uygulamaları hakkında genel bilgi vermek için son yıllarda değerli birçok derleme makale yayınlanmıştır (Penkov vd., 2015).

Plazma jetler daha çok elle tutulabilecek boyutlarda ve ince uzun kalem benzeri silindirik tüp şeklinde geometrilerde tasarlanmaktadır. Bunun için cam ya da seramikten mamul borular kullanılmaktadır. Borunun üst kısmından atmosferik basınçta gaz gönderilirken alt kısmından plazma dışarıya çıkmaktadır. Boru içinde veya dışında farklı türde metal elektrotlar kullanılmaktadır. Bununla birlikte yalıtkan borunun üst kısmından farklı gaz akış hızlarında argon, neon, helyum gibi farklı türde gaz ya da gaz karışımları gönderilebilmektedir. Bu nedenle plazma jetler için kullanılan gaz, gaz akış hızı, elektrot tasarımı gibi parametrelere göre farklı üretim tekniklerinden söz edilebilir. Ancak en temel

sınıflandırma kullanılan güç kaynağına göre yapılmaktadır. Kullanılan güç kaynakları, elde edilen plazmanın fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan değiştirebilme özelliğine sahiptir. DC güç kaynağı kullanılarak daha çok sıcak plazma jetler üretilmektedir. DC plazma jetler hem ekonomiktirler hem de kullanım açısından kolaylık sağlarlar ancak bazı dezavantajları bulunmaktadır. Örneğin elektrotlar arasında üretilen plazma türleri, elektrotlarla etkileşim içinde oldukları için plazma içine elektrot materyalleri karışmaktadır. Bu nedenle üretilen plazma, yalnız gönderilen gazın atomlarından oluşmamakta aynı zamanda elektrot materyaline ait atomları da içermektedir. Bu süreçte özellikle katoda ulaşan pozitif yüklü yüksek enerjili iyonlar, katottan ikincil elektron emisyonu ve daha sonra saçırma denilen katottan materyal sökümü meydana getirmektedir. Elektrotlardan sökülen bu materyaller plazma içine karıştığında plazmanın saflığı bozulmaktadır ve özellikle hassas uygulama alanlarında sorun çıkmaktadır. Ayrıca sürekli elektrot kaybına uğrayan plazmada kararlılık sorunu olmaktadır. Bu sorunlardan kurtulmanın en pratik yolu, elektrotları bir yalıtkanla kaplamaktır. Ancak bu durumda plazma içinde yüklü parçacıklar elektrotlara doğru hareket edecek yani elektronlar ve negatif yüklü iyonlar anoda doğru, pozitif iyonlar ise katoda doğru uygulanan DC voltajın elektrik alan etkisi ile hareket edeceklerdir. Elektrotlar bir yalıtkan ile kaplı olduğu zaman bu yüklü parçacıklar katoda ve anoda doğru hareket edip plazma akımını oluşturamayacakları için yalıtkan üzerinde birikmeye başlayacaklardır. Bu durumda, elektrotlar arasında belirli bir süre sonra uygulanan DC voltajın oluşturduğu elektrik alana zıt yönde yeni bir elektrik alan oluşacaktır. Yüklü parçacıkların elektrotlarda birikmesiyle oluşturdukları bu yeni elektrik alan, DC elektrik voltajı tarafından üretilen elektrik alana eşit olduğunda, elektrotlar arasında toplam elektrik alan sıfır olacaktır. Böylece elektrotlar arasındaki yüklü parçacıkları hızlandıracak ve iyonlaştıracak bir elektrik alan olmadığı için plazma sönecektir. Bu nedenle elektrotları yalıtkanla kaplı bir plazma sisteminde kararlı bir plazma üretmek için ya DC voltaj puls olarak uygulanmalıdır ya da voltaj AC olarak kullanılmalıdır. Puls DC güç kaynağı ve kHz, RF ve MHz mertebesindeki frekanslarda AC güç kaynağı kullanılan plazma üreteçlerinde oldukça soğuk plazma jetler elde edilebilmektedir. Laroussi ve Akan (2007)'de farklı türde kullanılan güç kaynaklarına göre üretilen plazma jetleri bir derleme olarak vermiştir. Kısaca özetlemek gerekirse plazma jetler güç kaynaklarına göre aşağıdaki gibi sıralanmaktadırlar:

1. Puls DC Plazma Jetler
2. AC Plazma Jetler
3. RF Plazma Jetler
4. MW Plazma Jetler

Bununla birlikte Lu vd. 2012' de gaz akış hızı ve kullanılan gaz türlerine göre plazma jetleri sınıflandıran bir derleme yapmıştır. Yapılan çalışmada plazma jetler sınıflandırılırken daha çok elektrot tasarımları temel alınmıştır. Bunlardan bazıları Şekil 2.1.'de verilmektedir.



Elektrot tipi	Tasarım
Dielektriksiz Elektrot	
Dielektrik Kaplı Elektrot	
DBD Benzeri	
Tek Elektrot	

Şekil 2.1. Elektrot tasarımlarına göre plazma jet tasarımlarından bazıları (Lu vd., 2012)

Soğuk plazma jetlerin çeşitli endüstriyel alanlarda kullanımının yaygınlaşması ile birlikte, süreç analizi ve kontrolü için elde edilen plazmanın karakteristiklerini tayin edebilmek de önem kazanmıştır. Plazmaların kullanıldığı işlemlerin karmaşıklığı, elektronlar, iyonlar, radikaller ve fotonlar gibi birden fazla ve farklı türün varlığından kaynaklanmaktadır. Plazma parametrelerinin ölçümü ve analizi, plazma uygulanan

medyumdaki değişiklikleri tayin ve sürecin devamında sistem optimizasyonları için oldukça önemlidir. Plazmanın karakterizasyonu, birçok gelişmiş teşhis aracının kullanılmasını içermektedir ve bu alan genellikle "plazma diagnostik" olarak adlandırılmaktadır (Misra vd. 2016).

Plazma parametrelerini belirlemeye giden yolda en sık kullanılan metot, plazma içerisine en basit hali ile bir prob (iletken) konumlandırmaktır. Langmuir prob olarak da bilinen bu iletken materyal, plazma potansiyeline göre belli bir potansiyelle beslenir, bu potansiyele göre elektrik akımı ölçümü yapar ve bir akım-voltaj (I-V) grafiği elde edilir. Elektriksel nötralitesine rağmen plazma da bir iletkendir. Bu nedenle plazma içine yerleştirilen prob, bölgesel olarak plazmayı pertürbe etse de elde edilen akım-voltaj (I-V) grafiğinin karakteristik özellikleri plazma parametreleriyle ilgili bilgiler verir (Güleç, 2011).

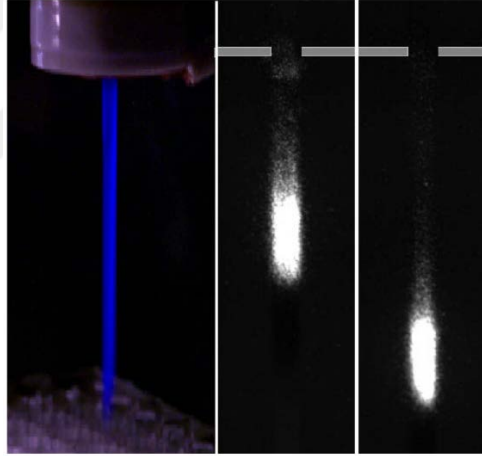
Elde edilen plazmayı pertürbe etmeden, plazma üzerinden alınacak optik emisyon spektrumlarından da benzer parametreleri elde edebilmek mümkündür. Plazma kaynaklarının birçoğu, plazmanın içerdii parçacıklara göre IR ‘den UV bölgesine kadar elektromanyetik radyasyon yayarlar ve optik spektrumları plazma hakkında bilgiler verir. Işık bir enerji formudur ve her bir dalgaboyu veya frekans, belirli bir miktar enerji ile ilişkilidir. Enerji (E) ve frekans (ν) olmak üzere, $E=h\nu$ formülü ile verilmektedir. Çizgisel spektrum, atom, molekül ya da iyonların ayrı enerji düzeyleri arasında elektron geçişleri nedeniyle yayınlanan fotonların sonucudur. Emisyon spektrumundan plazma içindeki elektronlar dışındaki parçacıkların belirlenmesi mümkündür. Bu şekilde hangi reaksiyonların meydana geldiği de tespit edilebilmektedir.

Optik emisyon spektrumundan plazma elektron sıcaklığı ve yoğunluğuna da ulaşılabilir. Boltzmann eğrisi olarak bilinen bu yöntemde, seçilen bazı dalga boylarının görelî şiddet değerlerinden yararlanarak elektron sıcaklığı ve elektron yoğunluğunu belirleyebilmek mümkündür (Mitic vd., 2010). Förster vd. (2005)’de argon akışıyla elde edilen plazmanın elektron sıcaklığını, optik emisyon spektrumundaki argon atomik çizgilerini Boltzmann eğrisinde kullanarak belirlemişlerdir. Bu metotta;

$$\ln\left(\frac{\lambda I}{gA}\right) = C - \frac{E_u}{kT_e} \quad (2.1)$$

ifadesinden hareketle elektron sıcaklığı bulunur. Bu ifadede λ dalgaboyu, I seçilen çizgilerin ışık yoğunluğu, g üst seviyenin istatistik ağırlığı, A geçiş olasılığı, E_u üst seviyenin enerjisi, k Boltzmann sabiti, C bir sabittir.

Farklı elektrot tasarımları, farklı gazlar, farklı gaz akış oranları ve farklı güç kaynakları kullanılarak uzunlukları birkaç milimetreden on santimetreye kadar olan plazma jetler üretebilmek mümkündür. Plazma jetlerinin dinamikleri görsel olarak süreklidir fakat bazı durumlarda yüksek bir hızda hareket eden bir mermiye benzeyen atmalar topluluğu şeklinde yayılmaktadır. Şekil 2.2.'de ile ICCD (Intensified charge-coupled device) kamera yardımıyla puls DC güç kaynağı ile atmosferik basıncında elde edilmiş plazma jete ait bir atmanın iki farklı konumda/zamanda çekilmiş görüntüleri verilmektedir.

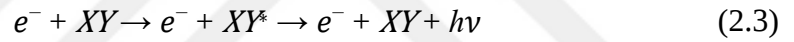
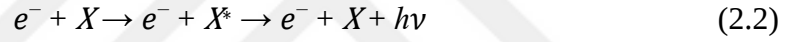


Şekil 2.2. Puls güç kaynağı ile üretilen atmosferik basınç plazma jet ve iki farklı konumdaki plazma atması (siyah-beyaz) (Laroussi vd., 2008)

Plazma jetler, atmosfer ortamında yayılan plazma hacimleridir. Bu nedenle atmosfer ortamında devam eden iyonlaşmanın sebebi elektrotlar arasına uygulanan yüksek voltaj değildir. Ayrıca atmosfer koşullarında herhangi bir dış elektrik alan olmadığından hem yüklü parçacıkların oluşumunda hem de yayılan jetin sürekliliğinde uygulanan yüksek voltajın bir rolü yoktur. Ancak harici bir elektrik alanın var olmadığı atmosfer ortamında plazmanın nasıl çıkarılabildiği, iyonlaşma süreçlerinin nasıl gerçekleştiği ve jetin varlığını nasıl sürdürdüğü soruları güncelliğini korumaktadır. Üretilen plazma jetin elektrotlar arasından

atmosfer ortamına çıkmasının ve açık havada yayılmasının sebebinin, yüklü parçacıklardan kaynaklanan lokal elektrik alanların varlığı nedeniyle elektriksel olarak aktif olması mı yoksa yüksek gaz akış hızı gibi başka herhangi bir parametre mi konusu halen açıklığa kavuşmamış olup araştırmacılar tarafından aktif olarak incelenmektedir.

Literatürde oluşan plazma jetin atmosfer ortamına çıkması ve bu ortamda varlığını sürdürmesi ile ilgili çeşitli teoriler ortaya atılmıştır. Fakat plazma jetin atmosfer ortamında yayılımına dair ortaya atılan fikirler incelenmeden önce jet içerisinde meydana gelen reaksiyonlar irdelenmelidir. Bu reaksiyonlar parçacık türlerinin elektronlarla etkileşimi ve ağır parçacık türlerinin diğer ağır parçacık türleri ile etkileşimi olmak üzere iki ana sınıfta ayrılabilir. Elektronların ağır parçacık türleri ile etkileşimleri uyarılma, iyonlaşma, yeniden birleşme, ayrıştırıcı birleşme, ayrışma, tutunma ve sökölme reaksiyonları şeklinde gerçekleşebilmektedir. Atom ya da moleküller için uyarılma reaksiyonu,



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

Plazma içerisinde yer alan yüksek enerjili elektronlar nötr molekülleri de iyonlaştırabilmektedirler. Elektron ile molekül etkileşimi,



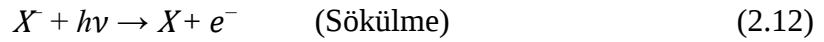
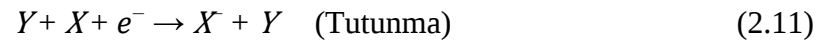
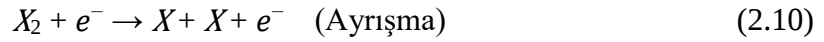
reaksiyonlarıyla gerçekleşebilir. Reaksiyon sonucunda ilgili molekülün pozitif veya negatif iyonları plazma jet ortamına aktarılabilir. Plazma jet içerisindeki plazma yoğunluğu belirli bir oranda olduğunda, iyonlar elektronlar ile birleşebilirler.

Bunun için,



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

Elektronların neden olduğu diğer reaksiyonlar,



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



gibi zıt yüklü atomlar yeni bir molekül oluşturabilmektedir. Öte yandan radikal atomların oluşturduğu



türündeki reaksiyonlarda da iyon çiftlerinin oluşumu söz konusudur.

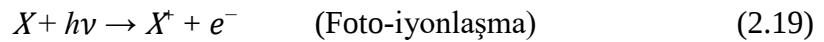
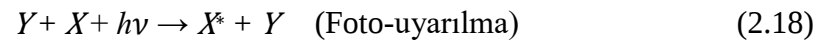
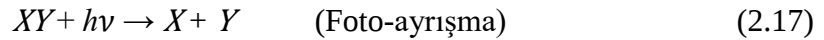
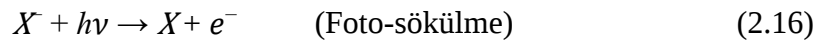
Ağır parçacıkların etkileşim reaksiyonlarında,



eşitliğinde verilen reaksiyon gerek deşarj, gerekse post-deşarj fiziği çalışmalarında önemli bir yere sahiptir. Penning iyonizasyon mekanizması olarak adlandırılan bu iyonlaşma süreci özellikle helyum ve argon gaz karışımlarının çalışıldığı plazma jetlerde uzun ömürlü metastabil atomların durumlarının belirlenmesinde önemlidir (Grill, 1993; İlik, 2017).

Yukarıda özetlenen reaksiyonlar, gaz fazındaki türlerin elektron ve ağır parçacıklarla esnek olmayan çarpışmaları sonucu oluşan homojen reaksiyonlardır. Heterojen reaksiyonlar ise, plazma türlerinin temas ettiği katı bir yüzey ile etkileşimi sonucu meydana gelmektedir. Plazma jetlerin elektrotlardan bağımsız olarak atmosfer koşullarında var oldukları düşünülürse, böyle bir yüzey ile etkileşim söz konusu değildir. Katı bir yüzeyle temas olmadığı için de ikincil elektron emisyonu, termal emisyon ve kinetik emisyon gibi reaksiyonlar gözlenemez ya da bu etkiler neredeyse ihmal edilebilecek seviyededir.

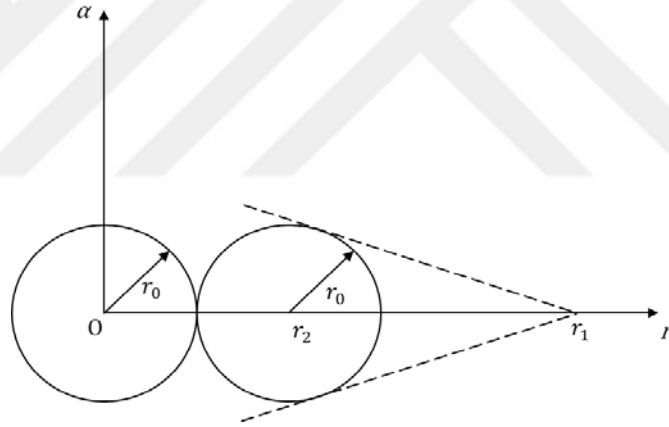
Plazma jetlerde fotonların atom ya da moleküller ile sürekli olarak etkileşimleri de söz konusudur. Bu etkileşimler,



reaksiyonları şeklinde gerçekleşmektedirler. Eşitlik 2.19' da verilen foto-iyonizasyon süreçleri plazma jet üzerinde önemli rol oynamaktadır. Dawson ve Winn (1965), foto-iyonizasyon varsayımına dayalı düşük elektrik alanlı ışık huzmesi (streamer) yayılımı modeli ile bu olayın açıklamasını öne sürmüşlerdir. Bu modelde, katot yönelimli ışık huzmesi başlangıcının yarıçapı r_0 olup bu yarıçapın oluşturduğu bölge, içerisinde pozitif

iyonları içermektedir. Tanımlanmış bölgede plazma ilerledikçe düşük iletkenlikte yaklaşık olarak nötral olan iyonlaşmış kanallar geçilmektedir. Bu varsayımdan yola çıkarak plazmanın oluşturduğu emisyonlardan Lu ve Laroussi (2006), aşağıdaki modeli önermişlerdir:

Buna göre, herhangi bir belirlenen zaman aralığında ışık huzmesi, başlangıcı r_0 yarıçaplı ve n_0 pozitif yüke sahip küçük kürelerden oluşmaktadır. Işık huzmesindeki foton emisyonunda küre merkezinden r_1 uzaklığında tek bir foto-elektronun üretildiği varsayılmıştır. Uzunluk tarafından oluşturulan alanın etkisi altında elektron küreye doğru hızlandırılmakta ve böylece çığ mekanizması başlatılmaktadır. Şekil 2.3' de Lu ve Laroussi'nin (2006) önerdiği ışık huzmesi modelinin şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.3. Işık huzmesi modelinin şematik gösterimi (Lu ve Laroussi, 2006)

Şekil 2.3' de r_2 noktasından r_1 noktasına hareket eden bir kürede, elektronların toplam parçacık sayısı,

$$n = \exp \int_{r_2}^{r_1} \alpha dr \quad (2.20)$$

eşitliği ile hesaplanabilmekte. Buradaki α , Townsend' in birinci iyonizasyon katsayısıdır. Difüzyon yarıçapı ise,

$$r_0 = \left(6 \int_{r_2}^{r_1} \frac{D}{v_d} dr \right)^{1/2} \quad (2.21)$$

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

Dawson ve Winn (1965), düşük elektrik alanın bulunduğu ya da elektrik alanın bulunmadığı alanlar altında ışık huzmesi yayılımının gerçekleşebilmesi için aşağıdaki üç gerekliliğin yerine getirilmesi gerektiğini söylemiştir:

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

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

$$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2.22)$$

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

Bağlanma reaksiyonları O_2 ' nin atmosferik havada plazma yayılımı içerisindeki difüzyonu ile gerçekleşmektedir. Yayılım içerisindeki havanın yüzdesi tam olarak

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

Eşitlik 2.21' den r_0 değeri,

$$D = \frac{2 \times 10^5}{p(Torr)} cm^2/s \quad (2.23)$$

ve

$$\mu_e = \frac{0,86 \times 10^6}{p(Torr)} cm^2/V.s \quad (2.24)$$

eşitlikleriyle hesaplanmış ve Çizelge 2.1' de farklı iyon sayıları için aşağıdaki değerler elde edilmiştir.

Çizelge 2.1. Farklı iyon sayıları için hesaplanan r_2 ve r_0 değerleri

$n^+ (10^9)$	1	2	3	4	5
$r_2 (cm)$	0,02	0,1	0,17	0,23	0,3
$r_0 (cm)$	0.056	0,068	0,075	0,080	0,085

Bu hesaplamada helyum gazı için birinci durumda $2r_0 < r_2$ koşulunun gerçekleştiği görülmektedir. $n^+ = 2 \times 10^9$ olduğunda ise, $2r_0 > r_2$ olduğu görülmektedir. Bu durumda ışık huzmesi başlangıcı kendiliğinden yayılım gerçekleştiremez. Ancak $n^+ \geq 3 \times 10^9$ durumunda $2r_0 < r_2$ olduğundan dış elektrik alanın çok düşük olduğu ya da bulunmadığı durumlarda ışık huzmesi başlangıcı kendiliğinden yayılım gerçekleştirebilir. Böylece Dawson ve Winn (1965) tarafından, plazma bulutunun hızı 10^6 m/s' den daha yüksek değerlere ulaştığında, elektrik alanın olmadığı bölgelerde plazmanın deşarj ortamından birkaç cm çıkarılabildiği belirtilmiştir. Bu durumun deneysel gözlemlerle uyum sağladığı görülmektedir. Işık huzmesi

kanalında yeni gaz hacminin iyonize olması için enerjinin gerektiği açıktır. Bu enerji ayrıca dış bir kaynak tarafından da sağlanabilir. Böylece kendiliğinden yayımlı ışık huzmesi modeli kararlı değil anca yarı-kararlı durumlar oluşturur. Işık huzmesi, kürelerin iyonizasyon süreçlerinde sahip olduğu elektrostatik enerjiyi kaybetmesi sonucu yayılımını sonlandıracaktır (Lu ve Laroussi, 2006).

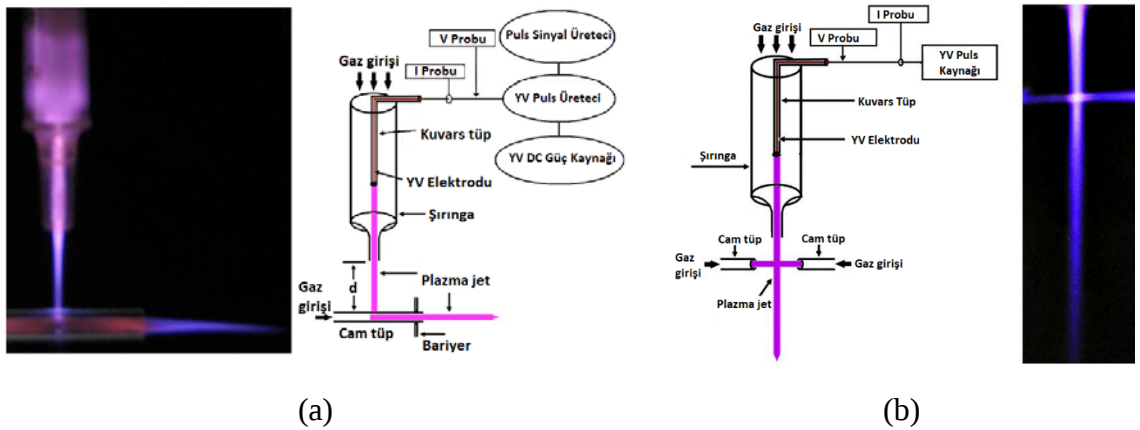
Lu ve Laroussi (2006) plazma jetin atmosfer ortamında yayılımında lokal elektrik alanların da önemli bir rol oynadığını varsaymaktadır. Yapılan çalışmada oluşturulan deney düzeneğinde, aralarında boşluk bulunan iki paralel elektrot bulunmaktadır. Sistemde solda üzerinde gaz girişinin sağlandığı, her birinin çapı yaklaşık 1 mm olan birden fazla delikler bulunan bir bakır disk elektrot yer almaktadır. Bakır disk herhangi bir dielektrik malzeme ile kaplanmamıştır. Bakır diskin karşına, yani sistemin sağ tarafında ise alümina ile kaplı bir alüminyum levha elektrot yerleştirilmiştir. Yürütülen çalışmalarda He (%95) ve N₂ (%5) gaz karışımı kullanılmış olup uygulanan voltaj, puls tekrar süresi, puls genişliği ve deşarj boşluğu sırasıyla $V_a = 6$ kV, $f = 2$ kHz, $t_{pw} = 500$ ns ve $d_{gap} = 5$ mm dir.

Deşarj boşluğundaki voltaj V_{gap} maksimum değere ulaştığında deşarj akımı sıfırdır. Bu anda deşarj boşluğunda zayıf bir emisyon gözlemlenmiştir. Deşarj akımı olmadığı için gözlenen emisyon bir önceki pulsdan kalan uyarılmış türlerden yayınlanmaktadır. 5 ns sonra deşarj akımı I_{dis} hızla artar ve deşarj boşluğu aydınlanır. Bu noktada plazma emisyonu en yüksek yoğunluğa ulaşmaktadır. Ardından deşarj akımı düştüğünde emisyon yoğunluğunun da azaldığı görülmektedir. 70 ns sonra akım neredeyse sıfıra ulaştığında plazma emisyonu oldukça zayıflamaktadır. Deşarj akımının sıfır olduğu anlarda elektrotlara yakın bölgeler hariç emisyon yoğunluğu azalmaktadır. Deşarj boşluğundaki voltaj negatif pik değerine ulaştığında da henüz deşarj akımı oluşmamıştır. Bu noktada elektrotlar civarı hariç emisyon oldukça zayıftır. Emisyon yoğunluğu 5 ns sonra akım artmaya başlar. Bununla birlikte solda bulunan bakır elektrottan sağda bulunan alümina kaplı levhaya doğru yayılım da başlar. Burada önemli olan, boşluk boyunca voltaj pulsu tersine olmasıdır (negatif puls). Yani soldaki bakır elektrot anottur. Deşarj akımı arttıkça plazma emisyonu soldan sağa doğru artmakta ve genişlemektedir. Sağdaki elektrottaki yoğunlukta herhangi bir değişim gözlenmemiştir. Deşarj akımı maksimum değerine ulaştığında, emisyon yoğunluğu da maksimum değerine ulaşmaktadır. Bu sefer boşluğun sol tarafı en güçlü emisyonu sağlar.

Ancak burada belirtilmesi gerekir ki, güçlü emisyon bölgesi ile sağ elektrot arasında karanlık bir alan bulunmaktadır. Akım azalmaya başlamasıyla birlikte emisyon da azalmaya başlar ve akım sıfıra ulaştığında boşluktaki emisyon yoğunluğu da zayıflar.

Deşarj her yeniden başladığında, deşarj boşluğunun büyük bölümünde önceki deşarjdan kalan ve katot bölgesine yakın olan elektronlar anoda doğru hareket etmeye başlar. Bu işlem sırasında elektronlar, molekülleri ve atomları uyarır, iyonlaştırır ve ayırır. Bu elektronlar önce anoda ulaşır. Bu anda deşarj kendi kendini sürdürebilen (self-sustained) moddadır. Ancak katot bölgesinden çıkan elektronlar anoda ulaştığında, dielektriğin yüzeyinde yeterli yük birikmiş olur, bu da gaz boşluğu boyunca voltajın ateşleme eşiğinin altına düşmesine ve deşarjın sönmesine neden olur (Lu ve Laroussi, 2006).

Yapılan bir başka çalışma da plazma jetin atmosfer ortamında yayılımında, plazma içerisindeki yüklü parçacıkların oluşturduğu lokal elektrik alanların kritik rol oynayabileceği fikrini desteklemektedir (a. Lu vd., 2009). Yapılan çalışmada, dikey bir plazma üreticiden çıkan birincil plazma jet ile bu jete yatay konumlandırılmış, herhangi bir elektriksel bağlantısı olmayan, yalnızca gaz için bir hat oluşturan cam bir tüpün ucunda ikincil bir plazma jet elde etmişlerdir (Şekil 2.4.(a)).



Şekil 2.4. Birincil plazmanın oluşturduğu ikincil plazma görseli ve deney düzenekleri a) gaz bir tüp içerisinde (a. Lu vd., 2009) b) gaz açık havada (b. Lu vd., 2009)

Araştırmada vurgulanan, birincil plazma jetin herhangi bir noktasına herhangi bir zarar görmeden insan elinin temas edebileceğidir. Bunun sebebi olarak da birincil jet boyunca voltajın muhtemelen çok düşük olması gösterilmektedir. Bu nedenle uygulanan voltaj ikincil jeti ateşleyememektedir ancak birincil jetteki foton emisyonu ve cam tüp yüzeyinde biriken yüklü parçacıkların oluşturdukları lokal elektrik alan ikincil plazmayı oluşturabilmektedir. Cam tüp bir alümina veya kuvars tüp ile değiştirilse bile herhangi bir fark olmaksızın ikincil jet elde edilebilmektedir. Bu nedenle birincil jet tarafından yayılan fotonların ikincil jet oluşumunda doğrudan bir rolü bulunmamaktadır. Diğer bir olası neden ise cam tüp yüzeyinde biriken yüklü parçacıkların oluşturdukları lokal elektrik alanıdır. Yüklerin cam tüp yüzeyi üzerinde sonsuz küçük genişlikte bir halka üzerinde eşit şekilde dağıldığı varsayılırsa, cam tüp üzerindeki elektrik alan hesaplanabilir. Cam tüp içerisindeki maksimum elektrik alan 20 kV/cm'den fazladır ki bu helyumun atmosfer basıncındaki kırılım (breakdown) voltajından yüksek bir değerdir. Dolayısıyla cam tüp üzerinde biriken yükler gerçekten de bir plazma oluşturabilirler (Lu vd., 2009).

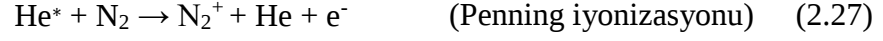
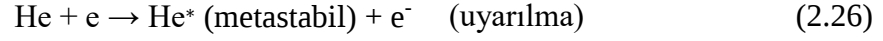
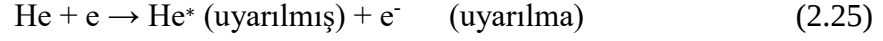
Lu vd.nin (2009) yaptığı bir başka çalışmada da yine dikey olarak konumlandırılmış kuvars bir tüp içerisine tek bir elektrot yerleştirilerek bir plazma üretici elde edilmiştir (Şekil 2.4. (b)) Plazma üreticine dik olarak elektriksel hiçbir bağlantısı olmayan iki gaz taşıyıcı cam tüp karşılıklı olarak yerleştirilmiştir. Gerçekleştirilen çalışmada yine dikey/birincil plazma jet vasıtası ile yatayda ikincil bir plazma jet elde edilmiştir. Birincil plazma jete, herhangi bir elektriksel şok hissetmeden çıplak elle temas edilebildiğinden, ikincil plazmanın uygulanan voltaj kaynaklı dış bir elektrik alan ile oluşamayacağı ve oluşan ikincil plazmanın yüksek ihtimalle, birincil plazma jetteki yüklü parçacıklar tarafından üretildiği vurgulanmaktadır. Her iki çalışma da göz önüne alınarak ikincil plazma oluşma mekanizması incelendiğinde, atmosferik basınç plazma jetin yayılımının yüklü parçacıkların oluşturdukları lokal elektrik alanların etkisi ile gerçekleştiği söylenebilir. Bunun yanı sıra, plazma atmalarının geride bıraktıkları görece düşük fakat göz ardı edilmeyecek iletkenlikteki karanlık iz (dark track) sebebiyle uygulanan voltaj kaynaklı dış elektrik alan da oluşan lokal elektrik alana eklenir ve plazma atmasının yayılımına destek olur (b. Lu vd., 2009).

Literatürde yer alan bir başka çalışmada, plazma jet atmosfer ortamında yayıldığında, penning iyonizasyonunun yayılma dinamiklerini etkilediğini gözlemlenmiştir (Li vd., 2010). Helyum, neon ve kripton gazları ile yapılan çalışmada, kullanılan gazlara ait deşarj paternlerini incelenmiştir. Deneylerde helyum ve neon deşarj paternlerinin birbirine benzerlik göstermesine rağmen kripton gazına ait paternin diğerlerinden farklı olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi olarak da kriptonun metastabil durumlarının (9.9 eV, 10.6 eV) azot ile doğrudan penning iyonizasyonunu devam ettiremediği ve kripton ile elde edilen plazma jete ait reaksiyonlarda temel rolü doğrudan çarpışmalar ile oluşan iyonlaşmaların oynadığı öne sürülmüştür.

Yapılan bir diğer çalışmada ise helyum mol kesiri ve plazmanın havada yayılması arasındaki ilişki incelenmiştir (Karakaş vd., 2010). Buna göre hava moleküllerinin helyum atomlarına oranı belirli bir değerin üzerinde ise plazma yayılımı gerçekleşmektedir. İyonlaşma ve bağlanma süreçleri, plazma atmalarının oluşumunda dominant süreçlerdir. Plazma atmaları havada ilerlediği için, oksijen molekülleri tarafından elektron bağlanması çok önemlidir. Towsend birinci iyonizasyon katsayısı α , bağlanma katsayısı β 'dan büyük olmalıdır. Dolayısıyla foto-iyonizasyon ile oluşan elektron çıkış (avalanç) plazma atmalarının oluşumunda ve yayılmasında kilit rol oynamaktadır.

Bu iyonlaşma sürecini devam ettirebilmek için, enerjinin yanı sıra gaz taşıyıcı hacim sürekli olarak helyum ile beslenmelidir. Ana uyarılmış türler atmosfer ortamında çalışılmasından dolayı N_2^+ ve N_2 olsa da helyum atomları plazma jet içerisinde birçok temel kimyasal reaksiyonun oluşumunda etkilidir. Helyum atomik çizgileri spektrumunda 501.6 nm ($3^1P \rightarrow 2^1S$), 587.6 nm ($3^3D \rightarrow 2^3P$), 667.8 nm ($3^1D \rightarrow 2^1P$), 706.5 nm ($3^3S \rightarrow 2^3P$) ve 728.1 nm ($3^1S \rightarrow 2^1P$)'de gözlenmektedir. Bir helyum atomunun 2^1S (singlet) ve 2^3S (triplet) olmak üzere iki adet metastabil seviyesi bulunmaktadır. Karakaş vd.nin (2010) yaptığı çalışmada oluşan plazma jette, $3^1P \rightarrow 2^1S$ at 501.6 nm elektronları helyum atomunun tekli metastabil (yarı kararlı) seviyesine yerleştiren önemli bir geçiş olduğu belirtilmiştir.

Metastabil helyum özellikle vurgulanmalıdır çünkü son dönemde yapılan çalışmalar, plazma atmalarının yayılımının büyük ölçüde helyum metastabil türlerinin penning iyonizasyonu vasıtasıyla oluştuğunu göstermektedir:



Bu prosese göre, elektron çığının arka plan (background) helyum gazı ile çarpışması sonucu, uyarılmış ve metastabil helyum atomları oluşturmaktadır. Bunun bir sonucu olarak da helyum metastabilleri havadaki N_2 moleküllerini uyararak penning iyonizasyonu ile N_2^* ve N_2^+ türlerini oluşturmaktadır. Bu bağlamda, helyum mol kesiri plazma atmalarının yayılımında önemli bir parametre haline gelmektedir. Başka bir deyişle yukarıdaki reaksiyonların devamlılığı için helyuma ihtiyaç duyulmaktadır.

Çalışmada elde edilen bir diğer önemli sonuç ise, plazma atmalarının yalnızca helyum mol kesirinin belirli bir limitten fazla olduğu durumda oluşmalarıdır. Bu da açıkça gösteriyor ki plazma atmaları ancak helyum mol kesiri yeterince yüksek ise reaksiyonlar sürdürülebilmekte ve atmalar yayılabilmektedir.

Literatürde yer alan bir diğer argüman ise plazma atmalarının, yüksek hızda hareket eden iyonlaşmış dalgalar olduğu yönündedir. İğne geometrisinde bir elektrotun yarattığı uniform olmayan bir elektrik alan varlığında gaz kırılımının (breakdown) özel bir formu oluşmaktadır. Ardından ince bir ışık huzmesi (streamer) şeklinde iyonlaşma dalgası yayılmaya başlar. Atmosferik basınçta rekombinasyon oranı oldukça yüksek olduğundan, reaktif türlerin plazma kaynağından/üreticinden birkaç santimetreden fazla ileri taşınması çok zordur. Uyarılmanın, gaz kanalı/tüpü boyunda bir iyonlaşma dalgasına bağlı olması ve kaynağın içindeki kilohertz uyarım ile tetiklenmesi durumu daha olasıdır. Bu uyarılma, kaynak gazın bu gaz kanalı boyunca yerel olarak ayrılmasına neden olabilir. Bu nedenle plazma atmasının iyonizasyon dalgası tarafından üretildiğini söylemek mümkündür (Karakaş vd., 2010).

Farklı reaktör geometrileri ve elektriksel uyarı türlerinde bir soğuk plazma jeti, gaz hızına kıyasla çok yüksek hızda yayılan bir atma dizisinden oluşmakta ve ilk deşarjdan hemen sonra bir plazma atması yayılmaya başlamaktadır (Jarrige vd., 2010). Jarrige vd.nin (2010) yaptıkları çalışmada ICCD kamera resimleri, bu iyonizasyon dalgasının önce tüp

reaktörde ve ardından atmosferik ortamda yayıldığını göstermektedir. Plazma atmalarının havada yayılırken arkasında ince ve zayıf ışıklı bir kanal/kuyruk bıraktığını belirtmek gerekir. Deşarj tüpünde böyle bir olay gözlemlenmemektedir. Bu nedenle bu yayımlanan türlerin havanın kimyasıyla ilişkili olabileceği düşünülmektedir. Pulsun sonunda, reaktörde ikinci deşarjdan kaynaklanan ışık emisyonu görülebilir, fakat bu emisyon ile ikinci bir plazma atması üretilmez. Buna karşılık, yayılan atma ikinci deşarjdan sonra sönmektedir.

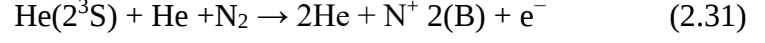
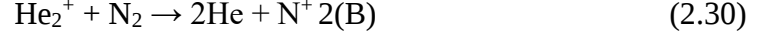
DBD reaktöründeki elektriksel deşarj, elektrotların yakınındaki dielektrik yüzeyde biriken ve yayılan yüklü türler üretmektedir. Plazma atmasının oluşumunun ve tüp içinde yayılmasının bu yüzey yükleriyle ilgili olduğuna inanılmaktadır. Elektronların ve iyonların üretimi, tüm deşarj piki boyunca, yani birkaç yüz nanosaniye boyunca etkilidir. Katoda yakın dielektrik yüzey üzerinde yeterli miktarda pozitif iyon biriktiğinde, üretilen elektrik alanı, bu pozitif uzay yükünün yakınında helyumun iyonlaşmasını ve daha sonra bir yüzey deşarjına benzer şekilde tüp boyunca bir iyonlaştırıcı dalganın yayılmasını sağlamaktadır (Gibalov ve Pietsch, 2000).

Bu iyonlaşma cephesi hava ile temas ettiğinde farklı bir yayılma mekanizması meydana gelmektedir. Azot ve oksijen molekülleri helyum kanalına girerek plazma kinetiğinin modifikasyonuna yol açmaktadır. Öte yandan, çalışmada plazma atmalarının içi boş yapıya sahip olduğu gösterilmiştir.

Bu bölgede, plazma atması, yüksek bir elektrik alanı oluşturan pozitif bir uzay yükü ve dalganın önünde yeni elektronlar oluşturan foto-iyonizasyon mekanizmaları ile pozitif bir ışık huzmesi (streamer) şeklinde davranıyor gibi görünmektedir. Helyum iyonizasyonu ve uyarılmasına ek olarak, elektron çığları sırasında elektron-parçacık çarpışmaları, azot ve oksijen moleküler iyonlarının ve uyarılmış türlerin, özellikle $N_2^+(B)$ ve $N_2(C)$ ışıma durumlarının oluşumuna yol açmaktadır:



Ricard vd.ne (1999) göre, diğer iki uyarma süreci (yani yük transferi ve Penning etkisi), hava-helyum deşarjlarında $N_2^+(B)$ üretimi için özellikle önemlidir:



He_2^+ , üç cisim reaksiyonu ile He^+ iyonundan hızla üretilir:



$N_2(C)$, helyum ile uyarılmış durumların (özellikle yarı kararlı) sönmesi, elektron etkisi ve havuz (pooling) reaksiyonları dâhil olmak üzere çok sayıda mekanizma tarafından üretilebilir.

Plazma atması oluşumunda dielektrik üzerinde biriken yüklerin varlığı, uygulanan voltajın atma özellikleri üzerindeki etkisini açıklayabilir. Uygulanan elektrik alan, deşarj özellikleri üzerinde önemli bir rol oynar. Aslında, elektrotlar arasındaki azaltılmış elektrik alanı E/N, deşarjdaki elektron enerji dağıtım fonksiyonunu (EEDF) ve dolayısıyla helyum iyonizasyon kesitini (özellikle yüksek enerjili elektronlar için) belirler. Uygulanan voltajın artmasıyla, deşarj akımı ve gazda biriken enerji artar ve dielektrik çevresinde daha yüksek yoğunlukta yüklü türler elde edilir. Bu da daha yüksek elektrik alanına sahip bir iyonizasyon dalgasının oluşumuna yol açar.

Deneysel sonuçlar, reaktörde uygulanan elektrik alanının, uzay yükü ile indüklenen elektrik alanının değerini etkilediğini göstermektedir. Birincisi, yayılma hızı, gazın iyonlaşma hızları ve dalganın önündeki elektron sürüklenme hızı ile ilgilidir. Daha sonra, plazma atmalarının hızının yüksek voltaj genliğine bağımlılığı, daha enerjik elektronların üretimini kanıtladığı gibi, uzay yükünün neden olduğu elektrik alanındaki bir değişiklik ile de açıklanabilir. İkincisi, tüm ışıma türlerinin yoğunlukları uygulanan gerilimlerle artar. $N_2^+(B)$ ve $He(3^3S)$ yoğunluğundaki değişiklik, plazma jette daha yüksek enerjili ve yoğun elektronların üretilmesinden kaynaklanıyor olabilir. Daha yüksek yoğunlukta He metastabillerinin üretimi, $N_2^+(B)$ üretiminin artmasıyla da sonuçlanır. $N_2(C)$ dönme ve

titreşim sıcaklıkları uygulanan voltajdan etkilenmez. Bu nedenle elektron etkisiyle üretiminin ihmal edilebilir olduğunu ve diğer üretim yollarının (uyarılmış He atomları ile reaksiyonlar, pooling etkileri) muhtemelen baskın olduğunu gösterir (Jarrige vd., 2010).

Literatür araştırması genel bir çerçeveden değerlendirildiğinde atmosfer ortamında hareket eden plazma jetin karakteri ve bu ortamda varlığını sürdürmesi konusunda pek çok modelin ortaya konduğu görülmüştür. Bunlardan bazıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Foto-iyonizasyon
- Plazma içindeki yüklü parçacıkların oluşturdukları lokal elektrik alanlar
- Penning iyonlaşması
- He mol kesiri
- İyonizasyon dalgaları

Tez çalışması kapsamında üretilen plazma üretici, deşarj rektörü ve elektrot tasarımı bakımından incelendiğinde literatürde yer alan puls DC plazma kalem ile oldukça benzerdir. Puls DC plazma kalem ile üretilen plazma jetin karakteristiği ve atmosfer basıncında yayılma mekanizması üzerine birçok araştırma yapılmıştır. Bu çalışmalarda gözle görünen sürekli yapıya sahip plazma jetin içyapısı aslında kesikli atmalardan oluşmaktadır. Mevcut modeller de bu atmaların karakteri ve davranışı üzerine geliştirilmiştir. Plazma kalem puls DC güç kaynağı ile çalışmaktadır. Cihazın ürettiği plazma jetin tüm karakteristikleri bu güç kaynağı ile ilişkilidir. Yaratılan elektrik alanın yapısının değişmesi durumunda plazma kalemin ürettiği jetin yapısının ve atmosfer koşullarında yayılım mekanizmasının değişip değişmeyeceği konusu üzerinde herhangi bir çalışma mevcut değildir. Bu tez çalışması kapsamında, güç kaynağının değişmesi durumunda, literatürde yer alan puls DC plazma kalem ile hemen hemen aynı tasarımsal özelliklere sahip bir plazma üreticinin ürettiği jetin karakteristiklerinin ne yönde değiştiği konusu araştırılmıştır. Böylece elektrik alan yapısının değişmesinin, tüm şartlar aynı olsa dahi jetin karakteristiklerini nasıl tamamen değiştirdiği bilgileri literatüre kazandırılmıştır.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde, kilohertz plazma kalem tasarımı ve üretimi için ihtiyaç duyulan temel malzemeler ve tez kapsamındaki plazma kalem üretim süreci açıklanacak, atmosfer basıncında plazma üretmek için kullanılan güç kaynağının, elde edilen plazmanın optik karakteristiklerinin belirlenmesi için kullanılan optik emisyon spektrometresinin (OES) ve plazmanın sıcaklık ve elektriksel analizleri için kullanılan cihazların özellikleri verilecektir.

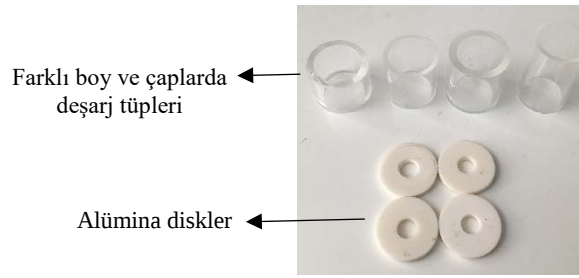
3.1. Kilohertz Plazma Kalem Tasarımı

Çizelge 3.1.'de kilohertz plazma kalemin üretiminde kullanılan sarf malzeme ve cihazlar yer almaktadır.

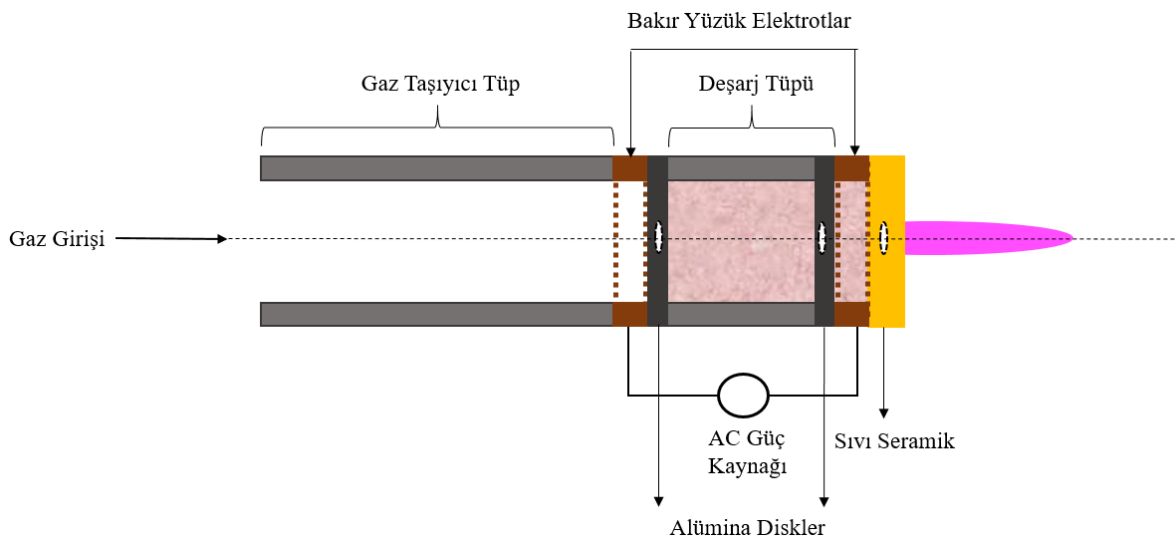
Çizelge 3.1. Kilohertz plazma kalem üretiminde kullanılan malzemeler ve cihazlar

Sarf Malzeme/Cihaz	Görevi
Alümina disk	Elektrotların yalıtımı
Deşarj tüpü/odası	Plazmanın oluştuğu alan
Gaz taşıyıcı tüp	Gaz tüpünden deşarj tüpüne kadar gazın taşındığı alan
Sıvı seramik	Sisteme ait parçaların birbirine yapıştırılması ve çıkış ağzında bulunun elektrotun yalıtımı
AC Güç kaynağı	Yüksek voltajın uygulanması
Akış ölçer	Sisteme beslenen gaz akış hızının belirlenmesi

Tez kapsamında tasarlanan atmosferik basınç kilohertz plazma kalemi oluşturan parçalar Şekil 3.1.'de verilmiştir. Şekil 3.2.'de ise sisteminin şematik tasarımı görülmektedir.



Şekil 3.1. Kiloherertz plazma kalem sisteminin üretim aşamasında kullanılan parçalar

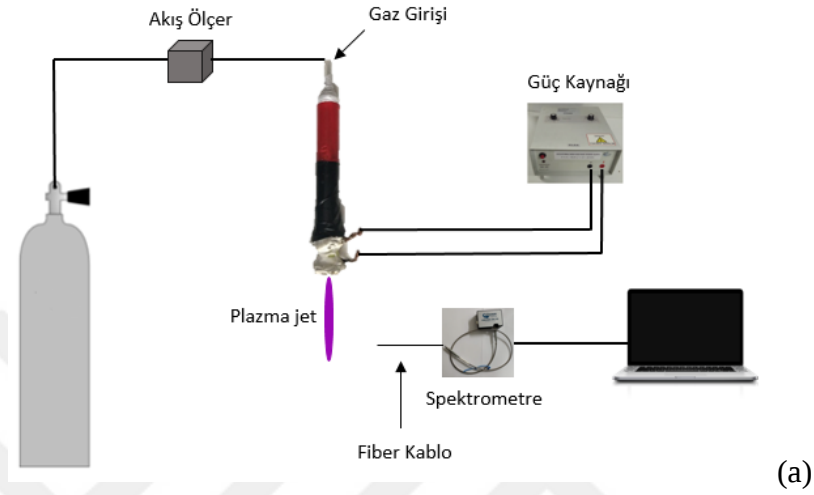


Şekil 3.2. Kiloherertz plazma kalem sisteminin şematik çizimi

Sistem iki dielektrik tüpün birleşiminden oluşmaktadır. Bunlardan biri gaz taşıyıcı tüp olup üst kısmından deşarj tüpü ile birleştirilmiştir. Sistemde gaz taşıyıcı tüp ile deşarj tüpü arasında bir bakır yüzük elektrot ve et kalınlığı 2,5 mm olan bir alümina disk bulunmaktadır. Alümina diskin dış çapı 18 mm, iç çapı ise 1-5 mm' dir. Alümina disk ile deşarj tüpü eşmerkezlidir. Deşarj tüpünün diğer ucuna bir diğer bakır elektrot sıvı seramik ile yapıştırılmıştır. Elektrotlar birbirinden 12,5 mm uzaklıkta bulunacak şekilde yerleştirilmişlerdir. Deneyler sırasında farklı çaplarda sistem üretilmiştir.

Gaz tüpü ile kiloherertz plazma kalem arasında bir akış ölçer bulunmaktadır. Akış ölçer ile sisteme beslenecek gazın miktarı kontrol edilmektedir. Tez kapsamında oluşturulan

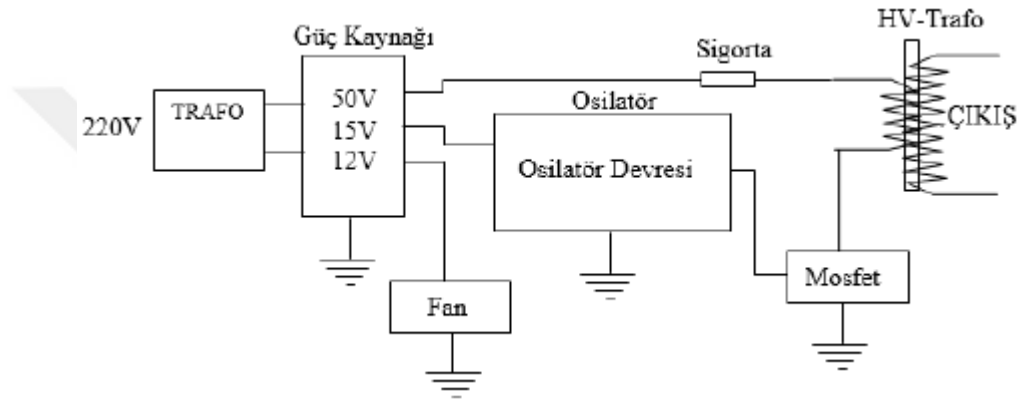
deney düzeneğinin şeması Şekil 3.3. (a)'da, laboratuvar ortamında kurulmuş halinin görseli ise Şekil 3.3. (b)'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Kiloherertz plazma kalem düzeneği a) şematik gösterim b) laboratuvar ortamında kurulmuş hali

3.2. Alternatif Akım Güç Kaynağı

Şekil 3.4.'de tez çalışmasında atmosfer basıncında kilohertz plazma kalemi çalıştırmak için kullanılan, yüksek frekans ve yüksek voltaj üretebilen ayarlanabilir alternatif akım güç kaynağının tasarımı ve Çizelge 3.2.'de bu güç kaynağının teknik özellikleri verilmektedir.

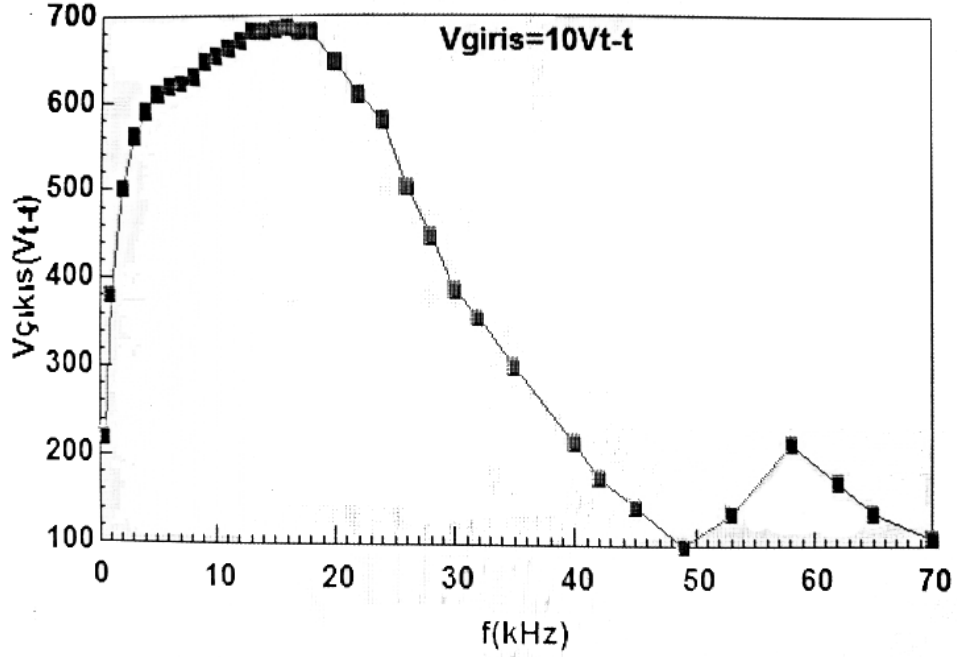


Şekil 3.4. AC güç kaynağının şematik gösterimi

Çizelge 3.2. AC güç kaynağının teknik özellikleri

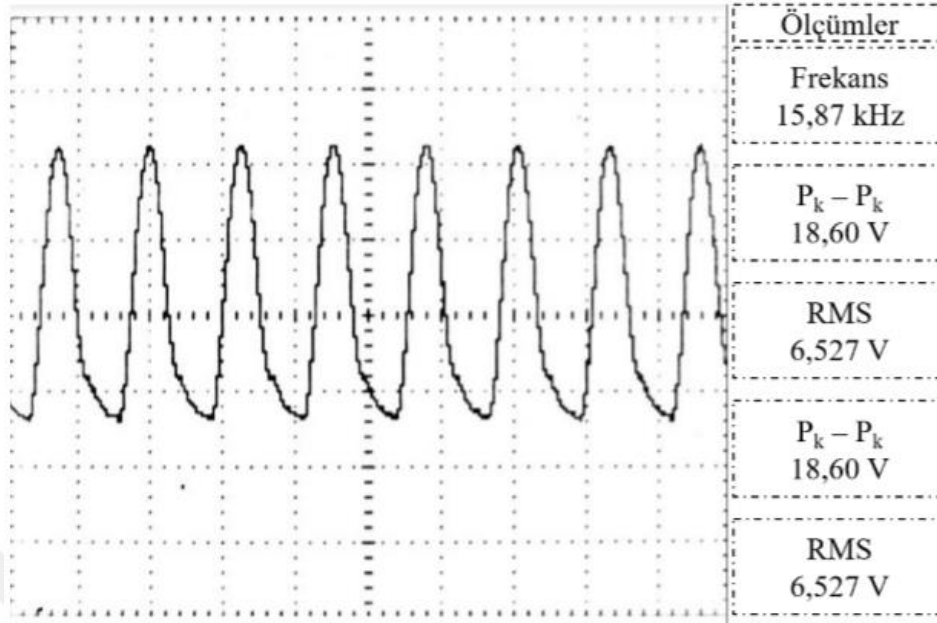
Özellik	Değer
İşletme Gerilimi	1 faz 1 nötr, 220 V-240 V
Trafo Gücü	80 W
İşletme Frekansı	50 Hz
Gecikme Zamanı	10 ms
Ortam Sıcaklığı	-5 °C-50 °C
Çıkış Frekansı	13-20 kHz
Çıkış Gerilimi	6-18 kV (t-t)
Koruma Sınıfı	IP 20
Boyutlar	280x220x100 m ³

220 V alternatif akım ile beslenen, -5 ila 50 °C ortam sıcaklığında çalışabilen güç kaynağı, gücü 80 W olan bir trafoya iletilmektedir. Yüksek voltajın üretimi sırasında soğutucu fan ile birlikte güç kaynağının yüksek akım çekmesini önleyebilmek için 1 A akım değerine sahip sigorta direnci kullanılmaktadır. Bu güç kaynağı ile 13 - 20 kHz çıkış frekansı ve 6 - 18 kV çıkış gerilimi elde edilebilmektedir. Güç kaynağı alternatif akımı yükselten bir trafo içermekte olup, $280 \times 220 \times 100$ mm ebatlarına sahiptir. Şekil 3.5.' deki grafikte trafo çıkış voltajının frekansa bağlı değişimleri ve Şekil 3.6.'da alternatif akım güç kaynağının osiloskop çıktısı verilmektedir. Şekil 3.7.' de ise söz konusu güç kaynağının fotoğrafları yer almaktadır.



Şekil 3.5. Trafo voltaj-frekans ölçümleri

Şekil 3.5.' ten görüldüğü gibi 15-20 kHz frekanslarda güç kaynağı maksimum çıkış voltalarını üretmektedir. Bu nedenle deneylerde 18 kHz frekansta çalışma seçilmiştir. Güç kaynaklarının optimum değerlerinde alınan çıkış gerilimi yüksek voltaj probu ile ölçülmüş olup, ölçüm sonuçları Şekil 3.6.'da verilmektedir.



Şekil 3.6. Alternatif akım güç kaynağına ait osiloskop çıktısı



Şekil 3.7. Çalışmalarda kullanılan AC güç kaynağı

3.3. Yüksek Voltaj Probu ve Akım Probu

Voltaj ölçümleri için FLUKE marka multimetreye bağlı PINTEK marka yüksek voltaj probu kullanılmıştır. Şekil 3.8.'de kullanılan voltaj probunun görseli ve Çizelge 3.3.'de bu voltaj probunun teknik özellikleri yer almaktadır.



Şekil 3.8. Yüksek voltaj probu

Çizelge 3.3. Yüksek voltaj probunun teknik özellikleri

Özellik	Değer
Giriş direnci	Yaklaşık 1000 M Ω
Max. Operasyon voltajı	DC: 0~40 KV AC: 1~28 KV (50/60 Hz)
Polarite	Pozitif/Negatif
Hassasiyet	DC: $\pm 1\%$ 20KV, $\pm 2\%$ 40 KV AC: $\pm -5\%$ -10% (1~28 KV; 50/60 Hz)
Sıcaklık katsayısı	≤ 200 PPM/ $^{\circ}\text{C}$
Maksimum yük akımı	≤ 40 μA (40 KV DC)
Maksimum yük gücü	≤ 1.6 Watt
Çalışma sıcaklığı	0 ~ +50 $^{\circ}\text{C}$
Depolama sıcaklığı	-20 ~ +70 $^{\circ}\text{C}$
Toprak kablo uzunluğu	90 cm (3.3 ft)
Çıkış kablo uzunluğu	100 cm (3.3 ft)
Kullanım	DMM (Dijital multi metre)
Çıkış bölüşümü	1V/1KV
Boyutlar	340 mm x 80 ϕ
Ağırlık	Yaklaşık 300 g

Akım ölçümleri için CEM FC33 miliamper ölçer pensampermetre kullanılmıştır. Şekil 3.9.'da pensampermetrenin görseli ve Çizelge 3.4.'te bu ampermetrenin teknik özellikleri yer almaktadır.



Şekil 3.9. Akım ölçümlerinde kullanılan pensampermetre

Çizelge 3.4. Pensampermetrenin teknik özellikleri

Fonksiyon	Aralık	Çözülüm	Okuma Doğruluğu (%)
DC Akım	2 A	1 mA	+ (2.8% + 10 hane)
	80 A	100 mA	+ (3.0% + 8 hane)
AC Akım (50/60 Hz)	2 A	1 mA	+ (3.0% + 10 hane)
	80 A	100 mA	+ (3.0% + 8 hane)
Non-kontakt AC Voltaj	100 V AC - 600 V AC 50/60 Hz		

3.4. Osiloskop

Kilohertz plazma kalemin elektriksel ölçümleri için 300 volta kadar giriş voltajını kaldırabilen iki kanallı 40 MHz Goldstar OS-9040D osiloskop kullanılmıştır. OS 9040D, 2 MHz bant genişliğine ve 30 kiloohm'a kadar giriş empedansına sahip bir Z eksen girişine sahiptir.



Şekil 3.10. Elektriksel ölçümlerde kullanılan osiloskop

3.5. Akış Ölçer

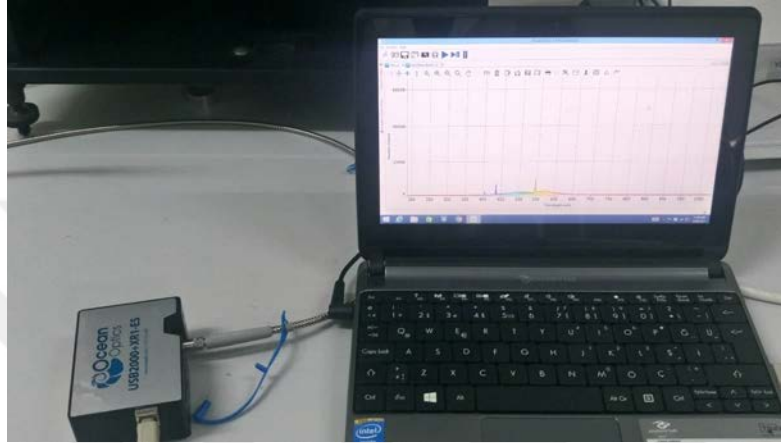
Deney düzeneğinde kullanılan akış ölçer mekanik akış ölçer olup deney düzeneğine dikey olarak bağlanmaktadır. Plazma kaleme gönderilen gaz debisini belirlemek ve ayar yapmak amacıyla kullanılmaktadır. Ayarlanabilir hassas vana ile akış ayarı yapılabilir. Şekil 3.11.'de tez kapsamında kullanılan akış ölçere ait görsel verilmektedir.



Şekil 3.11. Gaz akış ölçer

3.6. Optik Emisyon Spektrometresi

Şekil 3.12.'de tez çalışmasında kullanılan optik emisyon spektrometresinin bilgisayara bağlantısının yapıldığı fotoğraf verilmektedir.



Şekil 3.12. Optik emisyon spektrometresi ve çalışma bilgisayarına yüklenmiş yazılımı

Çizelge 3.5.'de çalışmalarda kullanılan optik emisyon spektrometresinin teknik özellikleri yer almaktadır.

Çizelge 3.5. Optik emisyon spektrometresinin teknik özellikleri

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

Deneysel çalışmalarda kullanılan Ocean Optics marka USB 2000+ model spektrometrenin optik çözünürlüğü 2,1 nm' dir. Spektrometre, aynı marka fiber kablo aracılığı ile bir bilgisayara bağlanmaktadır ve emisyon değişimlerini milisaniye ve saniye mertebelerinde bilgisayar ekranında gösterebilmektedir. Fiber kablo, ölçüm alınacak bölgeye güvenli ve yeterli bir mesafede sabit tutularak ölçümler yapılmıştır. Fiber kablonun, ölçüm alınacak bölge üzerindeki elektromanyetik spektrumun 200 - 1100 nm dalgaboyu aralığındaki ışınları toplayarak elde ettiği veriler, OceanView isimli yazılım yardımıyla analiz edilmiştir. Ek olarak, ışın toplayıcı kısım 1 ms ile 60 s arasında ölçüm alabilmektedir. Böylece birleştirme süresi değiştirilerek sonuçlar hassaslaştırılabilmektedir.

3.7. Kızılötesi Termometre

Deneyle esnasında plazma sıcaklığının yaklaşık tayini için Benetech GM 320 marka kızılötesi termometre kullanılmıştır. Şekil 3.13.'de termometrenin görseli, Çizelge 3.6.' da teknik özellikleri verilmektedir.



Şekil 3.13. Sıcaklık ölçümü için kullanılan kızılötesi termometre

Çizelge 3.6. Kızılötesi termometrenin teknik özellikleri

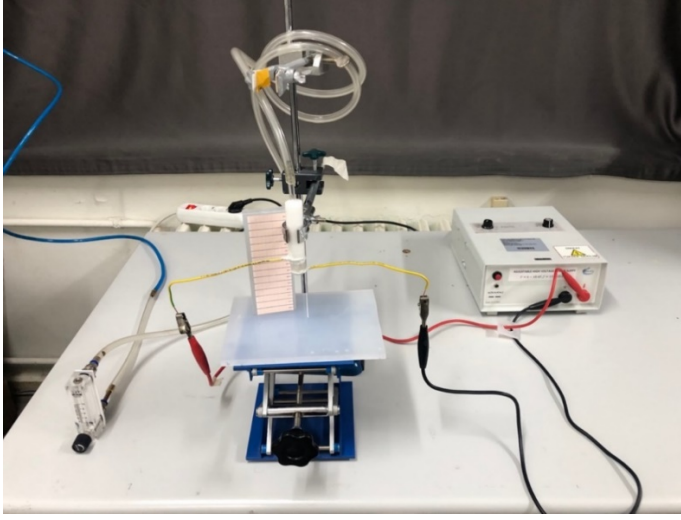
Sıcaklık Aralığı	-50 ~ 400°C (-58 ~ 752°F)
Doğruluk	0°C~400°C (32°F~752°F) : $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2.7^{\circ}\text{F}$) ya da $\pm 1.5\%$ -50°C ~ 0°C (-58°F~32°F) : $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ($\pm 5^{\circ}\text{F}$)
Çözünürlük	0.1°C ya da 0.1°F
Tepki Süresi	500 milisaniye, 95% tepki
Spektral Tepki	5-14
Yayınrlık	0.95 ayarlı
Çalışma Sıcaklığı	0 ~ 40°C (32 ~ 104°F)
Çalışma Nemi	10~90%RH yoğunlaşma, 30°C (86°F)'ye kadar
Depolama Sıcaklığı	-20 ~ 60°C (-4~140°F)
Güç	1.5V AAA*2 batarya
Batarya Ömrü	Lazer kapalı iken:12 saat

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. Helyum Kiloherzt Plazma Kalem

Puls DC plazma kalemin elektrot yapısına, yani yalıtılmamış bakır yüzük elektrotlara 18 kV-15 kHz alternatif gerilim uygulandığında plazma jet oluşmamıştır. Bu nedenle çıkış ağzındaki yüzük bakır elektrot yalıtkan sıvı seramik malzeme ile kaplanmıştır. Bu bağlamda kiloherzt plazma kalemin elektrot yapısı yeni ve orijinal olmaktadır.

Kiloherzt plazma kalem sisteminin fotoğrafı Şekil 4.1. (a)'da verilmiştir. Kiloherzt plazma kalemin Şekil 4.1. (b)' de fotoğrafı verilen üst cam borusundan yüksek basınç helyum gazı gönderildikten sonra elektrotlar arasına yüksek voltaj uygulandığında yine elektrotlar arasında dielektrik bariyer deşarj oluşurken aynı zamanda atmosfer ortamında da plazma jet üretilmektedir. Şekil 4.2.'de helyum gazı ile üretilen kiloherzt plazma jetin yandan, Şekil 4.3.'te ise alttan fotoğrafı verilmiştir. Fotoğraflarda elektrotlar arasında oluşan helyum gazı deşarjı ve alt elektrot deliğinden atmosfer ortamına çıkan plazma jet görülmektedir. Elektrotlar arasında deşarj beyaza yakın mor renkte oluşurken plazma jet pembe-mor renkte oluşmaktadır. Burada fotoğraflanan jete görülen jet (visible jet) ifadesini kullanmak daha doğru olmaktadır. Çünkü görülebilirlik; görünür bölge dalga boyunda (400-700 nm) foton yayınlanması ile ilgilidir. Oysaki plazmada hem görünür bölgede olmayan pek çok farklı dalga boyunda foton yayınlanmakta hem de emisyon yapmayan çok sayıda yüklü parçacık, atom, molekül ve elektron içermektedir. Görünür bölge dışında kalan dalga boyuna sahip fotonlar ve plazma parçacıkları fotoğraflanmadığı için plazma jet uzunluğu ya da jet hacmi yalnızca görünür bölge sınırları içerisinde değerlendirilmektedir. Fakat kiloherzt plazma kalem ile üretilen jetin boyutları fotoğraflarla belirlenen görünür boyutlardan daha büyüktür. Özellikle biyolojik uygulamalarda bu durum belirgin olarak ortaya çıkmaktadır.

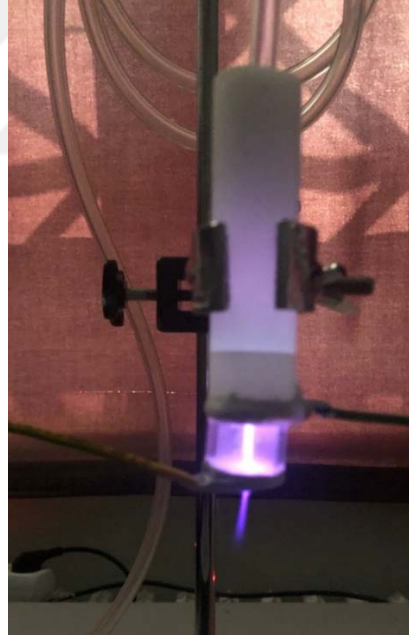


a)

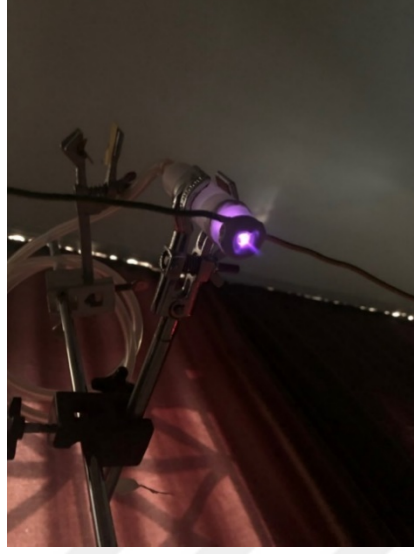


b)

Şekil 4.1. a) Kilohertz plazma kalem sistemi b) Kilohertz plazma kalem



Şekil 4.2. Kilohertz plazma kalem yandan fotoğrafı



Şekil 4.3. Kiloherertz plazma kalem alttan fotoğrafı

Kiloherertz plazma kalem jeti üretilirken güç kaynağının negatif kutbu çıkış ağzına (nozzle), pozitif kutbu ise üst elektroda bağlıdır. Kullanılan güç kaynağı AC voltaj olduğu için kutupların yer değiştirilmesi jet oluşumunda bir farklılık yaratmamıştır. Yine de çalışmalar negatif kutup alt elektroda bağlıyken yapılmıştır. Alt elektrot yeterince yalıtılmazsa kesinlikle jet oluşmamaktadır. Bu durumda elektrotlar arasındaki deşarj plazması doğrudan yalıtımın olmadığı metale akmaktadır. Bu sonuç, kiloherertz plazma kalemin, puls DC plazma kalemden farklı çalıştığını da göstermektedir. Puls DC plazma kalemde çıkış ağzındaki bakır elektrotta herhangi bir yalıtım kullanmamasına rağmen deşarjın elektrota atlaması ve plazma jetin sönümlenmesi gözlenmemektedir. Bu durum elektriksel incelemelerde detaylı incelenmiştir. Ancak bu sonuç kiloherertz plazma kalemin jet üretim dinamiğinin puls DC plazma kalem jet üretim dinamiğinden farklı olduğunu gösteren en önemli sonuçtur.

4.1.1. Helyum kiloherertz plazma kalem jet uzunluğunun gaz akış hızı ile değişimi

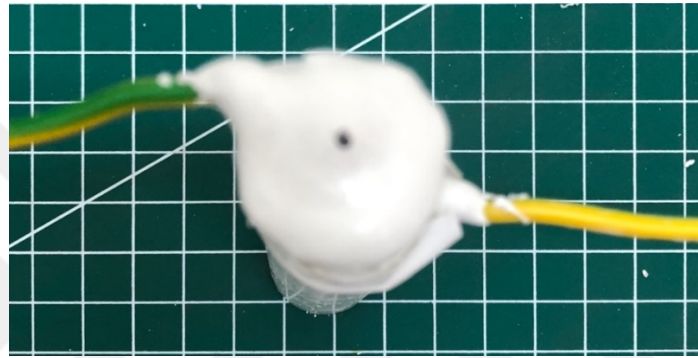
Helyum gazı kiloherertz plazma kalem sistemine gönderilirken bir gaz akış ölçerden geçmektedir. Helyum gaz tüpü vanası ve gaz akış ölçerin vanası ile kiloherertz plazma kaleme gönderilen gaz akış hızı kontrol edilebilmektedir. Plazma kalem sisteminde farklı çaplarda

çıkış ağzı (nozzle) elde etmek için çıkış ucu Şekil 4.4.'te görüldüğü gibi sıvı seramik ile kaplanmıştır. Bu çıkış ağzı 1,5 mm matkap ucu ile delinerek Şekil 4.5. (a)'da görüldüğü gibi 1,5 mm çapında çıkış ağzı elde edilmiştir. 1,5 mm çıkış ağzılı kilohertz plazma kaleme 3 l/dk helyum gazı gönderildikten sonra güç kaynağı açıldığında Şekil 4.5. (b)'de görüldüğü gibi çok ince ve kısa bir plazma jet üretilmiştir. Bölüm 4.1.'de, tez çalışması kapsamında bahsi geçen jet uzunluğunun gözle görülebilen plazma jet hacmi olduğuna değinilmiştir. Burada da elektrotlar dışında var olan jetin boyunun gözle görünenden fazla olacağına tekrar değinmek gerekir. Ancak çalışmalar boyunca görünür bölgede elde edilen jet uzunluğu üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Deşarj bölgesi beyaz ışıldaama içermesine rağmen azotun plazma rengi olan pembeye yakinken jet kısmının da aynı renkte olduğu görülmüştür. Şekil 4.5. (c) ve (d)'de helyum gaz akış hızı 6 l/dk ve 8 l/dk yapıldığında üretilen jetler verilmektedir. Bu gaz akış hızlarında deşarj bölgesi rengi beyaza yakın olurken jet, beyaz ve azot rengi olan pembe-mora yakın bir renktedir. Deşarj ve jetin rengi plazmadan yayınlanan fotonların dalga boyu ile ilişkilidir. Bu durum spektroskopik incelemelerde kısaca açıklanacaktır. Deşarj bölgesinde oluşan plazma rengini içerde hapsolan gaz miktarı belirlemektedir. Düşük gaz akış hızlarında deşarj bölgesinde daha çok azot bulunurken yüksek gaz akış hızlarında helyum depolanmaktadır. Helyum gazı ile azot gazı plazmalarının renkleri farklı olmaktadır. Ancak plazma jet daha çok helyum gazı renginde oluşmaktadır. Her ne kadar plazma jet bölgesinde azot ve oksijen molekülleri olsa da burada yukarıdan yüksek basınç ile gönderilen helyum gazı kanalı oluşmaktadır. Yine de plazma jet bölgesinde yalnızca helyum gazı değil helyum, azot ve oksijen karışımının plazması oluşmaktadır. Bununla birlikte deşarj bölgesinde deşarj odasını tümüyle kaplayan plazma yerine bir kanal şeklinde plazma oluştuğuna dikkat edilmelidir. Burada depolanan azot ve helyum gazının hem moleküler ağırlığı hem de iyonlaşma enerjileri farklıdır. Deşarj odasında bulunan azot daha hafif olan helyum gazı ile çeperlere doğru bir miktar itilebilmektedir. Bu nedenle deşarj odasının merkezi doğrultusunda bir kanal hattı üzerinde helyum plazması oluşmaktadır. Ancak gaz akış hızı arttığında deşarj odası daha çok helyum gazı ile dolmaktadır.

Helyum gazı farklı gaz akış hızları ile kilohertz plazma kaleme gönderilerek, oluşan jet uzunluğu değişimi incelenmiştir. Şekil 4.5. – Şekil 4.8.'de çıkış ağzı (nozzle) çapı 1,5 mm iken farklı He gaz akış hızlarında elde edilen kilohertz plazma kalem jet uzunluk değişimi verilmiştir.



Şekil 4.4. Kiloherertz Plazma kalemin çıkış ağzı seramik ile kaplı



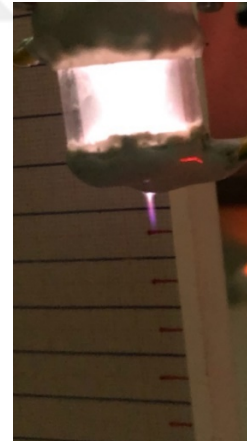
Çap 1,5 mm



a) 3 l/dk



b) 6 l/dk

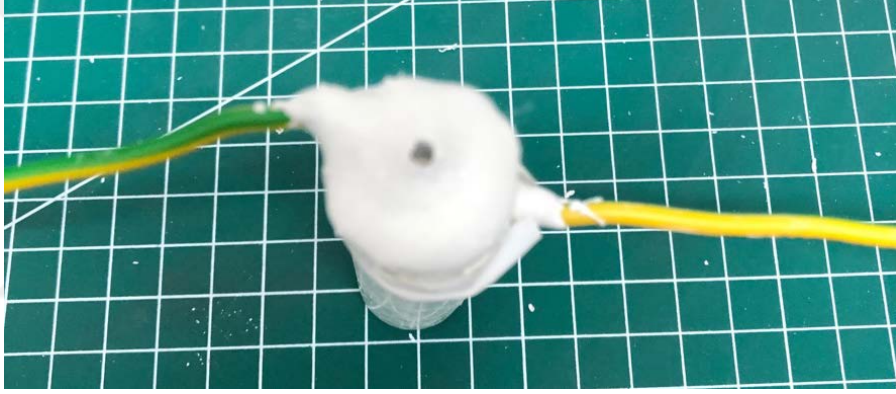


c) 8 l/dk

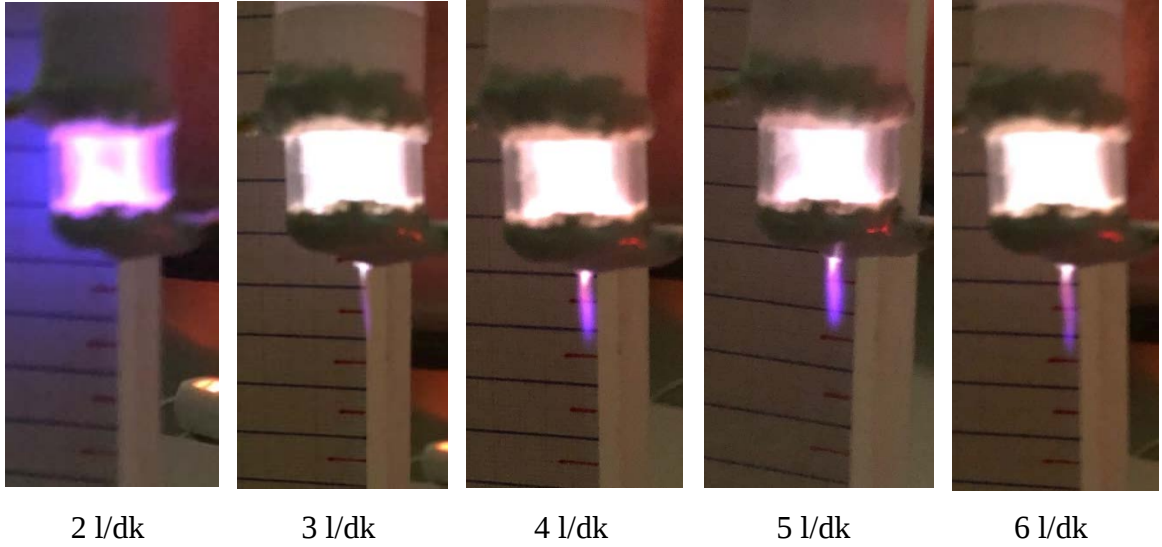
Şekil 4.5. 1,5 mm çıkış ağzılı kiloherertz plazma kalemin gaz akış hızı ile jet uzunluğu değişimi

Şekil 4.6.'da çıkış ağzı 2,5 mm ve Şekil 4.7.'de çıkış ağzı 3,5 mm yapılan kiloherertz plazma kalemin farklı gaz akış hızlarında fotoğrafları verilmiştir. Bu durumda üretilen jetler 1,5 mm çıkış ağzılı kiloherertz plazma kaleme benzerdir. Şekil 4.6 (a)'da görüldüğü gibi deşarj

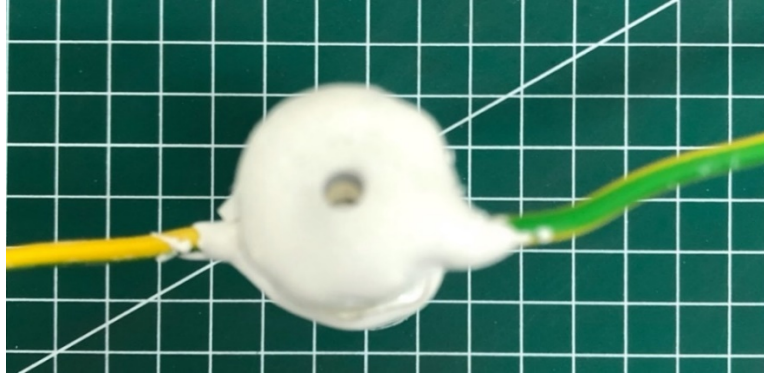
odası yeterince helyum gazı ile depolanmazsa jet oluşmamaktadır. Bu durumda deşarj odası daha çok azot ile doludur ve azot türleri yoğunluktadır. Gaz akış hızı belli bir değere ulaştıktan sonra jet oluşmaktadır. Bu durumda deşarj odasındaki plazmanın rengi değişmektedir. Jetin çıkış bölgesi deşarj odası rengine yakinken atmosferde ilerlediği uzantısı pembe-mor yani azota yakın renkte olmaktadır. Bu sonuç beklenen bir sonuçtur. Çünkü deşarj odasındaki helyum atmosfer ortamına uzanmaya çalışırken önünde bulunan atmosferi yani azotu itirmek zorundadır. Bu nedenle deşarj odasının çıkış ağzında daha çok helyum atmosfere uzanan bölgesinde ise daha çok azot iyonlaşması meydana gelmektedir. Bu boyutlarda nispeten daha kalın ve uzun bir jet üretilmiştir.



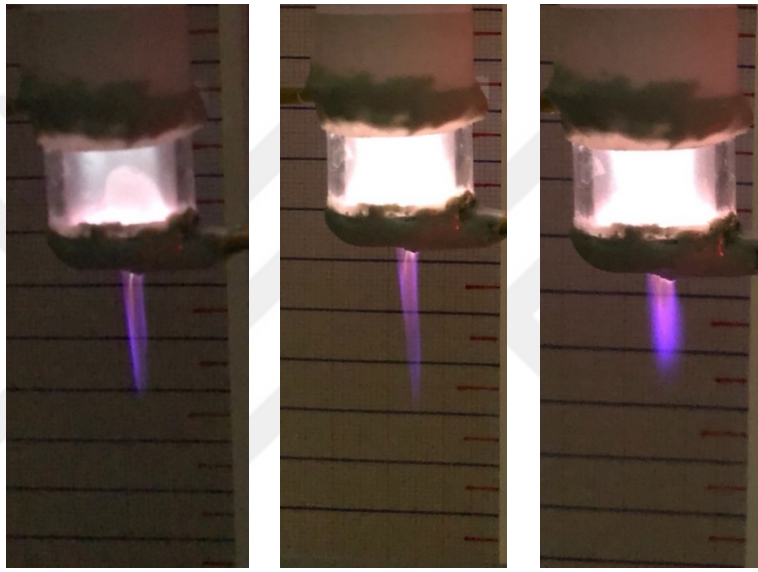
Çap 2,5 mm



Şekil 4.6. 2,5 mm çıkış ağızlı kilohertz plazma kalemin gaz akış hızı ile jet uzunluğu değişimi



Çap 3,5 mm



2 l/dk

3 l/dk

4 l/dk

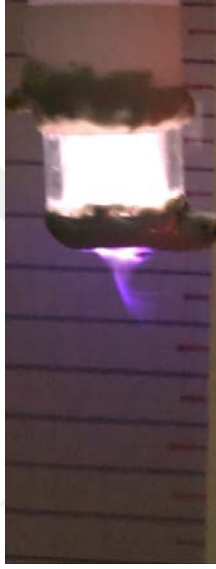
Şekil 4.7. 3,5 mm çıkış ağızlı kilohertz plazma kalem ile farklı gaz akış hızlarında jet uzunluğu değişimi

Şekil 4.8.'de 4,5 mm çıkış ağızlı kilohertz plazma kalemin farklı helyum gaz akış hızlarında fotoğrafları verilmiştir. Şekil 4.8.'den görüldüğü gibi düşük gaz akış hızında (2 l/dk) kilohertz plazma jet, ipliksi (filamentary) modda oluşmaktadır. Aynı zamanda jet, elektrik alan kabloına doğru yönelmektedir. Bu sonuç üretilen jetin puls DC plazma kalemden farklı olduğunu da göstermektedir. Puls DC plazma kalem için böyle bir veri bildirilmemiştir. Başka bir deyişle puls DC plazma kalem ipliksi modda çalışmamaktadır. Oysaki kilohertz plazma kalem ipliksi modda çalışabilmektedir. Bu sonuç, kilohertz plazma kalemin puls DC plazma kalemden farklı olmasını göstermesinin yanı sıra üretilen kilohertz plazma jetin fiziksel oluşum yapısı hakkında da önemli bir bilgi vermektedir. Plazma jetlerin

fiziksel oluşum mekanizmaları açıklanırken iki önemli teori ortaya çıkmaktadır. Birinci teoriye göre, jet bölgesinde elektrik alan çok fazla etkin değildir. Bu teoride jet daha çok plazma içi reaksiyonlarla varlığını sürdürmektedir. İkinci teoride ise jet, lokal elektrik alan etkisi ile varlığını sürdürmektedir. Her ne kadar jet elektrik alan bölgesinden çıkmış olsa da iyonlaşmalar ile oluşan yükler, kısmi elektrik alan bölgeleri yaratmaktadır. Bu tür jetlere elektrik alan ile çalışan (electrically driven) jetler denilmektedir. Bu sonuç üretilen kilohertz plazma jetin elektrik alan ile çalışan bir jet olduğunu göstermektedir. Oysaki literatürde yer alan çalışmalar, puls DC plazma kalemin üretim mekanizmasının (dinamiğini) daha çok helyum reaksiyonları sonucu oluşan fotonlarla meydana geldiğini (foto-iyonizasyon modeli) belirtmektedir (Lu ve Laroussi, 2006; Karakaş vd., 2010). Buradan hareketle üretilen kilohertz plazma jetin tamamıyla puls DC plazma kalemden farklı olduğu söylenebilmektedir. Şekil 4.8.'de gaz akış hızı arttırıldığında jetin ipliksi moddan yaygın (diffusive) moda geçtiği görülmektedir. Bununla birlikte jet uzunluğu ve hacmi artmaktadır. Ancak gaz akış hızı arttıkça belirli bir noktadan sonra jet uzunluğunda çok belirgin artış meydana gelmemektedir. Bu sonuçta yine üretilen kilohertz plazma jetin elektrik alan ile çalışan bir jet olduğunu göstermektedir. Jet bölgesinde helyum miktarının artışı jetin uzunluğunda çok büyük bir artış yaratmamaktadır. Bu nedenle jetin varlığını helyum reaksiyonlarının ürettiği fotonlarla (foto-iyonizasyon) sürdürmediği veya bu reaksiyonların baskın olmadığı söylenebilir. Burada jete uygulanan voltaj artışını gözlemlemek gerekmektedir. Bu bir sonraki bölümde incelenmiştir. Kilohertz plazma jete uygulanan voltaj arttıkça kilohertz plazma jet uzunluğu da arttığı için üretilen kilohertz plazma jet kesinlikle elektrik alanla çalışan bir jettir.



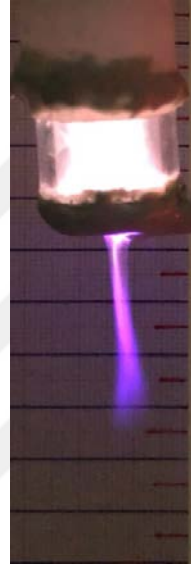
Çap 4,5 mm



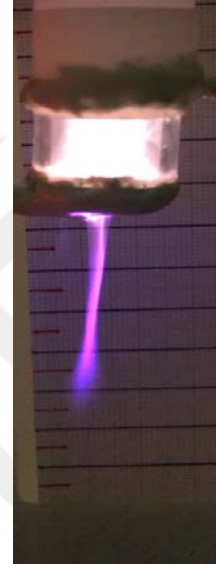
2 l/dk



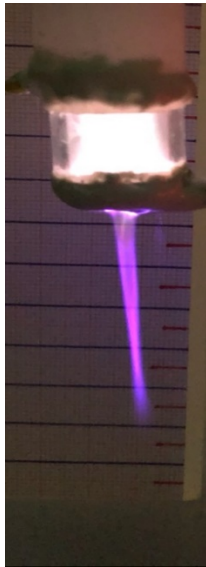
3 l/dk



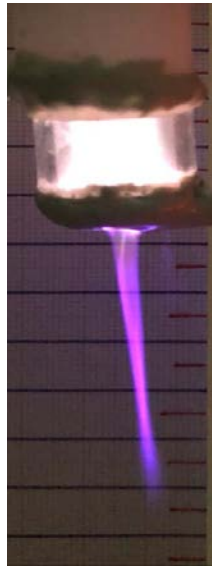
4 l/dk



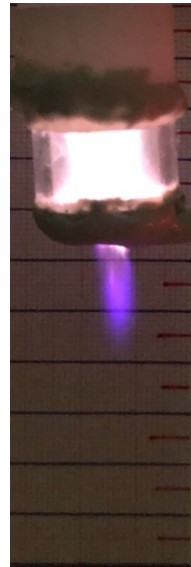
5 l/dk



6 l/dk



7 l/dk



8 l/dk



9 l/dk

Şekil 4.8. 4,5 mm çıkış ağızlı kilohertz plazma kalemin farklı gaz akış hızlarında jet uzunluğu değişimi

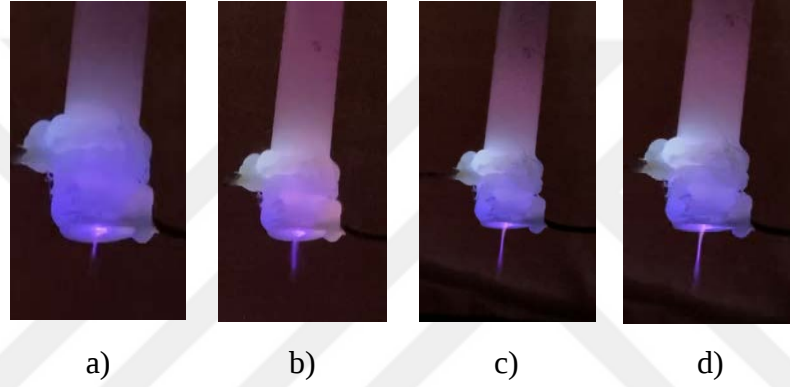
Şekil 4.8.'den görüldüğü gibi kilohertz plazma jet 6-7 l/dk gaz akış hızlarına kadar ipliksi modda çalışırken daha yüksek gaz akış hızlarında yaygın modda çalışmaktadır. İpliksi modda daha ince ve uzun jet üretilirken yaygın modda daha kalın ve kısa jet üretilmektedir. Yaygın modda üretilen jet daha kararlı yapıdadır. İpliksi modda uzunluk ve doğrultu zaman zaman değişirken yaygın modun kararlı olduğu gözlemlenmiştir. Kararlı modda gaz akış hızının artması jet yapısında çok fazla değişim yaratmamaktadır. Burada önemli bir husus açıklanmalıdır. İpliksi modda plazma üretim mekanizması yaygın modda üretilen plazmanın mekanizmasından farklıdır. İpliksi modda jet daha çok elektron çarpışmaları ile yeni iyonlaştırmaları meydana getirirken yaygın modda radyasyon etkili reaksiyonlar etkindir. Bu iki mod plazmanın kimyasal yapı incelenmesi için detaylı deneylere ve bazı modellemelere ihtiyaç vardır.

Yukarıdaki sonuçlar kilohertz plazma kalem üretilirken çıkış ağzı (nozzle) çapının çok önemli olduğunu göstermektedir. Görüldüğü gibi düşük çıkış ağız çaplarında plazma jet daha zor oluşmaktadır. Helyumun iyonlaşma enerjisi (24.6 eV) ve 2^3S_1 ve 2^1S_0 gibi iki metastabil türü sırasıyla 19.82 eV ve 20.06 eV enerjileri, azotun iyonlaşma enerjisi (15.58 eV)'nden daha büyük olduğu için azot iyonlaşması sağlanmaktadır. Kilohertz plazma kalemin yalnızca azot gazı ile üretilmesi denenmiştir. Bu durumda yüksek basınçta azot gazı tüpünden kilohertz plazma kaleme azot gazı gönderilmiştir. Ancak bu durumda deşarj odasında plazma dahi oluşmamıştır. Azotun iyonlaşma enerjisi 15.58 eV iken, N_2 (C-B) dört metastabil türü 11.17, 11.42, 11.66 ve 11.90 eV geçiş (transition) enerjisine sahiptir. Azot gazı ile plazma üretmek için kullanılan 18 kV ile hızlandırılan elektronların enerjisi azotun plazmasını oluşturmaya yetmemektedir. Plazma içinde penning iyonizasyon süreci taşıyıcı olduğu için azotun 11 eV civarındaki metastabil türleri azot molekülünü iyonlaştıramamaktadır ve azot plazması uygulanan voltaj ile üretilmemektedir. Bununla birlikte azotun plazması üretilirken azot moleküllerinin ayrışma (dissociation) enerjisi de harcanmaktadır.

4.1.2. Helyum kilohertz plazma kalem jet uzunluğunun çıkış ağız çapı ile değişimi

Yukarıdaki çalışmada her ne kadar farklı çaplarda çıkış ağızlı jetler üretildiyse bu bölümde hem kullanılan materyalin hem de jet ağzının kilohertz plazma jete etkileri

incelenmiştir. Çap değişiminin incelenmesi için benzer boyutlarda dört farklı plazma kalem üretilmiştir. Üretim kolaylığı olması için malzeme olarak polietilen plastik malzeme kullanılmıştır. Üretilen dört farklı sistem için deşarj odası hacmi aynı kalırken jetin çıkış ağzı (nozzle) çapları farklı seçilmiştir. Bu şekilde farklı çıkış ağzı çapının kilohertz plazma jetin uzunluk değişimine etkisi incelenmiştir. Şekil 4.9.'da dört farklı çıkış ağız çapında aynı koşullarda kilohertz plazma jet uzunluk değişimleri görülmektedir. Uygulama voltajı ve gaz akış hızı her çalışma için sabit olup 15 kHz-18 kV ve 6 l/dk' dır.



Şekil 4.9. Helyum gazı için a) 3,5 mm b) 4,5 mm c) 5,5 mm d) 6,5 mm delik çaplarına göre kilohertz plazma jet değişimi

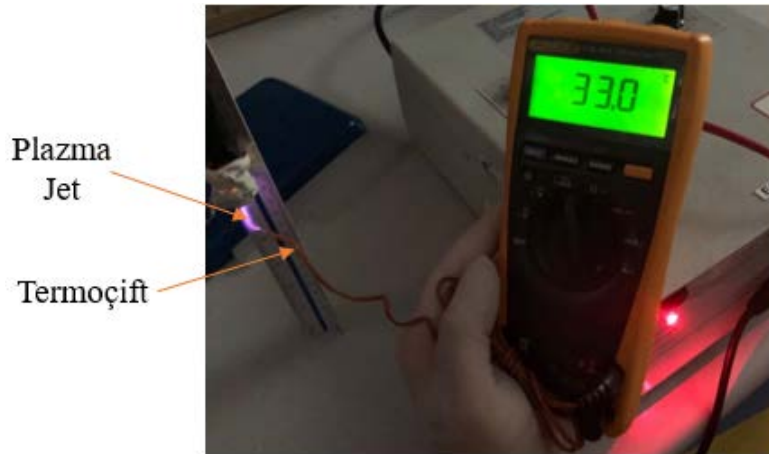
Şekil 4.9.'dan görüldüğü gibi plazma çıkış ağzının (nozzle) büyümesi ile aynı gaz akış hızında daha uzun jet oluşturmaktadır. Bu sonuç helyum gazının atmosfere daha kolay çıkmasının jet uzunluğunu arttırdığını göstermektedir. Öyleyse üretilen jet atmosfer bölgesinde helyum oranı yükseldiğinde daha fazla plazma reaksiyonları oluşturmaktadır. Bu aslında jet bölgesinde helyum iyonlaşmaları ile oluşan fotonların yeni iyonları oluşturduğunu göstermektedir. Yukarıda plazma jetlerin üretim mekanizmaları iki teoriye ayrılmıştı Birincisi; jet daha çok plazma içi reaksiyonlar sonucu üretilen yeni plazma türlerinin etkileşimi ile gerçekleşir. İkinci teoride jet elektrik alan etkisinde meydana gelmektedir. Her ne kadar bu jet bölgesinde elektrik alan yoksa da iyonlaşmalar ile oluşan yükler kısmi elektrik alan bölgeleri yaratmaktadır. Bu tür jetlere elektrik alan ile çalışan (electrically driven) jetler denilmektedir. Akış hızına bağlı jet uzunluğu çalışmalarında alınan sonuçlar, üretilen plazma jetin ikinci modele, yani elektrik alanın daha etkili olduğu

modele yakın olduğunu göstermekteydi. Ancak Şekil 4.9.'daki sonuç birinci modelin, yani gönderilen gazın reaksiyonlarının daha etkin olduğunu göstermektedir. Bu nedenle bu aşamada kilohertz plazma kalem jette hangi modelin etkin olduğunu ifade etmenin erken olduğu düşünülmektedir. Ancak hibrit bir model ortaya konabilir. Yani kilohertz plazma jet hem plazma içi reaksiyonlar ile hem de elektrik alan ile devamlılığını sağlamaktadır yorumu yapılabilir.

Burada önemli bir sonuç daha ortaya çıkmaktadır. Kilohertz plazma kalemin üretilmesi için kullanılan materyalin cinsi jetin yapısını etkilemektedir. Şekil 4.7.'de ve Şekil 4.9.(a)'da aynı deşarj hacmi, aynı voltaj ve yakın gaz akış hızları olmasına rağmen polietilen malzemede daha kısa ve ince jet üretilmektedir. Şekil 4.8. ve Şekil 4.9.(b)'de benzer şekilde aynı parametrelerde farklı plazma jetler oluşmaktadır. Polietilen malzeme statik olarak daha fazla yüklenme yaptığı için plazma jetin üretilmesi zorlaşmaktadır. Bununla birlikte polietilen malzeme ile yaygın modda plazma jet üretilmemektedir.

4.1.3. Helyum kilohertz plazma kalem jet sıcaklık analizi

Helyum gazı kilohertz plazma jetin sıcaklık ölçümü FLUKE marka multimetreye bağlı termoçift ile ölçülmüştür. Şekil 4.10.'da görüldüğü gibi kilohertz plazma kalem jeti, termoçiftin kontak noktasına değdirilmiştir.



Şekil 4.10. Helyum kilohertz plazma jet sıcaklık ölçümü

Termoçift helyum gazı ile üretilen kilohertz plazma jete yaklaştırıldığında jet, termoçiftin kontak noktasına doğru atlayarak ark yapma eğilimindedir. Bilindiği gibi termoçiftler farklı türde ve dolayısıyla iş fonksiyonları farklı iki metalin birleşiminden oluşmaktadır. Kontak noktasında oluşan sıcaklık farkından dolayı iki farklı iletkende elektron akımı farklı olmakta ve bir potansiyel farkı oluşmaktadır. Plazma jetin kontak noktası ile teması sırasında termoçift yalnızca sıcaklık farkını ölçmez. Plazma jet içindeki elektronların da iletken akışı söz konusu olur. Bu nedenle salt sıcaklık ölçen bir alet olmaktan çıkmaktadır. Ancak yine de literatürde plazma jetlerin sıcaklıkları genellikle termoçiftlerle ölçülmektedir (Hendawy vd., 2020) ve ortalama bir değer elde edilmektedir. Ancak termoçift plazma jete yaklaştırdıkça ark şiddeti artmaktadır ve termoçiftteki sıcaklık değerleri Şekil 4.11.'de verildiği gibi farklı değerler göstermektedir. Buradan jetin farklı bölgelerinin farklı sıcaklıkta olduğu sonucu çıkarılabilir. Ancak durum bu kadar basit değildir. Jet kontak bölgesine yüklü parçacık aktarmaktadır ve ölçüm salt sıcaklık farkı ölçmenin ötesindedir. Bununla birlikte jet ile kontak noktası arasında aslında farklı türde bir plazma oluşmaktadır ve kontak noktası ikinci bir elektrot gibi davranmaktadır. Bu durumda oluşan plazmanın yüklü parçacıkları kontak noktasına hızla vurarak sıcaklık artışı yapabilir. Her durumda gaz akış hızı arttığında jet sıcaklığı düşmektedir. Termoçiftin jet bölgesinde yer değiştirmeden durması zaman içinde sıcaklık değişimine neden olmamaktadır. Bu nedenle jet içi parçacıkların kontak bölgesinde fiziksel artışa neden olmadığı söylenebilir.

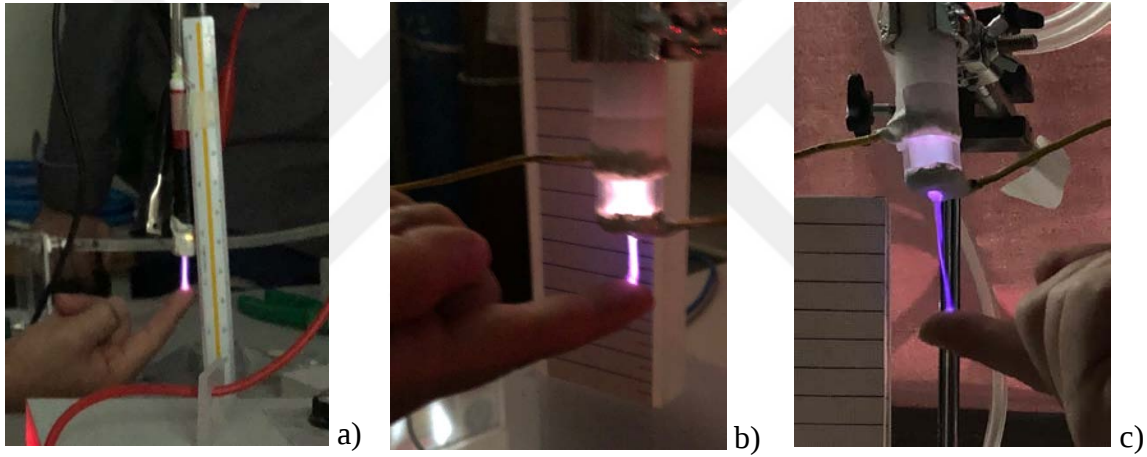


Şekil 4.11. Termoçift kilohertz plazma jetin farklı uzaklıklarına getirildiğinde sıcaklık değişimi

Şekil 4.11.'te termoçift ile yapılan sıcaklık ölçümleri değişiklik gösterdiği için farklı gaz akış hızlarında üretilen helyum kilohertz plazma jet sıcaklığı Şekil 4.12'de görüldüğü gibi Benetech GM 320 marka kızılötesi termometre ile ölçülmüştür. Helyum kilohertz plazma kalem ile üretilen jetin sıcaklığı oda sıcaklığı civarında kalmaktadır. Bu nedenle kilohertz plazma kalem atmosferik basınç soğuk plazma jet sınıfında yer alır. Bununla birlikte Şekil 4.13.'den görüldüğü gibi kilohertz plazma kalem jetine elle dokunulabilmektedir. 10 dakika kadar süre dahi kilohertz plazma kalem jet ele temas ettikten sonra deri üzerinde herhangi bir iz, leke ve yara meydana gelmediği gibi dokunma sırasında herhangi bir acı hissedilmemiştir.



Şekil 4.12. Kızılötesi termometre ile kilohertz plazma jetin sıcaklık ölçümü



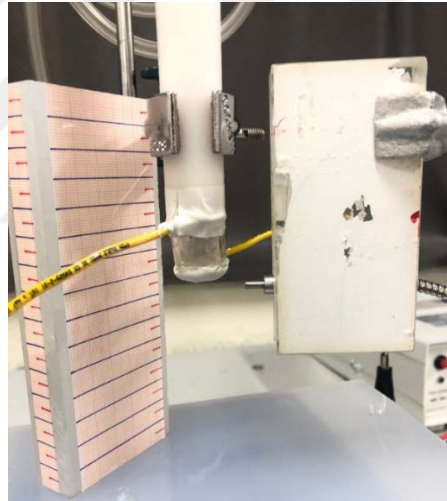
Şekil 4.13. Kilohertz plazma kalem jetine a) ve b) yaygın modda c) iplikli modda çıplak elle temas

4.1.4. Helyum kilohertz plazma kalem spektroskopik analizi

Helyum gazında kilohertz plazma kalem ile üretilen plazma jetin spektroskopisini elde etmek için Ocean Optics mini-spectrometer USB 2000+XR1-ES cihazı kullanılmıştır. Spektroskopik ölçüm sisteminin fotoğrafı Şekil 4.14.'te verilmiştir. Spektrometre cihazının optik probu Şekil 4.15.'te görüldüğü gibi kilohertz plazma kalem çıkış ağzından 5 mm eksenel olarak dik uzaklığa ve 5 mm alt kısmına gelecek şekilde yerleştirilmiştir.



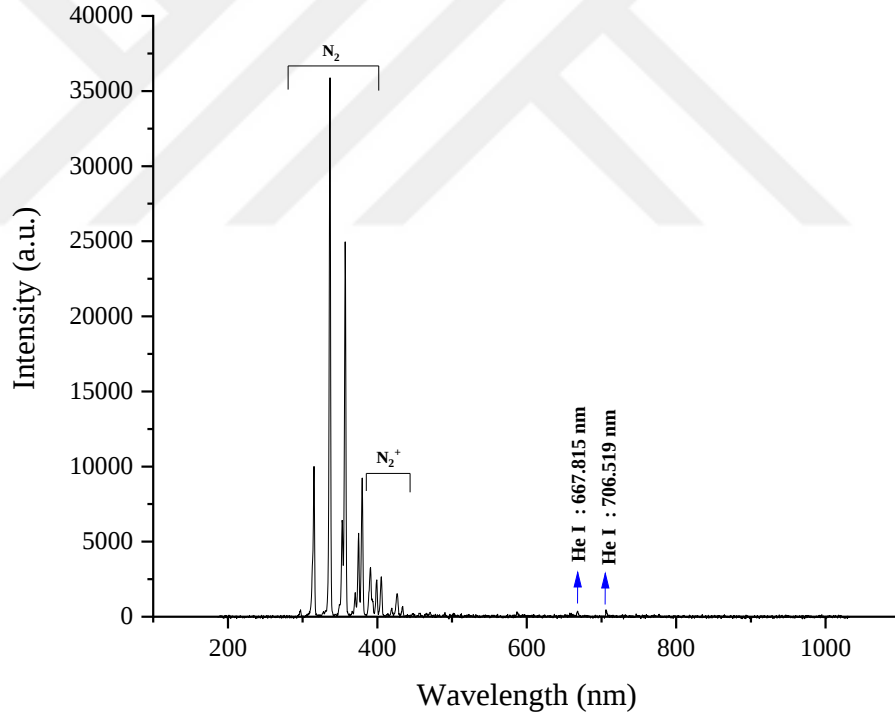
Şekil 4.14. Kiloherertz plazma kalem spektroskopik ölçüm sistemi



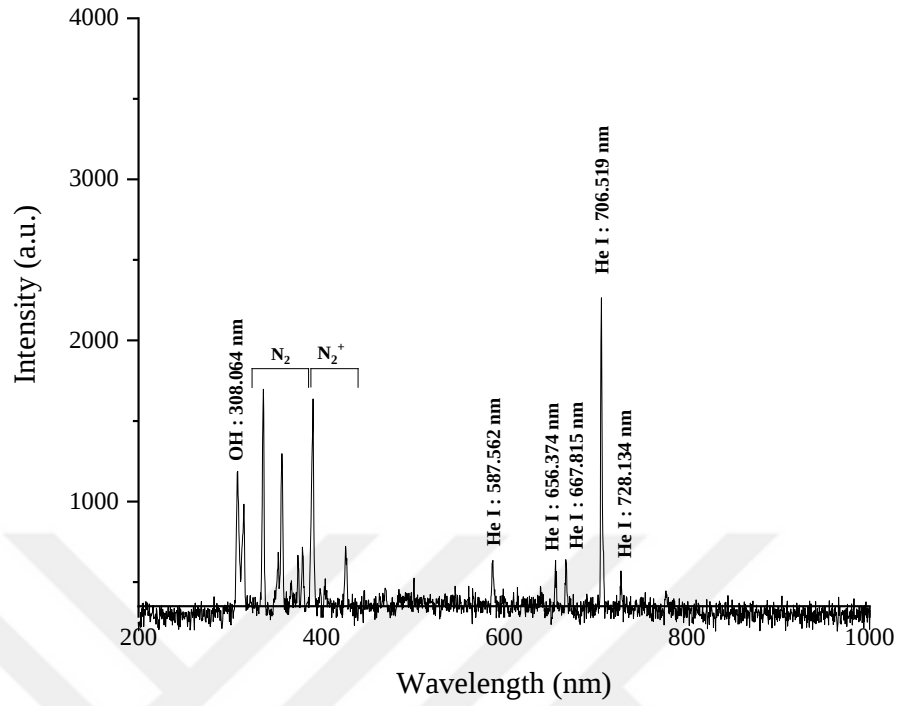
Şekil 4.15. Kiloherertz plazma kalem spektroskopik ölçümünde prob yerleşimi

Şekil 4.18.'de mor renge yakın üretilen kiloherertz plazma kalem plazma jetinin spektroskopik ölçüm sonuçları verilmiştir. Spektroskopik sonuçlardan görüldüğü gibi N_2 sistemin şiddetli moleküler bantları, moleküler iyon N_2^+ (B-X) sisteminin bantları ve OH radikal (A2S–X2P) sistemi ve helyum gazı geçişlerine ait fotonlar tespit edilmiştir. Çizelge 4.1.'de helyum gazı plazmasında görülen geçişlere ait bilgiler verilmiştir. Şekil 4.16.'da düşük gaz akış hızında jet üretilmediği durumda mor renge yakın “deşarj odası/bölgesi”nden alınan spektrum verilmiştir. Bu durumda helyum plazması neredeyse oluşmamaktadır ve azot türleri yoğunluktadır. Yukarıda düşük gaz akış hızındadeşarj odasının yeterince

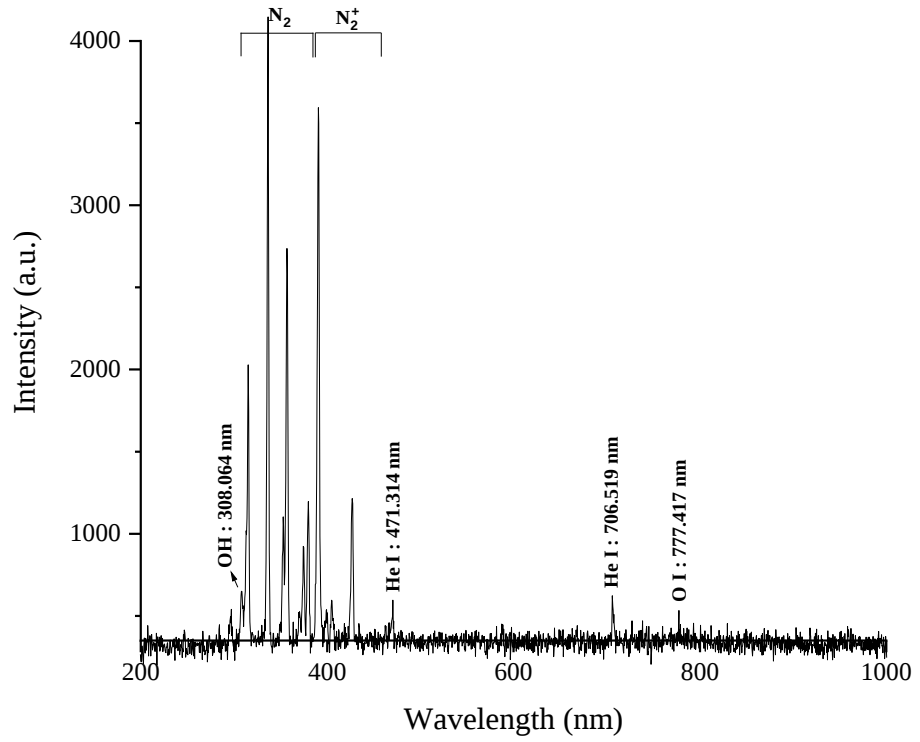
helyum gazı ile doldurulmadığı açıklanmıştır. Şekil 4.17.'de helyum gaz akış arttırıldığında kilohertz plazma kalem sisteminde elektrotlar arasında oluşan pembe-beyaz renge yakın “deşarj plazması”nın spektroskopik ölçüm sonuçları verilmiştir. Deşarj plazması daha az azot pikleri verirken daha yüksek helyum piki vermektedir. Şekil 4.18.'de post-deşarj plazmasının yani atmosfer ortamına çıkan plazma jetin spektrumu görülmektedir. Jet atmosfer ortamında yayıldığı için daha yüksek azot pikleri oluşmuştur ve bu doğaldır. Bu iki grafikte elektrotlar arasında üretilen plazma ile atmosfer ortamına çıkan plazmanın kıyaslanması yapılmıştır. Beklendiği gibi deşarj plazmasında daha çok helyum daha az azot piki oluşurken, post-deşarj yani plazma jette daha çok azot daha az helyum piki gözlenmektedir.



Şekil 4.16. Helyum kilohertz plazma kalemin **deşarj bölgesinden** “jet oluşmadan” alınan spektrum



Şekil 4.17. Helyum kilohertz plazma kalemin “jet oluştuğunda” **deşarj bölgesinden** spektrumu



Şekil 4.18. Helyum kilohertz plazma kalemin **jet (post-deşarj) bölgesinden** spektrumu

Çizelge 4.1. ve Çizelge 4.2.'de helyum gazı plazmasında gözlemlenen atomik ve moleküler geçişlere ait bilgiler verilmiştir.

Çizelge 4.1. Helyum gazı plazmasında gözlemlenen atomik geçişlere ait bilgiler (NIST, 2021)

Atom/İyon	Dalgaboyu (nm)	Geçiş	İstatistiksel Ağırlık (g _i)	Geçiş Olasılığı (A _{ij})	Alt seviye enerjisi (eV)	Üst seviye enerjisi (eV)
He I	471.314	1s4s (³ S 1) 1s2p (³ P° 2)	3	5.2894e+06	20.96408720675	23.593959036
He I	587.562	1s3d (³ D 3) 1s2p (³ P° 2)	7	7.0708e+07	20.96408720675	23.07365102990
He I	667.815	1s3d (¹ D 2) 1s2p (¹ P° 1)	5	6.3705e+07	21.2180230218	23.07407511941
He I	706.519	1s3s (³ S 1) 1s2p (³ P° 2)	3	1.5474e+07	20.96408720675	22.718466742
O I	777.417	2s ² 2p ³ (4S°) (⁵ p 2) 2s ² 2p ³ (4S°)3s (⁵ S° 2)	5	3.69e+07	9.1460911	10.7404756

Çizelge 4.2. Helyum gazı plazmasında gözlemlenen moleküler geçişlere ait bilgiler

Molekül/İyon	Dalgaboyu (nm)	Geçiş
OH	308.064	A ² Σ ⁺ – X ² Π
N ₂	297.143	C ³ Π _u (v=3) – B ³ Π _g (v=1)
N ₂	315.90	C ³ Π _u (v=1) – B ³ Π _g (v=0)
N ₂	337.10	C ³ Π _u (v=0) – B ³ Π _g (v=0)
N ₂	353.60	C ³ Π _u (v=1) – B ³ Π _g (v=2)
N ₂	357.70	C ³ Π _u (v=0) – B ³ Π _g (v=1)
N ₂	370.90	C ³ Π _u (v=2) – B ³ Π _g (v=4)
N ₂	375.40	C ³ Π _u (v=1) – B ³ Π _g (v=3)
N ₂	380.40	C ³ Π _u (v=0) – B ³ Π _g (v=2)
N ₂ ⁺	391.40 399.43 404.33 405.22 426.52 434.04	B ² Σ _u ⁺ – X ² Σ _g ⁺

Çizelge 4.1.'deki geçişler arttırılabilir ancak spektroskopik verilerde gözlemlendiğimiz plazma türleri ile sınırlandırılmıştır. Helyum plazmasında ortaya çıkan plazma türlerinin hangi kimyasal reaksiyonlarla ortaya çıktığı Bölüm 1, Çizelge 1.1. 'de kısmen verilmiştir. Ancak plazma içinde yüzlerce reaksiyonu incelemek plazma kimyası altında başlı başına bir uzmanlık alanıdır. Optik emisyon spektrometresi 1 ms ile 60 s arasında ölçüm alabilmektedir. Yani birleştirme süresi 1 ms ile 60 s arasında seçilen bir değerdir. Çalışmalarda alınan sonuçlar, seçilen birleştirme süresine göre gözlenen türlere aittir. Birleştirme süresi 1 ms seçilse dahi plazma içinde 10^{-8} s'de reaksiyonlar meydana gelmektedir. Dolayısıyla spektroskopi cihazının plazma içerisinde meydana gelen her türü yakalayabilmesi mümkün değildir.

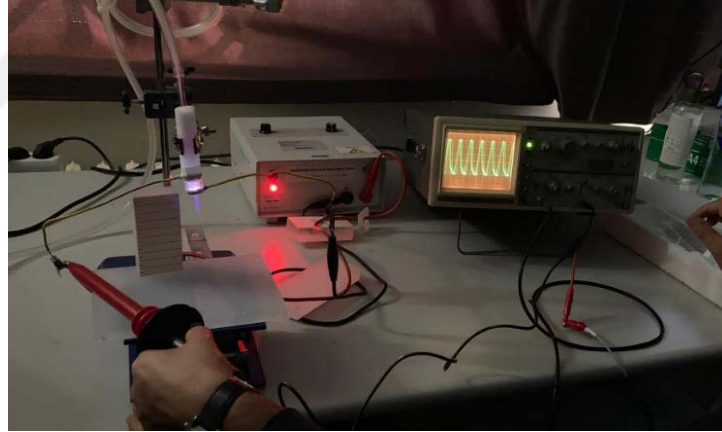
Helyumun iyonlaşma enerjisi 24.58 eV ve helyumun iki önemli metastabil türünün geçiş enerjileri ise 19.82 eV ve 20.06 eV'tur. Bununla birlikte azotun iyonlaşma enerjisi 15.58 eV ve azotun dört önemli metastabil türünün geçiş enerjileri ise 11.17, 11.42, 11.66 ve 11.90 eV'tur. Şekil 4.16., 4.17. ve 4.18.'den görüldüğü gibi optik emisyon spektrumlarında helyum, azot molekülü, azot iyonu, oksijen ve hidroksil (OH) molekülleri tespit edilmiştir. H₂O molekülünün ayrışma enerjisi 5.1 eV'tur. Burada oksijen radikali ile hidroksil molekülünün uyarılma enerjileri nispeten düşük olduğu için kolayca üretilmişlerdir. Bununla birlikte helyum iyonlaşmalarının gerçekleşmesi, plazma içerisinde 24.58 eV'tan daha yüksek enerjilerde elektronlar bulunduğunu göstermektedir. Genelde deşarj plazmalarında elektronların enerjileri ortalama 1-2 eV olmasına rağmen Maxwellian dağılımda çok daha yüksek enerjide elektronlar bulunduğu görülmektedir. Ancak azot iyonu (N₂⁺) üretimi argon plazma jette görülmemesine rağmen helyum deşarjında ve jetinde üretilmiştir. Azot iyonunun optik emisyon spektrumunda görülmesi, helyumun iki yüksek enerjili metastabili ile gerçekleşen penning iyonlaşma sürecinin bir sonucudur. Bölüm 4.2.3'te tartışılacağı gibi argon metastabil türleri azot gazını iyonlaştıracak enerjiye sahip olmadığı için argon kilohertz plazma jette N₂⁺ iyonları gözlenmemiştir.

Helyum plazması ve jetinin rengi de yukarıdaki spektroskopik verilerle açıklanabilir. Spektrumlarda mavi-mor görünür bölgede ışık yayınlayan 300-500 nm arası fotonlar ve kırmızı-pembe görünür bölgede ışık yayınlayan 600-800 nm arası fotonlar bulunmaktadır. Bu fotonların yayınlanma olasılıkları da plazmanın rengini etkilemektedir. Ancak genel

olarak plazmanın rengi yayınlanan radyasyonun dalga boyu ile ilgilidir. Bununla birlikte beyaz renk birçok rengin birleşimi ile oluşur. Son olarak kullanılan dijital fotoğraf makinesinin filtrasyon özellikleri de plazmanın görünen rengini belirlemektedir. Bu nedenle elde edilen deşarj ve jet plazmasının rengi ile ilgili yorumlar, plazmanın doğrudan görünen renginden çok spektroskopik veriler üzerinden yapılmalıdır.

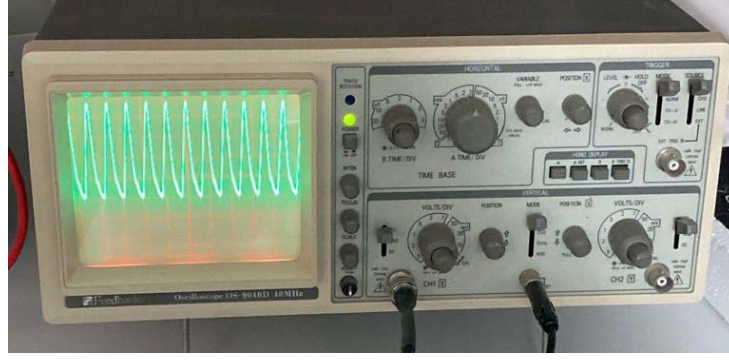
4.1.5. Helyum kilohertz plazma kalem elektriksel analizi

Şekil 4.19.'da kilohertz plazma kalemin elektriksel ölçümü için kullanılan sistemin fotoğrafı verilmiştir. Ölçüm için osiloskop, yüksek voltaj probu ve akım probu kullanılmıştır.



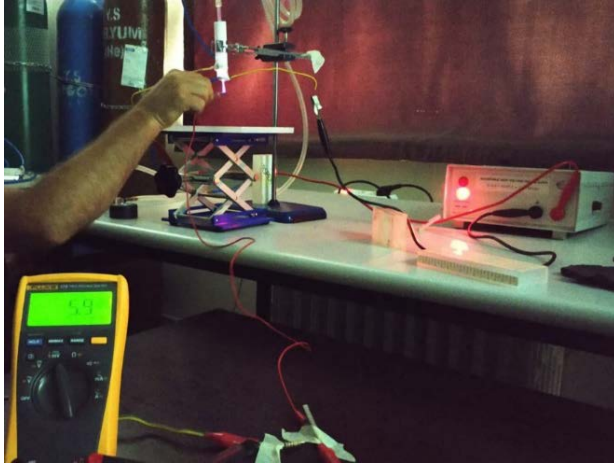
Şekil 4.19. Kilohertz plazma kalem elektriksel ölçümler için kullanılan sistem

Şekil 4.20'de kilohertz plazma kalem üretilirken elektrotlar arasında alınan osiloskop görüntüsü verilmiştir.

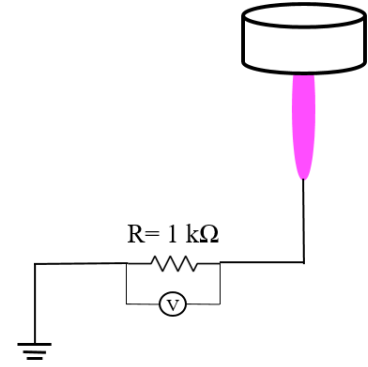


Şekil 4.20. Kiloherertz plazma kalemin çalışma sırasında osiloskop görüntüleri.

Kiloherertz plazma kalemin fiziksel dinamiğinin ortaya konulması literatürde var olan plazma jetlerin fiziksel dinamiklerden hangisine ait olduğunun belirlenmesi açısından önemlidir. Bu nedenle Şekil 4.21.'de verilen sistem kurulmuştur. Bu sistemde $1\text{ k}\Omega$ direncin bir ucuna bağlanan bir iletken kablo, plazma jete değdirilmiştir. Direncin diğer ucu toprak hattına (laboratuvar dışında 1 metrelik 1-2 cm kalınlıkta 8 adet bakır çubuk toprağa gömülüdür) bağlanmış ve direnç üzerinden kiloherertz plazma kalemin ürettiği elektronların geçişi sağlanmıştır. Bu sırada direnç üzerindeki voltaj ölçülmüştür. Plazma jete değen kablonun jete olan uzaklığı ile voltmetre üzerinden okunan voltajın grafiği Şekil 4.22.'de verilmiştir. Şekil 4.22.'den maksimum gerilim 650 mV seçilirse $1\text{ k}\Omega$ direnç üzerinden geçen maksimum jet akımı $650\text{ }\mu\text{A}$ olarak bulunur. Görüldüğü gibi jet elektriksel olarak aktiftir ve jete yaklaştıkça elektron sayısı artmaktadır. Bu sonuç üretilen kiloherertz plazma kalemin elektriksel çalışma mekanizmalı modele yakın olduğunu göstermektedir. Puls DC plazma kalem foto-iyonizasyon modeli ile açıklanmıştır. Bu açıdan kiloherertz plazma kalemin jet üretim dinamiğinin puls DC plazma kaleminden farklı olduğu görülmektedir.

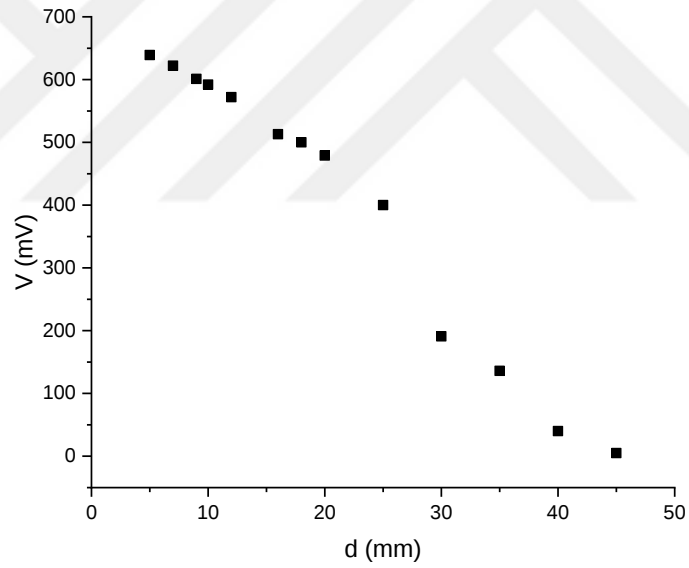


a)



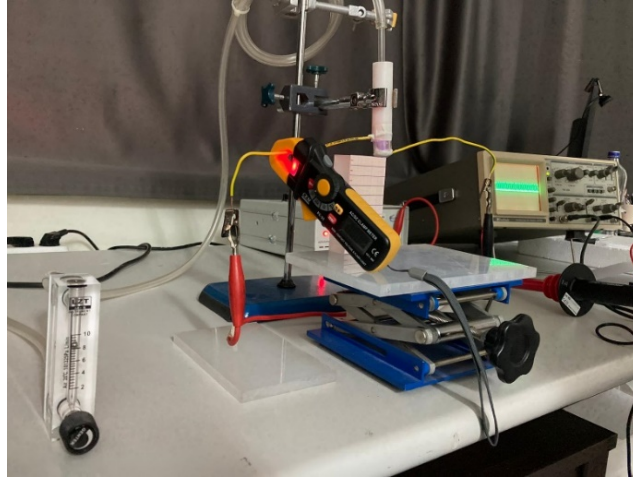
b)

Şekil 4.21. a) Kiloherz plazma kalemin ürettiği akımın 1 kΩ direnç üzerinden geçirilmesi
b) şematik gösterim



Şekil 4.22. 1 kΩ direnç üzerindeki voltajın jete uzaklık grafiği

Helyum gazı ile çalışan kiloherz plazma kalemin aynı (6 l/dk) gaz akış hızında farklı uygulama voltajı ve farklı uygulama frekanslarında çektiği akım değerleri yüksek akım probu ile Şekil 4.23.'te verildiği gibi ölçülmüştür. Yüksek akım probu herhangi bir kablodan geçen akımı doğrudan ölçebilmektedir. Bu nedenle jet üretilirken, kiloherz plazma kaleme gelen yüksek voltaj kablolarından pozitif kutba yüksek akım probu bağlanarak akım ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.2. ve Çizelge 4.3.'te verilmiştir.



Şekil 4.23. Kiloherertz plazma kalem akım değişimi

Çizelge 4.3. Sabit uygulama frekansı (15 kHz) ve gaz akış hızında (6 l/dk) uygulama voltajı ile kiloherertz plazma kalem akım değişimi

Uygulama voltajı (kV)	6	12	18
Akım (A)	0,402	0,518	0,616

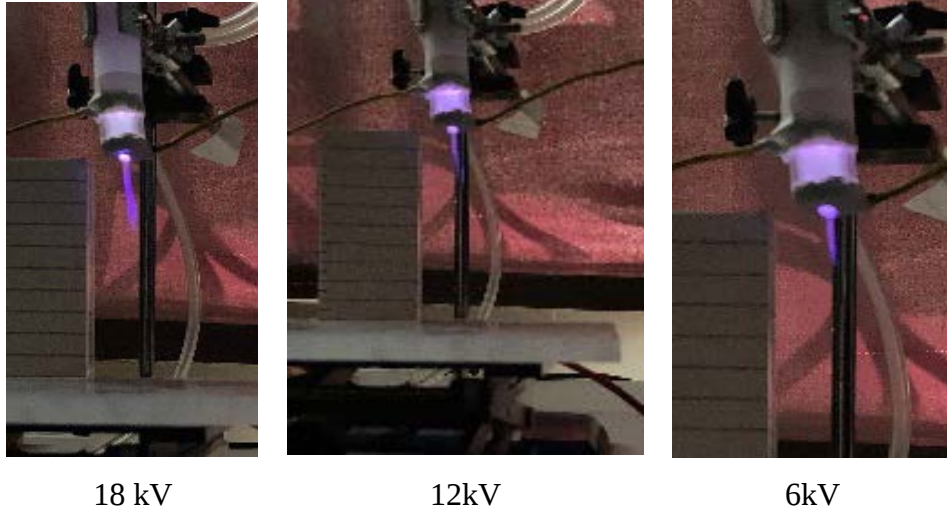
Çizelge 4.4. Sabit uygulama voltajı (18 kV) ve gaz akış hızında (6 l/dk) uygulama voltajı frekansı ile kiloherertz plazma kalem akım değişimi

Uygulama voltajı frekansı (kHz)	13	17	20
Akım (A)	0,616	0,465	0,325

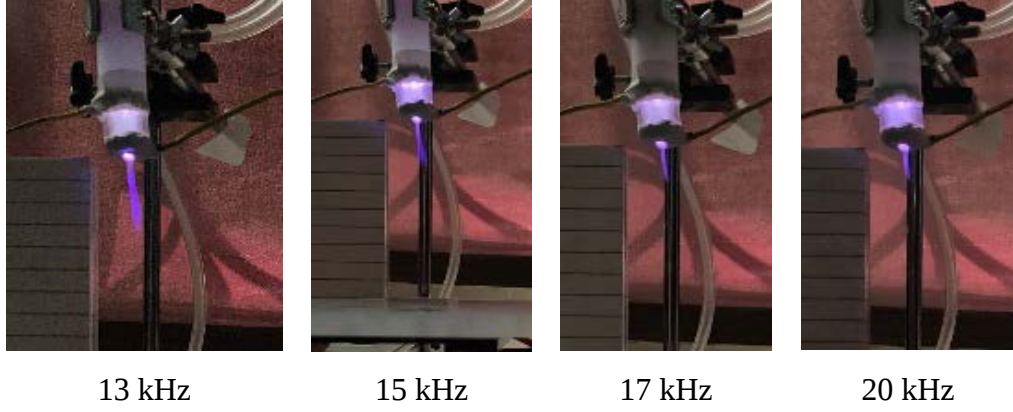
Çizelge 4.3.'den görüldüğü gibi uygulama voltajı arttırıldığında kiloherertz plazma kalemin taşıdığı akım artmaktadır. Bu beklenen bir sonuçtur. Uygulama voltajı arttığında iyonlaşan helyum atom sayısı ve elektron sayısı artmaktadır. Bu sonucun diğer önemli tarafı üretilen kiloherertz plazma kalemin elektrik alan ile çalışan (electrically driven) plazma üretim mekanizması olduğunu ortaya koymasındır. Çizelge 4.4.'teki sonuçta yüksek frekansta daha düşük akım görülmektedir. Bu sonuç ilk olarak materyal ve metot kısmında güç kaynağı için verilen Şekil 3.5. ile analiz edilmelidir. Görüldüğü gibi kullanılan güç kaynağında yüksek frekanslarda çıkış voltajı düşmektedir. Yine de ortalama değer üzerinden bakılırsa yüksek frekansta düşük akımın çarpışma sayısı ile ilişkili olduğu söylenebilir. Buradaki

sonuçlardan, maksimum deşarj akımı 0.616 A olarak düşünülürse Şekil 4.22.'den yapılan hesaplama ile elde edilen jet akımı olan 650 μ A'den 1000 kat fazla olduğu görülmektedir. Bu beklenen sonuçtur. Deşarj plazması, jetten çok daha yüksek akım taşımaktadır.

Helyum gazı kullanımında, kilohertz plazma kalem üzerine farklı uygulama voltajı değerleri ve frekansları uygulandığında jet uzunluk değişimi de incelenmiştir. Şekil 4.24.'te 13 kHz sabit uygulama frekansında farklı uygulama voltajlarında helyum kilohertz plazma kalem jet uzunluğu değişimi, Şekil 4.25.'te ise 18kV sabit uygulama voltajında farklı uygulama frekanslarında helyum gazı kilohertz plazma kalem jet uzunluğu değişimleri verilmiştir. Sonuçların Çizelge 4.3. ve Çizelge 4.4. ile uyumlu olduğu görülmektedir. Yüksek voltajda daha uzun jet uzunluğu elde edilirken yüksek frekansta daha kısa jet uzunluğu elde edilmektedir. Şekil 3.6.'da görüldüğü gibi frekans arttıkça kullanılan güç kaynağının çıkış voltajı bir değere kadar artmakta, belirli bir değerden sonra ise düşmektedir. Buna bağlı olarak, Şekil 4.25.'te sabit uygulama voltajı ve sabit gaz akış hızında frekans arttırıldığında oluşan plazma jetin boyunun kısalması, çıkış voltajının frekansa bağlı olarak düşmesinden kaynaklanmaktadır.



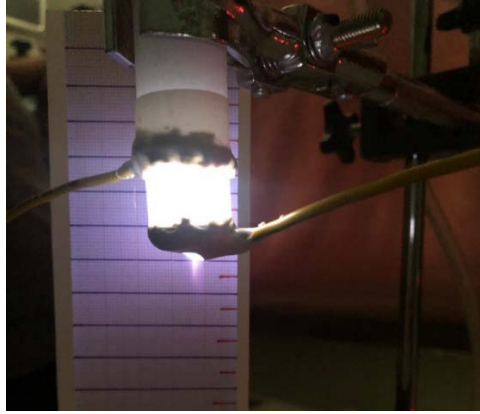
Şekil 4.24. Sabit uygulama voltajı frekansında (15 kHz) uygulama voltajı ile kilohertz plazma kalem jet uzunluğu değişimi



Şekil 4.25. Sabit uygulama voltajı (18 kV) değerinde uygulama voltajı frekansı ile kilohertz plazma kalem jet uzunluğu değişimi

4.2. Argon Kilohertz Plazma Kalem

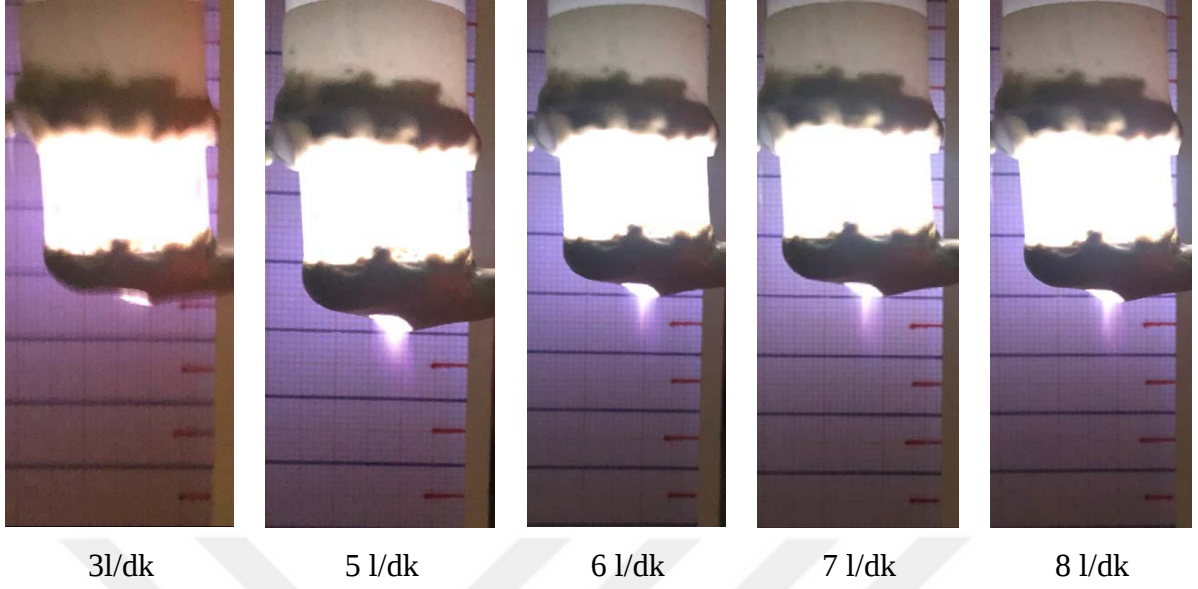
Kilohertz plazma kalemin üst cam borusundan yüksek basınç argon gazı gönderildikten sonra elektrotlar arasına yüksek voltaj uygulandığında yine elektrotlar arasında dielektrik bariyer deşarj oluşurken aynı zamanda atmosfer ortamında da plazma jet üretilmektedir. Şekil 4.26.'da argon gazı ile üretilen kilohertz plazma jet fotoğrafı verilmiştir. Jet mavi-beyaz renkte oluşmaktadır. Elektrotlar arasında oluşan plazma da bu renklere yakındır. Puls DC plazma kalem ile argon gazında jet üretilmemiştir. Bu açıdan kilohertz plazma kalem farklı gazlar ile jet üretilmesi açısından farklılık göstermektedir. Bununla birlikte azot gazı ile de kilohertz plazma kalem üretilmesi denenmiştir fakat sebepleri yukarıda tartışıldığı gibi üretilmemiştir. Argon gazı kilohertz plazma kalem jetinin her zaman helyum gazından daha kısa olduğu görülmüştür.



Şekil 4.26. Argon gazı ile üretilen kilohertz plazma jet

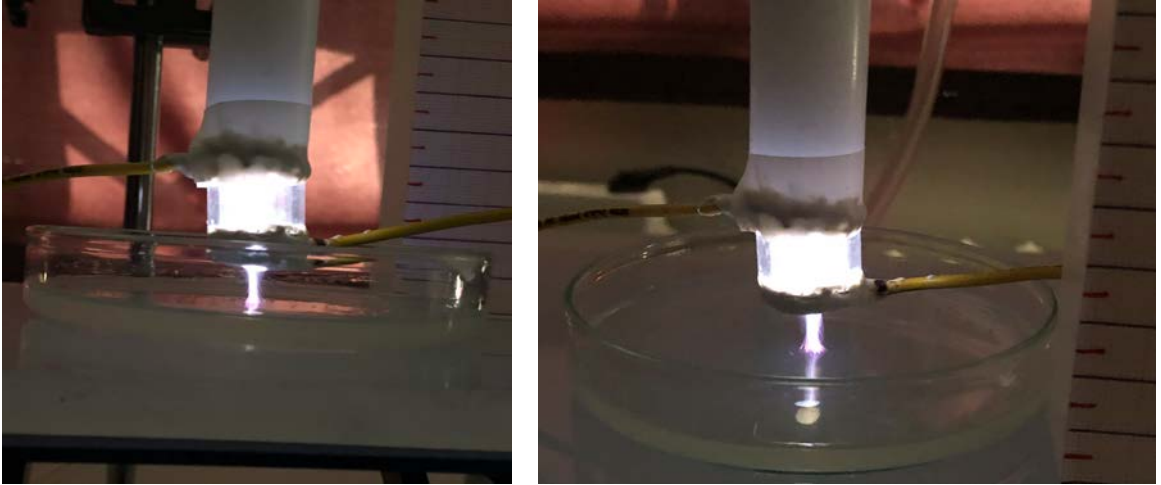
4.2.1. Argon kilohertz plazma kalem jet uzunluğunun gaz akış hızı ile değişimi

Gaz akış hızı kilohertz plazma kalem jet uzunluğunu belirleyen en önemli parametrelerden birisidir. Bununla birlikte kilohertz plazma kalem jetinin fiziksel özelliklerinin belirlenmesi açısından önemlidir. Bu nedenle kilohertz plazma kalem üzerine farklı gaz akış hızlarında argon gazı gönderilmiştir. Farklı gaz akış hızlarında argon gazı kilohertz plazma kalem jetinin uzunluğu Şekil 4.27.’de görüldüğü gibi değişmiştir. Argon gazı ile üretilen jet, helyum gazı kilohertz plazma kalem jetinden farklı olarak ipliksi modda oluşmamış, doğrudan yaygın modda oluşmuştur. Ancak 4 l/dk gaz akış hızında dış elektrik bağlantısına doğru hareket eğilimindedir. Bu sonuç da kilohertz plazma kalem ile üretilen jetin elektrik alan ile çalışan plazma olduğunu göstermektedir. Helyum kilohertz plazma kalem jetinde meydana gelen gaz akış hızı ile jet uzunluğunun şiddetli değişimi, argon gazında çok fazla gözlenmemiştir. Başka bir deyişle gaz akış hızı argon gazı kullanılarak elde edilen kilohertz plazma kalem jetinde etkili bir değişken değildir. Bununla birlikte argon gazı kilohertz plazma jeti çok daha kısa oluşmaktadır. Ancak Şekil 4.28.’de farklı sonuç görülmektedir. Argon ya da helyum gazı bir yüzey üzerinde uygulama yapıldığında uzama eğilimindedir. Her iki gaz ile üretilen kilohertz plazma kalem jetler lokal elektrik alan taşıdıkları için bir düzeyde topraklanma eğilimine geçerek uzamaktadır. Bu nedenle kilohertz plazma kalemin jet uzunluğu yalnızca gaz akış hızlarına bağlı değil uygulamak istenilen yüzeye uzaklığına da bağlıdır. Ek olarak, kilohertz plazma jet herhangi bir materyale yaklaştığında yalnızca uzama şeklinde fiziksel olarak bir değişime uğramamakta, aynı zamanda plazma jetin türü ve oluşum mekanizması da değiştirmektedir.



Şekil 4.27. Argon gazı ile kilohertz plazma kalem jet uzunluğunun gaz akış hızı ile değişimi

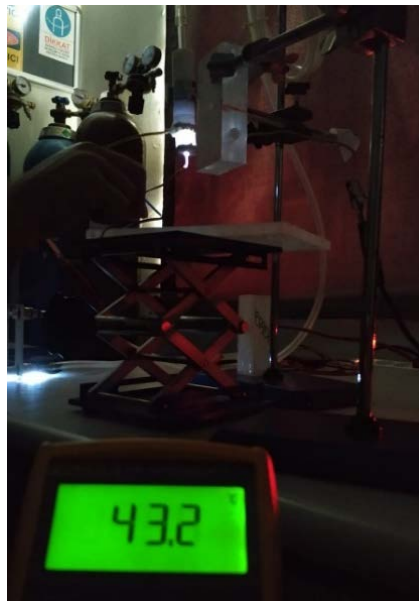
Bilindiği gibi plazma içerisinde elektron çığı (avalanche) olayı townsend ve streamer olarak iki şekilde gerçekleşmektedir. Glow deşarjlar townsend rejiminde iyonlaşmayı başlatırlar. Kilohertz plazma kalemin elektrotları arasındaki plazma dielektrik bariyer deşarj plazmadır ve glow deşarjdır. Ancak üretilen jet 2. Bölüm’de verildiği gibi henüz tanımlanmayan mekanizma ile plazma üretmektedir. Bu nedenle plazma jetler bir plazma türü olarak adlandırılır. Kilohertz plazma kalem Şekil 4.28.’de olduğu gibi bir nesneye (yani ikinci bir elektroda) doğru uzayıp temas ettiğinde streamer deşarja dönüşmektedir. Şekil 4.28.’de materyala temas noktalarında streamer deşarjlar gözükmemektedir. Bilindiği gibi streamer deşarj ikinci bir elektroda ulaştığında spark deşarj olarak adlandırılır. Bu nedenle kilohertz plazma kalem jeti ikinci elektrot görevi yapacak bir nesneye yaklaştığında jet plazma türünden spark plazma türüne geçmektedir. Bu geçiş sürecinde plazma içi reaksiyonların mekanizması jet oluşum sırasında meydana gelen mekanizmadan farklıdır.



Şekil 4.28. Argon gazı kilohertz plazma kalem jet uzunluğunun biyolojik uygulamalarda artışı

4.2.2. Argon kilohertz plazma kalem sıcaklık analizi

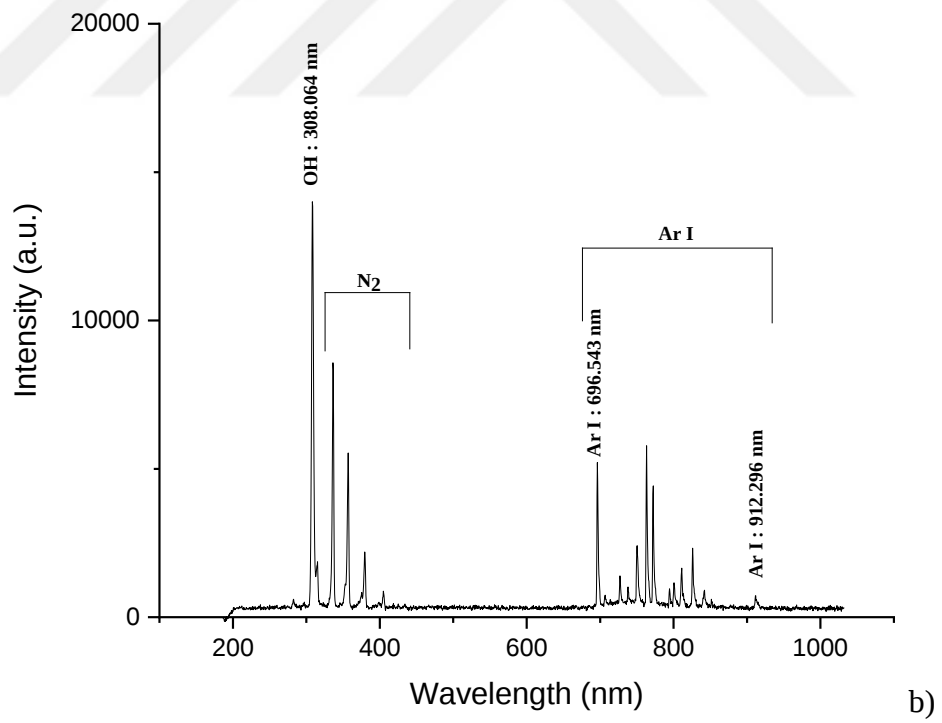
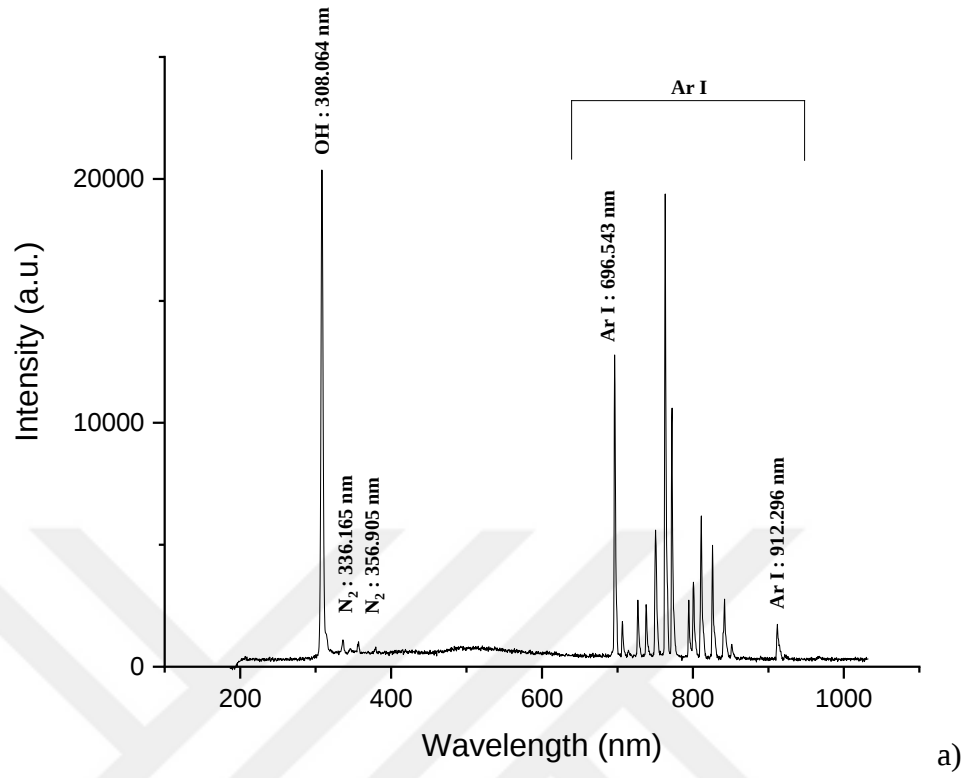
Argon gazı kilohertz plazma jet sıcaklığı Şekil 4.29.'da görüldüğü gibi termocift ile ölçülmüştür. Sıcaklık 40 derece civarında bulunmuştur. Ancak aynı jet kızılötesi termometre ile oda sıcaklığı civarında olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.29. Argon kilohertz plazma jet sıcaklık ölçümü

4.2.3. Argon kilohertz plazma kalem spektroskopik analizi

Şekil 4.30.'da argon gazı kilohertz plazma kalem üretiminde deşarj bölgesinden ve jet (post-deşarj) bölgesinden alınan optik emisyon spektrumları verilmektedir. Jet, 308 nm' de OH bandının geçişlerine ait olan önemli bir UV radyasyonu üretmektedir. Bu çizginin dışında argon ve azot reaksiyonlarından kaynaklanan geçişler oluşmaktadır. Çizelge 4.5. ve Çizelge 4.6.'da argon gazı plazmasında gözlemlenen atomik ve moleküler geçişlere ait verilmiştir. Çizelge 4.7.'de argon gazı plazmasında meydana gelen temel kimyasal reaksiyonlar verilmiştir. Helyum gazı kilohertz plazma jet ile argon gazı kilohertz plazma jeti arasında en önemli fark radikal OH ve radikal oksijen üretim farklarıdır. Argon gazı kilohertz plazma kalem jeti çok daha fazla miktarda radikal OH üretmektedir. Bununla birlikte radikal oksijen üretmemektedir.



Şekil 4.30. Argon gazı kilohertz plazma kalemin a) deşarj bölgesinden b) jet (post-deşarj) bölgesinden alınan spektrumlar

Çizelge 4.5. Argon gazı plazmasında gözlemlenen atomik geçişlere ait bilgiler (NIST, 2021)

Atom/ İyon	Dalgaboyu (nm)	Geçiş	İstatistiksel Ağırlık (g _i)	Geçiş Olasılığı (A _{ij})	Alt seviye enerjisi (eV)	Üst seviye enerjisi (eV)
Ar I	696.5431	$3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{1/2}) 4p^2 [1/2] 1$ $3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4s^2 [3/2]^{\circ} 2$	3	6.4e+06	11.54835442	13.32785705
Ar I	727.0664	$3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4d^2 [7/2]^{\circ} 3$ $3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4p^2 [5/2] 3$	7	1.1e+05	13.07571571	14.780512
Ar I	751.4652	$3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4p^2 [1/2] 0$ $3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4s^2 [3/2]^{\circ} 1$	1	4.0e+07	11.62359272	13.27303810
Ar I	763.5106	$3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4p^2 [3/2] 2$ $3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4s^2 [3/2]^{\circ} 2$	5	2.45e+07	11.54835442	13.17177770
Ar I	772.3761	$3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4p^2 [3/2] 1$ $3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4s^2 [3/2]^{\circ} 2$	3	5.2e+06	11.54835442	13.15314387
Ar I	794.8176	$3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{1/2}) 4p^2 [3/2] 1$ $3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{1/2}) 4s^2 [1/2]^{\circ} 0$	3	1.86e+07	11.72316039	13.28263902
Ar I	801.4786	$3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4p^2 [5/2] 2$ $3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4s^2 [3/2]^{\circ} 2$	5	9.3e+06	11.54835442	13.09487256
Ar I	826.4522	$3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4p^2 [1/2] 1$ $3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{1/2}) 4s^2 [1/2]^{\circ} 1$	3	1.53e+07	11.82807116	13.32785705
Ar I	842.4648	$3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4p^2 [5/2] 2$ $3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4s^2 [3/2]^{\circ} 1$	5	2.15e+07	11.62359272	13.09487256
Ar I	912.2967	$3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4p^2 [1/2] 1$ $3s^2 3p^5 ({}^2P^{\circ}_{3/2}) 4s^2 [3/2]^{\circ} 2$	3	1.89e+07	11.54835442	12.90701530

Çizelge 4.6. Argon gazı plazmasında gözlemlenen moleküler geçişlere ait bilgiler

Molekül/İyon	Dalgaboyu (nm)	Geçiş
OH	308.064	$\text{OH}(\text{A}^2\Sigma^+ - \text{X}^2\Pi)$
N_2	337.10	$\text{C}^3\Pi_u (v=0) - \text{B}^3\Pi_g (v=0)$
N_2	357.70	$\text{C}^3\Pi_u (v=0) - \text{B}^3\Pi_g (v=1)$
N_2	380.40	$\text{C}^3\Pi_u (v=0) - \text{B}^3\Pi_g (v=2)$
N_2	405.80	$\text{C}^3\Pi_u (v=0) - \text{B}^3\Pi_g (v=3)$

Çizelge 4.7. Argon gazında meydana gelen temel reaksiyonlar (Schmidt-Bleker, 2016)

$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}$	$\text{Ar}(4p) \rightarrow \text{Ar}(4s, ^1P_1)$
$e + \text{Ar} \rightarrow 2e + \text{Ar}^+$	$\text{Ar}(3d) \rightarrow \text{Ar}(4p)$
$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}(4s, ^3P_2)$	$\text{Ar}_2^+ + e \rightarrow \text{Ar} + \text{Ar}(4p)$
$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}(4s, ^3P_1)$	$\text{Ar}^+ + \text{Ar} + \text{M} \rightarrow \text{Ar}_2^+ + \text{M}$
$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}(4s, ^3P_0)$	$2\text{Ar}(4s, ^3P_2) \rightarrow \text{Ar}^+ + \text{Ar} + e$
$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}(4s, ^1P_1)$	$\text{Ar}(4p) + \text{Ar} + \text{M} \rightarrow \text{Ar}_2(\text{a}^3\Sigma_u^+) + \text{M}$
$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}(4p)$	$\text{Ar}(3d) + \text{Ar} + \text{M} \rightarrow \text{Ar}_2(\text{a}^3\Sigma_u^+) + \text{M}$
$e + \text{Ar} \rightarrow e + \text{Ar}(3d)$	$\text{Ar}(4s) + \text{Ar} + \text{M} \rightarrow \text{Ar}_2(\text{a}^3\Sigma_u^+) + \text{M}$
$\text{Ar}(4s, ^3P_1) \rightarrow \text{Ar}$	$\text{Ar}_2(\text{a}^3\Sigma_u^+) + \text{Ar} \rightarrow 3\text{Ar}$
$\text{Ar}(4s, ^1P_1) \rightarrow \text{Ar}$	$\text{Ar}_2(\text{a}^3\Sigma_u^+) \rightarrow 2\text{Ar}$
$\text{Ar}(4p) \rightarrow \text{Ar}(4s, ^3P_2)$	$e + \text{N}_2 \rightarrow e + \text{N}_2$
$\text{Ar}(4p) \rightarrow \text{Ar}(4s, ^3P_1)$	$e + \text{N}_2 \rightarrow e + \text{N}_2 (\text{vib/rot})$
$\text{Ar}(4p) \rightarrow \text{Ar}(4s, ^3P_0)$	$e + \text{N}_2 \rightarrow e + \text{N}_2(\text{B}^3\Pi_g)$
$e + \text{N}_2 \rightarrow e + \text{N}_2(\text{W}^3\Delta_u)$	$\text{Ar}^* + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ar} + \text{OH} + \text{H}$
$e + \text{N}_2 \rightarrow e + \text{N}_2(\text{A}^3\Sigma_u^+)$	$\text{Ar}^* + \text{O}_3 \rightarrow \text{Ar} + \text{O}_2 + \text{O}^*$
$e + \text{N}_2 \rightarrow e + \text{N}_2(\text{B}^3\Sigma_u^-)$	$\text{Ar}^* + \text{N}_2^* \rightarrow \text{Ar} + 2\text{N}$
$e + \text{N}_2 \rightarrow e + \text{N}_2(\text{a}^1\Sigma_u^-)$	$\text{Ar}^* + \text{NO} \rightarrow \text{Ar} + \text{N} + \text{O}$
$e + \text{N}_2 \rightarrow e + \text{N}_2(\text{a}^1\Pi_g)$	$\text{Ar}^* + \text{NO}_2 \rightarrow \text{Ar} + \text{NO} + \text{O}$
$e + \text{N}_2 \rightarrow e + \text{N}_2(\text{w}^1\Delta_u)$	$\text{Ar}^* + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{Ar} + \text{NO} + \text{N}$
$e + \text{N}_2 \rightarrow e + \text{N}_2(\text{C}^3\Pi_u)$	$\text{Ar}^* + \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{Ar} + \text{N}_2^* + \text{O}$
$e + \text{N}_2 \rightarrow e + 2\text{N}$	$\text{Ar}_2^* + \text{O}_2 \rightarrow \text{Ar} + 2\text{O}$

Çizelge 4.7. Argon gazında meydana gelen temel reaksiyonlar (Schmidt-Bleker, 2016) (devam)

$e + N_2 \rightarrow 2e + N_2^+$	$Ar_2^* + N_2 \rightarrow 2Ar + N_2^*$
$e + O_2 \rightarrow O + O^-$	$Ar_2^* + N_2 \rightarrow 2Ar + 2N$
$e + O_2 \rightarrow e + O_2$	$Ar_2^* + H_2O \rightarrow 2Ar + OH + H$
$e + O_2 \rightarrow e + O_2(vib/rot)$	$Ar_2^* + O_3 \rightarrow 2Ar + O_2 + O$
$e + O_2 \rightarrow e + O_2(a^1\Delta_g)$	$Ar_2^* + NO \rightarrow 2Ar + N + O$
$e + O_2 \rightarrow e + O_2(b^1\Sigma_g^+)$	$Ar_2^* + NO_2 \rightarrow 2Ar + NO + O$
$e + O_2 \rightarrow e + O(c^1, C^3, A^3)$	$Ar_2^* + N_2O \rightarrow 2Ar + N_2 + O$
$e + O_2 \rightarrow e + 2O$	$2 N_2^* \rightarrow N_2^* + N_2$
$e + O_2 \rightarrow e + O + O(^1D)$	$N_2^* + O_2 \rightarrow 2O + N_2$
$e + O_2 \rightarrow 2e + O_2^+$	$O_2^* + O_3 \rightarrow O + 2O_2$
$e + O_2 \rightarrow e + O + O^+$	$N_2^* + N \rightarrow N_2 + N$
$e + H_2O \rightarrow e + H + OH$	$N_2^* + O_2 \rightarrow N_2O + O$
$e + H_2O \rightarrow e + O(^1D) + H_2$	$N_2^* + N_2O \rightarrow 2N_2 + O$
$e + H_2O \rightarrow e + H_2O^+$	$N_2^* + N_2O \rightarrow NO + N + N_2$
$e + H_2O \rightarrow H_2 + O^-$	$N_2^* + O \rightarrow O^* + N_2$
$e + H_2O \rightarrow H^- + OH$	$N_2 + Ar \rightarrow N_2 + Ar$
$e + H_2O \rightarrow OH^- + H$	$N_2^* + N_2 \rightarrow 2N_2$
$Ar^* + Ar + M \rightarrow Ar_2^* + M$	$N_2^* + O_2 \rightarrow N_2 + O_2^*$
$Ar_2^* + Ar \rightarrow 3Ar$	$O_2^* + N_2^* \rightarrow 2O + N_2$
$Ar_2^* \rightarrow 2Ar$	$N + O_2 \rightarrow NO + O$
$Ar^* + O_2 \rightarrow Ar + 2O$	$NO_2 + N \rightarrow N_2O + O$
$Ar^* + N_2 \rightarrow Ar + N_2^*$	$NO_2 + N \rightarrow 2NO$
$Ar^* + N_2 \rightarrow Ar + 2N$	$O + N + N_2 \rightarrow N_2 + NO$
$O + N + M \rightarrow NO + M$	$2OH + M \rightarrow H_2O_2 + M$
$3N \rightarrow N + N_2$	$H_2O_2 + OH \rightarrow H_2O + HO_2$
$2N + Ar \rightarrow N_2 + Ar$	$NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$
$HNO + O \rightarrow OH + NO$	$NO + OH + M \rightarrow HNO_2 + M$
$N + NO \rightarrow N_2 + O$	$NO + HO_2 \rightarrow NO_2 + OH$
$O + O_2 + M \rightarrow O_3 + M$	$OH + HNO_2 \rightarrow NO_2 + H_2O$
$O + OH \rightarrow H + O_2$	$NO_2 + O + M \rightarrow NO_3 + M$

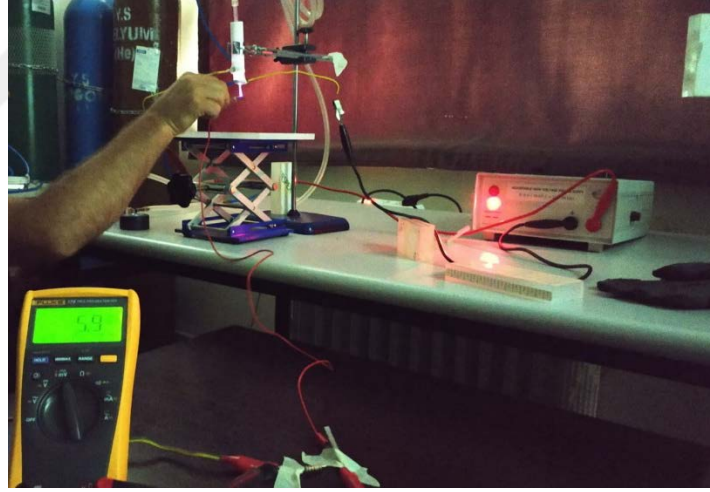
Çizelge 4.7. Argon gazında meydana gelen temel reaksiyonlar (Schmidt-Bleker, 2016) (devam)

$O + O_3 \rightarrow 2O_2$	$OH + HNO_3 \rightarrow NO_3 + H_2O$
$O + HO_2 \rightarrow OH + O_2$	$NO_2 + NO_3 + M \rightarrow N_2O_5 + M$
$2O + M \rightarrow O_2^* + M$	$N_2O_5 + M \rightarrow NO_2 + NO_3 + M$
$O + NO_2 \rightarrow NO + O_2$	$2H + M \rightarrow H_2 + M$
$NO + O + M \rightarrow NO_2 + M$	$NO_2 + O_3 \rightarrow NO_3 + O_2$
$O^* + O \rightarrow 2O$	$H + NO + M \rightarrow HNO + M$
$O^* + O_2^* \rightarrow O + O_2$	$HNO_2 + O \rightarrow OH + NO_2$
$O^* + O_2 \rightarrow O + O_2^*$	$HNO_2 + O_3 \rightarrow HNO_3 + O_2$
$O^* + O_3 \rightarrow 2O + O_2$	$HO_2 + NO + M \rightarrow HNO_3 + M$
$O^* + O_3 \rightarrow 2O_2$	$N^* + O \rightarrow NO + N$
$O^* + N_2 \rightarrow O + N_2$	$O_2 + O_3^* \rightarrow O_3 + O$
$O^* + N_2 + M \rightarrow N_2O + M$	$2O_2^* \rightarrow 2 O_2$
$O^* + N_2O \rightarrow N_2 + O_2$	$O_2^* + M \rightarrow O_2 + M$
$O^* + N_2O \rightarrow 2NO$	$H + O_3 \rightarrow OH + O_2$
$O^* + NO \rightarrow O + NO$	$OH + H_2O \rightarrow O_2 + H_2O$
$O^* + NO_2 \rightarrow O_2 + NO$	$OH + O_3 \rightarrow HO_2 + O_2$
$O^* + H_2O \rightarrow 2OH$	$OH + NO_2 + M \rightarrow HNO_3 + M$
$O^* + M \rightarrow O + M$	$H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$
$N + OH \rightarrow NO + H$	$2HO_2 + M \rightarrow H_2O_2 + O_2 + M$

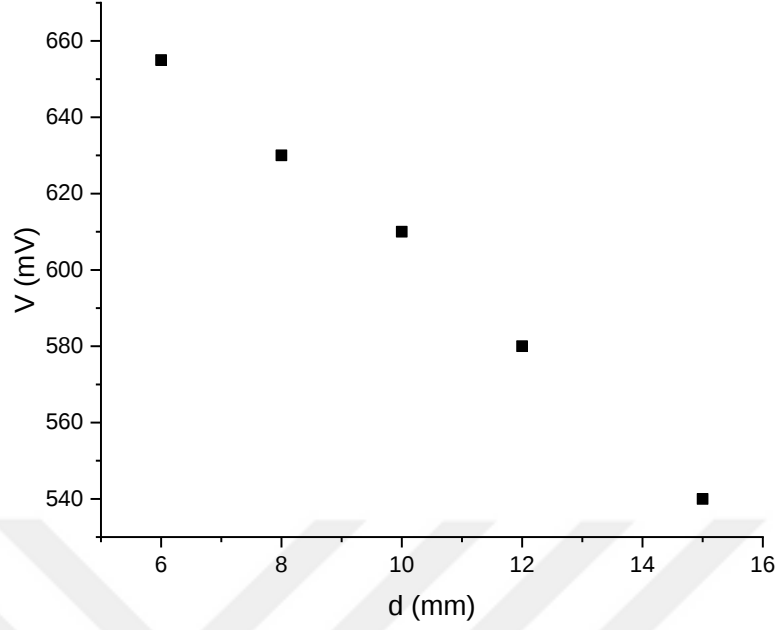
Argon kilohertz plazma kalem, helyum plazma kaleminden farklı olarak azot iyonu (N_2^+) üretmemektedir. Argonun önemli metastabili ($4^3P_2^o$) 11.6 eV enerjiye sahipken azotun iyonlaşma enerjisi 15.58 eV'tur. Kilohertz plazma kalemde baskın reaksiyon mekanizması penning iyonizasyonudur. Dolayısıyla argonun metastablinin enerjisi, azotun iyonlaşma enerjisinden daha küçük olduğu için azot iyonu görülmemektedir. Buna ek olarak, bir miktar enerjinin de azotun ayrışma reaksiyonu için gereklidir. Ancak argon plazmasında Şekil 4.30.'da görüldüğü gibi yaklaşık 11 eV civarındaki N_2 (C-B) geçişleri görülebilmektedir. Bunun yanı sıra argon plazma kalemde helyum plazma kaleminden daha düşük O ve daha yüksek OH görülmesi de yüksek enerjili metastabillerin olmaması ile açıklanabilir.

4.2.4. Argon kilohertz plazma kalem elektriksel analiz

Kilohertz plazma kalemin fiziksel dinamiğinin ortaya konulması literatürde var olan plazma jetlerin fiziksel dinamiklerden hangisine ait olduğunun belirlenmesi açısından önemlidir. Bu nedenle Şekil 4.31.'de verilen sistem argon gazı kilohertz plazma kalem jeti için de kurulmuştur. Bu sistemde 1 kiloohm'luk direnç üzerine bağlanan bir kablo, plazma jete değdirilmiştir. Direncin diğer ucu toprak hattına bağlanmış ve direnç üzerinden kilohertz plazma kalemin ürettiği elektronların geçişi sağlanmıştır. Bu sırada direnç üzerindeki voltaj ölçülmüştür. Plazma jete değen kablonun jete olan uzaklığı ile voltmetre üzerinden okunan voltajların grafiği Şekil 4.32.'de verilmiştir. Görüldüğü gibi jet elektriksel olarak aktiftir ve jete yaklaştıkça elektron sayısı artmaktadır. Bu sonuç üretilen kilohertz plazma jetin elektrik alan ile çalışan jet mekanizması modeline yakın olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.31. Argon gazı kilohertz plazma kalem direnç üzerinden akım geçişi



Şekil 4.32. Argon gazının 1 kiloohm'luk direnç üzerinden geçişi ile elde edilen akım değişimi

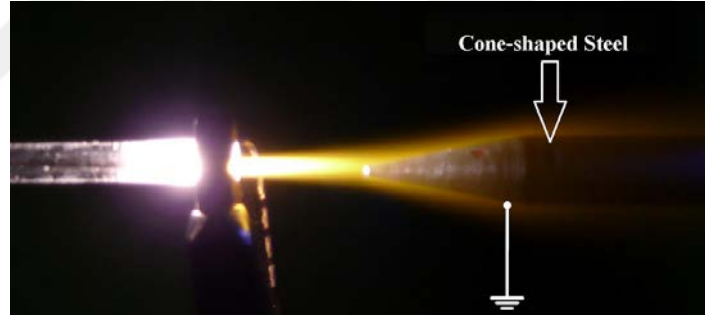
4.4. Kiloherertz Plazma Kalemin Farklı Boyutlarda İncelenmesi

1 cm üzerindeki uzunluklara sahip deşarj odalarında helyum deşarjı oluşturulup atmosfer ortamına çıkarılmak istendiğinde bir jet elde edilememiştir. Argon ve azot gazı için de aynı sonuçlar ile karşılaşılmasıdır. Deşarj odası boyutları jet üretmek için önemli bir parametredir. 1 cm'den daha kısa aynı çapta deşarj odasından helyum ve argon plazma jetleri üretilmiştir. Deşarj odası hacmi plazma jetin oluşmasında önemli bir bölgedir. Tüm başlangıç reaksiyonları burada meydana gelmektedir. Yukarıda kilohertz plazma kalem incelemelerinde çıkış ağzı çap değişiminin jet yapısında değişimi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda deşarj odasında atmosfer ortamından fazlaca azot bulunması jet yapısını etkilemektedir. Büyük hacim deşarj odasında daha fazla azot depolanabilmektedir. Her ne kadar üst borudan helyum ya da argon bu bölgeye yüksek basınçta sokulsa da deşarj odasındaki azotu yeterince itememektedir. Bu nedenle deşarj odasında yeterli argon ya da helyum depolanamazsa jet oluşmamaktadır. Azot gazı ile kilohertz plazma kalem çalışmalarında jet üretilmemesinin bir sebebi de budur. Her ne kadar azot iyonlaşma

enerjisinin yüksek olmasının etkisi olsa da kilohertz plazma kalemde jet üretiminin deşarj odasında helyum ve argon gibi yeterli taşıyıcı gazın bulunması gerektiği görülmektedir.

4.5. Kilohertz Plazma Kalemin Jetinin Bir İletken Varlığında Davranışı

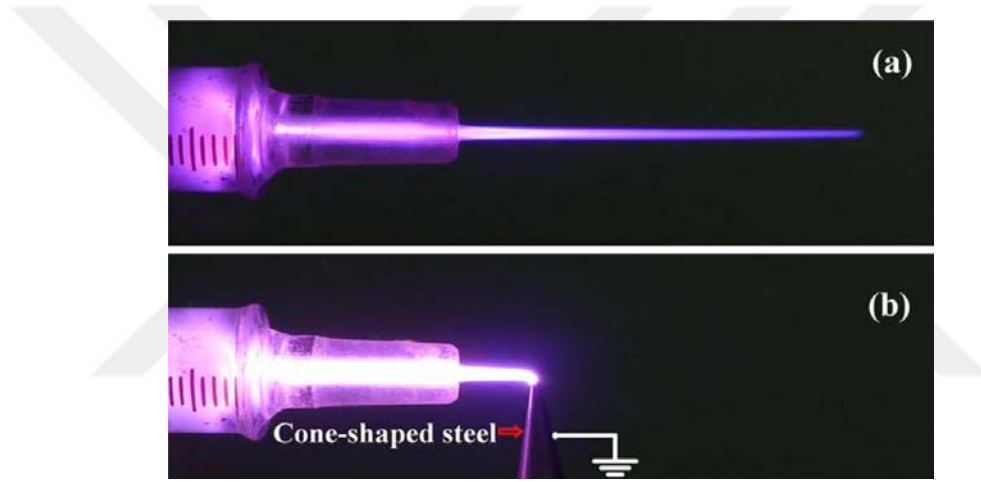
Kilohertz plazma kalem ile üretilen jetin bir iletken varlığında davranışını incelemek için kilohertz plazma kalemin çıkış ağzının (nozzle) birkaç milimetre uzağına bakır plakalar konumlandırılmıştır ve plakalardan biri topraklanmıştır. Literatür incelendiğinde, plazma kaleme enerji verilmesi durumunda iki olasılık beklenmektedir. Bunlardan biri jetin herhangi bir yöne sapmadan bir doğrultuda yayılmasıdır. Böyle bir olasılık için literatürde yapılan çalışmalardan bir örnek Şekil 4.33.'de verilmiştir (Xian vd., 2012).



Şekil 4.33. Plazma jet karşısına yerleştirilmiş topraklanmış konik çelik (Xian vd., 2012)

Şekil 4.33.'de görüldüğü gibi plazma jeti karşısına yerleştirilmiş topraklanmış konik çeliğin plazma jeti yayılımı üzerinde hiçbir etkisi olmamaktadır. Plazma, konik yapı üzerinden topraklanmış metal ile hiç etkileşime girmeden akmaya devam etmektedir. Bu sonuç jetin elektrik alan ile yönetilmediğini daha çok plazma reaksiyonları ile varlığını devam ettirdiğini göstermektedir. Yani plazma içerisinde gerçekleşen reaksiyonlar, plazma içerisinde oluşan lokal elektrik alanlardan daha baskındır. Eğer aksi durum olsaydı topraklanmış metal üzerine plazma içi elektrik yüklerinin akışı meydana gelirdi. Böyle bir olasılık için de literatürde yapılan çalışmalardan bir örnek Şekil 4.34.'de verilmektedir. Bu durumda, çıkış ağzına (nozzle) yakınına topraklanmış konik bir çelik konumlandırıldığında

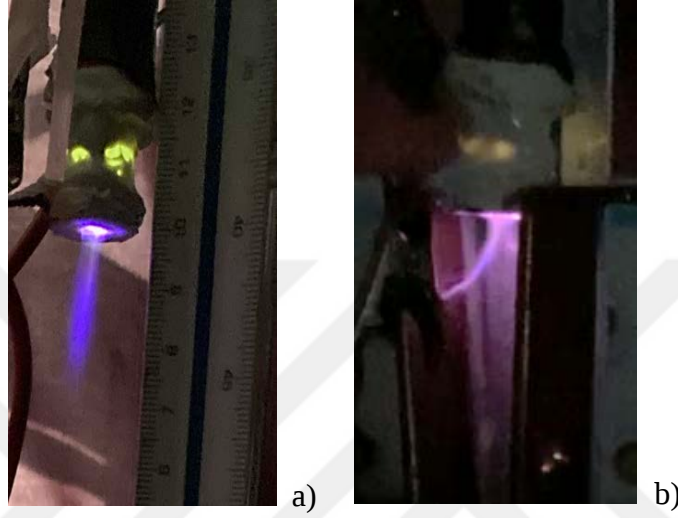
plazma jet, Şekil 4.34. (b)'de görüldüğü gibi konik çeliğe doğru yönelmekte ve plazma yayılımı sonlanmaktadır. Bu sonuç da oluşan plazma jetin elektriksel olarak aktif olduğu yani elektrik alan ile çalışan jet mekanizması görüşü ile açıklanmaktadır (Xian vd., 2012). Başka bir deyişle jet, içerisinde lokal elektrik yükleri barındırmaktadır. Topraklanmış metal elektrot olmadığında Şekil 4.34. (a)'da olduğu gibi jet hiç sapmadan yayılmaktadır. Topraklanmış metal elektrot varlığında ise jet elektrota doğru yönelmekte ve elektrot üzerinde sonlanmaktadır. Bu durumda jet içindeki elektrik yükleri toprağa akma eğilimindedir.



Şekil 4.34. Helyum plazma jet: (a) Plazma jetin açık havada yayılması (b) topraklanmış konik bir iletkenin plazma jete yakın bir noktaya konumlandırılması durumunda plazma jet yayılımının sonlanması (Xian vd., 2012)

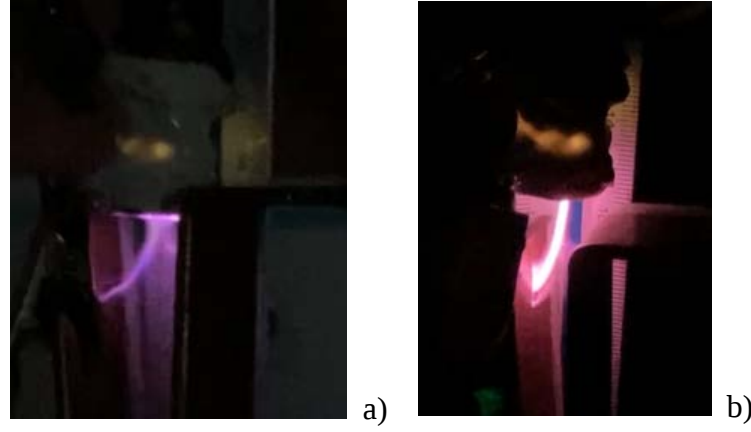
Şekil 4.34.'de gerçekleştirilen çalışma, kilohertz plazma kalem için de yapılmıştır. Laboratuvarında gerçekleştirilen çalışmalarda helyum gazı kullanılarak çalıştırılan kilohertz plazma kaleme ait görseller Şekil 4.35.'de verilmektedir. Kilohertz plazma jetin civarında herhangi bir iletken bulunmadığı durumda (Şekil 4.35.a) oluşan jet, açık havada herhangi bir yönelim olmaksızın tek bir doğrultuda yayılmaktadır. Ancak kilohertz plazma kalemin çıkış ağzının birkaç milimetre yakınına, topraklanmış bir bakır plaka yerleştirildiğinde ise plazma jetin plakaya doğru yöneldiği ve plakada sonlandığı gözlemlenmiştir (Şekil 4.35.b). Bu yönelim, plazma jete yakın konumlandırılan bakır plakanın, elektrik alan dağılımını ve dolayısıyla plazma yayılımını etkilediği şeklinde açıklanabilir. Başka bir deyişle üretilen

kilohertz plazma jet önemli miktarda lokal elektrik yükleri içermektedir ve jet varlığını bu yüklerin lokal elektrik alan etkileşimleri ile sürdürmektedir. Yani jet, elektrik alan ile çalışan bir jettir.



Şekil 4.35. Helyum kilohertz plazma jetin bakır plakaya yönelimi a) plazma jetin açık havada yayılımı b) bakır plaka varlığında plazma jetin davranışı

Kilohertz plazma kalem ile elde edilen jetin elektriksel olarak aktif olduğu sonucuna varıldıktan sonra, gaz akış hızının elektriksel aktiviteye bir katkısı olup olmadığı konusu üzerine de bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Helyum gaz akış hızı yaklaşık 2-3 l/dk olduğu durumda gözlenen Şekil 4.36.(a)'daki yönelimin, helyum gaz akış hızı 8 l/dk'ya çıkarılması durumunda daha da şiddetlendiği (Şekil 4.34.b) gözlemlenmiştir. Buna şu şekilde bir açıklama getirilebilir. Düşük gaz akış hızlarında jetin ipliksi yapıda olduğu deneylerde gözlemlenmişti. İpliksi yapıda yüklü parçacık yoğunluğunun yaygın yapıya nazaran daha az olduğu düşünülmektedir. Buna göre, gaz akış hızı arttıkça plazma içerisindeki yüklü parçacık yoğunluğunun arttığı ve yönelimin daha net ve şiddetli olduğu fikri oluşmaktadır.



Şekil 4.36. Helyum plazma jetin bakır plakaya yönelimi a) Gaz akış hızı 2-3 l/dk b) Gaz akış hızı 8 l/dk

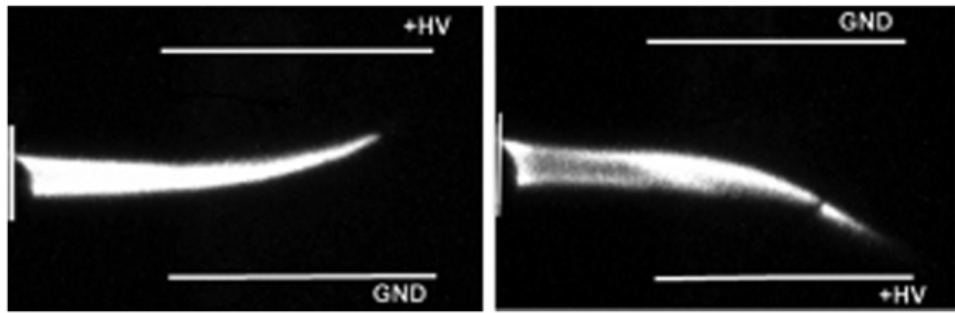
4.6. Kiloherertz Plazma Kalem Jetinin Harici Bir Elektrik Alanda Davranışı

Kiloherertz plazma kalem ile elde edilen plazma jet içerisindeki pozitif ve negatif yük yoğunluğu deneysel olarak incelenmiştir. Bunun için plazma kalem çıkış ağzından birkaç milimetre uzağa iki bakır plaka yerleştirilmiştir. Plazma kalemin jeti iki plakanın arasında kalacak şekilde konumlandırılmıştır. Plazma kaleme güç kaynağı ile kiloherertz voltaj verildikten ve plazma jet elde edildikten sonra bakır plakalara DC voltaj uygulanmıştır. Şekil 4.37.'te plazma jetin yakın olan elektrota yönelimi gösterilmektedir. Elde edilen bu sonuç, kiloherertz plazma kalem ile üretilen jet içerisinde yüklü parçacıkların ağırlıkta olduğu şeklinde yorumlanabilir. Ancak bakır plakalardan pozitif yüklü elektroda veya negatif yüklü elektroda yönelim etkindir denilememektedir. Jet milimetrik farkla hangi elektrota yakın ise o elektroda yönelmektedir. Burada çok daha önemli bir sonuç daha ortaya çıkmaktadır. Bakır plakalar arasına 1000 V civarında voltaj uygulanmıştır. Atmosferik ortamda plakalar arası uzaklık 1 mm olsa dahi havanın 1000 V ile iyonlaşması mümkün değildir. Ancak plakalar arasına plazma jet sokulduğunda plakalar arasında düzlemsel yeni plazma oluştuğu görülmektedir. Bu sonuç yine kiloherertz plazma jetin ciddi miktarda yüklü parçacık içerdiğini ve harici olarak uygulanan elektrik alana katkı yaptığını göstermektedir.



Şekil 4.37. Plazma jetin toprak elektrotuna yönelimi

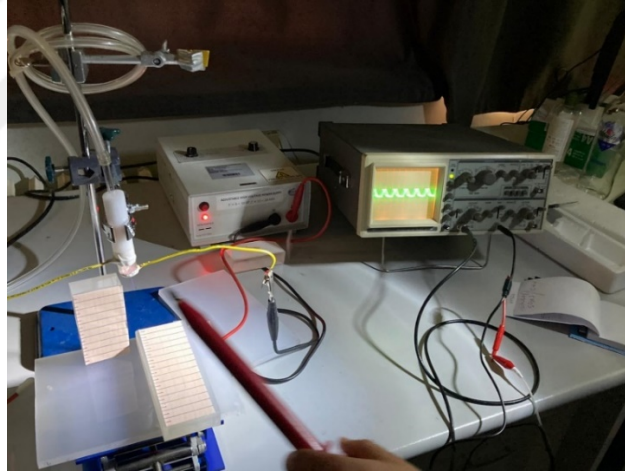
Şekil 4.35., 4.36. ve 4.37.'de elde edilen sonuçlar ile puls DC plazma jet ile elde edilen sonuçlarla kıyaslandığında kilohertz plazma jetin puls DC plazma jetten farklı olduğu da ortaya çıkacaktır. Literatürde puls DC plazma kalem ile elde edilen jetin, harici bir DC voltaj kullanıldığında pozitif elektrota yönelme eğiliminde olduğu ve plazma jetin toplam yükünün negatif olduğu bildirilmiştir (Merica-Bourdet vd., 2012). Puls DC plazma kalem ile elde edilen jetin harici bir elektrik alandaki yönelimi Şekil 4.38.'de verilmektedir.



Şekil 4.38. Puls DC Plazma Kalem ile elde edilen plazma jetin pozitif yöne eğilimi (Merica-Bourdet vd., 2012).

Şekil 4.38.'den görüldüğü gibi puls DC plazma kalem ile üretilen jet pozitif kutba yönelmekte fakat elektrot üzerinde sonlanmamaktadır. Bu genel plazma fizik teorileri

açısından bakıldığında elektrik alan etkisi az olan jet modeline yakındır. Puls DC plazma jetin açıklandığı çalışmalarda jetin oluşum mekanizmasının daha çok foto-iyonizasyon ile gerçekleştiği ve varlığını sürdürdüğü söylenmektedir. Yani plazma jette lokal elektrik alanların çok etkin olmadığı, reaksiyonlar sonucu oluşan metastabil helyum türlerinin ürettiği fotonların, önündeki nötr helyum atomlarını iyonlaştırdığı ve plazmanın bu mekanizma ile sürekliliğini devam ettirdiğini söylenmektedir. Bu sonuçlar kilohertz plazma kalemin puls DC plazma kalemden farklı olduğunu göstermektedir. Şekil 4.39.'da elde edilen veri de bunu desteklemektedir. Görüldüğü gibi yüksek voltaj probu jetin elektrik kablolarına kontak yapılmadığı halde osiloskopta düşük frekansta bir voltaj görülmektedir. Bu nedenle AC voltaj uygulandığında plazma jet bölgesinde elektromanyetik alan zaten bulunmaktadır. Dolayısıyla kilohertz plazma kalem ile üretilen jet, elektriksel olarak aktif plazma jet sınıfına girecektir.

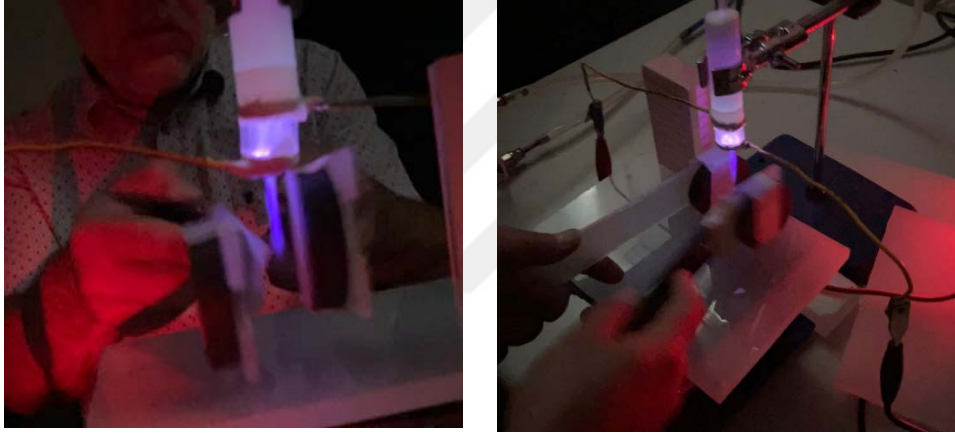


Şekil 4.39. Kilohertz plazma kalem civarında elektromanyetik alan

4.7. Kilohertz Plazma Kalemin Jetinin Harici Bir Manyetik Alanda Davranışı

Helyum gazında üretilen kilohertz plazma kalem jeti Şekil 4.40.'da görüldüğü gibi iki dairesel mıknatıs arasına yerleştirilmiştir. Mıknatıslar jete rahatlıkla yaklaştırebilmek için iki plastik tutucu üzerine sarılmıştır. Böylece elle kontrol edilebilmektedir. Jet ipliksi modda çalışırken hafif bir sapma gözlenmiş fakat bu sapmanın manyetik alanın alan etkisi ile mi olduğu yoksa gaz akışından kaynaklanan hava akımından mı olduğu net olarak

anlaşılamamıştır. Öte yandan, yüksek gaz akış hızında ipliksi jet yaygın moda geçme eğilimindedir. Jet yaygın moda geçtiğinde, ipliksi modda görülen hafif sapma dahi gözlenmemiştir. Yaygın modda uygulanan manyetik alan neredeyse jete hiç etki yapmamıştır. Plazma içerisinde birçok yüklü parçacık içermektedir ve yüklü parçacıkların manyetik alan içerisinde hareketi sonucu bir yönelim beklenmektedir. Burada gerek ipliksi modda jete gözlenen sapmanın kaynağının belirsizliği, gerekse yaygın modda herhangi bir sapmanın gözlenmemesi, uygulanan manyetik alan şiddetinin düşük olduğu ile yorumlanabilir. Daha yüksek bir manyetik alan içerisinde jetin bir yönelim göstereceği düşünülmektedir.



Şekil 4.40. Helyum kilohertz plazma kalem jetine manyetik alan uygulanması

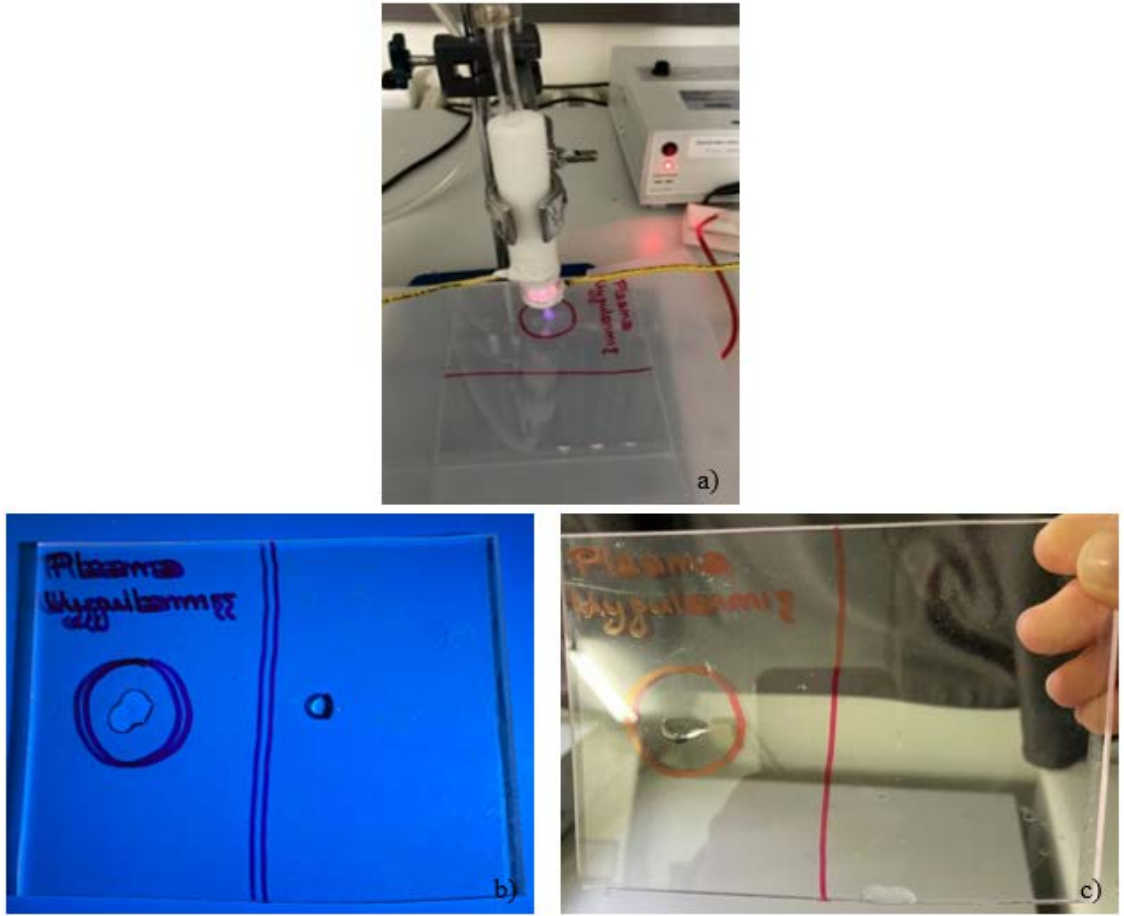
4.8. Kilohertz Plazma Kalemin Teknolojik Uygulanması

4.8.1. Kilohertz plazma kalem ile yüzey aktifleştirme

Kilohertz plazma kalem farklı yüzeyler üzerine 2 dakikadan fazla süre uygulanmıştır. Plazma uygulanan bölgeye ve plazma uygulanmayan bölgeye bir su damlası damlatılmıştır. Bilindiği gibi soğuk plazmalar uygulandığı bölgede yüzey aktifleme yapmaktadır. Bu plazmaların ürettiği yüklü parçacıkların etkisi ile olduğu gibi plazma içinde üretilen çeşitli kimyasal türlerin etkisi ile de olmaktadır. Plazma içindeki yüklü parçacıklar, özellikle OH ve NO gibi radikaller olmak üzere plazma türleri, uygulama yüzeyinin üst yapısındaki atom

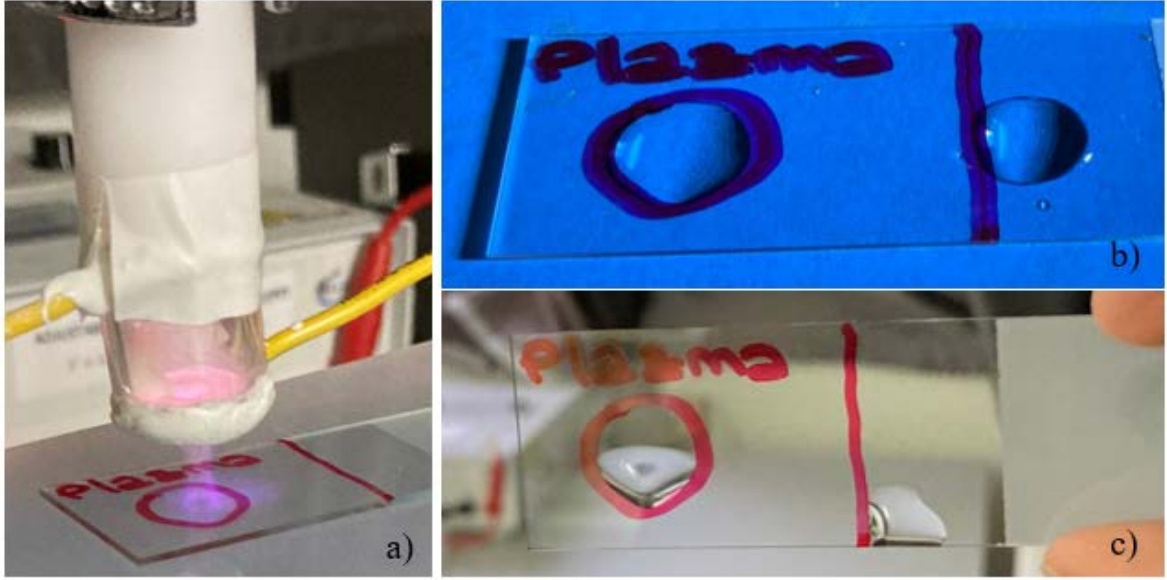
ve moleküllerle etkileşmektedir. Bu yüzeyin içine plazma türleri de kısmen nüfuz etmektedir. Bu etkileşme sonucunda gerek enerji bakımından gerekse yapı bakımından daha aktif bir yüzey oluşmaktadır. Bu aktifleşme sonucunda yüzeyin adheziv yapısı güçlenir ve bu bölgeye gelen atom ve molekülleri daha sıkı tutmaya çalışır. Plazmaların bu özelliğinden dolayı boya veya yapıştırma işlemi yapılacak yüzeyler uygulama öncesi plazma ile muamele edilirler. Plazma uygulamasına tabi tutulan yüzeyler, üzerine gelen atom ve molekülleri çok daha hızlı ve güçlü bir şekilde yapısına absorbe eder. Bu nedenle araç kaportaları ve pek çok tekstil ürünü boyanmadan önce plazma işlemine maruz bırakılır. Helikopter gibi üst teknoloji ürünlerin parçaları da statik denge sorunu yaşandığı için yapıştırılırlar. Bu metalik yüzeyler yapıştırma öncesi plazma işlemine tabi tutulur ve yüzeyler yapıştırıcıyı absorbe ederek çok daha sıkı tutunma gerçekleşir.

Şekil 4.41. (a)'da polietilen plastiğin belirlenen yüzeyine kilohertz plazma kalem uygulanmıştır. Şekil 4.41. (b)'de görüldüğü gibi plazma uygulanmayan bölgede su damlası küresel damlacık olarak kalırken kilohertz plazma uygulanan bölgeye damlatılan damlacık hemen yüzey üzerinde dağılmıştır. Şekil 4.31. (c)'de uygulama yapılan bu polietilen plastik dik konuma getirilse dahi plazma uygulanmış bölgedeki damlacık akmazken plazma uygulanmamış bölgedeki damlacık aşağıya akmaktadır. Kilohertz plazma kalem son derece güçlü yüzey aktifleştirme yapmaktadır. Bu nedenle gelecekte pek çok teknolojik uygulamada kullanılabilir.



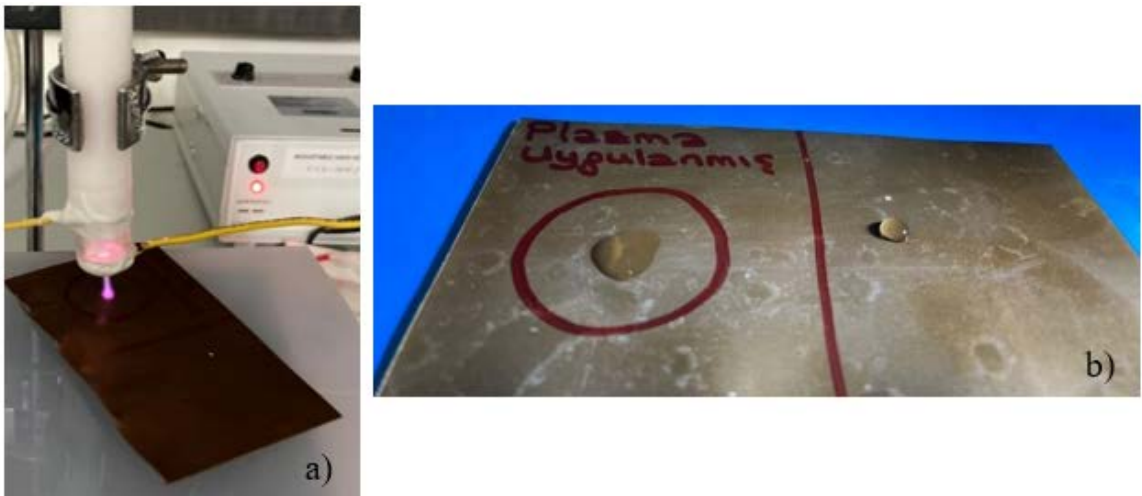
Şekil 4.41. a) kilohertz plazma kalemin polietilen plastik üzerine uygulanması b) Plazma uygulanan ve uygulanmayan bölgeye su damlatılması c) Damlatma işlemi sonrası su damlalarının eğik yapıda hareketi

Şekil 4.42. (a)'da mikroskop camının belirlenen yüzeyine kilohertz plazma kalem uygulanmıştır. Şekil 4.42. (b)'de görüldüğü gibi plazma uygulanmayan bölgede su damlası küresel damlacık olarak kalırken kilohertz plazma uygulanan bölgeye damlatılan damlacık yüzey üzerinde hemen dağılmıştır. Şekil 4.42. (c)'de uygulama yapılan bu camın dik konuma getirilse dahi plazma uygulanmış bölgedeki damlacık akmazken plazma uygulanmamış bölgedeki damlacık aşağıya akmaktadır. Bölge belirlenmesi için kırmızı kalem ile çizim hareketi kısıtlansa da yapılan pek çok çalışmada su damlası mikroskop camında plazma uygulanan bölgede çok daha sıkı tutunmaktadır.



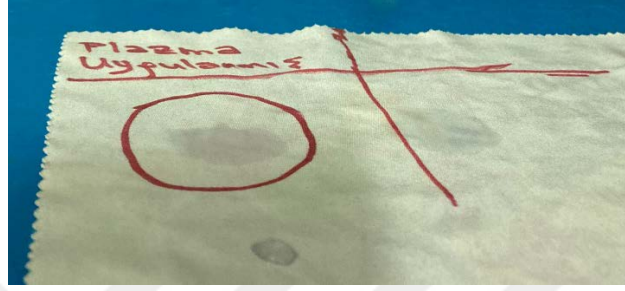
Şekil 4.42. a) Kiloherertz plazma kalemin cam üzerine uygulanması, b) Plazma uygulanan ve uygulanmayan bölgeye su damlatılması, c) Damlatma işlemi sonrası su damlalarının eğik yapıda hareketi

Şekil 4.43. (a)'da bakır plakanın belirlenen yüzeyine kiloherertz plazma kalem uygulanmıştır. Şekil 4.43. (b)'de görüldüğü gibi plazma uygulanmayan bölgede su damlası küresel damlacık olarak kalırken kiloherertz plazma uygulanan bölgeye damlatılan damlacık hemen yüzey üzerinde dağılmıştır.



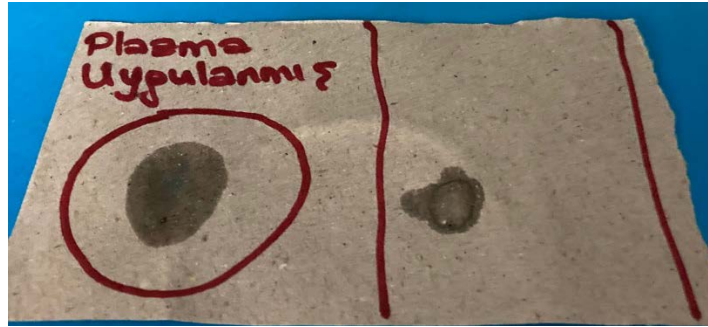
Şekil 4.43. a) Kiloherertz plazma kalemin bakır plaka üzerine uygulanması b) Plazma uygulanan ve uygulanmayan bölgeye su damlatılması

Şekil 4.44.'de gözlük temizleme bezinin belirlenen yüzeyine kilohertz plazma kalem uygulanmıştır. Daha sonra plazma uygulanan bölgeye ve uygulanmayan bölgeye su damlası damlatıldığında, damlanın plazma uygulanan bölgede uygulanmayan bölgeye göre hızla emildiği görülmüştür.



Şekil 4.44. Kilohertz plazma kalemin gözlük temizleme bezi üzerine uygulanması sonrası plazma uygulanan ve uygulanmayan bölgeye su damlatılması

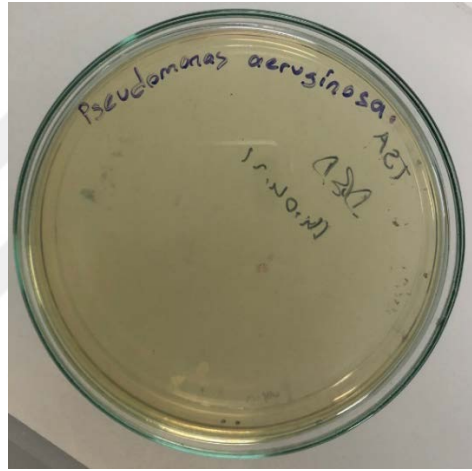
Şekil 4.45.'de su emici kâğıdın belirlenen yüzeyine kilohertz plazma kalem uygulanmıştır. Daha sonra plazma uygulanan bölgeye ve uygulanmayan bölgeye su damlası damlatıldığında, Şekil 4.44.'e benzer şekilde, damlanın plazma uygulanan bölgede uygulanmayan bölgeye göre hızla emildiği görülmüştür.



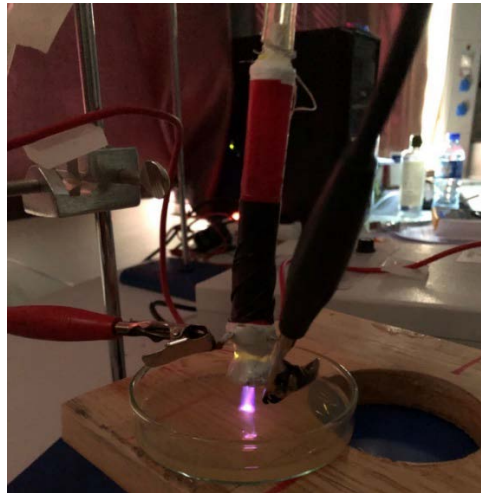
Şekil 4.45. Kilohertz plazma kalemin su emici kâğıt üzerine uygulanması sonrası plazma uygulanan ve uygulanmayan bölgeye su damlatılması

4.8.2. Kiloherzt plazma kalem ile bakteri sterilizasyonu

Uygulama yapılan bakteriler Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Biyoloji Bölümü'nde hazırlanmıştır (Şekil 4.46.). Kiloherzt plazma kalem ile *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri üzerine Şekil 4.47.'de görüldüğü gibi uygulama yapılmıştır. Şekil 4.46.' da fotoğrafı verilen petri kabında hazırlanmış bakteriler plazma kalemin jetinden 1,5 cm uzaklığa yerleştirilmiştir. Uygulama boyunca gaz akış hızı ve uygulama voltajı sabit olup sırasıyla 8 l/dk ve 18 kV olarak belirlenmiştir. Uygulama süresi 3 dakikadır.

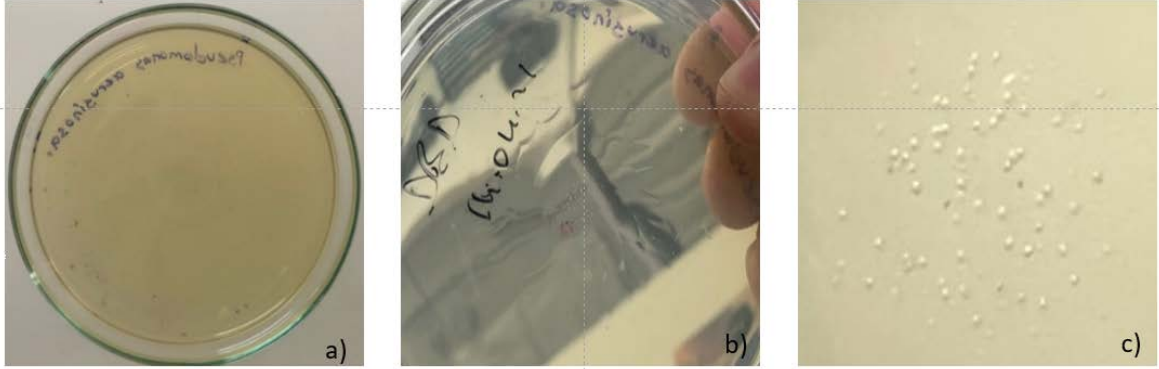


Şekil 4.46. Uygulama öncesi *Pseudomonas aeruginosa* bakterilerin petri kabında görünümü



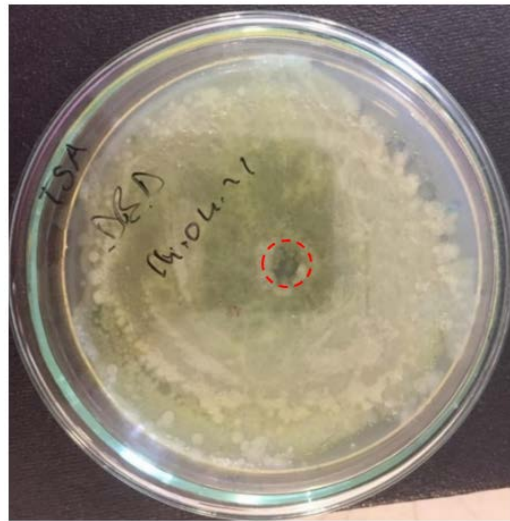
Şekil 4.47. Helyum kiloherzt plazma kalem ile *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri üzerine uygulama

Kilohertz plazma kalem noktasal olarak 3 dakika uygulandıktan sonra petri kabının fotoğrafı Şekil 4.48.'de verilmiştir.



Şekil 4.48. Helyum kilohertz plazma kalem ile *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri üzerine uygulama sonrası petri kabının görünümü

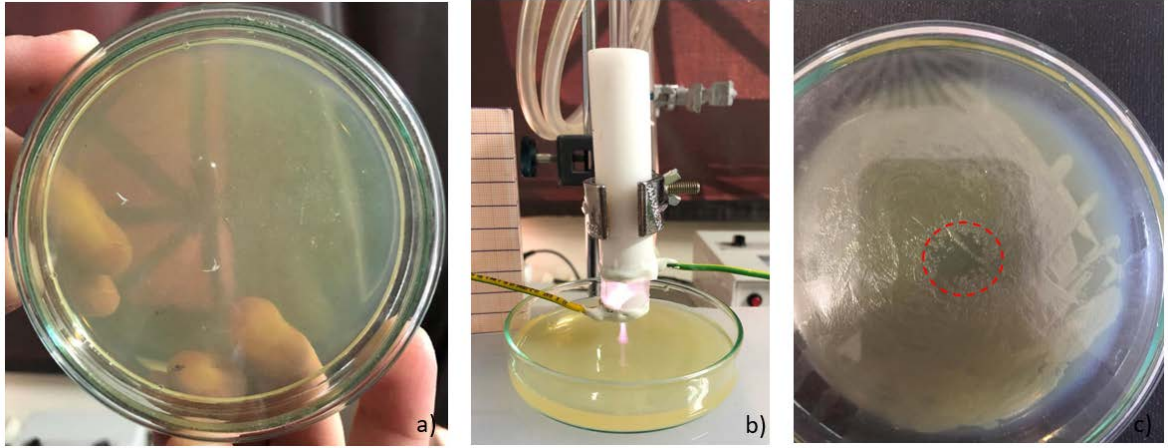
Kilohertz plazma kalem ile 3 dakika uygulama yapılan petri kabı gerekli biyolojik işlemlerden sonra Şekil 4.49.'daki gibi görünmektedir. Plazma uygulanan bölgede fiziksel etki Şekil 4.49.'da noktasal olarak belirgin şekilde görülmektedir.



Şekil 4.49. Helyum kilohertz plazma kalem ile *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri üzerine uygulama sonrası değişim

Şekil 4.49.'da orta kısımda jetin tam uygulama alanında fiziksel değişim daire şeklinde gözükmetedir. Şekil 4.48.(b)'de ve 4.48.(c)' de bu daire bölgesinin büyütülmüş fotoğrafları verilmiştir. Burada kilohertz plazma kalem jetinin fiziksel etkisi daha açık görülmektedir. Bununla birlikte Şekil 4.49.'daki bakteri miktarının spektroskopik yöntemlerle belirlendiğinde önemli miktarda azaldığı görülmüştür. Bu nedenle kilohertz plazma kalem, yüzeyleri bakteri ve istenmeyen diğer mikroorganizmalardan arındırmak için kullanılabilecektir.

Benzer bir çalışma argon gazı ile tekrarlanmıştır. Şekil 4.50. (a)'da görülen Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Biyoloji Bölümü'nde hazırlanmış *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri üzerine Şekil 4.50. (b)'de görüldüğü şekilde argon plazma jeti uygulanmıştır.



Şekil 4.50. *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri üzerine argon kilohertz plazma kalem uygulaması a) Uygulama öncesi petri kabının görünümü b) Argon kilohertz plazma jet uygulaması c) İnkübasyon sonrası petri kabının görünümü

Şekil 4.50. (c)'den de görüldüğü gibi noktasal olarak argon plazması uygulanan bölgede bakteri oluşumu gözlenmemiştir. Bu sonuçlar gerek helyum gerek argon ile çalıştırılan kilohertz plazma kalem sisteminin bakteriler üzerinde etkin olduğunu ve birçok sterilizasyon işleminde kullanılabileceğini göstermektedir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Helyum gazı kullanılarak 18 kV-15 kHz alternatif akım güç kaynağı kullanılarak kilohertz plazma kalem cihazı ile atmosferik basınçta soğuk plazma jet üretilmiştir. Jet üretiminde alternatif gerilimin hangi elektroda bağlı olduğu jet üretimini etkilememiştir. Ancak yeterli yalıtım yapılmaması jet üretimini önemli derecede etkilemiştir. Yalnızca bu sonuç üretilen kilohertz plazma kalemin literatürde var olan puls DC plazma kalemden farklı olduğunu göstermektedir. DC puls plazma kalemden çıkış ağzındaki elektrot yalıtılmamasına rağmen plazma jet üretebilmektedir. Oysaki tez çalışması kapsamında üretilen kilohertz plazma kalemden çıkış ağzındaki bakır elektrotun yalıtılmadığı durumda plazma doğrudan elektrot üzerinde sonlanmakta ve bir jet üretilmemektedir. Bu sonuç plazma kalemin foto-iyonizasyon üretim dinamiği ile kilohertz plazma kalemin ise lokal elektrik alanlara üretim dinamiğine sahip olduğunu göstermektedir. Bu açıdan bu tez çalışmasında hem orijinal bir cihaz hem de yeni bir plazma türü literatüre kazandırılmıştır.

Helyum gazı kullanılarak kilohertz plazma kalem ile üretilen plazma jetlerin uzunluk değişimi fotoğraflama tekniği ile incelenmiştir. Optimum çıkış ağzı çapında (4,5 mm) düşük gaz akış hızlarında iplikli modda jet oluşurken, yüksek gaz akış hızlarında yaygın modda plazma jet oluşmuştur. Yüksek gaz akış hızlarında yaygın modda oluşan plazma jet uzunluğu gaz akışına bağlı olarak çok fazla değişmemiştir. Bu kilohertz plazma kalemin ürettiği jetin oluşum dinamiğini açıklamak için önemli bir veridir. Literatürde yapılan çalışmalardaki sonuçlara göre eğer jet operatör gazın hâkim olduğu plazma içi reaksiyonlar ile oluşuyorsa, jet uzunluğu da gaz akış hızına bağlı olarak değişmektedir. Tez çalışması kapsamında yürütülen çalışmalarda ise, gaz akışı hızı arttıkça jet uzunluğu belirli bir değere kadar artmakta fakat belirli bir değerden sonra hem jetin modu değişmekte hem de jet uzunluğu kısalmaktadır. Bu noktadan sonra gaz akış hızının artması, jet uzunluğunda bir değişim yaratmamaktadır. Dolayısıyla, kilohertz plazma kalem jetinde gaz akış hızı için bir eşik değerin olduğu, bu değere kadar jetin, kullanılan gazın baskın olduğu reaksiyonlar ile oluştuğu söylenebilir. Eşik değerden sonra ise bu reaksiyonlar baskınlığını yitirmekte, jetin modu ve dolayısıyla oluşum mekanizması değişmektedir. Kilohertz plazma kalemin literatürdeki plazma kalemden farklı olduğunu gösteren önemli bir sonuçtur.

Plazma kalemin ürettiği jetlerin gaz akış hızları incelenirken jet çıkış ağzı (nozzle) çapı değişimi de incelenmiştir. Jet çıkış ağzı çok küçük olduğunda da büyük olduğunda da jet oluşmamaktadır. Bu da gönderilen gazın atmosfer ortamına çıkış miktarının optimum bir değerde olması gerektiğini göstermektedir. Esasında bu miktar plazma kalem jetinin üretim dinamiğini de etkileyen bir parametredir. Bu nedenle kilohertz plazma kalemin plazma üretim dinamiğinin tümüyle plazma içi reaksiyonlara bağlı olmadığı söylenemez. Plazma kalem ile plazma jet üretimi için plazma üretim hacmi yani elektrotlar arası uzaklık, başka bir deyişle deşarj odası hacmi de önemlidir. Optimum değerden yüksek deşarj odası hacminde plazma kalem jeti üretilmemektedir. Elektrotlar arası mesafenin 15 mm'den daha büyük olduğu deşarj odalarında kilohertz plazma kalem jeti oluşmamıştır. Deşarj odası, plazma kalem sistemi için oldukça önemli bir hacimdir zira tüm başlangıç reaksiyonları bu hacim içerisinde meydana gelmektedir. Dolayısıyla deşarj odası içinde gerçekleşen reaksiyonlar, jetin oluşumunu ve uzunluğunu etkileyen en önemli parametredir. Deşarj odasında atmosferden hafif gazların iyonlaşması ile bir deşarj plazması ve plazma jet üretilmektedir. Deşarj odası hacmi büyüdüğünde, deşarj odasında depolanan atmosfer gazlarının miktarı da artmaktadır. Deşarj odasında yeterli miktarda operatör gaz depolanmazsa, sisteme verilen enerji başlangıç reaksiyonlarını başlatmaya yetmemektedir. Bu durum, operatör gaz olarak azot kullanıldığında da deşarj plazması ya da plazma jet üretilmemesiyle de görülmüştür.

Helyum gazında üretilen plazma kalem jetinin sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar plazma kalem jetinin oda sıcaklığı civarında bir sıcaklık değerine sahip olduğunu göstermiştir. Bunun yanında kilohertz plazma kalem jetine çıplak el ile temas da mümkündür. Bu sonuçlar kilohertz plazma kalemin canlı üzerinde ve ısıya hassas yüzeylerde kullanılabileceğini göstermektedir. Son yıllarda atmosferik basınç plazmalar sivilce tedavisinde, yara ve yanık iyileştirmede, cilt kırışıklık tedavisinde, ağız ve diş sağlığında, kanser ve tümör tedavisi gibi insan sağlığını etkileyen önemli tıp uygulamalarında kullanılmaktadır. Bununla birlikte vücut içinde kullanılabilen ve sterilizasyonu önem arz eden ısıya hassas elektronik cihazların sterilizasyonunda da kullanılabilir. Öte yandan kilohertz plazma kalem ipliksi modda çalışırken elle dokunulduğunda sadece soğukluk hissi yaşanırken yaygın modda dokunulduğunda ise bir miktar karıncalanma hissedilmektedir. Ancak bu durumda dahi yanma ya da çarpılma gibi bir his yaşanmamıştır.

Helyum gazında plazma kalem ile üretilen plazma jetlerin optik emisyon spektrumları incelenmiştir. Üretilen jetler özellikle sterilizasyon uygulamalarında çok etkili olan radikal OH ve radikal oksijen üretmektedir. Bu iki radikal haricinde azot ve helyumun varlığı spektrumda görülmüştür. Radikal OH ve oksijen biyolojik hücrelerde oksidasyon ve peroksidasyon yaparak hem hücre zarında hem de protein ve DNA yapısında değişimlere neden olmaktadır. Bu nedenle kilohertz plazma kalem biyomedikal uygulamalar için önemli bir cihaz olacaktır.

Helyum gazında kilohertz plazma kalem ile üretilen plazma jetlerin elektriksel davranışları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar kilohertz plazma kalemin ciddi lokal elektrik alanlar ürettiği ve elektriksel olarak aktif (electrically driven) modele daha yakın olduğu yönündedir. Kilohertz plazma kalem jeti bir dirence bağlandığında bir akım değeri okunmaktadır. Bu akım özellikle jet uzunluğuna bağlıdır. Jetin çıkış ağzına yaklaştıkça direnç üzerinden çekilen akım artmaktadır. Kilohertz plazma kalem herhangi bir materyale yaklaştırıldığında mod değiştirerek steramer deşarj ve daha sonra spark deşarja dönmektedir. Ancak alternatif gerilim uygulandığı için ark deşarj oluşturmamaktadır.

Helyum gazında üretilen kilohertz plazma kalem jetinin uzunluğu ve çektiği akım, uygulama voltajına ve uygulama frekansına bağlıdır. Bu davranışlar, kilohertz plazma kalemin elektriksel olarak aktif bir plazma jet ürettiğini göstermektedir. Literatürde var olan puls DC plazma kalem ile elde edilen jetin oluşum dinamiğinde foto-iyonizasyon süreçleri baskındır. Bu nedenle kilohertz plazma kalem yeni ve farklı bir cihaz ve plazma olarak literatürde yerini alacaktır.

Argon gazı kullanılarak da kilohertz plazma kalem ile atmosferik basınç plazma jetler üretilmiştir. Üretilen plazma jetlerin gaz akış hızına göre değişimi incelenmiştir. Düşük gaz akış hızlarında neredeyse argon plazma jet üretilmemiştir. Bununla birlikte düşük gaz akış hızlarında helyum gazı kullanıldığında oluşan iplikli plazma jet argon gazında gözlenmemiştir. Argon gaz akış hızının yüksek değerlerinde gaz akış hızının artması jet uzunluğunda önemli bir değişim yaratmamaktadır. Ancak argon kilohertz plazma kalem jeti uzunluğu bakteri veya metal gibi yalıtkan uygulama yüzeylerine yaklaştırıldığında uzama eğilimindedir. Kilohertz plazma kalem ile üretilen jetlerin lokal elektrik alanlar ürettiği

gösterildiği için bu beklenen sonuçtur. Kiloherertz plazma kalem jeti taşıdığı lokal elektrik alanlarla ürettiği yüklü parçacıkları topraklama istemektedir. Bu nedenle yaklaşan her türlü maddeye akarak uzama eğilimindedir. Bu durumda plazma jet ile jete yaklaşan materyal arasındaki potansiyel farktan dolayı plazma jet materyale doğru atmosferi daha da iyonlaştırarak uzamaktadır. Argon gazı kiloherertz plazma kalem jeti ikinci elektrot ya da toprak olarak göreceği elektroda uzanırken streamer deşarj ve daha sonra spark deşarja dönmekte ve jet olarak elde edilen plazmanın türünü değiştirmektedir. Kiloherertz plazma kalem jetinin dinamiği, jetin ipliksi ve yaygın modları arasındaki geçiş ve jetten streamer deşarja, streamer deşarjdan spark deşarja geçiş dinamikleri oldukça önemli olup ileriki çalışmaların detaylı araştırma konusu olmalıdır.

Argon gazında üretilen kiloherertz plazma kalem jet sıcaklıkları da oda sıcaklığı civarında çıkmış ve elde edilen jetin soğuk plazma jetler sınıfında yer aldığı görülmüştür. Argon gazı kiloherertz plazma kaleme de jete çıplak el ile temas durumunda tende herhangi bir zarar meydana gelmemiştir.

Argon gazında üretilen kiloherertz plazma kalem jetinin optik emisyon spektroskopisi ile spektroskopik analizi yapılmıştır. Spektrumda argon ve azotun yanında şiddetli radikal OH görülmüştür. Spektrumda görülen OH piki neredeyse diğer piklerden daha yüksektir. Bu nedenle sterilizasyon uygulamalarında son derece etkin bir yöntem olacağı görülmektedir. Bununla birlikte argon gazı plazma kalem jetinde N_2^+ iyonları oluşmamıştır.

Puls DC plazma kalem ile argon gazında plazma jet üretilmemiştir. Bu nedenle bu çalışmadaki elektrot yapısı ile argon gazında ilk kez plazma jet üretilmiştir.

Argon gazında üretilen kiloherertz plazma kalem jetlerin elektriksel davranışları da helyum gazında üretilen jetlere benzerlik göstermiştir. Kiloherertz plazma kalem lokal elektrik alan ve yükleri taşımaktadır.

Helyum gazında üretilen kiloherertz plazma kalem jetleri harici elektrik alan ve manyetik alan içine yerleştirilerek davranışları incelenmiştir. Harici elektrik alanda içerisinde kiloherertz plazma kalem jeti oldukça fazla etkilenirken manyetik alandan neredeyse hiç

etkilenmemiştir. Bununla birlikte daha önceki sonuçlarda da görüldüğü gibi kilohertz plazma kalem kendisine yaklaşan her türlü maddeye akma eğilimindedir. Bunun için özellikle topraklanmış bir metale akışı incelenmiştir. Kilohertz plazma kalem jeti metale doğru akma ve metalde sonlanma eğilimindedir. Bu sonuçlar kilohertz plazma kalemin jet üretim mekanizmasının elektriksel alan ile jet üretim teorisine uygun olduğunu göstermektedir. Bu sonuç açısından foto-iyonizasyon ile jet üreten plazma kalemden ayrılmaktadır.

Atmosferik basınçta soğuk plazma jetlerin teknolojide en yaygın kullanımı yüzey aktifleştirmeleridir. Bu nedenle boyanmak istenen yüzeyler ya da yapıştırılmak istenen yüzeyler ilk önce ABSPJ ile muamele edilir. Özellikle tekstil sanayinde ve otomotivde boyanmak istenen yüzeyler ABSPJ ile muamele edildikten sonra boyanır. Bu yüzeyler plazma uygulaması sonrası aktifleştirdiği için boyayı daha sıkı tutmaktadır. Bu amaç için kilohertz plazma kalem jeti farklı yüzeylere uygulanarak damla testine tabi tutulmuştur. Bu amaç için cam, plastik, metal, kağıt ve bez üzerine kilohertz plazma kalem uygulanan bölgeye su damlatılmıştır. Kilohertz plazma kalem ile muamele edilen bölgeye damlatılan su her yüzeyde hemen yüzeye yayılarak tutunmuşlardır. Bu nedenle kilohertz plazma kalem yüzey aktifleştirme uygulamasında son derece başarılı bir cihaz olarak uygulanacaktır.

Kilohertz plazma kalem *Pseudomonas aeruginosa* bakterileri üzerine uygulanmıştır. Kilohertz plazma kalem jetinin bakteriyi 3 dk gibi kısa bir zamanda inaktive ettiği görülmüştür. Bu sonuç gerek yüzeyler üzerinde gerekse canlı vücudu içinde bakteri sterilizasyonunda ve enfeksiyon tedavisinde kilohertz plazma kalem jetinin son derece başarılı bir cihaz olacağını göstermektedir. Kilohertz plazma kalem hem argon gazı hem de helyum gazı ile *Pseudomonas aeruginosa* planktonik bakterileri üzerine uygulanmıştır ve çok kısa sürede antibakteriyel etki gözlenmiştir. Kilohertz plazma kalem planktonik bakteriler haricinde biyofimler üzerine ve özellikle canlı doku üzerinde çalışmalarda kullanılması için çalışmalar yapılmalıdır. Bununla birlikte kilohertz plazma kalem diğer plazma jetlerden çok daha kolay endoskopik yapıya dönüştürülebilir. Bu nedenle endoskopik uygulamalar yönelik çalışmalar da yapılmalıdır.

KAYNAKLAR DİZİNİ

- Akan, T., 2005, Maddenin 4. hali plazma ve temel özellikleri, İstanbul Üniversitesi, https://www.researchgate.net/publication/302468212_MADDENIN_4HALI_PLAZMA_VE_OZELLIKLERI / Erişim Tarihi: 21.11.2021
- Akan, T., 2014, Plazma Teknolojileri (Editör: B. İbrahimoglu), Ürün Yayınları, Ankara, 199–213.
- Akan, T., Çabuk, A., 2014, Indirect plasma inactivation by a low temperature atmospheric pressure plasma (LTAPP) system, *Journal of Electrostatics*, 72(3): 218–221.
- Akatsuka, H., Suzuki, M., 1993, Arc-heated magnetically trapped expanding plasma-jet generator, *Review of Scientific Instruments*. 64 1734–9.
- Barjasteh, A. Dehghani, Z., Lamichhane, P., Kaushik, N., Choi, E.H., Kaushik, N.K., 2021 Recent progress in applications of non-thermal plasma for water purification, bio-sterilization, and decontamination. *Applied Sciences*, 11, 3372.
- Boffa, C., Heberlei, J., Pfender, E., 1970, Criterion for establishing deviations from lte in atmospheric pressure Argon plasma jets, *Wärme- und Stoffübertragung* 4, 213–221.
- Chen, Z., Garcia, G., Arumugaswami, V., Wirz, E.R., 2020, Cold atmospheric plasma for SARS-CoV-2 inactivation, *Physics of Fluids* 32, 111702.
- Dawson, G.A., Winn, W.P., 1965, A model for streamer propagation, *Zeitschrift für Physik*, 183(2): 159–171.
- Dresvin, S.V., Klubniki, V.S., 1971, Disequilibrium in an Argon plasma-jet from a high-frequency induction discharge at atmospheric-pressure, *High Temperature*. 9 437.
- Filipić, A., Gutierrez-Aguirre, I., Primc, G., Mozetič, M., Dobnik, D., 2020, Cold plasma, a new hope in the field of virus inactivation, *Trends In Biotechnology*, volume 38, issue 11, P1278-1291.
- Freeman, M.P., 1968, A quantitative examination of lte condition in effluent of an atmospheric pressure Argon plasma jet, *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, Volume 8, Issue 1, p. 435-435.
- Fortin, M., Meubus, P., 1979, Metastable atoms in Argon and plasma jets at atmospheric-pressure in low-temperature regions, *Canadian Journal of Physics* 57 1594–602.
- Förster, S., Mohr, C., Viöl, W., 2005. Investigations of an atmospheric pressure plasma jet by optical emission spectroscopy, *Surface & Coatings Technology*, 200 827 – 830.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Gavahian, M., Chu, Y.H., Khaneghah, A.M., Barba, F.J., Misra, N.N., 2018, A critical analysis of the cold plasma induced lipid oxidation in foods, Trends in Food Science & Technology, Volume 77, Pages 32-41.
- Ghimire, B., Lamichhane, P., Lim, J.S., Min, B., Paneru, R., Weltmann, K.D., Choi, E.H., 2018, An atmospheric pressure plasma jet operated by injecting natural air, Applied Physics Letters 113, 194101.
- Giannini, G.M., 1957, The plasma jet, Scientific American, 197(2):80-88.
- Gianinni, G.M., Ducati, A.C., 1960, Plasma steam apparatus and methods, US Patent Office US2922869 A.
- Gibalov, V.I., Pietsch, G.J., 2000, The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces, Journal of Physics D: Applied Physics, 33 2636.
- Gordillo-Vazquez, F.J., 2008, Air plasma kinetics under the influence of sprites, Journal of Physics D: Applied Physics, 41, 234016 (EK).
- Grill, A., 1993, Cold plasma in materials fabrication, IEEE Press, New York, pp. 7–8, 19 22.
- Güleç, A., 2011, Yüksek frekans atmosferik basınç sistemlerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 90s.
- Hendawy, N., McQuaid, H., Mariotti, D., Maguire, P., 2020, Continuous gas temperature measurement of cold plasma jets containing microdroplets, using a focussed spot IR sensor, Plasma Sources Science and Technology, Volume 29, Number 8.
- İlik, E., 2017, Soğuk akan post-deşarj plazma reaktörlerinin üretimi ve bazı özelliklerinin incelenmesi, Doktora Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, 124 s.
- İlik, E., Akan, T., 2016, Optical properties of the atmospheric pressure helium plasma jet generated by alternative current (a.c.) power supply, Physics of Plasmas, Volume 23, Issue 5.
- İlik, E., Çelik, P. A., Topbaş, Y., Çabuk, A., Akan, T., 2017, Applying on Bacillus cereus of Low-Pressure and Low-Temperature Plasma Jet in a Postdischarge Chamber, IEEE Transactions on Radiation and Plasma Medical Sciences, Volume: 1, Issue: 5
- İlik, E., Durmuş, Ç., Akan, T., 2019, Adding water droplets into atmospheric pressure plasma jet of helium, IEEE Transactions on Plasma Science, Volume: 47, Issue: 11.
- Ito, M., Oh, J., Ohta, T., Shiratani, M., Hori, M., 2017, Current status and future prospects of agricultural applications using atmospheric-pressure plasma technologies, Plasma Processes and Polymers 15(2):e1700073.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Jarrige, J., Laroussi, M., Karakas, E., 2010, Formation and dynamics of plasma bullets in a non-thermal plasma jet: influence of the high-voltage parameters on the plume characteristics, *Plasma Sources Science and Technology*, 19(6):065005.
- Karakas, E., Koklu, M., Laroussi, M., 2010, Correlation between helium mole fraction and plasma bullet propagation in low temperature plasma jets, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43, 155202.
- Kelly, S., Turner, M.M., 2014, Power modulation in an atmospheric pressure plasma jet, *Plasma Sources Science and Technology*, 23, 065012 (10pp)
- Kolb, J.F., Mohamed, A.A.H., Price, R.O., Swanson, R.J., Bowman A., Chiavarini, R.L., Stacey, M., Schoenbach, K.H., 2008, Cold atmospheric pressure air plasma jet for medical applications, *Applied Physics Letters*, 92, 241501.
- Kurihara, K., Sasaki, K., Kawarada, M., Koshino, N., 1988, High-rate synthesis of diamond by dc plasma-jet chemical vapor-deposition, *Applied Physics Letters*, 52, 437–8.
- Laroussi, M., Akan, T., 2007, Arc-free atmospheric pressure cold plasma jets: a review, *Plasma Processes and Polymers*, 4 777–88.
- Laroussi, M., Hynes, W., Akan, T., Lu, X., Tendero, C., 2008, The plasma pencil: a source of hypersonic cold plasma bullets for biomedical applications, *IEEE Transactions on plasma science* 36 (4), 1298-1299.
- Li, J., Fang, C., Chen, J., Li, H.P., Makabe, T, 2021, Key chemical reaction pathways in a heliumnitrogen atmospheric glow discharge plasma based on a global model coupled with the genetic algorithm and dynamic programming, *Journal of Applied Physics*, 129, 133302.
- Li, Q., Zhu, W., Zhu, X., Pu, Y., 2010, Effects of Penning ionization on the discharge patterns of atmospheric pressure plasma jets, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 43, 382001 (5pp).
- Lu, Z.P., Stachowicz, L., Kong, P., Heberlein, J., Pfender, E., 1991, Diamond synthesis by dc thermal plasma cvd at 1 atm, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 11 387–94.
- Lu, X., Laroussi, M., Puech, V., 2012, On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets, *Plasma Sources Science and Technology*, 21, 034005 (17pp).
- Lu, X., Laroussi, M., 2006, Dynamics of an atmospheric pressure plasma plume generated by submicrosecond voltage pulses, *Journal of Applied Physics* 100: 063302, 1–6.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- a. Lu, X., Xiong, Q., Xiong, Z., Hu, J., Zhou, F., Gong, W., Xian, Y., Zou, C., Tang, Z., Jiang, Z., Pan, Y., 2009, Propagation of an atmospheric pressure plasma plume, *Journal Of Applied Physics* 105, 043304.
 - b. Lu, X., Xiong, Q., Xiong, Z., Hu, J., Zhou, F., Gong, W., Xian, Y., Zhou, C., Tang, Z., Jiang, Z., Pan, Y., 2009, A cold plasma cross made of three bullet-like plasma plumes, *Thin Solid Films* 518, 967–970.
- Mericam-Bourdet N, Laroussi M, Begum A, Karakaş E, 2009, Experimental investigations of plasma bullets, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42 055207.
- Mirpour, S., Fathollah, S., Mansouri, P., Larijani, B., Ghoranneviss, M., Tehrani, M.M., Amini, M.R., 2020, Cold atmospheric plasma as an effective method to treat diabetic foot ulcers: A randomized clinical trial, *Scientific Reports*, 10, 10440
- Misra, N.N., Jo, C., 2017, Applications of cold plasma technology for microbiological safety in meat industry, *Trends in Food Science & Technology*, Volume 64, Pages 74-86.
- Misra, N.N., Schlüter, O., Cullen, P.J., Turner, M., Christopher Whitehead, J., 2016, *Cold plasma in food and agriculture: fundamentals and applications*, Elsevier Inc., 117-141.
- Mitic, S., Klumov, B.A., Pustyl'nik M.Y., Morfill, G.E., 2010, Determination of electron temperature in low pressure plasmas by means of optical emission spectroscopy, *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, 91(5): 231–235.
- National Research Council, 1991,. *Plasma processing of materials: scientific opportunities and technological challenges*. Washington DC, The National Academies Press.
- NIST, 2021, National Institute of Standards and Technology, http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html, erişim tarihi: 15.11.2021
- Pankaj, S.K., Wan, Z., Keener, K.M., 2018, Effects of cold plasma on food quality: a review, *Foods*, 7(1), 4.
- Penkov, O.V., Khadem, M., Lim, W.S., Kim, D.E., 2015, A review of recent applications of atmospheric pressure plasmajets for materials processing, *Journal of Coatings Technology and Research*, 12 (2) 225–235.
- Ricard, A., D'écomps, P., Massines, F., 1999, Kinetics of radiative species in helium pulsed discharge at atmospheric pressure, *Surface and Coatings Technology*, Volume 112, Issues 1–3, Pages 1-4.
- Schoenbach, K.H., Moselhy, M., Shi, W., Bentley, R., 2003, Microhollow cathode discharges, *Journal of Vacuum Science & Technology*, A 21 1260–5.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Schütze, A., Jeong, J.Y., Babayan, S.E., Park, J., Selwyn, G.S., Hicks, R.F., 1998, The atmospheric-pressure plasma jet: a review and comparison to other plasma sources, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 26 1685–94.
- Schmidt-Bleker, A., Winter, J., Bösel, A., Reuter, S., Weltmann, K.D., 2016, On the plasma chemistry of a cold atmospheric argon plasma jet with shielding gas device, *Plasma Sources Science and Technology*, 25, 015005.
- Shintani, H., Sakudo, A., Burke, P., McDonnell, G., 2010, Gas plasma sterilization of microorganisms and mechanisms of action (Review), *Experimental and Therapeutic Medicine*, 731-738.
- Stalder, K.R., Vidmar, R.J., Nersisyan, G., Graham, W.G., 2006, Modeling the chemical kinetics of high-pressure glow discharges in mixtures of helium with real air, *Journal of Applied Physics* 99, 093301.
- Tendero, C., Tixier, C., Tristant, P., Desmaison, J., Leprince, P., 2006, Atmospheric pressure plasmas: a review, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 61 2–30.
- Tonks, L., Langmuir, I., 1929, Oscillations in ionized gases, *Pyhsics Review.*, Vol. 33, 195.
- Yeniçay, F., 1970, *Plazma Fiziği*, İstanbul Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları.
- Yoshie, K., Kasuya, S., Eguchi, K. Yoshida, T., 1992, Novel method for C-60 synthesis—a thermal plasma at atmospheric-pressure, *Applied Physics Letters*, 61 2782–3.
- Winter, J., Brandenburg, R., Weltmann, K.D., 2015, Atmospheric pressure plasma jets: an overview of devices and new directions, *Plasma Sources Science and Technology*, 24 064001 (19pp).
- Xian Y, Lu X, Wu S, Chu P K, Pan Y, 2012, Are all atmospheric pressure cold plasma jets electrically driven?, *Plasma Sources Science and Technology*, 100, 12