



T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü



DİELEKTRİK BARIYER DEŞARJ PARALEL PLAKA YÖNTEMİ İLE SOĞUK PLAZMA ÜRETİMİ ve OPTİMİZASYONU

Yüksek Lisans Tezi

Zeki GETİZMEN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

İzmir
2023

T.C.
EGE ÜNİVERSİTESİ
Fen Bilimleri Enstitüsü

**DİELEKTRİK BARIYER DEŞARJ PARALEL PLAKA
YÖNTEMİ İLE SOĞUK PLAZMA ÜRETİMİ ve
OPTİMİZASYONU**

Zeki GETİZMEN

Danışman: Doç. Dr. Yavuz ÖZTÜRK

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

İzmir
2023

KABUL ONAY SAFYASI

Zeki GETİZMEN tarafından Yüksek Lisans tezi olarak sunulan “Dielektrik Bariyer Deşarj Paralel Plaka Yöntemi ile Soğuk Plazma Üretimi ve Optimizasyonu” başlıklı bu çalışma EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile EÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi’nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 23.01.2023 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği ile başarılı bulunmuştur.

Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı : Prof.Dr. Tayyar GÜNGÖR

.....

Raportör Üye : Doç.Dr. Yavuz ÖZTÜRK

.....

Üye : Doç.Dr. Ulaş KILIÇ

.....

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

EÜ Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin ilgili hükümleri uyarınca Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Dielektrik Bariyer Deşarj Paralel Plaka Yöntemi ile Soğuk Plazma Üretimi ve Optimizasyonu” başlıklı bu tezin kendi çalışmam olduğunu, sunduğum tüm sonuç, doküman, bilgi ve belgeleri bizzat ve bu tez çalışması kapsamında elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara atıf yaptığımı ve bunları kaynaklar listesinde usulüne uygun olarak verdiğimi, tez çalışması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını, bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya diğer bir üniversitede başka bir tez çalışması içinde sunmadığımı, bu tezin planlanmasından yazımına kadar bütün safhalarda bilimsel etik kurallarına uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul edeceğimi beyan ederim.

23/01/2023

İmzası

Zeki GETİZMEN

ÖZET**DİELEKTRİK BARIYER DEŞARJ PARALEL PLAKA YÖNTEMİ İLE
SOĞUK PLAZMA ÜRETİMİ ve OPTİMİZASYONU**

GETİZMEN, Zeki

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Yavuz ÖZTÜRK

Ocak 2023, 182 sayfa

Bu tez çalışmasında, soğuk plazma üretimi için kullanılan yöntemlerden biri olan dielektrik bariyerdeşarj (DBD) paralel plaka yöntemi ile atmosferik basınç ve oda sıcaklığında hava soğuk plazması üretilmiştir. Soğuk plazmaların güç değerleri plazma üretimini etkileyen faktörlerden ölçülen veriler ile hesaplanmış, bu faktörlerin elektron yoğunluğu üzerindeki etkileri incelenmiş ve analiz edilmiştir.

DBD hava soğuk plazması üretiminde elektrotlar arasında dielektrik malzeme olarak 0.001 m, 0.002 m, 0.003 m ve 0.004 m kalınlıklarda cam ve pleksiglas kullanılmıştır. Metal elektrotlar 0.002 m kalınlıktaki alüminyum levhadan daire, dikdörtgen, kare ve oval geometrilerde yüzey alanları sırasıyla 0.000314 m², 0.000400 m², 0.000800 m² ve 0.001114 m² olacak şekilde imal edilmiştir. Tasarlanan mekanik reaktörde 0.001 m' lik adımlarla 0.001 m ile 0.011 m hava aralıklarında plazma oluşturulmuştur. Elektrotlara yüksek gerilim transformatörleri ile 400-1500 Hz aralığında 14.6890 kV_{rms} (20.7765 kV_{pp})'a kadar gerilim uygulanarak soğuk plazma elde edilmiştir. Plazma gücü ölçüm kapasitörü yöntemi ve Lissajous yöntemi ile hesaplanmıştır. Hava soğuk plazmasının elektron yoğunluğu güç dengesi yöntemi ile hesaplanmıştır. Hava soğuk plazmasının elektron yoğunluğu 1.7059E+15 m⁻³ ile 1.6313E+18 m⁻³ arasında hesaplanmıştır. Geniş bir kullanım alanına sahip olan soğuk plazmaların, plazma üretimine etki eden faktörlerin etkileri dikkate alınarak daha etkin kullanılmasının sağlanması ve plazma faktörlerinin optimizasyonu ile plazma veriminin artırılması amaçlanmıştır.

Anahtar sözcükler: Dielektrik bariyerdeşarj, paralel plaka yöntemi, Lissajous yöntemi, optimizasyon, ölçüm kapasitörü yöntemi, soğuk plazma.

ABSTRACT**COLD PLASMA PRODUCTION AND OPTIMIZATION WITH
DIELECTRIC BARRIER DISCHARGE PARALLEL PLATE METHOD**

GETİZMEN, Zeki

MSc in E. E. Eng.

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Yavuz ÖZTÜRK

January 2023, 182 pages

In this thesis, air cold plasma was produced at atmospheric pressure and room temperature by dielectric barrier discharge (DBD) parallel plate method, which is one of the methods used for cold plasma production. The power values of the cold plasmas were calculated with the measured data from the factors affecting the plasma production, the effects of these factors on the electron density were examined and analyzed.

For the production of DBD air cold plasma, glass and plexiglass with thicknesses of 0.001 m, 0.002 m, 0.003 m and 0.004 m were used as dielectric material between the electrodes. Metal electrodes were manufactured from 0.002 m thick aluminum sheet in circle, rectangular, square and oval geometries with surface areas of 0.000314 m², 0.000400 m², 0.000800 m² and 0.001114 m², respectively. In the designed mechanical reactor, plasma was formed at 0.001 m to 0.011 m air gaps in 0.001 m steps. Cold plasma was obtained by applying voltages up to 14.6890 kV_{rms} (20.7765 kV_{pp}) in the 400-1500 Hz range with high voltage transformers to the electrodes. The plasma power was calculated by the measuring capacitor method and the Lissajous method. The electron density of the air cold plasma was calculated by the power balance method. The electron density of the air cold plasma was calculated between 1.7059E+15 m⁻³ and 1.6313E+18 m⁻³. It is aimed to ensure that cold plasmas, which have a wide usage area, are used more effectively by taking into account the effects of factors affecting plasma production and to increase plasma efficiency by optimizing plasma factors.

Keywords: Dielectric barrier discharge, parallel plate method, Lissajous method, optimization, measurement capacitor method, cold plasma.

ÖNSÖZ

Gelişen teknolojik gelişmeler ve kullanım avantajlarından dolayı dielektrik bariyerdeşarj (DBD) soğuk plazmaları birçok alan ve sektörde kullanılmaya başlanmıştır. Son yıllarda kanser çalışmalarında DBD soğuk plazmaların kullanımı ile dikkate değer gelişmeler kaydedilmiştir. Tıp ve medikal alanlarda tedavi amaçlı DBD soğuk plazmaların kullanılması tedavilerin sürelerini kısaltmış ve etkinliğini artırmıştır. Soğuk plazmalar elektronik sektöründe baskı devre, yarıiletken üretimi, sensör üretimi ve özellikle mikroişlemci üretimi için uzun yıllardan beri kullanılmıştır. Uzay teknolojilerinde ve elektriksel itki sistemlerinde soğuk plazma uygulamaları kullanılmaktadır. Başta ozon olmak üzere birçok reaktif türü soğuk plazmalar ile üretilmekte olup gıda ve tarım sektörlerinde sebze ve meyvelerin rekoltesi ve raf ömrünü artırmak amaçlı kullanılmaktadır. Çevre teknolojilerinde zararlı maddelerin bertaraf edilmesi için sıklıkla soğuk plazma uygulamaların kullanılmaktadır. Uygulama koşulları ve etkileri bakımından soğuk plazmaların zararlı etkileri yok denecek kadar azdır. Bu bağlamda doğa dostu uygulamalar gerçekleştirilebilir. Tekstil sektöründe su tutmayan veya geçirmeye, alev tutucu veya kimyasal koruyuculuk sağlayan kumaşların üretimi soğuk plazma uygulamaları ile sağlanmaktadır. Kullanımı ve avantajları saymakla bitirilemeyen soğuk plazma teknolojilerinin üzerinde çalışma yapmak aynı zamanda bu sektörlerinde gelişimine katkı sağlayacaktır.

Soğuk plazmalar üzerinde yapılan akademik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmanın motivasyonu birçok alan ve sektörde kullanılan soğuk plazmalar üzerindeki ilginin artırılmasıdır. Bu amaçla soğuk plazmalar hakkında oldukça ayrıntılı bir literatür bilgisi verilip DBD paralel plaka yöntemi ile soğuk plazma üretimi detaylıca anlatılmıştır. Plazma üretimine etki eden faktörler analiz edilmiş ve plazma verimini artırmak için yapılması gereken optimizasyon işlemi hakkında bilgi verilmiştir. Soğuk plazma uygulamaları ile çalışma yapmak isteyenlere referans bir kaynak oluşturulmuştur. Yapılan bu tez çalışması ile soğuk plazma teknolojilerin gelişime katkıda bulunmak ve yeni çalışmalara imkân sağlaması dileğiyle.

İZMİR

23 /01 /2023

Zeki GETİZMEN

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	vii
ABSTRACT	ix
ÖNSÖZ	xi
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xix
TABLolar DİZİNİ	xxix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxxi
1. GİRİŞ	1
2. PLAZMANIN YAPISI, TÜRLERİ, PARAMETRELERİ ve ÜRETİM YÖNTEMLERİ	5
2.1. Plazma Yapısı	5
2.2. Plazma Türleri	9
2.2.1. Oluşumuna göre plazmaların sınıflandırılması	9
2.2.2. Sıcaklığa göre plazmaların sınıflandırılması	10
2.2.3. Basınca göre plazmaların sınıflandırılması	14
2.2.4. Kullanılan gerilim türüne göre plazmaların sınıflandırılması	16

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

2.2.5. Kullanılan frekans türüne göre plazmaların sınıflandırılması.....	17
2.3. Plazma Parametreleri	19
2.3.1. Plazma yoğunluğu	19
2.3.2. İyonizasyon derecesi	22
2.3.3. Plazma sıcaklığı	23
2.3.4. Plazma osilasyonu	26
2.3.5. Debye Kafesi ve Debye Uzunluğu	33
2.3.6. Plazma kılıfı	36
2.3.7. Kollektif davranış	40
2.4. Soğuk Plazma Üretim Yöntemleri	45
2.4.1. Elektriksel Kırılım.....	45
2.4.2. Plazma Jet ve Plazma Mermisi	58
2.4.3. Dielektrik bariyer deşarjı (DBD).....	60
2.4.4. Yüksek frekans deşarjı	61
3. DBD PLAZMALARININ ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU, ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ ve UYGULAMALARI	65
3.1. DBD Plazmalarının Üretim Yöntemleri.....	66

İÇİNDEKİLER (devam)

Sayfa

3.1.1. DBD paralel plaka yöntemi	68
3.1.2. DBD silindirik elektrot sistemi	70
3.1.3. DBD koaksiyel elektrot sistemi	71
3.1.4. Atmosferik basınç plazma jet (ABPJ)	72
3.2. DBD Plazmaların Karakterizasyonu.....	73
3.2.1. DBD plazmaların deşarj karakterizasyonu	73
3.2.2. DBD plazmaların elektriksel karakterizasyonu	78
3.3. DBD Plazmaları İçin Ölçüm Yöntemleri.....	84
3.3.1. Langmuir probu ile direkt ölçüm	84
3.3.2. DBD plazmalarının elektriksel ölçüm yöntemleri	88
3.3.3. DBD plazmalarının optik ölçüm yöntemleri	98
3.4. DBD Plazma Uygulamaları	103
3.4.1. Plazma ile yüzey temizleme	104
3.4.2. Plazma ile yüzey aktivasyonu	105
3.4.3. Plazma ile yüzey kaplama.....	106
3.4.4. Plazma ile yüzey aşındırma	107

İÇİNDEKİLER (devam)

	<u>Sayfa</u>
3.4.5. Plazma ile malzeme yüzeyinde çapraz bağ oluşturma	108
3.4.6. DBD plazmaların kullanım alanları	109
4. PLAZMA ÜRETİMİ ve OPTİMİZASYONU	112
5. SONUÇLAR	143
6. TARTIŞMA ve ÖNERİLER.....	146
KAYNAKLAR DİZİNİ	152
TEŞEKKÜR.....	165
ÖZGEÇMİŞ	166
EKLER.....	

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1. Maddenin dört fiziksel hali	2
Şekil 2.1. Plazmanın yapısı	5
Şekil 2.2. Maddenin fiziksel hallerine göre sahip oldukları enerji ve sıcaklık seviyeleri.....	7
Şekil 2.3. Doğal plazma türleri ve enerji seviyeleri	10
Şekil 2.4. Kullanılan frekans bantlarına göre plazmaların sınıflandırılması	18
Şekil 2.5. Plazmaların özelliklerine göre sınıflandırılması	19
Şekil 2.6. Plazma içerisindeki iyon dağılımı ve elektrik alan bölgeleri	21
Şekil 2.7. $k_B T = 5$ eV Sıcaklık değeri için enerji dağılım fonksiyonu. Mavi çizgi yüksek enerji limiti olup enerji dağılım fonksiyonu yaklaşık $\exp(-E/k_B T)$ değerinde enerji limitine yakınsar.....	25
Şekil 2.8. Oluşan elektrik alan etkisiyle elektronların yer değiştirmesi	28
Şekil 2.9. Sabit B etkisiyle v hızında hareket eden parçacığın: a) Siklotron dairesel hareketi b) Siklotron helisel hareketi	30
Şekil 2.10. Plazma içinde oluşan Debye Kafesi ve Plazma Kılıfı.....	33
Şekil 2.11. Plazma kılıfının oluşumu	40

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

Şekil 2.12. Townsend teorisine göre akım ve gerilime bağlı gazın kırılıp deşarj oluşması: (i) Katottan kopan elektron, (ii) Elektronların elektrik alanın tersine ivmelenmesi, (iii) Elektron çarpışmaları ile iyon oluşumu, (iv) Gazın kırılması, (v) Elektronların anotta çekilmesi, (vi) İkincil elektron oluşumu, (vii) Yüksek iletkenlikte bir kanal oluşumu.....	46
Şekil 2.13. Farklı gaz türleri için elde edilen Paschen eğrileri	48
Şekil 2.14. Elektrik deşarjının I-V karakteristiği.....	49
Şekil 2.15. Parıltı deşarjının yapısı ve parametrelerinin dağılımı.....	50
Şekil 2.16. Kesin noktasal bir elektrot ile oluşan Korona deşarjı.....	53
Şekil 2.17. Katot deşarjı ve temel bileşenleri	54
Şekil 2.18. Ark deşarjı	55
Şekil 2.19. Sıcaklık ve basınçsa bağlı olarak ark deşarjının rejimi	56
Şekil 2.20. Farklı ark deşarjı uygulamaları.....	57
Şekil 2.21. Kayan ark deşarjı.....	58
Şekil 2.22. Plazma Jet uygulamalarının farklı konfigürasyonları.....	58
Şekil 2.23. Plazma mermisinin yüksek hızlı fotoğrafları.....	59
Şekil 2.24. DBD yöntemi ve farklı uygulama yöntemleri	60

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

<u>Şekil</u>	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.25. RF deşarj türleri.....	63
Şekil 2.26. Mikrodalga deşarj plazma sistemi.....	64
Şekil 3.1. DBD Soğuk plazma yönteminin farklı konfigürasyonları	67
Şekil 3.2. DBD Paralel plaka yönteminin farklı konfigürasyonları: a) HDBD çift bariyer, b) HDBD hareketli tek bariyer, c) HDBD tek bariyer.....	68
Şekil 3.3. DBD paralel plaka yöntemindeki Townsend kırılım mekanizması	69
Şekil 3.4. DBD Paralel plaka yöntemindeki hafıza etkisi	70
Şekil 3.5. DBD Silindirik elektrot sisteminin farklı konfigürasyonları	71
Şekil 3.6. DBD Koaksiyel elektrot sistemi.....	72
Şekil 3.7. Atmosferik basınç plazma jet (ABPJ) uygulamasının farklı elektrot konfigürasyonları.....	73
Şekil 3.8. Pozitif flama oluşumu: a) Bölgesel iyon birikimi (çığ), b) İkincil elektron emisyonu, c) Kırılmanın ve plazmanın oluşumu, d) Flamanın oluşumu	75
Şekil 3.9. Negatif flama oluşumu: a) Bölgesel iyon birikimi (çığ), b) İkincil elektron emisyonu, c) Kırılmanın ve plazmanın oluşumu, d) Flamanın oluşumu	75

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

Şekil 3.10. DBD plazmalarında gözlemlenen deşarj türleri: a) Kıvılcım (Spark) deşarjı, b) Filament deşarjı c) Flama (Streamer) deşarjı, d) Parıltı (Glow) deşarjı	76
Şekil 3.11. DBD plazmalarının deşarj modları: a) Filamentli (Filamentary) deşarj modu, b) Dağınık (Diffuse) deşarj modu, c) Homojen (Homogeneous) deşarj modu	78
Şekil 3.12. DBD plazmalarının elektriksel eş değer devresi	79
Şekil 3.13. HDBD Tek dielektrik bariyer plazmalarında filament oluşumu ile plazmanın akım- gerilim karakteristiği	81
Şekil 3.14. DBD reaktöründe plazma aktif iken akım-gerilim karakteristiği ve eşdeğer elektrik devresi.....	81
Şekil 3.15. İdeal durumdaki Q-V (Lissajous) grafiği	83
Şekil 3.16. Langmuir prob türleri: a) r_p yarıçaplı küresel başlıklı Langmir probu, b) r_p yarıçaplı ve L uzunluklu silindir başlıklı Langmir probu, c) $2r_p$ genişliğe sahip düzlemsel başlıklı Langmir probu, d) Piyasadaki Langmir probu türleri	85
Şekil 3.17. Tipik bir Langmuir probunun a) Elektriksel eşdeğer devresi, b) I-V Karakteristiği.....	85
Şekil 3.18. Rogowski bobini ve iç yapısı.....	89
Şekil 3.19. Ölçüm kapasitörü ile plazma parametrelerinin ölçümü.....	91

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

Şekil 3.20. Yüksek gerilim trafosu ile oluşturulan DBD plazmasının eşdeğer elektrik devresi	92
Şekil 3.21. İndirgenmiş yüksek gerilim trafolu DBD plazma eşdeğer devresi	93
Şekil 3.22. Ölçüm kapasitörü ile plazma gerilimi arasında oluşan Lissajous (Q-V) grafiği	95
Şekil 3.23. DBD Plazmalarında akım yoğunluğu ve elektrik alan genliği ve dağılımı	96
Şekil 3.24. Atomdan foton saçılımı	99
Şekil 3.25. Elementlerin emisyon spektrumları	99
Şekil 3.26. OES ile DBD plazmalarının ölçümü ve hava plazması için elde edilmiş örnek bir dalga boyu-şiddet grafiği	100
Şekil 3.27. Stark genişlemesinin a) Emisyon spektrumdaki örneği, b) İstatiksel olarak hesaplanması	102
Şekil 3.28. Plazma ile yüzey temizleme a) Plazma uygulanmadan önceki malzeme yüzeyi, b) Plazma uygulandığındaki malzeme yüzeyi, c) Plazma uygulaması sonrasındaki malzeme yüzeyi	104
Şekil 3.29. Plazma ile yüzey aktivasyonu a) Plazma uygulanmadan önceki malzeme yüzeyi, b) Plazma uygulandığındaki malzeme yüzeyi, c) Plazma uygulaması sonrasındaki malzeme yüzeyi	105

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

Şekil 3.30. Plazma ile yüzey kaplama **a)** Plazma uygulanmadan önceki malzeme yüzeyi, **b)** Plazma uygulandığındaki malzeme yüzeyi, **c)** Plazma uygulaması sonrasındaki malzeme yüzeyi 106

Şekil 3.31. Plazma uygulandıktan sonra elde edilen hidrofobik kumaş kaplama **a)** Plazma uygulanan yüzey, **b)** Plazma uygulanmamış yüzey.....106

Şekil 3.32. Plazma uygulandıktan sonra elde edilen hidrofilik kaplama **a)** Plazma uygulanmamış yüzey, **b)** Plazma uygulanmış yüzey 107

Şekil 3.33. Plazma ile yüzey aşındırma **a)** Plazma uygulanmadan önce aşındırma maskesi yerleştirilmiş malzeme yüzeyi, **b)** Plazma uygulandığındaki malzeme yüzeyi, **c)** Plazma uygulaması sonrasındaki malzeme yüzeyi 107

Şekil 3.34. Plazma ile malzeme yüzeyinde çapraz bağların oluşturulması 108

Şekil 4.1. Kullanılan farklı geometrilere sahip elektrot türleri 113

Şekil 4.2. Plakaların hareketini sağlamak için tasarlanan mekanik sistem **a)** Mekanik sistemin Solidworks tasarımı **b)** Mekanik sistemin imal edilmiş hali.....114

Şekil 4.3. Kare elektrot, 1 mm pleksiglas ve 1 mm hava aralığı için anlık plazma voltajı, plazma akımı ve plazma güç grafiği 115

Şekil 4.4. Hava soğuk plazması üretim için kullanılan HDBD sistemi ve ekipmanları 117

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

Şekil 4.5. DBD paralel plaka yöntemi ile 1 kHz’de elde edilen hava soğuk plazmaları: a) 12.35 kV _{rms} , kare elektrot, 3 mm cam ve 2 mm hava aralığı, b) 12.01 kV _{rms} , daire elektrot, 2 mm pleksiglass ve 3 mm hava aralığı, c) 10.10 kV _{rms} , oval elektrot, 2 mm pleksi ve 3 mm hava aralığı, d) 10.20 kV _{rms} , oval elektrot, 2 mm pleksiglass ve 1 mm hava aralığı	119
Şekil 4.6. Daire elektrot, 1 mm cam ve 1 mm hava aralığında 1 kHz’ de uygulanan gerilim değerleri için elde edilen Lissajous eğrileri.....	120
Şekil 4.7. Daire elektrot, 1 mm pleksiglas ve 1 mm hava aralığında 1 kHz’ de uygulanan gerilim değerleri için elde edilen Lissajous eğrileri.....	120
Şekil.4.8. Daire elektrot ve 1 mm cam için plazma gücünün ve elektron yoğunluğun uygulanan gerilime bağlı değişimi (Tüm hava aralıkları)	121
Şekil 4.9. Daire elektrot ve 1 mm pleksiglas için plazma gücünün ve elektron yoğunluğun uygulanan gerilime bağlı değişimi (Tüm hava aralıkları)	122
Şekil 4.10. Oluşan istatistiksel modelin Predicted vs. Actual grafiği	128
Şekil 4.11. Oluşan istatistiksel modelin a) Dönüşüm uygulanmadan önceki Box-Cox grafiği, b) Dönüşüm uygulandıktan sonraki Box-Cox grafiği	128
Şekil 4.12. Tüm faktörlerin ayrı ayrı elektron yoğunluğu üzerindeki etkileri.....	130

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Şekil

Sayfa

Şekil 4.13. Daire elektrotta plazma oluşumu **a)** Elektrottun orta kısımlarında tekli flama oluşumu, **b)** Elektrottun orta kısımlarında çoklu filament oluşumu, **c)** Elektron yüzeyinin tamamındaki filament deşarjı, **d)** Dağınık deşarj oluşumu 132

Şekil 4.14. Oval elektrotta plazma oluşumu **a)** Elektrottun orta kısımlarında tekli flama oluşumu, **b)** Elektrottun orta kısımlarında çoklu filament oluşumu, **c)** Elektron yüzeyinin tamamındaki filament deşarjı, **d)** Dağınık deşarj oluşumu 133

Şekil 4.15. Kare elektrotta plazma oluşumu **a)** Elektrottun uç kısımlarında tekli flama oluşumu, **b)** Elektrottun diğer uç kısımlarında çoklu filament oluşumu, **c)** Elektron yüzeyinin tamamındaki filament deşarjı, **d)** Dağınık deşarj oluşumu 133

Şekil 4.16. Hava aralığı ve plazma geriliminin elektron yoğunluğu üzerindeki etkilerini gösteren 3d grafiği 135

Şekil 4.17. Kare elektrot, 2 mm pleksiglas ve 3 mm hava aralığı faktör değerleri ile elde edilen hava soğuk plazmasının uygulanan gerilim frekansına bağlı olarak elektron yoğunluğunun değişimi.....138

Şekil 4.18. Kare elektrot, 2 mm pleksiglas, 3 mm hava aralığı ve 8.1836 kV_{rms} faktör değerleri ile elde edilen hava soğuk plazmasının uygulanan gerilim frekansına bağlı olarak elektron yoğunluğunun değişimi.....139

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam)

Sekil

Sayfa

- Şekil 4.19.** Optimum değerler için dielektrik bariyerin farklı konumlarına göre hava soğuk plazmasının elde edilmesi **a)** Dielektrik bariyer üst elektrot yüzeyini örtmektedir, **b)** Dielektrik bariyer iki elektrot arasında orta noktada konumlanmıştır, **c)** Dielektrik bariyer alt elektrot yüzeyini örtmektedir 140
- Şekil 4.20.** Optimum değerlerde 1 mm pleksiglas dielektrik malzeme alt plaka yüzeyini ve 1 mm pleksiglas dielektrik malzeme üst plaka yüzeyini kaplayacak şekilde oluşturulan çift bariyer HDBD ile elde edilen hava soğuk plazması..... 141
- Şekil 4.21.** Daire elektrot, 2 mm pleksiglas, 2 mm hava aralığı ve 1 kHz 13.8970 kV_{rms} değerlerinde üretilen hava soğuk plazmasının spektrumu 142

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
Tablo 2.1. ROS ve RNS Türleri.....	8
Tablo 2.2. Sıcaklığa göre plazmaların sınıflandırılması ve özellikleri	14
Tablo 2.3. Değişik sistemler için plazma parametreleri.....	44
Tablo 2.4. Bazı gazlar için parıltı deşarjında gözlemlenen renkler	52
Tablo 4.1. Kullanılan elektrotların boyutları ve yüzey alanları	113
Tablo 4.2. İstatiksel analiz ve optimizasyon için kullanılan faktör ve cevap değerleri	123
Tablo 4.3. ANOVA Tablosu.....	127
Tablo 4.4. Uyum istatistiği tablosu	127
Tablo 4.5. Optimizasyon değerleri.....	136
Tablo 4.6. Farklı ölçüm anları için elde edilen elektron yoğunlukları.....	137
Tablo 4.7. Uygulanan gerilimin dalga şekline göre optimum değerlerde elde edilen elektron yoğunlukları	140
Tablo 4.8. Optimum plazma faktör değerler için dielektrik bariyerin farklı konumlarına göre elde edilen elektron yoğunlukları	141

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
π	Pi sayısı
ρ	Yük yoğunluğu
ϕ	Elektriksel potansiyel
Λ	Plazma parametresi
$^{\circ}\text{K}$	Kelvin derece
a	İvme
A	Amper birimi
A	Townsend katsayısı
B	Townsend katsayısı
c	Işık hızı
C	Coulomb
C	Kapasitans
cd	Kandela birimi
cm^{-3}	Santimetre küp hacimdeki yoğunluk
eV	Elektrovolt birimi
F	Farad birimi
Hz	Hertz birimi
GHz	Gigahertz birimi
J	Akım yoğunluğu

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
j	Joule
h	Planck sabiti
i	Akım
I	Akım
k	Boltzmann sabiti
kg	Kilogram birimi
kHz	Kilohertz birimi
kV	Kilovolt birimi
L	Endüktans
n	Parçacık yoğunluk
nF	Nanofarad
m	Metre birimi
m^2	Metrekare
m^{-3}	Metreküp hacimdeki yoğunluk
mm	Milimetre birimi
MHz	Megahertz birimi
q	Elektron yükü
Pa	Paskal birimi
P_{abs}	Absorbe edilen güç

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

<u>Simgeler</u>	<u>Açıklama</u>
p_d	Basınç aralık
pF	Pikofarad
r	Yarıçap
r	İç Direnç
R	Direnç
rad	Radyan
s	Saat birimi
sn	Saniye birimi
t	Zaman
T	Sıcaklık
T	Periyot
u	Hız
U	Gerilim
U_{rms}	Gerilim etkin değeri
U_{pp}	Gerilim sinyalinin tepeden tepeye değeri
V	Hacim
V	Volt birimi
w	Açısal frekans
W	Watt birimi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)

Kısaltmalar

3D	Üç boyutlu
ABPJ	Atmosferik basınç plazma jet
AA	Alternatif akım
AC	Alternatif akım
ANOVA	Varyans analizi
CCP	Kapasitif eşleşmiş plazmalar
csv	Virgülle ayrılmış değişkenler
DBD	Dielektrik bariyer deşarjı
DA	Doğru akım
DC	Doğru akım
DNA	Deoksiribo nükleik asit
ESR	Elektron spin rezonans
FWHM	Maksimum yarısı tam genişlik
HDBD	Hacimsel dielektrik bariyer deşarjı
ICP	Endüktif eşleşmiş plazmalar
LCR	Endüktans kapasitans direnç
LİF	Lazerle indüklenen floresan
LTS	Laser Thomson saçılımı
MD	Mikrodalga

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam)**Kısaltmalar**

NIST	Ulusal standartlar ve teknoloji enstitüsü
OES	Optik emisyon spektrometresi
PCB	Baskı devre kartı
pp	Tepeden tepeye
RF	Radyo frekansı
RLC	Direnç bobin kapasitör
RONs	Reaktif Oksijen ve Nitrojen parçacıkları
RMS	Etkin değer
USB	Evrensel seri veri yolu
UV	Morötesi
YDBD	Yüzeysel dielektrik bariyer deşarjı

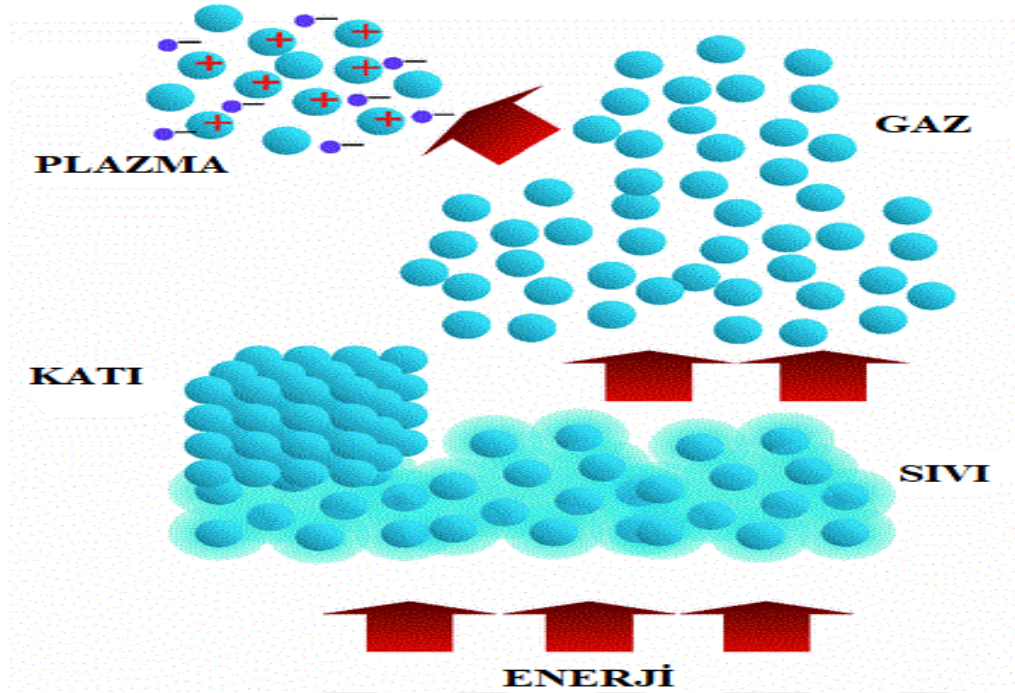
1. GİRİŞ

Maddenin ne olduğu ile ilgili tartışmalarda bilimin öncüsü kabul edilen Aristoteles; yer, nitelik ve boyut değiştirebilip oluşanı veya yok olanı madde olarak tanımlamış ve maddeyi 4 farklı gruba ayırmıştı. Buna göre maddeleri toprak, su, hava ve ateş olarak sınıflandırmıştı. Günümüzde ise madde uzayda yer kaplayan, hacmi ve kütlesi olan tanecikli yapı olarak tanımlanmaktadır ve fiziksel hallerine göre ayrırmakta olup; maddenin fiziksel halleri katı, sıvı, gaz ve plazma olarak sınıflandırılmıştır. Eski ve yeni tanımlamada toprak yani katı, su yani sıvı ve hava yani gaz çok zorlanmadan ifade edilebilen, tanımlanabilen ve algılanabilen madde formları olmalarına karşın ateş yani plazma maddenin diğer 3 haline göre anlaşılması, tanımlanması ve algısı daha zor ve gizlemlidir.

Plazma Latince kökenli bir kelime olup Latince ve İngilizce de “plasma” olarak ifade edilir. Latince “plasma” kelimesinin kökeni eski yunanca olan “plassein” kelimesi olup “kalıplanmış veya yaratılmış bir şey” anlamı taşımaktaydı. Bilimsel olarak ilk kez tıp ta 1845’de “kanın sıvı kısmını” tanımlamak için ak kan anlamında plazma kelimesi kullanılmıştır. Fizik de ise ilk kez 1928’de “iyonize gaz” anlamında plazma kelimesi kullanılmıştır.

Plazma ile ilgili ilk çalışma 1808’de Sir Humpry Davy’in DC ark deşarjı elde etmesi ile başlamıştır. 1932’de ise Sir Humpry Davy’nin asistanlığını yapmış olan Micheal Faraday ve arkadaşları tarafından yüksek gerilimli DC bir elektrikli deşarj tüpü geliştirilmiştir. 1879’da Sir William Crookes gazlardaki elektriksel deşarjları incelerken keşfettiği ve yine iyonize gaz olarak tanımladığı formu maddenin diğer 3 formundan farklı olduğunu belirtip keşfettiği bu formu maddenin dördüncü fiziksel formu olarak nitelendirmiştir. 1926’da Frans Michel Penning alçak basınçtaki cıva buharı üzerindeki çalışmalarında cıva buharından yayılan yüksek frekanslı radyo dalga titreşimlerini ölçümlenmiştir. 1929’de ise Irving Langmuir cıva buharından yayılan radyo frekanslarının nedenini araştırırken Sir William Crookes’ in maddenin 4. formu olarak tanımladığı iyonize gaz formunun radyo dalgaları yaydığı keşfedip bu iyonize gazı plazma olarak tanımlamıştır. Irving Langmuir plazmaları kullanarak yüzey kimyası

üzerindeki araştırmaları ve keşifleri ile 1932’ de Kimya dalında Nobel ödölü ile onurlandırılmıştır.



şekil 1.1. Maddenin dört fiziksel hali (Wong, C.S. and Mongkolnavin, R., 2016).

Maddenin katı, sıvı ve gaz halinden sonra gelen 4. durumu plazma olarak adlandırılır. Plazma durumunda maddeyi oluşturan atomlar maddenin diğerk hallerindeki durumlarına göre daha fazla enerjiye sahip olduklarından maddenin diğerk hallerine göre daha hareketli olup sürekli titreşim halinde olurlar. Bu durumdan dolayı maddenin diğerk durumlarına nazaran fiziksel ve kimyasal etkileşime girme istekleri daha yüksek olmaktadır.

Maddenin hal değışimlerini sağlayan enerji genellikle ısıdır. Maddeler ısıtıldıkça veya soğutuldukça hal değıştirir. Gaz fazından ısı uygulanarak elde edilen plazma Sıcak Plazma olarak isimlendirilir. Sıcak plazmada atomların alt parçacıklarının tamamı (proton, nötron ve elektron) ısı enerjisi ile yüksek enerji seviyelerine sahip olmakta ve titreşim halinde bulunmaktadır. Bu neden ile sıcak plazmalar yüksek sıcaklıklara sahip olmaktadır.

Soğuk Plazma olarak nitelendirilen plazmalarda ise ısı yerine genellikle elektrik enerjisi kullanılmakta olup enerji elektronlar üzerine uygulanır.

Elektronlar yüksek enerji seviyelerine sahip olsalar bile kütleleri atom çekirdeğine göre çok çok küçük olduğundan termodinamik yasaları gereği atomun tamamı yüksek enerjiye sahip olamaz bu nedenle atomun tamamının ısınması mümkün olmaz. Şekil1.1' de görüleceği gibi maddenin fiziksel hal durumunu belirleyen temel etken elektronların sahip oldukları enerji seviyelerinin etkisiyle atom çekirdeğine uzaklığı ve serbestliği olduğundan, sadece elektronların yüksek enerji seviyelerine sahip olması hal değişimi yaratıp plazma oluşmasını sağlar. Bu neden ile sadece elektronların yüksek enerji ile titreşiminden dolayı oda sıcaklığında plazma elde edilmesi mümkün olur.

Soğuk plazmalarda elektronların yüksek hızlarda ve serbestçe hareket etmesinden dolayı bu elektronlar ile etkileşen atomlar iyonize olabilirler. Plazma içindeki iyonlarda Coulomb kuvvetleri ile birbirlerini etkilemektedir. Plazma içinde radikaller ve uyarılmış atomlarda bulunur. İyonize parçacıklar bulunduğundan dolayı soğuk plazmalar elektrik ve manyetik alanlardan etkilenmektedir.

Soğuk plazma uygulamaları düşük sıcaklık seviyelerinden dolayı endüstride birçok alanında yer edinmiştir. Yüksek enerjili elektronlar ile fiziksel ve kimyasal etkileşimlere daha hızlı tepki vermesinden dolayı işlem sürelerinin kısaltmakla beraber düşük sıcaklıklara sahip olmasından dolayı daha az tahrip edici etkilere sahip olmamaları başlıca kullanım nedenleridir.

Son yıllardaki araştırmalar ve teknolojik gelişmelerle birlikte soğuk plazma kullanımının alanı oldukça genişlemiştir. Kullanım alanları incelendiğinde gıda, ziraat, su ürünleri, tekstil, tıp, malzeme bilimi, baskı devre kartı (PCB) üretimi ve yarı iletken üretimi gibi çok geniş bir yelpazeye sahip olduğu görülebilir. Soğuk plazmalar ile yüzey aktivasyonu, yüzey sterilizasyonu, aşındırma ve kaplama uygulamaları gerçekleştirilmektedir.

Akademik yapılan çalışmalar incelendiğinde ise soğuk plazmaların kanser tedavilerinde, diş minesini tedavilerinde, yara tedavilerinde ve itki sistemlerinde kullanıldığı görülmektedir.

Soğuk plazma kullanımına ilişkin ilgin ve kullanım alanının artması ile soğuk plazmaların üretiminin önemi artmıştır. Soğuk plazmaların üretimini etkileyen temel faktörlerin belirlenmesi, üretim yöntemlerinin tayini, optimize edilmesi ve geliştirilmesi birçok disiplinin gelişimine olanak sağlayacaktır.



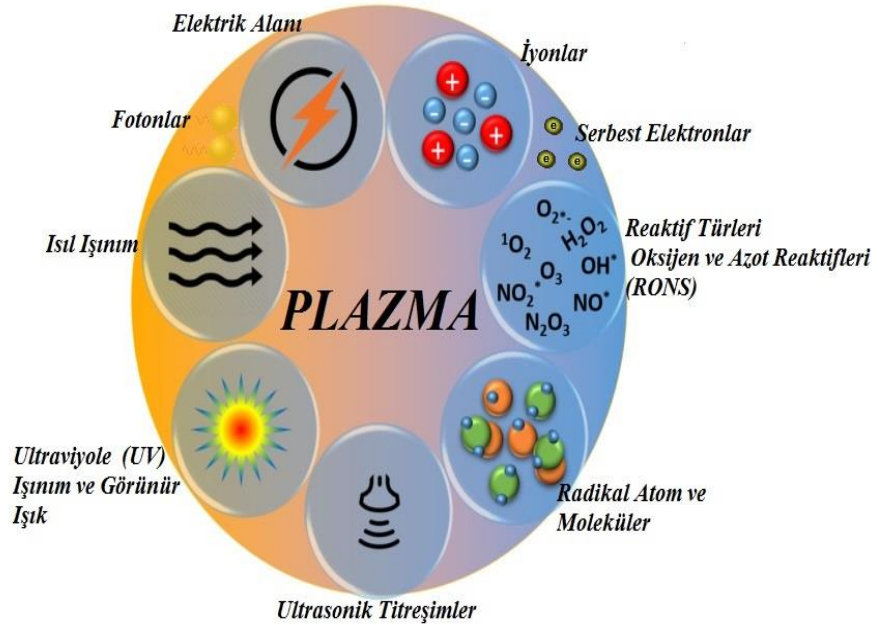
2. PLAZMANIN YAPISI, TÜRLERİ, PARAMETRELERİ ve ÜRETİM YÖNTEMLERİ

2.1. Plazma Yapısı

Maddelerin fiziksel hal değişimlerinde sahip oldukları yüksek enerji seviyelerinden dolayı elektronlar atom çekirdeğinden uzaklaşır ve elektron ile çekirdek arasındaki atom boşluğu artar. Plazma formunda ise elektron titreşimleri, elektronları çekirdeklerinden o denli uzaklaştırır ki elektronlar serbest hale geçer bundan dolayı ve madde içindeki atom ve molekül yapısı kırılır. Elektron hareketliliği ve titreşimleri Coulomb kuvveti ile etkilenip elektron ve atomların esnek ve esnek olmayan çarpışmalarına ve sürtünmelerine neden olur. Bu sebeplerden plazma yapısında serbest elektronlar, negatif yüklü iyonlar, pozitif yüklü iyonlar, uyarılmış atom ve moleküler, yarı kararlı atomlar ve moleküler, radikal atom ve molekül türleri, reaktif atom ve molekül türleri, serbest radikaller, nötr parçacıklar, fotonlar ve morötesi (UV) ışınımı ile görünür ışık bulunur (Conrads, H. and Schmidt, M., 2000; Laroussi, M. and Leipold, F., 2004a). Ek olarak plazmada ultrasonik titreşimler ve elektromanyetik ışıma ile ısı ışıma oluşur.

SICAK PLAZMALAR

SOĞUK PLAZMALAR



Şekil 2.1. Plazmanın yapısı (AMS, 2022).

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi plazma içeriği hem madde hem de farklı biçimlerde enerji barındıran karmaşık bir yapıya sahiptir. Plazmanın etkinliğini içeriğindeki parçaların kimyasal ve fiziksel etkileşimleri, iyonize parçaların elektriksel etkileşimleri ile plazmadan yayılan ısı, ses ve elektromanyetik ışınımalar belirler. Bundan dolayı plazma oluşumu için maddenin diğer hallerini elde etmek için gereken enerjiden daha yüksek enerji seviyelerinin uygulanmasına ihtiyaç vardır. Maddelerin sahip oldukları enerji seviyesi atomun hareketli parçacığı olan elektronun kinetik enerji değişimi ile ifade edilebilir. Bir elektronun atom boşluğunda 1 volt potansiyel fark oluşumu nedeniyle sahip olduğu kinetik enerji miktarı elektron volt (eV) olarak bilinir. Molekül ve atom düzeyindeki tüm enerji türleri elektron volt ile hesaplanıp ifade edilir. Maddenin hal değişimine göre parçacıklarının sahip oldukları elektron volt enerji seviyeleri Şekil 2.2’de verilmiştir. Görüleceği üzere plazma yapısının enerji seviyeleri maddenin diğer halleri ile karşılaştırıldığında çok yüksektir. Maddenin fiziksel halini belirleyen temel etken ısı enerjisi olduğundan ısı enerji ve sıcaklık değeri maddenin sahip olduğu elektron volt miktarı ile belirlenebilir. Plazma uygulamalarında plazma sıcaklığı genellikle elektron volt miktarı ölçülerek ile belirlenir.

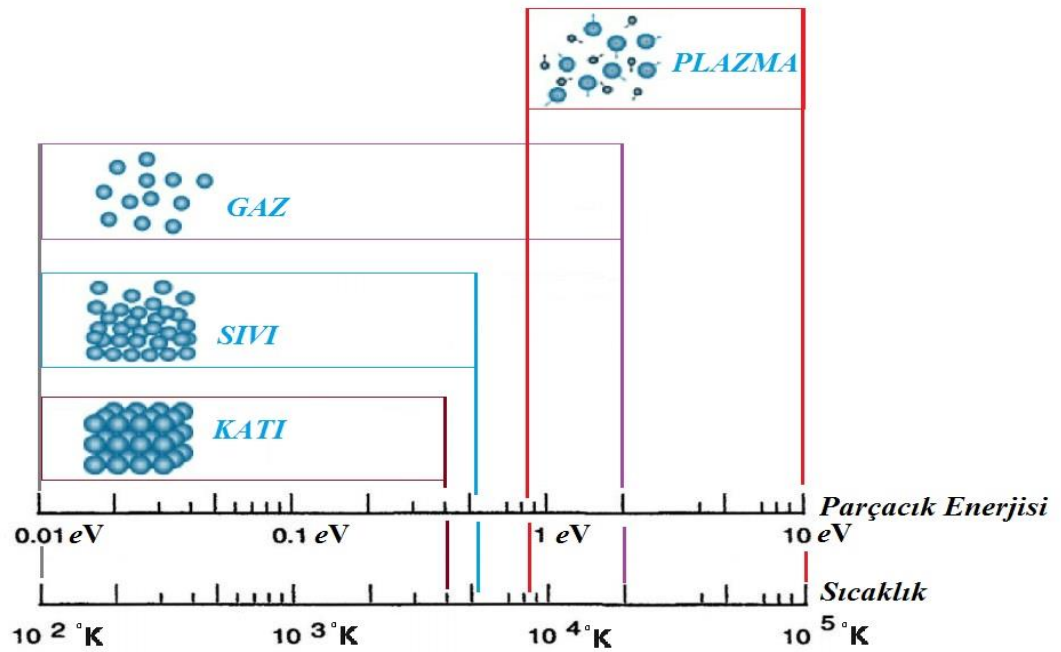
Bir elektronun sahip olduğu kinetik enerji yani 1 elektron volt $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$ ‘dür. Enerji ve sıcaklık arasında dönüşüm için Boltzmann sabiti kullanılmaktadır. Boltzmann sabiti $k_B = 1,3806452 \times 10^{-23} \text{ J/}^\circ\text{K}$ olduğuna göre bir 1eV enerji ile oluşan sıcaklık aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\frac{1 \text{ eV}}{k_B} = \frac{1,602 \times 10^{-19} \text{ (J)}}{1,3806452 \times 10^{-23} \text{ (J/}^\circ\text{K)}} \quad (2.1)$$

$$\frac{1}{k_B} = \frac{1,602 \times 10^{-19} \text{ (J/eV)}}{1,3806452 \times 10^{-23} \text{ (J/}^\circ\text{K)}} = 11604,505 \left(\frac{^\circ\text{K}}{\text{eV}} \right) \quad (2.2)$$

Buna göre 1 eV enerji 11604,505 °K bir sıcaklığa sahiptir. Şekil 2.2 incelendiğinde fiziksel hal değişimleri katıdan plazmaya doğru gittikçe elektron hareketi dolayısıyla kinetik enerjisi seviyeleri artıkça sıcaklığının da arttığı görülmektedir. Yüksek enerjiye ve yüksek sıcaklıklara sahip olduklarından dolayı plazmalar akışkandır.

Plazma yapısında ısı ışınlamında sonra önemli olan diğer bir enerji türü ultraviyole ışınlamadır. Elektromanyetik tayfta dalga boyu 10 nm ile 400 nm arasında kalan bölgedeki ışımlara morötesi yani ultraviyole (UV) ışınlam denilmektedir. UV ışınlam insan gözü ile gözlenemez olup tüm plazma türleri tarafında yayılır. UV ışınlamın canlı doku ve mikroorganizmaların DNA ve enzim yapılarını bozucu etkisi bulunduğunda antiseptik özellik gösterir. Özellikle 220 nm ile 280 nm dalga boyları arasında kalan ultraviyole ışınlamı sterilizasyon işlevi için kullanılmaktadır (Laroussi M., 2002). UV ışınlamı 3 eV (400 nm 'de) ile 124 eV (10 nm 'de) enerji aralığına sahiptir.



Şekil 2.2 . Maddenin fiziksel hallerine göre sahip oldukları enerji ve sıcaklık seviyeleri.

Plazma yapısındaki iyonlar plazmayı elektrik alanlara ve manyetik alanlara karşı duyarlı hale getirir. Serbest elektronlarla birlikte plazmadaki iyonlar plazma içerisinde akım akmasına izin verir. Plazma yapısındaki negatif ve pozitif iyon sayısı eşittir ve genel olarak plazmalar elektriksel olarak nötr halde bulunur.

Plazma yapısında bulunan radikaller ve reaktifler plazmayı kimyasal tepkimelere duyarlı hale getiren parçacıklardır. Radikaller dış yörüngelerinde ortaklaşmamış veya eşleşmemiş elektronlar bulunan yüksek enerji seviyelerine sahip atom ve moleküller olarak tanımlanırlar (Karabulut, H. ve Gülay, M. Ş.,

2016). Radikallerin son yörüngelerinde eşlenmemiş elektron bulunması başka atom ve moleküllerle kimyasal reaksiyonlara girme istekleri artırmaktadır. Radikaller serbest halde veya birleşik halde bulunduğu gibi iyon olarak ya da nötr halde bulunabilir. Bir maddenin kimyasal tepkimelere girme isteğine reaktivlik denilmekte olup çoğu radikalın kimyasal tepkimelere girme isteği yüksek olduğundan bu tür radikaller reaktif olarak tanımlanır. En az iki radikalın oluşturduğu moleküler yapı diradikal olarak adlandırılır. En önemli diradikal yapısı oksijen (O_2) molekülüdür. Oksijen diradikali reaktif olduğundan özellikle diğer radikaller reaksiyona girme isteği yüksektir. En önemli ve en çok bilinen oksijen radikali ozon (O_3) 'dur. İki oksijen molekülü ile oluşan ozon radikalinde bir oksijen molekülü diğer oksijen molekülünden bir oksijen atomu alarak ozon (O_3) oluşturduğu sırada yalnız kalan oksijen atomu aşırı derecede reaktif olup bulunduğu ortamdaki her madde ile reaksiyona girip oksitler. Özellikle canlı hücre ve mikroorganizmalarda ozon ve ozon oluşumdan kaynaklanan yalnız oksijen atomu yağ, karbonhidrat ve protein bileşiklerine etki ederek deoksiribo nükleik asit (DNA) ve enzim yapısına hasar verir. Bu özelliğinden dolayı biyomedikal uygulamalarında ozon kullanımı sıklıkla tercih edilir. Ozon üretimi için oksijen gazı ya da havadan oluşturulan soğuk plazmalar kullanılır.

Reaktif türleri oksijen ve/veya nitrojen kaynaklıdır. Reaktif oksijen ve nitrojen türleri (RONS) iki başlıkta incelenir. Buna göre oksijen kaynaklı reaktif türleri (ROS) ve nitrojen kaynaklı reaktif türleri (RNS) olarak kategorize edilir. ROS ve RNS türleri Tablo 2.1'de sunulmuştur.

Tablo 2.1. ROS ve RNS Türleri (Karabulut, H. ve Gülay, M. Ş., 2016).

ROS		RNS	
O_2^-	Süperoksit	NO^-	Nitrik Oksit
OH^-	Hidroksil	NO_2^-	Nitrojen Dioksit
ROO^-	Peroksil	HNO_2	Nitrik Asit
RO^-	Alkoksil	NO^+	Nitrosil Katyonu
HO_2^-	Hidroperoksil	NO^-	Nitrosil Anyonu
LOO^-	Lipid Peroksil	N_2O_4	Dinitrojen Tetroksid
H_2O_2	Hidrojen Peroksit	N_2O_3	Dinitrojen Trioksit
$HOCl$	Hipokloröz Asit	$ONOO^-$	Peroksinitrit
$HOBr$	Hipobromöz Asit	$ONOOH$	Peroksinitrik Asit
$^1O_2$	Singlet Oksijen	NO_2^+	Nitronyum Katyonu
O_3	Ozon	NO_2Cl	Nitril Klorid
		$ROONO$	Alkil Peroksinitrit

2.2. Plazma Türleri

Plazmaları sınıflandırmak için plazmaya oluşturan etkenler kullanılır. Plazmayı oluşturan etkenler sıcaklık ve basınçtır. Plazmanın doğal olması veya yapay olarak üretilmesi, plazmanın onu üreten kaynak sınırında kalması (Durağan) veya kaynağından uzaklaşabilmesi (Akan), plazmalarının iyonlaşma dereceleri (Tam iyonize ya da Kısmi iyonize), yapay plazma oluşturmak için kullanılan gerilim ve gerilime bağlı farklı frekans bantları plazmaları sınıflandırmak için kullanılmaktadır.

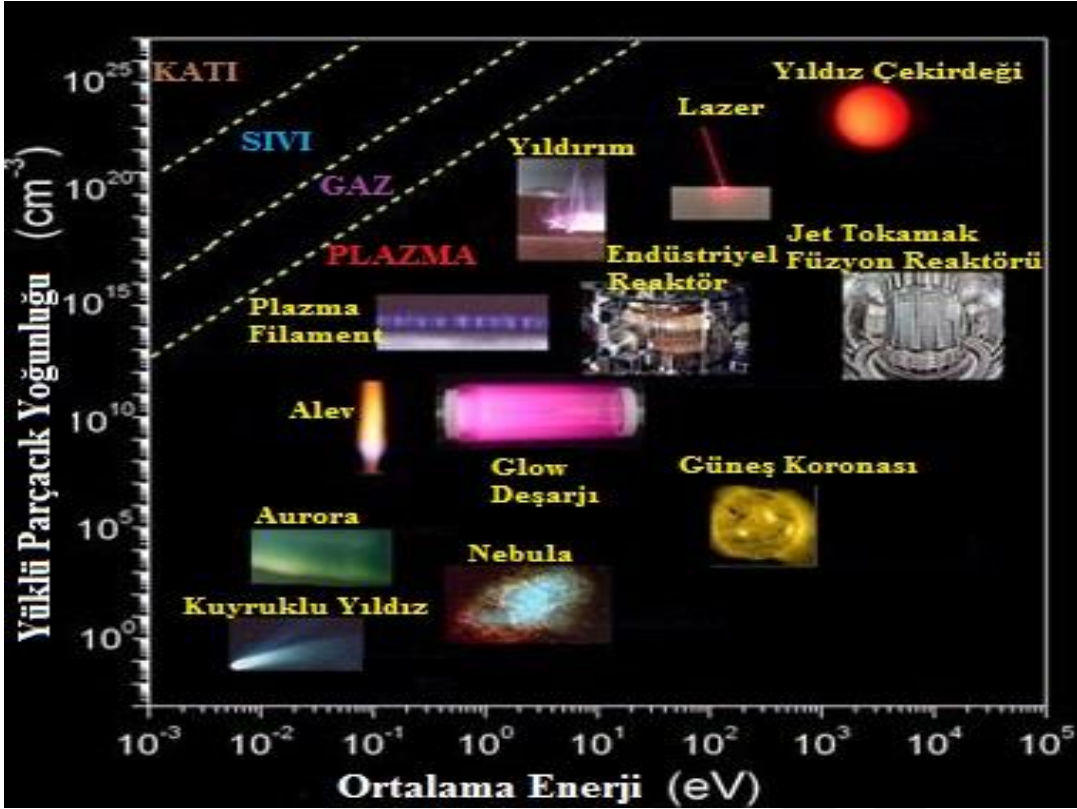
2.2.1. Oluşumuna göre plazmaların sınıflandırılması

Evrendeki maddelerin büyük bir çoğunluğunun plazma formunda bulunduğu kabul edilmektedir. Büyük patlamadan hemen sonra oluşup evreni kaplayan maddelerin çok yüksek bir sıcaklığa sahip oldukları ve bundan dolayı plazma formunda oldukları düşünülmektedir. Buna göre madde ilk plazma formunda idi ve evrendeki diğer madde formları plazmadan soğuyarak oluşmuştur.

Evrenin ısı ve sıcaklık kaynağı oluşturan yıldız, yıldız kümeleri ve yıldız olduğunu sağlayan nebula denen yapılar plazma formundadır. Uzayda gözlemlenen plazmalar 2 keV ve üzeri enerji seviyelerine sahiptir.

Yeryüzünde de doğal plazma formları gözlemlenmektedir. Aristoteles'in dördüncü element olarak tanımladığı ateş ve alev doğal bir plazmadır. Atmosferin iyonosfer tabakası, kutuplarda görülen Auroralar, Van Allen kuşakları, yüklü bulutlar arası oluşan şimşekler ile yüklü bulutlar ile yer yüzü arasında oluşan yıldırımlar yer yüzünde doğal olarak oluşan plazma yapılarıdır. Yer yüzündeki doğal plazmalar 0.1 eV ile 50 eV arasında bir enerji aralığına sahiptir. Bilinen doğal plazmalara ait enerji seviyeleri Şekil 2.3'de sunulmuştur.

Endüstriyel ve akademik amaçlı insan eliyle üretilen tüm plazmalar yapay plazmadır. Bu plazmalar farklı üretim teknikleri uygulanarak üretilir. Genel olarak farklı basınç seviyelerine sahip gazlara orta ve düşük frekansta yüksek gerilim uygulanarak değişik türden plazmalar elde edilir.



Şekil 2.3. Doğal plazma türleri ve enerji seviyeleri (Plasmaprometeo, 2022).

2.2.2. Sıcaklığa göre plazmaların sınıflandırılması

Plazma yapısındaki iyonize parçacıklar, uyarılmış parçacıklar, radikaller, reaktifler, serbest elektronlar ve fotonlar plazma sıcaklığı belirleyen unsurlardır. Plazma yapısındaki tanecikli yapılar kütle oranında kinetik enerjiye sahip olurlar. Sahip oldukları bu kinetik enerjiye göre parçacıkların ısıları artar ve kütle miktarlarına göre sıcaklık seviyelerine sahip olurlar. Bir elektron kütesinin bir proton kütesinin yaklaşık 1/1836 kadar olduğu düşünülürse plazma yapısındaki atomik yapıdaki türlerde elektron kütleleri atom çekirdek kütlelerinden binlerce kat daha küçüktür. Bu kütle farkından dolayı elektronların kinetik enerji seviyeleri atom çekirdeğine göre çok yüksektir. Yüksek kinetik enerjilerinden dolayı elektron sıcaklıkları atom çekirdeğinden daha yüksektir. Yine kütle farkının yüksek olmasından dolayı elektron ile atom çekirdeği arasında ısı transferi termodinamik yasalarına gereğince yeterli seviyede gerçekleşemez bundan dolayı da elektron sıcaklığı ve enerjisi atomun toplam sıcaklığını artıramaz.

Plazma fiziğinde plazmanın temel yapısının kırılmasından dolayı parçacık sıcaklıkları üzerinden plazma sıcaklığı tayin edilir. Parçacık sıcaklıkları eV cinsinden ifade edilir. Parçacık sıcaklığı yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$kT_{\text{parçacık}} = 1 \text{ eV} \cong 11604,505 \text{ }^{\circ}\text{K} \quad (2.3)$$

Buna göre parçacık enerjileri 1 eV seviyesine geldiğinde sıcaklıkları 11604.505 °K olmaktadır. Plazma sıcaklığını belirlemek için hesaplamaya katılan parçacık sıcaklıkları: nötr durumdaki parçacık sıcaklığı T_g ki bu parçacıklar plazmanın olduğu gaz fazından değişime uğramadan geldiğinden gaz sıcaklığı olarak da isimlendirmektedir, iyonize parçacık sıcaklığı T_i , uyarılmış parçacık sıcaklığı T_u , molekül yapısından ayrılan atomların sıcaklığı T_a ve elektron sıcaklığı T_e olarak ifade edilir. Plazma yapısındaki enerji formundaki yapıların sıcaklıkları: foton enerjisinin sıcaklık karşılığı T_f , ısı ışıınım (radyasyon) T_r ve plazma yapısının bozulmasında kaynaklı enerji temsilen bozulma sıcaklığı T_d olarak ifade edilir. Plazma sıcaklığı T_p ile temsil edilmekte olup tüm yapıların sıcaklıkları toplamına eşittir. Buna göre T_p :

$$T_p = T_g + T_i + T_u + T_a + T_e + T_f + T_r + T_d \quad (2.4)$$

Plazmalar sıcaklık seviyelerine göre yüksek sıcaklık plazmaları ve düşük sıcaklık plazmaları olarak iki temel kategoriye ayrılır (Tusek, L., et al., 2001). Yüksek sıcaklık plazmalarında plazma sıcaklığı 10^6 °K den daha yüksek seviyelere sahiptir (Günaydın, B., 2009). Yüksek sıcaklık plazmalarında plazma yapısındaki tüm parçacıklar yüksek kinetik enerjilere ve sıcaklıklara sahiptir. Termodinamik açıdan tüm parçacıkların ısı dengede olduğu varsayılır. Parçacıkların yüksek ısı seviyelere çıkması parçacıklar arasındaki ısı transferini hızlandırır ve tüm parçacıkların ve yapıların aynı sıcaklık seviyelerinde termal dengeye ulaşmasını sağlar. Bu durumdaki plazmalara termodinamik dengede (izotermal) sıcak plazmalar denilmektedir. İzotermal sıcak plazmalarda:

$$T_g = T_i = T_u = T_a = T_e = T_f = T_r = T_d \quad (2.5)$$

Doğal olan yüksek sıcaklık plazmaları 10^8 Pa ve üzeri yüksek basınçlarda oluşurlar. Yüksek sıcaklık ve yüksek basınç etkisiyle iyonlaşma dereceleri %100'e yakındır veya tam iyonize halde bulunur (Friedrich, J., 2011). Güneş ve diğer yıldızlar doğal olan yüksek sıcaklık plazma kaynaklarıdır ve yapılarında meydana gelen nükleer aktiviteler sonucu yüksek sıcaklıkta ve basınçta plazmalar oluşur. Yeryüzünde ise yıldırım ve şimşekler yüksek sıcaklık plazmalarına örnek verilebilir. Tokamak füzyon reaktörü gibi termonükleer füzyon ile yapay olarak yüksek sıcaklık plazmaları elde edilmektedir.

Plazma sıcaklığı 10^6 °K den düşük olan plazmalar düşük sıcaklık plazmaları olarak adlandırılır (Günaydın, B., 2009). Farklı basınç seviyelerinde oluşabilmektedirler. Yapısında bulunan elektron ve foton dışında kütleleri bu parçacıklara göre çok daha yüksek olan atomik ve moleküler yapıdaki parçacıkların kinetik enerjileri dolayısıyla sıcaklıkları yaklaşık aynıdır. Düşük sıcaklıklı plazmalarda termal dengeye ulaşamaz. Tam olarak izotermal bir yapı oluşmasa da yeterli sıcaklıklarda foton sıcaklığı dışında plazma yapısındaki diğer bileşenlerin sıcaklığı yaklaşık olarak aynı olabilir. Bu durum bölgesel (lokal) termal denge olarak değerlendirilir ve bu plazmalara sıcak plazma denir (Fridman, A. A., 2012). Sıcak plazmalarda:

$$T_g \cong T_i \cong T_u \cong T_a \cong T_e \cong T_r \cong T_d \neq T_f \quad (2.6)$$

Düşük sıcaklık plazmalarında lokal olarak da termal denge kurulamayabilir. Bu plazmalarda yüksek kinetik enerjilerinden dolayı elektronların sıcaklığı plazma yapısındaki diğer bileşenlerin sıcaklığından her daim büyük olur. Elektron sıcaklığı binlerce santigrat derece ulaşsa bile ($T_e \approx 5000-1E+5$ °C $\approx 1 - 2$ eV) düşük kütleleri yüzünden diğer parçacıklar ile termodinamik yasaları gereğince yeterli miktarda ısı iletimi gerçekleşemez (Tabares, F. L. and Junkar, I., 2021). Isı enerjisi ya da elektromanyetik enerji ile titreşen elektronlar plazma içinde diğer parçacıklar ile esnek veya esnek olmadan çarpıştığında yine düşük kütlelerinin etkisi ile sahip oldukları kinetik enerjilerinin düşük bir miktarını kaybederler. Bu nedenle elektronların kinetik enerjileri ve sıcaklıkları her daim yüksek seviyelerde kalmaktadır. Termal dengede olmayan ve elektron sıcaklığı diğer bileşenlerin sıcaklığından daha büyük olan plazmalara

soğuk plazmalar adı verilmektedir (Fridman, A. A., 2012). Buna göre soğuk plazmalarda:

$$T_e \gg T_g \cong T_i \cong T_u \cong T_a \cong T_r \cong T_d \neq T_f \quad (2.7)$$

Düşük sıcaklık plazmalarında kısmi iyonizasyon görülür. İyon miktarı yüksek sıcaklık plazmalarına göre daha az olsa da radikal, reaktif, yarı kararlı ve uyarılmış parçacık sayısı daha fazladır (Yang, B., et al., 2011). Sıcak plazmalarda plazma sıcaklığı $10^3 - 10^6$ °K arasındadır (Stranak, V., 2007). Doğal olarak ateş veya alev sıcak plazmalara örnek verilebilir aynı şekilde yeryüzünün magma katmanı sıcak plazma yapısına sahiptir. Yapay olarak değişik basınçlarda farklı gaz türlerine yüksek frekansta yüksek gerilim uygulanarak yüksek akım geçişi ile plazmalar yüksek sıcaklıklarda yerel termal dengeye ulaştırılarak sıcak plazmalar üretilir. Endüstriyel olarak kullanılan plazma jet kesim plazmaları ve kaynak işlevi gören plazmalar yapay sıcak plazma örnekleridir. Soğuk plazmalarda ise plazma sıcaklığı 10^3 °K altındadır (Stranak, V., 2007). Doğal olan soğuk plazmalara auroralar ve Van Allen kuşakları örnek verilebilir. Soğuk plazmalar düşük basınçlarda ve düşük sıcaklıklarda oluşabilir. Yapay soğuk plazmalar genel olarak atmosferik basınçta ve oda sıcaklığında üretilir. Yapay soğuk plazma üretimi için değişken gaz türlerine orta veya düşük frekanslarda yüksek gerilim uygulanır. Düşük basınç ve düşük sıcaklık seviyelerinden dolayı soğuk plazmalar endüstride ve akademide çok geniş kullanım alanına sahiptir.

Lazer soğutma ile çok düşük sıcaklık seviyelerine indirilmiş gaz atomları iyonlaşma sınırının hemen üzerinde enerji seviyesine sahip lazer ışınları ile fotoiyonize edilerek çok düşük sıcaklık plazmaları elde edilmektedir (Lyon, M. and Rolston, S. L., 2017). Çok düşük sıcaklık plazmaları yapay olarak laboratuvar koşullarında vakum ortamında üretilmekte olup tipik olarak elektron sıcaklıkları $T_e = 100$ m°K ve iyon sıcaklıkları $T_i = 10$ μ°K seviyelerindedir ve elektron yoğunlukları $n_e = 2 \times 10^9$ cm⁻³ (Shukla P.K., 2010). Plazma sıcaklıklarına bağlı olarak sınıflandırma işlemi için gerekli veriler ve özellikler Tablo 2.2’de sunulmuştur.

Tablo 2.2. Sıcaklığa göre plazmaların sınıflandırılması ve özellikleri.

Yüksek Sıcaklık Plazmaları	Düşük Sıcaklık Plazmaları		Çok Düşük Sıcaklık Plazmaları
	Sıcak Plazmalar	Soğuk Plazmalar	
İzotermal Plazmalar	Bölgesel İzotermal Plazmalar	İzotermal Olmayan Plazmalar	İzotermal Olmayan Plazmalar
$T_e = T_o = T_f$	$T_e \cong T_o \neq T_f$	$T_e \gg T_o \neq T_f$	$T_e \gg T_o \neq T_f$
$T_p \geq 10^6 \text{ }^\circ K$	$10^6 \text{ }^\circ K \geq T_p \geq 10^3 \text{ }^\circ K$	$T_p \leq 10^3 \text{ }^\circ K$	$T_p \leq 10 \text{ }^\circ K$
Tam İyonize Plazmalar	Kısmi İyonize Plazmalar	Kısmi İyonize Plazmalar	Kısmi İyonize Plazmalar
$n_e \geq 10^{20} \text{ m}^{-3}$	$10^{20} \text{ m}^{-3} \geq n_e \geq 10^{10} \text{ m}^{-3}$	$n_e \leq 10^{10} \text{ m}^{-3}$	$n_e \approx 2 \times 10^3 \text{ m}^{-3}$
$P_p \geq 10^8 \text{ Pa}$	$10^8 \text{ Pa} \geq P_p \geq 10 \text{ Pa}$	$10^5 \text{ Pa} \geq P_p \geq 10^{-1} \text{ Pa}$	$P_p \leq 10^{-1} \text{ Pa}$

T_e = Elektron Sıcaklığı; T_o = Plazma İçerisindeki Elektron Dışındaki Parçacıkların Sıcaklığı; T_f = Foton Sıcaklığı; T_p = Plazma Sıcaklığı; P_p = Plazma Basıncı; n_e = Elektron Yoğunluğu

2.2.3. Basınca göre plazmaların sınıflandırılması

Basınç etkisi madde içindeki parçacıkları birbirine yaklaştırıp hacimlerini düşürür. Madde içindeki parçacıkların birbirlerine yaklaştıkları için özellikle de elektronların esnek veya esnek olmayan çarpışma sayıları artar. Bu durumda maddenin ısı enerjisi ve sıcaklığı artar. Bu durum plazmalar içinde aynıdır. Plazma basınçları plazmaları oluşturan gaz basıncına bağlıdır. Gaz içindeki parçacıklara ısı enerjisi veya elektromanyetik enerji uygulandığında elektron titreşim miktarı artmaya başlar. Gaz basıncına göre parçacıklar arasındaki mesafe değişir. Parçacıklar arasındaki mesafeye bağlı olarak da elektronların ve diğer parçacıkların esnek ve esnek olmayan çarpışma miktarı değişir. Bu çarpışmalara göre de plazma yoğunluğu ve iyon miktarı belirlenir.

Plazma oluşumunu belirlenen temel etken ısı olmasına rağmen elektromanyetik etki ile de plazma oluşturulması ile çok düşük basınçlardan çok yüksek basınçlara kadar plazmalar gözlenmektedir. Plazmalar çok yüksek basınçlı plazmalar, yüksek basınçlı plazmalar, atmosferik basınçlı plazmalar, düşük basınçlı plazmalar ve vakum plazmaları olarak sınıflandırılabilir.

Çok yüksek basınçlı plazmalar 10^8 Pa ve üzeri seviyelerde (Kovitya, P. and Lowke, J. J., 1984) yüksek sıcaklık plazmaları halinde bulunurlar. Doğal olarak Güneş ve diğer yıldız türlerinde oluşur. Yapay olarak termonükleer füzyon reaktörlerinde oluşturulmaktadır. Plazma yapısındaki parçacıkların ve elektronların mesafeleri o denli küçük olur ki çok yüksek miktarda esnek ve esnek olmayan çarpışmalar oluşur. Bu nedenle çok yüksek basınçlı plazma türlerinde tam iyonizasyon yakın değerler görülür.

Yüksek basınçlı plazmalar hava basıncı ($\approx 10^5$ Pa) ile hava basıncının 10 katı ($\approx 10^6$ Pa) değerlerde oluşur (Kovitya, P., 1985). Yüksek basınçlı plazmalarda madde içindeki elektron ve parçacıkların çarpışmaları artma eğilimindedir ve bunun içinde yüksek basınçlı plazmalar yüksek miktarda ısı enerjisine ya da elektromanyetik enerjiye ihtiyaç duyarlar. Genellikle sıcak plazma halinde olurlar. Kısmi iyonizasyon görülür.

Atmosferik basınçtaki gazlara yüksek doğru akım (DA) gerilimler veya değişik frekanslarda orta ya da yüksek alternatif akım (AA) gerilimler uygulanarak atmosferik basınçlı plazmalar elde edilir. Basınç artırıcı (kompresör) veya düşürücü (vakum) gibi ekstra ekipmanlara ihtiyaç duyulmadığından endüstriyel uygulamalarda en çok kullanılan plazma türüdür. Kullanılan tekniğe göre sıcak ya da soğuk plazmalar elde edilmesi mümkündür. Kısmi iyonizasyon görülür.

Düşük basınçlı plazmalar atmosfer basıncının altındaki plazmalardır (Şahin, N., 2017). Genel olarak iki elektrot arasına elektromanyetik enerji uygulanması ile üretilirler. Elektrotlar arasında kalan hacimde bulunan gaz içindeki atom sayısı düşük basınç etkisinden dolayı azdır. Bu nedenle parçacıklar arası mesafe diğer basınç uygulamalarına nazaran fazladır. Parçacıklar arası mesafenin uzun olmasından dolayı elektronların diğer parçacıklar ile etkileşimi ve çarpışmaları azdır. Kısmi iyonizasyon oluşturulabilir. Parçacık çarpışmaları diğer basınç seviyelerine göre daha az gerçekleşeceğinden uygulanması gerek elektromanyetik enerji miktarı düşüktür. Diğer bir bakışla elektrotlara daha az gerilim uygulanarak plazma elde edilmesi mümkün olur. Elektromanyetik enerji elektronlar üzerine uygulandığından atom çekirdeği yeteri kadar ısınmaz.

Elektron sıcaklıkları atom çekirdeğinden daha yüksek kalır bu nedenle düşük basınçlı plazmalarda sadece soğuk plazmalar oluşturulabilir. Atmosfer basıncının altına düşünülmesi için vakum ekipmanları kullanılması gerekmektedir.

Vakum plazmaları 100 Pa ve altı basınç değerlerinde yapay olarak elde edilir. Vakum ekipmanları kullanılarak oluşturulmuş kapalı bir ortamda iki elektrot arasına enjekte edilen gaz AA veya DA gerilimler uygulanarak vakum plazmaları elde edilir. Düşük basınç etkisi ile gaz atomları arasındaki mesafe çok uzun olur. Bunun sonucunda son derece az elektron ve parçacık etkileşim ve çarpışmaları meydana gelir. Elektron parçacık etkileşimin azlığından çok düşük sayıda iyon oluşumu ve çok düşük iyonizasyon meydana gelir. Aynı şekilde uyarılmış parçacık, radikal ve reaktif parçacık sayıları da azdır. Plazma içindeki parçacıkların birbirleri ile çarpışma sayısının az olması plazmanın kendi içindeki fiziksel veya kimyasal reaksiyonları düşürür. Buna karşın plazmanın uygulandığı yüzeyler ile plazma içindeki parçacıkların etkileşimi artmakta ve daha etki yüzey modifikasyonları oluşturulmaktadır (Yushkov, Y. G., et al., 2022). Düşük iyonizasyon eğilimi elektrotlara uygulanması gereken gerilimin düşük seviyelerde olmasını sağlar. Vakum plazmalarından parçacıkların düşük sayıdaki çarpışma miktarı ve düşük iyonizasyon seviyesinden dolayı elektron ısısı her daim diğer plazma yapılarından çok yüksek kalır. Bu nedenle vakum plazmalarında sadece soğuk plazma oluşturulabilir.

2.2.4. Kullanılan gerilim türüne göre plazmaların sınıflandırılması

Yapay olarak üretilen elektromanyetik enerjili plazmalarda kullanılan gerilim türü ve frekans seviyesi plazma içindeki serbest elektron miktarını, iyonlaşma miktarını, uyarılmış parçacık sayısını, radikal ve reaktif yoğunluğunu etkilendiğinden plazma sınıflandırılmasında kullanılmaktadır.

Plazma oluşturmak için DA veya AA gerilim kullanmak plazmanın özelliklerini radikal bir şekilde değiştirebilmektedir. DA gerilimler daha yüksek gerilim ve akım kullanıma imkân verirken çok güçlü plazmalar oluşturulabilir. DA gerilim kullanımı dezavantajları ise yüksek maliyetleri, düşük verimleri ve düşük elektrot ömrü olarak sıralanabilir. Buna karşın plazma sürekliliği, kararlılığı

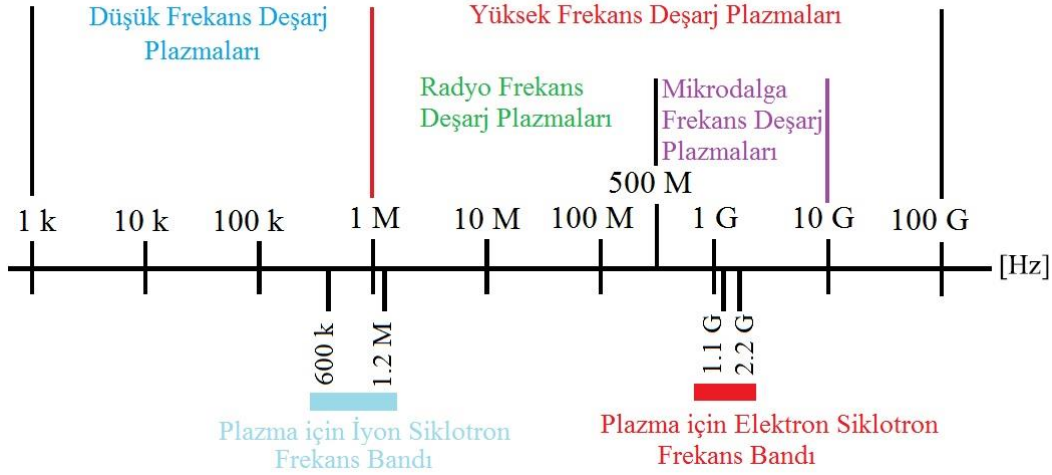
ve kontrol edilebilirliği AA gerilim uygulamalarına göre daha üstündür (Abdo, Y., et al., 2017). DA gerilim değişik frekanslarda darbeleri olarak kullanıldığında 600 A gibi yüksek akım geçirgenliğine sahip yüksek sıcaklıklarda yüksek elektron yoğunluğuna sahip sıcak plazmalar elde edilmektedir. DA darbeleri gerilim ile genel olarak ark plazma torç (plasma torch) üretilip endüstride yüksek ısı gerektiren kaynak, kesme ve spreyleme uygulamalarında kullanılmaktadır (Tendero, C., et al., 2006).

Plazma üretimi için AA gerilim kullanmak DA gerilim kullanımına nazır daha düşük güçte plazma oluşumunu sağlar. Değişik frekanslarda ve tek ya da üç faz AA gerilim kullanımı plazma içerisindeki iyonlaşma miktarı, radikal ve reaktif tür yoğunluğunun etkilemektedir. Düşük frekanslarda AA gerilim plazmanın iyonizasyonu artırırken yüksek frekans kullanımı da plazma içerisindeki radikal ve reaktif yoğunluğu artırmaktadır. AA gerilim kullanımı DA gerilim sistemlerine göre daha güvenli, maliyet açısından daha uygun ve daha verimlidir. Bazı yüksek güç uygulamalarında AA gerilim kullanımı da DA gerilim kullanılmasından kaynaklanan sınırlanmaların aşılmasını sağlar. AA gerilim kullanımında elektrot ömürleri DA gerilim kullanımına göre daha yüksektir. AA gerilim kullanımının dezavantajları ise birden fazla fazda veya yüksek frekans kullanımdan kontrol zorluğu, plazmanın sürekliliği sağlanmasının zorluğu ve kararlı plazma oluşturma zorluğu sayılabilir (Abdo, Y., et al., 2017).

2.2.5. Kullanılan frekans türüne göre plazmaların sınıflandırılması

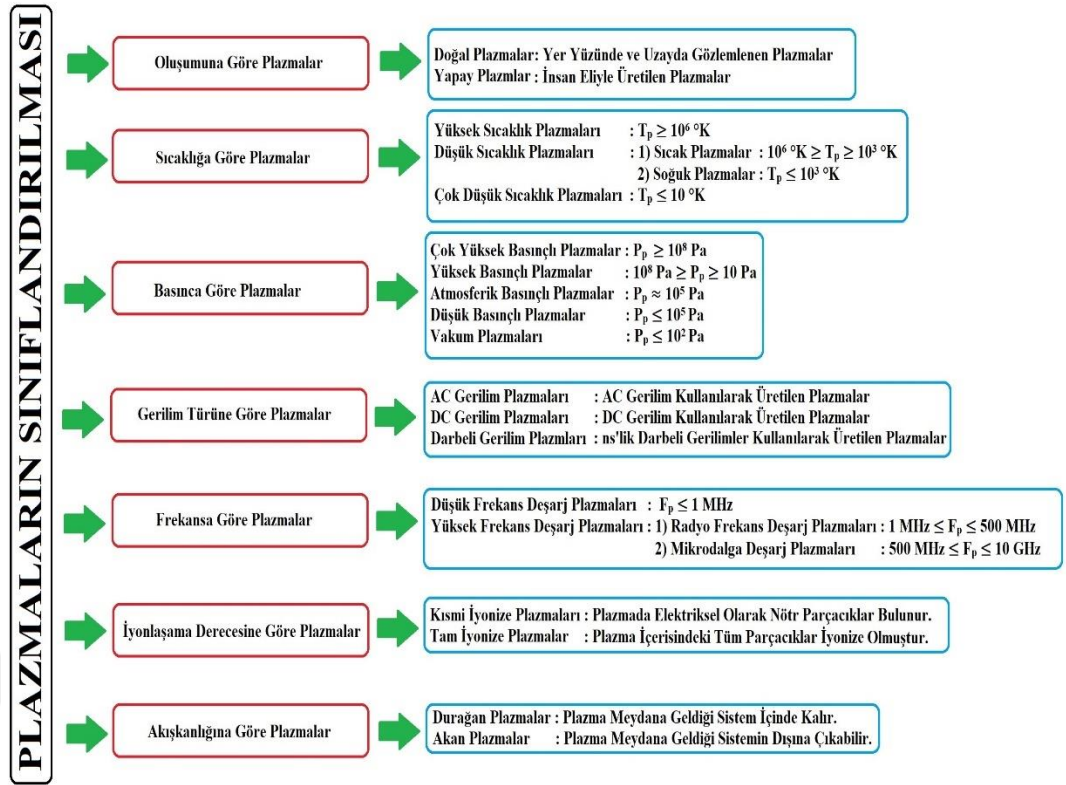
Plazmaları sınıflandırmak için kullanılan diğer bir kriter ise uygulanan gerilimin frekansıdır. 1 MHz ve altı frekanslarda elde edilen plazmalara düşük frekans deşarj plazmaları ve 1 MHz üstü frekanslarında elde edilen plazmalara yüksek frekans deşarj plazmaları denir (Napatovich, A. P., 2001). 1 MHz ile 500 MHz arasındaki frekans değerleri ile oluşturulmuş plazmalar radyo frekans deşarj plazmaları olarak isimlendirilmektedir. Radyo frekans deşarj plazmaları genel olarak 13.56 MHz ya da 27.54 MHz frekanslarında oluşturulmaktadır. 500 MHz ile 10 GHz frekans bandında üretilen plazmalara mikrodalga frekans deşarj plazmaları denilmektedir. Mikrodalga frekans deşarj plazmaları mikrodalga

oluşumunu sağlayan bir magnetron ile dalga kılavuzlarının genel olarak 2.45 GHz frekansta kullanımı ile elde edilir (Chabert, P. and Braithwaite, N., 2011). Kullanılan frekans bantlarına göre plazmaların sınıflandırılması Şekil 2.4’de görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 2.4. Kullanılan frekans bantlarına göre plazmaların sınıflandırılması.

Plazmaların temel özelliklere göre sınıflandırması ve sahip oldukları özellikleri Şekil 2.5’de sunulmuştur.



Şekil 2.5. Plazmaların özelliklerine göre sınıflandırılması.

2.3. Plazma Parametreleri

Plazmalar yapısındaki serbest elektronlar, iyonize parçacıklar, radikal parçacıklar, reaktif parçacıklar, fotonlar, UV ışıınımı ve termal ışıınım ile enerji yoğun maddesel karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu nedenle plazmalar için maddelerin boyut, konum, kütle, hareket ve elektriksel özellikleri gibi ortak özelliklerin ötesinde tanımlamalara ihtiyaç duyulur. Plazma yapısındaki parçacıkların miktarı, hareketleri, enerji seviyeleri, frekansları, birbirleri ve etrafları ile olan etkileşimleri plazma parametreleri olarak ortaya çıkar. Plazmanın temel özelliklerini ve etkinliği belirleyen plazmanın parametreleridir.

2.3.1. Plazma yoğunluğu

Plazma yoğunluğu plazma yapısındaki serbest elektron, iyon, radikal ve reaktif parçacıkların ayrı ayrı plazma hacmi içerisindeki miktarı ile tanımlanır. Serbest ve serbest olamayan çarpışmalar ile diğer parçacıkların oluşumundan sorumlu olduğu için elektron yoğunluğu plazma yoğunluğu olarak düşünülebilir.

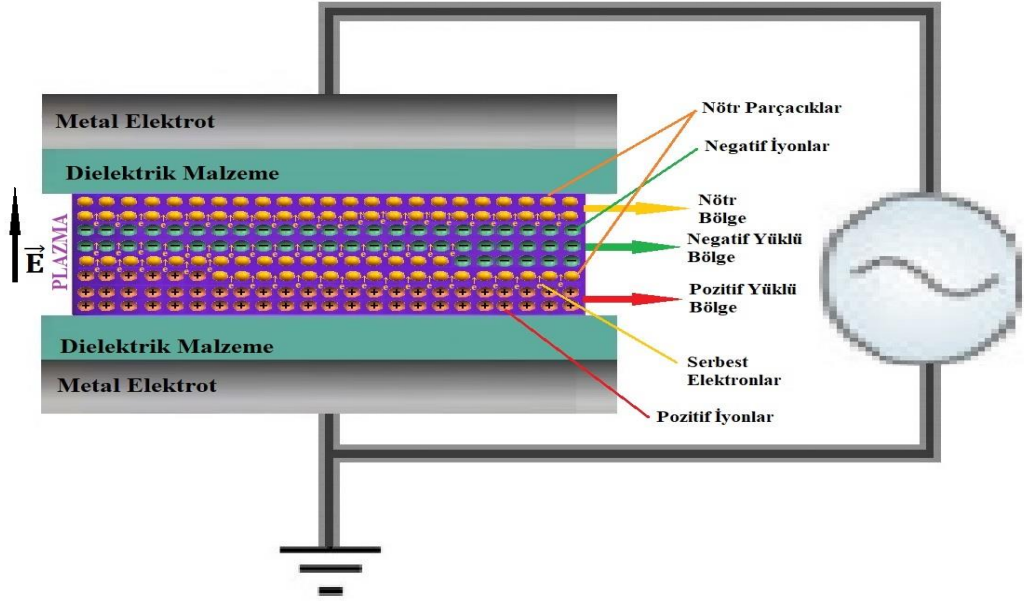
Her bir radikal ve reaktif türünün plazma hacmi içindeki miktarın hesaplanması yapılan çalışmalara özgü olup genel tanımlamada parçacıkların yoğunluğu elektriksel özelliklerine göre tanımlanır. Elektron hareketliliği sonucu negatif iyonlar, pozitif iyonlar ve nötr parçacıklar plazma içerisinde bölgesel olarak dağılır. Serbest elektronlar plazmanın tüm bölgelerinde etkinliğini gösterir. Şekil 2.6'da plazma içerisindeki iyonların ve elektrik alanların bölgesel dağılımlarını görülebilir. Plazma içerisindeki elektron yoğunluğu ve iyon yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$n_e = \frac{\text{Plazma içerisindeki elektron sayısı}}{\text{Plazma hacmi}} (m^{-3} \text{ veya } cm^{-3}) \quad (2.8)$$

$$n_i = \frac{\text{Plazma içerisindeki iyon sayısı}}{\text{Plazma hacmi}} (m^{-3} \text{ veya } cm^{-3}) \quad (2.9)$$

Bölgesel olarak farklı elektriksel özelliklere sahip olsa da makro ölçekte plazmalar elektriksel olarak nötrdür. Plazmalara girdikleri reaksiyonlarda veya maruz kaldıkları dış etkenlere karşı nötr kalma eğilimlerini korurlar (Bittencourt, J. A., 2004).

Plazma içerisindeki elektriksel yükler elektron-iyon çifti şeklinde oluşmakta olup pozitif iyon miktarı, elektron ve negatif iyon miktarına eşittir. İlk aşamada uygulanan elektriksel etkiler ile, genellikle elektrik alan kuvveti etkisiyle, elektron-pozitif iyon çifti oluşur. Plazmanın nötr kalma isteği nedeniyle ve diğer etkiler (Pattyn, C., et al., 2019) sonucu negatif iyonlar sonradan oluşur.



Şekil 2.6. Plazma içerisindeki iyon dağılımı ve elektrik alan bölgeleri.

Plazma içerisindeki pozitif iyon yoğunluğu (n_+) ve negatif iyon (n_-) yoğunluğu toplamından oluşan iyon yoğunluğu (n_i) yaklaşık olarak plazmadaki elektron yoğunluğuna (n_e) eşittir ve bu durum yarı-nötr (quasi-neutrality) olarak adlandırılır (Goebel, D. M. and Katz, I., 2008). Plazma yoğunluğu (n_p) yaklaşık olarak elektron yoğunluğu kabul edilirse;

$$n_p \cong n_e \cong n_i \quad (2.10)$$

$$n_e = \sum_s Z_s n_s \quad (2.11)$$

Denklem 2.11' deki s iyon miktarı, Z_s iyon türünün yükünü (pozitif veya negatif) ve n_s iyon türünü yoğunluğunu (n_+ veya n_-) göstermektedir.

Plazma içerisinde pozitif yük yoğunluğu pozitif iyonlardan, negatif yük yoğunluğu negatif iyon ve elektronlardan sağlanmakta olup plazmanın nötr durumunu koruması için yük yoğunluğu dengesini kurulması gerekir.

$$n_+ \approx n_e + n_- \quad (2.12)$$

Plazma içerisindeki iyon ve elektron yoğunluğunun hesaplanması için Boltzmann dağılım denklemlerinden yararlanılabilir.

$$n_e = n_{e0} e^{-\frac{e\phi}{k_B T_e}} \quad (2.13)$$

$$n_i = n_{i0} e^{-\frac{e\phi}{k_B T_i}} \quad (2.14)$$

Denklem 2.13 ve denklem 2.14'deki n_{e0} kritik elektron yoğunluğunu (genel olarak 10^{19} m^{-3}), n_{i0} kritik iyon yoğunluğunu (m^{-3}), e elektron yükünü ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$), ϕ elektrostatik potansiyeli (V), k_B Boltzmann sabitini ($1.3806452 \times 10^{-23} \text{ J/K}$), T_e elektron sıcaklığını ($^{\circ}\text{K}$), T_i iyon sıcaklığını ($^{\circ}\text{K}$) ifade eder.

Soğuk plazmalar genel olarak oda sıcaklığında ve atmosferik basınçta üretildiğinde ve plazma yoğunluğu yaklaşık olarak elektron yoğunluğu olarak alındığından soğuk plazmaların en önemli ve etkinliğini belirleyen temel parametresi elektron yoğunluğudur.

2.3.2. İyonizasyon derecesi

Gaz fazından plazma fazına geçişte gaz içerisinde bulunan atom ve moleküller iyonlarına ayrışır. Plazma içerisindeki iyonlaşmış parçacıkların yoğunluğunun tüm parçacıkların yoğunluğuna oranı iyonizasyon (iyonlaşma) derecesi olarak isimlendirilir. İyonlaşma derecesi, yük yoğunluğu ile değil, parçacık yoğunlukları ile tanımlanır. İyonizasyon derecesi aşağıdaki denklem ile hesaplanır;

$$\eta_i = \frac{\sum_s n_s}{n_0 + \sum_s n_s} \quad (2.15)$$

Denklem 2.15'deki η_i iyonizasyon derecesini belirtmekte olup 0 ile 1 arasında bir değer alır. $\eta_i = 1$ Değeri aldığı durum da plazmadaki tüm parçacıklar iyonlaşmış olup bu durum tam iyonizasyon olarak isimlendirilir (Inan, U. S. and Gołkowski, M., 2011). n_0 Nötr durumda olan parçacıkları temsil eder. Plazmalarda genel olarak $\eta_i < 1$ olup bu durum kısmi iyonizasyon olarak adlandırılır (Inan, U. S. and Gołkowski, M., 2011).

İyonizasyon derecesinin hesaplanması için Saha denklemi kullanılabilir. Buna göre;

$$\eta_i = \frac{n_i}{n_0} = 2.405 \times 10^{21} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{n_i} e^{-\frac{E_i}{k_B T}} \quad (2.15)$$

Denklem 2.15'deki T parçacık sıcaklığını ($^{\circ}\text{K}$), E_i (j) iyonlaşma enerjisini ifade etmektedir.

Tam iyonize plazmalar yıldızlarda, güneş rüzgarlarında ve yeryüzünde yapay olarak tokamak nükleer reaktörlerinde oluşmaktadır (Alfvén, H. and Arrhenius, G., 2010). Bunlar dışında bilinen tüm doğal ve yapay plazmalar kısmi iyonize plazmalardır. İyonizasyon derecesi plazmanın iç reaksiyonlarının ve plazmaların diğer maddelerle olan reaksiyonlarının hızını ve etkinliğini artırdığından plazma üretiminde yüksek iyonizasyon derecesi arzu edilir.

2.3.3. Plazma sıcaklığı

Maddelerin ortalama kinetik enerjilerinin bir ölçüsü olan sıcaklık plazmalar içinde en etkili olan parametrelerden biridir. Plazma içerisinde farklı boyut ve kütlelerde parçacıklar bulunmaktadır. Plazmada ısı ve sıcaklık parçacıkların kütle farkından dolayı farklı oranlarda dağılır. Termodinamik yasaları gereği ısı yüksek sıcaklığa sahip parçacıklardan düşük sıcaklığa kütleleri oranında aktarılır. İyon, radikal ve reaktif türleri arasında bu koşula uygun ısı transferi gerçekleşse de kütleleri diğer parçacıklara oranla binlerce kat daha düşük olan elektronlar ile diğer parçacıklar arasında termodinamik yasaları gereği ısı transferi gerçekleşemez. Çok düşük kütleleri sebebi ile elektron sıcaklığı binlerce derece kelvin sıcaklığa sahip olmaktadır ve yine çok düşük kütleleri nedeniyle diğer parçacıklar ile ısı transferi gerçekleştiremezler. İyonların ve/veya nötr parçacıkların arasındaki termal denge oluşumuna kıyasla elektronlar arasında düşük kütleleri etkisiyle daha kısa sürede termal denge kurulur.

Plazma içerisindeki farklı türdeki parçacıklar yük, hız ve sıcaklık gibi farklı özelliklere göre dağılım gösterirler. Parçacıkların plazma içerisindeki dağılımları en olası olarak Maxwell-Boltzmann dağılımına sahiptir (Inan, U. S. and

Gołkowski, M., 2011). Yeterli sayıda parçacık çarpışmaları meydana geldiği durumda plazmadaki enerji Maxwell–Boltzmann dağılımına uygun olarak dağılım gösterdiğinde plazma entropisi maksimum olur (Xiros, N., 2018).

m Kütleli ve v hızına sahip bir parçacığın kinetik enerjisi;

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.16)$$

Plazma içerisindeki farklı parçacık türleri farklı kütle ve hız değerlerine sahip olup plazma içerisindeki toplam parçacık sayısı N olarak alınırsa plazmanın ortalama kinetik enerjisi;

$$E_{ort.} = \frac{1}{2N} \sum_{i=1}^N m_i v_i^2 \quad (2.17)$$

Plazma içerisindeki parçacıkların hızlarına göre 3 boyutlu Maxwell–Boltzmann dağılımı;

$$f(v) = \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}} \quad (2.18)$$

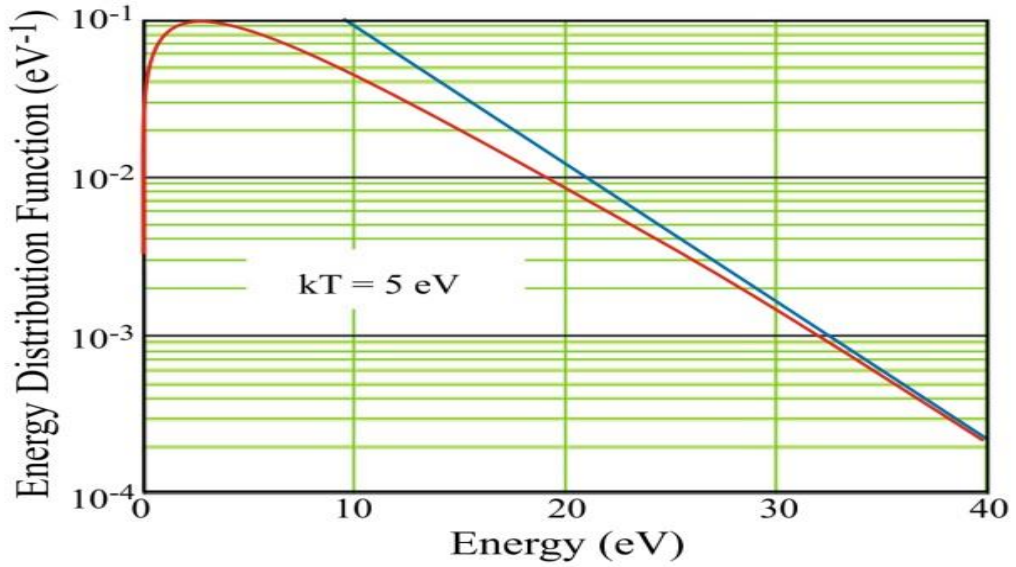
Denklem 2.18 içerisindeki v parçacık hızını (m/s), m parçacık kütlelerini (kg), T parçacık sıcaklığını (°K) ifade etmektedir. Bu dağılım parçacıkların her yönde aynı hızda (izotropik) bir dağılım gösterdiği durumda yalnızca v 'nin mutlak değerine bağlıdır. Bu dağılıma göre ortalama kinetik enerji ve ortalama hız hesaplanırsa;

$$\langle E \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{2}mv^2 f(v) dv}{\int_{-\infty}^{\infty} f(v) dv} = \frac{\int mv^2 f(v) d^3v}{2 \int f(v) d^3v} = \frac{3}{2}k_B T \quad (2.19)$$

$$\langle v \rangle = \frac{\int v f(v) d^3v}{\int f(v) d^3v} = \sqrt{\frac{8k_B T}{\pi m}} \quad (2.20)$$

Plazma içerisindeki enerji dağılım fonksiyonu ise;

$$f(E) = 4\pi v^2 f(v) \left| \frac{dE}{dv} \right| = \frac{2}{\sqrt{\pi}} E^{\frac{1}{2}} (k_B T)^{-\frac{3}{2}} e^{-\frac{E}{k_B T}} \quad (2.21)$$



Şekil 2.7. $k_B T = 5$ eV Sıcaklık değeri için Enerji dağılım fonksiyonu. Mavi çizgi yüksek enerji limiti olup enerji dağılım fonksiyonu yaklaşık $\exp(-E/k_B T)$ değerinde enerji limitine yakınsar (Xiros, N., 2018).

Şekil 2.7’de görüleceği üzere sıcaklığa bağlı olarak dağılan enerji dağılım fonksiyonu bir yüksek enerji limitine sahiptir. Sıcaklık ve enerji dağılım fonksiyonu plazmanın etkenliğini ve karakteristiğini belirleyen önemli parametrelerdir. Plazmanın enerji alış-verişi elektron hareketliğinden kaynaklandığından plazma sıcaklığı elektron sıcaklığı ile ifade edilir. Plazma fiziğinde tüm enerji türleri eV cinsinden ifade edilir. Spektrometre ile elektron sıcaklığı aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$T_e = \frac{-(E_1 - E_2)}{k_B \ln \left(\frac{\lambda_2 I_2 g_1 A_1}{\lambda_1 I_1 g_2 A_2} \right)} \quad (2.22)$$

Denklem 2.22 içerisindeki T_e elektron sıcaklığını (eV), E ölçülen dalgaının enerji seviyesini (eV), λ dalga boyunu (m), I ışık şiddetini (cd), g istatistiksel ağırlığı ve A geçiş olasılığı ifade etmektedir. g , A ve E değerleri National Institute of Standards and Technology (NIST) tablolarından elde edilmektedir (Atomic Spectra Database, 2022).

Plazmalar içinde termal denge elektriksel dengeden daha önce kurulur. Bu nedenle parçacıkların termal hız diye tanımlanan karakteristik bir hızı vardır. İyon ve elektronların termal hızları:

$$v_{ti} = \sqrt{\frac{k_B T_i}{m_i}} \quad (2.23)$$

$$v_{te} = \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_e}} \quad (2.24)$$

Denklem 2.23 ve denklem 2.24'deki v_{ti} iyon termal hızını (m/s), v_{te} elektron termal hızını (m/s), T_i iyon sıcaklığını (°K) ve m_i iyon kütleini (kg) temsil etmektedir.

Elektrik alan (E) etkisiyle oluşan plazmada t süresi sonunda iyonlar ve elektronlar eşit miktar da momentum kazanırlar.

$$m_e v_e = m_i v_i = eEt \quad (2.25)$$

$$\frac{m_i}{m_e} = \frac{v_e}{v_i} \gg 1 \quad (2.26)$$

Denklem 2.25 ve denklem 2.26 ile oluşan dengesizlik ve elektronlar ile iyonlar arası yeterli miktar ısı transferi gerçekleşemediğinden $T_e/T_i \gg 1$ olur. Bu durumda parçacık termal hızları v_{te} ve v_{ti} hız değerleri v_e ve v_i yerine kullanılır.

2.3.4. Plazma osilasyonu

Plazmalar elektriksel olarak nötr kalma eğilimindedirler. Dış etkenler ile ya da plazma içindeki yüklü parçacıkların hareketi ile bölgesel nötr alanlarda oluşan bozulmalar elektronları ve iyonları var olan konumlarından yer değiştirmeye zorlar. Bu bozulmalar plazmaların nötr kalma isteğinden dolayı elektron ve iyonların orijinal konumlara geri dönmesine neden olan bir elektrik alan

oluşumuna neden olur. Eylemsizlik momentinin etkisi ile geri çekilen elektronlar ve iyonlar bozulmaların olduğu bölgelerde salınım hareketi yaparlar. Bu salınım hareketi yüksek frekansta olduğundan bozulmanın olduğu bölgelerde yarı-nötr durumu ortalama zaman bazında korunur (Inan, U. S. and Gołkowski, M., 2011).

Kütle farklarından dolayı elektronlar iyonlara göre çok daha hızlı hareket edip bozulmalara yol açan elektrik alan etkilerini daha hızlı sönümlerler. Düşük kütleleri ve yüksek hızlarından dolayı elektronlar daha şiddetli etkiler oluştururlar. Bu nedenle ile elektronların plazmadaki nötr bölgelerde bozulmalara neden olan elektrik alanları sönümlenmek için yaptıkları osilasyon hareketine plazma frekansı denir.

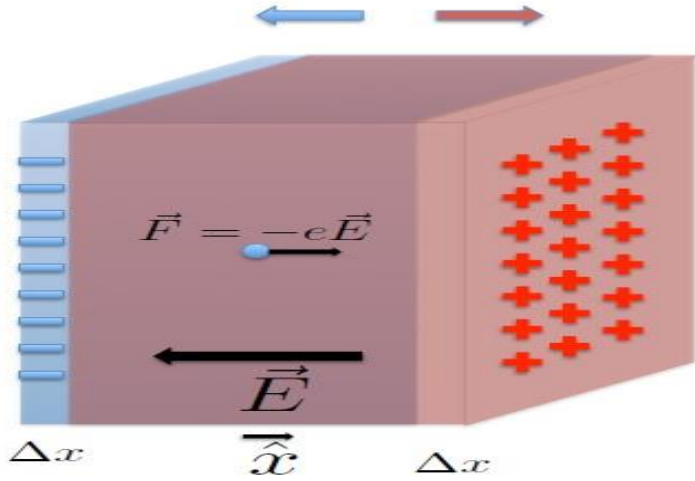
Şekil 2.8’de görülebileceği gibi bölgesel bozulmalar sonucu meydana gelen elektrik alanı ile aynı doğrultuda hareket eden m_e kütesine ve q_e yüküne sahip yer değişimi x kadar olan tek bir elektrona etki eden kuvvetten elde edilen hareket denklemi aşağıdaki gibi verilir.

$$F = ma = q_e E_x \quad (2.27)$$

$$m_e \frac{d^2 x}{dt^2} = q_e E_x \quad (2.28)$$

Bölgesel olarak oluşan elektrik alan yüzeysel olup Gauss yasası kullanılarak hesaplanabilir.

$$\oint E ds = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (2.29)$$



Şekil 2.8. Oluşan elektrik alan etkisiyle elektronların yer değiştirmesi (Dominguez, A., 2019).

Denklem 2.29'deki ϵ_0 boşluğun geçirgenliğini ($\approx 8.85 \times 10^{-12}$ F/m) ve Q ise S kapalı yüzey alanındaki elektronların toplam yükünü temsil etmektedir. S kapalı yüzey alanı y - z düzleminde olup x yönünde yer değiştiren toplam elektron yoğunluğu n_e ise toplam yük Q aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Q = Sx n_e q_e \quad (2.30)$$

Denklem 2.29'daki Gauss denklemi yeniden düzenlenir ise;

$$\oint E ds = -SE_x = \frac{Sx n_e q_e}{\epsilon_0} \quad (2.31)$$

$$E_x = -\frac{x n_e q_e}{\epsilon_0} \quad (2.32)$$

Tek bir elektron için verilen hareket denklemi yeniden düzenlenir ise;

$$m_e \frac{d^2 x}{dt^2} = -q_e \frac{x n_e q_e}{\epsilon_0} \quad (2.33)$$

$$m_e \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{n_e q_e^2}{\epsilon_0} x = 0 \quad (2.34)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{n_e q_e^2}{m_e \epsilon_0} x = 0 \quad (2.35)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + w_p^2 x = 0 \quad (2.36)$$

Denklemin 2.36'ın çözümü olan w_p frekansı zaman bağılı harmoniktir. Plazma elektron frekansı olarak ta bilinen açısıl plazma frekansı:

$$w_p = \sqrt{\frac{n_e q_e^2}{m_e \epsilon_0}} \left(\frac{rad}{s} \right) \quad (2.37)$$

Elektron parametre değerleri yerine konularak plazma elektron frekansın zamana bağılı frekans değeri:

$$f_p = \frac{w_p}{2\pi} = 8.98 \times 10^3 \sqrt{n_e} \text{ (Hz)} \quad (2.38)$$

İyonlar için plazma iyon frekansı:

$$w_{pi} = \sqrt{\frac{4\pi n_i Z^2 q_e^2}{m_i}} \left(\frac{rad}{s} \right) \quad (2.39)$$

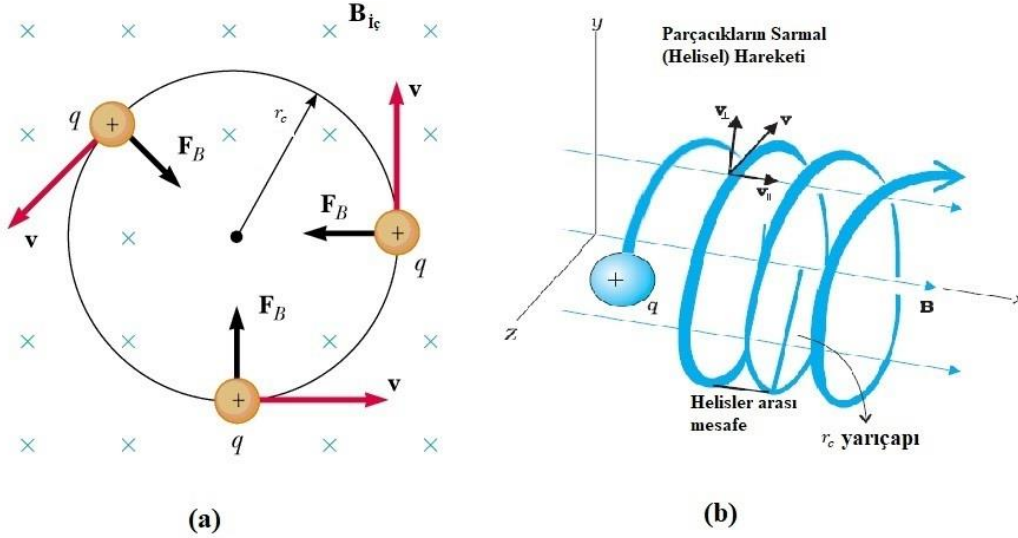
$$f_{pi} = \frac{w_{pi}}{2\pi} = 2.10 \times 10^2 Z \sqrt{\frac{n_e}{\mu}} \text{ (Hz)} \quad (2.40)$$

Denklem 2.39 ve denklem 2.40'daki Z iyon yük durumunu (pozitif ya da negatif) ve μ iyon kütlelerinin proton kütlelerini oranını (m_i/m_p) göstermektedir.

Kütlesi m , elektriksel yükü q , hızı $\vec{v}$ olan bir parçacık elektrik alan (E) kuvveti ve manyetik alan (B) kuvveti etkisinde hareket ederse hareketin denklemi aşağıdaki gibi elde edilir.

$$\vec{F} = m\vec{a} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.41)$$

Eğer parçacık üzerine düşen net elektrik alan kuvveti sıfır ise ya da parçacık üzerinde bir elektrik alan yok ise parçacığı etkileyen manyetik alanın kuvveti düzgün ve sabit olması durumunda parçacık Lorentz kuvveti etkisiyle manyetik alana dik bir yönde sabit bir ivme ile hareket eder.



Şekil 2.9. Sabit $\vec{B}$ etkisiyle $\vec{v}$ hızında hareket eden parçacığın: **a)** Siklotron dairesel hareketi **b)** Siklotron helisel hareketi.

Manyetik alana dik yönde sabit ivme ile yapılan bu dairesel hareket jiroskopik hareket (gyromotion) olarak isimlendirilir. Şekil 2.9' da görüleceği gibi dairesel hareketli parçacık manyetik alan doğrultusunda ve manyetik alan etrafında sarmal (helisel) bir salınım yapar. Bu salınım jiroskopik frekans ya da siklotron frekansı olarak adlandırılır. Net elektrik alan kuvvetinin sıfır olduğu durumda parçacık hareket denklemi:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q \vec{v} \times \vec{B} \quad (2.42)$$

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{q}{m} (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.43)$$

Manyetik alan x yönde oluşmuş ise $\vec{B} = \hat{x}B$ 'dir. Parçacık manyetik alan ile aynı x yönde hareket ediyor ise:

$$\frac{dv_z}{dt} = \frac{q}{m} (B v_y) \quad (2.44)$$

$$\frac{dv_z}{dt} - \frac{qB}{m} v_y = 0 \quad (2.45)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = \frac{q}{m} (B v_z) \quad (2.46)$$

$$\frac{dv_y}{dt} - \frac{qB}{m} v_z = 0 \quad (2.47)$$

$$\frac{dv_x}{dt} = 0 \quad (2.48)$$

v_z ve v_y değerlerini bulmak için denklemlerin ikinci türevleri alınırsa:

$$\frac{d^2 v_z}{dt^2} + \left(-\frac{qB}{m}\right)^2 v_z = 0 \quad (2.49)$$

$$\frac{d^2 v_y}{dt^2} + \left(-\frac{qB}{m}\right)^2 v_y = 0 \quad (2.50)$$

Denklem çözümü:

$$\frac{dv_z}{dt} = -\frac{qB}{m} = w_c \quad (2.51)$$

$$\frac{dv_y}{dt} = -\frac{qB}{m} = w_c \quad (2.52)$$

$$\frac{dv_x}{dt} = 0 \quad (2.53)$$

Buradan Siklotron (Cyclotron) frekansı:

$$w_c = -\frac{qB}{m} \left(\frac{rad}{s}\right) \quad (2.54)$$

Elektron siklotron frekansı:

$$w_{ce} = \frac{q_e B}{m_e c} \quad (2.55)$$

İyon siklotron frekansı:

$$\omega_{ci} = \frac{Zq_e B}{m_i c} \quad (2.56)$$

Şekil 2.9-a’da görülebileceği siklotron salınımı r_c yarıçapına sahip bir dairesel hareket yapar. Siklotron salınımı merkez kaç kuvveti ile dengelenir. Buna göre:

$$\frac{v^2}{r_c} = \frac{d\vec{v}}{dt} = \frac{dv_z}{dt} = \frac{q}{m} (Bv) \quad (2.57)$$

$$r_c = \frac{vm}{qB} \quad (2.58)$$

r_c Yarıçapı jiroyarıçapı (gyroradius) ya da Larmor yarıçapı olarak isimlendirilmektedir.

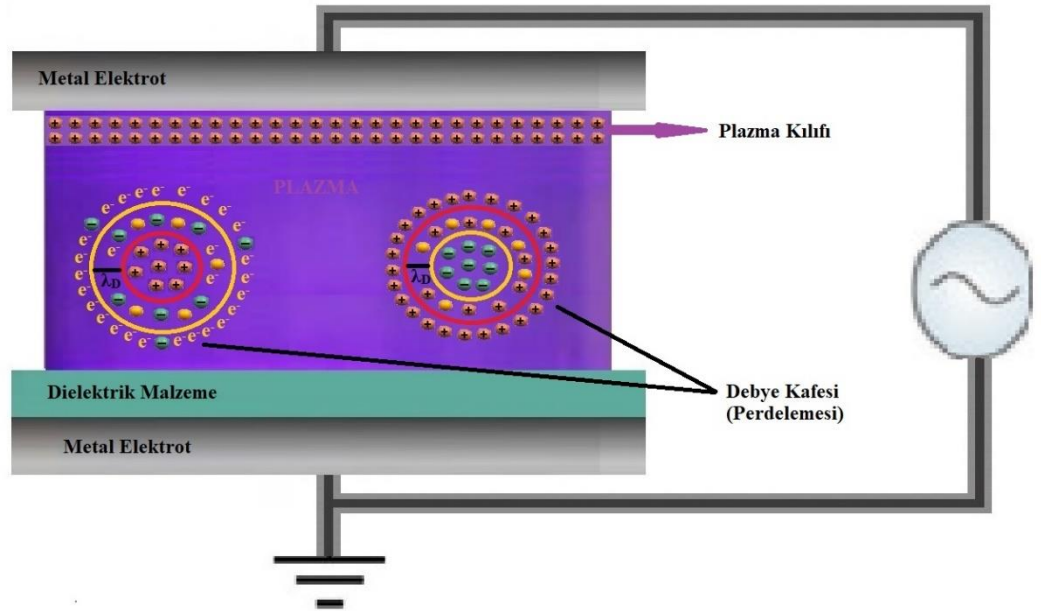
Plazma frekansı ω_p ve kırılma indisi μ_p olan bir plazma ortamına yollanan ω dalga frekansına sahip dalgaların dağılım ilişkisi:

$$\mu_p^2 = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (2.59)$$

Elektron kütlesi, yükü ve plazmanın elektriksel geçirgenliği (ϵ_p) sabit değerler aldığından plazma frekansı (ω_p) elektron yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Plazma ortamına yollanan dalga frekansı plazma frekansına eşit ise ($\omega = \omega_p$) bu durumda plazma kırılma indisi $\mu_p = 0$ değeri alır. Bu durumda plazmaya gelen dalgalar yansıtılır. Plazma ortamına yollanan dalga frekansı plazma frekansından büyük ise ($\omega > \omega_p$) plazmanın kırılma indisi pozitif değer alır. Bu durumda gelen dalgalar plazma ortamından geçebilir. Plazma ortamına yollanan dalga frekansı plazma frekansından küçük ise ($\omega < \omega_p$) plazmanın kırılma indisinin karesi negatif değer alır. Bu durum kırılma indisi sanal bileşenleri olduğu anlamına gelir. Bu durumda plazmaya gelen dalgalar sönümlenir ve plazma ortamından geçemez (Bourdier, A., Diels, J. C. and Delage, O., 2020).

2.3.5. Debye Kafesi ve Debye Uzunluğu

Plazma oluşumu sırasında kullanılan gaz içerisinde iyonlaşma elektron-iyon çifti oluşumu ile başlar ve plazma varlığı devam ettikçe elektron-iyon çiftinin oluşumu devam eder. Plazmadaki yük ve akım taşıyıcıları iyonlar ve elektronlardır. Oluşan elektron-iyon çifti plazma doğru akarken veya plazma içerisinde hareket ederken düşük kütleleri ile elektronlar iyonlara nazaran çok daha hızlı hareket ederler. Yüksek hızlarından dolayı elektronların yoğunluğunun biriktiği bir bölge oluşur ve bu bölgeden negatif bir indüklenme meydana gelir. İyonlar elektron hızına yetişemeyip geride kalır ve iyon yoğunluğunun biriktiği bir bölge oluşur ve bu bölgede pozitif bir indüklenme meydana gelir. Plazma yarı-nötr durumunu korumak için negatif indüklenmenin meydana geldiği bölgenin etrafında pozitif yüklü iyonlar, pozitif indüklenmenin meydana geldiği bölgenin etrafında elektronlar ve negatif yüklü iyonlar birikir. İndüklenme oluşan bölgeler ile bu bölgeyi nötr duruma getirmek için gelen elektron ve iyonların etkileşimi ile aralarında minimum nötr bölgesi olarak tarif edilen ve ‘Debye Kafesi’ (Debye shielding) adlandırılan bir bölge oluşur (Fridman A. A., 2012).



Şekil 2.10. Plazma içinde oluşan Debye Kafesi ve Plazma Kılıfı.

Plazma içerisinde oluşan pozitif ve negatif indüklenmenin olduğu bölgeler Şekil 2.10’da görüleceği gibi küresel bir şekle sahiptir. Bundan dolayı indüklenen

bölgenin etrafında oluşan Debye Kafesi küresel bir şekle sahiptir. Küresel şekle sahip pozitif indüklenme olduğu bölgenin merkezindeki bir parçacığın elektriksel potansiyeli aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\phi(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} \quad (2.60)$$

Pozitif yüklü bölgenin merkezinden negatif parçacıkların olduğu bölgeyi tarayan küresel hacim için elektrik potansiyeli hesaplanmak istendiğinde taranan hacimde elektron ve iyon yoğunluklarının küre yarı çapına bağlı değişkenlik gösterecektir. Küre merkezinden uzaklaştıkça elektron yoğunluğu artmakta ve iyon yoğunluğu azalmaktadır ($n_e > n_i$). Parçacık yoğunlukları için Boltzmann dağılım fonksiyonları kullanılırsa;

$$n_e(r) = n_0 e^{-\frac{q_e \phi(r)}{k_B T_e}} \quad (2.61)$$

$$n_i(r) = n_0 e^{\frac{q \phi(r)}{k_B T_i}} \quad (2.62)$$

Küre içinde kalan toplam yük yoğunluğu;

$$\rho(r) = q_e (n_e(r) - n_i(r)) \quad (2.63)$$

$$\rho(r) = q_e \left(n_0 e^{-\frac{q_e \phi(r)}{k_B T_e}} - n_0 e^{\frac{q \phi(r)}{k_B T_i}} \right) \quad (2.64)$$

Küre içinde yük yoğunluğunun değişkenlik göstermesi ve değişken skaler büyüklüğe sahip elektriksel potansiyellerin varlığı elektriksel potansiyel hesabı için Maxwell ve Gauss denklemlerinin kullanımını zorlaştırmaktadır. Daha sabit bir elektrik potansiyel hesabı için Poisson denklemi kullanılabilir.

$$\nabla^2 \phi(r) = -\frac{\rho(r)}{\epsilon_0} \quad (2.65)$$

Küre içindeki yük yoğunluğu denklemde yerine konulur ve Poisson denklemleri yeniden düzenlenirse;

$$\nabla^2 \phi(r) = - \frac{q_e \left(n_0 e^{-\frac{q_e \phi(r)}{k_B T_e}} - n_0 e^{-\frac{q \phi(r)}{k_B T_i}} \right)}{\epsilon_0} \quad (2.66)$$

$$\nabla^2 \phi(r) = - \frac{q_e n_0}{\epsilon_0} \left(e^{-\frac{q_e \phi(r)}{k_B T_e}} - e^{-\frac{q \phi(r)}{k_B T_i}} \right) \quad (2.67)$$

$$\nabla^2 \phi(r) = - \frac{q_e n_0}{\epsilon_0} \left(e^{-\frac{q_e \phi(r)}{k_B T_e}} - e^{-\frac{q \phi(r)}{k_B T_i}} \right) \quad (2.68)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\phi}{dr} \right) = - \frac{q_e n_0}{\epsilon_0} \left(e^{-\frac{q_e \phi(r)}{k_B T_e}} - e^{-\frac{q \phi(r)}{k_B T_i}} \right) \quad (2.69)$$

Küre içinde pozitif bölgenin olduğu küre dışında kalan bölgede yani Debye kafesi içinde iyon yoğunluğu sıfırdır.

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\phi}{dr} \right) = - \frac{q_e n_0}{\epsilon_0} \left(e^{-\frac{q_e \phi(r)}{k_B T_e}} - e^0 \right) \quad (2.70)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\phi}{dr} \right) = - \frac{q_e n_0}{\epsilon_0} \left(e^{-\frac{q_e \phi(r)}{k_B T_e}} - 1 \right) \quad (2.71)$$

Aynı zamanda elektron sıcaklığı çok yüksek değer aldığından ve elektron yükü çok düşük değerlere sahip olduğundan oluşabilecek elektrik potansiyel çok düşük kalacaktır ($k_B T_e \gg |q_e \phi(r)|$). Bundan dolayı üstel ifade için kuvvet seri açılımı kullanılabilir. Üstel ifade için kuvvet serisi:

$$e^x = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{x^n}{n!} = 1 + x + \frac{x^2}{2!} + \frac{x^3}{3!} + \dots \quad (2.72)$$

Kuvvet serisi için $k_B T_e \gg |q_e \phi(r)|$ olduğundan ilk iki ifadeyi almak yeterlidir. Buna göre Poisson denklemi yeniden düzenlenirse;

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\phi}{dr} \right) = - \frac{q_e n_0}{\epsilon_0} \left(1 - \frac{q_e \phi(r)}{k_B T_e} - 1 \right) \quad (2.73)$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{d\phi}{dr} \right) = \left(\frac{n_0 q_e^2}{\epsilon_0 k_B T_e} \right) \phi(r) = \left(\frac{1}{\lambda_D^2} \right) \phi(r) \quad (2.74)$$

Küre içinde yapılan bu hesaplama Debye kafesi içerisindeki bölge için tanımlı olduğundan λ_D Debye uzunluğu olarak adlandırılır. Debye uzunluğu:

$$\lambda_D = \sqrt{\frac{\epsilon_0 k_B T_e}{n_0 q_e^2}} \text{ (m)} \quad (2.75)$$

Debye uzunluğunun çok kullanılan başka bir denklemi:

$$\lambda_D = w_p^{-1} \sqrt{\frac{k_B T_e}{m_e}} \quad (2.76)$$

Poisson denkleminin basitleştirilmiş çözümüne göre Debye kafesinin potansiyeli:

$$\phi(r) = \left[\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r} \right] e^{-\frac{r}{\lambda_D}} \quad (2.77)$$

2.3.6. Plazma kılıfı

Plazmaya harici bir elektrik alan uygulanırsa ya da metal bir parça temas ettirilirse bu durum plazma içindeki yük dağılımını bozar ve plazma bu etkilere karşı Debye kafeslemesi benzeri bir reaksiyon gösterir. Plazma sınır bölgeleri plazma duvarı olarak isimlendirilmekte olup plazmanın dış etkenlere karşı oluşturduğu Debye kafesi plazma duvarında meydana gelir. Elektrik alan etkisiyle veya metal yüzeye temastan dolayı elektronlar plazma duvarında uzaklaşır. Pozitif yüklü iyonlar ise plazma duvarında birikir. Pozitif iyonların biriktiği bu bölge ‘Plazma Kılıfı’ olarak adlandırılır (Fridman A. A., 2012). Şekil 2.10’da görüleceği üzere plazma oluşumu için kullanılan metal elektrot yüzeyinde plazma kılıfı oluşmuştur.

Plazma duvarına gelen iyon yoğunluğu ve akım yoğunlukları duvarı terk eden elektron yoğunluğu ve akım yoğunluğuna eşittir. Elektronların hızlı hareketi ve yüksek frekansta titreşimleri nedeniyle plazmanın yarı-nötr durumu korunur. Plazma kılıfı Debye kafesi özelliği gösterdiğinden Debye kafesine ait bu denklemler bu alan içinde geçerlidir. Plazma kılıfının uzunluğu yaklaşık oluşan

Debye uzunluğu kadardır. Plazma kılıfı içindeki iyon ve elektron yoğunluğu Boltzmann dağılımı kullanılarak hesaplanabilir ve plazma potansiyeli içinde Poisson denklemleri geçerlidir. Plazma kılıfındaki iyonları ve elektronların eşit oranda yer değiştirmesi nedeniyle ortalama enerjileri eşit olup aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\frac{1}{2}m_e\langle v_e \rangle = \frac{1}{2}m_i\langle v_i \rangle \quad (2.78)$$

Plazma kılıfındaki iyon ve elektron akıları aşağıdaki gibidir.

$$\Gamma_e = \frac{1}{4}n_e\langle v_e \rangle \quad (2.79)$$

$$\Gamma_i = \frac{1}{4}n_i\langle v_i \rangle \quad (2.80)$$

Plazma kılıfın içerisindeki iyon ve elektron yoğunlukları ise;

$$n_e(x) = n_0 e^{-\frac{q_e \phi_{Duvvar}(x)}{k_B T_e}} \quad (2.81)$$

$$n_i(x) = n_0 e^{-\frac{q_i \phi_{Duvvar}(x)}{k_B T_i}} \quad (2.82)$$

Plazma duvarında plazma kılıfının başlangıç anında ve konumunda parçacıklarının akışları eşittir bu durumda;

$$\Gamma_e = \Gamma_i \quad (2.83)$$

$$\frac{1}{4}n_e\langle v_e \rangle = \frac{1}{4}n_i\langle v_i \rangle \quad (2.84)$$

$$\frac{n_i}{n_e} = \frac{\langle v_e \rangle}{\langle v_i \rangle} = \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \quad (2.85)$$

$$\frac{n_0 e^{-\frac{q_e \phi_{Duvar}}{k_B T_e}}}{n_0 e^{-\frac{q \phi_{Duvar}}{k_B T_i}}} = \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \quad (2.86)$$

Plazma duvarına gelen iyon ve duvardan uzaklaşan iyon yükleri eşit ($q_e = q_i$) ve başlangıç koşulları baz alındığında sıcaklıklarının aynı olduğu kabul edilmiştir ($T_e = T_i = T$). Buna göre eşitlik yeniden düzenlenirse;

$$e^{\frac{2q_e \phi_{Duvar}}{k_B T}} = \sqrt{\frac{m_i}{m_e}} \quad (2.87)$$

$$\phi_{Duvar} = \frac{k_B T}{4q_e} \ln \left(\frac{m_i}{m_e} \right) \quad (2.88)$$

Poisson denklemi kullanılırsa;

$$\nabla^2 \phi = -\frac{\rho}{\epsilon_0} = -\frac{q_e(n_e - n_i)}{\epsilon_0} \quad (2.89)$$

Plazma kılıf içinde iyon yoğunluğu akış hızına göre değişeceğinden enerji korumu denklemlerinden iyon yoğunluğu hesaplanabilir.

$$\frac{1}{2} m_i u^2(x) = \frac{1}{2} m_i u_x^2 - q_e \phi_{Duvar}(x) \quad (2.90)$$

İyon aksı ise;

$$n_i \langle v_i \rangle = n_i u_x \quad (2.91)$$

Buradan iyon yoğunluğu yeniden düzenlenir ise

$$n_i(x) = n_0 \left(1 + \frac{2q_e \phi_{Duvar}(x)}{m_i u_x^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.92)$$

Kılıf için Poisson denklemi yeniden düzenlenir ise:

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = -\frac{n_o q_e}{\epsilon_0} \left[e^{-\frac{q_e \phi_{Duvar}}{k_B T}} - \left(1 + \frac{2q_e \phi_{Duvar}(x)}{m_i u_x^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (2.93)$$

Kılıf içinde elektron yoğunluğu sıfırdır. $k_B T \gg |q_e \phi(x)|$ Olduğunda $m_i u_x^2 \gg |q_e \phi(x)|$ olacağı için üstel ifade 1. derece Taylor serisi açılımı yeterli olur. Buradan;

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = -\frac{n_o q_e}{\epsilon_0} \left[e^0 - \left(1 - \frac{q_e \phi_{Duvar}(x)}{m_i u_x^2} \right) \right] \quad (2.94)$$

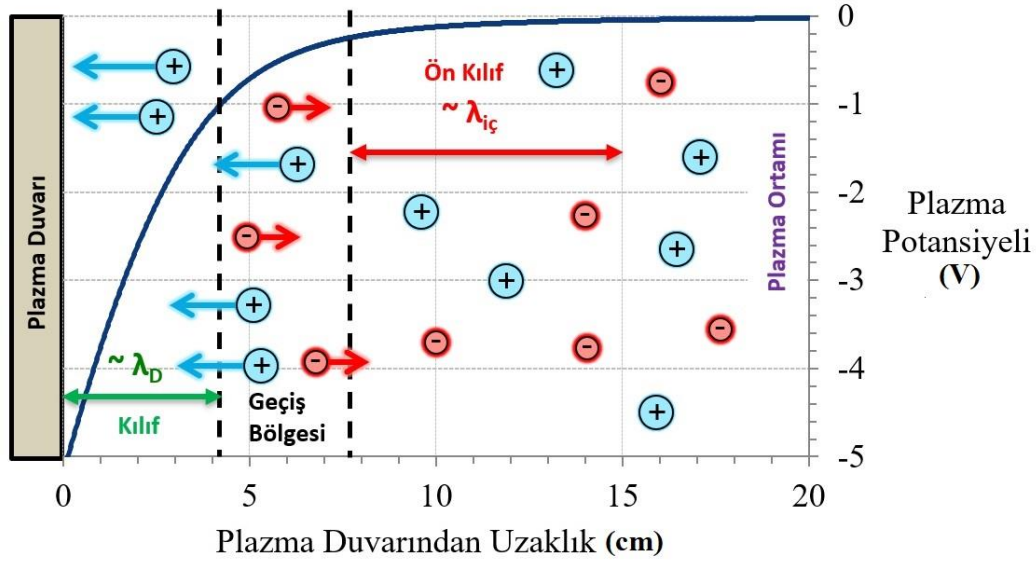
$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = \frac{n_o q_e}{\epsilon_0} \left(\frac{q_e \phi_{Duvar}(x)}{m_i u_x^2} \right) \quad (2.95)$$

Poisson denklemi yeniden düzenlendiğinde kılıf potansiyeli aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\frac{d^2\phi(x)}{dx^2} = \frac{\phi_{Duvar}(x)}{h}, \quad h = \lambda_D \left(1 - \frac{k_B T}{m_i u_x^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (2.96)$$

$$\phi(x) = \phi_{Duvar} e^{-\frac{x}{h}} \quad (2.97)$$

Plazma kılıfında oluşumu sırasında yaklaşık Debye uzunluğunda bir kılıfı, kılıf öncesinde çok ince bir geçiş bölgesi ve yaklaşık Debye uzunluğunda ön kılıf oluşmaktadır. Plazma kılıfının oluşumu Şekil 2.11’de sunulmuştur.



Şekil 2.11. Plazma kılıfının oluşumu (Langendorf, S., et al., 2013).

Plazma kılıfında pozitif iyonların birikimi ve elektronların uzaklaşmasından dolayı pozitif ve negatif indüklenme oluşur. Plazma duvarında negatif indüklenme plazma ortamında ise pozitif bir indüklenme oluşur. Bu indüklenme farkından dolayı plazma ortamından plazma duvarına doğru kılıf içinde bir akım akar (Goebel, D. M., et al, 2021). Plazmanın nötr durumunu koruma isteği nedeniyle kılıf içinde akan akımın net toplamı sıfır olmalıdır. Aynı durum akım yoğunluğu için geçerlidir. Buna göre;

$$\vec{J} = \vec{J}_e + \vec{J}_i = 0 \quad (2.98)$$

Kılıf içerisindeki iyon akım yoğunluğu elektron akım yoğunluğuna eşit olmalıdır. Toplam indüklenmenin sıfır olduğuna göre akım yoğunluğu hesabı için Maxwell dağılım denklemi kullanılabilir. Buna göre;

$$-\vec{J}_e = \vec{J}_i = -en_e \left(\frac{m_e}{2\pi k_B T_e} \right) e^{\frac{e\phi_{Duvar}}{k_B T_e}} \quad (2.99)$$

2.3.7. Kollektif davranış

Plazmaya dış bir etken uygulandığında plazmanın bir bütün olarak etkene karşı gösterdiği tepki ‘Kollektif Davranış’ olarak isimlendirilir. Plazmadaki bütün

parçacıkların bireysel davranışların toplamı kollektif davranış olarak nitelendirilir. Dış etken plazma içerisindeki tüm parçacıkları etkiler ve parçacıklar momentumlarını değiştirerek bu duruma tepki gösterir. Parçacıkların farklı yapısal özelliklerinde dolayı farklı tepkiler oluşabilir. Bu farklılar plazmanın iç dinamiği ile dengelenir. Plazmanın gösterdiği en basit kollektif davranış plazma salınımıdır.

Dengede olan bir plazmada elektron ve iyon yoğunlukları eşit ve net elektrostatik alan sıfırdır. Dış bir etki uygulanır ise plazma içinde elektrostatik denge bozulur. Plazma nötr kalma isteği nedeniyle bozulan elektrostatik alanı yeniden dengelemek için iyon ve elektron dağılımını yeniden düzenler. Bu durum plazma içerisinde kısa süreli bölgesel elektrostatik bozulma, sıcaklık farkları ve momentum değişimleri nedeniyle plazma içindeki tüm parçacıkların zincirlenme olarak etkilenmesine neden olur. Plazma içindeki parçacıklar plazmayı yeniden dengeye ulaştırırken 3 kritik koşulla uyarlar:

1. Plazma içinde dış etkenlerden dolayı bölgesel elektrostatik bozulmalar Debye kafesi oluşturularak dengelenir. Oluşan bu kafesin yarı çapı Debye uzunluğu (λ_D) kadar olup ve adına ‘Debye-Hückel Küresi’ denir (Goebel, D. M. and Katz, I., 2008). Plazmadaki elektrik ve ısısal dengenin sağlanması için küre içinde 1’den çok büyük sayıda parçacık bulunmalıdır (Inan, U. S. and Gołkowski, M., 2011). Debye-Hückel Küresinin hacmi:

$$V_D = \frac{4\pi}{3} \lambda_D^3 \quad (2.100)$$

Küre içindeki parçacık sayısı (N_D);

$$N_D = n_0 V_D = \frac{4\pi}{3} n_0 \lambda_D^3 \gg 1 \quad (2.101)$$

Küre içerisindeki bu koşulun alternatifi olan Coulomb veya Spitzer logaritması tarafından tanımlanan plazma parametresi;

$$g = \Lambda = \frac{1}{N_D} = \left(\frac{4\pi}{3} n_0 \lambda_D^3 \right)^{-1} \approx \frac{1}{n_0 \lambda_D^3} \ll 1 \quad (2.102)$$

2. Plazma kinematiği için plazma parçacıkları arasında yeterli bir mesafe bulunmalıdır. Bu durumda plazma parçacıkları için Boltzmann ve Maxwell dağılımları geçerli olur (Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J., 2005). Elektronlar için ortalama mesafe:

$$\lambda_n = \frac{1}{(n_e)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.103)$$

Bu mesafe ortalama elektron de Broglie dalga boyuna (λ_B) kıyasla büyüktür (Goebel, D. M. and Katz, I., 2008).

$$\lambda_B = \frac{h}{m_e v_{th}} \quad (2.104)$$

Denklem 2.104'deki h Planck sabiti ($h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ m}^2\text{kg/s}$) ve v_{th} parçacıkların termal de Broglie hızını (m/s) ifade eder. Kinetik enerji korunumu gereği termal de Broglie hızı aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir.

$$\frac{1}{2} m_e v_{th}^2 = k_B T_e \quad (2.105)$$

Debye-Hückel Küresi için Debye uzunluğu elektronların ortalama mesafesinde çok büyük olmalıdır.

$$\lambda_D \gg \lambda_n = \frac{1}{(n_e)^{\frac{1}{3}}} \quad (2.106)$$

Bu sayede Debye-Hückel Küresi yeterli parçacığa sahip olacak bir hacme sahip olur. Debye kafesi minimum nötr bölge olarak tanımlandığından plazmanın toplam uzunluğunun (L) Debye uzunluğundan çok daha büyük olması beklenir ($L \gg \lambda_D$).

3. Plazma oluşumu iyon-elektron çiftlerinin oluşumu ile başlar ve plazmanın varlığı içerisindeki iyon-elektron çiftlerin sürekliliği ile devam eder. Elektronlar ve iyonlar esnek ve esnek olmayan çarpışmalar yaparak plazma yapısını oluşturur. Bu nedenle plazma varlığı için parçacık çarpışmaların oluşması ve devamlılığı şarttır. Plazma içerisinde parçacıklar elektrik alan etkisi ile bir hareketliliğe sahip olup diğer parçacıklar ile yaptıkları çarpışmalar nedeni ile sahip oldukları hız sürüklenme hızı olarak tarif edilir. Buna göre sürüklenme hızı ($\vec{v}_D$):

$$\vec{v}_D = b q \vec{E} \quad (2.107)$$

Denklem 2.107 içerisinde b hareketlilik katsayısı olup elektronlar için aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$b_e = \left\langle \frac{1}{m_e v_{en}} \right\rangle = \left\langle \frac{1}{m_e Q_{en} v_e} \right\rangle \quad (2.108)$$

Denklemdaki v_{en} elektron ve nötr parçacıklar arasındaki momentum transfer çarpışma frekansını Q_{en} momentum transferi için ilgili enine kesit

alanını ifade eder (Inan, U. S. and Gołkowski, M., 2011). Bu tanım tek bir elektron için tanımlı olup ortalama hız dağılım fonksiyonu $f(\vec{v}_e)$ için aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\left\langle \frac{1}{m_e Q_{en} v_e} \right\rangle = \iiint \left(\frac{1}{m_e Q_{en} v_e} \right) f(\vec{v}_e) d^3 v_e \quad (2.109)$$

Bu çözüm sürüklenme hızının (v_D) elektronların ortalama hızından $\langle v_e \rangle$ düşük olduğu koşullar için geçerlidir. Elektronların ortalama hızı:

$$\langle v_e \rangle = \sqrt{\frac{8m_e}{\pi k_B T_e}} \quad (2.110)$$

Sürüklenen yüklü parçacıklar tarafından taşınan elektrik akım yoğunluğu sürüklenme hızı ile tanımlanır. Buna göre:

$$\vec{J}_e = qn\vec{v}_D = q^2 n \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad (2.111)$$

Denklem 2.111'deki σ iletkenlik katsayısı (S/m) olarak bilir (Wong, C.S. and Mongkolnavin, R., 2016). Elektrik alan etkisi ile bir parçacık Δx kadar hareket ettiğinde yaptığı ortalama çarpışma sayısı (ΔN_c) aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\Delta N_c = nS\Delta x \quad (2.112)$$

Denklemdaki S çarpışmaların olduğu bölgenin kesit alanını ifade eder. Buna göre ortalama bir çarpışma için serbest yol uzunluğu (λ_c) aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$\lambda_c = \frac{1}{nS} \quad (2.113)$$

Buradan ortalama v hızına sahip bir parçacığın ortalama çarpışma süresi:

$$t_c = \frac{\lambda_c}{v} = \frac{1}{nvS} \quad (2.114)$$

Parçacıkların hız dağılım fonksiyonu $f(v)$ bağlı olarak çarpışmaların olduğu bölgenin kesit alanı da değişecektir. Bu durumda çarpışmalar bir hız katsayısı $\langle Sv \rangle$ ile hız dağılım ortalaması alınarak ifade edilir (Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J., 2005). Buna göre çarpışma hız katsayısı:

$$\langle Sv \rangle = \frac{\int v^3 S(v) f(v) dv}{\int v^2 f(v) dv} \quad (2.115)$$

Buradan çarpışma frekansı (w_c):

$$w_c = v_c = n\langle Sv \rangle \quad (2.116)$$

Olarak bulunur. Çarpışma frekansı alternatif olarak aşağıdaki gibi denkle ile hesaplanabilir.

$$w_c = v_c = \frac{8\pi n_o e^4 \ln \Lambda}{m_e^2 v_0^3} \quad (2.117)$$

Denge durumunda plazmalarda çarpışmalar genellikle elektron-iyon çarpışma hızı ile ölçülür. Elektron-iyon çarpışma hızı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$v_{ei} = \frac{\pi^{\frac{3}{2}} n_e Z e^4 \ln \Lambda}{\sqrt{2} (4\pi \epsilon_0)^2 m_e^2 v_{te}^3} \quad (s^{-1}) \quad (2.118)$$

Debye-Hückel küresi için çarpışma frekansı plazma frekansından büyük olmalıdır. Küre içinde $v_o = v_e$ olur. Buna göre;

$$\frac{v_c}{w_p} = \frac{8\pi n_o e^4 \ln \Lambda}{m_e^2 v_e^3 w_p} = \frac{\ln \Lambda}{2\pi n_o \lambda_e^3} = \frac{\ln \Lambda}{2\pi \Lambda_e} \approx \frac{1}{\Lambda} \quad (2.119)$$

Plazmanın devamlılığı için plazma içerisindeki çarpışma sayısının 1'den çok büyük olması beklenir ($N_c = w_c t_c \gg 1$).

Değişik plazma istemleri için plazma metreleri ve değerleri Tablo 2.3'de sunulmuştur.

Tablo 2.3. Değişik sistemler için plazma parametreleri.

Sistem	$n_e \text{ (m}^{-3}\text{)}$	$T_e \text{ (eV)}$	$w_p \text{ (Hz)}$	$\lambda_D \text{ (m)}$
Yıldızlararası uzay plazması	10^6	1	10^5	10
Güneş rüzgarları	10^7	10	10^5	10
Van Allen Kuşakları	10^9	10^2	10^6	1
İyonosfer	10^{11}	10^{-1}	10^7	10^{-2}
Taç Küre	10^{13}	10^2	10^8	10^{-3}
Mum alevi	10^{14}	10^{-1}	10^9	10^{-4}
Neon Işıkları	10^{15}	1	10^9	10^{-4}
Ortalama bir gaz deşarjı	10^{18}	2	10^{11}	10^{-5}
Füzyon Reaktörlerinde	10^{20}	10^4	10^{12}	10^{-4}
Yıldırım	10^{29}	3	10^{14}	10^{-8}

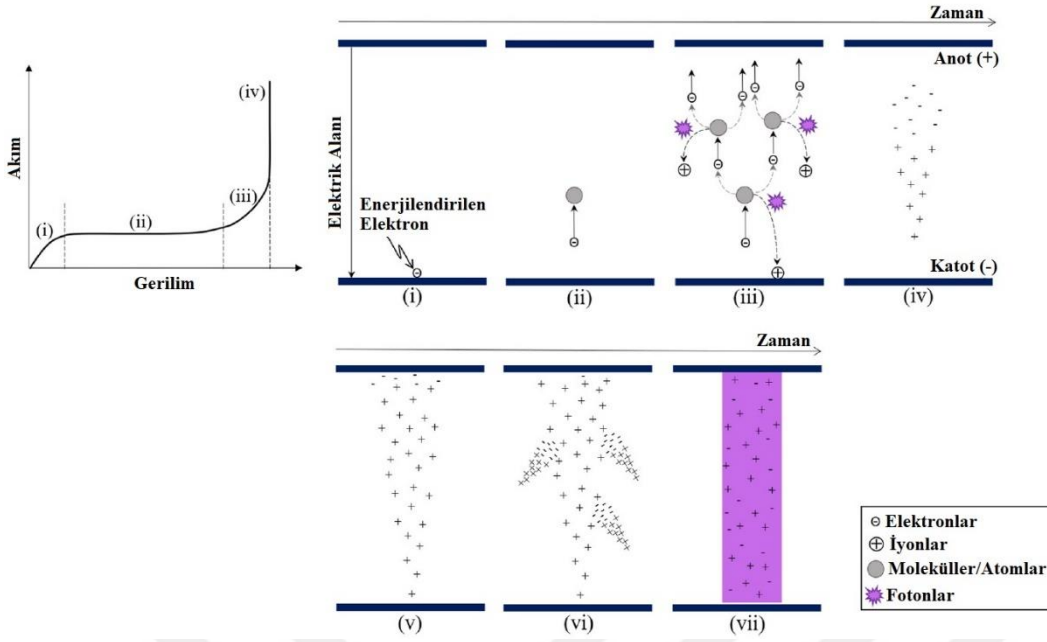
2.4. Soğuk Plazma Üretim Yöntemleri

Plazma üretimi, bir gaza enerji uygulanarak elektron-iyon çifti oluşumu ile gazın kırılıp plazmaya dönüştürülmesi ile sağlanır. Plazma oluşumu için yeterli enerjide ve miktarda iyonlaşma oluşturulması gerekir. İyonlaşma elektron-iyon çarpışmaları ya da fotoiyonizasyon şeklinde oluşturulabilir. Gazanın plazmaya dönüşmesi birçok farklı yöntemle enerji uygulanabilir. Alev oluşumunda olduğu gibi kimyasal tepkiler sonucu ısı etkisiyle veya tokamak reaktörlerinde olduğu gibi nükleer reaksiyonlar sonucu oluşan ısı enerjisi ile plazmalar elde edilebilir. Endüstriyel ve akademik amaçlı üretilen yapay plazmalar elektrik enerjisinin farklı uygulamaları ile üretilmektedir.

Uygulamanın amacına göre plazmalar değişik basınç, sıcaklık, gaz türü, gerilim ve frekans ile deşarj oluşturularak üretilir. Her deşarj türünün kendine özgü karakteristiği olduğundan farklı donanım ve ekipman kullanımı gerekir. Bu durum plazma üretim yöntemlerini farklılaşmasına neden olur.

2.4.1. Elektriksel kırılım

Nötr durumda bir gaz yalıtkandır ve üzerine uygulanan elektrik alan ne kadar büyük olursa olsun elektrik alımını iletmez. Bununla birlikte nötr gazlarda bile çok düşük miktarda başı boş yük bulunur (Wong, C.S. and Mongkolnavin, R., 2016). DA, AA veya darbeli gerilimler uygulanarak oluşturulan elektrik alan ile gaz içerisindeki elektronlar ve başı boş yükler ivmelendirilerek elektron-iyon çiftinin oluşumu için gerekli enerjiye sahip olurlar.



Şekil 2.12. Townsend teorisine göre akım ve gerilime bağlı gazın kırılıp deşarj oluşması: **(i)** Katottan kopan elektron, **(ii)** Elektronların elektrik alanın tersine ivmelenmesi, **(iii)** Elektron çarpışmaları ile iyon oluşumu, **(iv)** Gazın kırılması, **(v)** Elektronların anotta çekilmesi, **(vi)** İkincil elektron oluşumu, **(vii)** Yüksek iletkenlikte bir kanal oluşumu (Laroque, D. A., et al., 2022).

Plazma oluşumu için yeterli akım ve gerilimin gaz içerisinde akması gerekir. Bu akım ve gerilim değerleri Townsend ve Paschen kuralları ile belirlenir. Şekil 2.12’de görüleceği gibi Townsend kırılma mekanizmasına göre yeterli düzeyde uygulanan elektrik alanı ile katot olarak kullanılan elektrot yüzeyinden elektronlar koparılıp elektrik alanının tersi yönde ivmelendirilir. Uygulanan voltaj artırıldığında elektrik akımı da artar ve bir noktada doyuma ulaşır. Elektronlar bu noktada anotta doğru yönelirken diğer parçacıklar ile esnek veya esnek olamayan çarpışmalar yaparak iyonizasyonu sağlar. Elektron ve iyonların elektrot yüzeylerinde ayrışıp birikmesi sonucu gaz içinde bir akım akar. Bu akım elektrik alanı kuvvetlendirir ve daha çok parçacığın çarpışıp iyon oluşturmasını sağlar. Düşük kütleleri ile elektronlar iyonlara nazaran daha hızlı hareket edip anot yüzeyinde birikir. Gaz hacmi içinde pozitif iyon hakimiyeti oluşur. İyonlar katot yüzeyinden yeniden elektron çekmeye başlar. İkincil elektron oluşumu ve birikimi ile yeterince yoğun bir iyonlaşma oluşur ve gaz kırılıp iletken hale geçer (Bruggeman, P. J., Iza, F. and Brandenburg, R., 2017; Misra, N. N., Schlüter, O. and Cullen, P.J., 2016).

Gazın elektriksel kırılım mekanizmasının sabit bir elektrik alan (E) ve basınçta (p) oluştuğunu varsayılırsa katottan anoda doğru akan elektron akışı (F_a) aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$F_a = F_0 e^{\alpha d} \quad (2.120)$$

Denklemdeki F_0 katot yüzeyinden bir alan başına düşen elektron sayısını, d katot ile anot arasındaki mesafeyi ifade eder. α birinci Townsend katsayısı ya da iyonizasyon katsayısı olarak adlandırılır. Katottan anoda doğru birim zamanda akan toplam elektron sayısı (N):

$$N = n_0 \frac{e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.121)$$

Denklemdeki γ ikinci Townsend katsayısı ya da ikincil elektron emisyon katsayısı olarak adlandırılır. Denklemin paydası sıfıra doğru yaklaşırsa ($1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) \rightarrow 0$) N/n_0 oranı sonsuz olma eğiliminde olur. Bu durumdeşarj akımını da etkiler. Bu etki elektrotlar arasındaki gazın kırılması ile oluşabilir. Bu neden ile kırılım kriteri:

$$1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1) = 0 \quad (2.122)$$

Anottan akan akım yoğunluğu (J_a):

$$J_a = e F_a = J_0 e^{\alpha d} \quad (2.123)$$

Anot yüzey alanından akan toplam akım (I_a) ise:

$$I_a = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.124)$$

Townsend teoremine göre akım aşağıdaki kriteri sağlamalıdır.

$$I_a = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.125)$$

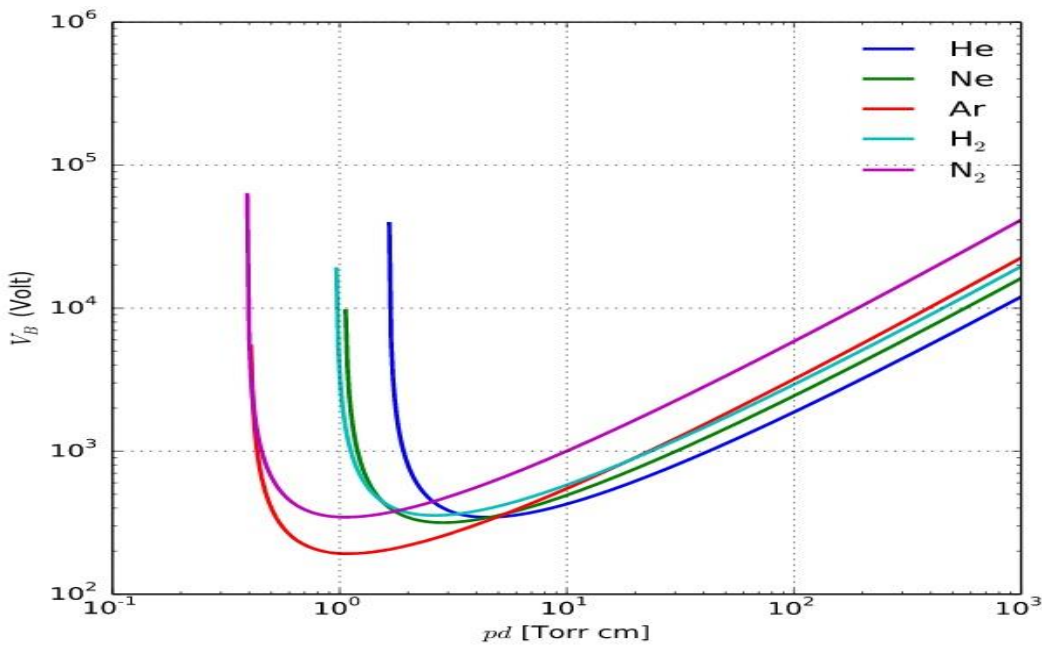
Townsend teoremine göre gaz kırılım gerilim (U_B) aşağıdaki kriteri sağlamalıdır.

$$U_B = \frac{Bpd}{\ln(pd) + \ln\left(\frac{A}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}\right)} \quad (2.126)$$

$$A = \frac{1}{\lambda_{e1}}; B = \frac{u_i}{\lambda_{e1}} \quad (2.127)$$

Denklem 2.127'deki λ_{e1} 1 Torr basınçta elektronların ortalama serbest yoludur ve u_i kullanılan gazın iyonlaşma potansiyelidir.

Paschen yaptığı çalışmalar ile γ sabitinin elektrik alan ve basıncın bir fonksiyonu olduğu ve yaklaşık aynı değerler aldığını fark etmiştir. Bu sayede kırılma gerilimi kullanılan gazın hem atomları hem de molekülleri için pd 'nin bir fonksiyonu olarak bulmuştur. Şekil 2.13'de görüleceği gibi kırılma gerilimi pd 'ye bağlı olarak farklı gazlar için benzer bir değişim gösterip Paschen eğrilerini oluşturmaktadır.

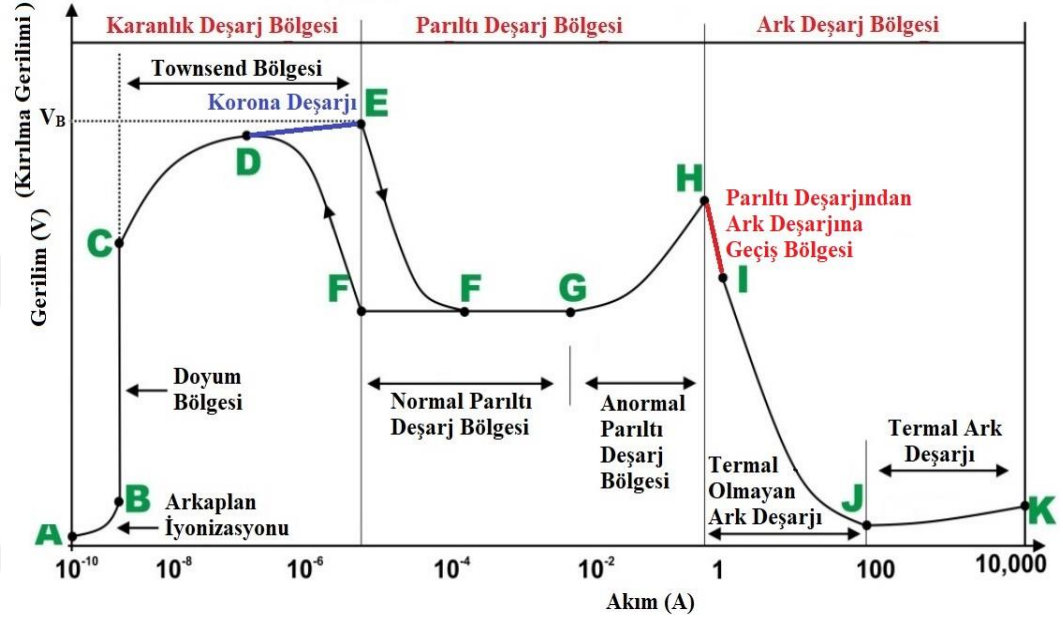


Şekil 2.13. Farklı gaz türleri için elde edilen Paschen eğrileri (Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J., 2005).

Paschen'e göre kırılma gerilimi:

$$U_B = \frac{A p d}{\ln(B p d) + C} \quad (2.128)$$

Denklemdaki A , B ve C sabit katsayılar olup kullanılan gaz ve elektron türüne göre değişir.



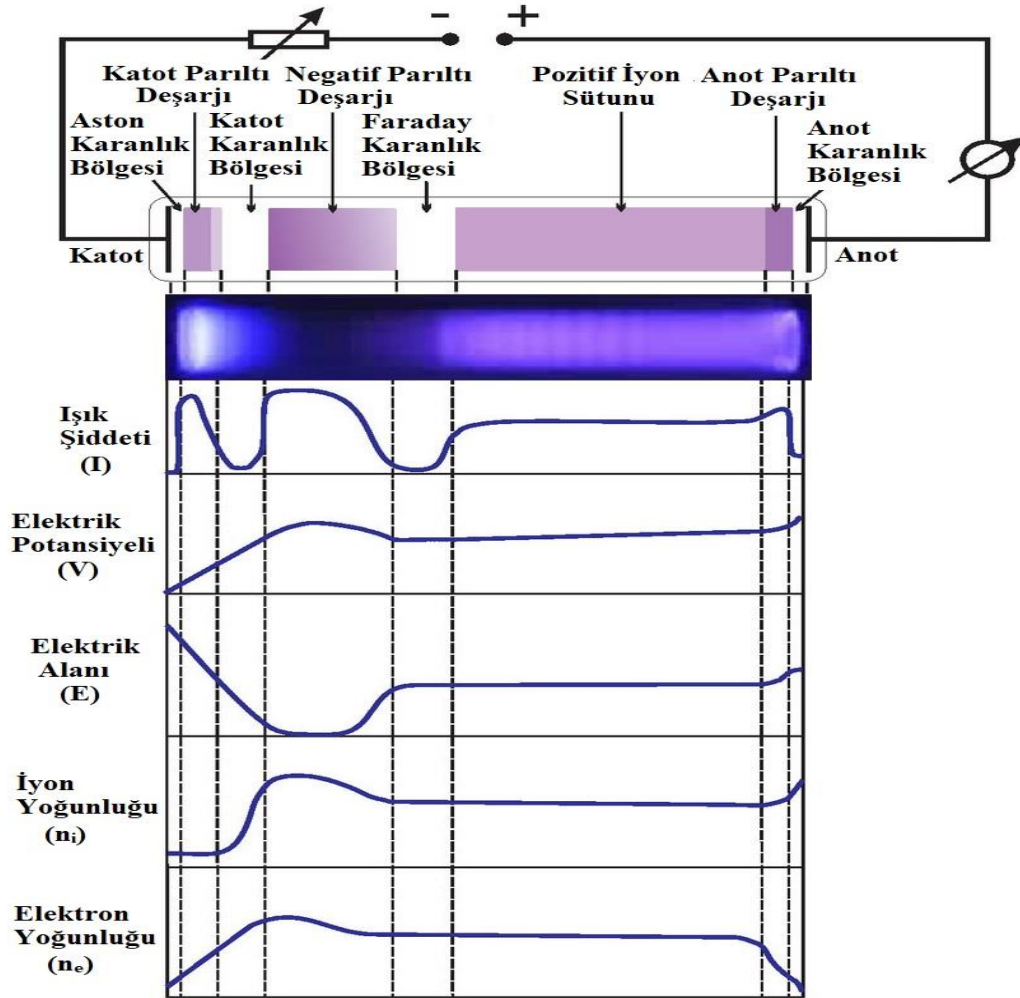
Şekil 2.14. Elektrik deşarjının I-V karakteristiği (Vossen, J. L., 1978).

Şekil 2.12’de görüleceği üzere uygulanan gerilim artması deşarj oluşumu etkilemekte, deşarj oluşumu da deşarj bölgesinden akan akımı etkilemektedir. Akım arttıkça oluşan deşarjın karakteristiği de değişmektedir. Elektrik deşarjının akım ve gerilime bağlı karakteristik eğrisi Şekil 2.14’de sunulmuştur. Karanlık deşarj bölgesinde gaza uygulanan gerilim arttıkça akımda artmaktadır. Kırılma gerilimine ulaşıldıktan sonra uygulanan gerilim düşmesine rağmen akım artışı devam etmektedir. Anormal parıltı deşarj bölgesinde ise akım artışı ile gerilim artışı oluşmaktadır. Ark deşarj bölgesine geçişte ise akım artışı ile gerilim düşüşü üstel bir şekilde gerçekleşmektedir. Bu durumlar plazmada sistemden sonsuz büyüklükte bir akım geçme isteği oluşmasına neden olmaktadır. Bu durumu engellemek için kaynak ile plazma arasında seri bir R_L direnci konulur (Konuma, M., 1992).

Gerekli gerilim şartı sağlandığında akım kontrolü ile istenen deşarj türü elde edilebilir. Buna göre aşağıdaki akım değerlerinde istenen deşarj türü elde edilir.

- 10^{-7} - 10^{-5} A arasında Korona deşarjı
- 10^{-5} -1 A arasında Parıltı deşarjı
- > 1 A Ark deşarjı

2.4.1.1. Parıltı deşarjı



Şekil 2.15. Parıltı deşarjının yapısı ve parametrelerinin dağılımı.

Düşük basınç veya atmosferik basınç altında DA, AA, RF ya da MD sistemleri ile kapalı bir cam tüpteki gaza enerji uygulanıp gazın bir bütün olarak homojen bir şekilde deşarj olması Parıltı (Glow) deşarj olarak adlandırılmaktadır. Bilinen en eski deşarj yöntemidir. Enerjinin uygulandığı temel parçacık elektronlar olduğundan parıltı deşarjı soğuk plazma olarak sınıflandırılır. Diğer

deşarj türleri ile kıyaslandığında parıltıdeşarjı ile oluşturulan plazmalar uzamsal olarak oldukça yüksek bir oranda homojen olup düşük sıcaklıklarda nispeten daha büyük hacimde üretilebilir.

Şekil 2.15’de görüleceği gibi parıltıdeşarjında birkaç parlak ve karanlık bölgeler bulunmaktadır. Bu bölgelerin her birinin kendine özgü karakteristiği olup plazma parametrelerinin değişimi Şekil 2.15’de görülebilir. Katottan kopan elektronlar anotta doğru hareket ederken ivmelerinde meydana gelen düşüş ve elektron yoğunluğundaki azalma elektronların enerjilerinde bir düşüş meydana getirir. Bu neden ile bu bölgelerdeki ışık şiddetinde bir düşüş olur ve bu gölgeler karanlık görünür. Anotta yaklaşılnca elektron ve iyon ivmelenmeleri artar ve elektronlarda yeniden enerji artışı olur. Parıltıdeşarjının en belirgin kısmı pozitif iyon sütunudur. Genel olarak parıltıdeşarjında elektron sıcaklıkları 1-2 eV arasında olup DAdeşarj ile 10^6 - 10^8 cm⁻³ arasında elektron yoğunluğu elde edilebilir (Wong, C.S. and Mongkolnavin, R., 2016).

Şekil 2.14 incelendiğinde akım ve gerilim karakteristiğine göre parıltıdeşarjı iki farklı bölgeye sahiptir. Normal parıltıdeşarj bölgesinde katot gerilimi düşmekte olup katot akımı ve akım yoğunluğu sabit kalmaktadır. Akım yoğunluğun değişimi sadece katot yerine kullanılan elektrottun yüzey alanının değişimi ile sağlanabilir. Bu bölgede gerilim ve akım değişimleri sadece kullanılan gaz ve elektrot türünün değişimine bağlıdır. Parıltıdeşarjının kapladığı elektrot yüzeyinden çekilen akım miktarı arttığında sabit bir alana sabit olduğundan elektrot yüzeyindeki akım yoğunluğunda bir artış olması beklenir. Bu durum katot gerilimini artırır ve katottan yayılan elektron miktarında bir artış sağlar. Bu durum plazmanın akımını, gerilimini ve dolayısı ile gücünü daha çok artırır. Bu bölge anormal parıltıdeşarj bölgesi olarak isimlendirilir. Elde edilen güçlü plazma ve yüksek elektron yoğunluğu sebebiyle yüzey işlemlerinde daha çok bu bölgedeki parıltıdeşarjları tercih edilir (Konuma, M., 1992). Akım artışı devam ettirilirse parıltıdeşarjından arkdeşarjına geçiş yapılır. Bu geçiş bölgesinde akım-gerilim karakteristiğinde bir histerezis eğrisi gözlemlenebilir.

Parıltı deşarjlarında kullanılan gaz türüne göre farklı renklerde deşarj gözlemlenir. Kullanılan gaz türlerine göre gözlemlenen renkler Tablo 2.4’de verilmiştir.

Tablo 2.4. Bazı gazlar için parıltı deşarjında gözlemlenen renkler.

Gaz Türü	Katod Parıltı Deşarjı	Negatif Parıltı Deşarjı	Pozitif İyon Sütünü
He	Kırmızı	Pembe	Kırmızı-Pembe
Ne	Sarı	Turuncu	Kırmızı-Kahverengi
Ar	Pembe	Koyu Mavi	Koyu Kırmızı
Kr	-	Yeşil	Mavi-Mor
Xe	-	Turuncu-Yeşil	Beyaz-Yeşil
H ₂	Kırmızı-Kahverengi	Hafif Mavi	Pembe
N ₂	Pembe	Mavi	Kırmızı-Sarı
O ₂	Kırmızı	Sarı-Beyaz	Kırmızı-Sarı
Hava	Pembe	Mavi	Kırmızı-Sarı

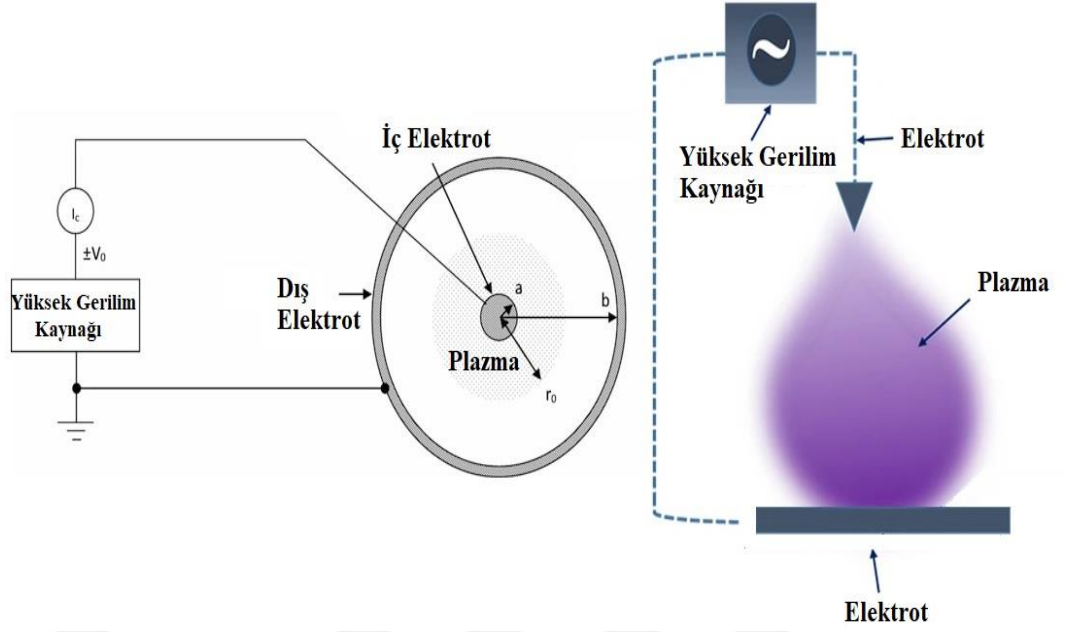
2.4.1.2. Korona deşarjı

Kırılma gerilimine yakın gerilimlerde birkaç mikro amperlik akımlarda korona deşarjı elde edilir. Kırılma gerilimine ulaşamadığında bile kesin bir uca sahip elektrot ile daha geniş yüzey alanına sahip elektrot arasında yüksek bir elektrik alanı oluşur ve kırılma meydana gelir. Keskin uçta oluşan yüksek elektriksel alandan dolayı, hava için $E > 3$ kV/mm, elektronlar ivmelenerek iyonlaşmayı sağlayacak çarpışmalar oluşturur. Bu etki elektrotlar arası mesafeye bağlıdır. Deşarjının oluşturan minimum mesafe Korona etki mesafesi olarak adlandırılır (Wong, C.S. and Mongkolnavin, R., 2016). Oluşan plazmalar sivri uçtan yüzey alanı geniş olan elektrotta doğru yönelen rastgele filamentler şeklinde oluşur.

Şekil 2.16’da görüleceği üzere küresel bir sisteme sahip korona deşarj sistemi için Poisson denklemi geçerli olur. Buna göre:

$$\nabla \cdot E = \frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} (r^2 E) = -\frac{\rho}{\epsilon_0} \approx 0 \quad (2.129)$$

$$E(r) = -\frac{dV}{dr} = \frac{a^2 E_0}{r^2} \quad (2.130)$$



Şekil 2.16. Keskin noktasal bir elektrot ile oluşan Korona deşarjı (Hage, M., et al., 2022; Wong, C.S. and Mongkolnarin, R., 2016).

Keskin uç için $r = a$ ve $V = V_0$ geniş yüzeyli elektrot için $r = b$ ve $V = 0$ olur. Bu durumda:

$$V(r) = V_0 \left[\frac{a(b-r)}{r(b-a)} \right] \quad (2.131)$$

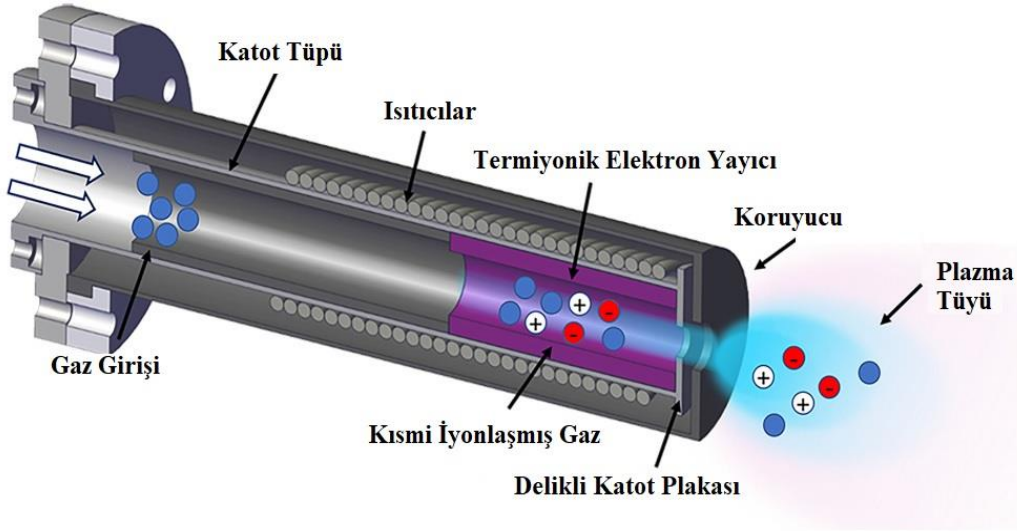
$$E(r) = \frac{abV_0}{r^2(b-a)} \quad (2.132)$$

Keskin uç için $a \ll b$ olduğundan $E_0 \approx \frac{V_0}{a}$ olacağından;

$$E(r) \approx \frac{aV_0}{r^2} \quad (2.133)$$

Bu durum elektrotlar arasındaki mesafenin (r) çok düşük olması ile gerçekleşir.

2.4.1.3. Sıcak katot deşarjı



Şekil 2.17. Katot deşarjı ve temel bileşenleri (Goebel, D. M., et al, 2021).

Sıcak katot deşarjı harici dış bir ısıtıcı kullanarak parıltı deşarjı ile plazma elde edilmesidir. Isıtıcı kullanılması nedeniyle sıcak katot olarak isimlendirilse de elde edilen plazma soğuk plazma olmasından dolayı soğuk katot deşarjı olarak ta isimlendirilmektedir (Phelps, A. V. and Petrovic, Z. L., 1999). Isıtıcı olarak genelde tungsten bobinleri kullanılmaktadır. Katotta uygulanan gerilim ile katot yüzeyinden elektronlar koparılır. Bu bölgeden yoğun bir elektron bulutu oluşmakta olup iyonlaşma yeterli miktarda gerçekleşmez. Elektronlar ısıtıcı ile ısıtıldığında iyonlaşma için gerekli kinetik enerji sahip olur ve iyonlaşma bu gölgede meydana gelir. Isıtıcının bulunduğu bölgede yeterli miktarda elektron ve iyon yoğunluğu olduğu için katot ve anot arasında çok büyük bir potansiyel farka ihtiyaç duyulmaz. Katot elektrotunun kullanım ömrünü kısaltmamak için katot ile anot arasında çok düşük bir potansiyel fark oluşturulur. Katot ve anot arasındaki boşlukta mutlak bir vakum oluşturulsa bile iyon ve elektron yoğunluğundan dolayı katot ve anot arasında bir akım akar (Wong, C.S. and Mongkolnavin, R., 2016).

Teoride termiyonik elektron yayılması ısıtıcının sıcaklığı T ve işlem fonksiyonu ϕ tarafından yönetilir. Bu durum denklem 2.134'de sunulan Richardson-Dushman denklemi ile verilir.

$$J = AT^2 e^{-\frac{e\phi}{kT}} \quad (2.134)$$

Denklem 2.134'deki A sabit bir katsayıdır. Isıtıcı bölgesinden akım akmasından dolayı bu bölgede akım yoğunluğu denklemleri kullanılır. Akım yoğunluğu aşağıdaki denklem ile ifade edilir.

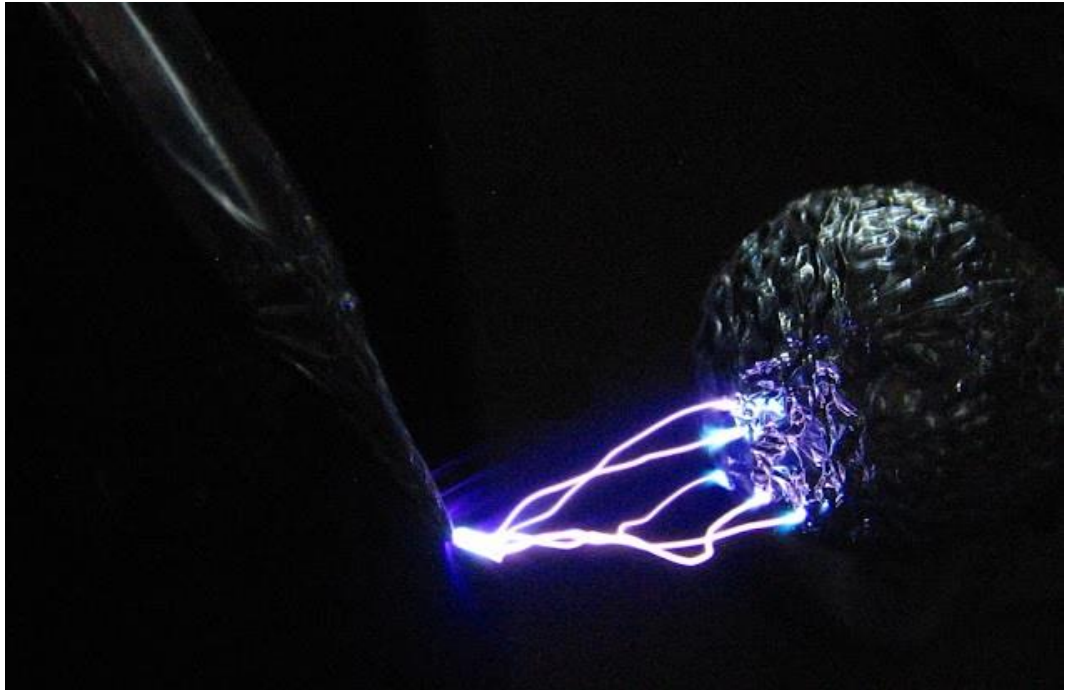
$$J = \frac{4\varepsilon_0}{9} \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \frac{U^{\frac{3}{2}}}{d^2} \quad (2.135)$$

Denklem 2.135'deki d elektrot arasındaki mesafe ve U uygulanan gerilimdir. Akım yoğunluğu hesabında katotta yakın gölgelerde parçacıklar arasında yeterli miktarda çarpışma ve iyonlaşma meydana gelmeme dikkate alınmıştır. Eğer anot ile katot arasında sabit basınçta bir gaz doldurulursa bu durumda katot ile ısıtıcı arasındaki bölgede meydana gelen parçacık çarpışmaları da dikkate alınmalıdır. Bu durumda deşarj akım yoğunluğu:

$$J = \frac{9\varepsilon_0\mu_e}{8} \frac{U^2}{d^3} \quad (2.136)$$

Denklem 2.316'deki μ_e elektron hareketliliğini ifade eder.

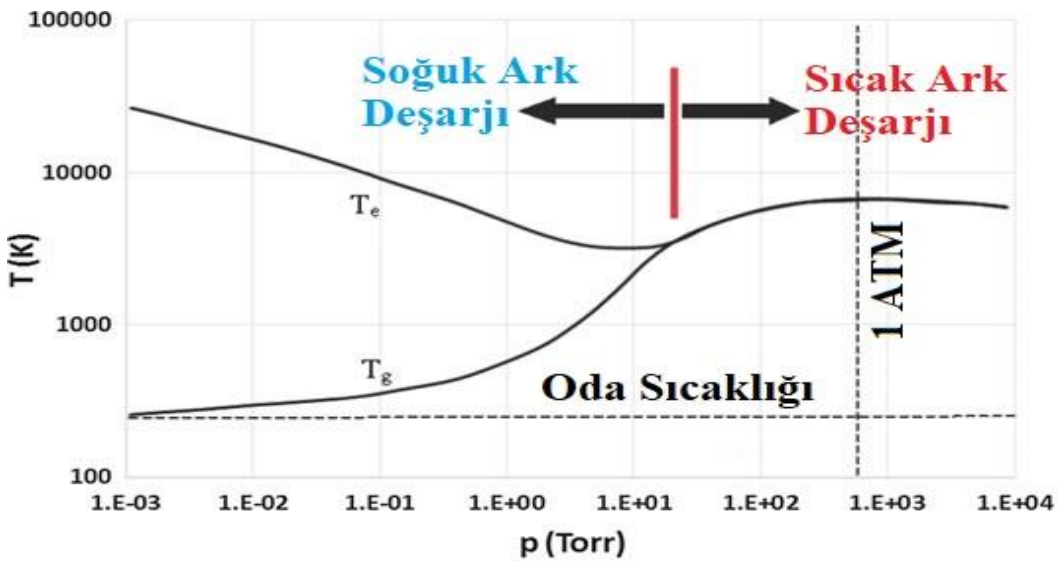
2.4.1.4. Ark deşarjı



Şekil 2.18. Ark deşarjı (Raul, T., 2022).

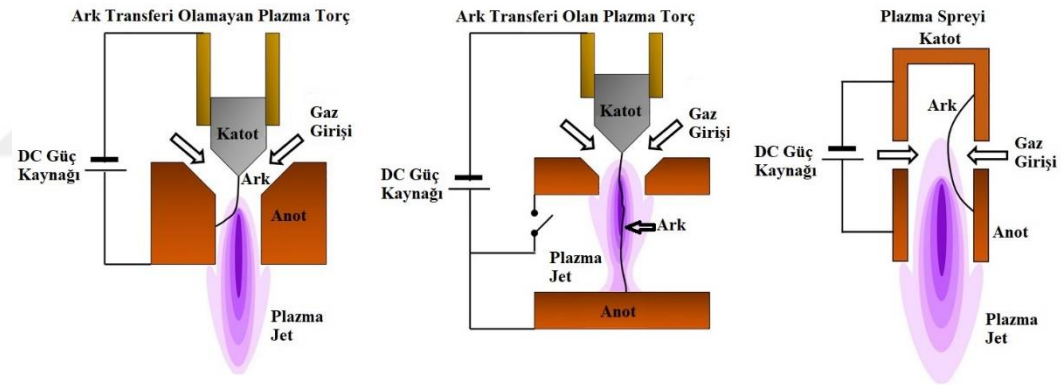
Katot ve anot elektrotları arasındaki bir gaza kırılma gerilimine ulaştıktan sonra akım uygulanmaya devam edilirse ve akım değeri 1 A değerinin üzerine çıktığında katot ile anot arasında elektron ve iyon hareketliliği termiyonik etki ile sağlanır ve katot ile anot arasında ısıltı bir akım akar. Bu şekilde oluşan deşarj “ark deşarjı” olarak bilinir. Diğer elektriksel kırılım türlerine göre daha yüksek basınçlarda meydana gelir. Basınç etkisi ile parçacık çarpışmalarının yeterli miktarda olmasıyla sistemden daha fazla akım çekilir ve katot ile anot arasında indüklenen gerilim aşırı derecede düşer. Basınç değerinin yükseltilmesi çarpışma miktarını ve plazma sıcaklığı artırır. Bu nedenle plazma sistemden daha fazla akım çekip katot-anot arasındaki potansiyel farkı daha çok düşürür. Çekilen akıma göre plazma soğuk ya da sıcak ark formunu alır. Genel kullanımda 100 V ve 100 A değerlerine kadar soğuk ark deşarjları elde edilir. Akım 100 A seviyelerinin üzerine çıktığında elektronlar ve iyonlar termal dengeye ulaşabilecek bir sıcaklığa sahip olup sıcak ark deşarjı oluşturur (Wong, C.S. and Mongkolnavin, R., 2016).

Akım akması ile termiyonik etki oluşur ve akım akışının durmasıyla yok olur. Bu nedenle ile kendi kendine devam etmeyen bir deşarj oluşur (Lopatin, I. V., et al., 2019). Şekil 2.18’de görüldüğü üzere havanın kırılıp plazmaya dönmesi ile oluşan ısıltı bir kanal boyunca akan akım plazma varlığı boyunca sürekli kalır. Termiyonik etki ile oluşan plazmanın rejimi uygulanan gazın sıcaklık ve basıncına bağlı olup bu etki Şekil 2.19’da sunulmuştur.



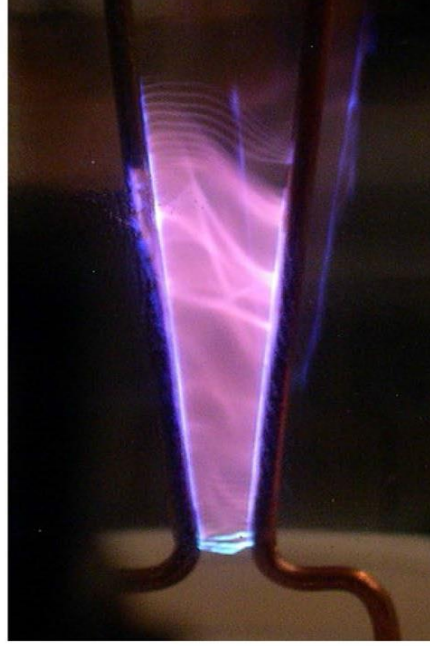
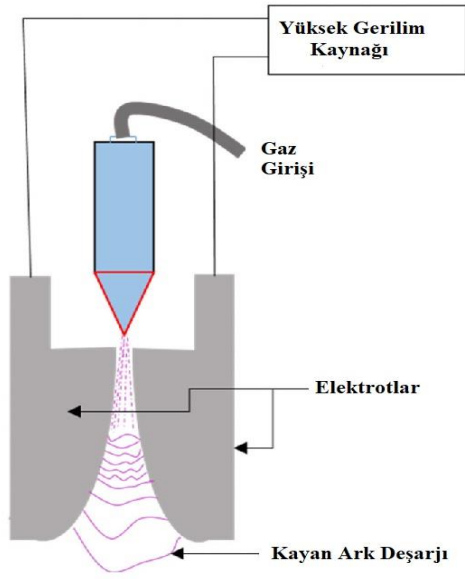
Şekil 2.19. Sıcaklık ve basınçla ilgili olarak ark deşarjının rejimi (Wong, C.S. and Mongkolnavin, R., 2016).

Uygulamalarda ark deşarjı iki farklı konfigürasyonda kullanılır. Bunlar plazma torcu ve plazma sprejidir. Plazma torcu ark transferi olan ve ark transferi olmayan iki farklı uygulamaya sahiptir. Ark transferi olan plazma torç uygulamasında işlem uygulanacak parça topraklanıp parça ile torç arasında ark deşarjı oluşturulur. Plazma ile kesim, eritme ve kaynak işlemleri ark transferi olan plazma torç uygulaması ile gerçekleştirilir. Ark transferi olmayan plazma torç uygulamalarında çalışma gazı torç ve toprak elektrotlarında oluşan bir nozuldan geçirilerek ark deşarjı ile oluşan bir plazma jet oluşturulur. Plazma spreyi ark transferi olmayan plazma torç uygulamasının bir varyasyonudur. Yüzey kaplama işlemleri için sıklıkla kullanılır. Seramik benzeri kaplama malzemeleri plazma spreyi uygulaması ile kaplama yapılacak malzeme yüzeyine püskürülür ya da molibden veya tungsten bir ağır metallerin hızlı bir şekilde eritilip malzeme yüzeyinde katılaşması sağlanıp kompozit malzeme üretiminde kullanılmaktadır. Ark deşarjının farklı uygulamaların şeması Şekil 2.20’de sunulmuştur.



Şekil 2.20. Farklı ark deşarjı uygulamaları (Kim, K. S. and Kim, T.H., 2019).

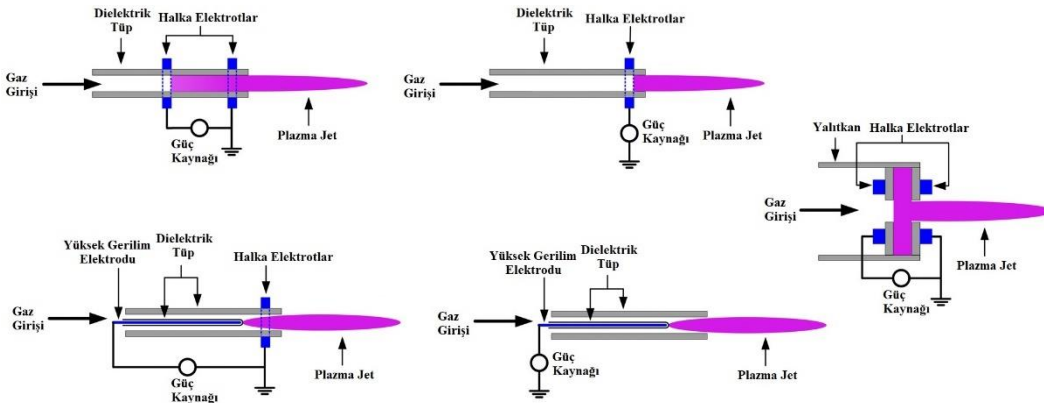
En çok bilinen diğer bir ark deşarjı uygulaması kayan ark deşarjıdır (gliding arc discharge). Kayan ark deşarjı yarı periyodik olarak oluşup elektrot boyunca ilerleyen ark deşarjlarından meydana gelir. Şekil 2.21’de görüleceği gibi elektrot türleri bıçak şeklinde ya da aralarında V tipi boşluk bulunan iki telden oluşabilir. Genel olarak atmosferik basınçta yarı termal dengeye sahip dengesiz nispetten soğuk bir plazma oluşur (Sun, S. R., et al., 2017). Kayan ark deşarjı su ve hava arıtma işlemlerinde ve birçok malzeme türü için yüzey modifikasyon uygulamalarında kullanılmaktadır (Du, C. M., et al., 2012).



Şekil 2.21. Kayan ark deşarjı (Pawlat, J., et al., 2019; Birania, S., et al., 2022).

2.4.2. Plazma Jet ve Plazma Mermisi

Plazma jet uygulaması, deşarj oluşumunu sağlayan sisteminin sınırladığı bölgeden yönsüz bir şekilde veya bir gradyan ile plazmanın bulunduğu ortama genişleyerek deşarj olması olarak tarif edilebilir.

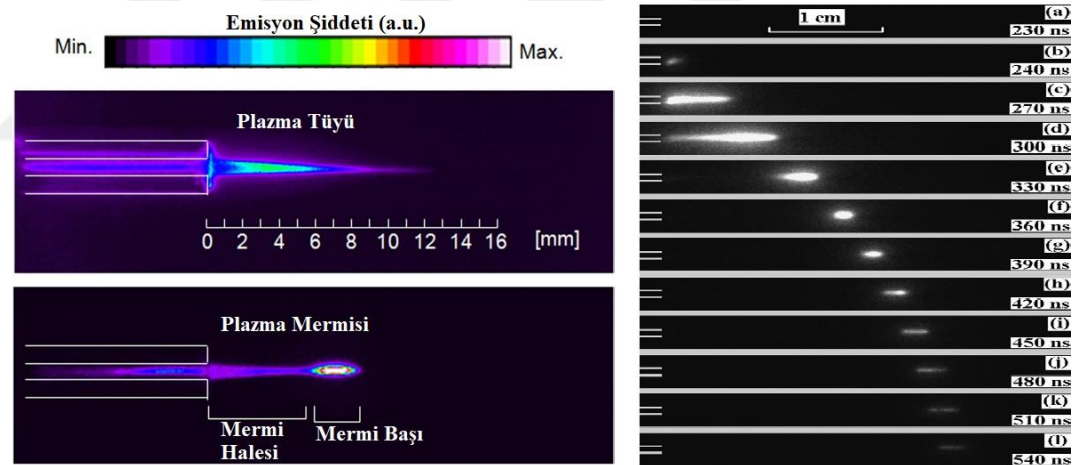


Şekil 2.22. Plazma Jet uygulamalarının farklı konfigürasyonları (Lu, X., Laroussi, M. and Puech, V., 2012).

Plazma Jet DA, AA veya darbeli gerilim sistemler ile RF veya MD sistemleri ile oluşturulabilir. Plazma Şekil 2.22’de gösterilen elektrot konfigürasyonların biri ile oluşturulmuş bir sistemde elektrotlar arasında meydana gelen deşarjlar ile oluşur ve yüksek bir akış hızıyla tüp içerisinde bulunan gaz tarafından bir jet etkisi

oluşturacak şekilde elektrot bölgesinin dışına doğru itilir. Atmosferik basınçta uygulanan plazma jetler ile kararlı, homojen ve düzgün bir deşarj elde edilir (Bermudez-Aguirre, D., 2020). Plazma Jet uygulaması çok geniş bir kullanım alanına sahiptir. Yüzey temizlik uygulamalarından yüksek sıcaklıkta malzeme sentezine ve kaynak işlemlerine lazer-plazma etkileşimlerinden uzay araçlarındaki parçacık hızlandırıcılarına kadar birçok farklı alan ve sektörde sıklıkla plazma jet uygulamaları tercih edilir (Kong, M. G., et al., 2012).

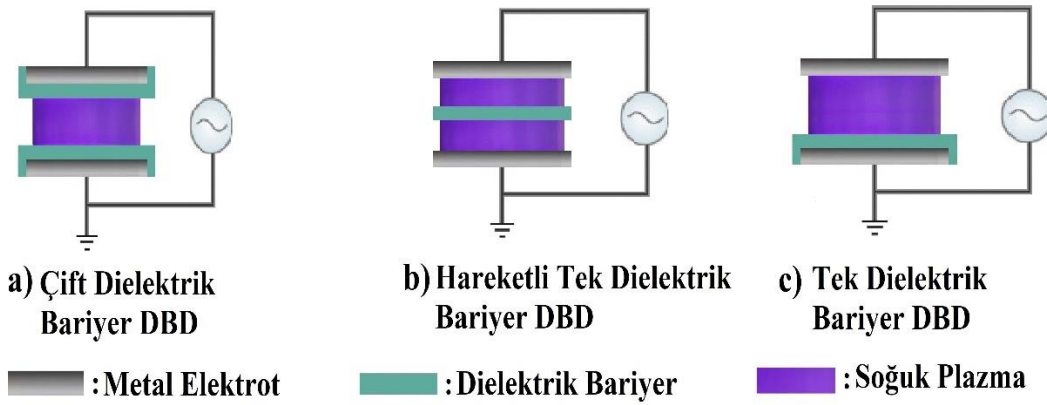
Teschke ve arkadaşları RF bir sistem ile ürettikleri bir plazma jet uygulamasında (Teschke, M., et al., 2005) ve Lu ile Laroussi yaptıkları darbeli DA plazma jeti (plazma kalemi) uygulamasında (Lu, X. and Laroussi, M., 2006) plazma tüyünü hızlı görüntüleme teknikleri ile incelediklerinde plazmanın yüksek hızlarda ve küçük hacimli bir yapıda sürekli olarak oluştuğunu gözlemlediler. Bundan dolayı bu tip deşarj özelliğine sahip plazma jet uygulamasına “Plazma Mermisi” adını verdiler.



Şekil 2.23. Plazma mermisinin yüksek hızlı fotoğrafları (Oh, J. S., Aranda-Gonzalvo, Y. and Bradley, J. W., 2011; Lu, X. and Laroussi, M., 2006).

Plazma mermisi darbeli diğer deşarj türleri ile karşılaştırıldığında, darbeli korona deşarj gibi darbe ile oluşan deşarjlarda oluşan plazma flamaları doğası gereği tekrarlanabilir değildir. Rastgele oluşan flamalar farklı yapılara sahip olur. Plazma mermisi uygulamalarında ise oluşan plazma mermi yapısı sürekli tekrarlanabilir (Lu, X., Laroussi, M. and Puech, V., 2012).

2.4.3. Dielektrik bariyer deşarjı (DBD)



Şekil 2.24. DBD yöntemi ve farklı uygulama yöntemleri.

Dielektrik Bariyer Deşarjı (DBD) en az biri dielektrik malzeme ile kaplanmış elektrotlar arasında veya elektrotlar arasına yerleştirilmiş dielektrik malzeme ile meydana gelen deşarjlar ile oluşur. Şekil 2.24’de görüldüğü gibi düzlemsel elektrot sistemleri en çok bilinen DBD sistemleridir. Genel olarak atmosferik basınç altında uygulanmakta olup değişik basınç değerleri içinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Elektrotlara AA, DA, darbeli gerilim, RF ve MD sistemleri ile enerji uygulanabilir. Dielektrik malzeme olarak cam, seramik, plastik, silikon, kuvars, emaye, lastik, teflon ve mika malzemeler kullanılmaktadır. Dielektrik malzeme elektrotlar arasında akan akımı sınırladığı için DBD sisteminin karakteristiğini belirler. Akımın sınırlanması ile ark oluşumu engellenir ve kullanılan gazın tam anlamıyla kırılması önlenmiş olur. Bu nedenle DBD plazmalarına “sessiz deşarj” da denilmektedir (Brandenburg, R., 2017). Genel olarak He, N₂, O₂ ve hava gazları kullanılmaktadır (Bermudez-Aguirre, D., 2020). Elektrotları arasındaki mesafe genel olarak birkaç santimetre seviyelerine çıkabilir. Genel kullanımda yüksek frekansta kilovoltluk AA gerilimler uygulanarak homojen deşarj oluşturulur.

DBD ilk kez 1857’de Werner Von Siemens tarafından ozon üretimi için kullanılmıştır (Siemens, W. V., 1857). Gelişen teknoloji ve sistem avantajları nedeniyle endüstriyel kullanımda en çok tercih edilen soğuk plazma uygulaması DBD olup uzun yıllar araştırma konusu olmuştur (Chirokov A., Gutsol A. and Fridman A., 2005). Birçok malzemenin yüzey işlemlerinde, gaz lazeri üretiminde, plazma ekran üretiminde, tıbbi cihazların sterilizasyonda, dokuların biyolojik

dekontaminasyonunda, aerodinamik kontrol sistemlerinde elektrik rüzgârı kaynağı olarak ve analitik algılama cihazlarında 1990'lerden beri DBD yöntemi kullanılmaktadır (Brandenburg, R., 2017).

2.4.4. Yüksek frekans deşarjı

Genel olarak yüksek frekans deşarj plazmaları radyo frekans plazmaları olarak bilinir. 1 MHz üstü frekanslarında yüksek frekans deşarj plazmaları olarak sınıflandırıldığından radyo frekans (RF) deşarj plazmaları ile mikrodalga (MD) deşarj plazmaları yüksek frekans deşarj plazmaları başlığı altında incelenecektir.

Yüksek gerilim ile oluşturulan plazmalarda doğası gereği elektrik alan düzensiz olarak dağılır ve heterojen bir deşarj dağılımı gözlemlenir. Yüksek frekans deşarjlarında daha güçlü, homojen ve hacimsel olarak daha büyük plazmalar elde edilir. Yüksek frekans deşarj plazmalarının oluşturulacak hacim başına absorbe ettikleri güç aşağıdaki denklem ile verilir.

$$\frac{P_{abs}}{V} = \frac{1}{2} n_e \frac{e^2}{m_e v_{e0}} \frac{v_{e0}^2}{v_{e0}^2 + w^2} E_0^2 \quad (2.137)$$

Denklem 2.137'deki v_{e0} elektron-nötr parçacık çarpışma frekansını w ise genliği E_0 olan elektromanyetik alanın açısal frekansını belirtmektedir. Elektrik alana dik bir yönde B manyetik alanı mevcut ise hacim başına absorbe denklemi aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{P_{abs}}{V} = \frac{1}{4} \frac{e^2}{m_e v_{e0}} \left(\frac{v_{e0}^2}{v_{e0}^2 + (w - w_{ce})^2} + \frac{v_{e0}^2}{v_{e0}^2 + (w + w_{ce})^2} \right) E_0^2 \quad (2.138)$$

Elektromanyetik dalgalarda elektron siklotron frekansı w_{ce} aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

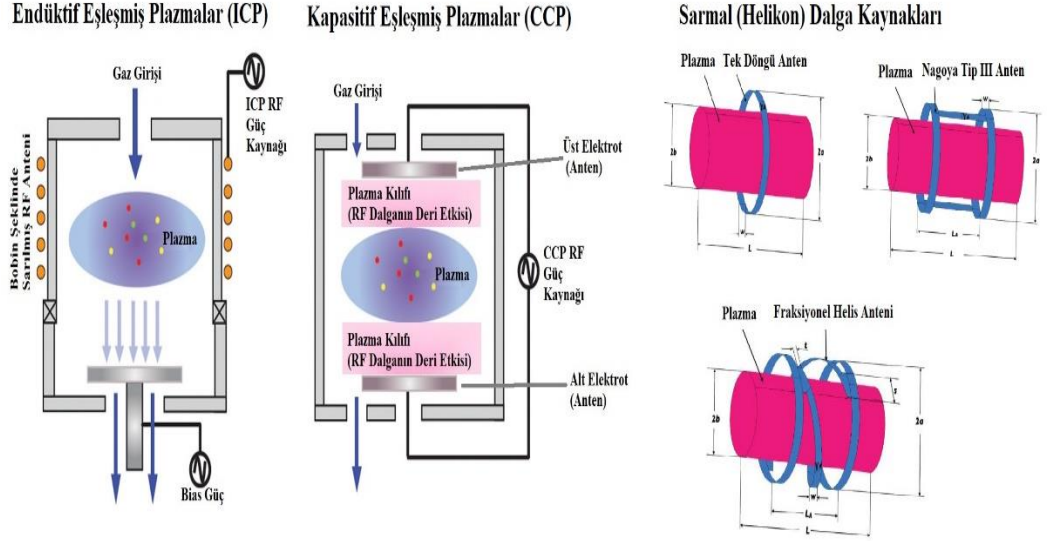
$$w_{ce} = \sqrt{\frac{e^2 n_e}{\epsilon_0 m_e}} \quad (2.139)$$

$v_{e0} \gg w$ Olduğu durumda dalga plazma içerisine bir miktar nüfus eder. Dalganın plazma içerisindeki nüfus mesafesi deri etkisi olarak ifade edilir. Deri etkisi plazma kılıfı uzunluğu ile sınırlıdır (Conrads, H. and Schmidt, M., 2000). Deri etkisinin uzunluğu δ_s :

$$\delta_s = \sqrt{2}c \sqrt{\frac{\epsilon_0 m_e v_{e0}}{e^2 n_e w}} \quad (2.140)$$

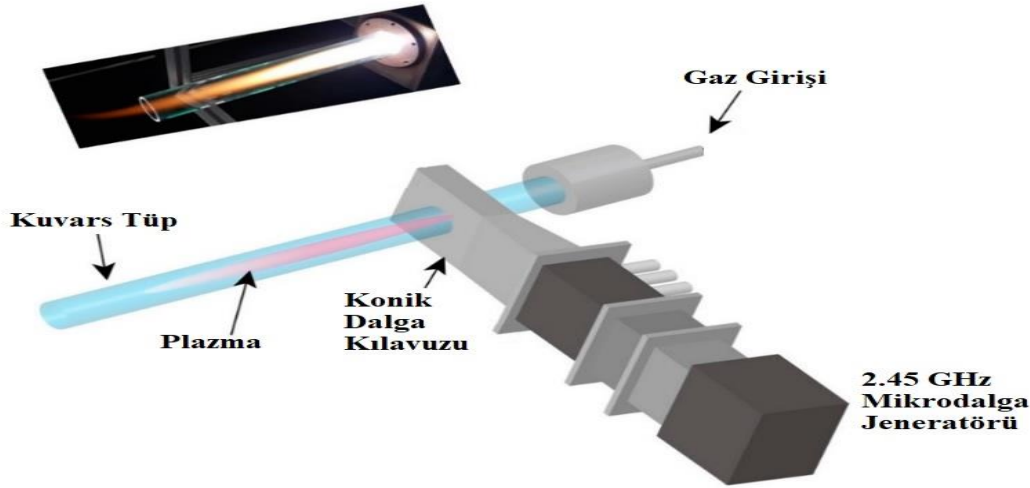
Denklem 2.140'deki c ışık hızını ($\approx 3 \times 10^8$ m/sn) ifade eder.

Radyo frekansı deşarj uygulamaları 1- 500 MHz frekans aralığında uygulanmakta olup genel kullanımda 13.56 MHz frekansında kullanılmaktadır. Anten olarak kullanılan elektrotlar aracılığıyla uygulanan elektromanyetik alanın kullanılan gaz içerisinde radyo frekansında salınım yapması ile iyonizasyon sağlanır ve plazma elde edilir. RF deşarj plazmalarında filament deşarjları çok kısa ömürlü olup homojen bir deşarj elde edilir (Anderson, C. A., Hopkins, M. B. and Graham, W. G., 1990). Üç ana RF deşarj plazma türü vardır: endüktif eşleşmiş plazmalar (ICP), kapasitif eşleşmiş plazmalar (CCP) ve sarmal (helikon) dalga kaynakları (Laroque, D. A., et al., 2022). RF deşarj plazmaları elektrotların veya antenlerin uygulanma şekline göre sınıflandırılır. Eğer elektrotlar yüzeyi birbirini görecek şekilde yerleştirilmiş ise bu durumda kapasitif bir etki oluşacağından bu deşarj CCP (Capacitively Coupled Plasma) olarak adlandırılır. Eğer sarmal bir şekilde sarılmış bir anten ile RF uygulanıyorsa bu durumda endüktif bir etki oluşacağından bu RF deşarjı ICP (Inductively Coupled Plasma) olarak adlandırılır. RF deşarj türlerine ait görsel Şekil 2.25'de sunulmuştur.



Şekil 2.25. RF deşarj türleri (Hill, S., Qian, W., Chen, W., Fu, J., 2016; Magarotto, M., et al., 2016).

500 MHz ile 10 GHz arasındaki frekans bandı arasındaki dalgalar kullanılarak elde edilen plazmalar mikrodalga deşarjı olarak isimlendirilir. Genel kullanımda mikrodalga frekansı olarak 2.45 GHz kullanılmaktadır. Uygulanan elektrik alan çok yüksek salınıma sahip olduğundan elektron-iyon çiftinin oluşumunu sağlayan elektrotlar bu salınıma hızını takip edemezler. Mikrodalgalar bir dalga kılavuzu ile direk olarak gaza uygulanır. Yüksek titreşimli elektromanyetik dalgalar gaz içerisindeki elektron tarafından emilir ve elektron-iyon çarpışma hızını artırarak plazma oluşumunu sağlar. Bu neden ile MD deşarjlarda elektrot kullanımına gerek duyulmaz. Elektrot kullanılmadığından ikincil elektron emisyonu gerçekleşmez. Bu sayede plazma gücü belirli bir gölgede konsantre olur ve yüksek yoğunluğu sahip plazmalar elde edilir (Konuma, M., 1992).



Şekil 2.26. Mikrodalga deşarj plazma sistemi (Lee, B.-J., Jo, S.-I. and Jeong, G.-H., 2019).

Mikrodalga deşarj plazma sistemi Şekil 2.26’da gösterildiği gibidir. Mikrodalga jeneratörü olarak magnetronlar veya klistronlar kullanılır. Magnetron osilasyonu ile oluşan elektromanyetik dalgalar bir dalga kılavuzu ile kullanılan gaza doğru yönlendirilir. Mikrodalga etkinliğini artırmak için yarım dalga doğrultucu veya tam dalga doğrultucu devreleri kullanılır. Magnetronu yansıyan dalgalardan korumak için bir izolatör ve bir sirkülatör kullanılır. İzolatör için soğutma sistemlerine ihtiyaç duyulabilir (Konuma, M., 1992).

Mikrodalga deşarj plazma sistemi ile çok yüksek oranda elektron yoğunluğu ile yüksek oranda reaktif parçacık yoğunluğu elde edilir (Bermudez-Aguirre, D., 2020). Elektrot kullanımına ihtiyaç olmaması ve yüksek elektron ve reaktif yoğunluğu ile elektronik, tıp, ışık işleme, çevresel iyileştirme, enerji üretimi ve depolama teknolojileri gibi birçok alanda mikrodalga deşarj plazmaları tercih edilir (Tatarova, 2014). Yüksek maliyetli uygulamalara sahip olmaları ve uygulama koşullarının hassasiyetleri mikrodalga deşarjlarının dezavantajları olarak sıralanabilir (Laroque, D. A., et al., 2022).

3. DBD PLAZMALARININ ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU, ÖLÇÜM YÖNTEMLERİ ve UYGULAMALARI

Soğuk plazma uygulamalarının en çok bilineni ve en çok uygulanan üretim yöntemi DBD plazmalarıdır. 1800'lü yıllardan beri endüstriyel kullanıma sahiptir (Siemens, W. V., 1857). Yüzyıllardır DBD plazmaları araştırma konusu olmuştur ve DBD plazmaları üzerine yapılan birçok çalışma mevcuttur. Atmosferik basınçta ve oda sıcaklığında üretilebilmeleri en büyük avantajlarıdır. Deşarj ile oluşan ark miktarını ve etkilerinin azaltmak için ya yüksek frekans deşarj sistemleri kullanılır ya da elektrotlar dielektrik malzeme ile kaplanır. Dielektrik malzeme bir elektrottan diğerine doğru akan akımı sınırlar. Şekil 2.14'deki I-V karakteristik eğrisinden de görüleceği gibi akımın sınırlandırılıp düşük değerlerde tutulması ark oluşumunu önlemektedir. Akım düşük değerlerde kalması kullanılan gazın ısınmasını önler (Fridman, A. A., 2012).

Genel olarak AA yüksek gerilimlerin 50 Hz ila 500 kHz frekans aralığında metal elektrotlara uygulanması ile DBD soğuk plazma elde edilir (Kogelschatz, U., 2003). Yüksek AA gerilimden dolayı genel kullanımda elektrotlardan biri yüksek gerilim elektrotu, diğeri toprak elektrotu olarak kullanılır. Yüksek güç sağlama avantajlarından dolayı yüksek gerilimler nanosaniyelik darbeler uygulanarak kullanılmaktadır. Genel kullanımda AA, DA ve darbeli gerilimler kullanılmakta olup uygulama şartlarına göre RF ve MD sistemleri tercih edilir. AA gerilim kullanımında 10-100 W arasında soğuk plazma elde edilmesi mümkün olur (Kogelschatz U, Eliasson B, Walter E, 1999).

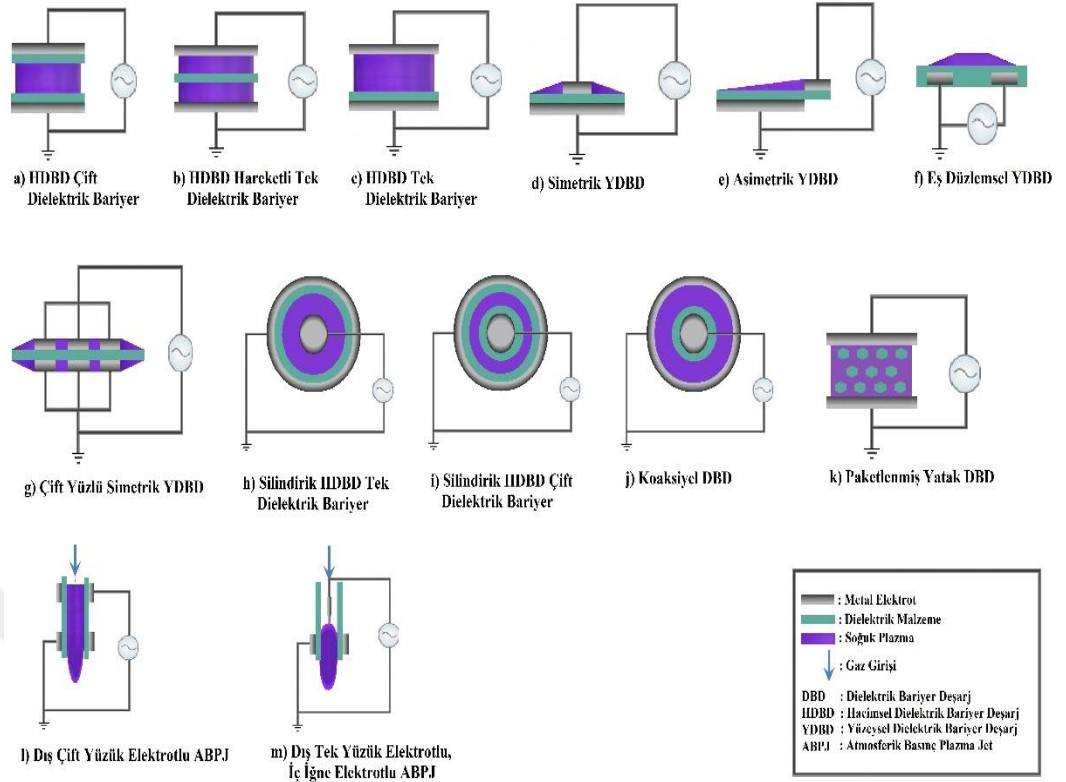
Uygulanan AA voltajı, dielektrik sabiti ve dielektrik malzemenin kalınlığı ile sınırlanan bir yer değiştirme akımını indükler. Dielektrik dışındaki bölgede elektrik alanı yeterince yüksek olduğunda, deşarjlar bu bölgelerde meydana gelir (Ollegott, K., et al., 2020). AA gerilim kullanımında elektrik alandan dolayı dielektrik malzeme yüzeyinde yük birikir. AA gerilimin ilk yarı periyodunda plazmada indüklenen elektrik alan dielektrik malzeme yüzeyinde biriken yük sonucu oluşan elektrik alan ile dengelenir. Bu durum aynı yarı periyotta flama ve ark oluşumunu engeller ve dielektrik malzeme yüzeyi boyunca deşarjların elektrik alan dağılımına göre yayılmasını sağlar. AA gerilimin her bir yarım periyodunda

flama deşarları nanosaniyelik ömürlerde oluşup kaybolur. Polarite her tersine çevrildiğinde, ilk yarı periyot boyunca dielektrik malzeme yüzeyde biriken yük ve plazma içerisindeki iyonlar, bölgesel mikro deşarja yol açan sonraki yarım dalgada aynı konumda bir flama oluşumunu kolaylaştırır. Bu davranışa hafıza etkisi denir (Ollegott, K., et al., 2020). Mikro deşarjların kısa ömrü, plazmanın tipik olarak sadece birkaç on kelvin mertebesinde düşük bir ısınmasına yol açar. Elektronlar, kimyasal reaksiyonları indükleyebilen iyonizasyon, ayrışma ve uyarma süreçlerine yol açan plazma tarafından emilen gücün büyük bir kısmını kazanır. Elektronların tipik ömrü nanosaniye mertebesindeyken, iyonların ömrü birkaç mikrosaniyedir (Fridman, A. A., 2012).

DBD soğuk plazmaları iki farklı başlıkta kategorize edilir. Buna göre DBD plazmaları, Hacimsel Dielektrik Bariyer Deşarjı (HDBD) ve Yüzeysel Dielektrik Bariyer Deşarjı (YDBD) olmak üzere ikiye ayrılır (Brandenburg, R., 2017). HDBD deşarjında metal elektrotlar arasında bir deşarj aralığı ve dielektrik malzeme bulunur. HDBD deşarjında plazma deşarj aralığında meydana gelir. Deşarj aralığı ya dielektrik malzemeler arasında ya da metal elektrotlar ile dielektrik malzeme arasında tipik olarak 0.1 mm ile birkaç santimetre arasında olmaktadır. Metal elektrotlar sabit bir yüzey alanına sahip olduğundan plazma hacmi deşarj aralığına bağlıdır. YDBD deşarjında metal elektrotlar arasında deşarj aralığı bulunmaz sadece dielektrik malzeme olur. YDBD deşarjında elektrot yüzey alanları farklı büyüklüktedir. Yüzey alanı düşük olan elektrot ile dielektrik malzeme arasında kalan bölgelerde plazma oluşur.

3.1. DBD Plazmalarının Üretim Yöntemleri

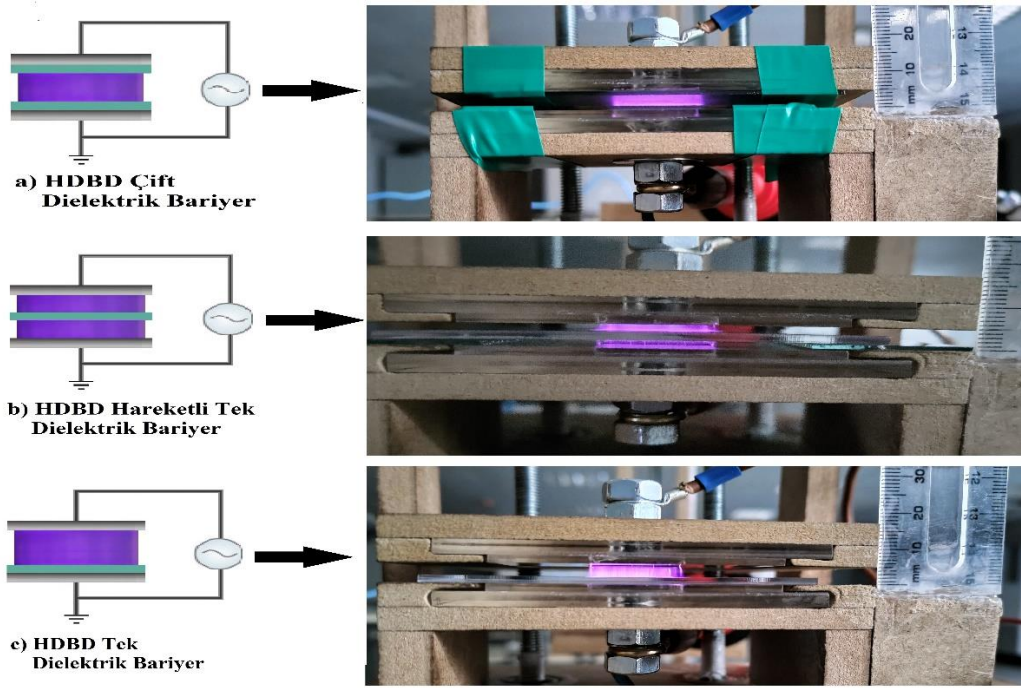
DBD plazma sistemlerinde elektrotların geometrisi, elektrotlara uygulanacak potansiyelin ve elektrik alan gücünün belirlenmesinde önemli bir rol oynar. Elektrotlar arası mesafe ve dielektrik bariyerin kalınlığı, DBD plazmasının üretiminde eşit derecede önemli bir role sahiptir (Subedi, D. P., Joshi, U. M. and Wong, C. S., 2017). DBD sistemleri birçok konfigürasyonda yapılabilir. Yaygın olarak düzlemsel plaka sistemi ve silindirik plaka sistemleri kullanılmaktadır. DBD plazma sistemlerinin farklı uygulamaları gösteren görsel Şekil 3.1’de sunulmuştur.



Şekil 3.1. DBD Soğuk plazma yönteminin farklı konfigürasyonları.

En yaygın DBD plazma üretim yöntemleri paralel plaka yöntemi, silindirik elektrot sistemi, koaksiyel elektrot sistemi ve atmosferik basınç plazma jet (ABPJ) uygulamalarıdır.

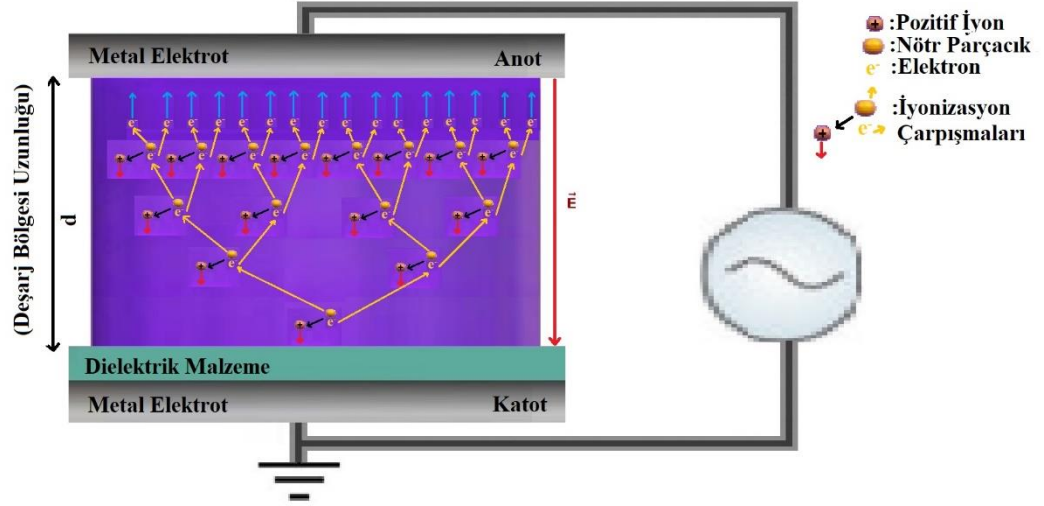
3.1.1. DBD paralel plaka yöntemi



Şekil 3.2. DBD Paralel plaka yönteminin farklı konfigürasyonları: **a)** HDBD çift bariyer, **b)** HDBD hareketli tek bariyer, **c)** HDBD tek bariyer.

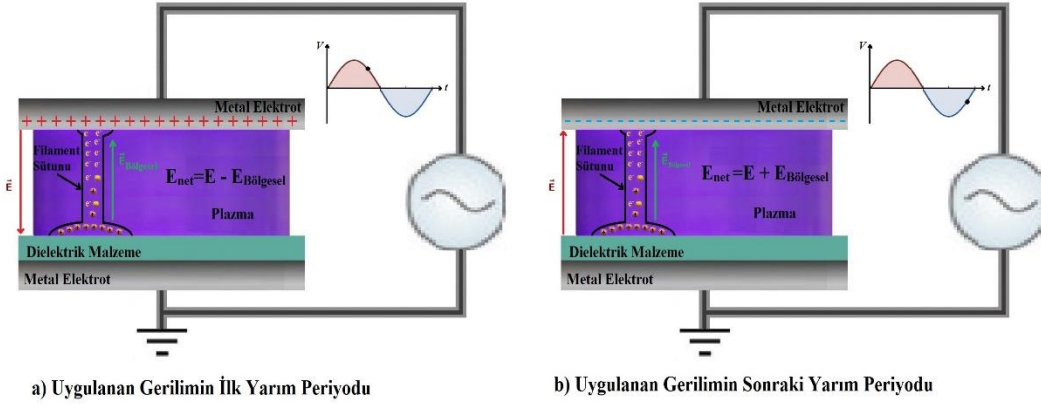
DBD paralel plaka yönteminde eş yüzey alanın sahip simetrik elektrotlar paralel olarak yerleştirilip aralarına dielektrik malzeme yerleştirilerek deşarj oluşturulur. DBD paralel plaka yöntemi ile hacimsel plazmalar elde edilir. Elektrotlardan biri sabit tutulurken diğeri hareket edebilir bir şekilde DBD paralel plaka sistemi tasarlanır.

Dielektrik malzemenin ve deşarj bölgesinin oluşturduğu plakalar arasındaki bölge reaktör ya da hücre olarak isimlendirilir. DBD paralel plaka reaktöründe genelde Townsend kırılım mekanizmasına göre deşarj oluşur ve plazma elde edilir. DBD paralel plakalar yöntemi için Townsend kırılım mekanizması Şekil 3.2’de sunulmuştur. Paschen ve Townsend denklemleri ve kuralları DBD paralel plaka yöntemi için geçerlidir.



Şekil 3.3. DBD paralel plaka yöntemindeki Townsend kırılım mekanizması.

DBD paralel plaka yönteminde elektrik alanı nedeniyle dielektrik yüzeyinde oluşan hafıza etkisi Şekil 3.4’de gösterilmiştir. Uygulanan gerilimin ilk yarım periyodunda elektrik alan sebebiyle dielektrik malzeme yüzeyinde bölgesel olarak yük birikimleri oluşur. Yük biriken dielektrik malzeme yüzeyindeki bölgeler ile metal elektrot arasında bölgesel elektrik alanlar oluşur. Oluşan bölgesel elektrik alanlar uygulanan elektrik alana zıt yönde olup, yük birikimi olan dielektrik malzeme yüzeylerinden metal elektroda doğru nanosaniyelik filament sütunları oluşmasını sağlar. Uygulanan gerilimin sonraki periyodunda uygulanan elektrik alan yön değişir ve dielektrik malzeme yüzeyinde önceki yarım dalgadan kalan artık yükler bulunur. Bu yüklerin varlığı ile oluşan bölgesel elektrik alanlar uygulanan elektrik alan ile aynı yönde oluşup deşarj oluşumu kolaylaştırıcı bir etkiye sahip olurlar. Artık yükler önceki yarım dalgada biriken yük bölgelerinde olduğundan deşarjlarda aynı bölgelerde oluşur.

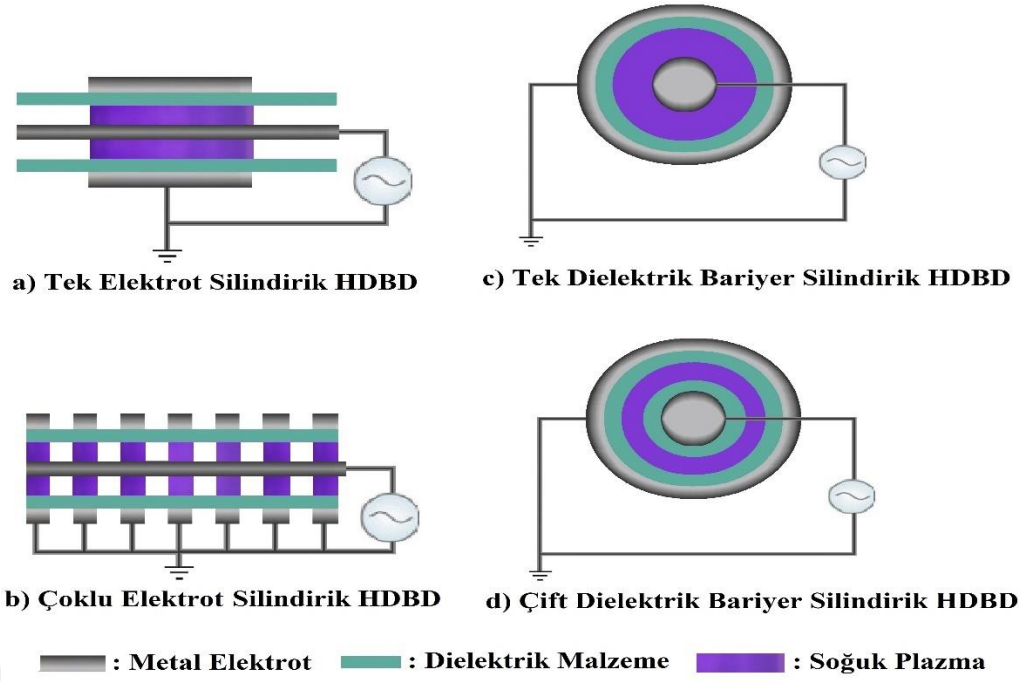


Şekil 3.4. DBD Paralel plaka yöntemindeki hafıza etkisi.

DBD paralel plaka yönteminde en çok tercih edilen DBD uygulamalarından biridir. Atmosferik basınçta ve oda sıcaklığında uygulanabilir olduğu için akademik ve endüstriyel uygulamalarda tercih edilmektedir (Kogelschatz U, Eliasson B, Walter E, 1999).

3.1.2. DBD silindirik elektrot sistemi

Silindirik yüzeye sahip ve en az biri dielektrik malzeme ile kaplanmış elektrot sisteminin oluşturduğu sistem DBD silindirik elektrot sistemi olarak adlandırılır. DBD silindirik elektrot sistemine ait görseller Şekil 3.5'te sunulmuştur. Deşarj içi içe yerleştirilmiş silindirik elektrotlar arasında ya da silindirik elektrotların dış yüzeyleri arasındaki bölgede oluşabilir. Silindirik geometri, yük dağılımını ve elektrik alan dağılımını homojen olmasını sağlayabilmektedir. Bu nedenle ark ve flama oluşumlarını azaltma imkanına sahiptir. Homojen parıltılı ve daha kararlı deşarj elde edilmesi daha olasıdır. Plazma kapasitesini düşürmek için çoklu elektrot yapısı kullanılabilir. Endüstriyel uygulamalarda silindirik yapıya sahip parçacıklar sıklıkla kullanıldığından işlem avantajı sağlar. Kimyasal uygulamalarda, polimer üretiminde, nanomateryal üretiminde ve tekstil sektöründe DBD silindirik elektrot sistemi uygulamalarına rastlanır.

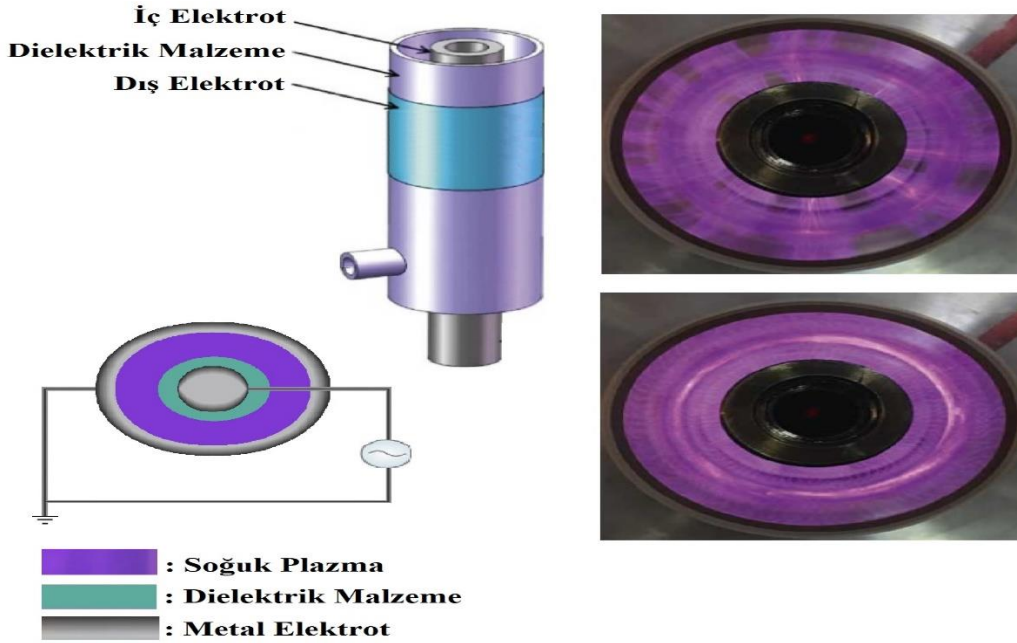


Şekil 3.5. DBD Silindirik elektrot sisteminin farklı konfigürasyonları.

3.1.3. DBD koaksiyel elektrot sistemi

Eş merkezli olarak iç içe yerleştirilmiş koaksiyel elektrotlar arasında dielektrik malzeme ve deşarj aralığı bulunan sistem DBD koaksiyel elektrot sistemi olarak bilinir. Genel olarak dielektrik malzeme ile kaplanmış iç koaksiyel elektrot ile deşarj aralığı ve dış koaksiyel elektrot yapısına sahiptir. İç koaksiyel elektrot ile dış koaksiyel elektrot arasındaki dairesel boşluğa uygulanan gerilim ile radyan yönde oluşan bir elektrik alan uygulanır. Halka şeklinde dairesel boşluktan akan gaz kırılıp plazma oluşturulur. Genel olarak AA gerilim sistemleri ile RF deşarj sistemleri kullanılmaktadır.

Akışkan gaz ve sıvı ortamlarında plazma üretmek için kullanılır. En yaygın olarak ozon üretimi için kullanılmaktadır. Motor egzoz gazının arıtılması, su dezenfeksiyonu, tekstil ve kimyasal sanayinde kullanılmaktadır. DBD koaksiyel elektrot sistemine ait görsel Şekil 3.6'da sunulmuştur.



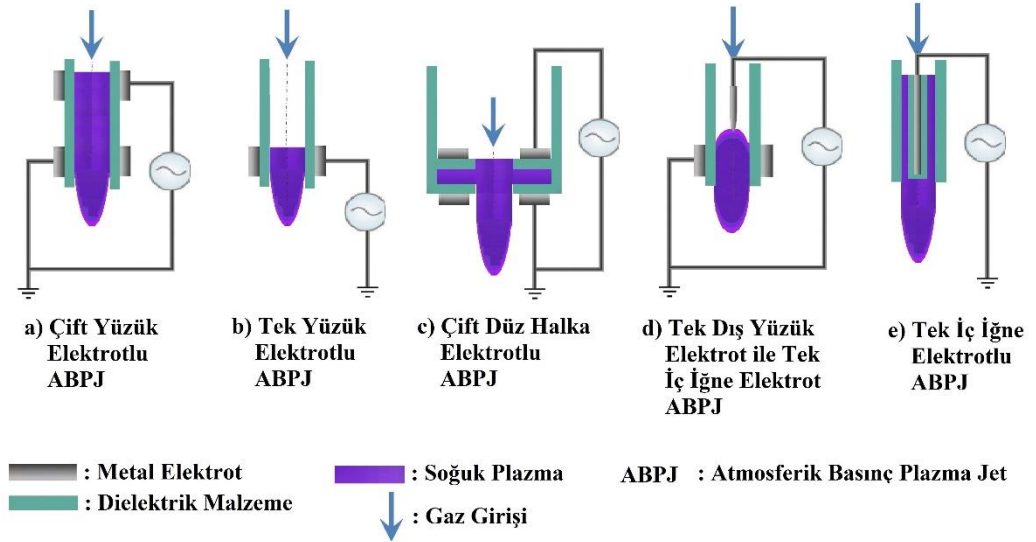
Şekil 3.6. DBD Koaksiyel elektrot sistemi (Liu, P., He, L. and Zhao, B., 2020).

3.1.4. Atmosferik basınç plazma jet (ABPJ)

Koaksiyel bir dielektrik malzemenin dairesel boşluğundan akan gazın çeşitli konfigürasyonlara sahip elektrotlar ile kırılıp plazma elde edilmesi ABPJ olarak bilinir. ABPJ uygulamasının elektrot konfigürasyonları Şekil 3.7’de sunulmuştur. Yüksek gaz debisi altından deşarj oluşturulabilir. Oluşan plazma yüksek gaz debisi ile dışarı atılıp jet etkisi oluşturulur.

ABPJ uygulamasında koaksiyel dielektrik malzeme ve dairesel boşluğundan akan gaz elektrotların uyguladığı radyal yöndeki elektrik alan ile deşarj olur ve koaksiyel dielektrik tüpten dışarı atılır. Plazma yüksek gerilim bölgesinden uzağa doğru yayıldığından elektriksel olarak güvenlidir.

ABPJ uygulamasında elektrot sisteminin sınırları dışında bulunduğu ortamda genel olarak sabit ve kontrol edilebilir ince bir plazma tüyü (plazma sütunu) oluşturulabilir. Oluşan plazma tüyleri sürekli akan bir plazma hacmi şeklinde değil yüksek hızda yayılan ayrı ayrı plazma paketleridir. Gerekli ekipmanlar ile plazma mermileri de oluşturulabilir.



Şekil 3.7. Atmosferik basınç plazma jet (ABPJ) uygulamasının farklı elektrot konfigürasyonları.

ABPJ deşarjı için AA, DA, darbeli gerilim sistemleri, RF sistemleri ve mikrodalga sistemleri kullanılabilir. Atmosferik basınçta, oda sıcaklığında, kararlı, kontrol edilebilir, elektriksel olarak güvenli ve plazmanın dışarı atması ile daha büyük nesneler üzerinde uygulanabilir olduğundan endüstriyel ve akademik uygulamalarda ABPJ uygulamaları sıklıkla kullanılır.

3.2. DBD Plazmaların Karakterizasyonu

DBD plazmaları deşarj ve elektriksel olarak iki ayrı başlıkta karakterize edilecektir.

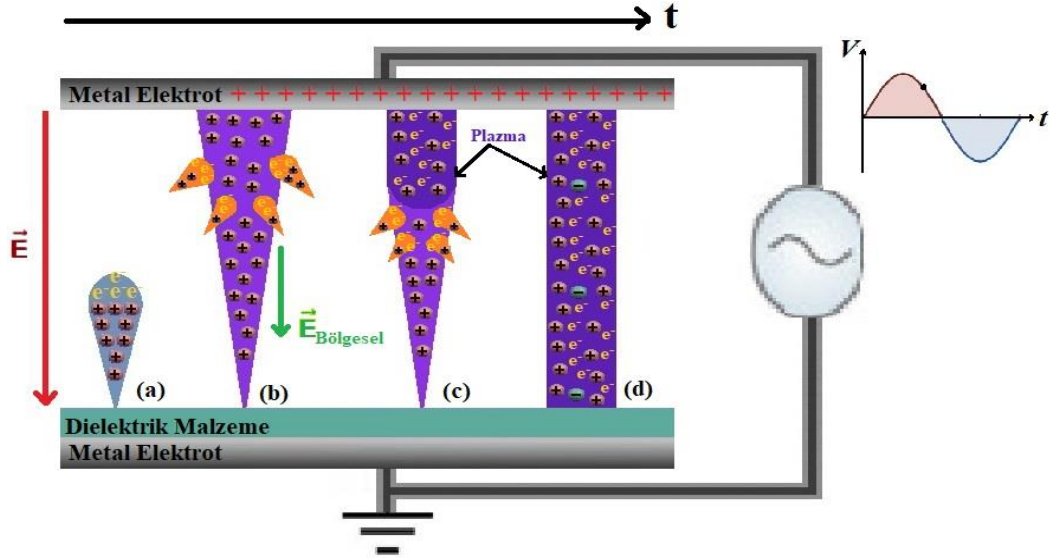
3.2.1. DBD Plazmaların deşarj karakterizasyonu

DBD plazmalarında deşarjlar genellikle Townsend kırılım mekanizması ile oluşur ve Paschen ve Townsend denklemleri ve kuralları DBD için geçerlidir. Ancak Townsend kırılım mekanizması düşük basınç ve çok küçük deşarj mesafelerinde ($pd < 4000$, Torr.cm atmosferik basınçta $d < 5$ cm) daha uygun olan bir prensiptir. Genel olarak homojen parıltı deşarj oluşumunu açıklar. Basıncın ve deşarj mesafesinin artması ile oluşan deşarjlar, kıvılcım ya da flama kırılım mekanizması olarak isimlendirilen prensip ile karakterize edilir (Fridman, A. A., 2012).

Yüksek pd değerlerinde ve kırılma gerilimine yakın yüksek gerilim seviyelerinde kıvılcım kırılması, iyonların boşluğu geçmesi ve ikincil emisyonu sağlaması için gereken süreden çok daha hızlı gelişir. Kıvılcım kırılma mekanizması, flama oluşumum şekline dayanmaktadır. Bir flama, pozitif iyon yoğunluğunun biriktiği bölgeden karşı elektrot yüzeyine doğru hareketi boyunca elektrotlar arasında hızla yayılan ince ışıltılı iyonize bir kanaldır. Flama kanalında deşarjı meydana getiren iyon bölgesindeki iyon yoğunluğundan daha fazla iyon toplanabilir.

İyon yoğunluğun yüksek seviyelerde olması iyon yoğunluğunun bulunduğu bölgede bölgesel bir elektrik alan oluşumuna neden olur. Oluşan bu elektrik alan elektrotlar arasına uygulanan elektrik alanı güçlendirici bir etkiye sahip ise bu etki ile elektrotlar arasında oluşan deşarj plazmadan daha fazla akım akmasına izin verir. Daha fazla akım akışına sebep olan bu deşarj türü kıvılcım deşarjı (spark) olarak isimlendirilir. Deşarj aralığı çok küçük ise deşarj yük yoğunluğunun anotta ulaşması ile gerçekleşir. Anottan katotta doğru oluşan bu deşarj katot yönelimli flama veya pozitif flama olarak isimlendirilir. Deşarj aralığı ve uygulanan gerilim yüksek değerler aldığında yük yoğunluğun biriktiği bölgeden anotta doğru yönelen bir flama deşarjı oluşur. Deşarj anotta uzak bir noktada gerçekleşebilir. Deşarj anotta göre yönelse de hem anotta hem de katotta doğru büyür. Bu deşarj anot yönelimli flama ya da negatif flama olarak isimlendirilir. Pozitif flama ve negatif flama oluşumu ile ilgili görseller Şekil 3.8’de ve Şekil 3.9’de sunulmuştur. Kıvılcım ve flama deşarjlarının ömürleri nanosaniyeler ile ölçülür. DBD plazmalarının uygulanan gerilim frekansları kHz seviyesinde olduğundan uygulanan gerilimin polarite değiştirmesi mikro saniyelik süreler alır. Hafıza etkisi her polarite değişimde yük bölgelerin bulunduğu yerde flama deşarjlarının oluşumu kolaylaştırır ve yeni yük birikimleri ile flama deşarjlarının oluşumuna olanak sağlar. Hafıza etkisiyle oluşan çoklu flama deşarjları, bölgesel olarak uzanan ve uzun süreli varlığını devam ettiren parlak ve incelen bir kanal şeklinde oluşan filament eden deşarj şeklini oluşturur.

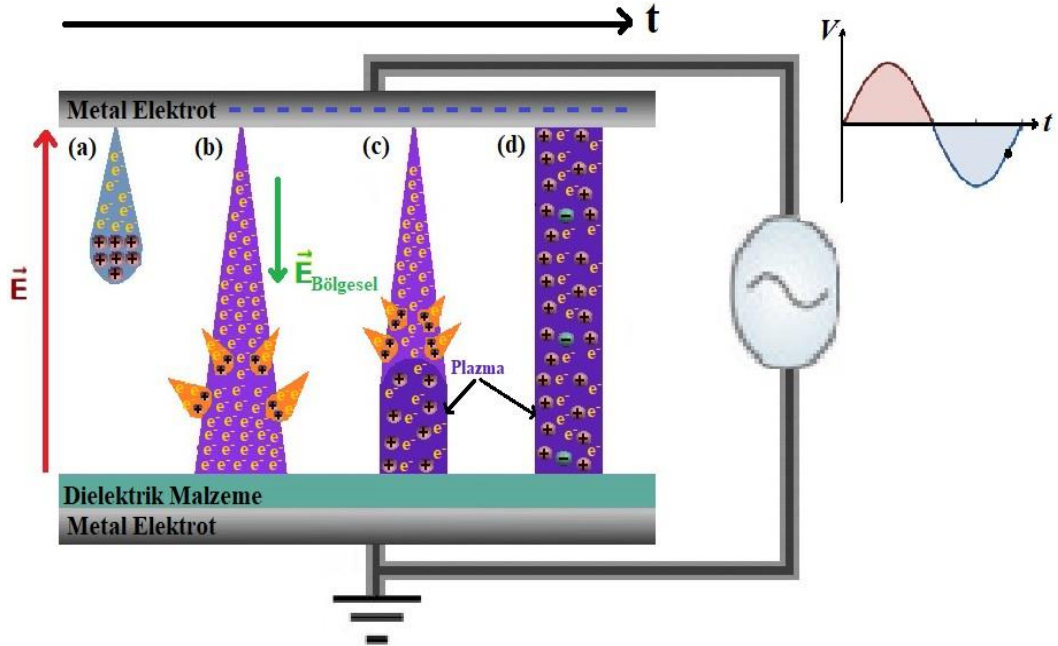
Kıvılcım veya flama deşarjlarının oluşabilmesi için Meek kırılma koşullarının oluşması gerekmektedir. Buna göre bir flama oluşumu için yük bölgesinde oluşan



Şekil 3.8. Pozitif flama oluşumu: **a)** Bölgesel iyon birikimi (çığ), **b)** İkincil elektron emisyonu, **c)** Kırılmanın ve plazmanın oluşumu, **d)** Flamanın oluşumu.

elektrik alanın ($E_{Bölgesel}$) yaklaşık olarak uygulanan elektrik alana (E) eşit olması gerekir :

$$E_{Bölgesel} = \frac{e}{4\pi\epsilon_0 r_{yük}^2} e^{a\left(\frac{E}{p}\right)d} \approx E \quad (3.1)$$



Şekil 3.9. Negatif flama oluşumu: **a)** Bölgesel iyon birikimi (çığ), **b)** İkincil elektron emisyonu, **c)** Kırılmanın ve plazmanın oluşumu, **d)** Flamanın oluşumu

İyonların biriktiği bölgenin (çığ) küresel bir şekle sahip olduğu düşünülürse küresel bölgenin yarıçapı $r_{Yük} \approx 1/\alpha$ olduğu varsayılmaktadır. Deşarj bölgesinin uzunluğu d kadar ise deşarjın büyümesi için αd kritik değerini aşması gereklidir. Buna göre:

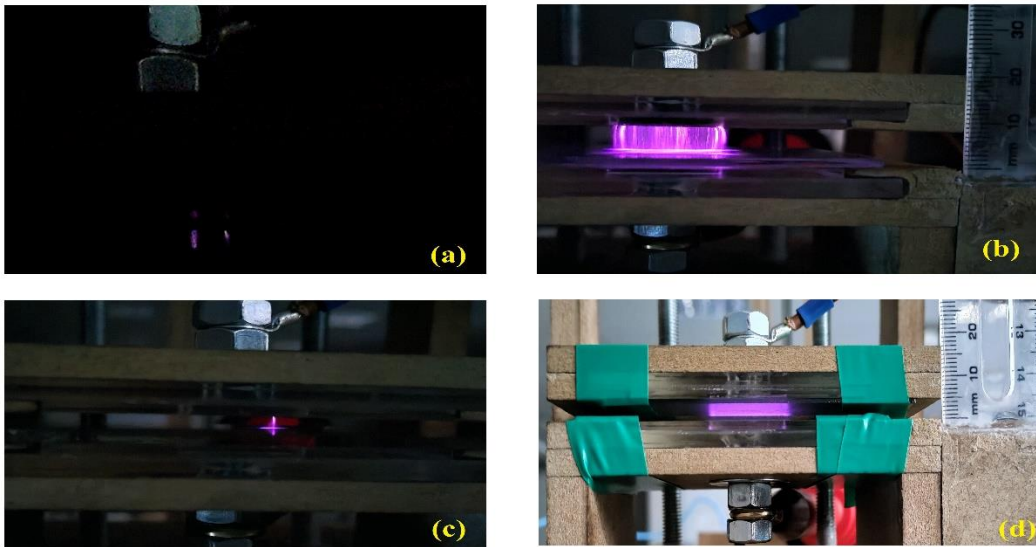
$$\alpha \left(\frac{E}{p} \right) d = \ln \frac{4\pi\epsilon_0 E}{e\alpha^2} \approx 20 \quad (3.2)$$

İyonların biriktiği bölgenin yük yoğunluğu yarı kararlık gereği elektron yoğunluğuna eşit olacağından yük bölgesindeki elektron yoğunluğu:

$$n_e = e^{\alpha d} \quad (3.3)$$

$\alpha d \geq 20$ Koşullu flama deşarjları için Meek kırılma koşullu olarak bilinir (Fridman, A. A., 2012).

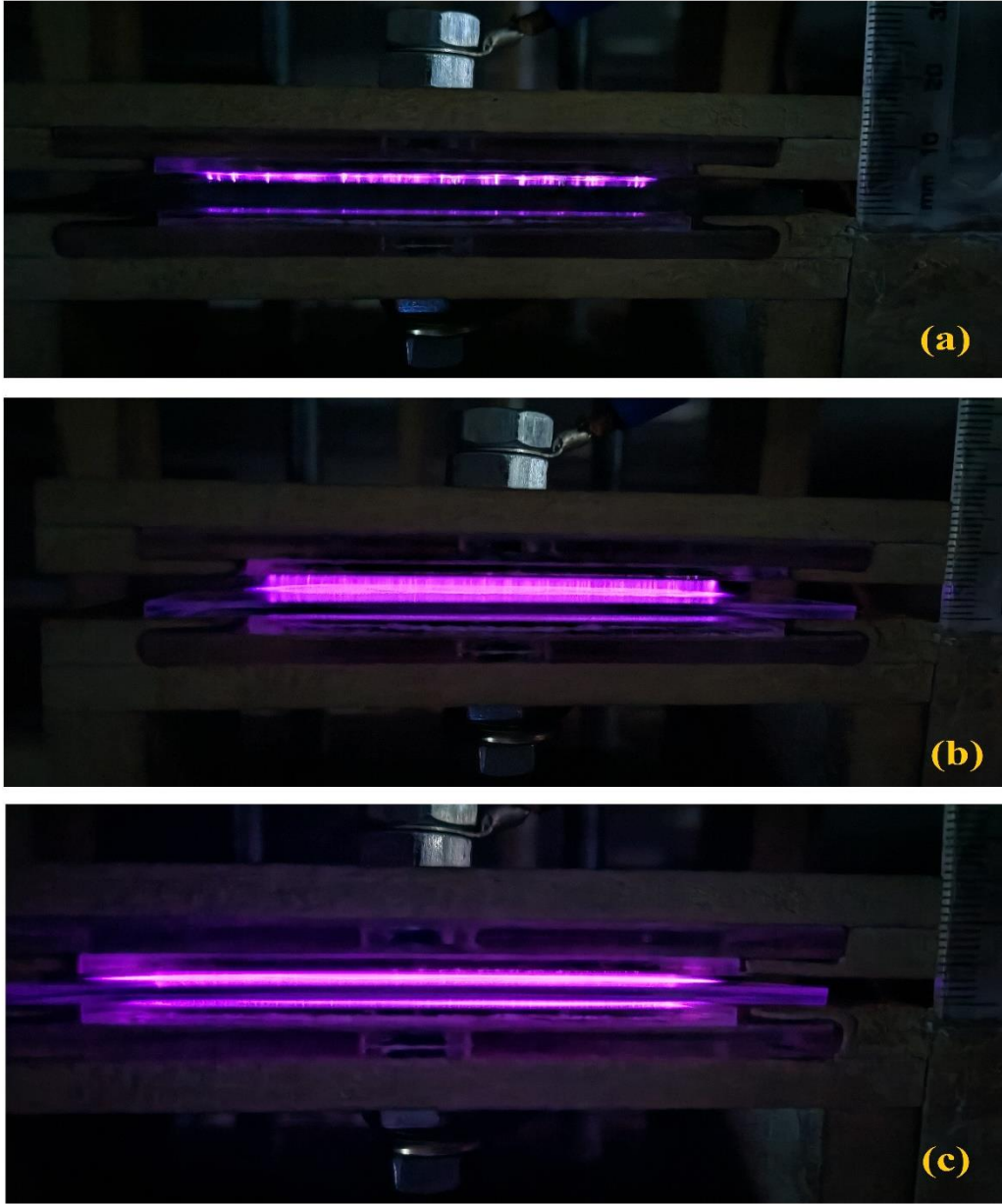
DBD plazmalarında kıvılcım (spark), filament, parıltı (glow) ve flama (streamer) deşarjları oluşur. DBD plazmalarında gözlemlenen deşarj türleri Şekil 3.10'da sunulmuştur. Dielektrik bariyer delinmediği sürece ark deşarjı oluşmaz. Ark oluşumu için plazma içinden akan akımın 1 A ve üzeri değerlerde olması gerekir. DBD plazmalarında ise plazmadan akan akım miliamper seviyelerindedir.



Şekil 3.10. DBD plazmalarında gözlemlenen deşarj türleri: **a)** Kıvılcım (Spark) deşarjı, **b)** Filament deşarjı **c)** Flama (Streamer) deşarjı, **d)** Parıltı (Glow) deşarjı.

Soğuk plazmalarda deşarj karakterizasyonu deşarj modları üzerinden yapılır. DBD plazmalarında filamentli (filamentary) deşarj modu, homojen (homogeneous) deşarj modu ve dağınık (diffuse) deşarj modu olmak üzere 3 deşarj modu oluşabilir. Filamentli deşarj modu, deşarj bölgesinde dağınık ve rastgele oluşan mikro deşarjlardan oluşur. Homojen deşarj modunda ise plazma bir bütün olarak parıltı (glow) deşarjı ile oluşur. Parıltı (glow) deşarjı tüm deşarj bölgesine homojen olarak dağılmıştır. Dağınık deşarj (diffuse discharge) modunda ise filament deşarjları parıltı deşarjı içerisinde oluşur. DBD plazmalarında gözlemlenen deşarj modları Şekil 3.11’de sunulmuştur.

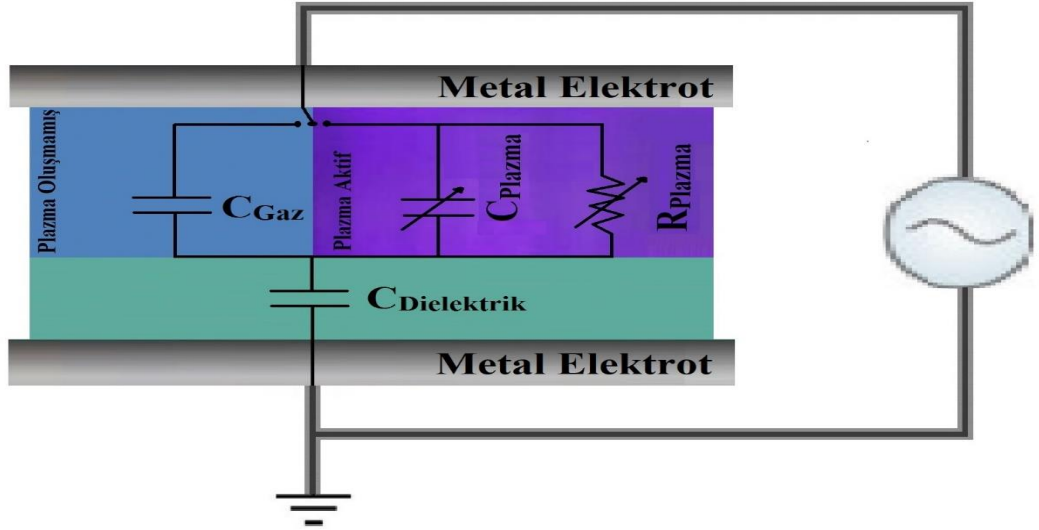




Şekil 3.11. DBD plazmalarının deşarj modları: **a)** Filamentli (Filamentary) deşarj modu, **b)** Dağınık (Diffuse) deşarj modu, **c)** Homojen (Homogeneous) deşarj modu.

3.2.2. DBD Plazmaların elektriksel karakterizasyonu

DBD plazmaları kapasitif bir özellik gösterirler (Manley, T. C., 1943). Tipik bir kapasitör plakalar arasına yerleştirilen dielektrik materyalden oluştuğundan (Westerlund, S. and Ekstam, L., 1994) DBD plazmaların kapasitif özelliği beklenen bir durumdur. Tipik bir DBD sistemi paralel plaka tek dielektrik bariyer HDBD ile temsil edilir. Buna göre DBD plazmalarının elektriksel özelliği Şekil 3.12 ile temsil edilir.



Şekil 3.12. DBD plazmalarının elektriksel eş değer devresi.

DBD reaktöründe plazma oluşmamış ve plazma aktif olmak üzere iki farklı durum için kapasitör etkisi oluşur. Plazma aktif değilken DBD reaktörünün kapasitörü birbirine seri olan kullanılan gazın oluşturulduğu kapasitör ile dielektrik malzemenin oluşturduğu kapasitörden meydana gelir. Kullanılan gaz ve dielektrik malzemenin sığası aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$C_{Gaz} = \varepsilon_{Gaz} \varepsilon_0 \frac{A_{Gaz}}{d_{Gaz}} (F) \quad (3.4)$$

$$C_{Dielektrik} = \varepsilon_{Dielektrik} \varepsilon_0 \frac{A_{Dielektrik}}{d_{Dielektrik}} (F) \quad (3.5)$$

Denklem 3.4 ve denklem 3.5'deki C_{Gaz} kullanılan gaz türünün sığasını (F), ε_{Gaz} kullanılan gaz türünün bağıl dielektrik sabiti, A_{Gaz} gazın temas ettiği elektrot yüzey alanını (m^2), d_{Gaz} gazın doldurduğu deşarj boşluğunun uzunluğunu (m), $C_{Dielektrik}$ kullanılan dielektrik malzemenin sığasını (F), $\varepsilon_{Dielektrik}$ kullanılan dielektrik malzemenin bağıl dielektrik sabitini, $A_{Dielektrik}$ gaz ile temas eden dielektrik malzemenin yüzey alanını (m^2), $d_{Dielektrik}$ kullanılan dielektrik malzemenin kalınlığını (m) ifade etmektedir.

Plazma oluşmamışken DBD reaktörünün sığası ($C_{Reaktör}$) aşağıdaki gibi hesaplanır.

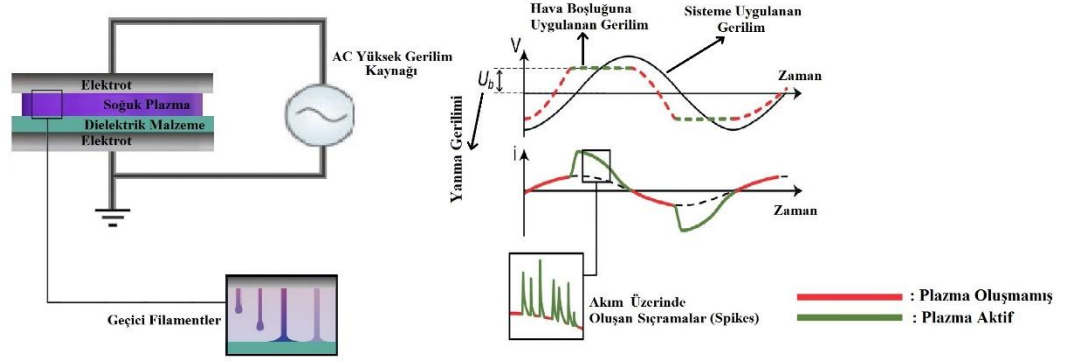
$$\frac{1}{C_{Reaktör}} = \frac{1}{C_{Dielektrik}} + \frac{1}{C_{Gaz}} \quad (3.6)$$

$$C_{Reaktör} = \frac{C_{Dielektrik} \cdot C_{Gaz}}{C_{Dielektrik} + C_{Gaz}} \quad (3.7)$$

DBD plazma üretim yöntemi ile kullanılan elektrot sayısı, dielektrik malzeme sayısı ve deşarj bölgesi sayısı reaktörün kapasitör hesabını değiştirecektir.

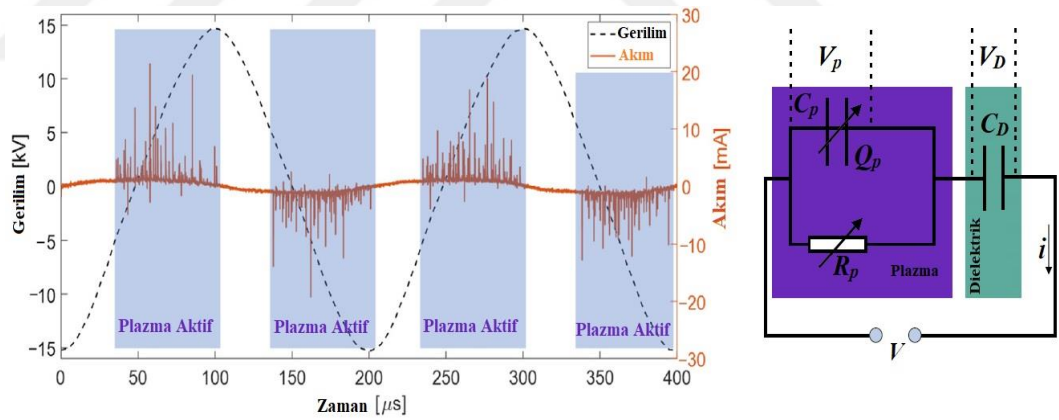
Plazma oluştuktan sonra DBD reaktörünün kapasitörü birbirine seri olan plazmanın oluşturduğu kapasitör ile dielektrik malzemenin oluşturduğu kapasitörden meydana gelir. DBD plazmalarında, plazma değişken kapasiteli kondansatör özelliği gösterip buna ek olarak paralel değişken bir soğuk plazma direnci oluşur (Pipa, A. V., et al., 2012). Pratikte DBD plazması ile oluşan kapasitör sığası ve plazma direncinin hesabı için klasik sığa ve direnç hesaplamaları uygulanamaz. DBD plazması ile oluşan kapasitör sığası ve plazma direnci plakalar arası mesafesin sabit kaldığı durumda plakalara uygulanan gerilim ile değişir.

DBD soğuk plazmaların elektriksel özellikleri plazma gerilimi ve plazma akımı ile belirlenir. Plazmaya uygulanan gerilim oluşturduğu elektrik alan ile plazma içerisindeki tüm parçacıkları etki eder ve herhangi bir bozulmaya uğramaz. Plazmadan akan akım ise yük ve akım taşıyıcıları olan elektronlar ve iyonlar ile bir elektrottan diğerine geçiş yapar. İyon ve elektron hareketliliği plazma içerisinde oluşan mikro deşarjlardan etkilendiğinden plazmada akım akması plazma içerisinde oluşan mikro deşarj ile sağlanır.



Şekil 3.13. HDBD Tek dielektrik bariyer plazmalarında filament oluşumu ile plazmanın akım-gerilim karakteristiği (Peeters, F. and Butterworth, T., 2019).

Plazma içerisindeki mikro deşarjların miktarı ve şiddeti plazmanın doğası gereği rassaldır. Şekil 3.13’de görüleceği gibi rassal oluşan mikro deşarjlar plazma içerisindeki akım dalgası üzerinde sıçramalar (spikes) oluşmasına neden olur. Plazmaya uygulanan gerilim artması ile akım üzerindeki sıçrama miktarı ve şiddeti artar ve akım dalgası üzerinde bozulmalar meydana getirir. Bu durum plazma akımının gözlemlenmesini ve ölçülmesini zorlaştırmaktadır.



Şekil 3.14. DBD reaktöründe plazma aktif iken akım-gerilim karakteristiği ve eşdeğer elektrik devresi (Neretti, G., et al., 2022).

DBD plazmaların kapasitif özelliği ile oluşan mikro deşarjlar yük olarak oluşan kapasitörde depolanır. Bu yaklaşım ile plazma akımı üzerinde oluşan sıçrama ve bozulmalar tolere edilir. Şekil 3.14’deki gibi plazma aktif iken oluşan elektriksel eş değer devresine göre plazmanın oluşturduğu kapasitör yükü aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$C_p = \frac{dQ_p}{dU_p} \quad (3.8)$$

$$dQ_p = C_p dU_p \quad (3.9)$$

Reaktörün toplam yükü (Q):

$$Q(t) = \left(1 - \frac{C_{Reaktör}}{C_{Dielektrik}}\right) Q_p(t) + C_{Reaktör} U(t) \quad (3.10)$$

Sistemden ve plazmadan akan akım (i_p):

$$i = i_p(t) = \frac{1}{1 - \frac{C_{Reaktör}}{C_{Dielektrik}}} \left[\frac{dQ(t)}{dt} - C_{Reaktör} \frac{dU(t)}{dt} \right] \quad (3.11)$$

Plazma gerilimi (U_p):

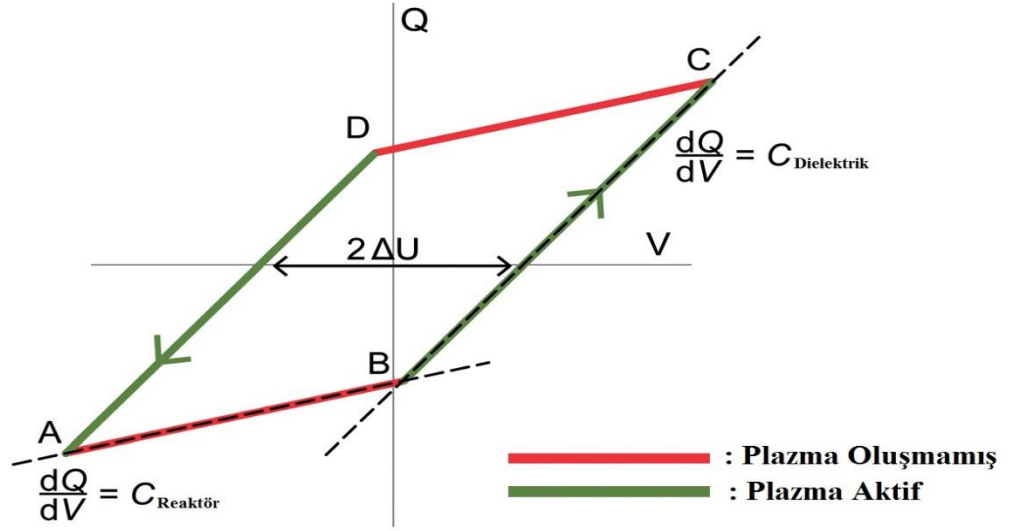
$$U_p(t) = U(t) - U_D(t) \quad (3.12)$$

$$U_p(t) = U(t) - \frac{Q(t)}{C_{Dielektrik}} \quad (3.13)$$

Plazma akımı üzerindeki bozulmalar dolayı ve plazmanın kapasitif özelliğinden DBD plazmaların karakteristiği alternatif olarak yük-gerilim (Q-V) üzerinden yapılmaktadır. Yük-gerilim grafiği, yükün ve gerilimin zamandan bağımsız olarak sadece birbirleri üzerindeki etkilerinden oluştuğundan dolayı Lissajous şekilleri oluşturur. Bu nedenle DBD plazmalarının yük-gerilim grafiği Lissajous grafiği olarak da bilinir. Lissajous grafiklerinin genel kullanım amacı aralarında faz farkı bulunan iki parametrelerin etkilerinin daha rahat gözlenmesidir. DBD plazmalarında elektrotlara gerilim uygulanmasından sonra oluşan deşarjlar ile akım akmaya başladığından plazma akımı ve gerilimi arasında her zaman bir faz farkı oluşacaktır.

İdeal durumda yük-gerilim grafiği paralel kenar şekilde oluşur. İdeal durum için Lissajous grafiği Şekil 3.15'de sunulmuştur. İdeal durumda plazma

oluşmamışken gerilime bağlı yük grafiğinin eğimi reaktörde oluşan kapasitörünün sığasına ve plazma aktifken gerilime bağlı yük grafiğinin eğimi dielektrik malzemenin oluşturduğu kapasitörün sığasına yaklaşık olarak eşittir.



Şekil 3.15. İdeal durumdaki Q-V (Lissajous) grafiği (Peeters, F. and Butterworth, T., 2019).

DBD sisteminin plazma oluşmamış ve plazma aktif durumları yüzünden plazma gücü ortalama güç hesaba ile belirlenir. Ortalama plazma gücü (P) uygulanan gerilimin bir periyodu (T) üzerinden hesaplanır. Buna göre plazma gücü:

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T i_p(t) V_p(t) dt \quad (3.14)$$

Sıçrama ve bozulmalardan dolayı plazma akımının hesaplanması zorlaşabilir bu durumda plazma gücü yük-gerilim hesabı üzerinden daha rahat yapılabilir. Yük-gerilim hesabı üzerinden ortalama plazma gücü aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T C_p \frac{dV_p(t)}{dt} V_p(t) dt \quad (3.15)$$

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_p(t) C_p dV_p(t) \quad (3.16)$$

$$\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_p(t) dQ_p(t) \quad (3.17)$$

DBD sisteminde plazmanın ortalama gücü yük-gerilim grafiği üzerinden de hesaplanabilir. Yük-gerilim grafiğinde oluşan Lissajous şeklinin alanı plazma enerjisine eşittir. Plazma enerjisi uygulanan gerilimin frekansı ile çarpılırsa plazmanın ortalama gücü hesaplanır.

3.3. DBD Plazmaları İçin Ölçüm Yöntemleri

DBD plazmaların etkinliği plazma gücü, elektron sıcaklığı ve elektron yoğunluğu ile belirlenir. Plazma parametreleri ölçmek için Langmuir probu, elektriksel ölçüm yöntemleri, optik emisyon spektrometresi (OES), kütle spektrometresi, Doppler genişlemesi, Stark genişlemesi, absorpsiyon spektroskopisi, lazerle indüklenen floresan (LİF) yöntemi, lazer saçılım yöntemi, Laser Thomson saçılım (LTS) yöntemi, kızılötesi spektroskopisi, mikrodalga interferometresi ve elektron spin rezonans (ESR) spektroskopisi gibi birçok ölçüm yöntemi kullanılmaktadır.

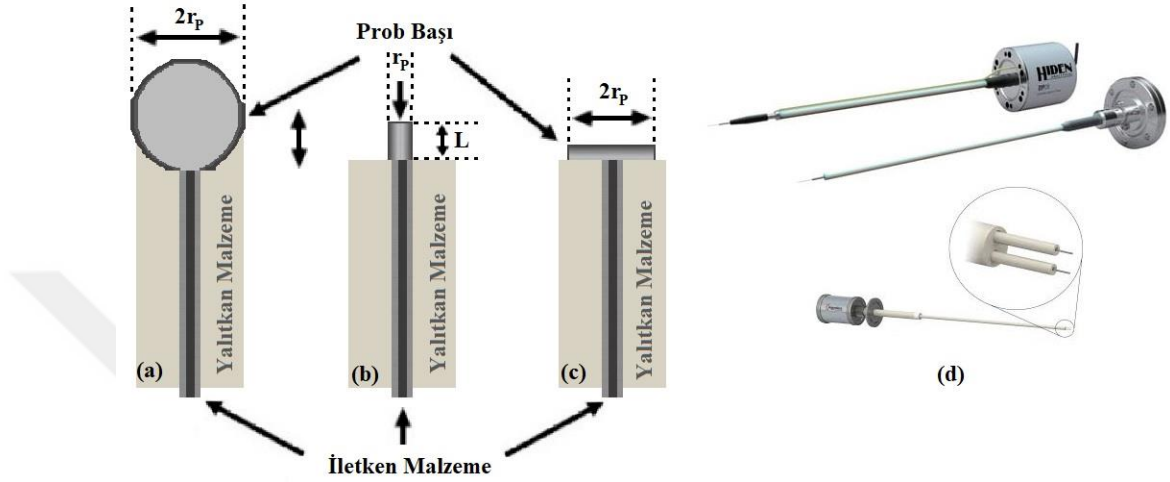
DBD plazmalarının genel olarak küçük hacimlerde olmaları, elektrot geometrisi, kullanılan yüksek frekanstaki yüksek gerilimin oluşturduğu parazit etkiler ölçüm sistemlerinin kullanımı zorlaştırmaktadır. Genel kullanımda DBD plazmaları için Langmuir probu ile direkt ölçüm, elektriksel ölçüm yöntemleri ve optik ölçüm yöntemleri kullanılmaktadır.

3.3.1. Langmuir probu ile direkt ölçüm

Plazmanın keşfini gerçekleştiren ve teorik alt yapısını oluşturan Irving Langmuir plazmanın içerisine yerleştirilen elektrostatik bir prob tasarlayarak plazma ölçümlerini gerçekleştirmiştir. Gelişen teknoloji ile prob tasarım geliştirilmiş ve Irving Langmuir'un adı yaşatmak amacıyla Langmuir probu olarak isimlendirilmiştir.

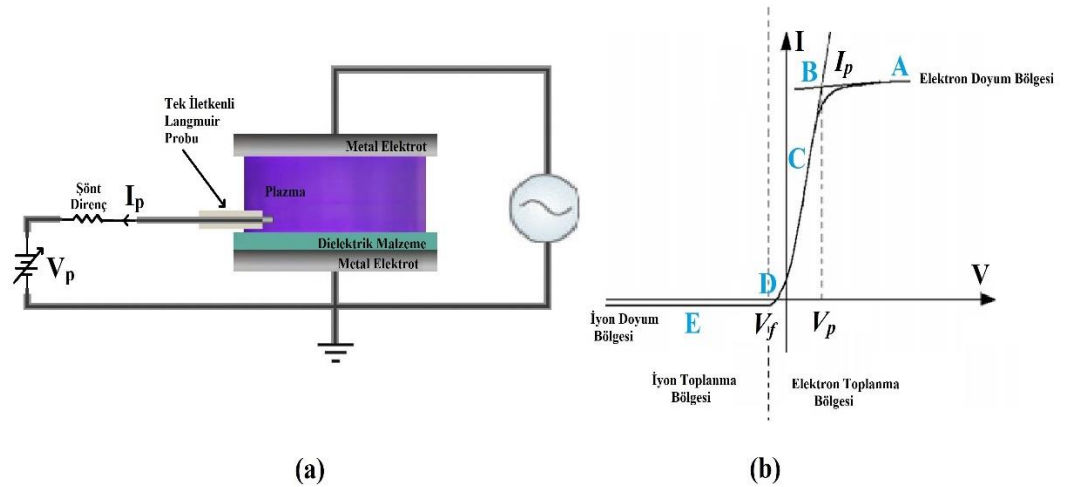
Langmuir probu tungsten veya nikel gibi yüksek sıcaklıktaki bir metalden yapılmış iletken bir tel ve teli çevreleyen genellikle alümina gibi bir seramikten

yapılmış bir yalıtkan malzemeden oluşur. İletken, prob alanını oluşturmak için yalıtkindan bir miktar uzağa genişler. Bu alana prob başlığı denir. Prob başlığı küresel, silindirik veya düzlemsel geometrilere sahip olabilir. Langmuir problearı uygulama amacına göre tek iletken, çift iletken veya 3 iletken ile oluşturulabilir. Langmuir problearına ait görsel Şekil 3.16’da sunulmuştur.



Şekil 3.16. Langmuir prob türleri: **a)** r_p yarıçaplı küresel başlıklı Langmuir probu, **b)** r_p yarıçaplı ve L uzunluklu silindirik başlıklı Langmuir probu, **c)** $2r_p$ genişliğe sahip düzlemsel başlıklı Langmuir probu, **d)** Piyasadaki Langmuir probu türleri.

Langmuir problearı ile soğuk plazmalarının elektron yoğunluğu, elektron sıcaklığı, iyon yoğunluğu, plazma potansiyeli, kayma potansiyeli ve bazı uygulamalar için elektron enerji dağılım fonksiyonu hesaplanabilir.



Şekil 3.17. Tipik bir Langmuir probunun **a)** Elektriksel eşdeğer devresi, **b)** I-V Karakteristiği.

Langmuir problemleri plazma ile fiziksel olarak temas ettiklerinden yalıtkan malzemelerine zarar vermeyen ve prob başlık yüzeyinde aşındırma oluşturmaya soğuk plazmalar için kullanılabilir. Şekil 3.17'de görüldüğü gibi prob başlığı tamamen plazma içerisinde olup fiziksel olarak prob ile temas etmelidir. Bu durumda Langmuir probunun başlık yüzeyinde içinde çarpışmaların meydana gelmediği bir plazma kılıfı oluşturur. Prob başlığının yarı çapı r_p elektronların ortalama serbest mesafesinden (λ_n) çok küçük olmalıdır ($r_p \ll \lambda_n$) ki bu durumda plazma kafesindeki Debye uzunluğu elektronların ortalama mesafesinden düşük ($\lambda_D \ll \lambda_n$) olur. Bu sayede oluşacak kılıf içinde parçacık çarpışmaları meydana gelmez ve prob plazmayı bozucu bir etki yapmadan ve plazma etkilerinden zarar görmeden bir ölçüm yapılabilir.

Plazma içerisindeki Langmuir probuna pozitif, toprak ve negatif polaritelerine sahip değişken gerilim kaynağı ile gerilimler uygulanır. Plazma ile prob gerilimi arasındaki potansiyel fark elektronları veya iyonların prob başlığının yüzeyinde toplanmasına neden olur. Bu sayede başlık yüzeyi üzerinden proba doğru bir akım akar. Bu sayede Şekil 3.17b'de görüldüğü gibi Langmuir probunun akım-gerilim karakteristik eğrisi elde edilir. Prob akımı (I_{prob}) elektron yük taşıyıcıların sağladığı akım (I_e) ile iyon yük taşıyıcıların sağladığı akım (I_i) farkı ile hesaplanır.

$$I_{prob} = I_e - I_i \quad (3.18)$$

Şekil 3.17b'deki prob I-V karakteristik eğrisi incelendiğinde A, B, C, D ve E ile etiketlenmiş eğri üzerinde farklılaşmanın başladığı bölgeler görülecektir. Bu bölgeler Langmuir probuna uygulanan gerilim ile belirlenmektedir. Grafikte I_p plazma akımını, V_p plazma gerilimini ve V_f kayma gerilimini temsil etmektedir. V_f kayma gerilimi, elektron yük taşıyıcıların sağladığı akım (I_e) ile iyon yük taşıyıcıların sağladığı akımın (I_i) eşit olduğu dolayısı ile prob akımı (I_{prob}) sıfır olduğu gerilim değeridir. V_f kayma gerilimi negatif bir değerde olup prob başlığının yüzeyinde oluşan kılıfın plazma duvarı gerilimine eşit olur. Buna göre Langmuir probuna V_f kayma geriliminden mutlak olarak daha büyük bir gerilim uygulandığından prob başlığının yüzeyine elektronlar çekilip, iyonlar itilir. Grafikte bu bölge BCD arasındadır. Eğer daha fazla gerilim uygulanmaya devam

edilirse bir noktadan sonra prob başlığı yüzeyine daha fazla elektron çekilemez ve akan akım yaklaşık olarak sabit bir değer alır. Bu bölge grafikte AB arasında olup bu bölgeye elektron doyum bölgesi denir. Langmuir probuna V_f kayma geriliminden mutlak olarak daha küçük bir gerilim uygulandığından prob başlığının yüzeyine iyonlar çekilip, elektronlar itilir. Grafikte bu bölge DE arasındadır. Bu bölgede prob başlığı yüzeyine daha fazla iyon çekilemez ve akan akım yaklaşık olarak sabit bir değer alır. Bu bölgeye iyon doyum bölgesi denir. Grafikteki BCD bölgesinde elektron yük taşıyıcıların sağladığı akım (I_e) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$I_e = I_{e0} e^{-\frac{eV}{k_B T_e}} \quad (3.19)$$

$$I_{e0} = -An_e e \sqrt{\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}} \quad (3.20)$$

Denklemdaki A Langmuir probu başlığının yüzey alanını (m^2) temsil etmektedir. I_{e0} Akımı elektron doyum bölgesinde akan akımdır. Grafikteki B noktasında oluşur ve plazma akımına (I_p) eşit olur. Langmuir probuna uygulanan gerilim plazma gerilimine (V_p) eşit olduğu noktada bu akım elde edilir. I_e Akımı yaklaşık olarak aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

$$I_e \approx \frac{An_e e}{4} \sqrt{\frac{8k_B T_e}{\pi m_e}} e^{-\frac{e(V_f - V_p)}{k_B T_e}} \quad (3.21)$$

Plazma içerisindeki parametreler prob başlığındaki akım yoğunluğundan etkilenir. Bu nedenle plazma parametreleri akım yoğunluğu üzerinde verilir. Grafikteki BCD bölgesinde elektron yük taşıyıcıların sağladığı akım yoğunluğu (J_e) aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$J_e = J_{e0} e^{-\frac{eV}{k_B T_e}} \quad (3.22)$$

$$J_{e0} = -n_e e \sqrt{\frac{k_B T_e}{2\pi m_e}} \quad (3.23)$$

$$J_p = J_{e0} e^{-\frac{eV}{k_B T_e}} - J_i \quad (3.24)$$

Denklem 3.24'deki J_{e0} elektron doyum bölgesindeki akım yoğunluğudur. J_p Langmuir probunun akım yoğunluğunu, J_i iyon yük taşıyıcıların sağladığı akım yoğunluğunu temsil etmektedir. Denklemler tekrardan düzenlendiğinde plazmanın elektron yoğunluğu ve elektron sıcaklığı aşağıdaki denklemler ile hesaplanır.

$$n_e = -\frac{J_{e0}}{e} \sqrt{\frac{2\pi m_e}{k_B T_e}} \quad (3.25)$$

$$T_e = -\frac{e}{k_B} \left[\frac{1}{\frac{d(\ln(J_p - J_i))}{dV}} \right] \quad (3.26)$$

Birçok soğuk plazma uygulamaları için Langmuir probu ile direkt ölçüm almak pratik bir yöntemdir. Uzun yıllardan beri plazma ölçümleri için kullanılmaktadır. Langmuir probu kullanımının dezavantajları ölçümlerinin karmaşık olması, plazmaya fiziksel olarak temas ettiği için gerekli koşulların oluşturulmaması ile hatalı sonuçlar alınabilir. Prob başlığı temiz tutulmalıdır. Yüzeydeki bir pürüzlülük ölçüm hatalarına sebep olur. Plazma gücü ve yoğunluğu beklenenin üzerinde olursa bu durum Langmuir probuna bir zarar verebilir.

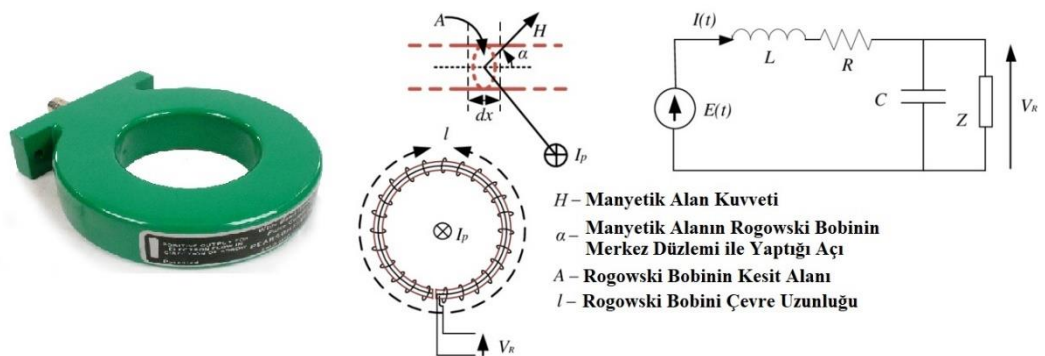
3.3.2. DBD plazmalarının elektriksel ölçüm yöntemleri

DBD uygulamaları genel olarak yüksek gerilim trafoları kullanılarak üretilir. Yüksek gerilim kullanımından dolayı oluşabilecek riskleri gidermek için gerekli yüksek gerilim kullanım tedbirlerinin alınması gerekmektedir. Yüksek frekansta yüksek AA gerilimler etkin mesafelerinde bulunan ekipman ve ölçüm cihazları üzerinde indükleme yapabilir. Bu durum parazit etkiler yaratıp ölçüm sonuçlarını etkiler ve ekipmanların zarar görmesine neden olabilir. Cihaz ve ekipmanlarının

yüksek gerilim kullanımına uygun olması ve yüksek gerilimin trafolarının topraklama yapılarak kullanılması bu etkileri minimuma indirir. Yüksek gerilim trafolarının topraklaması yapılırken kuplaj etkisi hesaba katılmalı ve trafonun sekonder kısmında nötr taraf topraklanmalıdır. Yüksek gerilimin bias ya da faz-nötr arası kullanımının gerektiği durumlarda elektriksel ölçümün diferansiyel probalar ile gerilim farkı ölçülerek alınması daha uygun olacaktır.

Yüksek gerilim trafoları ile DBD uygulamaları kilovolt seviyelerde gerilim uygulanması ile gerçekleşir. Uygulamalarda DBD reaktörünün gerilimi 1:1000 dönüştürme oranına sahip yüksek gerilim probu kullanılarak osiloskop ile ölçülebilir. Yüksek gerilimin ölçümünü daha rahat yapabilmek için bazı uygulamalarda gerilim bölücü olarak yüksek gerilime uygun direnç ve/veya kondansatör kullanılmaktadır.

Plazma akımının ölçümü ise akım üzerinden oluşan bozulmalardan dolayı çok zordur. DBD plazmalarında plazma akımı miliamper seviyelerinde oluşmaktadır. Yüksek gerilimde çok düşük seviyedeki akım ölçümü ve akım üzerindeki bozulmaları da dikkatte alabilecek bir ölçüm alınması gerekir. Plazma akımının ölçümündeki bu zorlukları aşmak için uygulamalarda iki farklı yöntem kullanılmaktadır. Birinci yöntemde plazma akımının anlık ölçümü yüksek gerilim ve akım değerlerine uygun akım probu veya Rogowski bobini ile ölçülebilir. Rogowski bobini ve iç yapısı Şekil 3.18’de sunulmuştur.



Şekil 3.18. Rogowski bobini ve iç yapısı (Pathirana, A., et al., 2012).

Rogowski bobini kablosuz bir akım monitörü olup ölçüm yapılacak kablo veya sistem bobininin içinde olacak şekilde yerleştirilir. Kabloda oluşan manyetik alan ölçülerek kablodan geçen akım gözlemlenir. Rogowski bobini akım transformatörü olarak kablodan geçen akımı ölçer. Buna göre:

$$V(t) = L \frac{di}{dt} + i(r + R) \quad (3.27)$$

Rogowski bobini iç direnci r ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Ölçülen akımın açısal frekansına bağlı olarak bobin endüktansından küçük bir direnç oluşturulur ($r + R \ll \omega L$) ise bobinde indüklenen gerilim manyetik akı yoğunluğuna (ϕ) bağlı olur. Buna göre:

$$V(t) = L \frac{di}{dt} = \frac{d\phi}{dt} \quad (3.28)$$

Rogowski bobininde akan akım:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int_0^t V(t) dt = \frac{\phi}{L} \quad (3.29)$$

N sarımlı bir Rogowski bobininde oluşan manyetik akı yoğunluğu:

$$\phi = \frac{\mu_0 N A i(t)}{2\pi \alpha R} \quad (3.30)$$

Rogowski bobin akım transformatörü olarak çalıştığında frekans tepkisi, bobinin çevre uzunluğu (l) boyunca akan gerilim sinyalinin geçiş süresi ile sınırlıdır. Bobinin birim uzunluğuna düşen endüktansı (L/l) ve birim başına düşen kapasitansı (C/l) Rogowski bobinin üst geçiş süresi sınırını ve üst frekans sınırını belirler. Buna göre:

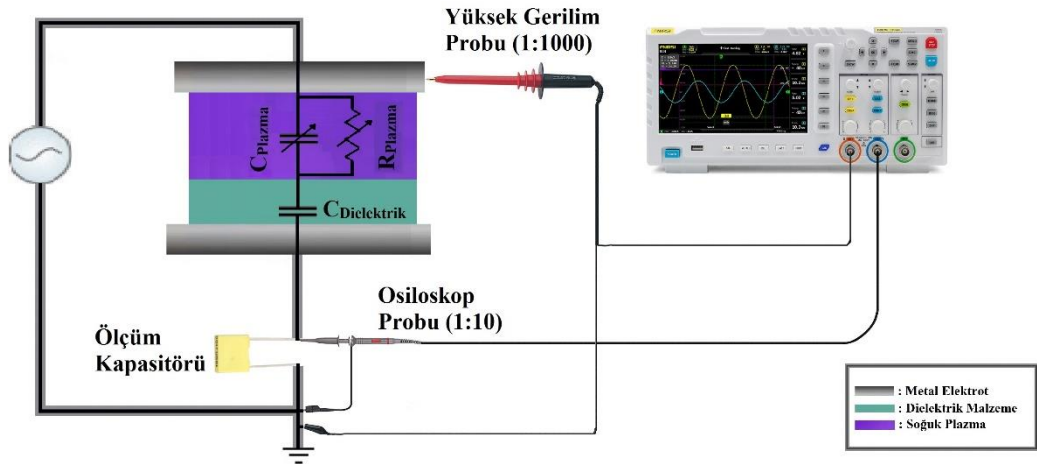
$$\tau = \sqrt{\frac{LC}{l^2}} 2\pi \alpha \quad (3.31)$$

$$f = \frac{1}{\tau} \quad (3.32)$$

Rogowski bobin alt frekans sınırı $R \ll \omega L$ koşulluna göre belirlenir. Buna göre:

$$f > \frac{R}{L} \quad (3.33)$$

Rogowski bobin pratik bir ölçüm yöntemi olsa da maliyetleri ve temin edilmeleri zor olabilir. Ek olarak plazmada meydana gelen deşarj sürelerini gözlemleyebilecek bir geçiş süresine sahip çok hassas bir yapıda üretilmesi gerekir. Bu nedenle plazma akımı alternatif olarak ikinci yöntem olan ölçüm kapasitörü yöntemi ile ölçülür. Ölçüm kapasitörü yönteminde plazma akımı sisteme bağlı seri bir kapasitör ile sürekli olarak değil dolaylı olarak ölçülür.



Şekil 3.19. Ölçüm kapasitörü ile plazma parametrelerinin ölçümü.

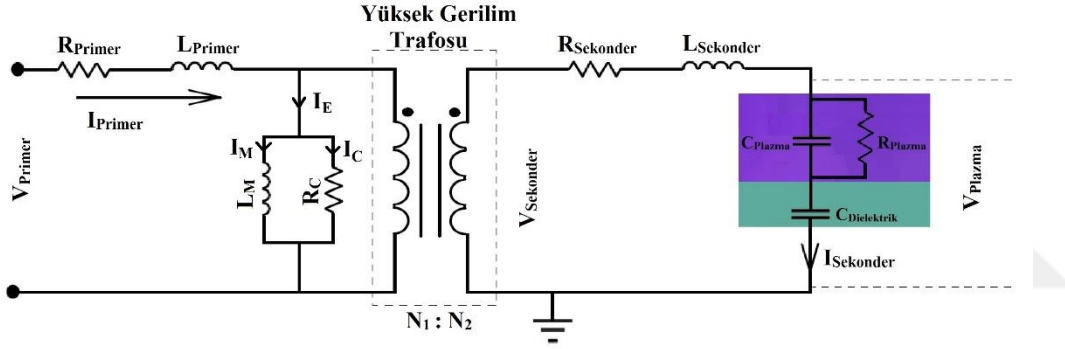
Şekil 3.19’da görüleceği gibi sisteme seri bağlanan ölçüm kapasitörünün gerilimi 1:10 osiloskop probu ile ölçülür. Ölçüm kapasitörü yeterli bir kapasiteye sahipse plazma akımı, akım üzerinde oluşan bozulmalarından olumsuz etkilenmeden yük depolar. Ölçüm kapasitöründeki yük denklemi:

$$Q(t) = C_{ölç} \cdot U_{ölç}(t) \quad (3.34)$$

Denklem 3.34'deki $C_{ölç.}$ ölçüm kapasitörünü sığasını (F), $U_{ölç.}$ ölçüm kapasitörünün gerilimini temsil etmektedir. Ölçüm kapasitörü sisteme seri bağlandığından ölçüm kapasitöründen akan akım plazma akımına eşit olur. Buna göre plazma akımı:

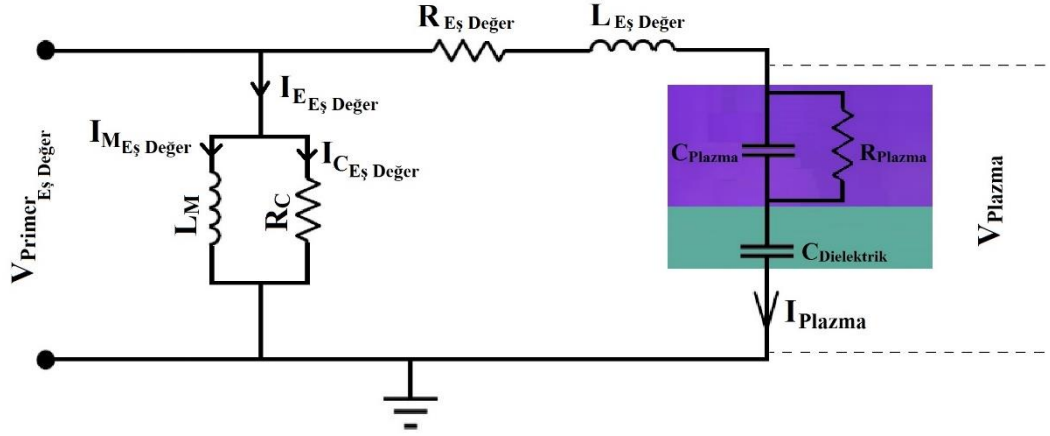
$$i_p = i_{ölç.} = \frac{dQ(t)}{dt} = C_{ölç.} \frac{dU_{ölç.}(t)}{dt} \quad (3.35)$$

Yüksek gerilim trafosu ile DBD plazması oluşturulduğunda trafonun indüktif etkisi ve plazmanın kapasitif etkisi ile seri bir RLC devresi oluşur. Sistemin elektriksel eş değer devresi Şekil 3.20'de sunulmuştur. Oluşan RLC sisteminde plazma gerilimi ile plazma akımı arasında bir faz farkı oluşur.



Şekil 3.20. Yüksek gerilim trafosu ile oluşturulan DBD plazmasının eşdeğer elektrik devresi.

Oluşan yüksek gerilim trafolu DBD plazma eşdeğer devresinin ölçümünü kolaylaştırmak için sistem indirgenerek birim sistem dönüşümü yapılabilir. Buna göre indirgenmiş yüksek gerilim trafolu DBD plazma eşdeğer devresinin Şekil 3.21'deki gibi olur.



Şekil 3.21. İndirgenmiş yüksek gerilim trafolu DBD plazma eşdeğer devresi.

Mıknatıslanma (mutual) indüktansı L_m değerinin empedansı daha baskın olduğundan hesaplamalarda R_c değeri ihmal edilebilir. Trafonun $R_{Eş}$ Değer, $L_{Eş}$ Değer ve L_m değerleri bir LCR metre ile ölçülebilir. Plazma akımını üzerindeki bozulmalar nedeni ile plazma akımının eş değer devre üzerinden teorik olarak çözümü çok karmaşık ve zordur. Bu neden ile plazma gerilimi ve plazma akımı Rogowski bobini veya ölçüm kapasitörü ile ölçülür. Plazma gücü akım ve gerilim ölçümleri ile hesaplanır. Buna göre plazma gücü:

$$P_p(t) = I_p(t)U_p(t) dt \quad (3.36)$$

DBD plazmalarında plazma oluşmamış ve plazma aktif bölgelerinin varlığı nedeniyle ortalama plazma gücü üzerinden hesaplamalar yapılır. Buna göre ortalama plazma gücü:

$$\langle P_p(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T I_p(t)U_p(t) dt \quad (3.37)$$

DBD sisteminde ölçüm kapasitörü kullanıldığında plazma akımı seri bağlandığı için ölçüm kapasitörünün akıma eşit olur. Bu durumda ortalama plazma gücü aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\langle P_p(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T U_p(t)C_{ölç.} \frac{dU_{ölç.}(t)}{dt} dt \quad (3.38)$$

$$\langle P_P(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T U_p(t) C_{ölç.} dU_{ölç.}(t) \quad (3.39)$$

$$\langle P_P(t) \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T U_p(t) dQ_{ölç.}(t) \quad (3.40)$$

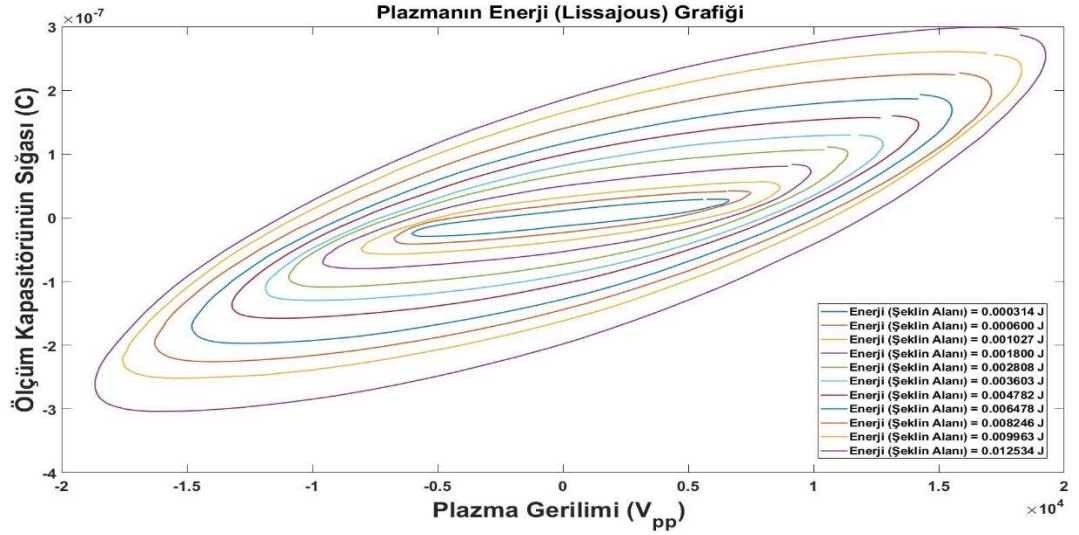
Ölçüm kapasitöründe biriken yük ($Q_{ölç.}$) kapasitör sığasına bağlı olarak değiştiğinden ölçüm kapasitörünün seçimi önemlidir. Plazmanın gücü ölçüm kapasitörüne bağlı değildir ancak ölçüm için ölçüm kapasitörünün plazma gücü etkilemeyecek bir sığaya sahip olması gerekir.

Ölçüm kapasitörün seçimi yapılırken plazma oluşmamışken DBD reaktörünün sığasından ($C_{Reaktör}$) çok büyük değerler ($C_{ölç.} \gg C_{Reaktör}$) seçilir. Genel yaklaşım $C_{Reaktör}/C_{ölç.}$ için 1/100 ile 1/10000 arasında bir değer seçimidir (Peeters, F. and Butterworth, T., 2019). Ölçüm kapasitörünün kapasitesi ölçüm kapasitörü üzerine düşen gerilimi de belirler.

$$U_{ölç.}(t) = U(t) \frac{C_{Reaktör}}{C_{ölç.}} \quad (3.41)$$

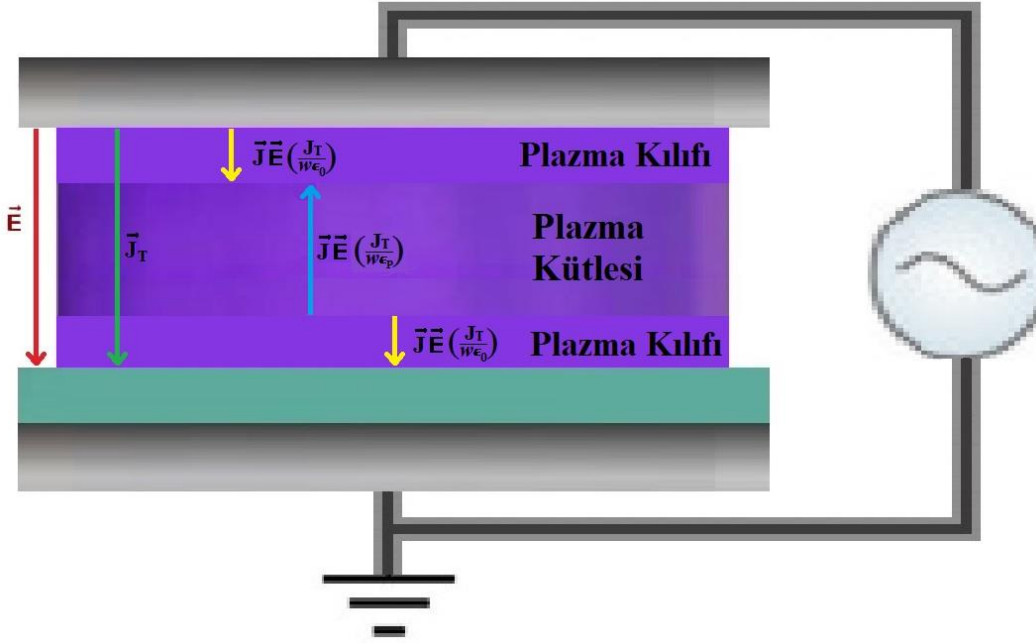
DBD uygulamalarında reaktöre genellikle yüksek gerilim trafosu ile kV'luk AA gerilimler uygulanmaktadır. Osiloskop ekranında maksimum 20 V gözlenebildiği ve osiloskop probunun 1/10 dönüşüm oranı ile 200 V gerilim ölçebildiği hesaba katılarak $C_{Reaktör}/C_{ölç.}$ oranının belirlenmesi ölçüm kapasitörünün gerilimin gözlenmesi ve ölçülmesini daha rahat hale getirir.

DBD sisteminde ölçüm kapasitörü kullanıldığında ölçüm kapasitörü yükü ile plazma gerilimi Şekil 3.22'de görüldüğü gibi bir Lissajous grafiği oluşturur. Oluşan Lissajous şeklinin alanı plazma enerjisine eşit olur. Plazma gerilimin frekansı ile Lissajous şeklinin alanı çarpılırsa plazma gücü hesaplanır. Bu yöntem Lissajous yöntemi olarak bilinir.



Şekil 3.22. Ölçüm kapasitörü ile plazma gerilimi arasında oluşan Lissajous (Q-V) grafiği.

Elektrotlara gerekli yüksek gerilim uygulandığında dielektrik malzeme veya metal elektrot yüzeylerinde bir plazma kılıfı oluşur. Oluşan elektrik alan nedeni ile dielektrik malzeme veya metal elektrot yüzeyinde elektron-iyon çiftinin oluşur. Plazma akımı elektron-iyon çiftinin oluşumu ile elektrot yüzeyinden plazma kılıfına aktarılır. Elektron ve iyon çarpışmaları ile plazma içerisinde geçip kullanılan diğer elektrot yüzeyindeki plazma kılıfına akım taşıyıcıları ile iletilir. Diğer elektrot yüzeyindeki plazma kılıfında ise elektrot hareketliliği ile metal elektrot yüzeyine iletilir. Elektrot yüzey alanı oluşan elektron-iyon çifti miktarını ve elektron akım taşıyıcı miktarını etkilediğinden plazma akımını etkiler. Bu nedenle plazma akımını akım yoğunluğu ile ifade etmek daha uygun olur. Şekil 3.23’de plazma içerisindeki bölgelere göre akım yoğunluğunun ve elektrik alanın genliği ve dağılımı verilmiştir.



Şekil 3.23. DBD Plazmalarında akım yoğunluğu ve elektrik alan genliği ve dağılımı.

Plazma akımı elektron ve iyon çarpışmaları ve hareketliliği ile plazma içerisinde geçip elektrotlar arasında bir kayıp olmadan akar (Subedi, D. P., Joshi, U. M. and Wong, C. S., 2017). Bu nedenle elektrotlara verilen elektrik enerjisinin elektron ve iyon kinetik enerji toplamlarına eşit olması beklenir. Bu durum enerji dengesi olarak bilinir. Termal denge için düşünüldüğünde plazmanın sistemden çektiği güç plazmanın ısıtılmasına aktarılır. Plazma sıcaklığı parçacık hareketliliğine neden olduğundan parçacıkların kinetik enerjilerine eşit olur. Bu durum omik ısıtma olarak bilinir. Atmosferik basınçta ve oda sıcaklığında DBD uygulamalarında plazma içerisinde omik ısıtma hakimdir. Plazmanın bir hacim başına sistemden çektiği ortalama güç aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$P_{\zeta} = \frac{1}{T} \int_0^T J_T(t) E(t) dt \quad (3.42)$$

Enerji dengesine göre elektrotlara uygulanan elektriksel enerji parçacıkların kinetik enerjisine aktarılır. Bu durum plazma kılıfı içinde geçerlidir. Plazma kılıfında elektron-iyon çifti oluşumu için gereken enerji elektrot yüzeyinde harcanan enerjiye eşit olmalıdır. Elektrot yüzeyinde harcanan enerji elektron yüzeyinde oluşan elektrik alan ile elektron hareketliliğinden kaynaklanır. Plazma

kılıfında elektron-iyon çiftinin oluşumu için gereken enerji 3 farklı şekilde kategorize edilen enerjilerin toplamı ile sağlanır. Bunlar elektron-iyon çarpışma enerjisi ($\mathcal{E}_\zeta$), elektron kinetik enerjisi ($\mathcal{E}_e$) ve iyon kinetik enerjisidir ($\mathcal{E}_i$). Buna göre elektron-iyon çiftinin oluşması için toplam enerji ($\mathcal{E}_T$):

$$\mathcal{E}_T = \mathcal{E}_\zeta + \mathcal{E}_e + \mathcal{E}_i \quad (3.43)$$

Plazma uygulamalarının tümünde olduğu gibi elektron-iyon çiftinin oluşması için gereken enerji eV cinsinden ifade edilir. Elektron-iyon çarpışma enerjisi elektron sıcaklığına bağlı olarak değişir ve elektron-iyon çifti için gerekli enerjinin büyük kısmını kapsar. Elektron hızı Maxwell dağılıma bağlı olduğundan elektron sıcaklığına göre ortalama elektron kinetik enerjisi $\mathcal{E}_e \approx 2T_e$ olarak alınabilir. İyonların kinetik enerjisi ise elektron sıcaklığı ile plazma kılıfının gerilimine ($V_{Kılıf}$) bağlı olarak değişir. İyonların kinetik enerjisi $\mathcal{E}_T = V_{Kılıf} + \frac{1}{2} T_e$ olarak hesaplanır. Elektron sıcaklığı kullanılan gaz türü ve ortam sıcaklığına bağlı olarak değişir. Genel olarak soğuk plazmalarda elektron sıcaklığı (T_e) 2 eV ile 5 eV arasında bir değer alır (Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J., 2005).

Elektron-iyon oluşumu için harcanan enerji sistemin kayıp enerjisi ($\mathcal{E}_{Kayıp}$) olarak da isimlendirilmektedir. Plazma kılıfında elektron yüzeyinden çekilen toplam enerji elektron-iyon çifti oluşturmak için sistemin kaybettiği enerjiye eşit olmalıdır. Elektrot yüzeyinde birim zamanda kaybedilen enerji plazma gücüne eşit olduğundan plazmadan çekilen güç elektron-iyon oluşumu için harcama güce eşit olmalıdır. Buna göre:

$$P_\zeta = \frac{1}{T} \int_0^T J_T(t) E(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T en_e v_D(t) A_{Ef} \mathcal{E}_T dt \quad (3.44)$$

Denklem 3.44'deki A_{Ef} , efektif elektrot yüzey alanı olup plazma ile temas eden toplam elektrot alanını simgeler. Sistemden çekilen güç plazmanın oluşmadığı ve aktif olduğu durumlarından dolayı ortalama plazma gücüne eşit olur. Plazma kılıfında temel akım taşıyıcıları iyonlardır. Kılıf içinde iyonların sürüklenme hızı kılıfı boyunca hareket ettiği sürede Bohm kılıf kriterine göre

Bohm hızına (v_B) erişir (Riemann, K-U, 1991). Güç denklemi yeniden düzenlenirse:

$$P_{Ort.} = en_e v_B A_{Ef.} \mathcal{E}_T \quad (3.45)$$

Bu denklem plazmalar için güç dengesi denklemi olarak bilir (Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J., 2005). Güç dengesi yöntemine göre plazma elektron yoğunluğu denklem 3.46'daki gibi hesaplanabilir.

$$n_e = \frac{P_{Ort.}}{e v_B A_{Ef.} \mathcal{E}_T} \quad (3.46)$$

Plazma ortalama gücü plazma akımının Rogowski bobini ölçümü ile, ölçüm kapasitörü ile ya da Lissajous yöntemi ile elektriksel olarak hesaplanabilir.

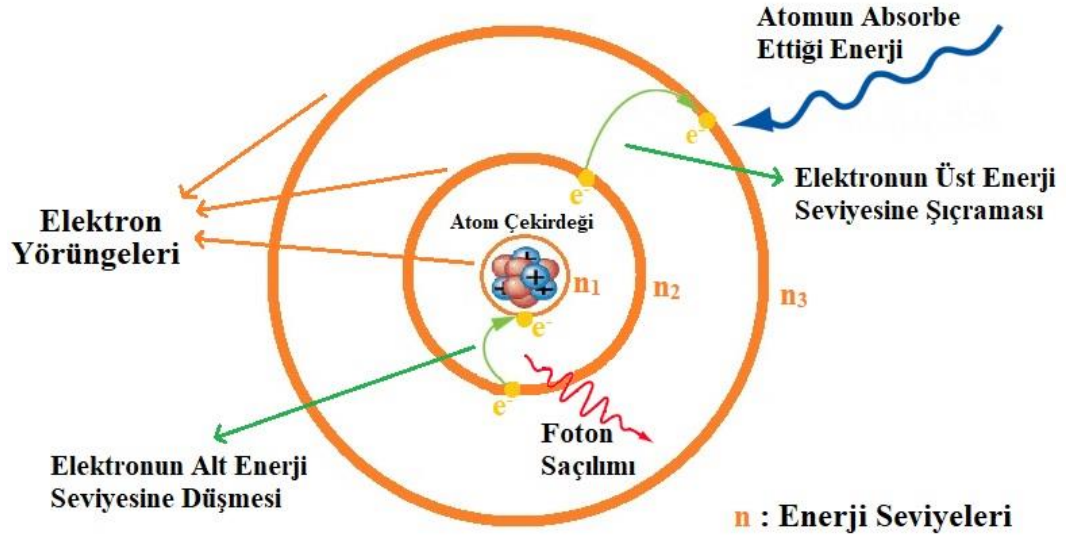
3.3.3. DBD plazmalarının optik ölçüm yöntemleri

Atom ve moleküller dış bir etken ile enerjilendirildiklerinde bu enerjiyi yayarak eski konumuna dönme eğilimindedirler. Enerji uygulandığında atom veya molekülün son görüngesindeki elektronlar bir üst enerji seviyesine çıkar. Uygulanan etkinin enerjisi azaldığında üst enerji seviyesindeki elektronlar daha alt bir enerji seviyesine iner. Uygulanan etki kaybolduğunda ise elektronlar uyarılmadan önceki enerji seviyesine döner. Enerji seviyelerindeki düşüşler sırasında atom ve moleküller foton saçarak enerji yayarlar. Foton saçılımı için atom ve moleküllere elektronlarını son yörüngelerinden koparacak yani iyonlaşmasına neden olacak enerji seviyesinin altında bir enerji uygulanmalıdır. Şekil 3.24'de atomun foton saçılım mekanizması sunulmuştur.

Saçılan foton dalga boyu (λ_F) aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

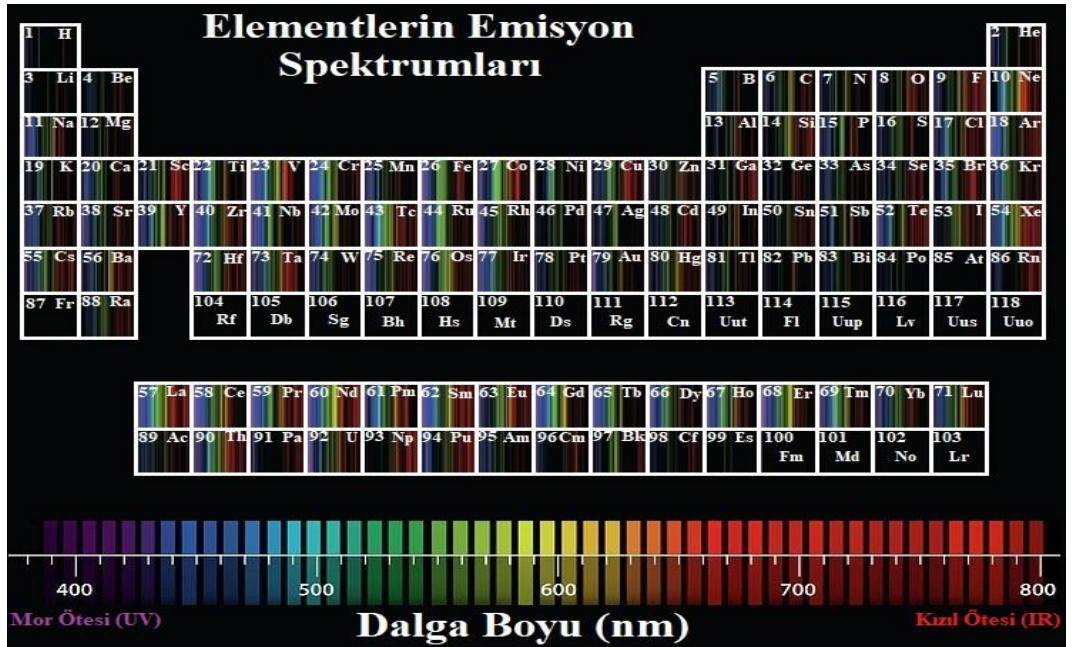
$$\lambda_F = \frac{hc}{\mathcal{E}_{n+1} - \mathcal{E}_n} \quad (3.47)$$

Denklem 3.47'deki $\mathcal{E}_n$ elektronun bulunduğu bölgedeki enerji seviyesini, $\mathcal{E}_{n+1}$ elektronun sıçradığı bir üst bölgedeki enerji seviyesini ifade etmektedir.



Şekil 3.24. Atomdan foton saçılımı.

Her atom ve molekül türünün yaydığı fotonlarının karakteristik bir dalga boyu ve yoğunluğu vardır. Fotonlar dalga boyuna ve sahip oldukları enerji miktarına göre farklı renklere sahip olur. Şekil 3.25’de elementlerin yaydığı fotonların renklerine göre ayrıldığı spektrometre ve fotonların renklerine göre sahip oldukları dalga boyu spektrumu verilmiştir.



Şekil 3.25. Elementlerin emisyon spektrumları.

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{I_1/I_2}{I_3/I_4} = \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \left(\frac{g_1}{g_2}\right) \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \left(\frac{A_4}{A_3}\right) \left(\frac{g_4}{g_3}\right) \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_4}\right) e^{-\frac{E_1-E_2-E_3+E_4}{k_B T_e}} \quad (3.48)$$

$$T_e = \frac{E_1 - E_2 - E_3 + E_4}{k_B \ln \left[\left(\frac{I_2}{I_1}\right) \left(\frac{I_3}{I_4}\right) \left(\frac{A_1}{A_2}\right) \left(\frac{g_1}{g_2}\right) \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \left(\frac{A_4}{A_3}\right) \left(\frac{g_4}{g_3}\right) \left(\frac{\lambda_3}{\lambda_4}\right) \right]} \quad (3.49)$$

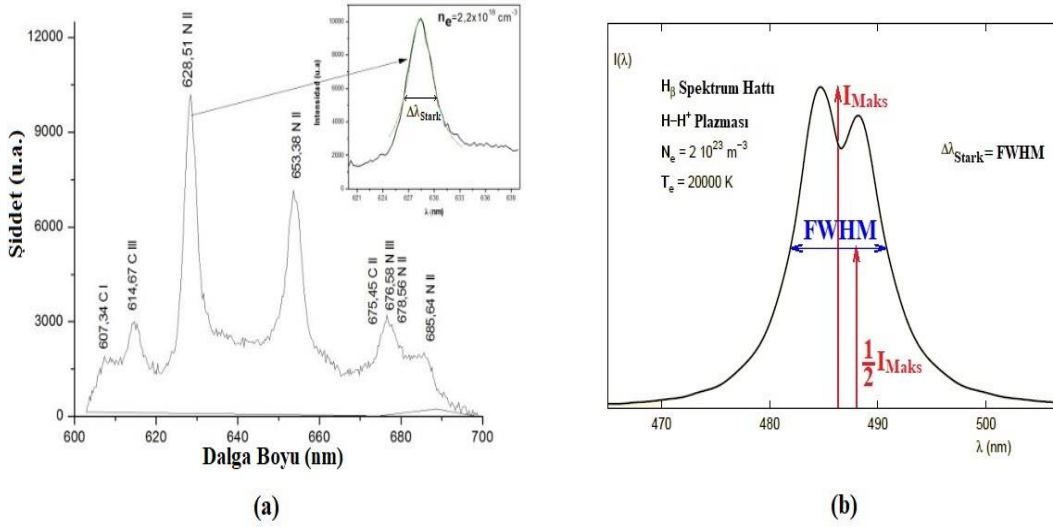
$$n_e = \left(\frac{I_1}{I_2}\right) \left(\frac{A_2}{A_1}\right) \left(\frac{g_2}{g_1}\right) \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right) \left(\frac{2\pi m_e k_B T_e}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} e^{\frac{E_i+E_1-E_2}{k_B T_e}} \quad (3.50)$$

Denklem 3.48, denklem 3.49 ve denklem 3.50'deki R_1 spektrum üzerinde seçilen birinci spektrum çizgi çiftinin şiddetleri oranını, R_2 spektrum üzerinde seçilen ikinci spektrum çizgi çiftinin şiddetleri oranını, I_1 , I_2 , I_3 ve I_4 seçilen spektrum çizgilerinin ışık şiddetini (a.u.), A_1 , A_2 , A_3 ve A_4 seçilen spektrum çizgilerinin geçiş olasılıklarını, g_1 , g_2 , g_3 ve g_4 seçilen spektrum çizgilerinin istatistiksel ağırlığını, λ_1 , λ_2 , λ_3 ve λ_4 seçilen spektrum çizgilerinin dalga boylarını (nm), E_1 , E_2 , E_3 ve E_4 seçilen spektrum çizgilerinin enerji seviyelerini (eV) ve E_i ölçülen parçacığın iyonlaşma enerjisini (eV) ifade etmektedir. Işık şiddeti ve dalga boyu spektrometre yapılan ölçüm ile elde edilmekte olup plazma içerisindeki parçacıkların türü belirlenebilir. Belirlenen parçacıklara ait geçiş olasılıkları, istatistiksel ağırlığı, enerji seviyeleri ve iyonlaşma enerjisi değerleri National Institute of Standards and Technology (NIST) tablolarından elde edilmektedir (Atomic Spectra Database, 2022).

DBD uygulaması ile elde edilen plazmalar filamentli deşarj moduna sahip ise Stark genişlemesi metodu elektron yoğunluğunun optik olarak hesaplanması için tercih edilir. Plazmada oluşan filamentlerde ve flamlarda yoğun bir şekilde yüklü parçacıkların Coulomb etkileşimleri meydana gelir. Yüklü parçacıkların etkileşimi ile Stark genişlemesi oluşup bu durum ölçülen dalga boyu-şiddet grafiğinde gözlenebilir.

Şekil 3.27a' deki gibi ölçüm ile elde edilen spektrum grafiğinde, genişlemenin olduğu bölgenin dalga boyuna göre genişleme miktarı Stark genişlemesi olarak bilinir. Stark genişlemesi oluşan eğrilerinin istatistiksel olarak hesaplanması ile

ölçülebilir. Stark genişlemesinin ile oluşan eğriler Lorentz, Gauss veya Voigt profillerine sahip olabilir (Burger, M. and Hermann, J., 2016) . Bu profil dağılımlarında maksimum şiddetinin yarısındaki tam genişlik (FWHM) hesaplanarak Stark genişliği hesaplanır. Şekil 3.27b’ de FWHM değerinin oluşan Stark genişlemesi üzerindeki yeri gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Stark genişlemesinin a) Emisyon spektrumundaki örneği (Vera, L. P., et al., 2014), b) İstatiksel olarak hesaplanması.

Stark genişlemesinin aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$\Delta\lambda_{Stark} = w \left[\frac{n_e}{n_e^{ref}} \right]^m + 3.5\alpha \left[\frac{n_e}{n_e^{ref}} \right]^{\frac{1}{4}} \left[1 - \frac{3}{4} N_D^{-\frac{1}{3}} \right] w \left[\frac{n_e}{n_e^{ref}} \right]^m \quad (3.51)$$

Denklemdaki n_e^{ref} referans elektron yoğunluğunu (m^{-3}), w referans elektron yoğunluğundaki elektron çarpma genişliği parametresini (nm), referans elektron yoğunluğundaki α iyon genişletme parametresini (nm) ve m Stark genişlemesinin elektron yoğunluğuna bağlı olan değişimi simgeleyen üstel Stark parametresini ifade eder. Stark genişlemesi elektron yoğunluğuna lineer bağımlı ise $m = 1$ değeri alır. Denklemdaki ilk terim elektronların etkisi ile olan genişlemeyi ikinci terim ise iyonların etkisi ile olan genişlemeyi ifade etmektedir. İyon genişleme etki

küçük olduğu için ihmal edilebilir. Buna göre Stark genişlemesi denklem 3.52'deki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta\lambda_{Stark} = w \left[\frac{n_e}{n_e^{ref}} \right]^m \quad (3.52)$$

DBD sistemi ile elde edilen hava ve argon plazmaları için $n_e^{ref} = 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ değeri alır. Buna göre DBD hava ve argon plazmaları için elektron yoğunluğu aşağıdaki gibi hesaplanır.

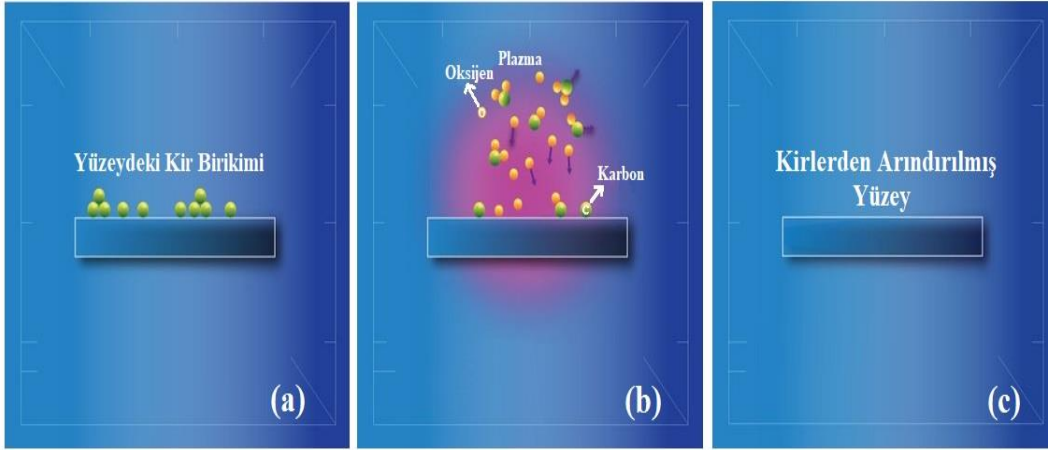
$$n_e = \left[\frac{\Delta\lambda_{Stark}}{2 \times 10^{-11}} \right]^{\frac{3}{2}} \quad (3.53)$$

Optik ölçüm yöntemleri düşük plaka aralıkları için uygulanabilir değildir. Plazmaların yaydığı ışıkların fiber uçlara aktarılması için odaklama aparatları gerekebilir. Plazma ile elde edilen morötesi dalgaların düşük dalga boyları nedeniyle optik spektrometre ile tespitleri zordur. Bu nedenle optik spektrometre ile elektron yoğunluğu ve sıcaklığı ölçümü yerine pratikte plazmanın kimyasal içeriğinin tespiti tercih edilir.

3.4. DBD Plazma Uygulamaları

DBD plazmalarının yüksek enerjili yapısı, UV ışınımı ve reaktif parçacıkların etkisi ile oluşan yüzey kimyası işlemleri uygulandığı materyalin yüzeyinde modifikasyonları oluşturur. Modifikasyon işlemleri uygulanan materyalin genellikle en dış yüzey veya atomik katmanları ile sınırlıdır ve materyalin özellikleri değişmeden kalır. Plazma ile uygulama derinliği, farklı plazma türlerinin ve farklı enerji yoğunluklarının kullanılmasıyla değiştirilebilir. Plazma ile yüzey etkileşim mekanizmaları, yüzey kimyası etkileşimleri ve kullanılan ekipmanların konfigürasyonlarına bağlı olup birçok farklı işlem türü gerçekleştirilebilir.

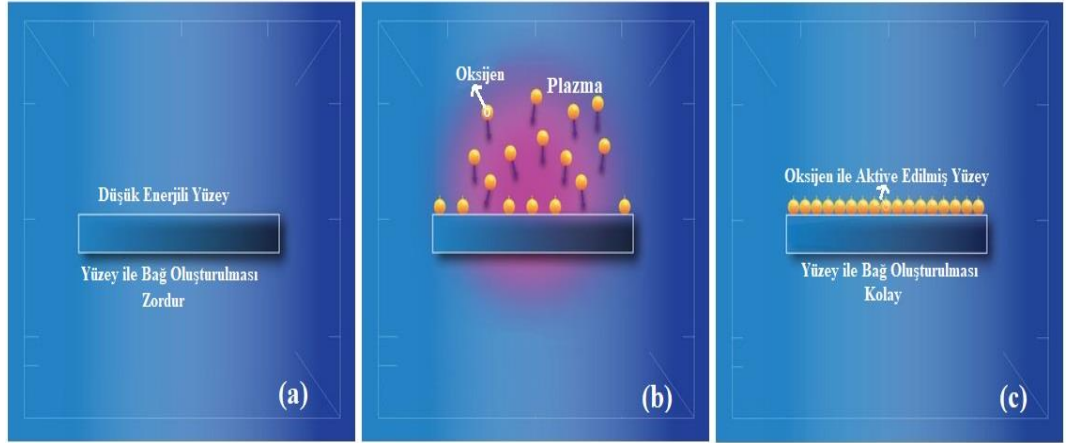
3.4.1. Plazma ile yüzey temizleme



Şekil 3.28. Plazma ile yüzey temizleme **a)** Plazma uygulanmadan önceki malzeme yüzeyi, **b)** Plazma uygulandığındaki malzeme yüzeyi, **c)** Plazma uygulaması sonrasındaki malzeme yüzeyi (Henniker Plasma, 2022).

Endüstriyel uygulamalar sırasında üretim kaynaklı birkaç nanometre kalınlığındaki organik kirlerler katmanlar halinde malzeme yüzeyinde birikir. Bu durum malzemeye uygulanacak yapıştırma, boya ve kaplama gibi birçok işlemi olumsuz etkiler ve uygulama verimini düşürür. Malzeme yüzeyinde biriken nano boyuttaki organik kirlilik malzeme yüzeyine oksijen veya hava plazması uygulanarak giderilir. Soğuk plazma yapısındaki UV ışıınımı kir birikintisindeki organik bağların kırma da oldukça etkilidir. Soğuk plazma yapısındaki oksijen reaktifleri organik yapıdaki karbon bileşenleri ile kimyasal tepkimelere girerek kirin buharlaşmasını sağlar. Plazma ile temizleme işlemi uygulanacak materyal gümüş ve bakır gibi kolayca oksitlenecek bir malzemeden oluşuyor ise argon veya helyum gibi inert gazların plazmaları kullanılır. Plazma ile yüzey temizliği, metalurji, mikroişlemci üretimi, yarı iletken üretimi ve tıbbi plastik üretimi gibi endüstrilerde uzun süredir kullanılmaktadır. Plazma ile yüzey temizleme işlemine ait görsel Şekil 3.28’de sunulmuştur.

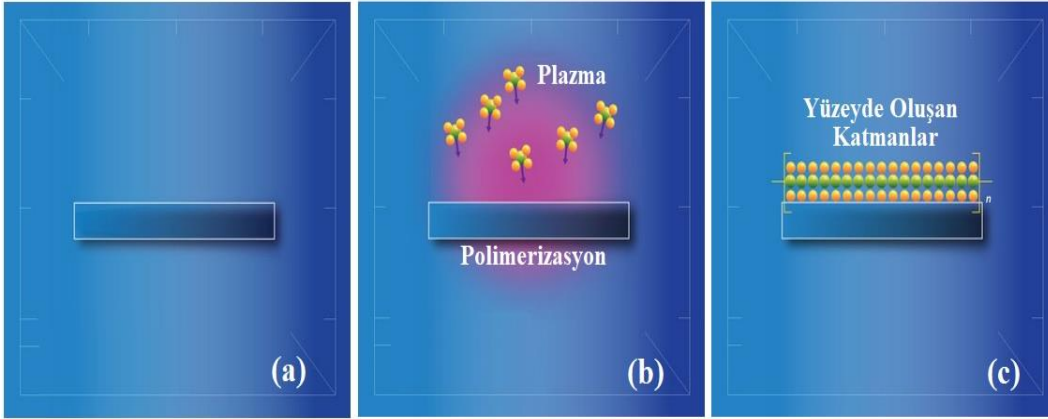
3.4.2. Plazma ile yüzey aktivasyonu



Şekil 3.29. Plazma ile yüzey aktivasyonu **a)** Plazma uygulanmadan önceki malzeme yüzeyi, **b)** Plazma uygulandığındaki malzeme yüzeyi, **c)** Plazma uygulaması sonrasındaki malzeme yüzeyi (Henniker Plasma, 2022).

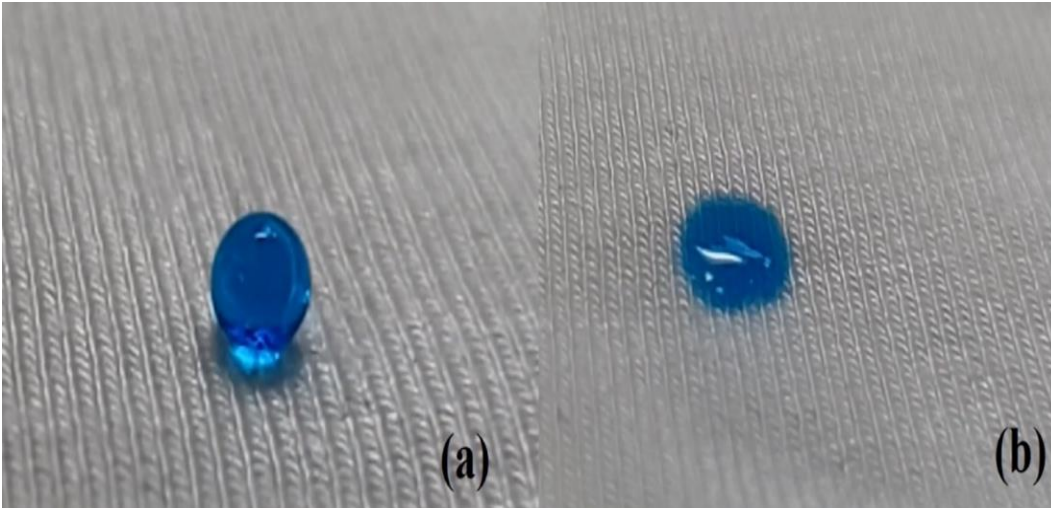
Polimerler gibi birçok endüstriyel malzeme türlerinin kimyasal reaksiyonlara girme istekleri azdır. Kimyasal inert olan materyal yüzeylerinde plazma uygulamaları ile fonksiyonel gruplar oluşturarak malzeme yüzeyinin etkinliği artırılır. Genellikle oksijen veya hava plazmaları kullanılarak malzeme yüzeyi reaktif parçacıklar ve UV radyasyonu ile temizlenir ardından reaktif ve radikal parçacıklar malzeme yüzeyine bağlanarak bağlayıcı maddelere karşı oldukça aktif bir yüzey oluşturulur. Parçalar, plazma işlemi uygulanan malzeme türüne bağlı olarak birkaç dakikadan birkaç aya kadar aktif kalır. Örneğin polipropilen, plazma aktivasyonundan birkaç hafta sonra yeniden işlenebilir. Plazma ile yüzey aktivasyonu boyama, yapıştırma ve kaplama gibi işlemleri kolaylaştırır ve uygulama verimini artırır. Plazma ile yüzey aktivasyon işlemine ait görsel Şekil 3.29’de sunulmuştur.

3.4.3. Plazma ile yüzey kaplama



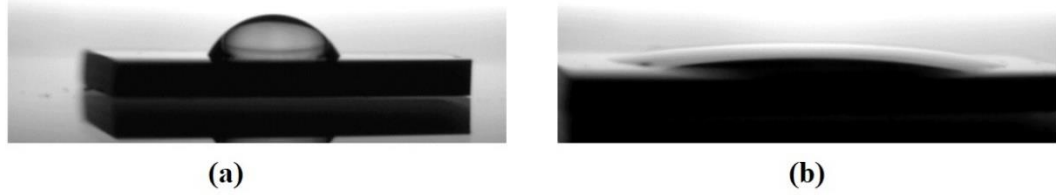
Şekil 3.30. Plazma ile yüzey kaplama **a)** Plazma uygulanmadan önceki malzeme yüzeyi, **b)** Plazma uygulandığındaki malzeme yüzeyi, **c)** Plazma uygulaması sonrasındaki malzeme yüzeyi (Henniker Plasma, 2022).

Plazma ile yüzey kaplama işleminde, oluşan plazmanın içerisine yerleştirilen monomer yapılı nesneler plazma içerisindeki reaktif parçacıklar ile aktifleştirilir ve plazma ile işlem yapılan malzeme yüzeyinde uygun koşullar sağlanıp çok hızlı bir polimerizasyon gerçekleştirilerek malzeme kaplanır. Kaplama kalınlığı nano ölçekte olup işlem süresi birkaç dakikadır. Plazma ile yüzey kaplama işlemine ait görsel Şekil 3.30'da sunulmuştur. Kullanılan monomer türlerine göre elde edilen kaplamalar hidrofob veya hidrofil özelliklere sahip olabilir.



Şekil 3.31. Plazma uygulandıktan sonra elde edilen hidrofobik kumaş kaplama **a)** Plazma uygulanan yüzey, **b)** Plazma uygulanmamış yüzey (Henniker Plasma, 2022).

Plazma kaplama ile elde edilen hidrofob özelliği ile su, solventler ve yağ gibi birçok sıvıya karşı malzeme yüzeyi kalıcı olarak itici hale getirilebilir. Şekil 3.31’de plazma kaplama ile elde edilen hidrofobik kumaşlar gösterilmektedir.



Şekil 3.32. Plazma uygulandıktan sonra elde edilen hidrofobik kaplama **a)** Plazma uygulanmamış yüzey, **b)** Plazma uygulanmış yüzey (Henniker Plasma, 2022).

Plazma kaplama ile elde edilen hidrofil özelliği ile su ve solventler gibi birçok sıvı ile malzeme yüzeyi kalıcı olarak tamamen ıslanabilir özelliğe sahip olur. Şekil 3.32’de plazma kaplama ile elde edilen hidrofilik bir yüzey gösterilmektedir.

Plazma ile yüzey kaplama uygulamaları ile tekstil, tıbbi cihaz, optik ve elektronik sektörlerinde ticari ürünler üretilmekte ve geliştirmektedir.

3.4.4. Plazma ile yüzey aşındırma



Şekil 3.33. Plazma ile yüzey aşındırma **a)** Plazma uygulanmadan önce aşındırma maskesi yerleştirilmiş malzeme yüzeyi, **b)** Plazma uygulandığındaki malzeme yüzeyi, **c)** Plazma uygulaması sonrasındaki malzeme yüzeyi (Henniker Plasma, 2022).

Plazma ile yüzey aşındırma işleminde yüzeyi aşındırma maskesi kaplanmış malzeme plazma içerisindeki reaktif parçacıklar ve iyonlar ile dağlanır. Maske

dışında kalan yüzeylerdeki moleküler plazma ile oluşan kimyasal reaksiyonlar sonucu buharlaşır. Yüzey alanı büyük ölçüde artırılarak yüzey enerjisi yükseltilir ve malzeme kolayca ıslanabilir hale getirilir. Mikroskobik ölçekte yüzey alanları kazınabilir. Aşındırma işlemi hassas bir şekilde kontrol edilen ekipmanlar ile sağlanır. Aşındırmanın amacı, yüzeyden ayrılarak uçucu veya düşük molekül ağırlıklı yan ürünler üreten kısımların en dıştaki katmandan çıkararak pürüzlülüğü arttırmaktır. Genellikle mikroelettronik, yarı iletken ve biyomedikal endüstrisinde kullanılır. Plazma ile yüzey aşındırma işlemine ait görsel Şekil 3.33'de sunulmuştur.

3.4.5. Plazma ile malzeme yüzeyinde çapraz bağ oluşturma



Şekil 3.34. Plazma ile malzeme yüzeyinde çapraz bağların oluşturulması (Henniker Plasma, 2022).

Soy gazlar gibi uygulanacak işlem için kimyasal olarak inert olan gazlar ile oluşturan plazmalar malzeme yüzeydeki polimerlerde C-H zincirlerinin kırılıp yüzeyde aktif radikaller oluşmasına neden olur. Oluşan radikallerin birbirleri ile etkileşimi ve rekombinasyonu çift bağların oluşumuna veya moleküler zincirlerin çapraz bağlanmasına yol açar. Radikaller ve çift bağlar, aşılama için molekülleri tutturmada önemli bir rol oynar. Çapraz bağlanma bazen sadece istenmeyen bir yan reaksiyondur, ancak amacın özellikle çapraz bağlı bir yüzey oluşturmak olduğu durumlar vardır (Bertóti, I., et al., 2007). Plazma ile malzeme yüzeyinde çapraz bağ oluşturma işlemine ait görsel Şekil 3.34'de sunulmuştur.

3.4.6. DBD plazmaların kullanım alanları

DBD plazmalarının yüksek enerjili yapısı, UV etkisi, radikal ve reaktif parçacıkların etkileri ile atmosfer basıncında ve oda sıcaklığında üretiminden dolayı akademik ve endüstriyel amaçlar ile birçok farklı alan ve sektörde kullanım alanı bulunmaktadır. Soğuk plazmalar üzerine yapılan araştırmaların artması ve gelişen teknoloji ile soğuk plazmaların kullanım alanları oldukça genişlemiştir.

Tıpta yara tedavisinde (Bekeschus, S., et al., 2021), kronik ülser tedavisinde (Isbary, G., et al., 2012) , diyabetik ayak ülseri tedavisinde (Mirpour, S., et al., 2020), yanık tedavisinde (Betancourt-Ángeles, M., et al., 2017) , kök hücre tedavisinde (Hadeffi, A., et al., 2022), deri hastalıkları tedavisinde (Busco, G., et al., 2020), deri kanseri tedavisinde (Yan, D., et al., 2021), meme kanseri tedavisinde (Aggelopoulos, C. A., et al., 2022), rahim ağzı kanseri tedavisinde (Ha, J.-H. and Kim, Y.-J., 2021), kalın bağırsak kanseri tedavisinde (Zafari, P., et al., 2022), rahim kanseri tedavisinde (Yoshikawa, N., et al., 2020), mide kanseri tedavisinde (Torii, K., et al., 2015), akciğer kanseri tedavisinde (Jo A., et al., 2022), lösemi tedavisinde (Erfani, R., et al., 2022) ve beyin tümörü (Adhikari, M., et al., 2020) tedavisinde soğuk plazmalar kullanılmaktadır.

Biyomedikal alanında antimikrobiyal etki (bakteri inaktivasyonu, mantar inaktivasyonu, virüs inaktivasyonu) oluşturmak için (Deepak, G. D. and Sharma, A., 2022), sterilizasyon ve dezenfeksiyon amaçlı (Sakudo, A., Yagyu, Y. and Onodera, T., 2019), kan pıhtılaşma (hemostaz) sürecini hızlandırmak için (Kuo, S., 2018), cilt yenilenmesi için (Shakouri, R., et al., 2021), biyomateryal üretiminde (Reyna-Martínez, R., et al., 2018), kozmetik ve estetik amaçlı (Metelmann, HR., Böttge, K. and von Woedtke, T., 2022) ve dokuların kesilip çıkarılması (eksizyon) işlemi için (Huang, H., et al., 2020) soğuk plazma uygulamaları kullanılmaktadır.

Diş tedavilerinde antimikrobiyal etki oluşturmak için (Jungbauer, G., et al., 2021), biyofilm üretimi ve ağız için kullanımda film kalınlığının azaltılması işlemi için (Hong, Q., et al., 2019), diş kanal uygulamalarında dezenfeksiyon sağlamak için (Lata, S., et al., 2021) ,diş yapılarının iyileştirilmesi (Borges, A.C.,

et al., 2021), diş minesinin güçlendirilmesi için (Fathollah, S., et al., 2022) ve diş beyazlatma işlevi için (Nam, S. H., Choi, B. and Kim, G. C., 2021) soğuk plazma uygulamaları tercih edilmektedir.

Gıda teknolojilerinde ürünlerin raf ömürlerini artırmak amacı ile sıklıkla soğuk plazmalar kullanılmaktadır (Laroque, D. A., et al., 2022).

Tarım teknolojilerinde tohum çimlenme hızının ve kalitesinin artırılması için (Waskow, A., Howling, A. and Furno, I., 2021), bitki büyümesini ve direncini artırmak için (Pańka, D., et al., 2022), azotlu gübre üretimi için (Chen, H., et al., 2021), sulama amaçlı kullanılacak suların temizlenmesi (Judée, F., et al., 2018), bitkilerdeki kimyasal ilaç (pestisit) kalıntılarının azaltılması ile böcek ilaçları yerine kullanılmak için (Zheng, Y., et al., 2019) ve rekolte verimini artırmak için (Hashizume, H., et al., 2020) soğuk plazma uygulamalarına başvurulur.

Çevre teknolojilerinde içme suyunun dezenfeksiyonu (Nguyen, D. V., et al., 2018), katı atık bertaraf ve atık su arıtma işlemleri için (Aggelopoulos, C. A., 2022) ve havanın arıtılması işlemleri için (Bisht, S., et al., 2014) soğuk plazma teknolojileri kullanılmaya başlanmıştır.

Tekstilde yüzey modifikasyonu işlemleri ile su geçirmezlik, sterilizasyon, yıkama dayanımı, alev tutuculuğu ve dayanımı, kumaşların bağ kapasitesinin artırılması ve kumaşlara kir tutmaz özelliği kazandırmak için (Shakeri, M., 2020) soğuk plazma uygulamaları kullanılmaktadır.

Elektronikte PCB üretiminde (Coenen, N. J., 2022) ve yarıiletken üretiminde yüzey modifikasyonu işlemleri için (Jaeger, E. F., et al., 1995) 1990 yıllardan bu yana soğuk plazmalar kullanılmakta olup son yıllarda sensör üretiminde (Zaky, Z. A., et al., 2022) soğuk plazma uygulamaları kullanılmaya başlanmıştır.

Malzeme biliminde kâğıt, ahşap, plastik, cam ve metal malzemelerin yüzey modifikasyon işlemlerinde, ince film üretiminde ve nanoparçacık üretiminde (Jama, C. and Delobel, R., 2007) soğuk plazmalar tercih edilmektedir.

Soğuk plazmalar fabrikasyon ve imalat sanayinde kendine yer edinmiş olup birçok uygulama tekniği bulunmaktadır (Grill, A., April 1994). Uçak endüstrisi (Merati, A., et al., 2017), otomobil sektöründe (Kang, W. S., et al., 2013), uzay teknolojilerinde (Shimizu, S., et al., 2018) ve elektriksel itki sistemlerinde (Jiménez, P., Merino, M. and Ahedo, E., 2022) soğuk plazma uygulamaları kullanılmaktadır.



4. PLAZMA ÜRETİMİ ve OPTİMİZASYONU

DBD uygulamalarında en çok tercih edilen yöntemlerden biri olduğundan (Brandenburg, R., 2016) soğuk plazma üretimi için DBD paralel plaka yöntemi seçilmiştir. DBD paralel plaka yöntemi ile atmosferik basınçta ve oda sıcaklığında soğuk plazma üretimi gerçekleştirilmiştir. Atmosferik basınçta ve oda sıcaklığında plazma üretimi gerçekleştirildiğinden plazmanın etkinliğinin belirleyen en önemli parametresi elektron yoğunluğudur. Bu nedenle DBD paralel plaka yöntemi ile plazma elde edilirken plazma oluşumunu etkileyen faktörlerin elektron yoğunluğu üzerindeki etkileri incelenmiştir.

DBD paralel plaka yöntemi ile oluşturulan plazmalar kullanılan metal elektrottan, dielektrik malzemedan, kullanılan gaz türünden, deşarj mesafesinden ve plakalara uygulanan elektrik enerjisinden etkilenir. Bu faktörlerinin elektron yoğunluğu üzerindeki etkilerini incelenmiştir.

En yaygın kullanılan elektrik sistemi olan yüksek gerilim trafoları ile AA gerilim uygulanarak plazma üretilmiştir. Plazmaların deşarj modunu belirleyen ana faktör kullanılan gazın cinsidir. Helyum, Argon ve Azot gazları veya bu türleri içeren gaz karışımları, parıltı deşarjları oluşturarak ve dağınık ve homojen deşarj modlu plazma elde etmek için kullanılır. Hava karışımında %78 Azot, %21 Oksijen, %1 Argon, Karbondioksit, Helyum, Hidrojen, Neon ve diğer gazlar bulunur. Tüm deşarj modlarının oluşturabilmesinde dolayı kullanım gazı olarak hava kullanılmıştır. Hava plazması diğer bir avantajı ise yüksek yoğunlukta reaktif türleri (RONS) elde edilebilir. En önemli reaktif türü olan ozon hava plazması ile kolaylık yüksek yoğunluklarda elde edilir.

Dielektrik malzeme olarak cam ve pleksiglas kullanılmıştır. Dielektrik malzeme türü ve kalınlığı plazmadan geçen akımı sınırladığı için deşarj türüne ve elektron yoğunluğuna etki eder. Dielektrik malzeme plakalara uygulanacak gerilimin sınırlarını da belirler. Hava, cam ve pleksiglas için dielektrik dayanımları sırasıyla 3 kV/mm, 100 kV/mm ve 26 kV/mm'dir. Genel kullanımda dielektrik dayanımları AA gerilimlerde tepeden tepeye değerleri için verilir. Bazı malzemeler için dielektrik dayanımları etkin değerler üzerinden de

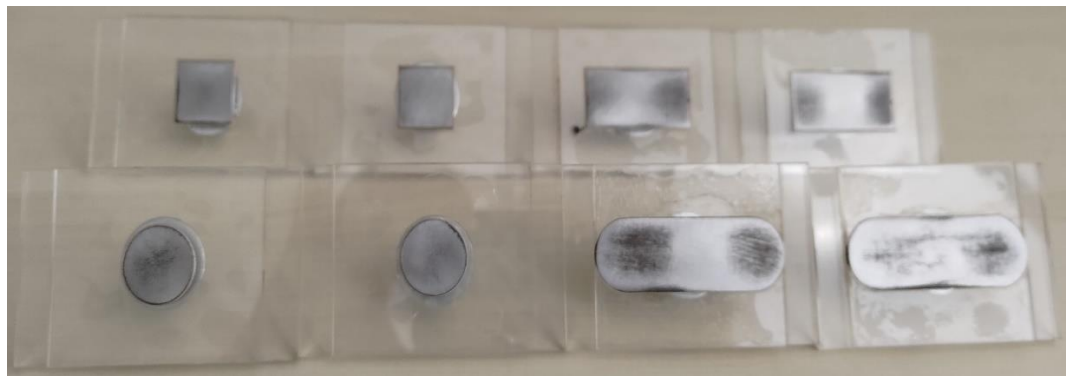
verilebilmektedir. Bu çalışmada oluşabilecek karışıklığı önlemek ve AA gerilimler ile uygulanan değerlerin DA değerler içinde kullanımını sağlamak için gerilim değerleri AA tepeden tepeye ve etkin değerleri ile beraber verilmiştir. Dielektrik malzemelerin elektrot yoğunluğu üzerindeki etkilerini gözlemlemek için cam ve pleksiglas malzemeler 0.001 m, 0.002 m, 0.003 m ve 0.004 m kalınlıklarda ve her biri 0.060 m x 0.080 m yüzey alanına sahip olacak şekilde hazırlanmıştır.

Elektrot yüzey alanı ve geometrisi plazmaya akan akım yoğunluğu ve plazmadaki elektrik alan dağılımı etkileyecektir. Bu durum plazmanın elektron yoğunluğunu da etkileyecektir. Elektrotlar yüzey alanın ve geometrisinin elektron yoğunluğunun üzerindeki etkisini gözlemlemek için 0.002 m kalınlığındaki alüminyum levhadan Tablo 4.1'deki ölçülerde hazırlanmıştır.

Tablo 4.1. Kullanılan elektrotların boyutları ve yüzey alanları.

Elektrot Geometrisi	Daire	Dikdörtgen	Kare	Oval (Yarış Pisti)
Elektrot Ölçüleri	$R = 0.02 \text{ m}$	0.04 m x 0.02 m	0.02 m x 0.02 m	$(R = 0.02 \text{ m})/2 + 0.04 \text{ m} \times 0.02 \text{ m} + (R = 0.02 \text{ m})/2$
Yüzey Alanı (m ²)	0.000314	0.000800	0.000400	0.001114

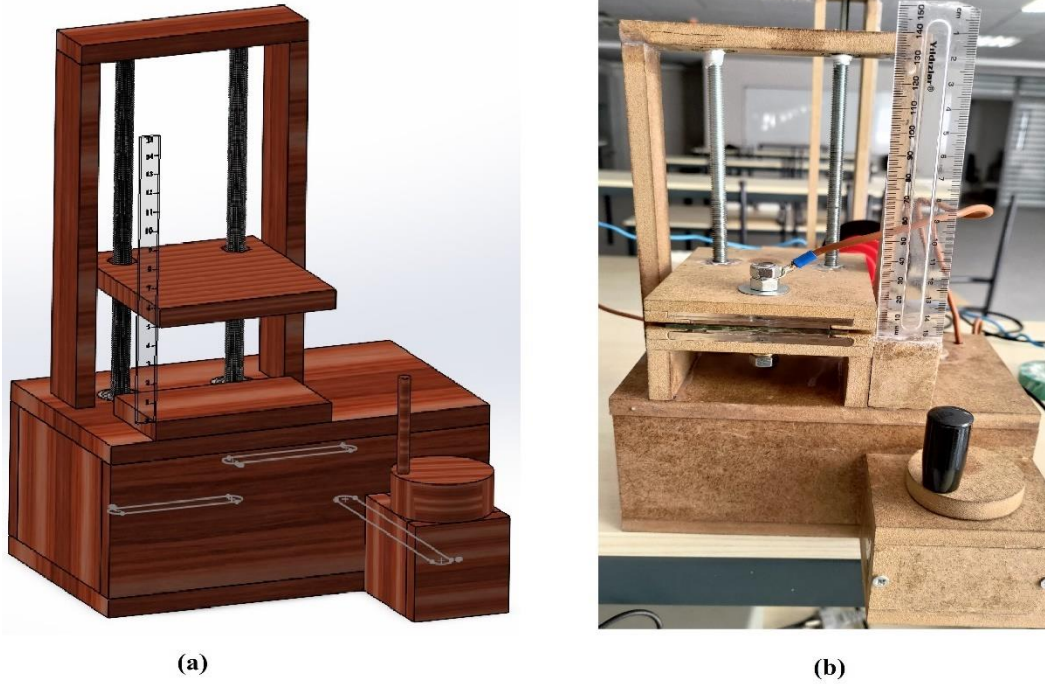
Kullanılan metal elektrotların görselleri Şekil 4.1'de sunulmuştur.



Şekil 4.1. Kullanılan farklı geometrilere sahip elektrot türleri.

Dielektrik malzeme ve kalınlığının etkisini daha rahat gözlemlemek için tek dielektrik bariyer kullanılmıştır. Deşarj mesafesinin etkisini gözlemlemek için de hacimsel plazma üretilmiştir. Tek bariyer HDBD sisteminde değişken elektrot ve

dielektrik malzeme türlerine bağlı plazma üretmek için elektrotlar dielektrik malzeme ile kaplanmamış, dielektrik bariyer elektrot yüzeyini tamamını kapayacak şekilde alt plaka üzerine yerleştirilmiştir. Dört farklı geometrik şekilde elde edilen elektrot çiftleri aynı yüzey alanına sahiptir. Paralel eş bir düzlemde oluşturacak bir şekilde plaka hareketi sağlanmıştır. Plakaların hareketini sağlamak için Şekil 4.2'deki gibi mekanik bir sisteme tasarlanmıştır.



Şekil 4.2. Plakaların hareketini sağlamak için tasarlanan mekanik sistem **a)** Mekanik sistemin Solidworks tasarımı **b)** Mekanik sistemin imal edilmiş hali.

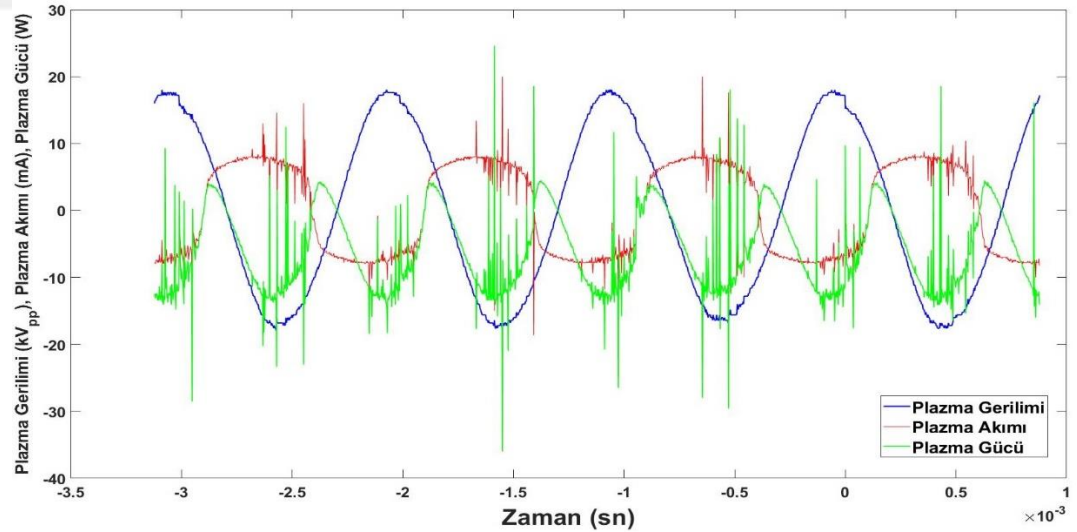
Elektrotlar pleksiglastan yapılmış plakalara yerleştirmiştir. Plaka çiftleri tasarlanan mekanik sistemdeki plaka tutuculara yerleştirilmiştir. Mekanik sistemde alt plaka sabit tutulup üst plaka 0.001 m aralıklarla hareket ettirilmiştir. Güvenlik amaçlı plakalara gerilim deşarj mesafesi ayarlandıktan sonra uygulanmıştır. Plakalara gerilim uygulanırken plakalar hareket ettirilmemiştir.

AA Yüksek gerilim oluşturulan iki transformatörünün seri bağlanması ile elde edilmiştir. Birinci transformatör Leybold 562-13 ve Leybold 562-16 sargıları ile oluşturulmuş olup 250:10000 dönüştürme oranına sahiptir. İkinci transformatör Leybold 562-13 ve Leybold 562-17 sargıları ile oluşturulmuş olup 250:23000 dönüştürme oranına sahiptir. Bu iki transformatörün seri bağlantısı ile oluşturulan

AA gerilim sistemi ile 1 kHz'de 14.6890 kV_{rms} (20.7765 kV_{pp})'a kadar AA gerilim elde edilmiştir. Yalıtım ve güvenlik amaçlı iki trafoda I-10 trafo yağı ile doldurulmuş kaplara yerleştirilmiştir. Oluşan seri transformatörün kuplaj ucu tespit edildi ve kuplaj olmayan diğer uç sistem güvenliği açısından topraklandı. Uygulan gerilimin ve frekansın elektron yoğunluğu üzerindeki etkisini gözlemlemek için farklı frekanslarda ve gerilimlerde elektrotlara gerilim uygulanmıştır.

Uygulanan yüksek gerilimi ölçmek için Pintek HVP-40 yüksek gerilim probu (1:1000) kullanılmıştır. Yüksek gerilim probu kanca ucu ile trafonun kuplaj ucunun bağlandığı plakaya bağlanmıştır.

Yüksek gerilim trafoları ile 14.6890 kV_{rms} (20.7765 kV_{pp})'a kadar gerilim uygulanması ile oluşan plazma akımı Şekil 4.3'deki gibi çok sayıda ve yüksek şiddette sıçramalar (spikes) sahip olmaktadır. Plazma akımı üzerindeki bozulmalar plazma gücünü etkilemektedir. Ölçümlerin daha rahat ve güvenilir olması için plazma gücü ölçüm kapasitörü yöntemi ile hesaplanmıştır.



Şekil 4.3. Kare elektrot, 1 mm pleksiglas ve 1 mm hava aralığı için anlık plazma voltajı, plazma akımı ve plazma güç grafiği.

Ölçüm kapasitörünün değerini belirlemek için elektrot çifti, dielektrik malzeme ve hava aralığından oluşan plazma rektörünün kapasitör sığası, tüm elektrot türleri ve dielektrik malzeme türleri için 0.001 m aralıklarda plazma

gözlemlenen hava aralığına kadar HP 4263B LCR metre ile 1 kHz'de ölçülmüştür. Elde edilen sığa değerleri Ek A'de sunulmuştur. Reaktör kapasitörünün aldığı en düşük sığa değeri ile en yüksek sığa değeri sırasıyla 1.23 pF ve 9.04 pF olarak ölçülmüştür. Reaktör kapasitör sığası ve ölçüm kapasitör sığası oranı olarak ($C_{Reaktör}/C_{ölç.}$) için 1/100 seçilip 100 x (1.23 pF ve 9.04 pF) değerlerde kapasitör gerilimin osiloskop ile ölçüm uyumluluğu kontrol edilmiştir. 900.04 pF maksimum değere yakın temin edilecek kapasitör olarak 1 nF 100 V 5 mm polyester kapasitör kullanılmıştır. 1 nF kapasitör HP 4263B LCR metre ile 1 kHz tekrar ölçüldüğünde 715.33 pF bir kapasiteye sahip olduğu görülmüştür. Ölçüm kapasitörü için belirlenen kriter 123 pF ile 900.04 pF arasında kaldığından ve osiloskop ölçümleri için uygun olduğundan 715.33 pF değeri ölçüm kapasitörü olarak alınmıştır. Ölçüm kapasitörünün gerilimini ölçmek için 1:10 osiloskop probu kullanılmıştır.

Plazma gerilimi ile ölçüm kapasitörü gerilimi osiloskop ile ölçüldüğünden ayrık zaman üzerinden ortalama plazma gücü Denklem 4.1 ile hesaplanmıştır.

$$P_{Ort.} = \frac{1}{N(t_n - t_{n-1})} \sum_{n=1}^N U(t_n) \cdot [Q(t_n) - Q(t_{n-1})] \quad (4.1)$$

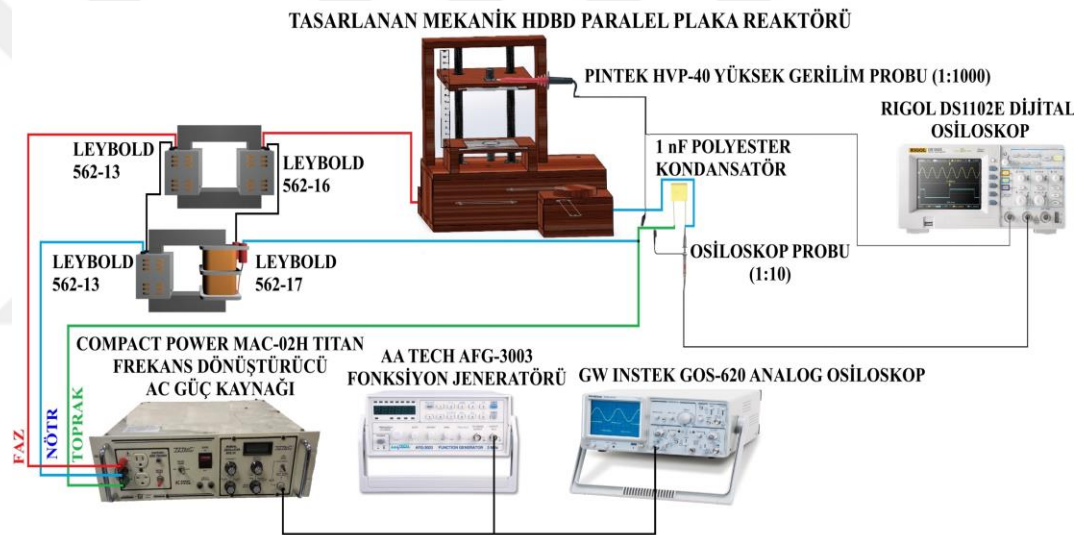
Denklem 4.1'deki N bir periyot için osiloskop ölçümü ile edilen sonuçların örnekleme sayısını, t_n örnekleme anının zaman değerini ve t_{n-1} bir önceki örnekleme anının zaman değerini ifade etmektedir. Lissajous yöntemi ile plazma gücü hesaplanarak ortalama güç hesaplaması doğrulanmıştır.

Plazmanın elektron yoğunluğu güç dengesi yöntemi ile dolaylı olarak hesaplanmıştır. Güç dengesi yöntemi için Denklem 3.46'daki plazma ile temas edilen efektif alan, kullanılan paralel plaka yönteminde eş yüzey alanına sahip elektrot çifti için 2A olarak alınmıştır.

$$n_e = \frac{P_{Ort.}}{2Aev_B \epsilon_{Kayıp}} \quad (4.2)$$

Denklem 4.2'deki e ifadesi bir elektronun kazanabileceği kinetik enerji miktarı olup elektrovolt dönüşümü ($1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$) ile ifade edilir. Denklemdeki v_B Bohm hızını ($2 \times 10^3 \text{ m/s}$) temsil etmektedir. Denklemde $\mathcal{E}_{Kayıp}$ ifadesi elektron-iyon oluşumu için sistemin harcaması gereken enerji miktarıdır. Hava için $\mathcal{E}_{Kayıp} = 41.4 \text{ eV}$ alınmıştır (Fourkal, E., et al., 2017). Denklemdeki A ifadesi elektrot yüzey alanını (m^2) temsil etmekte olup Tablo 4.1'deki her elektrot yüzey alanı için ayrı ayrı elektron yoğunlukları hesaplanmıştır.

Elektron yoğunluğunun güç dengesi yöntemi ile hesaplanabilmesi için parıltı deşarjının oluşumu gereklidir. Bu nedenle dağınık mod ve homojen mod deşarjları oluşturularak plazma elde edilmiştir.



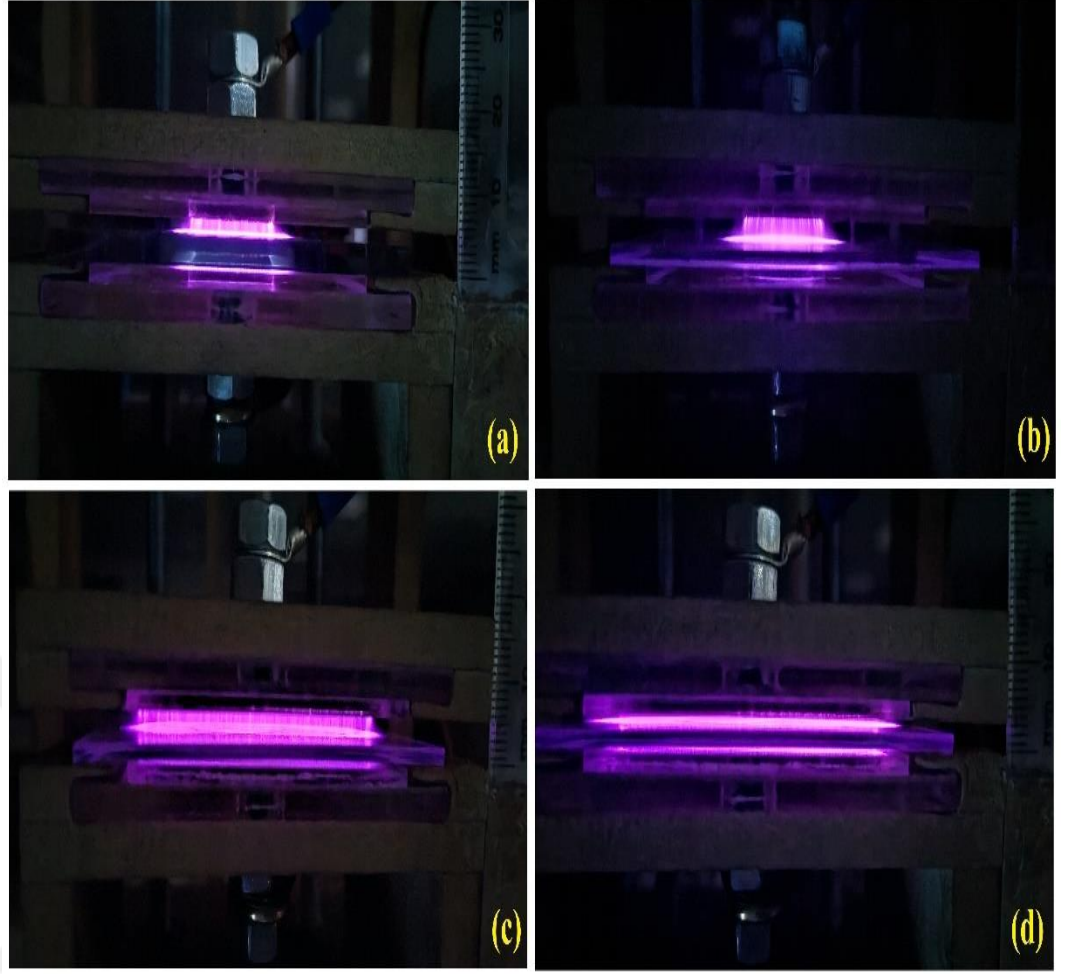
Şekil 4.4. Hava soğuk plazması üretim için kullanılan HDBD sistemi ve ekipmanları.

Yüksek gerilim transformatörlerini sürmek için Compact Power Mac-02H Titan serisi bir frekans dönüştürücü AA güç kaynağı kullanıldı. Frekans dönüştürücü AA güç kaynağı, AATech AFG-3003 fonksiyon üretici ile sürüldü. Fonksiyon üreticinin oluşturduğu sinyalleri ayarlamak ve gözlemlemek için fonksiyon üreticinin çıkışı ek olarak GW Instek GOS-620 analog osiloskopa bağlanmıştır. Fonksiyon üreticiden 1 kHz sinüs dalgalı $1 V_{rms}$ 'e kadar olan sinyaller ile güç kaynağından 1 kHz $130 V_{rms}$ 'e kadar gerilim üretilip, bu gerilimler trafonun primerine uygulanmış ve trafonun sekonderinden 14.6890 kV_{rms} (20.7765 kV_{pp})'a kadar gerilim ile soğuk plazma elde edilmiştir. Plazma

voltajı yüksek gerilim probu ile ve ölçüm kapasitör voltajı osiloskop probu ile Rigol DS1102E dijital osiloskopta ölçüldü. Dijital osiloskopta ölçülen değerler csv dosyası olarak bir USB belleğe kaydedilmiştir. Hava soğuk plazması üretimi için tasarlanan HDBD paralel plakalı seri ölçüm kondansatörlü sistem Şekil 4.4’de sunulmuştur.

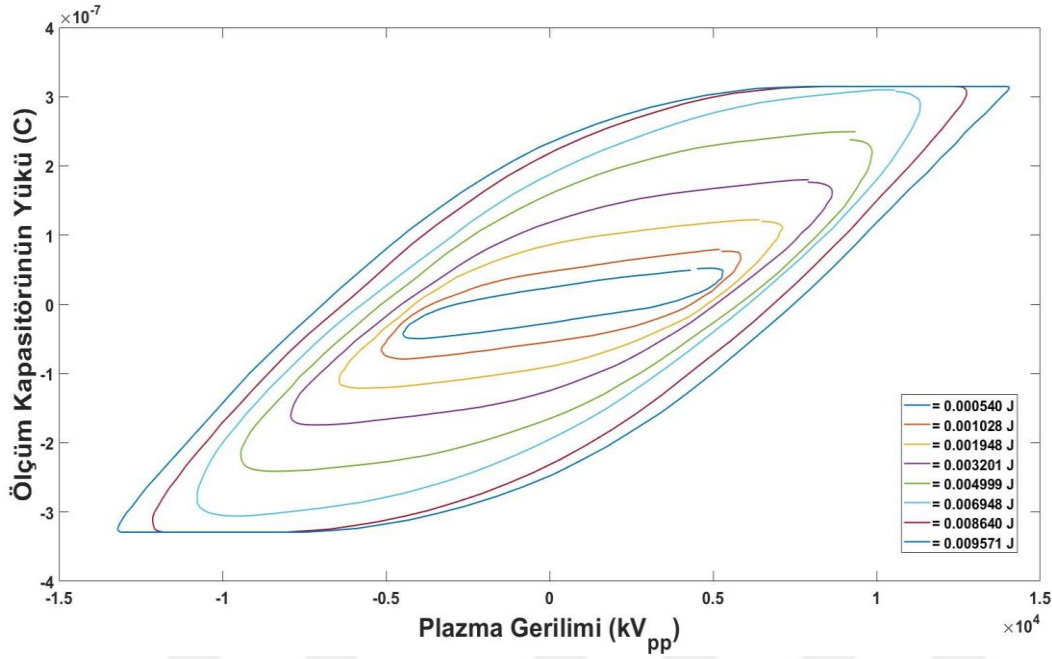
Uygulanması gereken gerilim sınırları, gazın dielektrik dayanımdan yüksek ve dielektrik malzemenin dielektrik dayanımdan daha düşük olmalıdır. Oluşturulan sistemde dielektrik delinme riskin en kritik olduğu durum 0.001 *m* hava ve 0.001 *m* pleksiglas ile oluşan reaktöre 20.7765 *kV_{pp}* (14.6890 *kV_{rms}*) uygulanması ile oluşmaktadır. Plazma üretimi için 0.001 *m* hava aralığı üzerine düşen gerilimin 3 *kV_{pp}* üzerinde olması gerekir. 0.001 *m* kalınlığındaki pleksiglas malzeme üzerine düşen gerilim, trafonun uygulayabileceği maksimum gerilim olsa bile pleksiglas malzemenin dielektrik dayanımından daha düşük olacağı için (20.7765 *kV_{pp}* < 26 *kV*) dielektrik delinme oluşmaz. En kritik durumda dielektrik delinme oluşmadığından plazma üretimi boyunca tüm dielektrik malzeme türlerinde ve kalınlıklarında için dielektrik delinme oluşmamıştır. Dielektrik delinme için dikkat edilmesi gereken bir başka kriter ise dielektrik malzemelerin sıcaklığıdır. Dielektrik malzemenin sıcaklık değerlerindeki artışı malzemenin dielektrik dayanımını düşürecektir. Dielektrik malzemedeki sıcaklık artışı uygulanan gerilim seviyesi ve plazmanın uygulanma süresine bağlı olarak yükselecektir.

Transformatör ile plakalara havanın dielektrik dayanımın üstünde gerilimler (> 3 *kV/mm*) uygulanarak plazma oluşması sağlanmıştır. Parıltı deşarjının gözlemlendiği minimum gerilim ile parıltı deşarjının oluştuğu maksimum gerilim arasındaki gerilimler osiloskop ile bir USB belleğe kaydedilmiştir. Ölçümler minimum hava aralığı olan 0.001 *m* ile parıltı deşarjının gözlemlendiği maksimum hava aralığı mesafesine kadar 0.001 *m* aralıklar ile alınmıştır. Bu işlemler tüm elektrot türleri ve dielektrik malzeme türü ve kalınlıkları için gerçekleştirilmiştir. Elde edilen DBD hava soğuk plazmalarına ait görseller Şekil 4.5’de sunulmuştur.



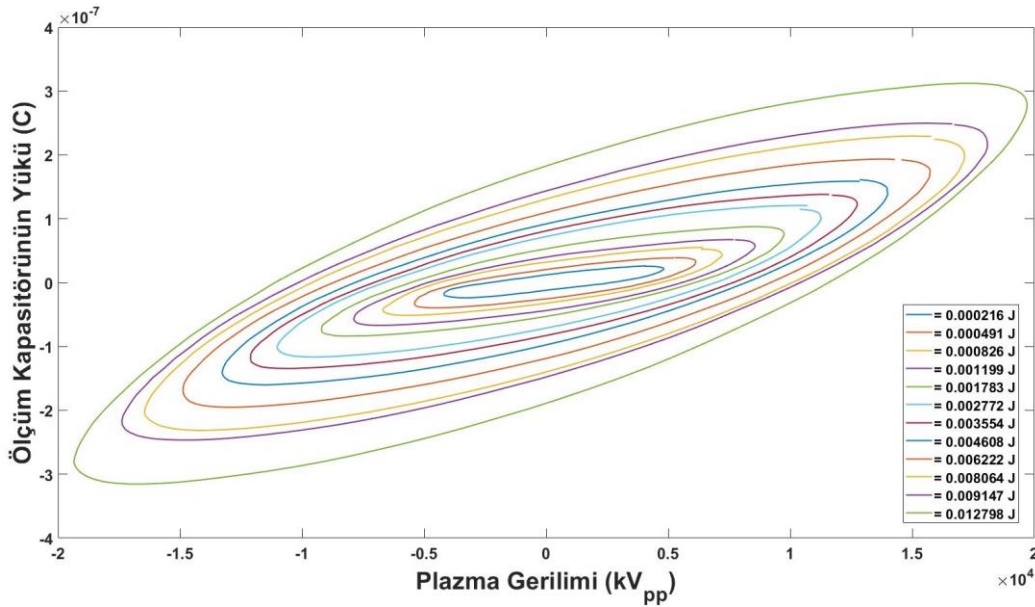
Şekil 4.5. DBD paralel plaka yöntemi ile 1 kHz’de elde edilen hava soğuk plazmaları: **a)** 12.35 kV_{rms} , kare elektrot, 3 mm cam ve 2 mm hava aralığı, **b)** 12.01 kV_{rms} , daire elektrot, 2 mm pleksiglass ve 3 mm hava aralığı, **c)** 10.10 kV_{rms} , oval elektrot, 2 mm pleksi ve 3 mm hava aralığı, **d)** 10.20 kV_{rms} , oval elektrot, 2 mm pleksiglass ve 1 mm hava aralığı.

Osiloskop ile csv formatında elde edilen plazma ve ölçüm kapasitörü gerilimleri hazırlanan bir Matlab kodu ile bilgisayar ortamında işlenerek plazmanın gücü ve elektron yoğunluğu hesaplanmıştır. Kullanılan Matlab kodları Ek-B’de sunulmuştur. Daire elektrot ve 0.001 m cam dielektrik malzeme için elde edilen Lissajous grafiği Şekil 4.6’de sunulmuştur.



Şekil 4.6. Daire elektrot, 1 mm cam ve 1 mm hava aralığında 1 kHz’ de uygulanan gerilim değerleri için elde edilen Lissajous eğrileri.

Daire elektrot ve 0.001 m pleksiglas dielektrik malzeme için elde edilen Lissajous grafiği Şekil 4.7’da sunulmuştur.

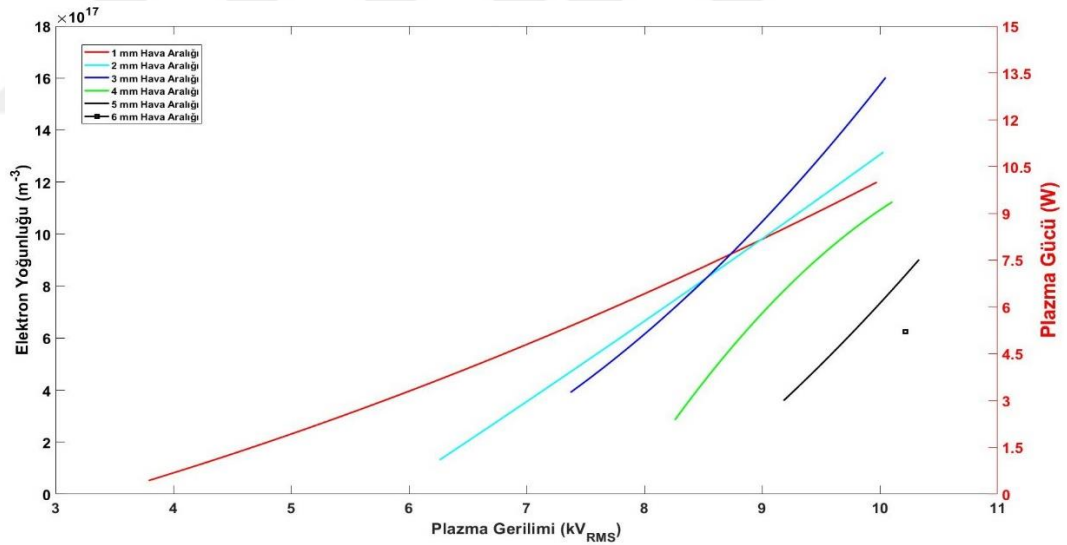


Şekil 4.7. Daire elektrot, 1 mm pleksiglas ve 1 mm hava aralığında 1 kHz’ de uygulanan gerilim değerleri için elde edilen Lissajous eğrileri.

Daire elektrot için elde edilen Lissajous grafikleri cam ve dielektrik malzeme için değişkenlik göstermektedir. Cam malzeme plazma akımını pleksiglas göre

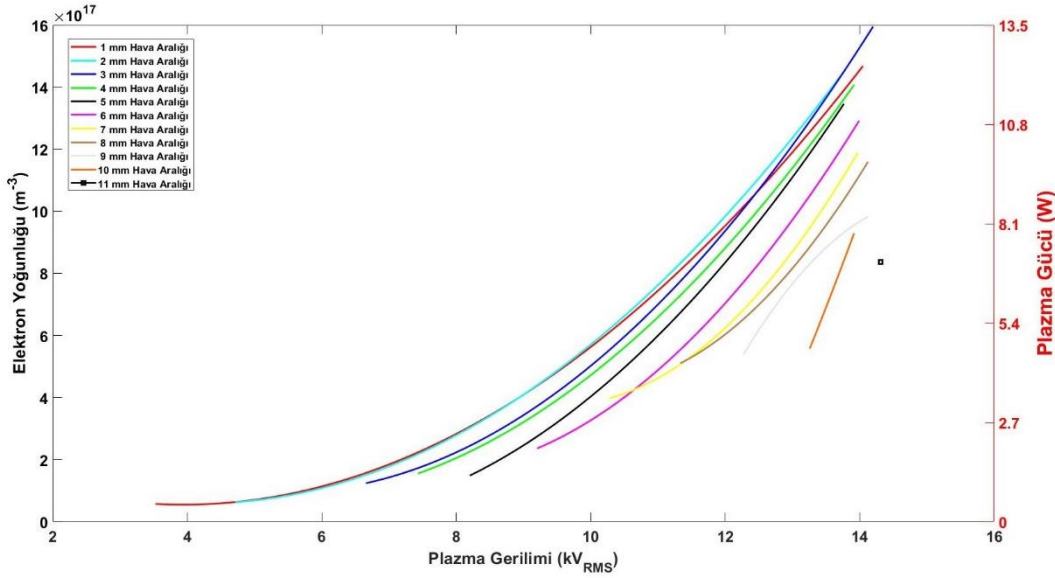
daha fazla sınırlamaktadır. Bundan dolayı Şekil 4.6’da iki polarite için plazma gerilimi artıkça ölçüm kapasitörünün yükünün sabit değerler aldığı eğriler bulunmaktadır. Sisteme seri bağlanmasından dolayı ölçüm kapasitörünün yükü sabit değer aldığı anlarda ölçüm kapasitörün akımı ve plazma akımı sabit değer alır. Bu durum plazma gerilimini sınırlar. Şekil 4.6 ve Şekil 4.7 incelendiğinde plazma gerilimi cam malzeme için 14.6110 kV_{pp} değerinde sınırlandığı pleksiglas için ise 20 kV_{pp} değerlerine ulaştığı görülecektir. Her iki Lissajous grafiği incelendiğinde yaklaşık aynı değerlerdeki ölçüm kapasitörü yükü cam ve pleksiglas için farklı gerilimlerde depolamıştır. Bu durumlar diğer tüm elektrot türlerine ait elde edilen Lissajous grafiklerinde gözlemlenmiştir.

Daire elektrot ve 0.001 m cam dielektrik malzeme için 1 kHz ’de plazma gerilimine bağlı plazma gücünün ve elektron yoğunluğunun parıltı deşarjının gözlemlendiği tüm hava aralıkları için değişimi gösteren grafik Şekil 4.8’de sunulmuştur.



Şekil.4.8. Daire elektrot ve 1 mm cam için plazma gücünün ve elektron yoğunluğun uygulanan gerilime bağlı değişimi (Tüm hava aralıkları).

Daire elektrot ve 0.001 m pleksiglas dielektrik malzeme için 1 kHz ’de plazma gerilimine bağlı plazma gücünün ve elektron yoğunluğunun parıltı deşarjının gözlemlendiği tüm hava aralıkları için değişimi gösteren grafik Şekil 4.9’de sunulmuştur.



Şekil 4.9. Daire elektrot ve 1 mm pleksiglas için plazma gücünün ve elektron yoğunluğun uygulanan gerilime bağlı değişimi (Tüm hava aralıkları).

Tüm elektrot türleri ile dielektrik malzeme türleri ve kalınlıkları için 1 kHz’de plazma gerilimine bağlı plazma gücünün ve elektron yoğunluğunun parıltı deşarjının gözlemlendiği tüm hava aralıkları için değişimi gösteren grafikler Ek-C’de sunulmuştur.

Şekil 4.8 ve Şekil 4.9 incelendiğinde cam malzeme için plazma geriliminin değişimi plazma gücü ve elektron yoğunluğu üzerinde daha radikal bir etki oluştururken pleksiglas malzeme için plazma geriliminin değişimi plazma gücü ve elektron yoğunluğu üzerinde daha yumuşak bir etki oluşturmaktadır. Her iki dielektrik malzeme türü için hava aralığı artırıldığında beklenildiği gibi parıltı deşarjı için uygulanması gereken gerilim miktarı artmaktadır. Bu artış cam dielektrik malzeme için yüksek bir değişim ile olurken pleksiglas için daha düşük değişimler ile artmaktadır. Cam dielektrik malzeme için 0.006 m’ye kadar plazma elde edilebilirken pleksiglas dielektrik malzeme için 0.011 m’ye kadar plazma elde edilmiştir. Cam dielektrik malzeme için plazma gerilimi Şekil 4.8’de görüleceği gibi 10.33 kV_{rms} ile sınırlanmıştır. Pleksiglas dielektrik malzeme için plazma gerilimi Şekil 4.9’da görüleceği gibi 14.6890 kV_{rms}’e çıkabilmiştir. Her iki dielektrik malzeme türü için aynı giriş gücü uygulanmış ve aynı çıkış güçleri elde edilmiştir. Cam malzeme için plazma gerilimi 10.33 kV_{rms}’e kadar çıkabilmiş, 0.006 m’ e kadar plazma elde edilmiş ve 13.5 W’ a kadar plazma gücü elde

edinilmiştir. Pleksiglas malzeme için plazma gerilimi 14.6890 kV_{rms} 'e kadar çıkabilmiş, 0.011 m ' e kadar plazma elde edilmiş ve 13.5 W ' a kadar plazma gücü elde edilmiştir. Ek-C incelendiğinde benzer durumlar diğer tüm elektrot türleri ve dielektrik malzeme kalınlıkları için gerçekleşmiştir.

Dielektrik malzeme türünün ve kalınlığının, hava aralığının ve elektrot yüzey alanının ve şeklinin elektron yoğunluğu üzerindeki etkileri birbirleri ve plazma gerilimi üzerinden gözlenebilmiştir. Bireysel olarak her bir faktörün elektron yoğunluğu üzerindeki etkilerini ölçebilmek için istatistiksel analize ihtiyaç duyulmuştur. Elektron yoğunluğuna etki eden faktörlerinin istatistiksel analizi ve optimizasyonu için Design Expert programı kullanılmıştır.

Optimizasyon işlemi istatistiksel analizi de içerdiğinden optimizasyon işlemi ile devam edilmiştir. Design Expert programı ile optimizasyon işlemi için Response Surface menüsünden Central Composite işlemi seçilmiştir. Dielektrik kalınlıklarının ara değerlerinin eldesinin mümkün olmadığından center point sıfır olarak ve alpha değeri face centered olarak girilmiştir. Program 112 adet veri seti oluşturmuş ve Tablo 4.2'deki veriler programa işlenmiştir.

Tablo 4.2. İstatistiksel analiz ve optimizasyon için kullanılan faktör ve cevap değerleri.

Std	Run	Factor 1 A : Plazma Gerilimi kV_{rms}	Factor 2 B : Hava Aralığı m	Factor 3 C : Dielektrik Malzeme Kalınlığı m	Factor 4 D : Dielektrik Malzeme Türü	Factor 5 E : Elektrot Türü	Response 1 Elektron Yoğunluğu m^{-3}
48	1	3.7901	0.001	0.001	Cam	Daire	6.4899E+16
19	2	9.0321	0.002	0.001	Cam	Daire	1.0118E+18
59	3	10.2201	0.006	0.001	Cam	Daire	6.2548E+17
112	4	11.7851	0.001	0.002	Cam	Daire	1.2060E+18
10	5	9.1264	0.003	0.002	Cam	Daire	5.7309E+17
43	6	11.6908	0.007	0.002	Cam	Daire	4.7492E+17
82	7	12.8976	0.001	0.003	Cam	Daire	1.2461E+18
39	8	10.2012	0.003	0.003	Cam	Daire	5.5645E+17
73	9	12.3319	0.004	0.003	Cam	Daire	8.9456E+17
32	10	5.0535	0.001	0.004	Cam	Daire	4.0424E+16
95	11	12.0302	0.001	0.004	Cam	Daire	7.7521E+17
12	12	12.9542	0.002	0.004	Cam	Daire	9.5107E+17
26	13	12.1622	0.004	0.004	Cam	Daire	6.1929E+17
60	14	14.6890	0.009	0.004	Cam	Daire	6.1874E+17

Tablo 4.2. (devam).

Std	Run	Factor 1 A : Plazma Gerilmi kV _{rms}	Factor 2 B : Hava Aralığı m	Factor 3 C : Dielektrik Malzeme Kalınlığı m	Factor 4 D : Dielektrik Malzeme Türü	Factor 5 E : Elektrot Türü	Response 1 Elektron Yoğunluğu m ⁻³
2	15	3.5261	0.001	0.001	PleksiGlass	Daire	2.5987E+16
58	16	11.2760	0.003	0.001	PleksiGlass	Daire	7.0151E+17
20	17	10.3898	0.005	0.001	PleksiGlass	Daire	5.3844E+17
94	18	14.3118	0.011	0.001	PleksiGlass	Daire	8.3640E+17
17	19	4.8083	0.001	0.002	PleksiGlass	Daire	3.9462E+16
89	20	8.0516	0.002	0.002	PleksiGlass	Daire	2.0872E+17
69	21	10.2578	0.004	0.002	PleksiGlass	Daire	3.2161E+17
34	22	14.0101	0.010	0.002	PleksiGlass	Daire	5.1809E+17
9	23	4.9215	0.001	0.003	PleksiGlass	Daire	3.2450E+16
104	24	14.1421	0.004	0.003	PleksiGlass	Daire	7.6064E+17
8	25	14.6135	0.009	0.003	PleksiGlass	Daire	5.3060E+17
16	26	6.6562	0.001	0.004	PleksiGlass	Daire	6.7511E+16
47	27	7.9007	0.002	0.004	PleksiGlass	Daire	1.0505E+17
28	28	14.3307	0.008	0.004	PleksiGlass	Daire	2.6743E+17
98	29	3.9221	0.001	0.001	Cam	Dikdörtgen	3.7905E+16
92	30	8.5041	0.002	0.001	Cam	Dikdörtgen	5.8353E+17
107	31	10.1823	0.007	0.001	Cam	Dikdörtgen	4.7570E+17
65	32	4.4689	0.001	0.002	Cam	Dikdörtgen	1.2041E+16
81	33	6.6751	0.003	0.002	Cam	Dikdörtgen	3.7527E+16
76	34	11.2760	0.007	0.002	Cam	Dikdörtgen	8.0183E+16
4	35	5.0157	0.001	0.003	Cam	Dikdörtgen	4.4816E+15
55	36	9.9938	0.003	0.003	Cam	Dikdörtgen	3.4703E+17
90	37	11.1440	0.005	0.003	Cam	Dikdörtgen	3.5740E+17
38	38	13.6896	0.010	0.003	Cam	Dikdörtgen	1.2689E+17
11	39	4.9403	0.001	0.004	Cam	Dikdörtgen	3.0777E+16
61	40	9.0887	0.002	0.004	Cam	Dikdörtgen	2.2322E+17
56	41	9.0698	0.004	0.004	Cam	Dikdörtgen	1.2921E+17
42	42	13.5199	0.009	0.004	Cam	Dikdörtgen	1.8132E+17
33	43	4.1295	0.001	0.001	PleksiGlass	Dikdörtgen	1.5821E+16
57	44	12.0491	0.004	0.001	PleksiGlass	Dikdörtgen	6.1706E+17
84	45	12.1434	0.010	0.001	PleksiGlass	Dikdörtgen	2.1215E+17
14	46	4.5255	0.001	0.002	PleksiGlass	Dikdörtgen	2.0788E+16
15	47	11.4457	0.003	0.002	PleksiGlass	Dikdörtgen	3.4352E+17
18	48	11.0874	0.005	0.002	PleksiGlass	Dikdörtgen	2.3974E+17
6	49	13.6519	0.010	0.002	PleksiGlass	Dikdörtgen	1.6857E+17
24	50	4.9780	0.001	0.003	PleksiGlass	Dikdörtgen	1.8034E+16
87	51	11.3137	0.002	0.003	PleksiGlass	Dikdörtgen	2.4185E+17
110	52	14.1044	0.004	0.003	PleksiGlass	Dikdörtgen	4.1533E+17
50	53	14.2176	0.010	0.003	PleksiGlass	Dikdörtgen	1.0977E+17
13	54	6.3168	0.001	0.004	PleksiGlass	Dikdörtgen	2.3758E+16

Tablo 4.2. (devam).

Std	Run	Factor 1 A : Plazma Gerilmi kV _{rms}	Factor 2 B : Hava Aralığı m	Factor 3 C : Dielektrik Malzeme Kalınlığı m	Factor 4 D : Dielektrik Malzeme Türü	Factor 5 E : Elektrot Türü	Response 1 Elektron Yoğunluğu m ⁻³
46	55	11.3703	0.002	0.004	PleksiGlass	Dikdörtgen	1.5378E+17
68	56	14.2176	0.009	0.004	PleksiGlass	Dikdörtgen	1.0038E+17
79	57	3.8467	0.001	0.001	Cam	Kare	6.1339E+16
7	58	8.9378	0.002	0.001	Cam	Kare	1.1501E+18
91	59	9.9938	0.006	0.001	Cam	Kare	7.3455E+17
52	60	4.1295	0.001	0.002	Cam	Kare	4.7192E+16
40	61	6.9579	0.002	0.002	Cam	Kare	2.8693E+17
64	62	7.9573	0.005	0.002	Cam	Kare	2.6339E+17
3	63	13.1428	0.010	0.002	Cam	Kare	8.1209E+17
105	64	4.6009	0.001	0.003	Cam	Kare	3.1317E+16
37	65	8.1082	0.003	0.003	Cam	Kare	2.9892E+17
83	66	12.2565	0.004	0.003	Cam	Kare	9.5669E+17
97	67	13.4445	0.008	0.003	Cam	Kare	7.7041E+17
77	68	5.3552	0.001	0.004	Cam	Kare	5.9287E+16
86	69	13.1805	0.002	0.004	Cam	Kare	1.0845E+18
49	70	13.5199	0.008	0.004	Cam	Kare	5.4686E+17
30	71	3.7524	0.001	0.001	PleksiGlass	Kare	2.9481E+16
109	72	10.2201	0.004	0.001	PleksiGlass	Kare	5.6339E+17
101	73	13.0673	0.011	0.001	PleksiGlass	Kare	6.2699E+17
85	74	4.7895	0.001	0.002	PleksiGlass	Kare	3.8229E+16
96	75	8.1836	0.003	0.002	PleksiGlass	Kare	1.7797E+17
25	76	11.4080	0.006	0.002	PleksiGlass	Kare	3.4913E+17
80	77	13.9536	0.011	0.002	PleksiGlass	Kare	4.7699E+17
36	78	5.3363	0.001	0.003	PleksiGlass	Kare	4.2440E+16
70	79	13.8970	0.002	0.003	PleksiGlass	Kare	7.6717E+17
5	80	12.8976	0.006	0.003	PleksiGlass	Kare	4.3725E+17
93	81	13.9536	0.010	0.003	PleksiGlass	Kare	3.6382E+17
41	82	6.3922	0.001	0.004	PleksiGlass	Kare	4.9568E+16
72	83	9.9184	0.005	0.004	PleksiGlass	Kare	1.1868E+17
75	84	13.9159	0.009	0.004	PleksiGlass	Kare	2.8110E+17
31	85	4.2426	0.001	0.001	Cam	Oval	4.7300E+15
27	86	7.8065	0.002	0.001	Cam	Oval	3.8999E+17
108	87	9.0133	0.006	0.001	Cam	Oval	2.0060E+17
99	88	4.9026	0.001	0.002	Cam	Oval	7.2229E+16
62	89	6.2603	0.002	0.002	Cam	Oval	1.0565E+17
88	90	8.7870	0.004	0.002	Cam	Oval	2.7911E+17
53	91	13.4256	0.009	0.002	Cam	Oval	2.7108E+17
51	92	5.2420	0.001	0.003	Cam	Oval	6.5793E+16
23	93	7.0899	0.002	0.003	Cam	Oval	1.4826E+17
100	94	9.2018	0.004	0.003	Cam	Oval	2.4809E+17

Tablo 4.2. (devam).

Std	Run	Factor 1 A : Plazma Gerilmi kV _{rms}	Factor 2 B : Hava Aralığı m	Factor 3 C : Dielektrik Malzeme Kalınlığı m	Factor 4 D : Dielektrik Malzeme Türü	Factor 5 E : Elektrot Türü	Response 1 Elektron Yoğunluğu m ⁻³
74	95	13.6142	0.009	0.003	Cam	Oval	2.4204E+17
63	96	5.3740	0.001	0.004	Cam	Oval	3.9468E+16
106	97	8.1459	0.003	0.004	Cam	Oval	1.3135E+17
22	98	13.6707	0.008	0.004	Cam	Oval	2.7670E+17
45	99	3.8844	0.001	0.001	PleksiGlass	Oval	2.5395E+16
102	100	10.0881	0.004	0.001	PleksiGlass	Oval	4.0608E+17
21	101	12.2942	0.009	0.001	PleksiGlass	Oval	3.9561E+17
66	102	4.7140	0.001	0.002	PleksiGlass	Oval	1.0623E+16
29	103	9.0698	0.002	0.002	PleksiGlass	Oval	1.3698E+17
1	104	9.2207	0.004	0.002	PleksiGlass	Oval	7.3276E+16
44	105	13.1993	0.009	0.002	PleksiGlass	Oval	1.1992E+17
78	106	5.7134	0.001	0.003	PleksiGlass	Oval	1.6361E+16
103	107	11.3326	0.002	0.003	PleksiGlass	Oval	1.8734E+17
111	108	9.4281	0.005	0.003	PleksiGlass	Oval	2.9388E+16
54	109	13.3502	0.009	0.003	PleksiGlass	Oval	1.9812E+16
67	110	5.7323	0.001	0.004	PleksiGlass	Oval	2.5201E+15
35	111	7.7499	0.003	0.004	PleksiGlass	Oval	2.5356E+16
71	112	14.0479	0.009	0.004	PleksiGlass	Oval	7.8083E+16

Tablo 4.2'deki deney verilerin işlenmesi ile elde edilen ANOVA tablosu Tablo 4.3'de sunulmuştur. İstatiksel analiz için anlamlılık standart alfa %5 değeri olarak seçilmiştir. Programda plazma faktörleri ile kuadratik bir model oluşturmuştur. Programın önerdiği karekök dönüşümü uygulanmış ve Tablo 4.3'deki değerler elde edilmiştir. ANOVA tablosu incelendiğinde programın oluşturduğu model ve plazma faktörlerinin hepsinin son derece anlamlı ve güvenilir olduğu görülecektir. Plazma oluşumu için tüm plazma faktörlerinin etkisi gerektiğinden faktörlerin anlamlılığı beklenen bir durumdur. Diğer bir bakış açısı ile plazma faktörlerinin en ufak bir değişimi elektron yoğunluğu üzerinde etkili bir değişime neden olacaktır.

Oluşan Model ile ilgili uyum istatistiği tablosu Tablo 4.4'de sunulmuştur. Uyum istatistiği tablosu incelendiğinde R^2 değerinin 0.9642 olduğu görülür. Bu değer yapılan 112 adet deney ile oluşturulabilecek en iyi model eğrisinin bir ölçüsü olup 1 değerine ne kadar yakın olursa o kadar iyi olur. Predicted R^2 değeri

0.9327 çıkmıştır. Bu değer model için oluşturulan denklemin model eğrisine olan uyumun bir ölçüsüdür ve 1 değerine ne kadar yakınsa o kadar iyidir. Adjusted R^2 değeri oluşan model denkleminin uyumluluğunu sağlamak için kullanılan bir korelasyon değeridir. Adjusted R^2 0.9521 değeri iyi bir korelasyon değeridir. Adeq Precision değeri sinyal-gürültü oranını ölçer. 4'ten büyük bir oran arzu edilir. 34.1805 olan Adeq Precision değeri oldukça yeterli bir sinyali gösterir.

Tablo 4.3. ANOVA Tablosu.

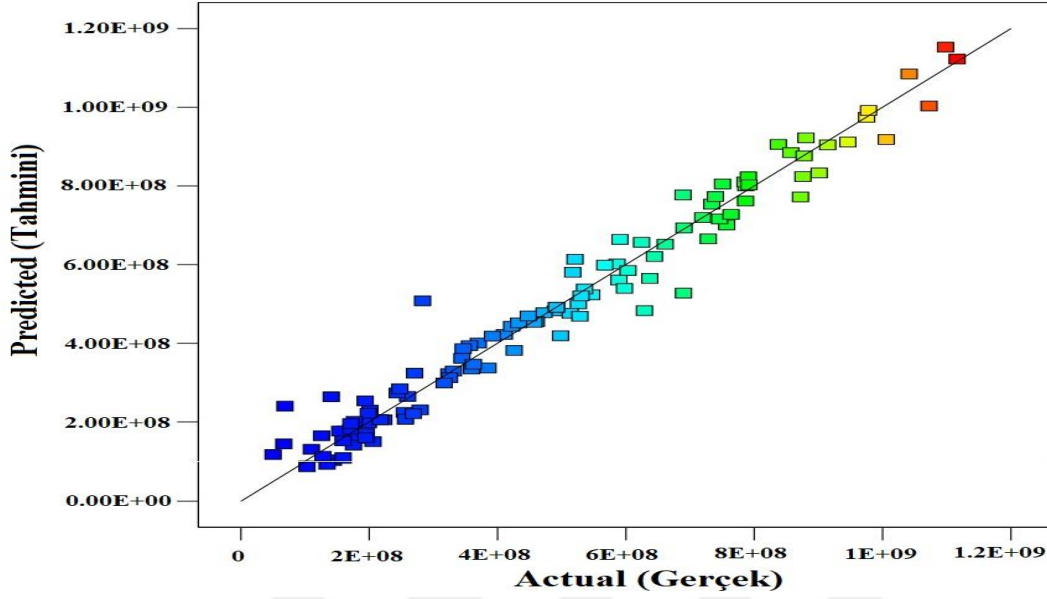
Source	Sum of Square	df	Mean Square	F-Value	p-Value	
Model	8.383E+18	28	2.994E+17	79.83	< 0.0001	significant
A- Plazma Gerilimi	3.084E+18	1	3.084E+18	822.19	< 0.0001	
B- Hava Aralığı	6.782E+17	1	6.782E+17	180.84	< 0.0001	
C- Dielektrik Malzeme Kalınlığı	8.833E+17	1	8.833E+17	235.52	< 0.0001	
D- Dielektrik Malzeme Türü	6.790E+17	1	6.790E+17	181.05	< 0.0001	
E-Elektrot Türü	7.477E+17	3	2.492E+17	66.46	< 0.0001	
AB	4.412E+14	1	4.412E+14	0.1176	0.7325	
AC	4.195E+16	1	4.195E+16	11.19	0.0012	
AD	1.097E+17	1	1.097E+17	29.24	< 0.0001	
AE	1.018E+16	3	3.395E+15	0.9052	0.4422	
BC	2.540E+15	1	2.540E+15	0.6774	0.4128	
BD	6.681E+16	1	6.681E+16	17.81	< 0.0001	
BE	1.730E+16	3	5.767E+15	1.54	0.2108	
CD	1.425E+15	1	1.425E+15	0.3800	0.5393	
CE	8.417E+15	3	2.806E+15	0.7481	0.5265	
DE	2.905E+16	3	9.684E+15	2.58	0.0589	
A ²	3.024E+11	1	3.024E+11	0.0001	0.9929	
B ²	3.737E+15	1	3.737E+15	0.9965	0.3211	
C ²	8.587E+16	1	8.587E+16	22.89	< 0.0001	
Residual	3.113E+17	83	3.750E+15			
Cor Total	8.695E+18	111				

Tablo 4.4. Uyum istatistiği tablosu.

Std. Dev.	6.124E+07	R²	0.9642
Mean	4.878E+08	Adjusted R²	0.9521
C.V. %	12.55	Predicted R²	0.9327
		Adeq Precision	34.1805

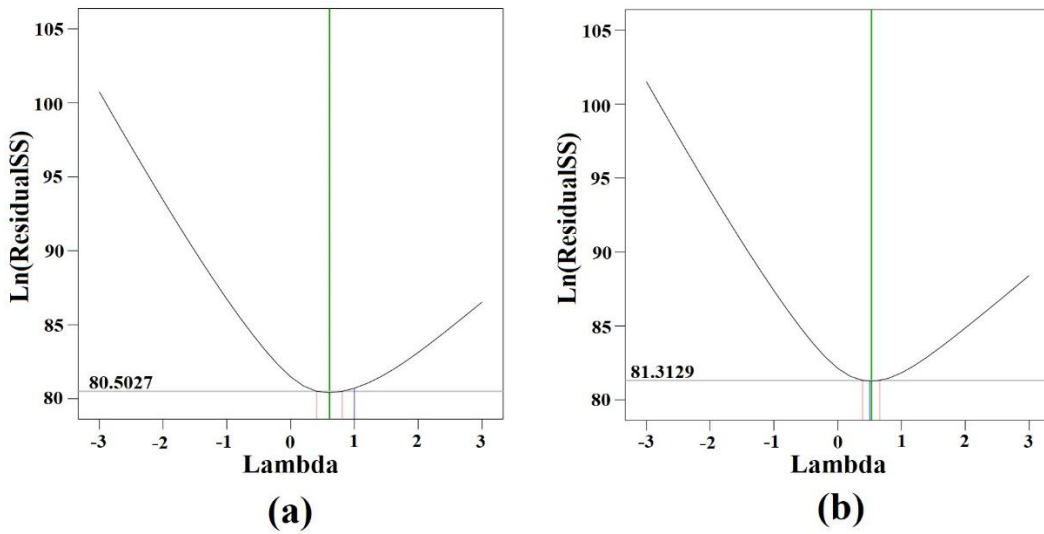
Modelin istatistiksel yeterlilikte olduğunu gösteren diğer bir kriter olan tahmini model değerlerinin gerçek model değerlerine olan uyumluluğunu gösteren

Predicted vs. Actual grafiği Şekil 4.10'da sunulmuştur. Modelle ait dönüşüm gerekliliğini ve türünü gösteren Box-Cox grafikleri Şekil 4.11'de sunulmuştur.



Şekil 4.10. Oluşan istatistiksel modelin Predicted vs. Actual grafiği.

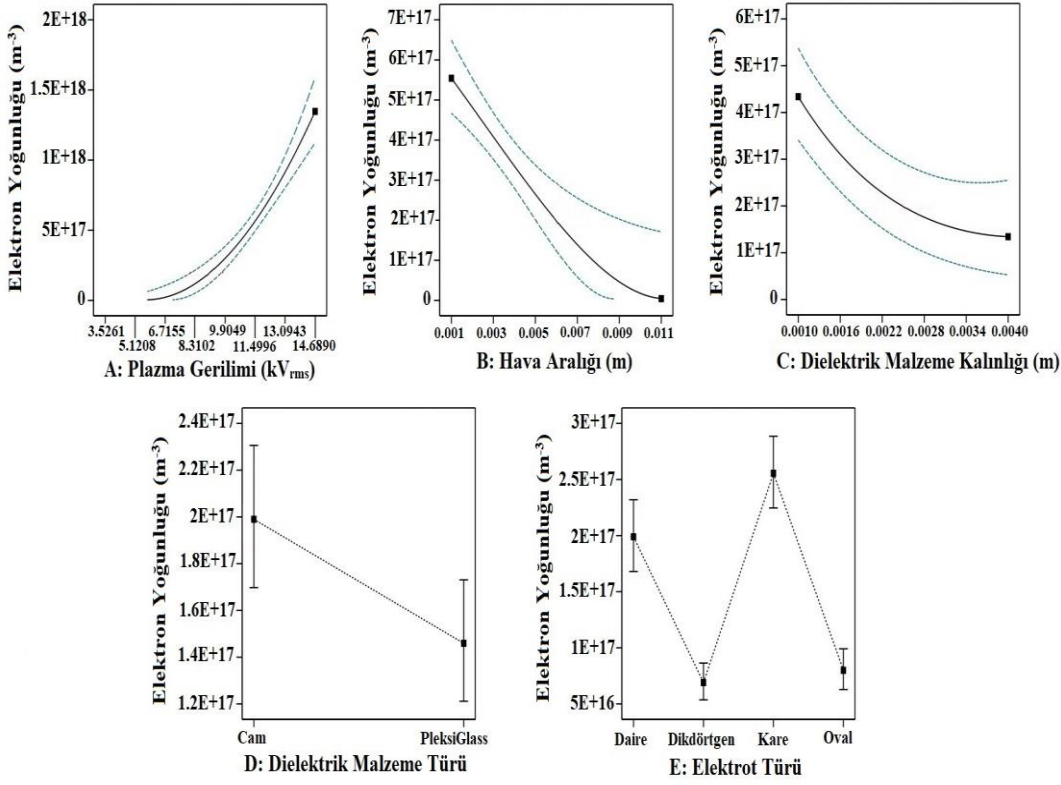
Tahmin model değeri gerçekteki model değeriyle uyumluğunu gösteren Predicted vs Actual grafiği tüm faktörlerin ortalaması ile oluşan eğim çizgisine faktörlerin olabildiğince yakın olması beklenir. Şekil 4.10 incelendiğinde faktörleri eğim çizgisine yakınlığı tatmin edici durumdadır.



Şekil 4.11. Oluşan istatistiksel modelin a) Dönüşüm uygulanmadan önceki Box-Cox grafiği, b) Dönüşüm uygulandıktan sonraki Box-Cox grafiği.

Box-Cox grafiği ile oluşan modelin varyanslarının normal dağılım sahip olup olmadığı denetlenir. Normal bir dağılım göstermeyen modeller için veri dönüştürme nerileri sunar. şekil 4.11a’da oluşan model için karekök dönüşümü önerilmiştir. şekil 4.11’de modelin varyans dağılımını gösteren mavi çizgi dönüşüm uygulandıktan sonra dağılım normaline yaklaştırılmıştır.

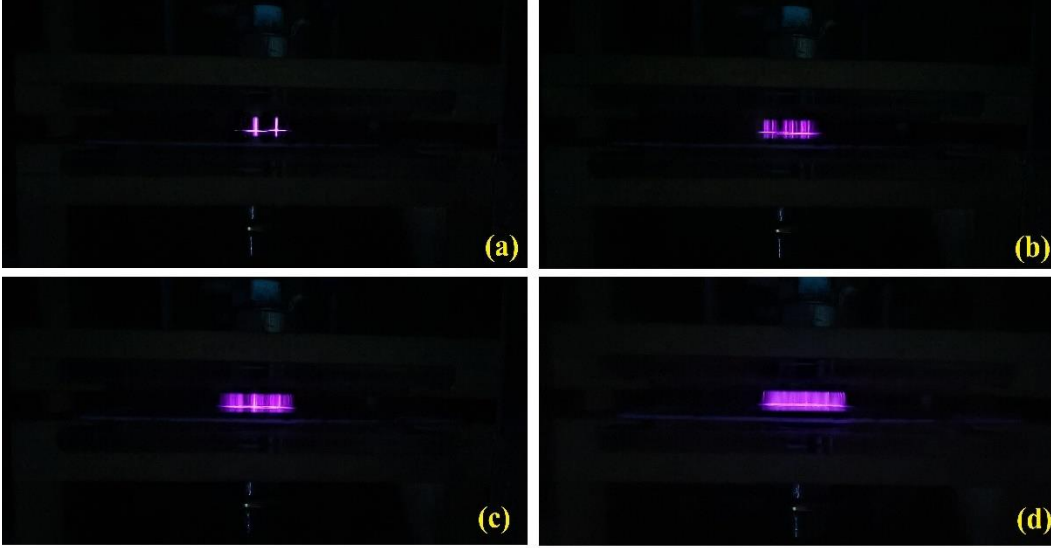
Modelin istatistik uyumlugu yeterli ve anlamlı olduğundan faktörlerinin elektron yoğunluğu üzerindeki istatistiksel etkileri incelenebilir. Plazma faktörlerinin ayrı ayrı elektron yoğunluğu üzerindeki etkilerini gösteren grafik şekil 4.12’de sunulmuştur. şekil 4.12 incelendiğinde plazma gerilimi plazma oluşumu etkileyen ana faktör olduğundan elektron yoğunluğu üzerinde en büyük etkiyi oluşturması beklenen bir durumdur. Plazma gerilimine bağlı olarak elektron yoğunluğu üstel bir artış göstermektedir. Elektron yoğunluğu plazma gerilimi ile radikal bir şekilde değişim göstermektedir. Elektrot yüzey alanı sabit olduğundan plazma hacmi hava aralığına bağlıdır. Diğer tüm etkenler sabit olduğundan hava aralığının artışı ile plazma hacminin artması plazma içerisindeki elektron sayıları yetersizliği nedeniyle elektron yoğunluğunu düşürür. Sabit elektron sayısı ile hava aralığı artması beklenildiği üzere şiddetli bir şekilde elektron yoğunluğunu düşürmektedir.



Şekil 4.12. Tüm faktörlerin ayrı ayrı elektron yoğunluğu üzerindeki etkileri.

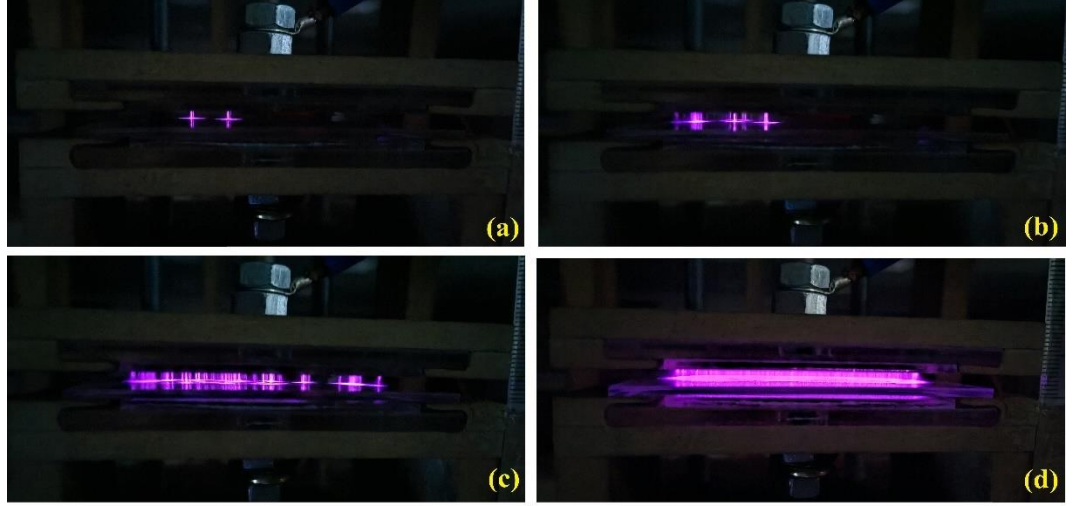
Hava aralığının elektron yoğunluğu üzerinde radikal bir etkisi olup daha büyük hacimde bir plazma üretilmek istenirse plazma geriliminin artırılması gereklidir. Plazma gerilimi elektron-iyon çiftinin oluşumuna etki eden ana faktördür. Şekil 4.12'deki dielektrik malzeme kalınlığının elektron yoğunluğu üzerindeki incelendiğinde dielektrik malzeme kalınlığının plazma gerilimi ve hava aralığına nazaran elektron yoğunluğu üzerinde daha az bir etki oluşturduğu söylenebilir. Dielektrik malzeme plazma akımını sınırlar ve kalınlığı arttıkça akım sınırlayıcı etkisi artar. Plazma akımı elektron ve iyon taşıyıcıları ile plazma içerisinde taşındığından azalan plazma akımı ile plazma içerisindeki elektron sayısının düşüş eğilimde olduğu anlaşılır. Bu neden ile dielektrik malzeme kalınlığı arttıkça elektron yoğunluğunun düşmesi beklenen bir durumdur. Dielektrik malzeme kalınlığı elektron yoğunluğunu üstel olarak, yumuşak ve nispetten dar bir değer aralığında etkiler. Dielektrik malzeme türünün molekülerinin iç yapısı ve bağlı geçirgenliği etkisi ile plazma akımını sınırlar. Plazma reaktöründe oluşturulan kapasitör sığasını etkiler ve bu neden ile plazmada oluşan kapasitör etkisinin yük depolama kapasitesi etkiler. Bu durum plazma gücünü dolayısıyla elektron yoğunluğunu etkiler. Daha büyük bağlı

dielektrik sabiti (4-10) değerine sahip olan cam dielektrik malzemenin oluşturduğu plazmalarının elektron yoğunluğunu, bağıl dielektrik sabiti (2.2-3.4) değeri daha düşük olan pleksiglas dielektrik malzemesi ile oluşturulan plazmaların elektron yoğunluğuna nazaran daha yüksektir. Bununla birlikte daha fazla plazma akımının akmasına izin veren pleksiglas dielektrik malzeme ile daha geniş ölçekte plazma gerilimi uygulanarak plazma elde edilmiştir. Cam dielektrik malzeme ile daha düşük plazma akımının akmasına izin verdiğinden, daha yüksek seviyelerde ve daha dar ölçeklerde gerilim kullanımı ile plazma elde edilmiştir. Şekil 4.12'deki elektrot türlerinin elektron yoğunluğu üzerindeki etkileri incelenirse daha büyük yüzey alanlarına sahip oval (0.001114 m^2) ve dikdörtgen (0.000800 m^2) şekle sahip elektrotların daha düşük yüzey alanına sahip daire (0.000314 m^2) ve kare (0.000400 m^2) şekline sahip elektrotlara nazaran daha düşük elektron yoğunluğu oluşturuldukları görülecektir. Diğer tüm etkenlerin sabit olduğu durumda yüzey alanının artması elektrot yüzeyindeki elektrik alan değerini düşürür. Elektrik alanı düşmesi plazma içerisindeki elektron-iyon çiftinin oluşumu düşürür. Bu durumda elektron yoğunluğunun düşmesine neden olur. Diğer bir bakış açısıyla güç dengesi denklemi düşünüldüğünde denklemin paydasında olan elektrot yüzey alanı artış gösterdiğinde elektron yoğunluğunun düşmesi beklenen bir durumdur. Yine de yüzey alanına birbirine yakın değerlerde olan daire ve kare şeklindeki elektrotlar incelendiğinde yüzey alanı daha fazla olan kare elektrot ile daha büyük elektron yoğunluğu elde edildiği görülecektir. Aynı zamanda daha düşük yüzey alanına sahip dikdörtgen şeklindeki elektrottan daha büyük yüzey alanına sahip oval şeklindeki elektrotta göre daha düşük elektron yoğunluğu elde edilmiştir. Bu durumlar elektrot yüzeyinin geometrik şekli ile açıklanabilir. Dikdörtgen ve kare şeklindeki elektrotlar kesin köşelere sahip olup daire ve oval şeklindeki elektrotlar ise yumuşak bir yüzey alanına sahiptir. Elektriksel yükler doğaları gereği uç noktalarda birikir. İyon ve elektron birikimi kare ve dikdörtgen şekillere sahip elektrotlarda köşe uçlar sebebiyle daha fazla olmuştur. Bu durum elektrot yüzeyindeki elektrik alan dağılımını da etkiler. Uç kısımlarda biriken yük miktarının fazla olması sebebiyle elektrik alan dağılımı bu bölgelerde elektrot yüzeylerinin diğer bölgelerine göre daha yüksek olur. Bu durum plazma oluşumun aşamasında daha rahat gözlenir.



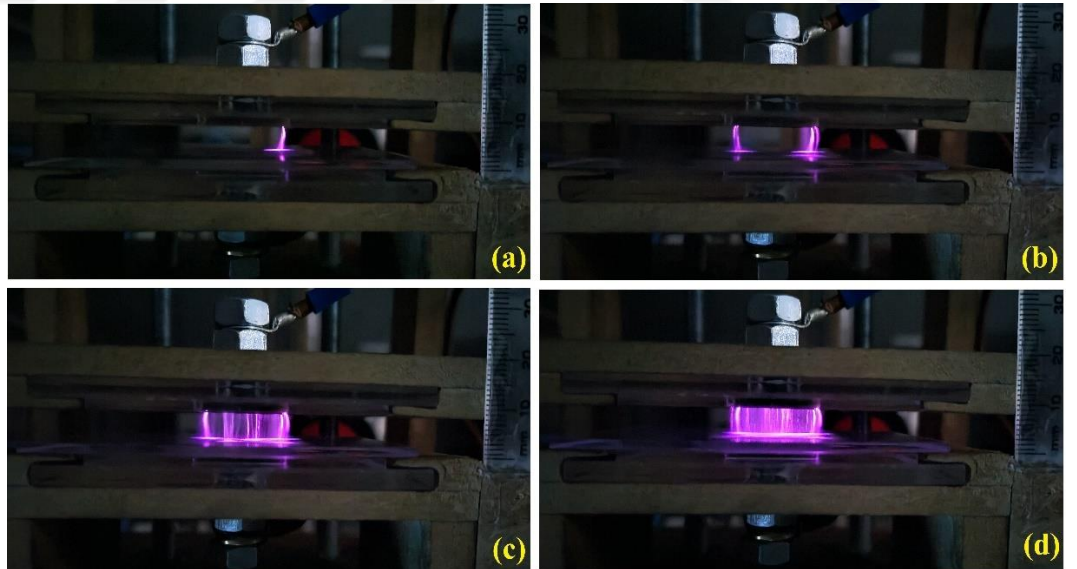
Şekil 4.13. Daire elektrotta plazma oluşumu **a)** Elektrottun orta kısımlarında tekli flama oluşumu, **b)** Elektrottun orta kısımlarında çoklu filament oluşumu, **c)** Elektron yüzeyinin tamamındaki filament deşarjı, **d)** Dağınık deşarj oluşumu.

Daire şeklindeki elektrot ile plazma oluşumu sırasında Şekil 4.13’de görüldüğü gibi elektrottun orta kısımlarında tekli flama oluşumları ile deşarj başlamıştır. Uygulanan gerilim artışı daire elektrot yüzeyin orta kısımda meydana gelen flama deşarj sayısı artarak filament deşarjları oluşmuştur. Uygulanan gerilim artması ile filament deşarjı daire elektrottun tüm yüzeyine yayılmıştır. Uygulanan gerilim artışı ile dağınık deşarj elde edilmiştir. Görüleceği üzere daire elektrodun sahip olduğu yumuşak geometri ile elektrik alan dağılımı ve deşarj dağılımı elektrot yüzeyine dağılırarak oluşmuştur.



Şekil 4.14. Oval elektrotta plazma oluşumu **a)** Elektrottun orta kısımlarında tekli flama oluşumu, **b)** Elektrottun orta kısımlarında çoklu filament oluşumu, **c)** Elektron yüzeyinin tamamındaki filament deşarjı, **d)** Dağınık deşarj oluşumu.

Oval şeklindeki elektrot ile plazma oluşumu sırasında Şekil 4.14’de görüldüğü gibi daire elektrotta benzer bir şekilde orta kısımlarında tekli flama oluşumları ile başlayan deşarjlar tüm oval elektrot yüzeyine dağılarak plazma oluşumu gerçekleşmiştir.



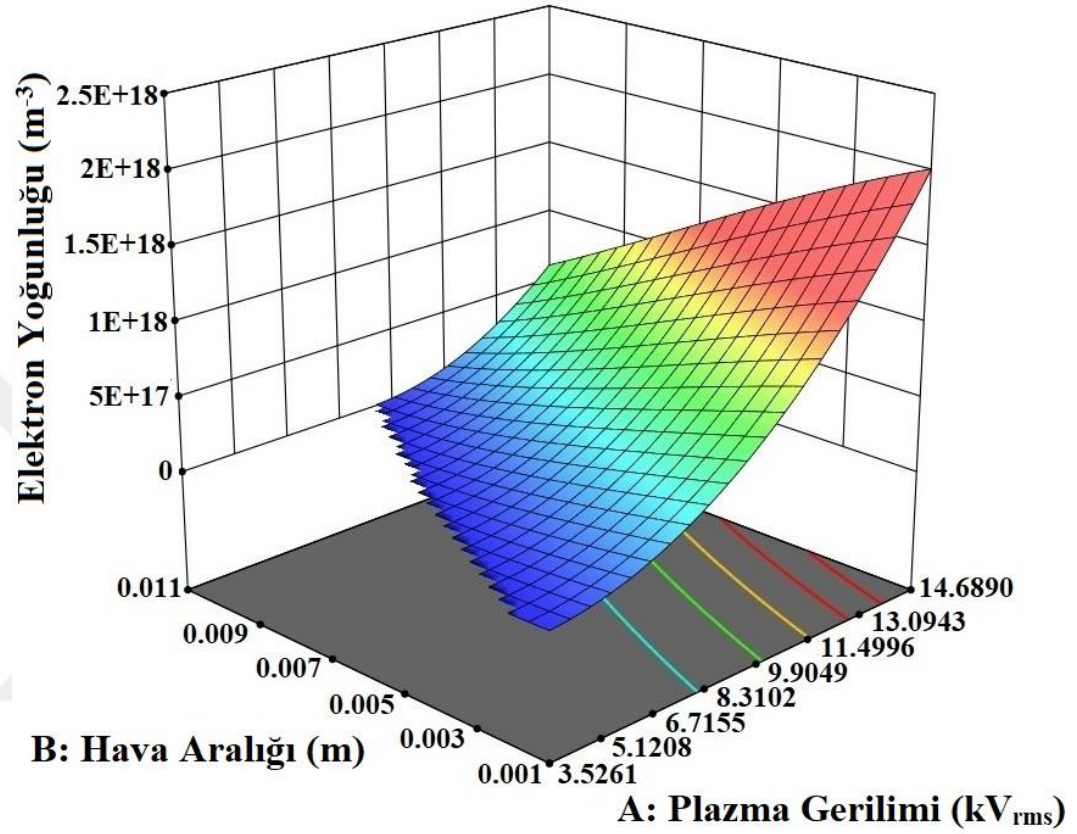
Şekil 4.15. Kare elektrotta plazma oluşumu **a)** Elektrottun uç kısımlarında tekli flama oluşumu, **b)** Elektrottun diğer uç kısımlarında çoklu filament oluşumu, **c)** Elektron yüzeyinin tamamındaki filament deşarjı, **d)** Dağınık deşarj oluşumu.

Kare şeklindeki elektrot ile plazma oluşumu uçlarında biriken yük yoğunluğu nedeniyle Şekil 4.15’de görüldüğü gibi elektrottun uç kısımda tekli flama deşarjı

ile başlamıştır. Uygulanan gerilim artışı ile kare şeklindeki elektrottun diğer uçlarında biriken yük yoğunluğu nedeniyle flama deşarjları oluşumu gerçekleşmiştir. Uygulanan gerilimin artışın devam ettirildiğinde elektrot yüzeyinin tamamına dağılan bir filament deşarjı oluşmuştur. Uygulanan gerilim daha fazla artırılması ile dağınık deşarj (diffuse discharge) elde edilmiştir. Görüleceği üzere kare şeklindeki elektrottun uç noktalarına biriken yük yoğunlukları elektron yüzeyine dağılan elektrik alanı uç noktalarda maksimum olacak şekilde bir dağılıma sahip olmasına neden olup ve deşarjlar öncelikle bu noktalarda başlamıştır. Bu durum köşeli bir yapıya sahip olan dikdörtgen elektrot içinde aynı şekilde oluşmuştur. Kare şeklindeki elektrot için uç noktalar biriken yük yoğunluğun etkisi ile daha fazla elektron-iyon oluşumu meydana gelmiş ve bu neden ile daire şeklindeki elektrotta nazaran daha fazla elektron yoğunluğu elde edilmiştir. Bir başka ifade ile kare şekline sahip elektrotta uç bölgelerde kuvvetli deşarj meydana gelmekte ve kare elektrot yüzeyinin neredeyse tamamı hala enerjilendirilerek deşarj oluşumunu elde edilebilir haldedir. Dikdörtgen şeklindeki elektrot için ise elektrik alan uç noktalara doğru kaydığından deşarj oluşumu için gereken elektrik alan değeri zayıflamıştır. Bu nedenle oval şeklindeki elektroda nazaran daha az elektron-iyon oluşumu meydana gelmiş ve daha az elektron yoğunluğu elde edilmiştir. Elektrot yüzey alanı artıkcça elektrotlara uygulanması gereken geriliminde artırılması gerekmektedir. Sisteme uygulanan elektrik alan daha düşük yüzey alanına sahip olan kare şeklindeki elektrot için yeterli iken daha büyük dikdörtgen şeklindeki elektrot için yeterli olmamıştır. Yeterli seviyede yüksek gerilim uygulanması ile dikdörtgen şeklindeki elektrottan oval şeklindeki elektrotta göre daha fazla elektron yoğunluğu elde edilebilir.

Plazma faktörleri incelendiğinde elektron yoğunluğu, plazma gerilimi ve hava aralığı faktörleri ile diğer faktörlere nazaran daha radikal bir şekilde değişim göstermektedir. Şekil 4.16'da 112 adet deney verisi oluşturulan model ile diğer tüm etkenleri sabit kaldığı durumda plazma gerilimine ve hava aralığına bağlı olarak elektron yoğunluğunun değişimini gösteren 3D grafiği sunulmuştur. 3D grafiği incelendiğinde en kısa hava aralığında en yüksek gerilimin uygulanması ile maksimum elektron yoğunluğu elde edilmektedir. Aynı şekilde en uzun hava aralığında en düşük gerilim uygulanması ile minimum elektron yoğunluğu

oluşmaktadır. Hava aralığı artıkça plazma oluşumu ve parıltı deşarjı için uygulanması gereken gerilim arttığı görülmektedir. Yeterli gerilimin uygulanmadığı gerilim değerlerinde beklenildiği gibi plazma oluşumu meydana gelmediğinde elektron yoğunluğu sıfır değeri almıştır.



Şekil 4.16. Hava aralığı ve plazma geriliminin elektron yoğunluğu üzerindeki etkilerini gösteren 3D grafiği.

Şekil 4.16 incelendiğinde yüksek elektron yoğunluğu elde edilen bölgeler kırmızı renge, ortalama elektron yoğunluğu elde edilen bölgeler yeşil renge ve düşük elektron yoğunluğu elde edilen bölgeler mavi renge sahip olduğu görülecektir. Elektron yoğunluğunun istenilen bölgelerde elde edilmesi için diğer faktör değerlerinin de bu bölgelerdeki değerlerinin belirlenmesi gerekir. Elektron yoğunluğunun istenilen bölgelerdeki en iyi değerinin elde edildiği noktanın ve bu noktaya bağlı diğer faktör değerlerinin belirlenmesi optimizasyon işlemi ile sağlanır.

Plazma oluşumuna etkileyen faktörlerin her birinin elde edilen plazma ve elektron yoğunluğu üzerinde belirleyici bir etkisi bulunmaktadır. Atmosferik basınçta ve oda sıcaklığında üretilen DBD plazmalarını etkinliği elektron yoğunluğuna bağlı olduğundan plazma faktörlerinin elektron yoğunluğu üzerinden optimizasyonu elde edilen plazma verimliliğini artırır. Optimizasyon ile bu faktör değerleri ve bu değerler ile elde edilen elektron yoğunluğu belirlenerek en iyi uygulama koşullarına sahip DBD soğuk plazmaları elde edilir. Optimizasyon işlemi için Design Expert programının ile optimizasyon sekmesindeki numerical menüsü kullanılmıştır. Optimizasyon işlemi nümerik olarak yapılmıştır. Şekil 4.16 incelendiğinde elde edilen 3D grafiğinin üç boyutlu düzgün içbükey geometriye sahip olduğu görülecektir. Şekilden de görüleceği gibi maksimum ve minimum noktaları ile kırmızı, yeşil ve mavi bölgeler için yerel maksimum ve yerel minimum noktaları vardır. Şekil 4.12 incelendiğinde her bir faktörün grafiğinde elde edilen eğrilerin değişken değerlere sahip olduğu, maksimum ve minimum değerlere sahip olduğu görülecektir. Bu neden ile 5 faktörün elektron yoğunluğu üzerindeki etkilerini gösterebilecek bir grafikte maksimum, minimum, yerel maksimum ve yerel minimum noktaları olacaktır. Bu noktalarda türevlenebilir olacaktır. Program tarafından optimizasyon işleminin uygulanabilirliğini sağlayan 1. dereceden gerekli koşullar ve 2. dereceden gerekli koşullar ile yeterliliği hesaplanıp bu koşullar sağladığından optimizasyon işlemini program tarafından gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon işlemi faktörlerin tüm değer aralıklarında elektron yoğunluğun maksimum, minimum ve tüm değer aralığı için yapılmıştır. Elde edilen faktör değerleri ve elektron yoğunlukları Tablo 4.5’de sunulmuştur.

Tablo 4.5. Optimizasyon değerleri.

Optimizasyon Türü	Plazma Gerilimi (kV_{rms})	Hava Aralığı (m)	Dielektrik Malzeme Kalınlığı (m)	Dielektrik Malzeme Türü	Elektrot Türü	Elektron Yoğunluğu (m^{-3})
Maksimize	13.176	0.001	0.001	Pleksiglass	Daire	1.3378E+18
Minimize	4.0630	0.001	0.001	Pleksiglass	Oval	3.8295E+16
Tüm Aralıklarda	8.1836	0.003	0.002	Pleksiglass	Kare	1.7797E+17

Tablo 4.5’deki optimizasyon türleri için doğrulama deneyleri yapılarak optimizasyon işlemi tamamlanmıştır. Tüm aralıklarda yapılan optimizasyon işlemi 112 adet deney ile elde edilecek soğuk plazmaları temsil eder. Buna göre tüm

aralıklarda optimizasyon koşulları ile üretilen bir soğuk plazma, uygulamada soğuk plazmanın uygulandığı işlem için etkisinin ne olduğunu bilinmediği bir durumda ilk aşamada kullanılabilir. Plazma etkisi istenilen düzeyde değil ise faktör koşulları değiştirilerek daha yoğun bir plazma elde edilebilir ya da beklenenin üzerinde bir etki oluşur ise verimlilik açısından faktör değerleri düşülerek daha düşük yoğunlukta bir plazma elde edilir.

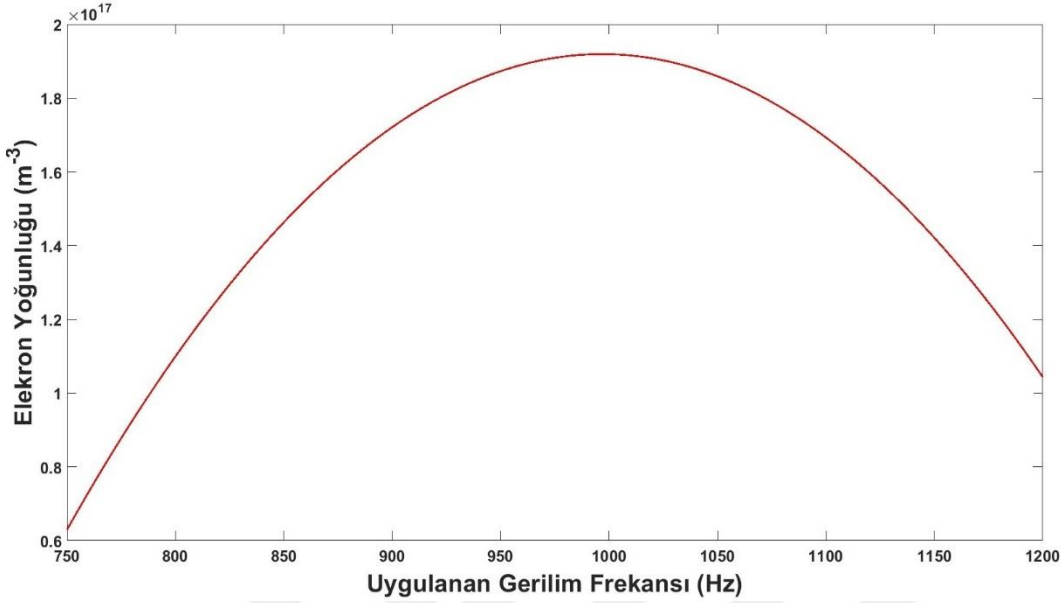
Plazma ölçümlerinde dikkat edilmesi gereken bir başka hususta plazma oluşumunda meydana gelen deşarj miktarının ve şiddetinin rassal dağılımından dolayı aynı koşullar altında deşarjların etkilediği ölçümlerde farklı değerlerin oluşabileceğidir. Plazma akımı deşarj sayısından ve genliğinden etkilendiğinden plazma gücü ve hesaplanan elektron yoğunluğu değerleri deşarjın rassal doğasına bağlı olarak tüm faktör değerleri ve çalışma koşullarının aynı kalmasına rağmen değişkenlik gösterir. Ölçümlerde meydana gelen bu değişim farklılığı dar bir aralığa sahiptir. Atmosferik basınçta, oda sıcaklığında, tek dielektrik bariyer HDBD yöntemi ile kare elektrot, 0.002 m pleksiglas, 0.003 m hava aralığı ve 1 kHz 8.1836 kV_{rms} optimum değerlerinde elde edilen soğuk plazmanın farklı anlarda ölçümünden elde edilen elektron yoğunlukları Tablo 4.6'da sunulmuştur.

Tablo 4.6. Farklı ölçüm anları için elde edilen elektron yoğunlukları.

Ölçüm Sırası	Elektron Yoğunluğu (m ⁻³)
1	1.9060E+17
2	1.6458E+17
3	1.6544E+17
4	1.7905E+17
5	1.7937E+17
6	2.1404E+17
7	1.8110E+17

Yüksek gerilim trafoları ile oluşturulan AA sistemde DBD plazmaların elektron yoğunluğuna etki eden diğer bir faktörde uygulanan gerilim frekansıdır. Bu faktör optimizasyon işlemi için yapılması gereken deney sayısını aşırı bir biçimde artırdığından ve optimizasyon işlemini zorlaştırdığından optimizasyon için kullanılmamış bunun yerine diğer faktörler ile belirlenen optimum koşul için incelenmiştir. Uygulanan gerilim frekansını elektron yoğunluğu üzerindeki

etkisini incelemek için Matlab programı kullanılmış ve elde edilen grafik değerleri Şekil 4.16’da ve Şekil 4.17’de sunulmuştur.

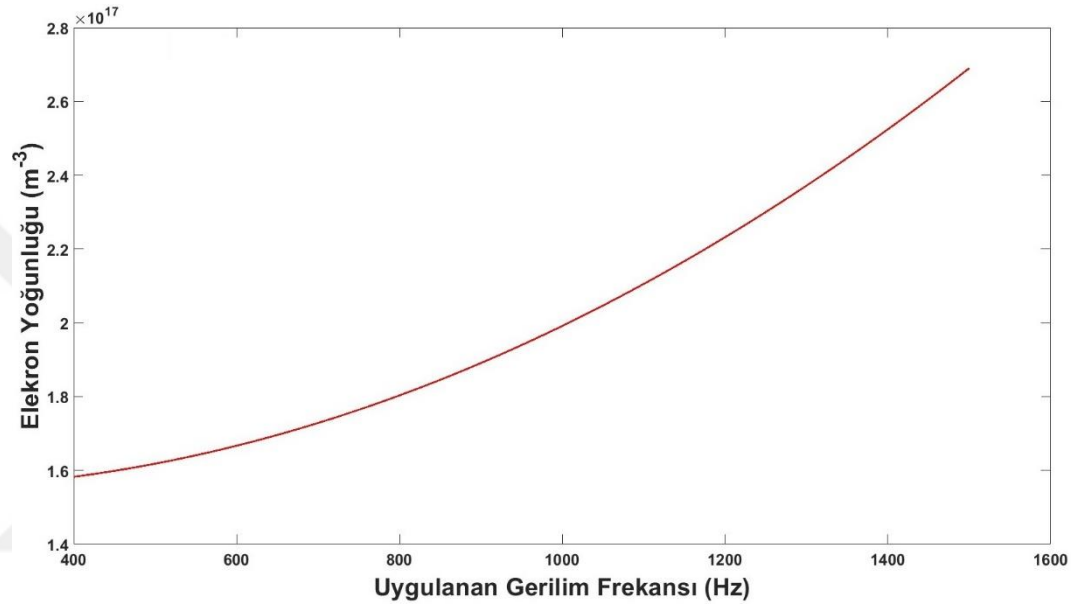


Şekil 4.17. Kare elektrot, 2 mm pleksiglas ve 3 mm hava aralığı faktör değerleri ile elde edilen hava soğuk plazmasının uygulanan gerilim frekansına bağlı olarak elektron yoğunluğunun değişimi.

Tüm aralıklarda yapılan optimizasyonun faktör değerleri kare elektrot, 0.002 m pleksiglas, 0.003 m hava aralığı ve 8.1836 kV_{rms} değerlerinde elde edilen plazmalar 1 kHz gerilim frekansında elde edilmiştir. Yüksek gerilim trafolarının endüktif etkisi ve soğuk plazmalarının kapasitif etkisi ile oluşan sistem bir RLC devresi oluşturup plazma kapasitansının uygulanan gerilim frekansına göre değişmesi beklenen bir durumdur. Bu durum plazma akımını ve gerilimini değiştirerek plazmanın elektron yoğunluğunu etkiler. Plazmanın 8.1836 kV_{rms} gerilim değeri için 750 Hz ile 1200 Hz frekans aralığında plazma varlığını devam ettirmiştir. Bu frekans aralığında plazmanın gerilimi ve akımı değişmiştir. Kare elektrot, 0.002 m pleksiglas ve 0.003 m hava aralığı faktör değerleri için 750 Hz ile 1200 Hz frekans aralığının dışında plazma oluşumu gözlenmemiştir. Uygulanan gerilim frekansına bağlı olarak elde edilen elektron yoğunluğunun değişimi Şekil 4.17’de görüldüğü gibidir ve 1 kHz frekansında maksimum değerdedir.

Tüm aralıklarda yapılan optimizasyonun faktör değerleri kare elektrot, 0.002 m pleksiglas ve 0.003 m hava aralığı değerlerinde 8.1836 kV_{rms} plazma gerilim

değerinin farklı frekans değerlerinde uygulanan gerilim frekansına bağlı elektron yoğunluğu değişimi Şekil 4.18’de görüldüğü gibidir. 8.1836 kV_{rms} ve 400 Hz değerleri ile 8.1836 kV_{rms} ve 1600 Hz değerleri arasında plazma oluşumu gözlemlenmiştir. Bu aralıkların dışında kare elektrot, 0.002 m pleksiglas ve 0.003 m hava aralığı faktör değerleri için plazma oluşumu gözlenmemiştir. Şekil 4.18’de görüldüğü sabit 8.1836 kV_{rms} geriliminde frekans artışı elektron yoğunluğunu üstel bir etki ile artırmaktadır.

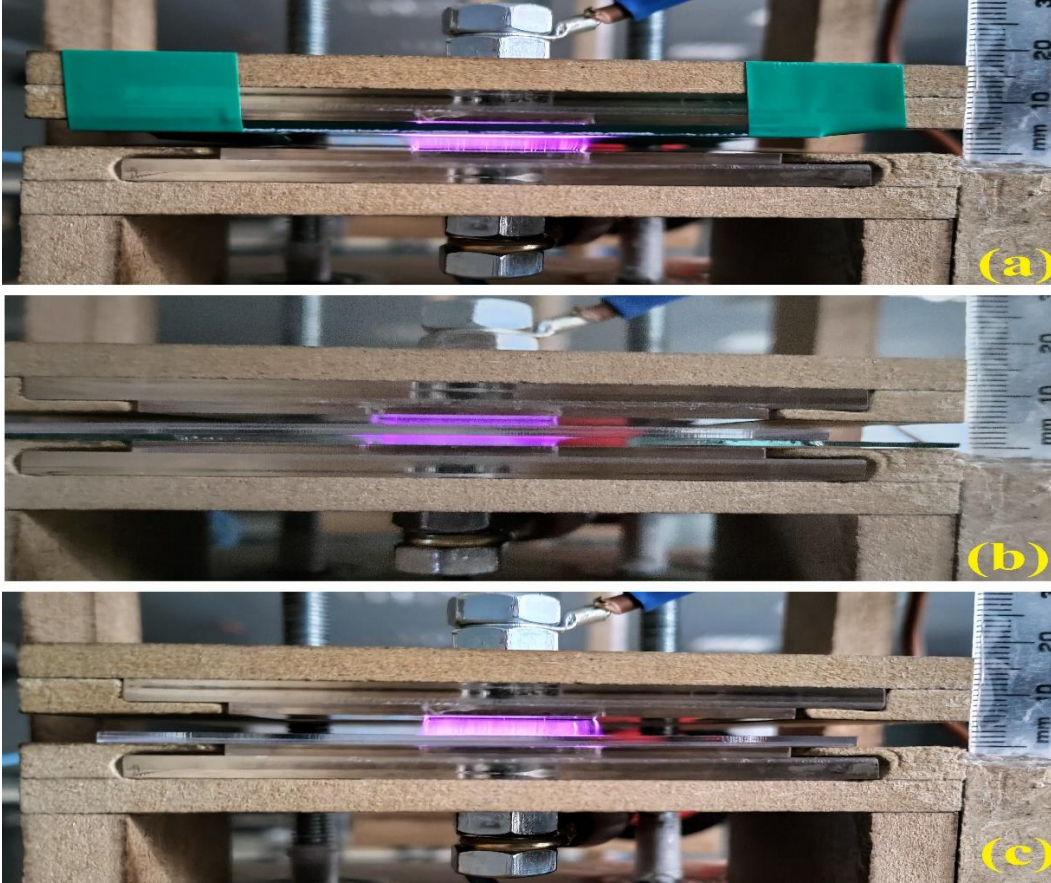


Şekil 4.18. Kare elektrot, 2 mm pleksiglas, 3 mm hava aralığı ve 8.1836 kV_{rms} faktör değerleri ile elde edilen hava soğuk plazmasının uygulanan gerilim frekansına bağlı olarak elektron yoğunluğunun değişimi.

Uygulanan gerilim için bir başka değişkende uygulanan gerilimin dalga şeklidir. Trafo girişine uygulanan kare, üçgen ve sinüs dalga şekilleri için plazma gerilimi sinüs dalga şeklini koruduğu gözlemlenmiştir. Plazma değişkenleri kare elektrot, 0.002 m pleksiglas, 0.003 m hava aralığı ve 1 kHz 8.1836 kV_{rms} alınarak uygulanan giriş gerilimin dalga şekli kare, üçgen ve sinüs dalgası için hesaplanan elektron yoğunlukları Tablo 4.7’de sunulmuştur. Elde edilen elektron yoğunluklarının plazma oluşumundaki rassal deşarjlara bağlı olarak ölçüm değişimleri gösterdiği düşünüldüğünde, uygulanan gerilimin dalga şeklinin elektron yoğunluğunu etkilemediği söylenebilir.

Tablo 4.7. Uygulanan gerilimin dalga şekline göre optimum değerlerde elde edilen elektron yoğunlukları.

Giriş Gerilimin Dalga Şekli	Elektron Yoğunluğu (m^{-3})
Kare	1.9568E+17
Sinüs	2.0691E+17
Üçgen	2.1166E+17



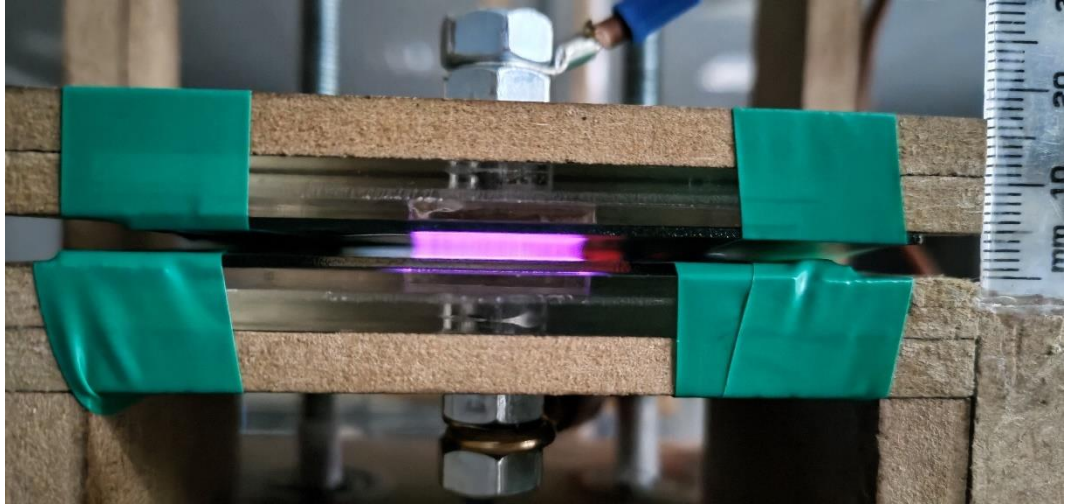
Şekil 4.19. Optimum değerler için dielektrik bariyerin farklı konumlarına göre hava soğuk plazmasının elde edilmesi **a)** Dielektrik bariyer üst elektrot yüzeyini örtmektedir, **b)** Dielektrik bariyer iki elektrot arasında orta noktada konumlanmıştır, **c)** Dielektrik bariyer alt elektrot yüzeyini örtmektedir.

Tek dielektrik bariyer HDBD yönteminde dielektrik bariyer alt elektrotta, üst elektrotta ya da iki elektrot arasında yerleştirilebilir. Optimum değerlerde elde edilen hava soğuk plazmasının dielektrik bariyerin farklı konumlarına ait görseller Şekil 4.19'da sunulmuştur. Tablo 4.8'de dielektrik bariyerinin elektrotlar arasında yer değiştirmesi ile elde edilen elektron yoğunlukları verilmiştir. Plazma oluşumundaki rassal deşarjlara bağlı olarak meydana gelen ölçüm değişim düşünüldüğünde dielektrik bariyer konumunun elektron yoğunluğunu değiştirmedeği söylenebilir.

Tablo 4.8. Optimum plazma faktör değerler için dielektrik bariyerin farklı konumlarına göre elde edilen elektron yoğunlukları.

Dielektrik Bariyer Konumu	Elektron Yoğunluğu (m^{-3})
Alt Plaka	1.7910E+17
Elektrotların orta noktasında	1.8175E+17
Üst Plaka	1.7732E+17

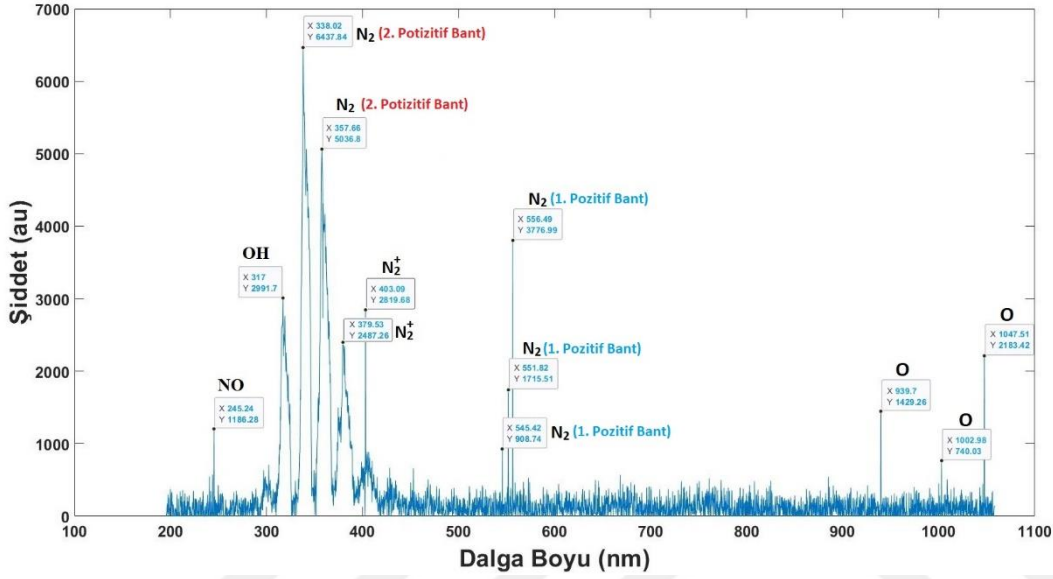
Dielektrik malzeme kalınlığının etkisinin elektrotlar arasındaki toplam dielektrik malzeme kalınlığına bağlı olduğunu göstermek için optimum plazma faktör değişkenleri kare elektrot, 0.003 m hava aralığı ve 1 kHz 8.1836 kV_{rms} kullanılarak 0.002 m pleksiglas dielektrik malzeme iki parça şeklinde 0.001 m pleksiglas alt plaka yüzeyine ve 0.001 m pleksiglas üst plaka yüzeyine yerleştirilmiştir. Elde edilen çift bariyer HDBD hava soğuk plazmasına ait görsel Şekil 4.20’ de sunulmuştur. Çift bariyer HDBD sistemi ile elde edilen elektron yoğunluğu $1.8963E+17 m^{-3}$ ’dir. Bu değer ile ölçümlerde oluşabilecek değişim farklılıkları düşünüldüğünde farklı konumlarda ve farklı kalınlıklara ayrılarak kullanılsa bile elektrotlar arasındaki toplam dielektrik malzeme kalınlığı etkisinin değişmediği çıkarımı yapılabilir. Kullanılan iki metal elektrot yüzeyinin dielektrik malzeme ile kaplanması ile daha homojen dağılım gösteren parıltı deşarjları elde edilmiştir.



Şekil 4.20. Optimum değerlerde 1 mm pleksiglas dielektrik malzeme alt plaka yüzeyini ve 1 mm pleksiglas dielektrik malzeme üst plaka yüzeyini kaplayacak şekilde oluşturulan çift bariyer HDBD ile elde edilen hava soğuk plazması.

Hava soğuk plazmasının içeriğindeki radikal, reaktif ve nötr moleküllerin tespit edilip kimyasal içeriği hakkında bilgi edinmek için optik emisyon

spektrometri yöntemi kullanılmıştır. Ocean Optics USB4000 spektrometre ile daire elektrot, 0.002 m pleksiglas, 0.002 m hava aralığı ve 1 kHz 13.8970 kV_{rms} değerlerinde üretilen hava soğuk plazmasının OES analizi yapılmıştır. Elde edilen spektrum grafiği Şekil 4.21’de sunulmuştur. Hava karışımının %78 Azot ve %21 Oksijen içermesinden dolayı NO, OH, N₂⁺, O radikalleri ile N₂ 1.pozitif bant ve 2.pozitif bant sistemleri elde edilmiştir.



Şekil 4.21. Daire elektrot, 2 mm pleksiglas, 2 mm hava aralığı ve 1 kHz 13.8970 kV_{rms} değerlerinde üretilen hava soğuk plazmasının spektrumu.

Hava ortamında üretilen her plazma türünün hava ile etkileşimden kaynaklı spektrometresinde 200 nm ile 400 nm aralığında NO, OH ve N₂ radikallerine rastlanır. Hava soğuk plazması oluşturulduğundan Şekil 4.21’de görüldüğü en belirgin ölçümler 200 nm ile 400 nm aralığında NO, OH ve N₂ radikallerine aittir. Bu radikallerin baskın etkisi ve UV ışımaları ile hava soğuk plazması mor renk ve tonlarında elde edilmiştir.

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada soğuk plazmaların yapısı, türleri, parametreleri, üretim ile ölçüm yöntemleri ve kullanım alanları hakkında geniş teorik bilgiler verilmiş, bu bilgiler ışığında hava soğuk plazmasının üretim, ölçüm, parametre hesapları ve optimizasyon işlemlerinin yapılışı sunulmuştur. Hava soğuk plazması DBD paralel plaka yöntemi ile tek dielektrik bariyer HDBD şeklinde oluşturulmuştur. Atmosferik basınç ve oda sıcaklığında plazma üretimi gerçekleştirildiğinden DBD soğuk plazmalarının etkinliği elektron yoğunluğu üzerinden belirlenmiştir. Hava soğuk plazmasının elektron yoğunluğunu etkin eden faktörler analiz edilmiştir. Bu kapsam dielektrik malzemeler $0.060\text{ m} \times 0.080\text{ m}$ yüzey alanına sahip 0.001 m , 0.002 m , 0.003 m ve 0.004 m kalınlıklarda cam ve pleksiglas malzemeden üretilmiştir. Metal elektrotlar 0.002 m kalınlıktaki alüminyum levhadan daire, dikdörtgen, kare ve oval geometrilerde sırasıyla 0.000314 m^2 , 0.000400 m^2 , 0.000800 m^2 ve 0.001114 m^2 yüzey alanlarında imal edilmiştir. Plakaların paralel ve düzlemsel hareketini sağlamak için mekanik bir reaktör tasarlanmıştır. Dielektrik malzeme ve metal elektrotlar tasarlanan reaktöre yerleştirilerek plazma oluşturulmuştur. Hacimsel hava plazması elde edilmiş olup hava aralığı 0.001 m ile 0.011 m arasında 0.001 m aralıklarda artırılmıştır. Plazma oluşumu için gerekli enerji yüksek gerilim trafoları ile sağlanmıştır. Yüksek gerilim trafoları ile 14.6890 kV_{rms} (20.7765 kV_{pp})'a kadar gerilim ile soğuk plazma elde edilmiştir. Gerilim frekansları 400 Hz ile 1500 Hz arasında kullanılarak plazma elde edildi. Plazma güç ölçümü için ölçüm kapasitörü ve Lissajous yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen hava soğuk plazmalarının elektron yoğunlukları güç dengesi yöntemi ile hesaplandı. Hava soğuk plazmasının elektron yoğunlukları $1.7059\text{E}+15\text{ m}^{-3}$ ile $1.6313\text{E}+18\text{ m}^{-3}$ arasında hesaplanmıştır. Plazma oluşumunu sağlayan plazma gerilimi, hava aralığı, dielektrik malzeme türü, dielektrik malzeme kalınlığı ve elektrot türleri faktörlerin elektron yoğunluğu üzerindeki etkileri analiz edilerek plazma faktör değerleri optimize edildi.

Elde edilen deneysel sonuçlara göre plazma oluşumunu ve elektron yoğunluğunu domine eden faktör plazma gerilimidir. Elektron yoğunluğu plazma gerilimi ile dramatik bir artış göstermiştir. Plazma gerilimi oluşturulan plazmanın deşarj karakteristiğini de etkilemiştir. Hava plazmalarında genellikle filament

deşarj modu gözlemlenir. Uygulanan yüksek gerilim artırılması ile dağınık moddeşarjları ve homojen moddeşarjları gözlemlendi.

Hava aralığı değeri artırıldıkça plazma oluşumu için uygulanması gereken gerilim miktarının artırılması gerekir. Diğer faktörlerin sabit olduğu durumda hava aralığının artırılması üstel olarak elektron yoğunluğu düşürmüştür. Gerekli diğer faktör değerlerinde hava aralığının artırılması ile daha büyük hacimde plazma elde edilmiştir. 0.010 m ve üzeri hava aralıklarında uygulanması gereken gerilim seviyeleri trafolardan uygulanan gerilimin maksimum seviyesinin üstünde olduğundan elde edilen plazmalar homojen veya dağınıkdeşarj modundan filamentdeşarj moduna ve ardından tekli flamadeşarjları oluşabilmiştir.

Dielektrik malzeme türü ve kalınlığı plazma akımın ve gerilimi sınırlamaktadır. Cam dielektrik malzeme ile oluşturulan plazmalar için elde edilen Lissajous grafikleri ve elektron yoğunluğu grafikleri incelendiğinde cam malzemenin 10.33 kV_{rms} (14.6110 kV_{pp}) değerlerinde plazma gerilimi sınırladığı görüldü. Bu değer üzerinde gerilim uygulanmaya çalışıldığında plazma gerilimi ve frekansında bozulmalar meydana gelmiştir. Sınırlama değerlerinin üzerinde plazma kapasitif etkisi ile kaynağı sönümleyici akım oluşturmuştur. Cam malzeme ile elde edilen plazmalar için yüksek değerlerde ve dar bir aralıkta gerilimler uygulandı. Pleksiglas dielektrik malzeme ile oluşturulan plazmalar için elde edilen Lissajous grafikleri ve elektron yoğunluğu grafikleri incelendiğinde pleksiglas malzeme ile plazma gerilimi 14.6890 kV_{rms} (20.7765 kV_{pp})'e değerlerine kadar çıkabilmiştir. Pleksiglas malzeme ile elde edilen plazmalar için düşük değerlerden başlayan geniş bir aralıkta gerilimler uygulandı. İki dielektrik malzeme aynı giriş gücünde cam malzeme için daha yüksek ve sınırlı gerilimler ile plazma oluşturulurken pleksiglas malzeme için daha düşük ve geniş aralıkta sınırlanmadan plazmalar oluşturuldu. Dielektrik malzeme kalınlığı artırıldıkça plazma akımının daha çok sınırlandığı bu neden ile plazma gücü ve elektron yoğunluğunun logaritmik bir şekilde düştüğü gözlemlendi. Dielektrik malzeme kalınlığı, plazma gerilimi etkisi ve hava aralığı etkisine nazaran daha dar bir aralıkta etkiye sahiptir.

Elektrot yüzey alanı ve geometrik şekli elektrotlara uygulanan elektrik alan miktarı ve dağılımını belirler. Bu sayede elektron-iyon çiftinin oluşumu sağlar ve elektron ve iyon yoğunluğunu etkiler. Diğer plazma faktörlerinin sabit değerlerde aldığı durumda yüzey alanı daha küçük olan daire ve kare şeklindeki elektrotlardan dikdörtgen ve oval şeklindeki elektrotlara nazaran elektron yoğunluğu daha yüksek plazmalar elde edilmiştir. Kare ve dikdörtgen geometriye sahip elektrotlar sahip oldukları kesin uçlarda sebebi ile daire ve oval geometrilere sahip elektrotlara göre daha fazla yük depolayabilmektedirler. Ancak kare ve dikdörtgen şeklindeki elektrot yüzeyinde elektrik alan dağılımı heterojen olup uç kısımlara yoğunlaşır. Bu sebep ile kesin uçlara sahip geometrilerde homojen deşarj elde edilmesi daha zordur. Yüzey alan değerleri birbirine yakın olan kare ve daire şekillerine sahip elektrotlardan yüzey alanı daha büyük olmasına rağmen uç kısımlarında depolanan yük miktarı ile kare geometrili elektrottan daha fazla elektron yoğunluğu elde edilmiştir. Yüzey alan değerleri birbirine yakın olan dikdörtgen ve oval geometrilere karşılaştırıldığında ise yüzey alanı daha düşük olan dikdörtgen şeklindeki elektrottan elde edilen plazmada, oval şeklindeki elektrot ile elde edilen plazmanın elektron yoğunluğundan daha düşük elektron yoğunluğu olduğu gözlemlendi. Yüzey alanı daha büyük olan dikdörtgen ve oval geometrili elektrotlar için trafo ile uygulanan gerilim seviyeleri yeterli olmamış ve dikdörtgen geometrili elektrot sahip olduğu enerjinin bir miktarını uç kısımlarına yük depolamaya harcamıştır. Oval elektrotta ise uygulanan gerilim ile oluşan enerji deşarj oluşumu için kullanılmıştır.

Plazma oluşumuna etki eden tüm faktörlerin elektron yoğunluğu üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu gözlemlendi. Bu neden ile bu faktör değerlerinin seçimi plazma etkinliğini belirlemede önem teşkil etmektedir. Bu amaç ile plazma faktör değerleri elektron yoğunluğu için optimize edildi. Optimizasyon işlemi elektron yoğunluğunu maksimize, minimize ve tüm aralıkları için yapılmıştır. Tasarlanan sistemin tüm aralıklardaki optimum değeri 1 kHz 8.1836 kV_{rms} 'de kare elektrot (0.000400 m^2 yüzey alanı), 0.002 m pleksiglas ve 0.003 m hava aralığı alınarak $1.7797\text{E}+17 \text{ m}^{-3}$ elektron yoğunluğu sahip hava soğuk plazması elde edildi. Soğuk plazma uygulamalarında uygulamaya bağlı başka faktörlerin varlığında, elektron yoğunluğuna etkisi göz önüne alınarak plazmanın optimizasyonda bu faktörlerin etkileri dikkatte alınmalıdır.

6. TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Soğuk plazmalarının Langmuir probu ile direkt ölçümü daha kesin ve doğru sonuçlar elde verebilir ancak Langur probunun fiziksel olarak plazmaya temas etmek zorunluluğu, paralel plakalar arasındaki elektriksel alanın yüksek seviyedeki parazit etkileri, hava soğuk plazması ile oluşan yüksek ozon yoğunluğu ile oksitlenme durumu, ölçüm hesaplamalarının karmaşık olması, temin edilmesini zor ve maliyetli olması nedenleriyle bu çalışmada tercih edilmemiştir.

Optik ölçüm yöntemleri düşük plaka aralık değerleri için ($< 3 \text{ mm}$) uygulanmasının çok zor olması, hava plazmasının yoğun bir UV ışınımına sahip olması, plazmadan yayılan ışıkların fiber kablolar ile ölçülmesinin zor olması ve bir odaklama sistemine ihtiyaç duyması, hava plazmasındaki RONS reaktifleri sebebiyle geniş bir spektrum analizine ihtiyaç duyulması, tespit edilen radikal ve reaktif türlerinin NIST atomic spektrum data base tablolarında gerekli değerlerinin belirlenmesinin çok zor olması nedeni ile plazmanın elektron yoğunluğu ölçümlerinde kullanılmamıştır.

Elektron yoğunluğu belirlenmesi için literatürdeki diğer bir yöntem olan güç dengesi yöntemi ile elektron yoğunluğu belirlenmiştir. Pratikliği, oluşan plazmayı etkilememesi, ekstra bir ekipman kullanımının gerekmemesi ve ölçüm hesaplamalarının kolay olmasından dolayı birçok çalışmada elektron yoğunluğu hesabında güç dengesi yöntemi tercih edilmiştir (Garamoon A. A. and El-zeer D. M., 2009; Fontanarosa, D., et al., 2020; Vanraes, P., et al., 2018; Wang, X., et al., 2015; Neretti, G., Taglioli, M. and Borghi, C. A., 2018; Rajasekaran, P., Bibinov, N. and Awakowicz, P., 2012; Thapa, B. B. and Tyata, R. B., Dec. 2019; Shrestha, R., et al., 2017; Subedi, D. P., Joshi, U. M. and Wong, C. S., 2017). Hava soğuk plazmasının hesaplanan elektron yoğunluğu değerleri $1.7059\text{E}+15 \text{ m}^{-3}$ ile $1.6313\text{E}+18 \text{ m}^{-3}$ arasında olup bu değerler, literatürdeki hava soğuk plazma çalışmalarında elde edilen elektron yoğunluğu değerleri aralığındadır (Vera, L. P., et al., 2014; Rajasekaran, P., et al., 2010; Shrestha, R., et al., 2017; Rajasekaran, P., Bibinov, N. and Awakowicz, P., 2012; Thapa, B. B. and Tyata, R. B., Dec. 2019; Kadhim, M. M., Abbas, Q. A. and Abdulameer, M. R., 2022; Wang, X., et

al., 2015; Rajasekaran, P., Bibinov, N. and Awakowicz, P., 2012; Subedi, D. P., Joshi, U. M. and Wong, C. S., 2017; Keller, S., et al., 2012).

Plazma oluşumunda meydana gelen deşarjların sayısı ve genlikleri rassal olduğundan plazma akımı üzerinde çok sayıda sıçramalar (spikes) olmuştur. Elektrotlara uygulanan gerilim artırıldığında deşarj sayısı ve şiddetleri de artarak plazma akımının üzerinde bozulmalara yol açmıştır. Plazma üzerinde oluşan deşarjlar nanosaniyelik ömürlere sahiptir. Budan dolayı da plazma akımı üzerinde nanosaniyelik aralıklarla bozulmalar oluşmuştur. Plazma akımlarının değerleri mA düzeylerinde ölçülmüştür. Yüksek gerilimlerde çok düşük seviyede akım ölçümü plazma parametrelerinin ölçümlerinin zorlaşmasına neden olmaktadır. Plazma akımının anlık değeri oluşan deşarj sürelerine duyarlı Rogowski bobininden yapılmış bir akım monitörü ile gözlenebilir. Bu tip akım monitörlerinin temini zor ve yüksek maliyetlidir. Bu neden ile plazma akımı anlık gözlemlenmesi yerine dolaylı olarak ölçülmüştür. Plazma reaktörüne seri bağlanan bir ölçüm kapasitörü ile plazma gücü ve elektron yoğunluğu hesaplanmıştır.

Plazma oluşumunu sağlayan faktörlerin elektron yoğunluğu üzerindeki etkileri bu tez kapsamında analiz edilmiştir. Bu faktörlerin herhangi birinin katkısı olmadan DBD soğuk plazması elde edilmesi mümkün değildir ve bu faktörlerin her birinin değerinde meydana gelen değişime karşı plazmanın elektron yoğunluğu ihmal edilemeyecek bir değişim göstermektedir. Bu değerlerin seçimi elde edilecek plazma işlevselliğini ve verimi etkileyebilir. Faktör değerlerinin yeterli seviye uygulanması ile en iyi elektron yoğunluğu sahip plazma elde edilmesi optimizasyon işlemi ile sağlanır. Bu amaçla plazma faktörleri elektron yoğunluğunu maksimize, minimize ve tüm aralıkları için optimize edilmiştir.

Soğuk plazmalarının iki temel parametresi elektron sıcaklığı ve elektron yoğunluğudur. Atmosferik basınç altında ($\approx 10^5$ Pa) ve oda sıcaklığında ($25^\circ C$) üretilen soğuk plazmaların elektron sıcaklığı $1 - 2$ eV ($T_e \approx 5000-10^5$ °C) değerleri arasındadır (Tabares, F. L. and Junkar, I., 2021). Soğuk plazmalarda binlerce santigrat derecelerde olan elektron sıcaklığının DBD plazmalarının atmosferik basınç ile oda sıcaklığında oluşturulup kullanılması ile oluşan düşük seviyelerdeki artışlar ile plazma işlevini etkileyecek bir değişim yaratılamaz. Bu neden ile

plazma etkinliğinin analizi ve optimizasyonu elektron yoğunluğu üzerinden yapılmıştır.

Elektron yoğunluğunun analizi ve optimizasyon için yapılan deney sayısı yaklaşık olarak 1500'dür. Çok fazla sayıda deney verisi ve çok fazla değişken ile oluşan hesaplamalar bilgisayar ortamında Matlab ve Design Expert programları ile yapılmıştır.

Plazma faktörlerinin seğıiminin ve optimizasyon işlemin kritik önemde olması, ölçüm verilerin fazlalığı ve hesaplama zorluğu düşünöldüğünde DBD plazma uygulaması üzerinde çalışmak yapmak için otomatik kontrol ve ölçüm sistemi oluşturulması daha uygun olacaktır. Bu çalışmada DBD sistemini etkileyen faktörün analizi yapılmış, ölçüm kapasitörü ile plazma güç hesaplanabilir olduğu ve güç dengesi yöntemi ile elektron yoğunluğunun hava plazması için uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.

DBD plazmaları birçok farklı alanda ve sektörde çok yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmanın motivasyonu çok fazla sektörde kullanılan DBD soğuk plazmaları gelişimini ve verimini artırarak kullanıldığı alan ve sektörlerinde gelişimine katkı sağlamaktır. Bu amaçla DBD plazmaları üzerinde yeterli akademik çalışmaları olmamasından dolayı bu çalışmada geniş bir literatür bilgisi verilip soğuk plazma üretim ve optimizasyon aşamaları ayrıntı bir şekilde anlatılmıştır.

DBD plazmaları genel olarak çok düşük bir hacimde ve dar bir deşarj aralığında üretilmektedir. Yapılan çalışmalarda daha büyük hacimli plazma oluşumu gerekli ise yapılan çalışma sonu plazma oluşumunu ve yoğunluğunu etkileyen en önemli faktör olan plazma gerilimin artırılması gereklidir. Daha büyük bir elektrot seğıimi ve/veya daha büyük hava aralıkları ile plazma hacmi artırılması havanın kırılması için daha büyük bir elektrik alanına ihtiyaç olacaktır. Bununla birlikte plazma akımı ve gerilimin sınırlandırılması önlemek için plazmanın daha büyük bir hacmine sahip olmasından dolayı düşük dielektrik dayanımına sahip bir dielektrik malzeme seğıilebilir. Ancak kısa mesafelerde dielektrik malzemenin delinme riski göz önüne alınmalıdır. Bu çalışmada

maksimum 1 kHz 14.6890 kV_{rms} (20.7765 kV_{pp}) gerilim oluşturan yüksek gerilim trafosu ile maksimum 0.011 m hava aralığında plazma elde edilmiştir. Daha uzun bir hava aralığında plazma elde etmek için çok daha yüksek gerilimlerde çalışması şarttır. Bu neden ile kesinlikle yüksek gerilim önemleri alınmalıdır. Kullanılan tüm ekipman ve sistem topraklanmalıdır. Çalışma yapılan mekânın toprak hatlarının kontrolleri yapılmalıdır.

Çalışmada yapılan deney koşullarında yüksek yoğunluklarda RONS parçacıkları elde edilmiştir. Deney düzeneği yüksek yoğunlukta ozon üretimi için kullanılabilir. Ozon kokusu çalışma ortamında yoğun bir şekilde hissedilmiştir. Bu nedenle ozon üretimi istenmiyorsa çalışma ortamının havalandırılması uygun olacaktır. Daha yoğun RONS parçacıkları elde edilmek istenirse plazmaya uygulanan gerilim frekansının artırılması gerekmektedir. Yüksek gerilim trafoları ile soğuk plazma oluşturma bir RLC devre etkisi oluşturur. Uygulanan gerilim frekansın artırılması ile plazma üzerine düşen gerilimin düşmesine neden olacaktır. Bu neden ile yüksek frekansta daha büyük gerilim kullanılması gerekecektir. Yüksek gerilim tek bir trafodan sağlanacak olursa trafonun endüktans direnç oranı dikkatte alınmalıdır. Yüksek gerilim için çok küçük çaplarda ve çok büyük sarım sayılarında sekonder sargılar çok büyük L/R oranına sahip olacaktır. Bu şekilde yüksek frekansta trafo kullanımı trafonun doyuma ulaşmasını zorlaştırarak verimini düşürecektir. Ek olarak çok yüksek gerilimler elde etmek aynı zamanda çok düşük akım elde edilmesine neden olur. Trafonun sekonder kısmında oluşan plazma, trafonun primer tarafından şebekeden daha fazla akım çekmesine neden olur. Bu nedenle primer sargılarının daha kalın ve daha az sarımda yapılması gerekir. Tüm bu zorluklar düşünüldüğünde yüksek gerilim oluşumu için tek trafo yerine eş özelliklere sahip paralel bağlı birden plazma trafo kullanılması çok yüksek gerilim kullanımı ile plazma elde edilmesi ve yüksek frekansta çalışması için daha uygun olacaktır.

Yüksek gerilim gerekli hesaplamaların yapıldığı bir güç elektroniği sistemi ile de sağlanabilir. Piyasada bu amaçlar üretilmiş yüksek frekanslarda 40 kV ve üzeri gerilimler sağlayabilecek güç kaynakları ya da plazma üretim sistemleri mevcuttur.

Dielektrik malzeme seçimi yapılacak çalışma bağlı olarak değişebilir. Tıp ve gıda teknolojilerinde teflon, malzeme bilimde kauçuk veya mika ve atmosferik basınç plazma jet uygulamalarında cam ve kuvars dielektrik malzemeler kullanılmaktadır. DBD yöntemi için dielektrik malzeme yerine yarıiletken kullanılan çalışmalarda mevcuttur (Solmaz, R. ve Hansu F., 2020). Dielektrik malzeme plazma akımını sınırladığı için seçimi önemlidir. Bununla beraber kalınlığı değiştirilerek istenilen etki oluşturulabilir. Bu tez için yapılan çalışmada dielektrik malzeme kalınlığının elektron yoğunluğu üzerinde logaritmik bir etki yarattığı gözlemlenmiştir. Buna bağlı olarak yapılan çalışmaya için kullanılan dielektrik malzeme kalınlığı fazla olduğu durumda daha kısa dielektrik malzeme kullanmak için ya kullanılan gerilim düşürerek daha az yoğunlukta plazma elde edilmeli ya da kullanılan elektrot yüzey alanı artırılarak aynı ya da daha yüksek seviyede gerilim uygulanmalıdır.

Elektrot şekli plazmanın deşarj karakteristiği etkilemektedir. Bu neden ile homojen deşarj modu arzu ediliyorsa sivri uçlara sahip elektrot geometrileri kullanılmamalıdır. Ek olarak kullanılan tüm elektrot yüzeylerin dielektrik malzeme ile kaplanması homojen deşarj modunda plazma elde edilmesine yardımcı olur. Kullanım amacına göre literatürde birçok farklı elektrot geometrileri mevcuttur. Dağınık deşarj modunda daha yüksek elektron yoğunluğuna ulaşılma isteniyorsa düzlemsel plakalar yerine bir elektrodun yüzeyinde çok sayıda ve eş yapıda pin veya sivri uçlu yapılar oluşturulabilir. Bu sayede pin uçlarına daha fazla yük depo edilir ve çok sayıda ve paralelindeki elektrodun daha düşük yüzey alanına etki ederek elektrik alanının nispetten daha düzgün yayılmasına neden olacaktır. Bu durumda daha yoğun dağınık deşarj modunda plazmalar elde edilebilir. Ancak bu durumda da daha fazla gerilim kullanımı gerekecektir.

DBD yöntemi için yapılacak bir sonraki çalışmada daha fazla yüksek frekanslarda, daha gerilim sağlayabilecek DBD deşarjlarına uygun ve kontrol edilebilir bir güç kaynağı tasarlanmak hedeflenmektedir. Daha büyük hacimlerde plazma elde edilecektir. Farklı dielektrik malzemelerin farklı kalınlıklarında kaplanmış değişik geometrilere sahip elektrotları monte edilebileceği ve daha uzun deşarj aralıklarına sahip ve mikrometre adım aralıklarına sahip olabilecek bir

mekanik reaktör tasarım yapılacaktır. Tasarlanacak bir akım ölçer ile plazma akımının anlık gözlemlenmesi hedeflenmektedir. Tüm ölçüm ve hesaplamaların otomatik yapılacağı gömülü bir sistem tasarımı düşünülmektedir. Bu şekilde DBD plazmaların kullanımının daha rahat ve basit hale getirilmesi hedeflenmektedir.



KAYNAKLAR DİZİNİ

- Abdo, Y., et al.**, 2017, New perspectives on the dynamics of AC and DC plasma arcs exposed to cross-fields, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 50, 065203.
- Adhikari, M., et al.**, 2020, Cold Atmospheric Plasma as a Novel Therapeutic Tool for the Treatment of Brain Cancer, *Current pharmaceutical design*, 26(19):2195–2206p.,
<https://doi.org/10.2174/1381612826666200302105715>.
- Aggelopoulos, C. A.**, 2022, Recent advances of cold plasma technology for water and soil remediation: A critical review, *Chemical Engineering Journal*, 428, 131657, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.131657>.
- Aggelopoulos, C. A., et al.**, 2022, Cold Atmospheric Plasma Attenuates Breast Cancer Cell Growth Through Regulation of Cell Microenvironment Effectors, *Frontiers in oncology*, 11, 826865,
<https://doi.org/10.3389/fonc.2021.826865>.
- Alfvén, H. and Arrhenius, G.**, 2010, Part C, Plasma and Condensation. *Evolution of the Solar System*, 10:243-334p., Washington, D.C.: NASA SP, 345.
- AMS.**, 2022, *the plasma: technical explanations*, Anti Aging Medical Systems, <https://aamsworld.com/nos-solutions/plasma/?lang=en> (Erişim tarihi : 25 Kasım 2022).
- Anderson, C. A., Hopkins, M. B. and Graham, W. G.**, 1990, Plasma parameters of a radio frequency discharge, *Review of Scientific Instruments*, 61:448p., <https://doi.org/10.1063/1.1141269>.
- Atomic Spectra Database**, 2022, NIST, <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database> (Erişim tarihi : 15 Kasım 2022).
- Bekeschus, S., et al.**, 2021, Medical gas plasma-stimulated wound healing: Evidence and mechanisms, *Redox Biology*, 41, 102116,
<https://doi.org/10.1016/j.redox.2021.102116>.
- Bermudez-Aguirre, D.**, 2020, Equipment design for cold plasma disinfection of food products, M. T. Sakudo A., *Advances in Cold Plasma Applications for Food Safety and Preservation*, 289-307p., Elsevier Inc.,
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814921-8.00010-4>.
- Bertóti, I., et al.**, 2007, Nitrogen-PBII modification of ultra-high molecular weight polyethylene: Composition, structure and nanomechanical properties, *Surface and Coatings Technology*, 201(15):6839-6842p.,
<https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.09.022>.
- Betancourt-Ángeles, M., et al.**, 2017, Treatment in the healing of burns with a cold plasma source, *International journal of burns and trauma*, 7(7):142–146p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Birania, S., et al.,** 2022, Cold plasma in food processing and preservation: A review, *Journal of Food Process Engineering*, 45(9), e14110, <https://doi.org/10.1111/jfpe.14110>.
- Bisht, S., et al.,** 2014, Plasma Applications for Environmental Protection, *International Journal of Engineering and Advanced Technolog*, 3(5):2249 – 8958p.
- Bittencourt, J. A.,** 2004, *Fundamentals of Plasma Physics Third Edition*, New York: Springer-Verlag.
- Borges, A.C., et al.,** 2021, Applications of Cold Atmospheric Pressure Plasma in Dentistry, *Applied Sciences*, 11, 1975, <https://doi.org/10.3390/app11051975>.
- Bourdier, A., Diels, J. C. and Delage, O.,** 2020, Calculation of the refractive index for plane waves propagating in ionized gas, *Results in Physics*, 18, 103250, <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2020.103250>.
- Brandenburg, R.,** 2017, Dielectric barrier discharges: progress on plasma sources and on the understanding of regimes and single filaments, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 26, 053001, <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa6426>.
- Brandenburg, R.,** 2016, Dielectric Barrier Discharge (DBD), S. J. L., *Encyclopedia of Plasma Technology - Two Volume Set (1st ed.)*, CRC Press.
- Bruggeman, P. J., Iza, F. and Brandenburg, R.,** 2017, Foundations of atmospheric pressure, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 26, 123002, <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aa97af>.
- Burger, M. and Hermann, J.,** 2016, Stark broadening measurements in plasmas produced by laser ablation of hydrogen containing compounds, *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 122:118-126p., <https://doi.org/10.1016/j.sab.2016.06.005>.
- Busco, G., et al.,** 2020, The emerging potential of cold atmospheric plasma in skin biology, *Free radical biology & medicine*, 161:290–304p., <https://doi.org/10.1016/j.freeradbiomed.2020.10.004>.
- Chabert, P. and Braithwaite, N.,** 2011, *Physics Of Radio-Frequency Plasmas*, Cambridge University Press ISBN 978-0-521-76300-4, 385p.
- Chen, H., et al.,** 2021, Review of low-temperature plasma nitrogen fixation technology, *Waste Dispos. Sustain. Energy*, 3:201–217p., <https://doi.org/10.1007/s42768-021-00074-z>.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Chirokov, A., Gutsol, A. and Fridman, A.,** 2005, Atmospheric pressure plasma of dielectric barrier, *Pure Appl. Chem.*, 77(2):487–495p., <https://doi.org/10.1351/pac200577020487>.
- Coenen, N. J.,** 2022, Openair-Plasma in Electronics Manufacturing, *2022 IEEE 9th Electronics System-Integration Technology Conference (ESTC)*, 158-162p., Sibiu, Romania, IEEE, Doi: 10.1109/ESTC55720.2022.9939467.
- Conrads, H. and Schmidt, M.,** 2000, Plasma generation and plasma sources, *Plasma Sources Science and Technology*, 9(4):441p.
- Deepak, G. D. and Sharma, A.,** 2022, Biomedical Applications of Cold Plasma-A Review, *Journal of Clinical and Diagnostic Research*, 16(3):1-8p., <https://doi.org/10.7860/JCDR/2022/53693.16177>.
- Dominguez, A.,** 2019, Introduction to Plasma Physics., *ders notları*, <https://suli.pppl.gov/2020/course/latexnotes.pdf>.
- Du, C. M., et al.,** 2012, The application of a non-thermal plasma generated by gas–liquid gliding arc discharge in sterilization, *New J. Phys.*, 14, 109502, <https://doi.org/10.1088/1367-2630/14/1/013010>.
- Erfani, R., et al.,** 2022, Nanosecond-pulsed DBD plasma treatment on human leukaemia Jurkat cells and monoblastic U937 cells in vitro, *Scientific reports*, 12, 6270, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10056-8>.
- Fathollah, S., et al.,** 2022, Cold plasma enamel surface treatment to increase fluoride varnish uptake, *Sci Rep*, 12:4657p., <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08069-4>.
- Fontanarosa, D., et al.,** 2020, Effects of plasma kinetic modeling on performance characterization of plasma actuators for active flow control, *75th National ATI Congress – #7 Clean Energy for all (ATI 2020)*, 11, Roma, İtalya: E3S Web Conf.
- Fourkal, E., et al.,** 2017, Average energy required to produce an ion pair, revisited, *Plasma Physics, Cornell University*, <http://arxiv.org/abs/1703.10032v1>.
- Fridman, A. A.,** 2012, *Plasma Chemistry*. Cambridge : Cambridge University Press.
- Friedrich, J.,** 2011, Mechanisms of Plasma Polymerization – Reviewed from a Chemical Point of View, *Plasma Processes and Polymers*, 8(9):783–802p.
- Garamoon, A. A. and El-zeer, D. M.,** 2009, Atmospheric pressure glow discharge plasma in air at frequency 50 Hz, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 18, 045006, <https://doi.org/10.1088/0963-0252/18/4/045006>.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Goebel, D. M. and Katz, I.**, 2008, Basic Plasma Physics 3.1. *Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters*, 37-90p., John Wiley & Sons.
- Goebel, D. M., et al.**, 2021, Plasma hollow cathodes, *Journal of Applied Physics*, 130, 050902, <https://doi.org/10.1063/5.0051228>.
- Grill, A.**, 1994, *Cold Plasma Materials Fabrication: From Fundamentals to Applications*, Wiley-IEEE Press.
- Günaydın, B.**, 2009, *Preparation of Electrochemical Sensor by Plasma Polymerization*, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara. Ispc_19, 41–45.
- Ha, J.-H. and Kim, Y.-J.**, 2021, Photodynamic and Cold Atmospheric Plasma Combination Therapy Using Polymeric Nanoparticles for the Synergistic Treatment of Cervical Cancer, *International Journal of Molecular Sciences*, 22(3):1172p., <https://doi.org/10.3390/ijms22031172>.
- Hadeifi, A., et al.**, 2022, Cold atmospheric plasma differentially affects cell renewal and differentiation of stem cells and APC-deficient-derived tumor cells in intestinal organoids, *Cell death discovery*, 8(66), <https://doi.org/10.1038/s41420-022-00835-7>.
- Hage, M., et al.**, 2022, Cold plasma surface treatments to prevent biofilm formation in food industries and medical sectors, *Appl Microbiol Biotechnol*, 106:81–100p., <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11715-y>.
- Hashizume, H., et al.**, 2020, Improvement of yield and grain quality by periodic cold plasma treatment with rice plants in a paddy field, *Plasma Processes and Polymers*, 18(1), 2000181, <https://doi.org/10.1002/ppap.202000181>.
- Henniker Plasma.**, 2022, *Plasma Technology Overview*, Henniker Plasma, <https://plasmatreatment.co.uk/pt/plasma-technology-overview/plasma-surface-activation> (Erişim tarihi : 19 Kasım 2022).
- Hill, S., Qian, W., Chen, W., Fu, J.**, 2016, Surface micromachining of polydimethylsiloxane for microfluidics applications, *Biomicrofluidics*, 10(5), 054114, doi: 10.1063/1.4964717.
- Hong, Q., et al.**, 2019, An in vitro and in vivo study of plasma treatment effects on oral biofilm, *Journal of Oral Microbiol*, 11(1), 1603524, <https://doi.org/10.1080/20002297.2019.1603524>.
- Huang, H., et al.**, 2020, Evaluation of the Safety and Efficacy of a Low-Temperature Plasma Surgical System for Pterygium, *Cornea*, 39(12):1581–1587p., <https://doi.org/10.1097/ICO.0000000000002487>.
- Inan, U. S. and Golkowski, M.**, 2011, *Principles of Plasma Physics for Engineers and Scientists*, Cambridge University Press.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Isbary, G., et al.,** 2012, Successful and safe use of 2 min cold atmospheric argon plasma in chronic wounds: results of a randomized controlled trial, *The British journal of dermatology*, 167(2):404–410p., <https://doi.org/10.1111/j.1365-2133.2012.10923.x>.
- Jaeger, E. F., et al.,** 1995, Power deposition in high-density inductively coupled plasma tools for semiconductor processing, *Physics of Plasmas*, 2(6):2597-2604p., <https://doi.org/10.1063/1.871222>.
- Jama, C. and Delobel, R.,** 2007, Cold Plasma Technologies for Surface Modification and Thin Film Deposition, *Multifunctional Barriers for Flexible Structure*, 109-124p., Berlin, Heidelberg: Materials Science, https://doi.org/10.1007/978-3-540-71920-5_6.
- Jiménez, P., Merino, M. and Ahedo, E.,** 2022, Wave propagation and absorption in a helicon plasma thruster and its plume, *Plasma Sources Science and Technology*, 31(4), 045009, <https://doi.org/10.1088/1361-6595/ac5ecd>.
- Jo, A., et al.,** 2022, Plasma-activated medium induces ferroptosis by depleting FSP1 in human lung cancer cells, *Cell Death Dis.*, 13:212p., <https://doi.org/10.1038/s41419-022-04660-9>.
- Judée, F., et al.,** 2018, Plasma-activation of tap water using DBD for agronomy applications: Identification and quantification of long lifetime chemical species and production/consumption mechanisms, *Water Research*, 133:47-59p., <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.12.035>.
- Jungbauer, G., et al.,** 2021, The Antimicrobial Effect of Cold Atmospheric Plasma against Dental Pathogens-A Systematic Review of In-Vitro Studies, *Antibiotics*, 10(2):211p., <https://doi.org/10.3390/antibiotics10020211>.
- Kadhim, M. M., Abbas, Q. A. and Abdulameer, M. R.,** 2022, Study of Some Plasma Characteristics in Dielectric Barrier Discharge (DBD) System. *Iraqi Journal of Science*, 63(5):2048–2056p., <https://doi.org/10.24996/ijs.2022.63.5.20>.
- Kang, W. S., et al.,** 2013, Combination of plasma with a honeycomb-structured catalyst for automobile exhaust treatment. *Environmental science & technology*, 47(19):11358–11362p., <https://doi.org/10.1021/es402477a>.
- Karabulut, H. ve Gülay, M. Ş.,** 2016, Serbest radikaller, *MAKÜ Sag. Bil. Enst. Derg.*, 4(1):50-59s.
- Keller, S., et al.,** 2012, Characterization of transient discharges under atmospheric-pressure conditions applying nitrogen photoemission and current measurements, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 45, 125202, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/45/12/125202>.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Kim, K. S. and Kim, T.H.**, 2019, Nanofabrication by thermal plasma jets: From nanoparticles to low-dimensional nanomaterials, *Journal of Applied Physics*, 125, 070901, <https://doi.org/10.1063/1.5060977>.
- Kogelschatz, U., Eliasson, B., Walter, E.**, 1999, From ozone generator to flat television screens: history and future potential of dielectric barrier discharges, *Pure Appl Chem*, 71:1819–1828p.
- Kogelschatz, U.**, 2003, Dielectric-Barrier Discharges: Their History, Discharge Physics and Industrial Applications, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, 23:1-46, <https://doi.org/10.1023/A:1022470901385>.
- Kong, M. G., et al.**, 2012, Plasma jets and plasma bullets, *Plasma Sources Sci. Technol*, 21, 030201, <https://doi.org/10.1088/0963-0252/21/3/030201>.
- Konuma, M.**, 1992, Generation of Cold Plasma, *Film Deposition by Plasma Techniques*, 49–73p., Berlin: Springer, https://doi.org/10.1007/978-3-642-84511-6_3.
- Kovitya, P.**, 1985, Physical Properties of High-Pressure Plasmas of Hydrogen and Copper in the Temperature Range 5000-60 000 K, *IEEE Transactions On Plasma Science*, 13(6).
- Kovitya, P. and Lowke, J. J.**, 1984, Theoretical predictions of ablation stabilised arcs confined in cylindrical tubes, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 17(6):1197-1212p.
- Kuo, S.**, 2018, On Hemostasis of Cold Atmospheric Air Plasma, *Open Journal of Emergency Medicine*, (6):99-111p., doi: 10.4236/ojem.2018.64012.
- Langendorf, S., et al.**, 2013, Effect of Ion-Neutral Collisions on Sheath Potential Profile, *33rd International Electric Propulsion Conference*, (s. 6-10). Washington, D.C.
- Laroque, D. A., et al.**, 2022, Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application, *Journal of Food Engineering*, 312, 110748, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2021.110748>.
- Laroussi, M.**, 2002, Nonthermal Decontamination of Biological Media by Atmospheric-Pressure Plasmas: Review, Analysis and Prospects, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 30 (4):1409-1415p.
- Laroussi, M. and Leipold, F.**, 2004a, Evaluation of the roles of reactive species, heat, and UV radiation in the inactivation of bacterial cells by air plasmas at atmospheric pressure, *International Journal of Mass Spectrometry*, 233(1):81-86p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Lata, S., et al.,** 2021, Aurora Borealis in dentistry: The applications of cold plasma in biomedicine, *Materials today Bio*, 13, 100200, <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2021.100200>.
- Lee, B.-J., Jo, S.-I. and Jeong, G.-H.,** 2019, Synthesis of ZnO Nanomaterials Using Low-Cost Compressed Air as Microwave Plasma Gas at Atmospheric Pressure, *Nanomaterials*, 9(7):942p., <https://doi.org/10.3390/nano9070942>.
- Lieberman, M. A. and Lichtenberg, A. J.,** 2005, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing, Second Edition*, John Wiley & Sons Inc.
- Liu, P., He, L. and Zhao, B.,** 2020, Discharge and Optical Emission Spectrum Characteristics of a Coaxial Dielectric Barrier Discharge Plasma-Assisted Combustion Actuator, *Journal of Spectroscopy*, <https://doi.org/10.1155/2020/6034848>.
- Lopatin, I. V., et al.,** 2019, Plasma generation in the arc discharge with a thermionic cathode in current stabilization conditions, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1393, 012046, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1393/1/012046>.
- Lu, X. and Laroussi, M.,** 2006, Dynamics of an atmospheric pressure plasma plume generated by submicrosecond voltage pulses, *Journal of Applied Physics*, 100, 063302, <https://doi.org/10.1063/1.2349475>.
- Lu, X., Laroussi, M. and Puech, V.,** 2012, On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 21, 034005, <https://doi.org/10.1088/0963-0252/21/3/034005>.
- Lyon, M. and Rolston, S. L.,** 2017, Ultracold neutral plasmas, *Rep. Prog. Phys.*, 80, 017001.
- Magarotto, M., et al.,** 2016, Numerical Investigation into the Power Deposition and Transport Phenomena in Helicon Plasma Sources, *COMSOL conference*, Munich.
- Manley, T. C.,** 1943, The Electric Characteristics of the Ozonator Discharge, *Trans. Electrochem. Soc.*, 84(1):83-96p., Doi : 10.1149/1.3071556.
- Merati, A., et al.,** 2017, Alternate Environmentally Friendly De-Painting Process for Aircraft Structures-Atmospheric Plasma, *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*, 5(4):223-235p., <https://doi.org/10.4236/jmmce.2017.54019>.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Metelmann, H.R., Böttge, K. and von Woedtke, T.**, 2022, Cold Plasma Treatment and Aesthetic Medicine, *Textbook of Good Clinical Practice in Cold Plasma Therapy*, 229–243p., Springer, Cham., https://doi.org/10.1007/978-3-030-87857-3_13.
- Mirpour, S., et al.**, 2020, Cold atmospheric plasma as an effective method to treat diabetic foot ulcers: A randomized clinical trial, *Scientific reports*, 10(1), 10440, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67232-x>.
- Misra, N. N., Schlüter, O. and Cullen, P.J.**, 2016, Physics of cold plasma, T. M., *Cold plasma in food and agriculture – Fundamentals and applications*, 17-51p., Academic Press, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801365-6.00002-0>.
- Nam, S. H., Choi, B. and Kim, G. C.**, 2021, The Whitening Effect and Histological Safety of Nonthermal Atmospheric Plasma Inducing Tooth Bleaching, *International journal of environmental research and public health*, 18(9):4714, <https://doi.org/10.3390/ijerph18094714>.
- Napartovich, A. P.**, 2001, Overview of atmospheric pressure discharges producing nonthermal plasma, *Plasmas Polym.*, 6(1-2):1-14p.
- Neretti, G., et al.**, 2022, Real Time Power Control in a High Voltage Power Supply for Dielectric Barrier Discharge Reactors: Implementation Strategy and Load Thermal Analysis, *Electronics*, 11, 1536, <https://doi.org/10.3390/electronics11101536>.
- Neretti, G., Taglioli, M. and Borghi, C. A.**, 2018, Experimental determination and numerical evaluation under simplifying assumptions of the ozone concentration in an atmospheric-pressure air DBD plasma, *The European Physical Journal D*, 72:113p., <https://doi.org/10.1140/epjd/e2018-80603-4>.
- Nguyen, D. V., et al.**, 2018, Treatment of surface water using cold plasma for domestic water supply, *Environmental Engineering Research*, 24(3):412–417p., <https://doi.org/10.4491/eer.2018.215>.
- Oh, J. S., Aranda-Gonzalvo, Y. and Bradley, J. W.**, 2011, Time-resolved mass spectroscopic studies of an atmospheric-pressure helium microplasma jet, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44, 365202, <https://doi.org/10.1088/0022-3727/44/36/365202>.
- Ollegott, K., et al.**, 2020, Fundamental Properties and Applications of Dielectric Barrier Discharges in Plasma-Catalytic Processes at Atmospheric Pressure, *Chem. Ing. Tech.*, 92(10):1542–1558p., <https://doi.org/10.1002/cite.202000075>.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Pańka, D., et al.**, 2022, Can Cold Plasma Be Used for Boosting Plant Growth and Plant Protection in Sustainable Plant Production?, *Agronomy*, 12(4):841p., <https://doi.org/10.3390/agronomy12040841>.
- Pathirana, A., et al.**, 2012, Detecting fault generated surges in DC line of VSC HVDC schemes for travelling wave based fault location, *2012 CIGRÉ Canada Conference*, Montréal: CIGRÉ- 052.
- Pattyn, C., et al.**, 2019, Formation and behavior of negative ions in low pressure aniline-containing RF plasmas, *Sci Rep*, 9, 10886, <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47425-9>.
- Pawlat, J., et al.**, 2019, Evaluation of Oxidative Species in Gaseous and Liquid Phase Generated by Mini-Gliding Arc Discharge, *Plasma Chem Plasma Process*, 39:627–642p., <https://doi.org/10.1007/s11090-019-09974-9>.
- Peeters, F. and Butterworth, T.**, 2019, Electrical Diagnostics of Dielectric Barrier Discharges, *Atmospheric Pressure Plasma - from Diagnostics to Applications*, IntechOpen, doi: 10.5772/intechopen.80433.
- Phelps, A. V. and Petrovic, Z. L.**, 1999, Cold-cathode discharges and breakdown in argon: surface and gas phase production of secondary electrons, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 8, R21, <https://doi.org/10.1088/0963-0252/8/3/201>.
- Pipa, A. V., et al.**, 2012, The simplest equivalent circuit of a pulsed dielectric barrier discharge and the determination of the gas gap charge transfer, *Review of Scientific Instruments*, 83, 115112, <https://doi.org/10.1063/1.4767637>.
- Plasmaprometeo.**, 2022, *Plasmas*, Plasmaprometeo, http://www.plasmaprometeo.unimib.it/index0d2a.html?page_id=20 (Erişim tarihi : 25 Kasım 2022).
- Rajasekaran, P., at al.**, 2010, Filamentary and Homogeneous Modes of Dielectric Barrier Discharge (DBD) in Air: Investigation through Plasma Characterization and Simulation of Surface Irradiation, *Plasma Processes Polym.*, 7:665-675p., <https://doi.org/10.1002/ppap.200900175>.
- Rajasekaran, P., Bibinov, N. and Awakowicz, P.**, 2012, Characterization of dielectric barrier discharge in air applying current measurement, numerical simulation and emission spectroscopy, *arXiv Plasma Physics*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.1202.3879>.
- Rajasekaran, P., Bibinov, N. and Awakowicz, P.**, 2012, Quantitative characterization of a dielectric barrier discharge in air applying non-calibrated spectrometer, current measurement and numerical simulation, *Measurement Science and Technology*, 23, 085605, <https://doi.org/10.1088/0957-0233/23/8/085605>.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Raul, T.**, 2022, *Experimento para demostrar el Efecto Punta (segunda parte)*, La ciencia de Toquelec, http://toquelec.blogspot.com/2012/12/efecto-punta-ii_899.html (Erişim tarihi : 1 Kasım 2022).
- Reyna-Martínez, R., et al.**, 2018, Use of Cold Plasma Technology in Biomaterials and Their Potential Utilization in Controlled Administration of Active Substances. *JOJ Material Sci.*, 4(5), 555649, Doi: 10.19080/JOJMS.2018.04.555649.
- Riemann, K-U.**, 1991, The Bohm criterion and sheath formation. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 24(4):493-518p., doi:10.1088/0022-3727/24/4/001.
- Sakudo, A., Yagyu, Y. and Onodera, T.**, 2019, Disinfection and Sterilization Using Plasma Technology: Fundamentals and Future Perspectives for Biological Applications, *International journal of molecular sciences*, 20(20):5216p., <https://doi.org/10.3390/ijms20205216>.
- Shakeri, M.**, 2020, Chapter 2 - Cold plasma coating for protective textiles and clothing. *Advances in Functional and Protective Textiles*, 19-35p., Tehran, Iran, The Textile Institute Book Series, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820257-9.00002-3>.
- Shakouri, R.**, et al., 2021, In vivo study of the effects of a portable cold plasma device and vitamin C for skin rejuvenation, *Sci. Rep.*, 11, 21915, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01341-z>.
- Shimizu, S., et al.**, 2018, Cold atmospheric plasma - A new technology for spacecraft component decontamination, *Planetary and Space Science*, 90:60-71p., <https://doi.org/10.1016/j.pss.2013.10.008>.
- Shrestha, R., et al.**, 2017, Generation and diagnostics of atmospheric pressure dielectric barrier discharge in argon/air, *Indian Journal of Pure & Applied Physics*, 55(2):155-162p., Doi: 10.56042/ijpap.v55i2.7493.
- Shukla, P.K.**, 2010, Properties of electrostatic waves in ultracold neutral plasmas, *Physics Letters A* 374, 3656–3657p.
- Siemens, W. V.**, 1857, Ueber die elektrostatische Induction und die Verzögerung des Stroms in Flaschendrahten, *Poggendorfs Ann. Phys. Chem.*, 102:66–122p., <https://doi.org/10.1002/andp.1857178090>.
- Solmaz, R. ve Hansu F.**, 2020, Experimental Analysis of Current Oscillations of Semiconductor Barrier Discharge, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 48(11):3905-3914p., doi: 10.1109/TPS.2020.3027958.
- Stranak, V.**, 2007, Diagnostics of low-temperature plasma for Technological applications (Doctoral Dissertation).

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Subedi, D. P., Joshi, U. M. and Wong, C. S.,** 2017, Dielectric Barrier Discharge (DBD) Plasmas and Their Applications, *Plasma Science and Technology for Emerging Economies*, 693–737p., Singapore, Springer, https://doi.org/10.1007/978-981-10-4217-1_13.
- Sun, S. R., et al.,** 2017, Coupled gas flow-plasma model for a gliding arc: investigations of the back-breakdown phenomenon and its effect on the gliding arc characteristics, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 26, 015003, <https://doi.org/10.1088/0963-0252/26/1/015003>.
- Şahin, N.,** 2017, Plazma temel denklemleri ve düşük basınç plazmalarda langmuir probu ölçümleriyle optik ve elektriksel özelliklerin belirlenmesi, Doktora Tezi, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir.
- Tabares, F. L. and Junkar, I.,** 2021, Cold Plasma Systems and Their Application in Surface Treatments for Medicine, *Molecules*, 26(7):1903p., <https://doi.org/10.3390/molecules26071903>.
- Tatarova, E., et al.,** 2014, Plasmas for environmental issues: from hydrogen production to 2D materials assembly, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 23, 063002, <https://doi.org/10.1088/0963-0252/23/6/063002>.
- Tendero, C., et al.,** 2006, Atmospheric pressure plasmas: A review, *Spectrochimica Acta Part B*, 61:2–30p.
- Teschke, M., et al.,** 2005, High-speed photographs of a dielectric barrier atmospheric pressure plasma jet, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 33(2):310–311p., doi: 10.1109/TPS.2005.845377.
- Thapa, B. B. and Tyata, R. B.,** 2019, Study of Dielectric Barrier Discharge in Air and Estimation of Electron Density and Energy Deposition, *Jnl Sci. Engg*, 7:1–9p., <https://doi.org/10.3126/jsce.v7i0.26780>.
- Torii, K., et al.,** 2015, Effectiveness of Plasma Treatment on Gastric Cancer Cells, *Gastric Cancer*, 18:635–643p., <https://doi.org/10.1007/s10120-014-0395-6>.
- Tusek, L., et al.,** 2001, Surface characterisation of NH₃ plasma treated polyamide 6 foils, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 195:81–95p.
- Vanraes, P., et al.,** 2018, Study of an AC dielectric barrier single micro-discharge filament over a water film, *Scientific Reports*, 8, 10919, <https://doi.org/10.1038/s41598-018-29189-w>.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Vera, L. P., et al.,** 2014, Spectroscopic study of emission coal mineral plasma produced by laser ablation, *15th International Congress on Plasma Physics*, 511, 012063, Santiago, Chile: J. Phys.: Conf. Ser., doi : 10.1088/1742-6596/511/1/012063.
- Vossen, J. L.,** 1978, *Thin Film Processes*, New York: Academic Press INC.
- Wang, X., et al.,** 2015, Time-resolved measurements of electron density in nanosecond pulsed plasmas using microwave scattering, *Plasma Sources Sci. Technol.*, 27, 07LT02, <https://doi.org/10.1088/1361-6595/aacc06>.
- Waskow, A., Howling, A. and Furno, I.,** 2021, Mechanisms of Plasma-Seed Treatments as a Potential Seed Processing Technology, *Front. Phys.*, 9, 617345, <https://doi.org/10.3389/fphy.2021.617345>.
- Westerlund, S. and Ekstam, L.,** 1994, Capacitor theory, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 1(5):826-839p., doi: 10.1109/94.326654.
- Wolf, R. A.,** 2012, Atmospheric Plasma—A New Surface Treatment Technology for Cleaning PCBs.
- Wong, C.S. and Mongkolnavin, R.,** 2016, Methods of Plasma Generation, *Elements of Plasma Technology*, 15-48p., Singapore, Springer, https://doi.org/10.1007/978-981-10-0117-8_2.
- Xiros, N.,** 2018, Plasma Definition and Classification, *Mathematical Magnetohydrodynamics. Synthesis Lectures on Mechanical Engineering*, 1-6p., Springer, Cham, https://doi.org/10.1007/978-3-031-79601-2_1.
- Yan, D., et al.,** 2021, Cold Atmospheric Plasma Cancer Treatment, a Critical Review, *Applied Sciences*, 11(16):7757p., <https://doi.org/10.3390/app11167757>.
- Yang, B., et al.,** 2011, Oral bacterial deactivation using a low-temperature atmospheric argon plasma brush, *J Dent*, 39:48-56p.
- Yoshikawa, N., et al.,** 2020, Plasma-activated medium promotes autophagic cell death along with alteration of the mTOR pathway, *Sci. Rep.*, 10, 1614, <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58667-3>.
- Yushkov, Y. G., et al.,** 2022, Dielectric Coating Deposition Regimes during Electron-Beam Evaporation of Ceramics in the Fore-Vacuum Pressure Range, *Coatings*, 12:130p.
- Zafari, P., et al.,** 2022, Effect of Cold Atmospheric Plasma on Gene Expression and Methylation of Genes Involved in Colorectal Cancer, *J Mazandaran Univ Med Sci.*, 31(204):26-39p.

KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

- Zaky, Z. A., et al.,** 2022, The impact of magnetized cold plasma and its various properties in sensing applications. *Scientific Reports*, 12, 3754, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-07461-4>.
- Zheng, Y., et al.,** 2019, Reduction of phoxim pesticide residues from grapes by atmospheric pressure non-thermal air plasma activated water. *Journal of hazardous materials*, 377:98-105p., <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.05.058>.



TEŞEKKÜR

Tez çalışmam için beni soğuk plazmalar üzerine yönlendiren, yüksek lisans öğrenimim ve tez çalışmam süresince tecrübe ve bilgisi ile bana yol gösteren kendisiyle çalışmaktan keyif aldığım danışman hocam sayın Doç. Dr. Yavuz ÖZTÜRK' e teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca bilgi ve birikimleri ile bana değer katan ve derslerini almaktan keyif aldığım değerleri hocalarım Prof. Dr. Gökâl KAHRAMAN, Prof. Dr. Mehmet ENGİN, Prof. Dr. Enver TATLICIOĞLU, Prof. Dr. Murat ELİBOL, Doç. Dr. Cem CİVELEK ve Doç. Dr. Melih Soner ÇELİKTAŞ' a hürmetlerimi sunar çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca maddi ve manevi desteğini benden esirgemeyen sevgili dostum Doğan KAYADELEN' e çok teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca maddi ve manevi desteğinden dolayı yeğenim Berkant BONCUKÇU' a çok teşekkür ederim.

Mühendislik deneyimi, bilgi birikimi ve sohbeti ile kendisi ile vakit geçirmekten mutluluk duyduğum ve tez çalışmam boyunca beni motive eden çok sevdiğim kuzenim Soner RUMELLİ' e en içten dileklerim ile teşekkür ederim.

Yüksek lisans öğrenimim boyunca maddi ve manevi desteği bende esirgemeyen tez çalışmam boyunca beni motive eden değerli kuzenlerim Mehmet Cemil RUMELLİ ve Şakir Öner RUMELLİ' e çok teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca bana değer katan hiçbir zaman maddi ve manevi desteklerini bende esirgemeyen, yüksek lisans eğitimim için ve tez çalışmam boyun beni motive eden her türlü imkân ve destekleri ile bana yardımcı olan sevgili dostlarım Yusuf KIZILDAĞ ve Uğur ÖFKELİ' e en içten teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca tüm hayatım boyunca benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen haklarını asla ödeyemeyeceğim annem Hapka GETİZMEN' e, babam Rızkullah GETİZMEN' e, sevgili kız kardeşim Zekiye GÜLŞEN' e eşi Ahmet GÜLŞEN' e ve sevgili yeğenim Atiye Hazal GÜLŞEN' e, sevgili ablam Hatice GETİZMEN' e ve her zaman desteğim ve yoldaşım olan kardeşim Uğur GETİZMEN' e en derin teşekkürlerimi sunarım.

ÖZGEÇMİŞ

Adı : ZEKİ
Soyadı : GETİZMEN
ORCID : 0000-0001-9803-1371

YÜKSEK LİSANS

Üniversite : EGE ÜNİVERSİTESİ
Enstitü : Fen Bilimleri Enstitüsü
Ana Bilim Dalı : Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Başlangıç Tarihi : 06.02.2020

LİSANS

Üniversite : ERZİNCAN ÜNİVERSİTESİ
Fakülte : Mühendislik Fakültesi
Bölüm : Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Başlangıç Tarihi : 07.09.2012
Bitiş Tarihi : 05.06.2016
Diploma Notu : 3,59 (4'lük Sistem)
Çift Anadal : Makine Mühendisliği
Bitiş Tarihi : 05.06.2016
Diploma Notu : 3,53 (4'lük Sistem)

KONFERANS

Adı : Türk Fizik Derneği 38.Uluslararası Fizik Kongresi (TFD38)

Yer : Bodrum **Tarih** : 03.09.2022

Sunum: Sözel Sunum

Sunum Başlığı : Cold Plasma Production with DBD Parallel Plate Method

BİLDİRİ

Adı : Cold Plasma Production with DBD Parallel Plate Method

Yayınlandığı Yer : TPS38 (2022), Vol.04, No.03, pp.82-90, ISBN:978-605-70853-5-1.

EKLER**EK-A Plazma Rektörünün Kapasitör Sığa Değerleri**

S/N	Elektrot Türü	Elektrot Yüzey Alanı (m ²)	Dielektrik Malzeme Türü	Dielektrik Malzeme Kalınlığı (m)	Hava Aralığı (m)	LCR Meter ile 1 kHz'de Ölçülen Reaktör Sığası (F)
1	Daire	0.000314	Cam	0.001	0.001	3.70E-12
2	Daire	0.000314	Cam	0.001	0.002	2.80E-12
3	Daire	0.000314	Cam	0.001	0.003	2.38E-12
4	Daire	0.000314	Cam	0.001	0.004	2.11E-12
5	Daire	0.000314	Cam	0.001	0.005	1.92E-12
6	Daire	0.000314	Cam	0.001	0.006	1.75E-12
7	Daire	0.000314	Cam	0.002	0.001	4.04E-12
8	Daire	0.000314	Cam	0.002	0.002	2.97E+12
9	Daire	0.000314	Cam	0.002	0.003	2.51E-12
10	Daire	0.000314	Cam	0.002	0.004	2.25E-12
11	Daire	0.000314	Cam	0.002	0.005	2.03E-12
12	Daire	0.000314	Cam	0.002	0.006	1.84E-12
13	Daire	0.000314	Cam	0.002	0.007	1.71E-12
14	Daire	0.000314	Cam	0.003	0.001	3.39E-12
15	Daire	0.000314	Cam	0.003	0.002	2.65E-12
16	Daire	0.000314	Cam	0.003	0.003	2.32E-12
17	Daire	0.000314	Cam	0.003	0.004	2.02E-12
18	Daire	0.000314	Cam	0.003	0.005	1.83E-12
19	Daire	0.000314	Cam	0.003	0.006	1.70E-12
20	Daire	0.000314	Cam	0.003	0.007	1.59E-12
21	Daire	0.000314	Cam	0.003	0.008	1.50E-12
22	Daire	0.000314	Cam	0.004	0.001	3.20E-12
23	Daire	0.000314	Cam	0.004	0.002	2.58E-12
24	Daire	0.000314	Cam	0.004	0.003	2.21E-12
25	Daire	0.000314	Cam	0.004	0.004	1.98E-12
26	Daire	0.000314	Cam	0.004	0.005	1.81E-12
27	Daire	0.000314	Cam	0.004	0.006	1.69E-12
28	Daire	0.000314	Cam	0.004	0.007	1.58E-12
29	Daire	0.000314	Cam	0.004	0.008	1.49E-12
30	Daire	0.000314	Cam	0.004	0.009	1.40E-12
31	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.001	0.001	3.42E-12
32	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.001	0.002	2.66E-12
33	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.001	0.003	2.29E-12
34	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.001	0.004	2.00E-12
35	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.001	0.005	1.82E-12
36	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.001	0.006	1.67E-12
37	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.001	0.007	1.52E-12
38	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.001	0.008	1.42E-12
39	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.001	0.009	1.36E-12
40	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.001	0.010	1.29E-12
41	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.001	0.011	1.23E-12
42	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.002	0.001	2.93E-12
43	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.002	0.002	2.47E-12
44	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.002	0.003	2.17E-12
45	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.002	0.004	1.96E-12
46	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.002	0.005	1.79E-12

EK-A (devam)

S/N	Elektrot Türü	Elektrot Yüzey Alanı (m ²)	Dielektrik Malzeme Türü	Dielektrik Malzeme Kalınlığı (m)	Hava Aralığı (m)	LCR Meter ile 1 kHz'de Ölçülen Reaktör Sığası (F)
47	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.002	0.006	1.65E-12
48	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.002	0.007	1.54E-12
49	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.002	0.008	1.43E-12
50	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.002	0.009	1.37E-12
51	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.002	0.010	1.30E-12
52	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.003	0.001	2.81E-12
53	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.003	0.002	2.37E-12
54	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.003	0.003	2.11E-12
55	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.003	0.004	1.90E-12
56	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.003	0.005	1.72E-12
57	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.003	0.006	1.60E-12
58	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.003	0.007	1.49E-12
59	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.003	0.008	1.42E-12
60	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.003	0.009	1.34E-12
61	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.004	0.001	2.67E-12
62	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.004	0.002	2.34E-12
63	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.004	0.003	2.04E-12
64	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.004	0.004	1.85E-12
65	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.004	0.005	1.69E-12
66	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.004	0.006	1.57E-12
67	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.004	0.007	1.49E-12
68	Daire	0.000314	PleksiGlass	0.004	0.008	1.41E-12
69	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.001	0.001	8.31E-12
70	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.001	0.002	5.31E-12
71	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.001	0.003	4.07E-12
72	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.001	0.004	3.43E-12
73	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.001	0.005	3.00E-12
74	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.001	0.006	2.70E-12
75	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.001	0.007	2.45E-12
76	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.002	0.001	8.03E-12
77	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.002	0.002	5.66E-12
78	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.002	0.003	4.40E-12
79	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.002	0.004	3.60E-12
80	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.002	0.005	3.25E-12
81	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.002	0.006	2.85E-12
82	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.002	0.007	2.60E-12
83	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.003	0.001	7.34E-12
84	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.003	0.002	5.10E-12
85	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.003	0.003	4.06E-12
86	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.003	0.004	3.43E-12
87	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.003	0.005	2.98E-12
88	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.003	0.006	2.70E-12
89	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.003	0.007	2.46E-12
90	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.003	0.008	2.26E-12
91	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.003	0.009	2.12E-12
92	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.003	0.010	2.00E-12
93	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.004	0.001	6.54E-12
94	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.004	0.002	4.78E-12
95	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.004	0.003	3.89E-12

EK-A (devam)

S/N	Elektrot Türü	Elektrot Yüzey Alanı (m ²)	Dielektrik Malzeme Türü	Dielektrik Malzeme Kalınlığı (m)	Hava Aralığı (m)	LCR Meter ile 1 kHz'de Ölçülen Reaktör Sığası (F)
96	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.004	0.004	3.30E-12
97	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.004	0.005	2.93E-12
98	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.004	0.006	2.63E-12
99	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.004	0.007	2.47E-12
100	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.004	0.008	2.26E-12
101	Dikdörtgen	0.000800	Cam	0.004	0.009	2.09E-12
102	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.001	0.001	8.04E-12
103	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.001	0.002	5.19E-12
104	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.001	0.003	3.96E-12
105	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.001	0.004	3.32E-12
106	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.001	0.005	2.91E-12
107	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.001	0.006	2.54E-12
108	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.001	0.007	2.34E-12
109	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.001	0.008	2.16E-12
110	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.001	0.009	2.00E-12
111	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.001	0.010	1.86E-12
112	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.002	0.001	6.44E-12
113	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.002	0.002	4.62E-12
114	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.002	0.003	3.75E-12
115	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.002	0.004	3.18E-12
116	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.002	0.005	2.81E-12
117	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.002	0.006	2.51E-12
118	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.002	0.007	2.30E-12
119	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.002	0.008	2.12E-12
120	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.002	0.009	1.96E-12
121	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.002	0.010	1.87E-12
122	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.003	0.001	5.32E-12
123	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.003	0.002	4.15E-12
124	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.003	0.003	3.51E-12
125	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.003	0.004	2.99E-12
126	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.003	0.005	2.64E-12
127	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.003	0.006	2.41E-12
128	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.003	0.007	2.24E-12
129	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.003	0.008	2.08E-12
130	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.003	0.009	1.92E-12
131	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.003	0.010	1.81E-12
132	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.004	0.001	4.89E-12
133	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.004	0.002	4.02E-12
134	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.004	0.003	3.37E-12
135	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.004	0.004	2.91E-12
136	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.004	0.005	2.60E-12
137	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.004	0.006	2.41E-12
138	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.004	0.007	2.20E-12
139	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.004	0.008	2.04E-12
140	Dikdörtgen	0.000800	PleksiGlass	0.004	0.009	1.90E-12
141	Kare	0.000400	Cam	0.001	0.001	4.96E-12
142	Kare	0.000400	Cam	0.001	0.002	3.44E-12
143	Kare	0.000400	Cam	0.001	0.003	2.77E-12
144	Kare	0.000400	Cam	0.001	0.004	2.43E-12

EK-A (devam)

S/N	Elektrot Türü	Elektrot Yüzey Alanı (m ²)	Dielektrik Malzeme Türü	Dielektrik Malzeme Kalınlığı (m)	Hava Aralığı (m)	LCR Meter ile 1 kHz'de Ölçülen Reaktör Sığası (F)
145	Kare	0.000400	Cam	0.001	0.005	2.12E-12
146	Kare	0.000400	Cam	0.001	0.006	1.92E-12
147	Kare	0.000400	Cam	0.002	0.001	4.82E-12
148	Kare	0.000400	Cam	0.002	0.002	3.40E-12
149	Kare	0.000400	Cam	0.002	0.003	2.78E-12
150	Kare	0.000400	Cam	0.002	0.004	2.37E-12
151	Kare	0.000400	Cam	0.002	0.005	2.20E-12
152	Kare	0.000400	Cam	0.002	0.006	1.97E-12
153	Kare	0.000400	Cam	0.002	0.007	1.80E-12
154	Kare	0.000400	Cam	0.002	0.008	1.71E-12
155	Kare	0.000400	Cam	0.002	0.009	1.61E-12
156	Kare	0.000400	Cam	0.002	0.010	1.51E-12
157	Kare	0.000400	Cam	0.003	0.001	4.27E-12
158	Kare	0.000400	Cam	0.003	0.002	3.11E-12
159	Kare	0.000400	Cam	0.003	0.003	2.58E-12
160	Kare	0.000400	Cam	0.003	0.004	2.30E-12
161	Kare	0.000400	Cam	0.003	0.005	2.06E-12
162	Kare	0.000400	Cam	0.003	0.006	1.89E-12
163	Kare	0.000400	Cam	0.003	0.007	1.77E-12
164	Kare	0.000400	Cam	0.003	0.008	1.64E-12
165	Kare	0.000400	Cam	0.004	0.001	3.79E-12
166	Kare	0.000400	Cam	0.004	0.002	3.02E-12
167	Kare	0.000400	Cam	0.004	0.003	2.62E-12
168	Kare	0.000400	Cam	0.004	0.004	2.28E-12
169	Kare	0.000400	Cam	0.004	0.005	2.04E-12
170	Kare	0.000400	Cam	0.004	0.006	1.89E-12
171	Kare	0.000400	Cam	0.004	0.007	1.74E-12
172	Kare	0.000400	Cam	0.004	0.008	1.64E-12
173	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.001	0.001	4.31E-12
174	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.001	0.002	3.23E-12
175	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.001	0.003	2.57E-12
176	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.001	0.004	2.29E-12
177	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.001	0.005	2.02E-12
178	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.001	0.006	1.84E-12
179	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.001	0.007	1.68E-12
180	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.001	0.008	1.58E-12
181	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.001	0.009	1.47E-12
182	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.001	0.010	1.38E-12
183	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.001	0.011	1.33E-12
184	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.002	0.001	3.77E-12
185	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.002	0.002	2.92E-12
186	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.002	0.003	2.48E-12
187	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.002	0.004	2.15E-12
188	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.002	0.005	1.98E-12
189	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.002	0.006	1.77E-12
190	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.002	0.007	1.65E-12
191	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.002	0.008	1.55E-12
192	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.002	0.009	1.46E-12
193	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.002	0.010	1.38E-12

EK-A (devam)

S/N	Elektrot Türü	Elektrot Yüzey Alanı (m ²)	Dielektrik Malzeme Türü	Dielektrik Malzeme Kalınlığı (m)	Hava Aralığı (m)	LCR Meter ile 1 kHz'de Ölçülen Reaktör Sığası (F)
194	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.002	0.011	1.31E-12
195	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.003	0.001	3.26E-12
196	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.003	0.002	2.70E-12
197	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.003	0.003	2.31E-12
198	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.003	0.004	2.08E-12
199	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.003	0.005	1.87E-12
200	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.003	0.006	1.72E-12
201	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.003	0.007	1.60E-12
202	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.003	0.008	1.50E-12
203	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.003	0.009	1.43E-12
204	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.003	0.010	1.35E-12
205	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.004	0.001	3.12E-12
206	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.004	0.002	2.56E-12
207	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.004	0.003	2.28E-12
208	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.004	0.004	2.04E-12
209	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.004	0.005	1.86E-12
210	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.004	0.006	1.71E-12
211	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.004	0.007	1.58E-12
212	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.004	0.008	1.51E-12
213	Kare	0.000400	PleksiGlass	0.004	0.009	1.42E-12
214	Oval	0.001114	Cam	0.001	0.001	8.51E-12
215	Oval	0.001114	Cam	0.001	0.002	5.86E-12
216	Oval	0.001114	Cam	0.001	0.003	4.83E-12
217	Oval	0.001114	Cam	0.001	0.004	4.12E-12
218	Oval	0.001114	Cam	0.001	0.005	3.56E-12
219	Oval	0.001114	Cam	0.001	0.006	3.18E-12
220	Oval	0.001114	Cam	0.002	0.001	9.04E+12
221	Oval	0.001114	Cam	0.002	0.002	6.23E-12
222	Oval	0.001114	Cam	0.002	0.003	5.28E-12
223	Oval	0.001114	Cam	0.002	0.004	4.42E-12
224	Oval	0.001114	Cam	0.002	0.005	3.81E-12
225	Oval	0.001114	Cam	0.002	0.006	3.33E-12
226	Oval	0.001114	Cam	0.002	0.007	3.04E-12
227	Oval	0.001114	Cam	0.002	0.008	2.79E-12
228	Oval	0.001114	Cam	0.002	0.009	2.56E-12
229	Oval	0.001114	Cam	0.003	0.001	7.30E-12
230	Oval	0.001114	Cam	0.003	0.002	5.52E-12
231	Oval	0.001114	Cam	0.003	0.003	4.36E-12
232	Oval	0.001114	Cam	0.003	0.004	3.98E-12
233	Oval	0.001114	Cam	0.003	0.005	3.50E-12
234	Oval	0.001114	Cam	0.003	0.006	3.16E-12
235	Oval	0.001114	Cam	0.003	0.007	2.87E-12
236	Oval	0.001114	Cam	0.003	0.008	2.66E-12
237	Oval	0.001114	Cam	0.003	0.009	2.48E-12
238	Oval	0.001114	Cam	0.004	0.001	6.82E-12
239	Oval	0.001114	Cam	0.004	0.002	5.31E-12
240	Oval	0.001114	Cam	0.004	0.003	4.47E-12
241	Oval	0.001114	Cam	0.004	0.004	3.85E-12
242	Oval	0.001114	Cam	0.004	0.005	3.39E-12

EK-A (devam)

S/N	Elektrot Türü	Elektrot Yüzey Alanı (m ²)	Dielektrik Malzeme Türü	Dielektrik Malzeme Kalınlığı (m)	Hava Aralığı (m)	LCR Meter ile 1 kHz'de Ölçülen Reaktör Sığası (F)
243	Oval	0.001114	Cam	0.004	0.006	3.09E-12
244	Oval	0.001114	Cam	0.004	0.007	2.83E-12
245	Oval	0.001114	Cam	0.004	0.008	2.63E-12
246	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.001	0.001	7.79E-12
247	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.001	0.002	5.56E-12
248	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.001	0.003	4.58E-12
249	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.001	0.004	3.89E-12
250	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.001	0.005	3.35E-12
251	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.001	0.006	3.03E-12
252	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.001	0.007	2.75E-12
253	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.001	0.008	2.54E-12
254	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.001	0.009	2.34E-12
255	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.002	0.001	6.75E-12
256	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.002	0.002	5.18E-12
257	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.002	0.003	4.31E-12
258	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.002	0.004	3.73E-12
259	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.002	0.005	3.29E-12
260	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.002	0.006	2.99E-12
261	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.002	0.007	2.71E-12
262	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.002	0.008	2.51E-12
263	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.002	0.009	2.31E-12
264	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.003	0.001	6.57E-12
265	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.003	0.002	5.00E-12
266	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.003	0.003	4.23E-12
267	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.003	0.004	3.58E-12
268	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.003	0.005	3.20E-12
269	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.003	0.006	2.86E-12
270	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.003	0.007	2.65E-12
271	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.003	0.008	2.45E-12
272	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.003	0.009	2.32E-12
273	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.004	0.001	5.71E-12
274	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.004	0.002	4.77E-12
275	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.004	0.003	3.89E-12
276	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.004	0.004	3.44E-12
277	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.004	0.005	3.07E-12
278	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.004	0.006	2.81E-12
279	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.004	0.007	2.61E-12
280	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.004	0.008	2.45E-12
281	Oval	0.001114	PleksiGlass	0.004	0.009	2.26E-12

EK-B Plazma Ölçümlerinde Kullanılan Matlab Kodları

EK-B.1. Plazma gücü, elektron yoğunluğu ve Lissajous grafiklerinin hesabı için kullanılan Matlab kodları

```
% Zeki GETİZMEN 16.02.2022 (Yüksek Lisans)
% Soğuk Plazma (Paralel Plaka DBD) Parametreleri Hesabı Ölçüm
Kapasitörü Yöntemi (Lissajous Grafikleri) Yaklaşımı
```

```
clc;
clear all
close all
```

```
Frekans=1000; % 1 kHz ölçümdeki frekans değeri bu alana
girilmeli
alan=pi*0.01^2; % Ölçümdeki elektrot alan değeri bu alana
girilmeli
eV=1.6e-19; % Elektron enerjisinin dönüşüm değeri (joule
değerinden elektrovoltta)
Vb=2e3; % Bhom hızı
Elost=41.4; % Havanın elektron-iyon çifti için harcaması
gereken enerji elektrovolt cinsinden
Kapasitans=715.33e-12; % Ölçüm kapasitörünün sığa değeri
%% Verilerin Okunması ve İşlenmesi
```

```
% 1.Sutun Zaman, 2.Sutun CH1-Yüksek Gerilim Probu (1:1000),
3.Sutun CH2-Ölçüm Kapasitör Gerilimi (1:10)
```

```
% İlgili Klasörde bulunan csv formatındaki plazma gerilimi ve
ölçüm kapasitör gerilimin Matlab a aktarılması
```

```
Dosya = dir('*.csv');
Dosya_Sayisi = length(Dosya);
Veri = cell(length(Dosya), 1);
```

```
for i = 1:Dosya_Sayisi
    Veri{i} = readmatrix(Dosya(i).name);
end
```

```
Veri_Zaman = Veri{1}(:,1);
```

```
% İlgili ölçüm için periyot aralığının örnekleme değerleri
```

```
for i=1:600
    if Veri_Zaman(i)==-0.0017
        Alt_Sinir_1=i;
    end
    if Veri_Zaman(i)==-0.0007
        Ust_Sinir_1=i;
    end
    if Veri_Zaman(i)==-0.00175
        Alt_Sinir_2=i;
    end
    if Veri_Zaman(i)==-0.00075
        Ust_Sinir_2=i;
    end
end
end
```

EK-B.1. (devam)

```

konum1=131;
konum2=231;

% Problar ile ölçülen değerlerin gerçek değerlerine atanması ve
grafikler için smooth işlemi

for j=1:Dosya_Sayisi

Veri_Yuksek_Gerilim{j}= Veri{j}(:,2);
Veri_Olcum_Kapasitor_Gerilimi{j}= Veri{j}(:,3);

Kapasitor_Yuku{j}=Kapasitans*10*Veri_Olcum_Kapasitor_Gerilimi{j};
Plazma_Gerilimi{j}=1000*Veri_Yuksek_Gerilim{j};

Gerilim_Smooth{j}=smooth(Veri_Zaman,Veri_Yuksek_Gerilim{j},15);
Kapasitor_Gerilimi_Smooth{j}=smooth(Veri_Zaman,Veri_Olcum_Kapasito
r_Gerilimi{j},15);

Plazma_Gerilimi_Smooth{j}=Gerilim_Smooth{j}*1000;
Kapasitor_Yuku_Smooth{j}=Kapasitor_Gerilimi_Smooth{j}*Kapasitans*1
0;

end

% Plazma gerilimin ve ölçüm gerilimin rms değerlerinin
hesaplanması

for m=1:Dosya_Sayisi

Vpp_Plazma(m)=max(Gerilim_Smooth{1,m});
Vrms_Plazma(m)=Vpp_Plazma(m)/sqrt(2);

Vpp_Kapasitor(m)=max(Kapasitor_Gerilimi_Smooth{1,m});
Vrms_Kapasitor(m)=Vpp_Kapasitor(m)/sqrt(2);

% İlgili ölçümün için bir periyotta güç ve elektron yoğunluğunun
hesaplanması

for k=konum1:konum2
Anlik_Enerji{1,m}(k-
konum1+1)=Plazma_Gerilimi{1,m}(k,1)*(Kapasitor_Yuku{1,m}(k,1)-
Kapasitor_Yuku{1,m}(k-1,1));
end

Toplam_Enerji(m)=sum(Anlik_Enerji{1,m});
Guc(m)=Frekans*Toplam_Enerji(m);

ne(m)=Guc(m)/(2*alan*Vb*Elost*eV);

end

% İlgili ölçümün için plazma gerilimi ve ölçüm kapasitör gerilimi
arasındaki faz farkının hesaplanması

```

EK-B.1. (devam)

```

for i = 1:Dosya_Sayisi
x{i} = Veri_YukseK_Gerilim{i} - mean(Veri_YukseK_Gerilim{i});

y{i} = Veri_Olcum_Kapasitor_Gerilimi{i} -
mean(Veri_Olcum_Kapasitor_Gerilimi{i});
X{i}=fft(x{i});
Y{i}=fft(y{i});
[Genlik_x(i), Konum_x(i)] = max(abs(X{i}));
[Genlik_y(i), Konum_y(i)] = max(abs(Y{i}));
Faz_x(i) = angle(X{i}(Konum_x(i)));
Faz_y(i) = angle(Y{i}(Konum_y(i)));
Faz_Farki(i) = Faz_y(i) - Faz_x(i);
Faz_Acisi(i)=Faz_Farki(i)*(180/pi);
end

% Lissajous grafiğinin alanının hesaplanması

Vrms_Plazma_Str=num2str(Toplam_Enerji(1:Dosya_Sayisi).','Enerji
(Şeklin Alanı) = %f J');

% İlgili ölçüm değerin diğer hesaplamaları için gerekli dizi
değerlerine atanması

Daire_1mm_Cam_1mm_Hava=table(Vrms_Plazma,Guc,ne,Vrms_Kapasitor,Faz
_Farki);

% İlgili ölçüm için elektron yoğunluğunun plazma gerilimine bağlı
değişimi grafiği

figure(1)
plot(Vrms_Plazma,ne,'Marker','square');
xlabel('Plazma Gerilimi (kV RMS) ');
ylabel('Plazma Elektron Yoğunluğu (m^-3)')
title('Uygulanan Gerilime Bağlı Plazmanın Hesaplanan Elektron
Yoğunluğunu Değişim Grafiği ')

% İlgili ölçüm için plazma gücünün plazma gerilimine bağlı
değişimi grafiği

figure(2)
plot(Vrms_Plazma,Guc,'Marker','square');
xlabel('Plazma Gerilimi (kV RMS) ');
ylabel('Plazma Gücü (W)')
title('Uygulanan Gerilime Bağlı Plazma Gücünün Değişim Grafiği ')

% İlgili ölçüm için Lissajous grafiği

figure(3)
figure(3)
for i = 1:Dosya_Sayisi
plot(Plazma_Gerilimi_Smooth{1,i}(konum1:konum2,1),Kapasitor_Yuku_S
mooth{1,i}(konum1:konum2,1),'LineWidth',1.5);
hold on
end
ax = gca;
ax.XLabel.Interpreter = 'tex';

```

EK-B.1. (devam)

```

ax.YLabel.Interpreter = 'tex';
a = get(gca,'XTickLabel');
a2 = get(gca,'YTickLabel');
set(gca,'XTickLabel',a,'fontsize',18,'FontWeight','bold')
set(gca,'YTickLabel',a2,'fontsize',18,'FontWeight','bold')
set(gca,'XTickLabelMode','auto')
set(gca,'YTickLabelMode','auto')
xlabel('Applied Voltage
(kV_p_p)','fontweight','bold','FontSize',28)
ylabel('The Charge of the Measurement Capacitor
(C)','fontweight','bold','FontSize',28)
% title('Lissajous Graph (Energy Graph) of Plasma','FontSize',24)
legend(Vrms_Plazma_Str,'fontweight','bold','FontSize',16);

```

EK-B.2. Plazma gerilimine bağı plazma gücünün ve elektron yoğunluğunun değişimi grafikleri oluşturulması için kullanılan Matlab kodları

```
% Zeki GETİZMEN 16.02.2022 (Yüksek Lisans)
% Soğuk Plazma (Paralel DBD) Parametreleri Hesabı Deşarj Yöntemi
(Lissajous Grafikleri) Yaklaşımı
% Tüm Elektrot, Dielektrik türü ve kalınlıkları için elektron
yoğunluğunun ve plazma gücünün plazma gerilimine bağıli değişimi
(Tüm hava aralıkları için)
clc;
clear all
close all

%% Verilerin Okunması ve İşlenmesi

% 1.Sutun Zaman, 2.Sutun CH1-Yüksek Gerilim Probu (1:1000),
3.Sutun CH2-Ölçüm Kapasitör Gerilimi (1:10)
% Elektrot türlerine göre dielektrik kalınlıkları için hazırlanmış
dizi değerlerinin Matlab'a yüklenmesi

Dosya = dir('*.mat');
Dosya_Sayisi = length(Dosya);

for i = 1:Dosya_Sayisi
    load(Dosya(i).name);
end

% Oluşturulacak grafikleri fit değerlerinin oluşturulması (ilgili
elektrot türü ve dielektrik kalınlığı için oluşturulmalıdır).

for i = 1:6
    Fit_Daire_1mm_Cam_Guc{1,i}=fitlm(Daire_1mm_Cam{1,i},Daire_1mm_Cam{
2,i},"quadratic");
    Fit_Daire_1mm_Cam_ne{1,i}=fitlm(Daire_1mm_Cam{1,i},Daire_1mm_Cam{3
,i},"quadratic");
end

% Fit işlemi ile oluşturulan grafiklerde eğrilerin farklı
renklerde görünmesi sağlamak için renk değerlerinin atanması

renk(1)="r";
renk(2)="c";
renk(3)="b";
renk(4)="g";
renk(5)="k";
renk(6)="m";
renk(7)="y";
renk(8)="[0.7 0.5 0.3]";
renk(9)="[0.9 0.9 0.9]";
renk(10)="[1 0.4 0]";
renk(11)="[0.2 0.4 0.78]";
```

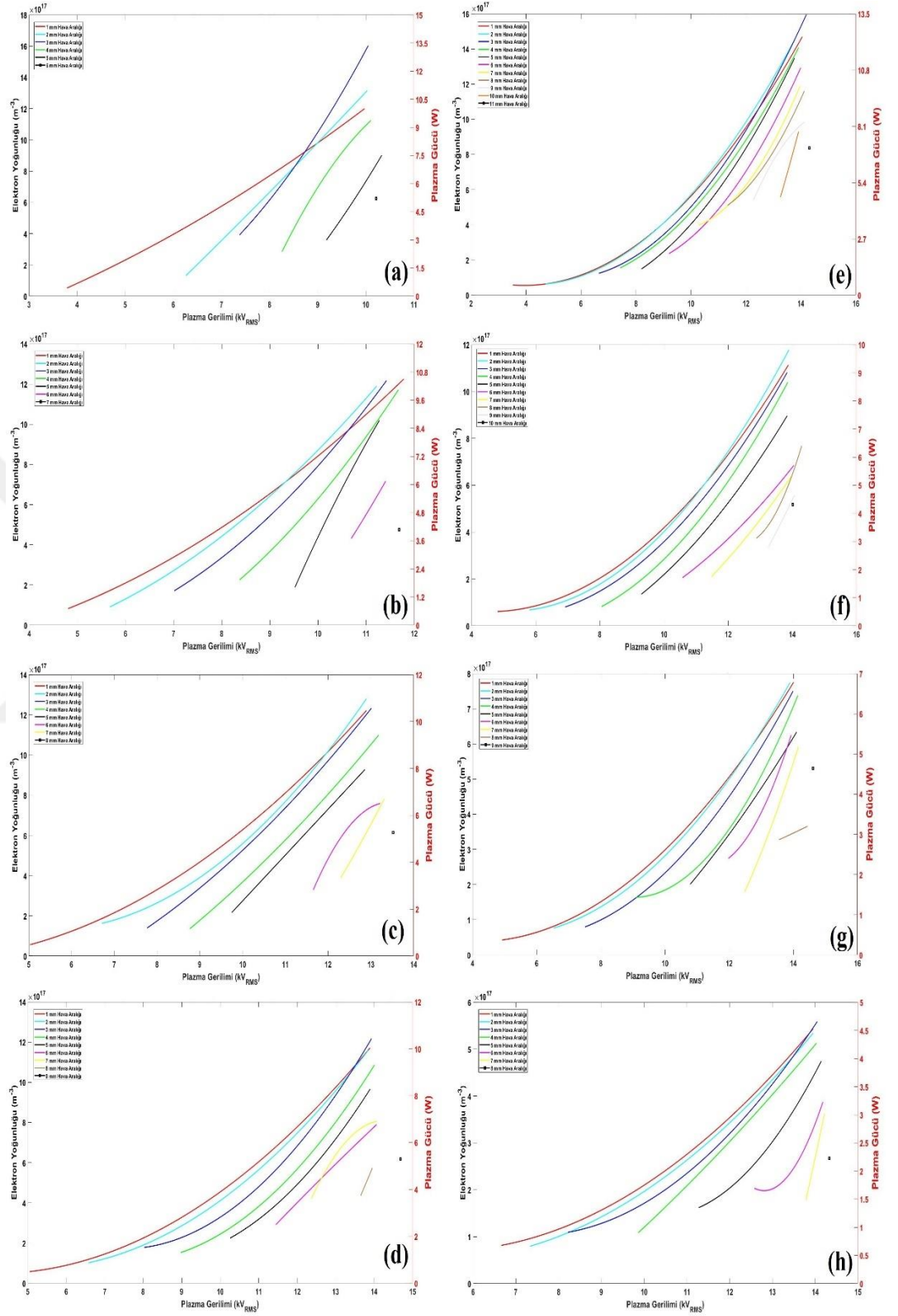
EK-B.2. (devam)

% Fit işlemi ile oluşturulan grafiklerin elektrot ve dielektrik türlerine göre oluşturulması (ilgili elektrot türü ve dielektrik kalınlığı için oluşturulmalıdır).

figure(1)

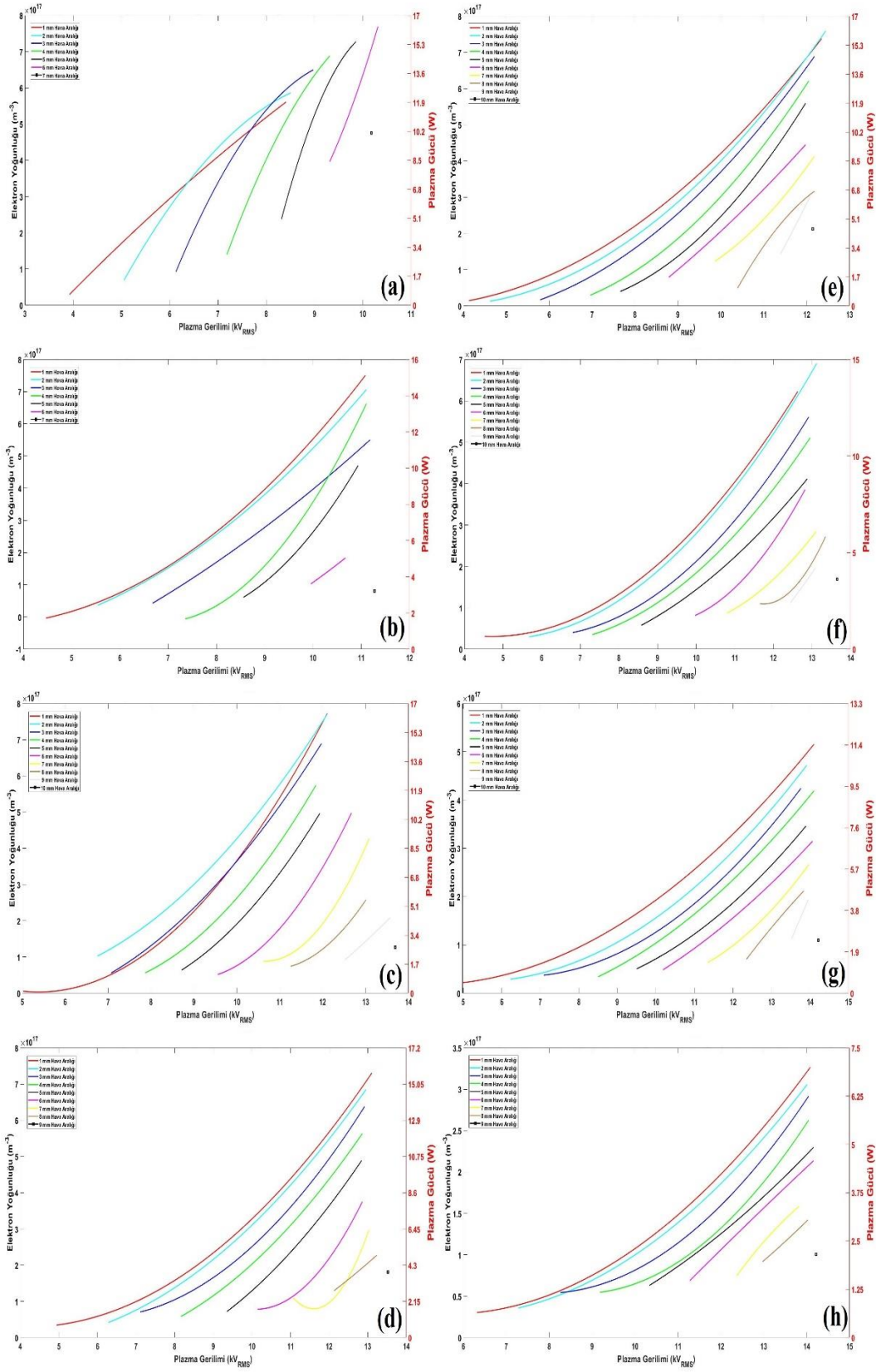
```
for i=1:5
Cizim_i=plot(Fit_Daire_1mm_Cam_ne{1,i});
delete(Cizim_i(1))
delete(Cizim_i(3))
delete(Cizim_i(4))
Cizim_i(2).Color=renk(i);
Cizim_i(2).LineWidth=2;
hold on
end
Cizim_11=plot(Fit_Daire_1mm_Cam_ne{1,6});
delete(Cizim_11(1))
delete(Cizim_11(3))
delete(Cizim_11(4))
Cizim_11(2).Color='k';
Cizim_11(2).LineWidth=2;
Cizim_11(2).Marker="square";
ax = gca;
ax.XLabel.Interpreter = 'tex';
ax.YLabel.Interpreter = 'tex';
a = get(gca,'XTickLabel');
a2 = get(gca,'YTickLabel');
set(gca,'XTickLabel',a,'fontsize',18,'FontWeight','bold')
set(gca,'YTickLabel',a2,'fontsize',18,'FontWeight','bold')
set(gca,'XTickLabelMode','auto')
set(gca,'YTickLabelMode','auto')
xlabel('Plazma Gerilimi
(kV_{RMS})','FontWeight','bold','FontSize',28)
ylabel('Elektron Yoğunluğu (m^-
^3)','FontWeight','bold','FontSize',28)
yyaxis right
ax.YColor = 'r';
set(gca,'YTickLabel',a2,'fontsize',18,'FontWeight','bold')
ylabel('Plazma Gücü (W)','FontWeight','bold','FontSize',24)
yticks(0:1/10:1)
yticklabels(0:15/10:15)
title('Daire Elektrod ve 1 mm Cam için Plazmanın Gerilimine Bağlı
Hesaplanan Elektron Yoğunluğu ve Plazma Gücü Grafiği (Tüm Hava
Aralıkları)','FontSize',15)
legend(num2str((1:6).','),'%d mm Hava
Aralığı'),'FontWeight','bold','FontSize',12)
```

EK-C Plazma Gerilimine Bağlı Plazma Gücü ve Elektron Yoğunluğu Grafikleri



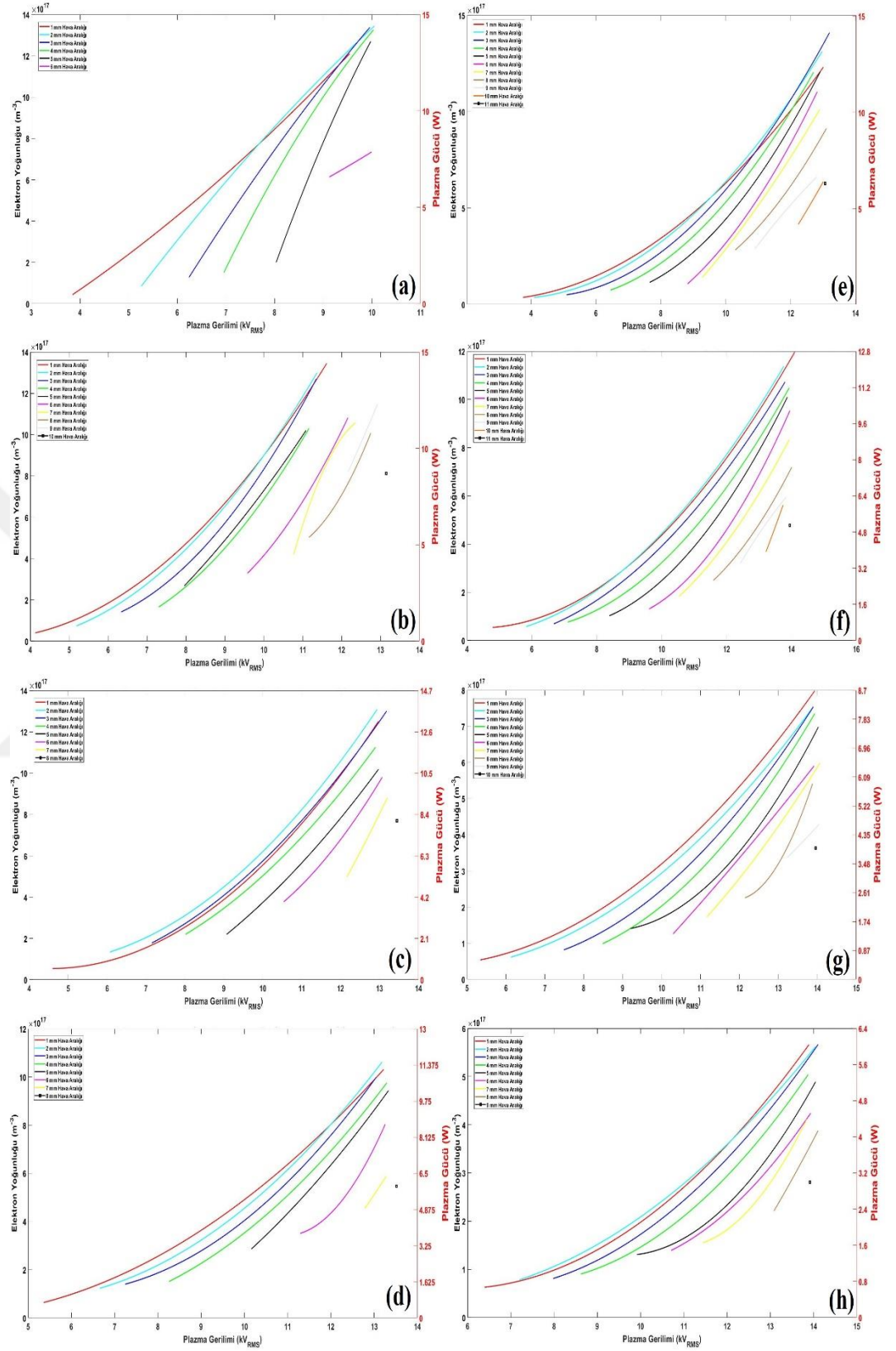
Daire elektrot için plazma gücünün ve elektron yoğunluğunun uygulanan gerilime bağlı değişimi (Tüm hava aralıkları): **a)** 1 mm cam, **b)** 2 mm cam, **c)** 3 mm cam, **d)** 4 mm cam, **e)** 1 mm pleksiglas, **f)** 2 mm pleksiglas, **g)** 3 mm pleksiglas, **h)** 4 mm pleksiglas.

EK-C (devam)



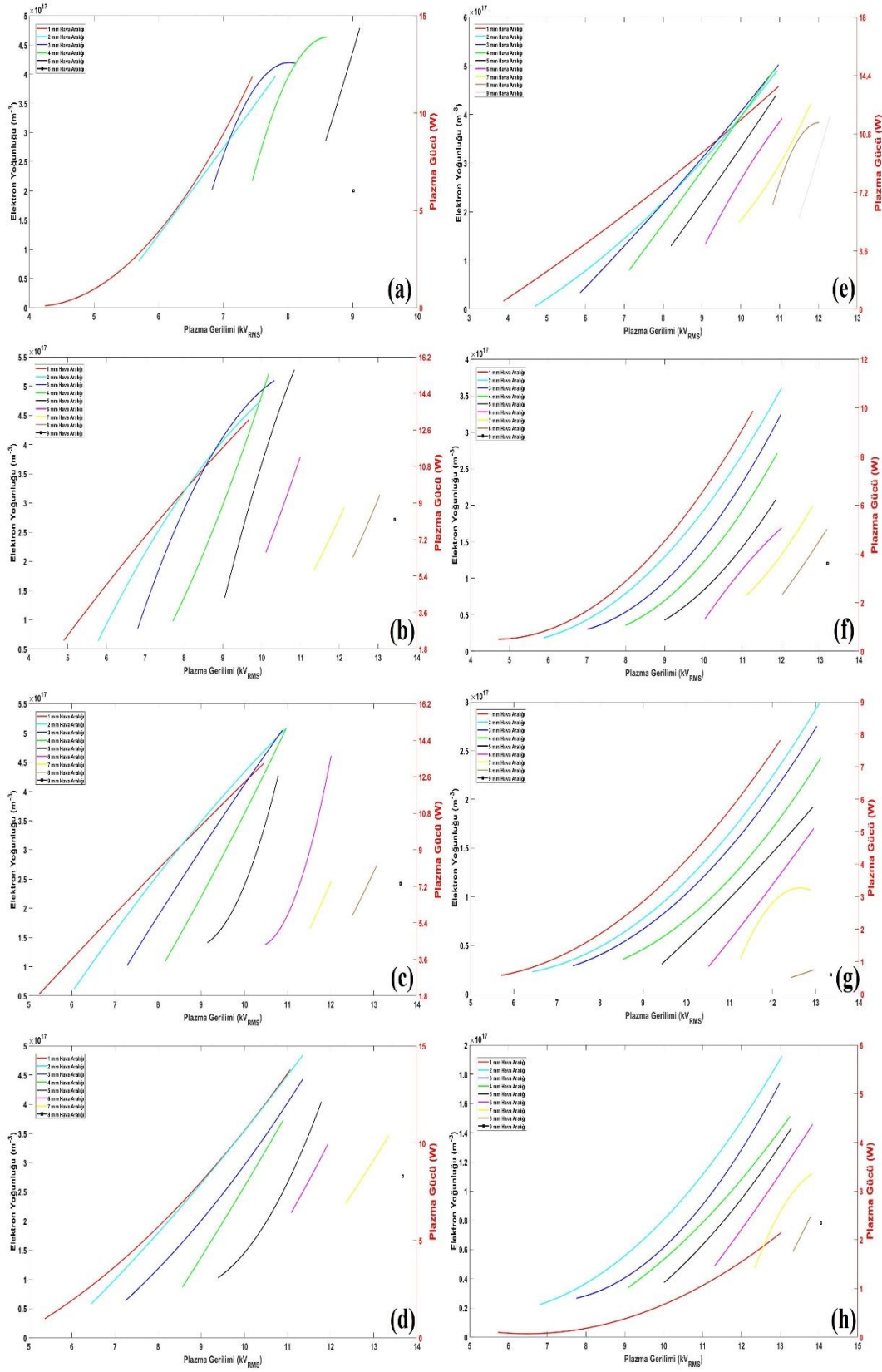
Dikdörtgen elektrot için plazma gücünün ve elektron yoğunluğunun uygulanan gerilime bağlı değişimi (Tüm hava aralıkları): **a)** 1 mm cam, **b)** 2 mm cam, **c)** 3 mm cam, **d)** 4 mm cam, **e)** 1 mm pleksiglas, **f)** 2 mm pleksiglas, **g)** 3 mm pleksiglas, **h)** 4 mm pleksiglas.

EK-C (devam)



Kare elektrot için plazma gücünün ve elektron yoğunluğunun uygulanan gerilime bağlı değişimi (Tüm hava aralıkları): **a)** 1 mm cam, **b)** 2 mm cam, **c)** 3 mm cam, **d)** 4 mm cam, **e)** 1 mm pleksiglas, **f)** 2 mm pleksiglas, **g)** 3 mm pleksiglas, **h)** 4 mm pleksiglas.

EK-C (devam)



Oval elektrot için plazma gücünün ve elektron yoğunluğunun uygulanan gerilime bağlı değişimi (Tüm hava aralıkları): **a)** 1 mm cam, **b)** 2 mm cam, **c)** 3 mm cam, **d)** 4 mm cam, **e)** 1 mm pleksiglas, **f)** 2 mm pleksiglas, **g)** 3 mm pleksiglas, **h)** 4 mm pleksiglas.