

T.C.
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BARİYER BOŞALMASINDAKİ AKIM KARARSIZLIKLARININ
DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZİ

FEVZİ HANSU

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

MALATYA
Ocak 2012

Tez Başlığı : **“Bariyer Boşalmasındaki Akım Kararsızlıklarının Deneysel ve Nümerik Analizi”**

Tezi Hazırlayan : **Fevzi HANSU**

Sınav Tarihi : **05.01.2012**

Yukarıda adı geçen tez, jürimizce değerlendirilerek Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Doktora Tezi olarak kabul edilmiştir.

Sınav Jürisi Üyeleri

Doç. Dr. Selçuk YILDIRIM
(Jüri Başkanı)

Siirt Üniversitesi
(Elektrik-Elektronik Mühendisliği)

Prof. Dr. Hafız ALİSOY
(Danışman)

İnönü Üniversitesi

Doç. Dr. Serdar Ethem HAMAMCI
(Üye)

İnönü Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Celaleddin YEROĞLU
(Üye)

İnönü Üniversitesi
(Bilgisayar Mühendisliği)

Yrd. Doç. Dr. Asım KAYGUSUZ
(Üye)

İnönü Üniversitesi

İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

Prof. Dr. Asım KÜNKÜL
Enstitü Müdürü

ONUR SÖZÜ

Doktora Tezi olarak sunduğum “**Bariyer Boşalmasındaki Akım Kararsızlıklarının Deneysel ve Nümerik Analizi**” başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün kaynakların, hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterilenlerden oluştuğunu belirtir, bunu onurumla doğrularım.

Fevzi HANSU

ÖZET

Doktora Tezi

BARİYER BOŞALMASINDAKİ AKIM KARARSIZLIKLARININ DENEYSEL VE NÜMERİK ANALİZİ

Fevzi HANSU

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

124+xi sayfa

2011

Danışman: Prof. Dr. Hafız ALİSOY

Dielektrik bariyer boşalmalarının (DBB) ortam parametreleri ve koşullarına bağlı olarak incelenmesi, gazların yalıtım elemanı olarak yaygın bir şekilde kullanıldığı yüksek gerilim tekniği ve boşalma olaylarını esas alan diğer teknolojik işlemler açısından büyük öneme sahiptir.

Farklı gaz ortamlarında, tek bariyerli Metal-Gaz-Dielektrik-Metal (*MGDM*) ve çift bariyerli Metal-Dielektrik-Gaz-Dielektrik-Metal (*MDGDM*) DBB hücre modellerinde, dielektrik tabakadaki yüzey yüklenme mekanizmasının neden olduğu akım kararsızlıklarının analizi için bariyer boşalmasının deneysel olarak incelenmesi ve nümerik olarak modellenmesi önemli bir avantaj sağlar.

Bu çalışmada, Townsend yaklaşımında hava ve azot ortamında $pd < (pd)_{kr}$ ve $pd > (pd)_{kr}$ (*p-basınç, d-elektrotlar arasındaki mesafe*) koşullarında, *MGDM* ve *MDGDM* DBB hücreleri için iletkenlik mekanizmasını temel alan yeni bir model geliştirilmiş ve DBB hücresinde gerçekleşen akım osilasyonlarının teorik analizi ve nümerik benzetimi yapılmıştır. Deneysel olarak ölçülen *Gerilim-Akım* ve *Gerilim-Yük* eğrilerinden hareketle, modelin temel parametrelerinin belirlenmesi gösterilmiş ve elde edilen deneysel sonuçların, önerilen nümerik modelle uyumluluğu karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: Dielektrik Bariyer Boşalması (DBB), Akım Osilasyonları, Townsend Mekanizması

ABSTRACT

PhD. Thesis

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF CURRENT INSTABILITIES IN BARRIER DISCHARGE

Fevzi HANSU

Inonu University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical-Electronics Engineering

124+xi pages

2011

Supervisor: Prof. Dr. Hafız ALISOY

The investigation of dielectric barrier discharges (DBD) depending on the medium parameters and conditions has a great significance in the perspective of the technological processes based on discharge phenomena and high voltage technique in which the gases are widely used as an insulation material.

In various gas mediums, in DBD cell models including Metal-Gas-Dielectric-Metal (*MGDM*) with single barrier and Metal-Dielectric-Gas-Dielectric-Metal (*MDGDM*) with double barriers, the experimental investigation and numerical modeling of barrier discharges provide a considerable advantage for the analysis of the current instabilities resulting from surface charging mechanism on dielectric layer.

In this study, a new model based on conductivity mechanism for *MGDM* and *MDGDM* DBD cells has been developed under the conditions of $pd < (pd)_{cr}$ and $pd > (pd)_{cr}$, (p -pressure, d -the distance between electrodes) in air and nitrogen medium by considering Townsend approach, and theoretical analysis and numerical simulation of current oscillations occurring in DBD cell, have been performed. By considering the *Voltage-Current* and *Voltage-Charge* curves measured experimentally, the determining of basic parameters of the model has been explained and the consistency between obtained experimental results and the results of proposed numerical method has been investigated comparatively.

KEYWORDS: Dielectric Barrier Discharge (DBD), Current Oscillations,
Townsend Mechanism

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgemedi beni yönlendiren danışman hocam Sayın Prof. Dr. Hafız ALİSOY'a;

Tez çalışması süresince önerileriyle ve yardımlarıyla karşılaştığım sorunları aşmamı sağlayan Tez İzleme Komitesi Üyelerine;

Tez süresince karşılaştığım her türlü sorunda yardımlarını esirgemeyen ve verdikleri tavsiyelerle bana çok şeyler katan İnönü Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyelerine ve öğretim elemanlarına;

Tezin bir bölümünü oluşturan simülasyon analizlerinde bana gerekli desteği sağlayan doktora arkadaşım Barış Baykant ALAGÖZ'e;

Tüm bu süreçte, tez çalışmalarımı tamamlamak için bana gerekli olanakları sağlayan Siirt Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi dekanı sayın Prof. Dr. Ömer ŞAHİN'e, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölüm Başkanı sayın Doç. Dr. Selçuk YILDIRIM'a ve çalışma arkadaşlarıma;

Bugünlere gelmemde büyük emeği olan ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili anneme, ablalarıma ve abilerime

teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	3
2.1. DBB'nin Akım Osilasyonları	3
2.2. DBB'nin Delinme Mekanizması	8
2.3. DBB Mekanizmasına Ait Bazı Temel Denklemler ve Basit Yaklaşımlar	10
2.4. DBB Mekanizmasındaki Akım Gelişmesi	13
2.5. Hava ve Azot Gazı Ortamlarında Gerçekleşen Bariyer Boşalmasının İyonlaşma Katsayısının Belirlenmesi	14
2.6. Bariyer Boşalmasının Pratik Uygulamaları	16
2.6.1. DBB Yöntemiyle Ozon (O_3) Üretimi	16
2.6.2. DBB Excimer (UV) Lambalar	19
2.6.3. DBB'nin Metal-Dielektrik-Gaz-Dielektrik-Metal (MDGDM) Ozonator Sistemine Uygulanması	20
2.6.4. DBB'nin Kullanılmasıyla Kobalt ($Co(0)$) Katalizörü Ortamında Sodyumborhidrür ($NaBH_4$) Çözeltilisinden Hidrojen Üretimi	23
2.6.5. DBB'nin Kullanılmasıyla Nikel ($Ni(0)$) Katalizörü Ortamında Sodyumborhidrür ($NaBH_4$) Çözeltilisinden Hidrojen Üretimi	26
2.6.6. DBB'nin Diğer Uygulamaları	29
3. MATERYAL ve YÖNTEM	30
3.1. Materyal	30
3.1.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Hava ve Azot Gazlarının Özellikleri	30
3.1.1.1. Hava	30
3.1.1.2. Azot	32
3.1.2. Poliimid Bariyer Tabakalar	33
3.1.3. DBB Elektrot Sistemi	35
3.1.4. DBB Deney Sistemi	36
3.1.5. Deneysel Çalışmada Kullanılan Araç-Gereçler	39
3.2. Yöntem	40
3.2.1. DBB Deneyinin Kapsamı ve İçeriği	41
3.2.2. DBB Akım Osilasyonlarının Deneysel Olarak Görüntülenmesi	43
3.2.3. Yalıtım Sistemlerinde Kullanılan Dielektrik Malzemelerdeki Kusurlar ...	45
3.2.4. Dielektrik Malzemelerdeki Kusurların Sınıflandırılması	49
3.2.5. Dielektrik Malzemelerin Kusur Parametreleri	50
3.2.6. Bariyer Boşalmasının Modellenmesi	52
3.2.7. Tek Bariyerli İki Tabakalı Metal-Gaz-Dielektrik-Metal (MGDM) DBB Hücre Modeli	53
3.2.8. Çift Bariyerli Üç Tabakalı Seri Metal-Dielektrik-Gaz-Dielektrik-Metal (MDGDM) DBB Hücre Modeli	58
3.2.9. Bariyer Boşalmasının Nümerik Modeli	64

3.2.10. DBB'nin Hava ve N_2 Gaz Ortamlarındaki Bazı Parametrelerinin Hesabı	66
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	68
4.1. Bariyer Boşalmasının Deneysel Ölçümler Sonucunda Elde Edilmiş Olan <i>Gerilim-Akım</i> Özeğrileri	68
4.1.1. DBB'nin $pd < pd_{kr}$ Değerlerinde Ölçülen <i>Gerilim-Akım</i> Özeğrileri	69
4.1.2. DBB'nin $pd > pd_{kr}$ Değerlerinde Ölçülen <i>Gerilim-Akım</i> Özeğrileri	71
4.1.3. pd 'nin DBB Tutuşma ve Sönümlleme Gerilimleri Üzerindeki Etkisi	73
4.2. DBB'nin Deneysel Olarak Görüntülenen <i>Gerilim-Akım</i> Osilasyonları	74
4.2.1. R_v Direncinin Devrede Olması Durumunda Görüntülenen Osilasyonlar ..	74
4.2.2. C_v Kondansatörünün Devrede Olması Durumunda Görüntülenen Osilasyonlar	78
4.2.3. R_v Direnci ve C_v Kondansatörünün Birlikte Devrede Olması Durumunda Görüntülenen Osilasyonlar	80
4.2.4. R_v ve C_v 'nin Devrede Olmadığı ve Gerilim Sabit Olduğu Durumunda, pd 'nin Değiştirilmesi Sonucu Görüntülenen Osilasyonlar	84
4.3. DBB'nin Deneysel Olarak Belirlenen <i>Gerilim-Yük</i> Karakteristiğinden Yararlanarak Boşalma Parametrelerinin Sayısal Olarak Belirlenmesi	88
4.4. Bariyer Boşalmasının Deneysel Olarak Belirlenen Grafiklerinin Nümerik Olarak Belirlenen Grafiklerle Karşılaştırılması	103
4.4.1. α İyonizasyon Katsayısı ve β Elektron Katsayısının Benzetim Sonuçları Üzerindeki Etkileri	108
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	111
6. KAYNAKLAR	115
EKLER	121
Ek 1. Çalışmada Kullanılan Matlab Programı	121
ÖZGEÇMİŞ	124

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. DBB'nin azot ortamındaki gerilim ve akımının osilasyon biçimleri [26].....	5
Şekil 2.2. Boşalma aralığının farklı değerlerindeki akım osilasyonlarının görüntüleri (a) $d=5\text{ mm}$, (b) $d=4\text{ mm}$, (c) $d=3\text{ mm}$ ve (d) $d=2\text{ mm}$ [27]	6
Şekil 2.3. Elektrot aralığında gerçekleşen DBB'nin görüntüsü [35]	9
Şekil 2.4. DBB'de elektrot yüzeylerine yayılan boşalmanın görüntüsü ve delinme sonucu oluşan mikro deşarj kanallarının görüntüsü [37].....	10
Şekil 2.5. Elektrik gaz boşalması hücresinin genel şeması.....	11
Şekil 2.6. Akım, yüzey yükü ve gaz aralığındaki elektrik alanının zamana göre değişim grafiği (I. Fazda akım, elektrik alanının $E=E_d$ seviyesine getirir. II. fazda ise iletim akımı sıfırdır) [38]	13
Şekil 2.7. Oksijen (O_2)'deki kesirli enerji kayıpları grafiği [44]	17
Şekil 2.8. Farklı pd koşullarında gerçekleşen DBB'nin $V-I$ karakteristikleri [49]	21
Şekil 2.9. DBB'nin elektrot aralığındaki kanal sayılarının dağılım grafiği.....	22
Şekil 2.10. DBB ortamında $Co(0)$ katalizörü üretmek için hazırlanan deney sistemi [51]	24
Şekil 2.11. DBB plazma ortamında üretilen $Co(0)$ katalizörünün, $NaBH_4$ çözeltisinden hidrojen üretimi üzerindeki etkisi [51]	25
Şekil 2.12. $Co(0)$ katalizörü için a) Normal metotla elde edilen katalizörün SEM görüntüsü b) DBB etkisiyle üretilen katalizörün SEM görüntüsü [51].....	25
Şekil 2.13. DBB ortamında $Ni(0)$ katalizörünün üretimi için hazırlanan hücre [52].....	26
Şekil 2.14. DBB plazma etkisiyle üretilen $Ni(0)$ katalizörünün, $NaBH_4$ çözeltisinden hidrojen üretimi üzerindeki etkisi [52]	27
Şekil 2.15. $Ni(0)$ katalizörü için a) Normal metotla elde edilen katalizörün SEM görüntüsü b) DBB etkisiyle üretilen katalizörün SEM görüntüsü [52].....	28
Şekil 2.16. DBB katalizör deneylerinde kullanılan hidrojen gazı ölçüm sistemi [52] ...	28
Şekil 3.1. a) Tek tabaka poliimid bariyer b) Çift tabaka poliimid Bariyer görüntüsü....	35
Şekil 3.2. DBB deneyinde kullanılan elektrot sisteminin yapısı	36
Şekil 3.3. DBB mekanizmasını incelediğimiz deney sisteminin genel görünümü	37
Şekil 3.4. DBB deney sisteminde kullanılan vakumlanabilir boşalma tüpleri	38
Şekil 3.5. DBB deneylerindeki küçük akımları ölçmek için hazırlanmış olan yükseltici devre şeması [80]	39
Şekil 3.6. AC dielektrik bariyer boşalmasının tipik devre şeması	42
Şekil 3.7. Homojen ve Flama tipi DBB'nin akım osilasyonları ve bazı çıplak görüntüleri.....	44
Şekil 3.8. Dielektrik malzemedeki kusur görüntüsü	46
Şekil 3.9. KB'nin gerçekleştiği dielektrik malzemedeki kusurun elektrik eşdeğer devresi [88, 89]	47
Şekil 3.10. Kısmi boşalma (KB) durumundaki Gerilim-Akım eğrileri [89].....	48
Şekil 3.11. Dielektrik malzemelerde oluşan kusur çeşitlerini gösteren kusur matrisi....	50
Şekil 3.12. a) Devre şeması b) Boşalmanın elektrik eşdeğer devresi.....	53
Şekil 3.13. DBB'nin $UG < UD$ ve $UG > UD$ koşullarındaki eşdeğer devreleri.....	61
Şekil 3.14. DBB Eşdeğer Modelinin Nümerik Benzetim Programı Akış Şeması	66

Şekil 4.1. DBB'nin hava ortamında ve $pd < pd_{kr}$ değerlerindeki $V-I$ karakteristikleri....	69
Şekil 4.2. DBB'nin hava ortamındaki $pd < pd_{kr}$ değerindeki $V-I$ karakteristiği.....	70
Şekil 4.3. DBB'nin hava ortamında ve $pd > pd_{kr}$ değerindeki $V-I$ karakteristiği	72
Şekil 4.4. DBB'nin azot ortamında ve $pd > pd_{kr}$ koşulundaki $V-I$ karakteristikleri	73
Şekil 4.5. DBB tutuşma geriliminin pd' 'ye bağlı değişimini gösteren Paschen Eğrisi ...	74
Şekil 4.6. R_v direnci üzerinden alınan $V-I$ osilasyonlarının zamana bağlı değişim eğrileri.....	75
Şekil 4.7. R_v direnci üzerinde meydana gelen osilasyonların $V-I$ grafiği	76
Şekil 4.8. Sistemin omik durumdaki <i>Gerilim-Akım</i> eğrilerinin zamana göre değişimi..	77
Şekil 4.9. Sistemin omik devre durumunda oluşan osilasyonların $V-I$ grafiği	77
Şekil 4.10. C_v kondansatörü devredeyken, $V-I$ grafiklerinin zamana bağlı değişimleri .	78
Şekil 4.11. DBB'nin <i>Gerilim-Yük</i> eğrisinin karakteristik görüntüsü.....	79
Şekil 4.12. Sistemde R_v ve C_v kondansatörü birlikte devredeyken alınan <i>Gerilim-Akım</i> grafiklerinin zamana bağlı değişimleri	80
Şekil 4.13. Sistemde R_v ve C_v kondansatörü birlikte devredeyken alınan osilasyonların $V-I$ grafiği.....	81
Şekil 4.14. Sistemde R_v direnci ve C_v kondansatörü birlikte devredeyken boşalmanın varlığında oluşan osilasyonların $V-I$ grafiği.....	81
Şekil 4.15. Sistemde R_v ve C_v birlikte devredeyken, boşalmanın varlığında pd' 'nin artırılması sonucunda oluşan osilasyonların $V-I$ grafiği	82
Şekil 4.16. Sistemde R_v direnci devredeyken boşalmanın varlığında, pd' 'nin azaltılması sonucu alınan tek guruplu osilasyonun $V-I$ grafiği	83
Şekil 4.17. Sistemde R_v direnci devredeyken boşalmanın varlığında, pd' 'nin artırılması sonucu alınan osilasyon guruplarının $V-I$ grafiği.....	84
Şekil 4.18. Sistemde R_v ve C_v yokken sabit gerilim varlığında, pd' 'nin değiştirilmesi ile oluşan ilk osilasyonun $V-I$ grafiği.....	85
Şekil 4.19. Sistemde R_v ve C_v yokken boşalmanın varlığında, pd' 'nin artırılmasıyla birlikte artan osilasyon guruplarının $V-I$ grafiği	85
Şekil 4.20. Sabit pd değerinde, sistemin geriliminin artırılmasıyla birlikte, ilk olarak negatif alternasta tutuşan boşalmanın <i>Gerilim-Akım</i> eğrisi	86
Şekil 4.21. Sistemin geriliminin ve pd' 'nin kritik değerlerinde, boşalmanın tutuşma eğiliminde olduğu durumdaki $V-I$ grafiği	87
Şekil 4.22. pd' 'nin sabit değerinde, gerilimin artırılmasıyla birlikte tutuşan boşalmanın kararlı olarak yanmakta olduğu durumundaki <i>Gerilim-Akım</i> eğrisi	88
Şekil 4.23. DBB'nin <i>Gerilim-Yük</i> eğrisinden yararlanılarak belirlenebilen bazı boşalma parametrelerinin konum grafiği	89
Şekil 4.24. DBB'nin osiloskop yardımıyla ölçülen $UCH1$ ve $UCH2$ gerilim eğrileri....	93
Şekil 4.25. DBB'nin osiloskopla ölçülen $UCH1$ ve $UCH2$ gerilim eğrilerinin her bir yarım periyodunun ayrı ayrı 23 eşit parçaya bölünmesi durumu	94
Şekil 4.26. DBB'nin teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen <i>Gerilim-Akım</i> karakteristiği	97
Şekil 4.27. DBB'nin deneysel olarak elde edilen <i>Gerilim-Akım</i> karakteristiği.....	98
Şekil 4.28. Teorik hesaplamalar sonucunda oluşturulmuş olan DBB <i>Gerilim-Yük</i> eğrisi.....	100

Şekil 4.29. DBB'nin deneysel ölçümlerle oluşturulan <i>Gerilim-Akım</i> karakteristiği	101
Şekil 4.30. Sistemde delinme olayı başlamadan önce C_v kondansatörü ve R_v direnci üzerinden ölçülen akım eğrileri ve benzetim sonuçları	104
Şekil 4.31. Sistemde pd parametresine bağlı olarak R_v direnci üzerinden ölçülen bazı <i>Gerilim-Akım</i> eğrileri ve benzetim sonuçları.....	105
Şekil 4.32. Sistemde pd değerinin arttırılması sonucunda R_v direnci üzerinden ölçülen bazı akım osilasyonları ve benzetim görüntüleri	106
Şekil 4.33. DBB'nin kapasitif devre durumundaki boşalma akımı ve kapasitif akımının C_v kondansatörü üzerinden ölçülen gerçek görüntüleri ve benzetim görüntüleri.....	107
Şekil 4.34. DBB'nin tutuşması sırasında akım eğrisinde meydana gelen kararsız osilasyon guruplarının biçimleri ve nümerik benzetim görüntüleri.....	108
Şekil 4.35. İyonizasyon katsayısının farklı değerlerindeki nümerik benzetim görüntüleri.....	109
Şekil 4.36. İyonizasyon katsayısının farklı değerlerindeki nümerik benzetim görüntüleri.....	109

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 3.1: Havada bulunan kimyasal gazlar ve yüzde oranları [60].....	31
Tablo 3.2: Havanın sabit bileşenlerinin özellikleri [60].....	31
Tablo 3.3: Azot gazının fiziksel özellikleri [60]	32
Tablo 3.4: Genel kusur parametreleri ve kontrol faktörlerinin özeti [91].....	51
Tablo 4.1: DBB'nin deneysel grafikteki verilere göre hesaplanmış gerilim ve akım parametrelerinin gerçek değerleri	96
Tablo 4.2: DBB'nin deneysel grafikteki verilere göre hesaplanmış gerilim ve yük parametrelerinin gerçek değerleri	99

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

ε_0	Vakumun dielektrik katsayısı
ε	Ortamın dielektrik katsayısı
f_i	İyonizasyon olasılığı
λ	İyonlar için ortalama serbest uçuş yolu
n_0	Plazma yoğunluğu
ρ	Hacim yük yoğunluğu
r	Elektriksel alanın hesaplandığı uzaklık
σ	İletkenlik
σ_{ac}	AC iletkenlik
t	Zaman
τ_o	Makroskopik gevşeme süresi
τ	Ortalama relaksasyon zamanı (zaman sabiti)
ω	Açısal frekans
γ	Streamer kanal alanının kritik alana oranı
μ	İyon hareketliliği
A	Streamer dağılımının boyutsuz faktörü
Al	Aluminyum
B	Streamer ölçüt parametresi
C	Malzemenin kapasitansı
DBD	Dielectric Barrier Discharge
DBB	Dielektrik Bariyer Boşalması
E	Elektriksel alan
E_0	Dış elektrik alan şiddeti
E_i	İyon enerjisi
E_{cr}	$(E/p)_{kr}$ kritik alan
J	İletim akımı yoğunluğu
J_T	Toplam akım yoğunluğu
KB	Kısmi Boşalma
K_s	Yüzey iletkenliği
l_{str}	Streamer dağılım uzunluğu
p	Gaz basıncı
PD	Partial Discharge
PET	Polietilen tereftalat
PI	Poliimid
PMDA	Piromelitik dianhidrid
PS	Polisitren
PTFE	Politetrafloroetilen
PVC	Polivinilklorid
q	Fiziksel yük
q_{min}	Minimum yük
q_{max}	Maksimum yük
R	Küresel oyuk yarıçapı
r	E_0 alanına dik olan kusur ölçeği
r_c	Temas yüzeyinin karakteristik yarıçapı
T	Sıcaklık
$T/2$	AC yarı periyodu

U_o	Yalıtım sistemine uygulanan gerilim
UV	Ultraviole
V_b	Besleme gerilimi
W	Dielektrik tarafından absorbe edilen enerji
W_{RF}	RF plazma enerjisi
ΔE	Oyuk içindeki elektriksel alan değişimi
ΔU	PD üzerindeki potansiyel farkı
ΔU_q	Yüzey yükleri veya boşluğun potansiyel farkı
v_{di}	İyon sürüklenme hızı
V_{eff}	Etkin iyonizasyon hacmi
X_{cr}	$E = E_{kr}$ 'deki mesafe
X	Streamer yolu boyunca uzaysal koordinat

1. GİRİŞ

Elektrik gaz boşalmalarının önemli bir türü olan ve bazen sessiz boşalma olarak da nitelenen dielektrik bariyer boşalması (DBB), her geçen gün daha farklı teknolojik alanlara uygulanarak önemli sonuçların elde edilmesine olanak sağlamaktadır. Dolayısıyla bu alandaki çalışmalara olan ilgi sürekli olarak artmaktadır. Bariyer boşalması ile ilgili ilk araştırmalar 1857 yılında Siemens tarafından hava karışımı ve oksijen buharından ozon (O_3) üretimi ile başlamış [1, 2] olup, günümüzde bu boşalma metodu ağırlıklı olarak *yüksek gerilim tekniği* ve *iyon-elektron* teknolojisinde geniş bir kullanım alanına sahiptir.

Atmosferik basınçlardaki düşük sıcaklıklı plazmaların kaynağını oluşturan DBB, elektrotlardan biri veya her ikisi dielektrikle kaplanmış olan iki elektrot aralığında gerçekleşen bir elektrik gaz boşalmasıdır. Günümüzde bu tür boşalmalar medikal cihazların sterilizasyonunda [3], plazma panellerinde [4], excimer (UV) lambalarında [5], CO_2 lazerlerinde [6–8], deşarj lambalarında [9–14], baca gazlarının temizlenmesinde [15–18], yüzey modifikasyonunda [17–18], hava kirliliği kontrolünde [11–18], H_2S ayrıştırılmasında [19] ve CO_2 hidrojenasyonu [20–21] gibi alanlarda genişçe kullanılmaktadır. İleri teknolojik yöntemlerle geliştirilen tüm bu uygulamalar, ozon üretimi için büyük avantaj sağlamaktadır. Bariyer boşalmasının gaz kimyasında kullanılmasının en önemli avantajı ise, atmosferik basınçtaki büyük hacimli bir gaz akışının plazma ortamında incelenmesi durumunda bu gazın çok küçük (ihmal edilebilir) bir entalpi değişimine uğramasıdır. Bu avantajlar göz önüne alınarak ve günümüz koşullarında geliştirilen farklı uygulamalar nedeniyle DBB mekanizmasının kimyasal plazma reaktörlerinde titizlikle incelenmesi, önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu incelemeler doğrultusunda elektrik gaz boşalmalarının önemli bir türü olan dielektrik bariyer boşalmasının özel parametreleri, boşalma sırasında oluşan yüklü parçacık etkileşimlerinin modellenmesiyle ve serbest radikal kimyasındaki yöntemler kullanılarak belirlenebilir.

Dielektrik bariyer boşalmasının farklı gaz ortamlarında incelenmesi sonucu ortamın özelliklerine (parametrelerine) bağlı olarak önemli sonuçlara ulaşılabilir. Sistemdeki elektrotlara AC gerilim uygulandığında, aralıktaki elektrik alan şiddeti gerilimle birlikte

artarak dielektrik yüzeyinde belirli bir yük birikimine neden olur. Elektrik alan şiddetinin artarak delinme değerini aşmasıyla birlikte boşalma gerçekleşir. Dielektrik bariyer boşalması deneyleri genel olarak, boşalma parametrelerinin geniş bir değer aralığında incelenmesiyle gerçekleştirilir. Basınç değerleri birkaç *hektopaskal* (*hPa*)’dan birkaç yüz *hPa*’a kadar çeşitlilik gösterir [22, 23] ve uygulama geriliminin frekans değerleri ise birkaç *Hz*’den birkaç yüz *kHz*’e kadar çeşitlilik gösterir [24, 25]. Elektrot aralığının uzunluğu ise genellikle bir *milimetreden* az veya birkaç *milimetre* civarında olmaktadır.

Bariyer boşalması mekanizması temelde üç modda gerçekleşir. Bunlar, Townsend boşalması modu, Glow boşalması modu ve Flama modudur. En sade ve ilk olanı, elektrik alanının ortamda oluşan uzay yüklerinden çok az etkilendiği Townsend modudur. Uygulama geriliminin yüksek frekans değerlerinde gerçekleşebilen Glow boşalması modunda ise, elektrik alan şiddeti ortamdaki yüklerin etkisiyle büyük oranda bozulmaya uğrar ve plazmanın etkisiyle boşalmanın çoğu bu bölümde gerçekleşir. Flama modunda ise iki elektrot arasında çok sayıda ince ve yüksek iletkenliğe sahip deşarj kanalları oluşarak büyük akımlara (*miliamper*) sahip boşalma gerçekleşir.

Günümüzde, gelişen nümerik benzetim yöntemleri kullanılarak bu tür boşalmaların mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için bilim adamları tarafından yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında DBB’nin akım osilasyonlarının ve elektrik alan şiddetinin zamana bağlı değişim kanunu, daha kararlı sonuçlar verebilen Townsend modunda incelenmiştir. Çalışmada, hava ve azot gazları ortamında gerçekleşen DBB’nin akım osilasyonları ve elektrik alan şiddetinin fiziksel mekanizması deneysel olarak $pd < (pd)_{kr}$ ve $pd > (pd)_{kr}$ (*p-basınç ve d-elektrotlar arasındaki mesafe, $(pd)_{kritik}$ -basınç ile aralık uzunluğunun çarpımının kritik değeri*) durumları için incelenmiş olup, boşalmanın farklı basınçlardaki *Gerilim-Akım* (*V-I*) ve *Gerilim-Yük* (*V-Q*) karakteristikleri elde edilmiştir. Daha sonra bu deney sonuçlarına uygun olan ve boşalma kanalının iletkenlik mekanizmasını esas alan yeni bir model geliştirilmiş olup DBB hücresinde gerçekleşen osilasyonların nümerik benzetimi yapılmış ve deneysel olarak elde edilen sonuçların, geliştirilen nümerik modelle uyumluluk derecelerinin belirlenmesi için gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır. Bariyer boşalması mekanizmasının temel parametrelerinin daha iyi incelenebilmesi için genel olarak boşalmanın, kararlı bir yapıya sahip olan Townsend modundan yararlanılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

Dielektrik bariyer boşalması (DBB) atmosferik basınçlarda soğuk plazma üreterek ozon üretimi, yüzey modifikasyonu ve biyolojik arıtma işlemleri gibi geniş bir uygulama alanına sahiptir. DBB'nin her geçen gün farklı teknolojik alanlara uygulanarak önemli sonuçlar elde edilmesi nedeniyle, bu boşalma mekanizmasının daha iyi açıklanabilmesi ve temel parametrelerinin belirlenebilmesi önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Uygulama türlerine bağlı olarak yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, çoğu durumda boşalma mekanizmasının daha iyi açıklanabilmesi için DBB'nin Townsend modunun incelenmesinin, boşalmanın Glow modu ve Flama moduna göre daha kararlı sonuçlar verdiği görülmüştür. Dolayısıyla bu boşalma türlerinin modellenmesi için yapılan ölçüm ve analizler genellikle boşalmanın Townsend modu esas alınarak yapılır. Boşalma parametrelerinin etkinliğini gözlemlemek için boşalmanın akım osilasyonlarının davranışlarından önemli derecede yararlanılır.

2.1. DBB'nin Akım Osilasyonları

Dielektrik bariyer boşalmasının incelenmesi ve modellenmesi için boşalmanın akım osilasyonları büyük önem taşır. Boşalmanın temel parametrelerini içeren bu akım osilasyonlarının biçimi ve frekansı, boşalmanın karakteri ve gelişimi yönünde önemli bilgiler sağlar. DBB'nin Townsend modu, uygulama geriliminin her yarım periyodundaki bir akım osilasyonunu karakterize eder. Fakat bunun uzaysal karakteristiği anoda yakın homojen bir ışık dağılımı şeklinde olup yüksek akımlara sahip olan düşük basınçlı Glow boşalmasından oldukça farklıdır [25].

Son yıllarda DBB'nin akım osilasyonları üzerine bazı boşalma modelleri geliştirilmiştir. Uygulama geriliminin her yarım periyodundaki akım osilasyonları için bariyer boşalmasının atmosferik basınçlardaki farklı gaz ortamlarında incelenmesi sonucunda çeşitli açıklamalar ve tartışmalar yapılmıştır. Fakat elde edilen deney sonuçları Golubovskii ve ekibinin tezlerini büyük oranda doğrulamaktadır. Golubovskii ve beraberindekiler, genel olarak çoklu akım osilasyonlarının yapısının anoda yakın bölgelerdeki iyon üretimi ile katot üzerindeki *iyon-elektron* emisyonu arasındaki gecikmeden kaynaklandığını öne sürmüşlerdir. Ayrıca çoklu akım osilasyonlarının, sadece Townsend boşalma çeşidindeki uygulama geriliminin her yarım periyodunda

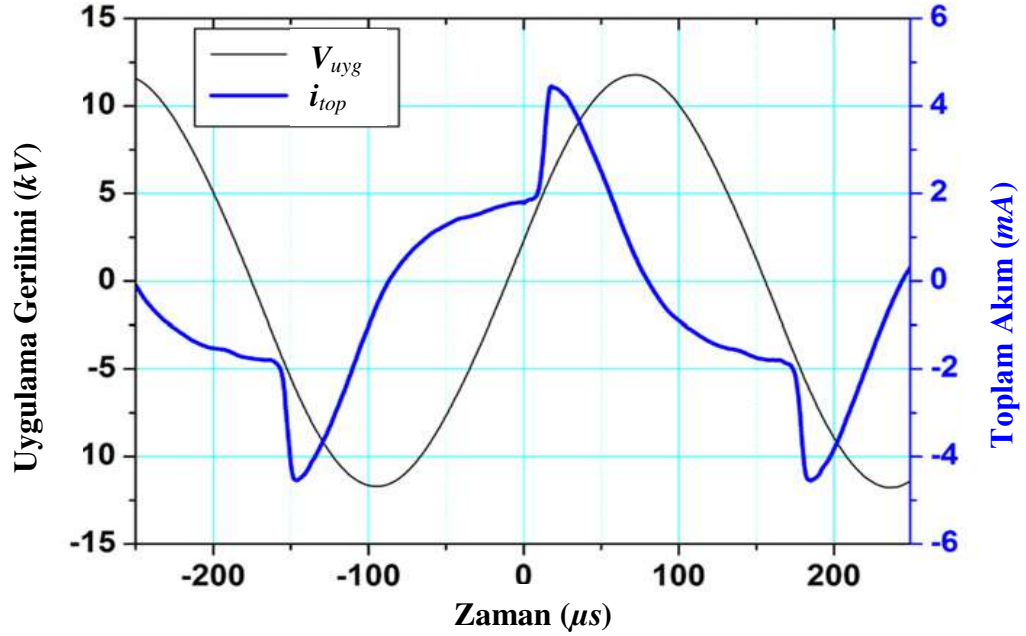
oluşturduğunu savunmaktadırlar. Bu ekibin ileri sürdüğü teze göre boşalmanın gelişimi dış parametrelere bağlı olarak değişir. Bu parametreler genel olarak ortamdaki gazın özelliği, uygulama geriliminin genliği ve frekansı, boşalma aralığının uzunluğu ve dielektrik bariyer tabakaların özelliği şeklinde sıralanabilir. Boşalmanın modu genel olarak az miktarda uygulama geriliminin genliği ve frekansına; çoğu durumda ise boşalma aralığının uzunluğuna ve bariyer tabakanın özelliğine bağlıdır. Bu durumda eğer bariyer tabakalar ince ve boşalma aralığı yeterince geniş ise boşalma Glow modunda; diğer durumlarda ise Townsend modunda gelişir [25].

DBB'nin atmosferik basınçlardaki farklı gaz ortamlarında incelenmesi sonucu boşalmanın azot ve neon gazları dışındaki gaz ortamlarında homojen olmayan bir davranışa sahip olduğu gözlenmiştir. DBB'nin azot ortamında homojen bir davranış göstermesinin nedeni hâlâ tam olarak anlaşılamamıştır. Bariyer boşalmasının üç ana mekanizmasından biri olan Townsend mekanizmasında, boşalma sırasında azot gazının zayıf elektrik alanındaki Townsend delinmesi için yeteri kadar başlangıç elektronu üretebilecek yapıya sahip olduğu düşünülmektedir. Boşalmanın Townsend mekanizmasının daha iyi anlaşılabilmesi için Haiyun Luo ve ekibi tarafından yapılan deneysel çalışmanın temelinde, 2 mm aralığa sahip metal elektrot sistemine uygulanan gerilimin genliği ve frekansı esas alınarak modellenmiştir. Modelden alınan deneysel sonuçlar DBB'nin azot ortamındaki Townsend mekanizmasına ait mevcut teorilerle açıklanmıştır [26].

Homojen DBB'nin akım osilasyonlarının biçimi ile Flama tipi DBB'nin akım osilasyonlarının biçimi birbirinden tamamen farklıdır. Homojen DBB, uygulama geriliminin her yarım periyodundaki bir akım osilasyonunun genişliği ile karakterize edilirken, Flama tipi DBB ise her yarım periyotta elektrotlar arasında meydana gelen çoklu iletken kanal sayısı (akım osilasyon sayısı) ile karakterize edilir. Dolayısıyla boşalmanın homojenliğini belirlemek için her yarım periyottaki bir akım osilasyonunun incelenmesi yeterli koşuldur [26].

Şekil 2.1'de Haiyun Luo ve ekibi tarafından yapılan deneysel çalışmadaki homojen boşalmanın tipik dalga biçimi görülmektedir. Sisteme uygulanan geriliminin frekansı 3 kHz ve elektrotlararası mesafe ise 2 mm olup deneyler azot gazı ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneyde ölçülen toplam akımın dalga biçimi ise bir kambur yapı ve

bir pik olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Akımın kambur kısmı mevcut deplasman (kapasitif) akımını, pik kısmı ise boşalma akımını karakterize etmektedir. Boşalma akımının değeri, toplam akımdan kapasitif akım çıkarılarak elde edilir [26].



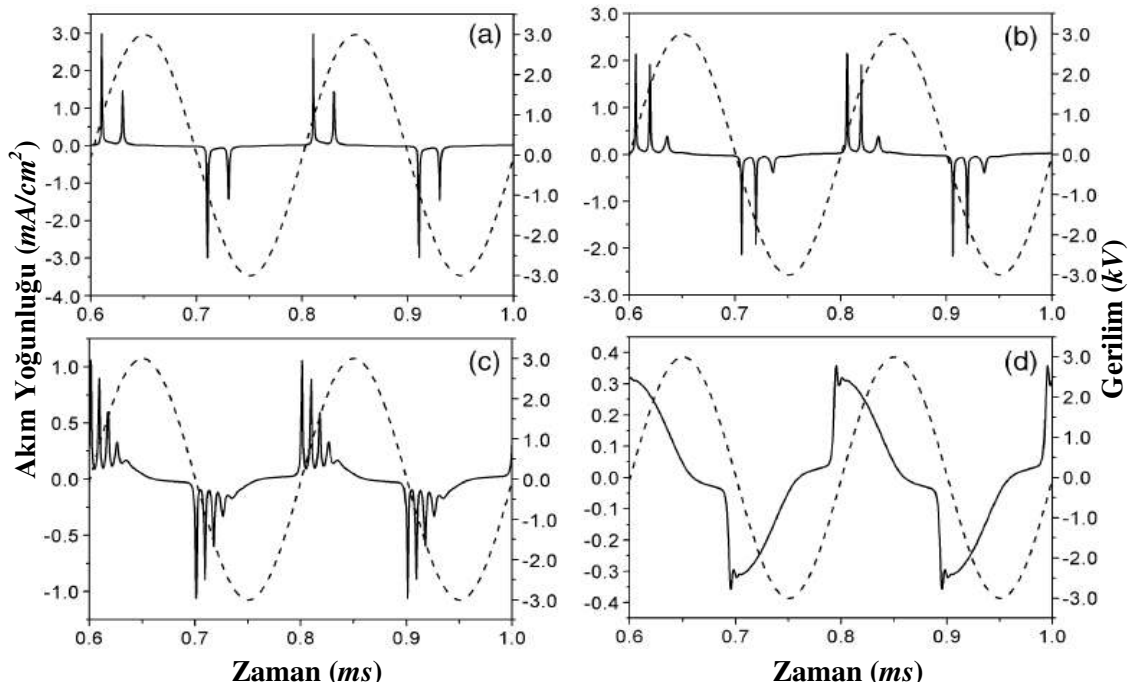
Şekil 2.1. DBB'nin azot ortamındaki gerilim ve akımının osilasyon biçimleri [26]

Townsend boşalmasındaki akım osilasyonlarını önemli derecede etkileyen tuzaklanmış elektronların aktivitesi, boşalmanın tutuşması ve sönümlenmesinde önemli bir rol oynar. Bilindiği gibi gaz aralığının geriliminin ani olarak azaltılmasıyla DBB sönümlenir ve dielektrikteki yük miktarı ise artar. Fakat yapılan deneysel analizler sonucu gaz aralığının gerilimi artarken, azot ortamındaki Townsend boşalmasının sönümlendiği gözlenmiştir. Boşalmanın bu durumda sönümlenmesinin nedeni, tuzaklanmış elektron sayılarının sınırlandırılması ve bu elektronların Townsend boşalması için yeterli miktarda ikincil elektronlar oluşturamamasıyla açıklanabilir [26].

Nümerik hesaplamalar ve analizler, çoklu akım osilasyonlarına sahip atmosferik basınçlardaki gaz ortamına sahip homojen DBB'nin mekanizmasının daha iyi anlaşılması için büyük avantajlar sağlar. Dezhen Wang ve arkadaşları tarafından geliştirilen bu modelin temeli, gaz ortamındaki elektrot sisteminin bir boyutlu hareketinin iyonizasyon dağılımı işleminde hesaba katılması prensibine dayanır. Bu yöntemle göre akım osilasyonlarının davranışları boşalma aralığının uzunluğu ile kontrol edilir. Boşalmanın küçük elektrot aralıklarında meydana gelen akım osilasyonlarının

nedeni, dielektrik yüzeyinde depolanan yük yoğunluğunun dış elektrik alanını önemli derecede etkilemesinin bir sonucudur. Bu durumda oluşan her bir akım osilasyonu, gaz aralığında oluşan bir delinme kanalını karakterize eder. Bu osilasyonların mekanizması, DBB'nin Townsend modu esas alınarak helyum gazı ortamında incelenmiştir [27].

Boşalma aralığı uzunluğunun dinamikliği esasına dayanan ve çoklu akım osilasyonlarının kontrolünü sağlayan bu yöntemin nümerik benzetim sonuçlarına göre elde edilmiş grafikleri Şekil 2.2'de gösterilmiştir. Deneysel çalışma 1013,25 *hPa* basıncındaki helyum gazı ortamında gerçekleştirilmiştir. Uygulama gerilimi 3 *kV* ve frekansı ise 5 *kHz*'dir. Kullanılan dielektrik bariyerin kalınlığı 1 *mm* ve dielektrik katsayısı ise 7.5 değerindedir. Küçük elektrot aralıklarında, boşalma sırasında yüzeyde biriken yük yoğunluğu oldukça fazladır. Dielektrik yüzeyde biriken bu yüksek değerdeki yük yoğunluğu, bir sonraki polaritede aşırı bir elektrik alanı meydana getirerek ilk delinmeyi gerçekleştirir. Bu durumda dış gerilim ise bir sonraki boşalmayı azaltıcı yönde etki gösterir [27].



Şekil 2.2. Boşalma aralığının farklı değerlerindeki akım osilasyonlarının görüntüleri (a) $d=5\text{ mm}$, (b) $d=4\text{ mm}$, (c) $d=3\text{ mm}$ ve (d) $d=2\text{ mm}$ [27]

Şekil 2.2a, b ve c'den görüldüğü gibi, elektrotlar arası uzunluğun ($d=5\text{ mm}$ 'den $d=3\text{ mm}$ 'ye kadar) azaltılmasıyla birlikte yüksek frekanslı akım osilasyonlarının meydana geldiği görülmektedir. Eğer yükler tarafından oluşturulan elektrik alan şiddetinin değeri

dış elektrik alanından büyük olup delinme sınırını aşarsa, uygulama gerilimi, polaritesini değiştirmeden boşalma gerçekleşir. Özellikle küçük elektrot açıklarında ($d=2\text{ mm}$) karşılaşılabilen bu durum Şekil 2.2d’de gösterilmiştir [27].

DBB’nin homojenliğini ve kararlılığını etkileyen diğer bir önemli parametre ise kullanılan dielektrik bariyerin türü ve permitivitesidir (ϵ). Golubovskii ve ekibi tarafından, dielektrik bariyer tabakanın parametrelerini esas alarak geliştirilen bu modelle ilgili olarak yapılan teorik ve deneysel çalışmalar neticesinde, boşalmada kullanılan bariyer tabaka özelliğinin akım osilasyonlarının kararlılığı açısından önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür. Deneysel çalışma 7 kHz frekansında ve atmosferik basınçlardaki azot ortamında gerçekleştirilmiştir. Deneysel verilere göre, kullanılan malzemenin türüne bağlı olan dielektrik permitivite ne kadar yüksek ise, boşalmanın homojenliği ve kararlılığı da o kadar fazla olur. Townsend mekanizmasıyla ilgili varolan hesaplama ve analiz yöntemleri de bu modeli doğrular niteliktedir. Ayrıca bariyer boşalmasının bu modele uygun olarak yapılan iki boyutlu benzetim sonuçlarına göre boşalmanın kararlılığının yarıçap doğrultusundaki değişiminin, bariyer tabakanın permitivitesine bağlı olduğu düşünülmektedir. Malzemenin bariyer etkisi ise yüzey yükleri tarafından oluşturulan elektrik alanının geçirgenlik katsayısı olarak yorumlanabilir [28].

Bariyer malzemesinin DBB karakteristikleri üzerindeki etkisini incelemek için [28]’de yapılan çalışmada, homojen boşalma ortamındaki çift tabakalı bariyer sistemi ele alınmıştır. Bariyer malzemenin teknik özellikleri [28]’de detaylı olarak verilmiştir. Çift bariyerli boşalma aralığının kapasitansını hesaplamak için düzlem plakalı kondansatör modelinden yararlanılmıştır. Elektrotlar ile dielektrik bariyer arasındaki parazitik kapasitans etkisini yok etmek için gümüş kontaklar kullanılmıştır [28].

Dielektrik malzemenin bariyer etkisini incelemek için iki boyutlu benzetim tekniğine ihtiyaç duyulur. Çünkü yapılan araştırmalar neticesinde tek boyutlu modelin incelenmesiyle malzemenin etkisinden ziyade sadece bariyer tabakanın kapasitans etkisi bulunabilir. Deneysel çalışmalar sonucunda ise, Townsend boşalmasının dielektrik permitiviteye bağlı olduğu, fakat bu boşalmanın bariyer kapasitansı üzerinde herhangi bir etkiye sahip olduğu yönünde açık bir kanıta rastlanılamamıştır. Dolayısıyla çalışmada daha kapsamlı sonuçlar verebilen iki boyutlu benzetim modeli kullanılmıştır.

Bu durumda boşalmanın homojen olduğu kabul edilmiş ve kenar etkisi ise hesaba katılmamıştır. Her iki model için elektron, iyon ve moleküllerin enerji denge denklemlerinin çözümü yapılmış olup Poisson denklemiyle ifade edilmiştir. Modelde ayrıca *başlangıç elektron* akımı ve *iyon-elektron* akımı da hesaba katılmıştır [28].

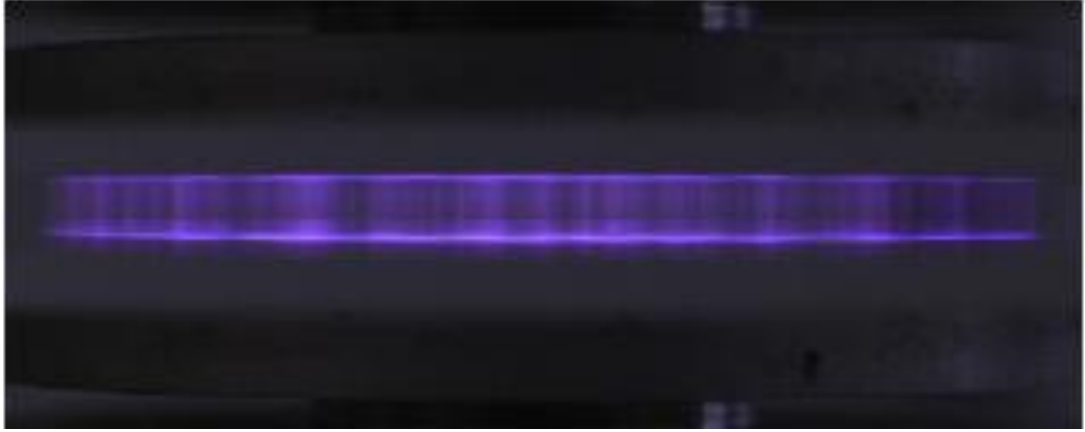
Homojen boşalma ortamında dielektrik permitivite ne kadar düşük olursa parametre değer aralığı da o kadar geniş olur. Permitivite etkisi nicel olarak şu şekilde açıklanabilir: Boşalma ortamında yüklü parçacıklar meydana gelerek bariyer tabakaya doğru sürüklenir ve bu yükler dış elektrik alanını etkiler. Bu yüklerin etkisi altındaki dielektrik bariyer tabakalar kutuplanmış olur. Dielektrik permitivite ne kadar yüksek olursa kutuplanma derecesi de o kadar fazla olur. Bu kutuplanma yüzey yüklerinin elektrik alanını azaltır. Permitivite ne kadar fazla olursa yüzey yüklerinin alanı da o kadar azalır. Dolayısıyla küçük alandaki bu yükler, elektrik alanını önemli ölçüde etkiler. Bariyer tabakanın permitivitesinin düşük olması, lokal bir akım yoğunluğu artışına sebebiyet verir ve buna bağlı olarak elektrik alanında ve yüzey yük yoğunluğunda bir artış meydana gelir. Fakat permitivite yüksek olduğunda yüzey yüklerinin oluşturduğu elektrik alanı küçük olur ve böylece dış elektrik alanı bu yüklerden daha az etkilenmiş olur [28].

2.2. DBB'nin Delinme Mekanizması

Elektrik gaz boşalmalarının delinme mekanizması genel olarak DBB'nin Townsend modundan sonraki aşamalar olan Glow ve Flama modlarında incelenir. Boşalmanın bu modlarında, atmosferik koşullarda gerçekleşen bariyer boşalması sırasında oluşan çok sayıdaki mikrobeşarjların birçok gaz türünde elektriksel delinme meydana getirmesi kaçınılmazdır. Fakat aynı elektrot sisteminde basınç azaltıldığında homojen bir elektriksel plazma elde edilebilir. Bu tür boşalmalar genellikle *RF* boşalmaları olarak da anlandırılırlar. *RF* boşalmaları, plazma çöktürmede ve yarıiletken endüstrisinde geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Bu boşalma sistemlerinde 1000 *hPa*'a yakın basınç değerlerinde, belirli miktarlarda helyum (*He*) ve neon (*Ne*) gibi gazların veya özel katkıların ortama eklenmesiyle homojen bir plazma elde etmek mümkündür [29–33].

Dielektrik bariyer boşalmasının elektrot aralığındaki gerçek görüntüsü Şekil 2.3'te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi boşalma çok sayıdaki ince damarlı ve kısa süreli mikrobeşarjlardan oluşmaktadır. Bu mikro yapıdakideşarjlar yaklaşık 100 μm

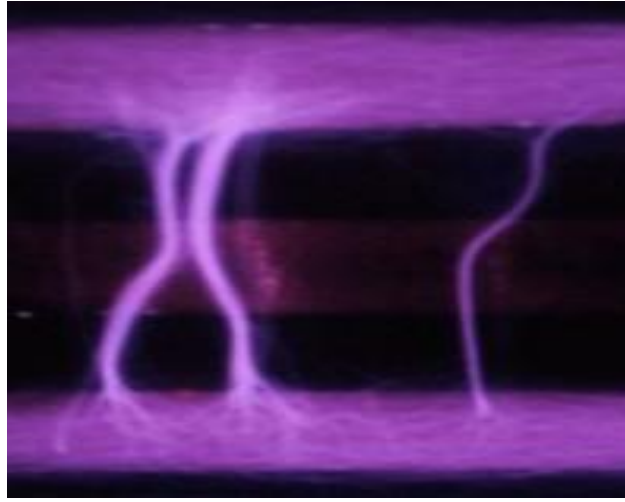
yarıçapındaki silindirik plazma kanalları şeklinde olup elektrot yüzeyine genişçe yayılırlar. Sisteme elektriksel delinme geriliminden daha büyük değerde bir gerilim uygulandığında, boşalma Townsend modundan Glow moduna geçerek elektrotlar arasında lokal bir delinme başlar. Bu durumda boşalma için uygun ortam koşullarında yayılmış elektron çığı, başlangıç elektronu karşı elektroda varmadan önce hızlı bir şekilde gelişerek yüksek bir uzay yükü bulutu meydana getirir [34–35].



Şekil 2.3. Elektrot aralığında gerçekleşen DBB'nin görüntüsü [35]

Şekil 2.4'te ise DBB'nin Glow moduna ait delinme kanallarının görüntüsü verilmiştir. Gerilimin belirli bir değere kadar arttırılması sonucu oluşan elektron çıgıları, silindirik iletken kanallar halinde katot ile anot arasında yüksek iletkenliğe sahip bir köprü oluşturur. İnce ve silindirik yapıya sahip bu delinme kanallarında çok sayıda elektron çıgıları meydana gelir. Bu çıgılardaki bir elektronun drift (sürüklenme) hızından çok daha hızlı hareket eden Streamer'in baş kısmında gelişen alan, anottan çıkıp 1 *nanosaniyelik* bir fraksiyonla katoda doğru gelişir ve katot yüzeyinde çok ince bir tabaka meydana getirir. Bu durumda Glow boşalmasının geçişini sağlayan bu iletken kanal gelişerek elektrot aralığında bir köprü oluşturur. Böyle bir sistemde atmosferik basınç koşullarındaki elektron yoğunluğu 10^{14} ile 10^{15} *iyon-elektron/cm³* değerlerine ulaşır. Katotta oluşan tabakanın kalınlığı ise birkaç μm civarındadır. Dielektrik yüzeyde biriken yük, elektrot aralığında meydana gelen 100 *ns* süreli mikrobeşarj akımlarını oluşturan lokal elektrik alanına azaltıcı yönde bir etki gösterir. Ortamdaki gazın özelliğine bağlı olarak bu etki, yüzeysel boşalmaya ve bariyer tabakasının özelliğine bağlıdır. Eğer uygulama gerilimi daha da arttırılırsa elektrik alanının yoğun olduğu diğer noktalarda da mikrobeşarjlar oluşur. Buradan varılan sonuca göre dielektrik

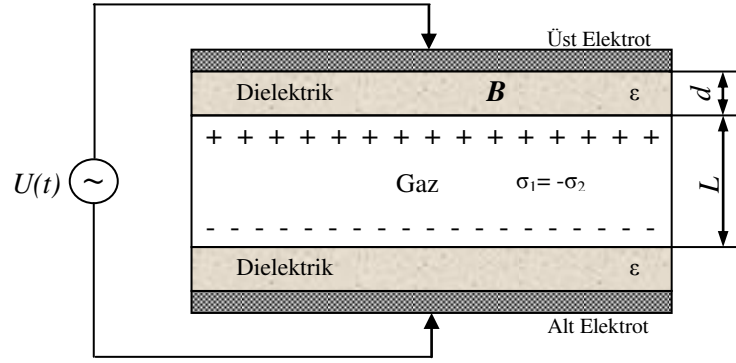
bariyerlerin iki önemi vardır: Birincisi, her bir mikroddeşarj kanalının enerjisini ve yük miktarını sınırlar. İkinci olarak da, mikroddeşarjların elektrot yüzeyi boyunca homojen olarak dağılmasını sağlar. Bu mikroddeşarjların yük değerleri *nanocoulomb* (nC) ve enerjileri ise *mikrojoule* (μJ) mertebelerindedir. Burada dikkat çekilmesi gereken nokta; gazın özellikleri, basıncın ayarlanması, elektrotlar arası mesafe ve bariyerin özellikleri gibi parametrelerin değiştirilmesiyle plazma karakteristiklerinin kolayca kontrol edilebilmesinin mümkün olmasıdır [36–37].



Şekil 2.4. DBB’de elektrot yüzeylerine yayılan boşalmanın görüntüsü ve delinme sonucu oluşan mikro ddeşarj kanallarının görüntüsü [37]

2.3. DBB Mekanizmasına Ait Bazı Temel Denklemler ve Basit Yaklaşımlar

DBB’nin matematiksel olarak modellenmesi için boşalma mekanizmasının önemli bir aşaması olan ve kararlı sonuçlar veren Townsend modundan yararlanılır. Şekil 2.5’te elektrik gaz boşalması hücresinin genel şeması verilmiştir. Bu eşdeğer şemaya göre elektrotlar arasında gerçekleşen boşalma olaylarının analizi ve modellenmesi için bazı matematiksel ifadeler türetilmiştir. Elektrotlar aralığında gerçekleşen boşalmanın incelenmesi durumunda, eğer elektrot aralığında herhangi bir yüklenmiş parçacık yoksa (pasif faz durumu), bu durumda yüzey yükleri sabit olur ve aralıktaki elektrik alan şiddeti $U(t)$ uygulama gerilimine bağlı olarak değişir. Aktif faz durumunda ise boşalma akımının osilasyonu, aralığın elektrik alan şiddeti ve yüzey yüklerine bağlı olarak değişim gösterir. Bu kısımda ayrıca uygulama gerilimi $U(t)$ ile aralığın elektrik alan şiddeti $E(t)$ ve yüzey yük yoğunluğu $\sigma(t)$ arasındaki ilişkiyi belirten ifade türetilmiştir [38].



Şekil 2.5. Elektrik gaz boşalması hücresinin genel şeması

Bariyer boşalma mekanizmasının önemli bir parçası olan elektrot sisteminde yer alan dielektrik malzemedeki akım, sürüklenme akımı ile taşınır. Benzer şekilde boşalma aralığında ise sürüklenme ve iletim akımlarıyla taşınır. Elektrot aralığında oluşan yükler hızlı bir şekilde (τ kadarlık bir sürede), aralıktan dielektrik yüzeyine taşınır ve $\omega^{-1} = \frac{T}{2\pi}$ kadarlık bir sürede dielektrik yüzeyinde toplanır. Dielektrik malzemedeki yüzey yük yoğunluğu genel olarak aşağıda verilen Denklem 2.1'deki gibi bir dağılım gösterir [38].

$$\sigma_1(t) \approx -\sigma_2(t) \quad (2.1)$$

Bu durumda aralıktaki elektrik alanı, uygulanan gerilime ve yüzey yüklerine bağlıdır. Yüzey yükleri tarafından oluşturulan elektrik alanı, uygulama gerilimini kısmen nötralize eder. Bu yüzden aşırı yüksek gerilim durumunda elektrot aralığındaki net elektrik alanı bu iki alanın farkına eşit olur. Uzay yüklerinin aralıktaki elektrik alanını bozması durumunda ise delinme gerilimi bu alana göre daha küçük olur. Problemin çözümü için aralıktaki elektrik alanı, uygulama gerilimi $U(t)$ ve dielektrik yüzeyindeki yük yoğunluğunu $\sigma(t) = |\sigma_1(t)|$ belirlemek gerekir. Dolayısıyla Gauss teoremine göre elektrik alanının ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir [38]:

$$E = U \frac{1}{L + \frac{2d}{\epsilon}} + \sigma \frac{8\pi}{L + \frac{2d}{\epsilon}} \frac{d}{\epsilon} \quad (2.2)$$

Aralıktaki alanın E_d (Elektrik alanının delinme sınırı değeri) seviyesini aşması durumunda ise akım hızlı bir şekilde artar. Elektrik alanının bir fonksiyonu olan

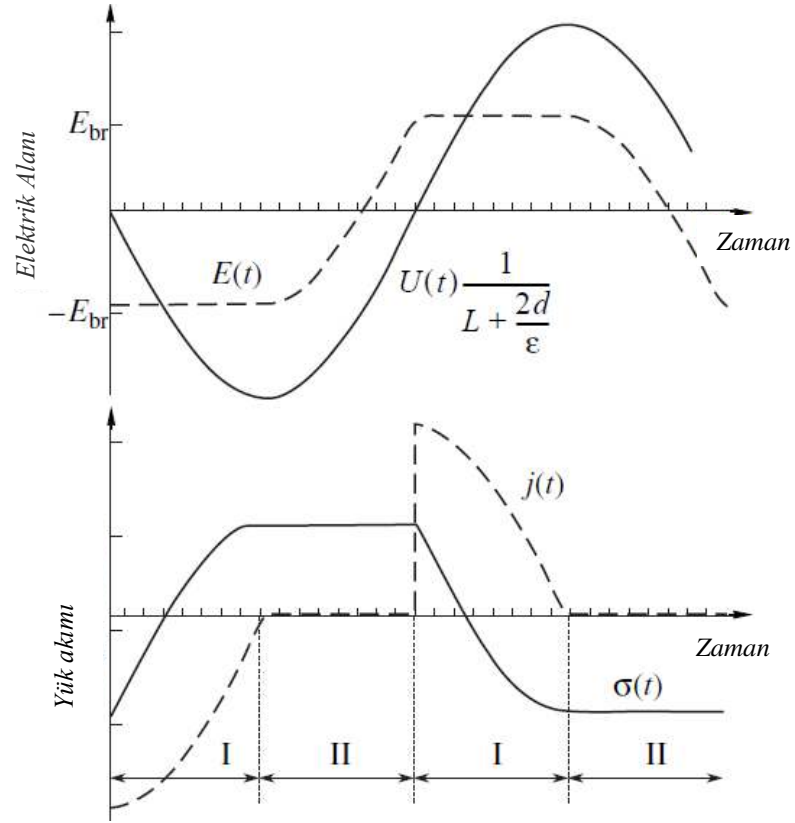
boşalma akımı ise elektrik alanı üzerindeki Townsend'in birinci iyonlaşma katsayısı olan α 'ya bağlı olarak üstel biçimde değişir. Anot üzerindeki elektron akışı ise anottan katoda olan α ile üstel olarak değişir. Dolayısıyla elektrot aralığındaki akım üstel bir şekilde artar. Akımın ani artışı, elektrik alan şiddetini E_d seviyesine yakın değerlerde tutar. Buradan özetle şu sonuca varılabilir: Townsend boşalmasında elektrik alan şiddeti, delinme elektrik alan şiddeti değerini aşamaz (yani $|E(t)| \leq E_d$). Bu durumda boşalma, uygulama geriliminin her periyodunda iki faza ayrılır. Birinci (I) aktif faz durumunda $\left(t^* < t < \frac{\pi}{2\omega}\right)$ boşalma aralığındaki iletim akımı, yüzey yük yoğunluğunu değiştirir ve elektrik alanını $E = E_d$ seviyesinde tutar. Denklem 2.2'ye göre yüzey yük yoğunluğu ikinci (II) Fazda $-U(t)$ 'ye bağlı olarak değişir $\frac{\pi}{2\omega} < t < \frac{\pi}{\omega} + t^*$. Bu durumda elektrot aralığındaki elektrik alanı E_d 'den daha azdır. Bu fazın en başında bütün yüklenmiş parçacıklar gaz aralığından dielektrik yüzeyine taşınır. Bu durumda iletim akımı sıfırdır ve yüzey yük yoğunluğu sabittir. Denklem 2.2'ye göre uygulama gerilimindeki herhangi bir değişiklik, gaz aralığındaki elektrik alan şiddetini de değiştirir. Elektrik alanı, yüzey yük yoğunluğu ve sinüsoidal gerilim durumundaki akımın zamana göre değişimleri Şekil 2.6'da gösterilmiştir [38].

$$U_{\max} > 2L \left(1 + \frac{2d}{L\epsilon}\right) E_d \quad (2.3)$$

Uygulama geriliminin düşük değerlerinde Denklem 2.3'e göre delinme gerçekleşir ve $U(t)$ işaret değiştirir. Buna karşılık aşırı yüksek gerilim durumunda ise delinme, $U(t)$ işaret değiştirmeden önce gerçekleşir. Buradan görülüyor ki, I. faz ve II. faz süreleri uygulama geriliminin genliğine bağlıdır. Bu durumu karakterize eden elektrik alanının zamana göre değişim grafiği Şekil 2.6'da verilmiştir [38].

Denklem 2.2'den, elektrik alanını sınırlamak için gerekli olan iletim akımı aşağıdaki şekilde belirlenir [38]:

$$j = \frac{d\sigma}{dt} = \begin{cases} \frac{dU}{dt} \frac{\epsilon}{8\pi d}, & t \in I. \text{ Faz} \\ 0, & t \in II. \text{ Faz} \end{cases} \quad (2.4)$$



Şekil 2.6. Akım, yüzey yükü ve gaz aralığındaki elektrik alanının zamana göre değişim grafiği (I. Fazda akım, elektrik alanının $E=E_d$ seviyesine getirir. II. fazda ise iletim akımı sıfırdır) [38]

2.4. DBB Mekanizmasındaki Akım Gelişmesi

Bu kısımdaki çalışma koşulları Townsend modeliyle sınırlandırılmıştır. Bu modele göre boşalma aralığındaki elektronlar, nötr atomların çarpışma iyonizasyonu ile katlanarak artmaktadırlar. Bu işlem sadece elektrik alanıyla kontrol edilir. İkinci elektron ise iyonların bombardıman etkisiyle katottan ayrılır. Townsend boşalmasındaki elektron çoğalması periyodu, bir iyonun bulunduğu yerden katot yüzeyine kadar olan karakteristik drift (sürüklenme) zamanı τ ile belirlenir (Katot ve anot, aralıktaki elektrik alanıyla birbirine bağlıdır). Boşalma aralığındaki lokal iyonizasyonunun incelenmesi durumunda akım, aşağıdaki formülle ifade edilir [38]:

$$j(t) = j_{du}(t) + \int_0^L j\left(t - \frac{x}{u}\right) \gamma \cdot \alpha\left(t - \frac{x}{u}\right) \exp\left[x \cdot \alpha\left(t - \frac{x}{u}\right)\right] dx \quad (2.5)$$

Burada x -aralığın uzunluğu, α -iyonlaşma katsayı, γ -iletkenlik katsayısı ve $j(t)$ ise katottaki iletim akımıdır. $j_{du}(t)$ *iyon-elektron* emisyonu (dış iyonlaşma akımı) ve u ise iyonların sürüklenme hızıdır. Denklem 2.5'in $j_{du}(t) \propto \delta(t-t')$ ile çözümünden hareketle, zamana bağlı keyfi bir $j_{du}(t)$ ifadesi elde edilir. Bu durum aşağıdaki gibi verilebilir [38]:

$$j(t) = \frac{u}{L} \int_{-\infty}^t j_{du}(t') i(t, t') dt',$$

$$i(t, t') = \frac{L}{u} \delta(t-t') + \int_0^L i \left(t - \frac{x}{u} \right) \gamma \cdot \alpha \left(t - \frac{x}{u} \right) \exp \left[x \cdot \alpha \left(t - \frac{x}{u} \right) \right] dx \quad (2.6)$$

Bu nedenle $i = i(t, t')$ 'nin çözümü, incelenen problem için bir tür Green fonksiyonudur. I. Faz durumundaki elektrik alanının değişkenliği tanımlandığı için $\gamma(e^{\alpha(t) \cdot L} - 1) \approx 1$ ifadesi alınır. Sabit bir aşırı gerilim durumunda akım $i = i_0 \exp(\beta(t-t'))$ şeklinde üstel olarak artar ve gerçekte Denklem 2.6'nın zamana bağlı bir çözümü olarak kabul edilebilir [38].

2.5. Hava ve Azot Gazı Ortamlarında Gerçekleşen Bariyer Boşalmasının İyonlaşma Katsayısının Belirlenmesi

Bariyer boşalması mekanizmasında genel olarak üç türlü yüklü parçacık ele alınır. Bunlar *elektronlar*, *pozitif iyonlar* ve *negatif iyonlardır*. Boşalmadaki toplam yüklü parçacık miktarı, ortamda bulunan yüklü parçacıkların sürüklenme ve difüzyon özelliklerine bağlı olarak hesaplanabilir. Boşalmanın gelişimi sırasındaki elektronların, pozitif iyonların ve negatif iyonların yoğunluğundaki değişim oranı, yük akışının süreklilik denklemleri kullanılarak aşağıdaki şekilde karakterize edilebilir [39]:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (n_e v_e + D_e \nabla n_e) = \alpha n_e |v_e| - \eta n_e |v_e| - \beta_{ep} n_e n_p + S_{ph}, \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \nabla \cdot (n_p v_p) = \alpha n_e |v_e| - \beta_{ep} n_e n_p - \beta_{np} n_n n_p + S_{ph}, \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} + \nabla \cdot (n_n v_n) = \alpha n_e |v_e| - \beta_{np} n_n n_p. \quad (2.9)$$

Burada t zaman; n_e elektron yoğunluğu; n_p pozitif iyonların yoğunluğu; n_n negatif iyonların yoğunluğu; ν_e , ν_p ve ν_n ise bunlara karşılık gelen ortalama sürüklenme hızlarını karakterize eder. D_e ise elektronların difüzyon katsayısıdır. Denklem 2.7, Denklem 2.8 ve Denklem 2.9'un sağ tarafındaki kaynak terimleri, gaz ortamındaki her bir yüklü parçacığın farklı çarpışma süreçlerindeki birleşmesini veya ayrışmasını karakterize eder. Başka bir deyişle, iyonizasyon ve rekombinasyon (tekrar birleşme) olaylarını karakterize ederler. Denklemlerdeki α , Townsend'in iyonlaşma katsayısıdır; η ise oksijen moleküllerine bağlı olan elektronları karakterize eden sabit bir katsayıdır. β_{ep} elektron-iyon, β_{pn} ise iyon-iyon rekombinasyonunu (tekrar birleşmesini) tanımlayan birer katsayılarıdır. S_{ph} da fotoiyonizasyon oranını karakterize eden bir katsayıdır. İyonların kinetik enerjileri, elektronların kinetik enerjisine göre çok daha düşüktür. Bu nedenle iyonların çarpışma olasılığı, boşalma gelişiminin başlangıcında önemli bir etkiye sahip değildir. Dolayısıyla simülasyon işlemlerinde iyonik difüzyon olayı dikkate alınmaz. Fakat iyonik sürüklenme (*drift*), boşalmanın sonraki aşamalarında önemli bir etki gösterdiği için Denklem 2.8 ve Denklem 2.9'da ihmal edilemez [40]. Elektriksel boşalma olaylarını detaylı bir biçimde belirleyen Denklem 2.7–2.9 ile tanımlanan nonlinear deklemlerin nümerik çözümlenebilmesi için bu ifadelerin içerdiği parametrelerin özellikle de etkin iyonlaşma katsayısının bilinmesi gerekmektedir [41]. Gazlarda elektrik boşalmasının tutuşma teorisinden (Townsend veya Streamer) bağımsız olarak tutuşma geriliminin hesabı için, öncelikle incelenen gaz ortamında elektronların iyonizasyon katsayısının (α) ve bu katsayının E/p 'ye bağımlılığını veren $(\alpha/p) = f(E/p)$ ifadesinin bilinmesi gerekmektedir. İyonizasyon katsayısının yeterince gerçek değerinin hesabı, sadece bazı atomar ve moleküler gazlar için mümkündür [42]. Konuya ilişkin yapılan son çalışmalarda, *Monte-Carlo* yöntemi kullanılarak Raizer ve öğrencileri tarafından $(\alpha/p) = f(E/p)$ ifadesinin nümerik olarak belirlenen değerlerinin, deneysel olarak belirlenen sonuçlarla makul bir şekilde uyduğu bilinmektedir.

Fiziksel bir olayın nümerik ve analitik çözümleri, birbirini tamamlayan evrelerdir. Öte yandan nümerik olarak hesaplanan parametreler, fiziksel bir olayın nicel özelliklerini belirlerken, nitel özelliklerin analizine pek de katkıda bulunamazlar. Bu husus göz önüne alınarak, gaz karışımları için bazı yaklaşımlar doğrultusunda,

Ref. [43]'te $(\alpha/p) = f(E/p)$ bağıntısının analitik ifadesi belirlenmiştir. Buna göre E elektrik alan şiddeti (kV/cm) ve p ise basınç (*Pascal* cinsinden) olmak üzere, Townsend yaklaşımında % 10,6 O_2 + % 89,4 N_2 gaz karışımı için α iyonlaşma katsayısının E/P bağıl elektrik alan şiddetine göre değişimi için,

$$\alpha = 1,23 \times 10^{-2} p \exp \left[-160 \frac{p}{E} \right] \quad (2.10)$$

ifadesi elde edilmiştir. Bu tez çalışmasında, [43]'te kullanılan varsayımlar ve yaklaşımlar doğrultusunda saf azot gazı ve hava ortamı için etkin iyonlaşma katsayıları, sırasıyla aşağıda verilen formüllerle belirlenmiştir.

$$\alpha = 3.37 \times 10^{-5} p \exp \left[\frac{E}{p} - 21.7 \right]^2 \quad (\text{Azot}) \quad (2.11)$$

$$\alpha = 7.68 \times 10^{-5} p \exp \left[\frac{E}{p} - 0.204 \right]^2 \quad (\text{Hava}) \quad (2.12)$$

2.6. Bariyer Boşalmasının Pratik Uygulamaları

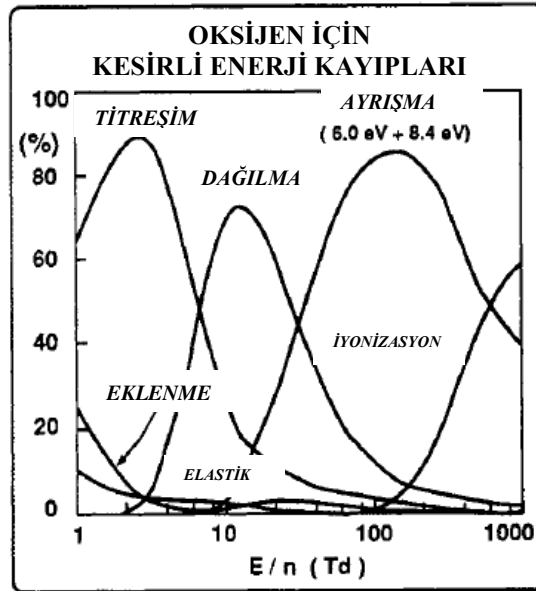
Dielektrik bariyer boşalmasının bütün uygulamaları genel bir mekanizmaya tabidir. En sade açıklamayla, elektrot sistemine uygulanan bir gerilim sonucu bir elektrik alan oluşur ve bu elektrik alanının etkisiyle bir boşalma meydana gelir. Bu boşalmada yüklü parçacıklar, uyarılmış yükler ve serbest radikaller birbirleriyle etkileşime girerler. Bu kararsız yapıların reaksiyonları ortam gazında kimyasal bir değişim meydana getirir. Böylece pratik uygulamaların türüne bağlı olarak çeşitli reaksiyon mekanizmaları gerçekleşir.

2.6.1. DBB Yöntemiyle Ozon (O_3) Üretimi

Dielektrik bariyer boşalmasının ilk ve hâlâ en önemli uygulaması, oksijen veya havadan ozon (O_3) üretimidir. 20. yüzyılın sonlarında içme sularının dezenfeksiyonu için kurulmuş olan büyük ozon üretme tesisleri, Fransa'nın Nice ve Rusya'nın St. Petersburg kentlerinde kurulmuştur. Fakat günümüzde bu alanda binlerce tesis kurulmuş durumdadır. En büyüğü birkaç *MW* gücünde olup günde birkaç ton ozon

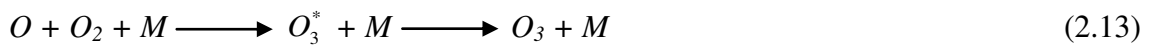
üretimini gerçekleştirebilecek kapasiteye sahiptir. Şişe suyunun sterilizasyonu hâlâ çok önemli bir konumda olmasının yanı sıra ozon üretiminin diğer uygulamaları da büyük bir aciliyet gerektirmektedir. Bunun örnekleri kapalı soğutma suyu sistemlerinin koşulları, atık suların temizlenmesi, kimyasal oksidasyon ve parlatma işlemleridir. Gelecek için düşünülebilecek ana ozon uygulamaları ise meyve sularının sterilizasyonlarındaki klorin bileşenleri olabilir.

DBB'deki ozon üretimi, elektronların uyarma etkisi sonucu oksijen moleküllerinin ayrışması işlemiyle başlar. Üretilen oksijen atomları farklı reaksiyon yollarıyla meydana gelirler. Bu reaksiyonlar sonucu oluşan oksijenin kesirli enerji kayıplarını gösteren grafik Şekil 2.7'de verilmiştir.



Şekil 2.7. Oksijen (O_2)'deki kesirli enerji kayıpları grafiği [44]

Aşağıda verilmiş olan reaksiyonlardaki M , reaksiyonun üçüncü bir bileşenidir ve bu bileşen havadaki bir oksijen molekülü veya azot molekülü olabilir. O_3^* bileşeni ise orta derecede uyarılmış bir ozon molekülüdür. Bu molekül, ozonun kararlı yapısından çok daha fazla reaktiftir. Göreceli parçacık konsantrasyonları üzerindeki farklı reaksiyonların göreceli önemi, gazın basıncı ve gazın sıcaklığını ifade eder [44].





Reaksiyon 2.13, az miktardaki yüksek basınçta (1000–3000 *hPa*), düşük gaz sıcaklığında ve göreceli olarak düşük atom konsantrasyonlarında ($[O]/n \sim 10^{-3}$) gerçekleşir. İlk iki şart, dengesiz bir boşalma gerektirir. Çünkü elektronlar oksijen moleküllerinin bağlarını kırmak için yeterince yüksek bir enerji gerektirirler. Şekil 2.7'deki grafikler dar aralıkta gerçekleşen DBB'nin bütün bu gereklilikleri ideal bir şekilde karşılayacak özelliğe sahip olduğunu deneysel olarak göstermektedir [44].

Saf oksijenin pahalı olmasından dolayı birçok ozon jeneratörü, besleme gazı olarak havayı kullanır. Fakat bu çözümün birçok sakıncaları vardır. DBB işleminde, gaz karışımındaki nemlilik önemli bir dezavantaj olduğu için, ozon oluşturmak amacıyla kullanılan havanın -60 °C noktasına kadar kurutulması gerekir. Çünkü bu sıcaklıkta içerikteki su kalıntısı birkaç *ppm* değerlerinde olur. İkinci bir dezavantaj ise havadaki oksijen moleküllerinin bozunma oranı çok düşüktür. Çünkü titreşimsel dağılım ve azot moleküllerinin bozunması, elektron enerjilerini soğuran ana etkenlerdir. Fakat tüm bu enerjiyi kayıp olarak değerlendirmek yanlıştır. Çünkü azot atomlarını içeren bazı reaksiyonlar ve uyarılmış N_2^* molekülleri, ek oksijen atomlarını oluştururlar. Ozon oluşumuna katkı sağlayan bu reaksiyonlar aşağıda verilmiştir [45].



Genel anlamda havayla çalışan ozon jeneratörleri belirli bir miktar ozon üretimi için iki kat daha fazla enerji gerektirir ve oksijenle çalışan ozon jeneratörlerinin yarısı miktardaki konsantrasyona sahiptirler. Üçüncü dezavantaj ise azotoksit bileşiklerinin (N_2O , NO , NO_2 , NO_3 , N_2O_5) davranışları, boşalma işleminin optimizasyonunun

sağlanmasında saf oksijen kullanımındakine göre çok daha fazla karmaşıktır. Gerçek durumda hava ile çalışan ozon jeneratörlerinde en uygun performansın sağlanabilmesi için farklı işlem koşullarını gerektiren bir mekanizmaya ihtiyaç duyarlar [46].

2.6.2. DBB Excimer (UV) Lambalar

Mikrodeşarjlardaki elektron yoğunluğu ve elektron enerjileri, basınçlı Excimerdeşarj lazerlerinin mekanizmalarıyla açıklanabilir. Çünkü DBB bazı gazlarda, gaz karışımlarında ve halojenlerde kullanılabilir (örneğin excimer oluşumunda). Birçok Excimer lambası etkin ve güçlü ultraviyole (UV) ve vakum ultraviyole kaynağı olduğu için bu prensiple çalışmaktadırlar. DBB'deki excimer oluşumunun iki örneği şöyledir: Birincisi, Xe_2^* excimerin oluşumudur ve $\lambda=172\text{ nm}$ dalga boyuna sahip olup vakum UV olarak sınıflandırılır. Diğeri ise $XeCl^*$ excimer oluşumudur ve bu da $\lambda=308\text{ nm}$ dalga boyuna sahip olup UV-B olarak sınıflandırılır. Buradaki Xe_2^* , uyarılmış ksenon (Xe^*) atomlarından oluşur. Her ikisi de üç gövdeli reaksiyona sahip olup, normal değerdeki bir yüksek basınç gerektirir. Bu duruma ait reaksiyonlar aşağıdaki gibidir [47].



Bu reaksiyonlarda M , üçüncü bir reaktant (katalizör) maddesidir. Çoğu durumda bu madde, ortama eklenmiş ve tampon olarak kullanılan düşük konsantrasyonlu gazın bir atomu konumunda olup elektron enerji dağılımını uyarmak için kullanılır.

Pratikte excimer lazerlerin yaygın olarak kullanılmalarının nedeni, lambanın içerisindeki gaz karışımının quartz maddeden yapılmış ince borulardan iletilerek daha uzun ömürlü olması sağlanır. Bu lambaların diğer bir önemli avantajı ise elektrot sistemi bariyer tabakayla kaplı olduğu için boşalmayla direk olarak temasta değildir ve bu nedenle elektrot malzemesinden kaynaklanan kül, atık vs. gibi sakıncaları yoktur.

Farklı gaz karışımlarının kullanılması yöntemiyle, *dar-bant* excimer flüoresant lambalar 20'den fazla çeşitli dalga boylarında (100–550 nm arasında) imal edilirler. Çoğu durumda, gaz konsantrasyonunun ve gaz basıncının dikkatlice ayarlanması

sonucunda *tekli-baskın-bant* emisyonlu tip olarak da elde etmek mümkündür. Bu lambaların tipik spektral genişlikleri yarım şiddet değerinde kabul edilen 1 nm ile 15 nm arası değerlerdedir. Excimer karışımı yüksek yoğunluklu güçte pompalandığı için spektral açıdan çok güçlü ve seçici UV foton kaynağı olarak fotokimyasal ve fotofiziksel işlemleri başlatmak için kullanılabilir. Yüksek hızlı UV ışınlarının kaynağı olan DBB excimer lambalarının bazı yeni uygulama alanları ise yüksek hızlı UV, metalik fotodepozisyon (ışıkla uyarılma), yalıtkan ve yarıiletken tabakaların ışıklı uyarılması ve ışıklı uyarma metoduyla polimer yüzeylerinin modifikasyonu gibi işlemler örnek olarak gösterilebilir [48].

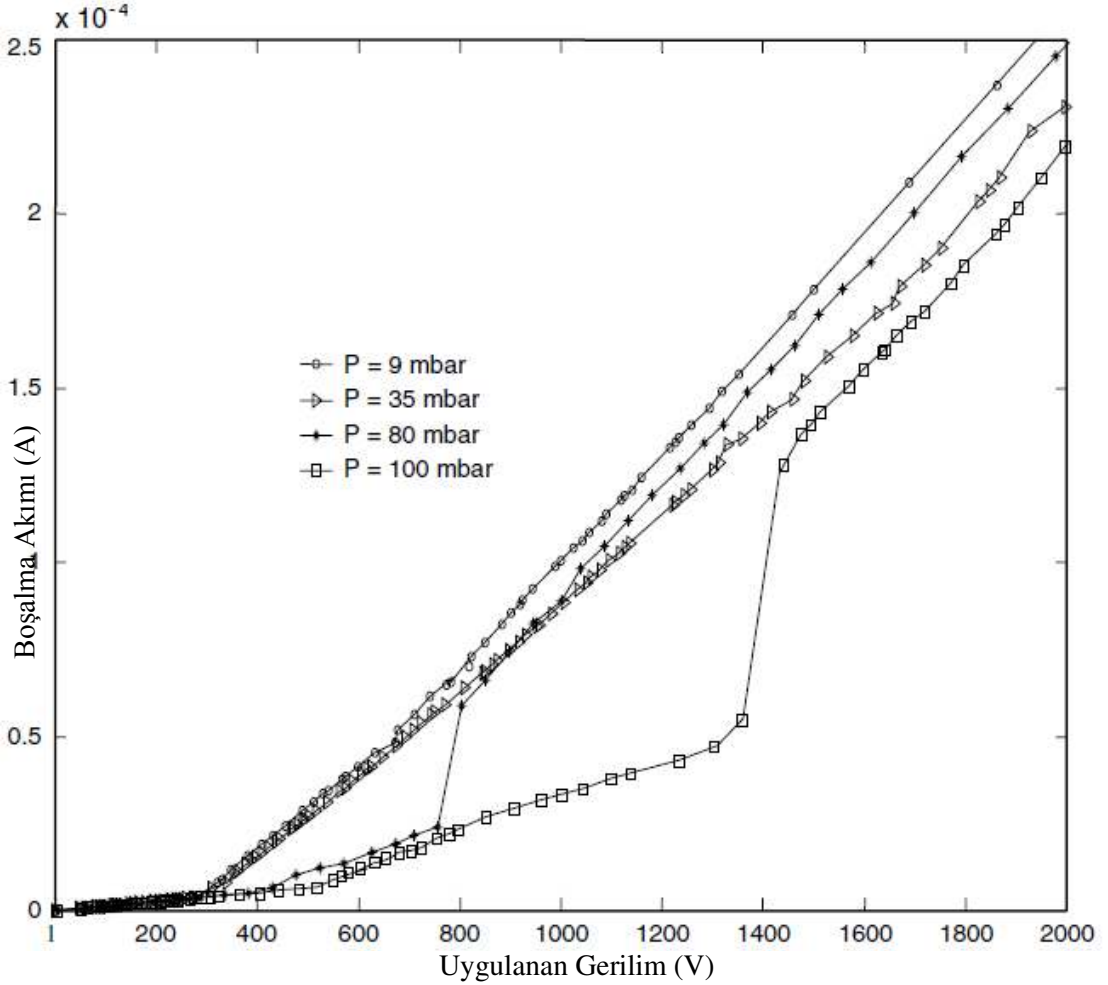
2.6.3. DBB'nin Metal-Dielektrik-Gaz-Dielektrik-Metal (MDGDM) Ozonator Sistemine Uygulanması

Bu uygulamada DBB'nin elektrot sisteminin özel durumunu karakterize eden Metal-Dielektrik-Gaz-Dielektrik-Metal (MDGDM) şeklinde hazırlanmış çift bariyerli sistem anlatılmıştır. Sistemde genel olarak gaz elektrokimyasında bulunan ozonator tip reaktörlerde gerçekleşen DBB incelenmiştir. Bu yöntemle göre yapılan deneysel çalışma için seçilen parametreler; elektrot sisteminin aralığı $d=580 \mu m$ ve basınç değerleri ise $p=1-100 hPa$ aralığında olup deneyler hava ortamında gerçekleştirilmiştir. Bu sistemde yapılan deneysel çalışmalara göre bariyer boşalmasının darbe şekilli olduğu gözlenmiştir. Çalışma kapsamında boşalmanın farklı pd değerlerinde *Gerilim-Akım* ve *Gerilim-Yük* karakteristikleri belirlenmiştir.

Gaz elektrokimyasında önemli bir yere sahip olan ozonatör tip sistemler pratik uygulamada ozon üretimi için kullanılmaktadır. Bu sistemler genellikle belirli bir gaz aralığına sahip koaksiyel bir silindiriksel kapasitör şeklinde imal edilirler. Bu tip sistemlerde elektrik boşalması hem gaz aralığında ve hem de ozonatörün elektrotları arasında meydana gelir. Her iki ortamda da meydana gelen boşalma aynı karaktere sahiptir [49].

Şekil 2.8'de görüldüğü gibi farklı pd değerlerinde gerçekleşen bariyer boşalmasının *Gerilim-Akım* karakteristiklerinin basamak şekilli olduğu ve boşalma başlangıç gerilimlerinin de pd 'ye bağlı farklılık gösterdiği deneysel olarak belirlenmiştir. Bu yöntemle elde edilen deneysel verilere istinaden $pd < pd_{kritik}$ koşulunda boşalma

Towsend mekanizmasıyla açıklanabilmekte ve $pd > pd_{kritik}$ koşulunda ise Streamer teorisiyle açıklanabilir. Şekilden de görüldüğü gibi boşalma akımı, düşük basınç değerlerinde lineer bir şekilde artarken yüksek basınç değerlerinde ise bu akım basamak şekilli bir artış göstermektedir. Bunun muhtemel nedeni, boşalma aralığındaki *iyon-elektron* konsantrasyonu ve boşalma ortamında bulunan uzay hacim yüklerinin kararsız davranışları olabilir [49].



Şekil 2.8. Farklı pd koşullarında gerçekleşen DBB'nin $V-I$ karakteristikleri [49]

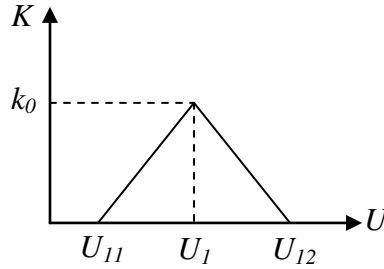
Dielektrikle sınırlı gaz aralığında gerçekleşen bariyer boşalmasının [49]'da verilen eşdeğer elektrik modelinden hareketle, DBB'nin akım denklemleri elde edilebilir. DBB'nin bu eşdeğer modele göre elde edilmiş olan akım denklemleri aşağıda verilmiş olan Denklem 2.22 ile belirlenebilir:

$$i(t) \approx \frac{(U_p - U_n)}{RC_0} C_d' \exp\left[-\frac{t}{RC_0}\right] \quad (2.22)$$

Uygulanan gerilimin yarım periyot zarfında oluşturduğu boşalma sayıları ise,

$$n = 2 \left[\frac{\alpha U_p - V_p}{V_p - U_n} \right] = 2 \left[\frac{\eta - m}{1 - m} \right] = 2 [\eta_m] \quad (2.23)$$

ifadesiyle verilir [50]. Denklem 2.23'teki η_m , sönümlenme gerilimin (V_p 'nin) sıfırdan farklı değerleri için aşırı gerilim parametresini ifade etmektedir. Denklem 2.23, tek bir boşalma kanalında gerçekleşen osilasyon sayısını ifade etmektedir. Aralıktaki osilasyon sayısının gerilime bağlılığının sert basamak şekilli olmamasının nedenlerinden biri, ayrı ayrı oluşan boşalma kanallarının tutuşma gerilimlerinin farklı olmasıdır. Şekil 2.9'da elektrot aralığındaki boşalmanın kanal sayılarının dağılımını gösteren grafik verilmiştir.



Şekil 2.9. DBB'nin elektrot aralığındaki kanal sayılarının dağılım grafiği

Boşalma aralığındaki kanal sayısının tutuşma gerilimine göre dağılımının üçgen şeklinde bir dağılıma sahip olduğu düşünülürse, bu durumda boşalmanın tutuşmasıyla birlikte deney hücresi üzerinden yarım periyot zaman zarfında geçen ortalama akım değeri için aşağıdaki denklem takımları elde edilir [49]:

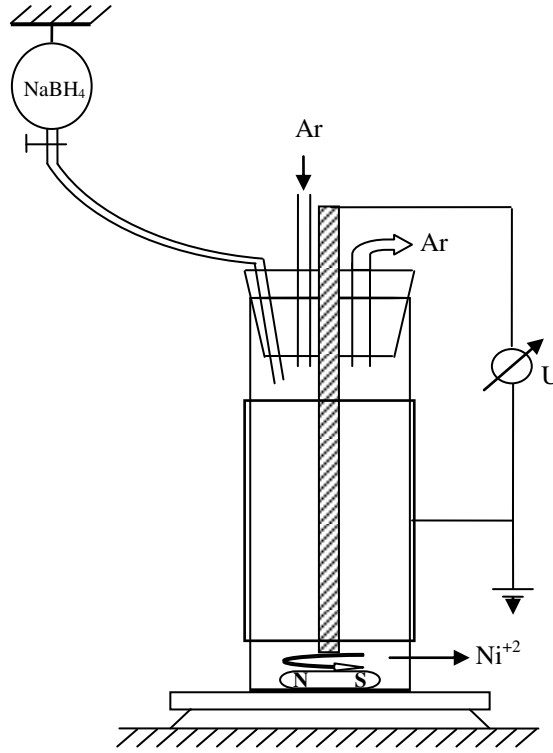
$$I_{ort}(U) = \begin{cases} \frac{2U \omega C_0}{\pi} \cdot \left(1 + \frac{q K [\eta_m]}{2U C_0} \right) & , \quad U_{N-1,2} < U < U_{N,1} \\ \frac{2U \omega C_0}{\pi} \cdot \left(1 + \frac{8q K [\eta_m]}{N C_0} \cdot \frac{(U - U_{N,1})^2}{(U_{1,2} - U_{1,1})^2} \right) & , \quad U_{N,1} < U < U_N \\ \frac{2U \omega C_0}{\pi} \cdot \left(1 - \frac{8q K [\eta_m]}{N C_0} \cdot \frac{(U - U_{N,2})^2}{(U_{1,2} - U_{1,1})^2} \right) & , \quad U_N < U < U_{N,2} \end{cases} \quad (2.24)$$

Denklem 2.24 ile tanımlanan ifadenin sağ tarafındaki birinci bileşenler, boşalma olmaksızın deney hücresi üzerinden geçen kapasitif akımı, ikinci bileşenler ise oluşan boşalma akımının ortalama değerlerini ifade etmektedir [49].

2.6.4. DBB'nin Kullanılmasıyla Kobalt ($Co(0)$) Katalizörü Ortamında Sodyumborhidrür ($NaBH_4$) Çözeltisinden Hidrojen Üretimi

Bariyer boşalmasının kimya alanında kullanılmasının en önemli avantajlarından biri, boşalmanın düşük sıcaklığa sahip olup ortamdaki reaksiyon üzerinde herhangi bir bozunmaya sebebiyet vermemesidir. Bu kısımda DBB metodunun kullanılmasıyla elde edilen plazma ortamında üretilen $Co(0)$ katalizörünün Sodyumborhidrür ($NaBH_4$) çözeltisinden hidrojen üretme işlemi üzerindeki etkinliği incelenmiştir. Yapılan ön deneysel çalışmalar sonucunda, DBB'nin kimyasal reaksiyonlar üzerinde büyük etkisinin olduğu gözlenmiştir. DBB'in $Co(0)$ katalizörü üzerindeki etkinliğini belirlemek amacıyla yapılan bilimsel çalışma aşağıdaki basamaklardan oluşmaktadır:

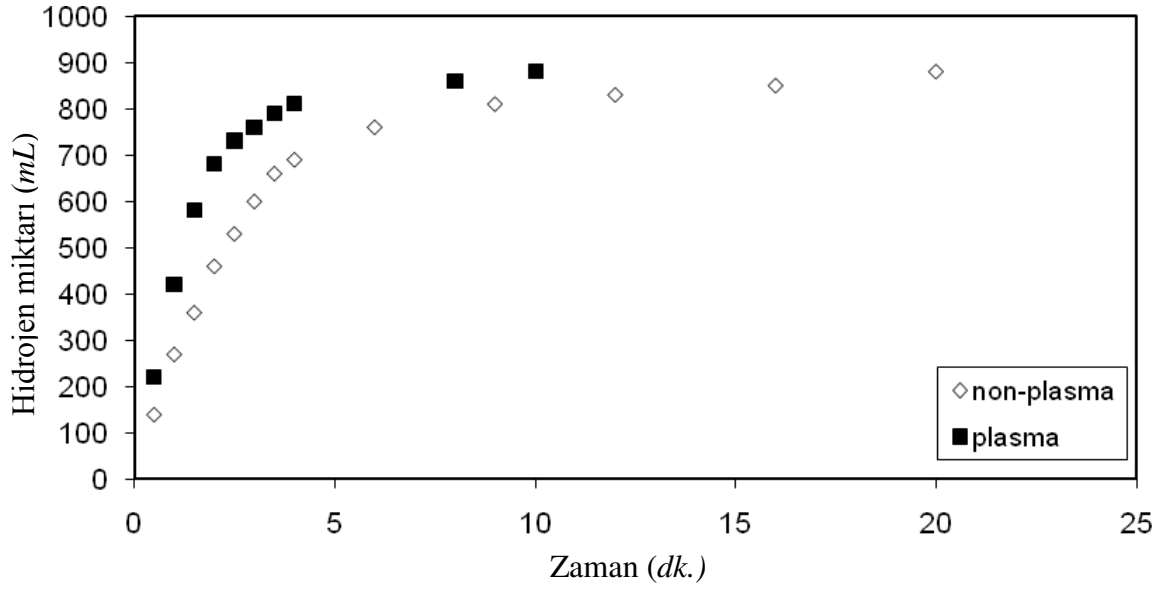
- a) Belirli bir gerilim uygulanarak oluşturulan DBB plazma ortamında $Co(0)$ katalizörü kimyasal indirgenme yöntemiyle sentezlenmiştir. İndirgeme çözeltisi olarak $NaBH_4$ 'ün kobalt tuzunu ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$) içeren sulu ortamdaki çözeltisi kullanılmıştır. Şekil 2.10'da bu işlemin gerçekleştirildiği deney sisteminin şeması verilmiştir. Sistem genel olarak ince alüminyum tabaka ile kaplanmış (katot elektrodu) bir cam mezür ve ortasına yalıtkan lastik tıpa yardımıyla merkezlenmiş olan ve cam bariyer tabaka ile kaplanmış bir anot elektrodundan oluşmuştur. Bu elektrot sistemine uygun değerlerde ve belirli sürelerle yüksek gerilim uygulanarak DBB plazma işlemine maruz bırakılmıştır. Mezür içerisindeki çözelti, elektromanyetik bir karıştırıcı yardımıyla reaksiyon süresince sürekli olarak karıştırılmıştır. Sentezleme işlemi sırasında, ortamın oksijene karşı yalıtımını sağlamak amacıyla sisteme sürekli argon gazı beslenmiştir. Bu şekilde sentezlenen $Co(0)$ katalizörü, çözeltiden mekanik süzme yöntemiyle ayrıştırılarak en az üç kez saf suyla yıkanmıştır. Yıkanan bu katalizör, argon gazı ortamında ve $120\ ^\circ C$ sıcaklıktaki etüvde kurutulma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra kurutulmuş olan bu katalizör, doğal soğutma ortamına bırakılarak oda sıcaklığına gelmesi sağlanmıştır. Elde edilen $Co(0)$ katalizörünün yüzey aktivasyonunu daha da arttırmak amacıyla özel olarak tasarlanmış olan plazma reaktöründe, belirli sürelerle DBB plazma işlemine tabi tutulmuştur. DBB yöntemiyle aktifleştirilen bu katalizörün hidrojen gazı üretim etkinliğini belirlemek için, katalizörün belirli bir miktarı alınarak çeşitli testler uygulanmıştır [51].



Şekil 2.10. DBB ortamında $Co(0)$ katalizörü üretmek için hazırlanan deney sistemi [51]

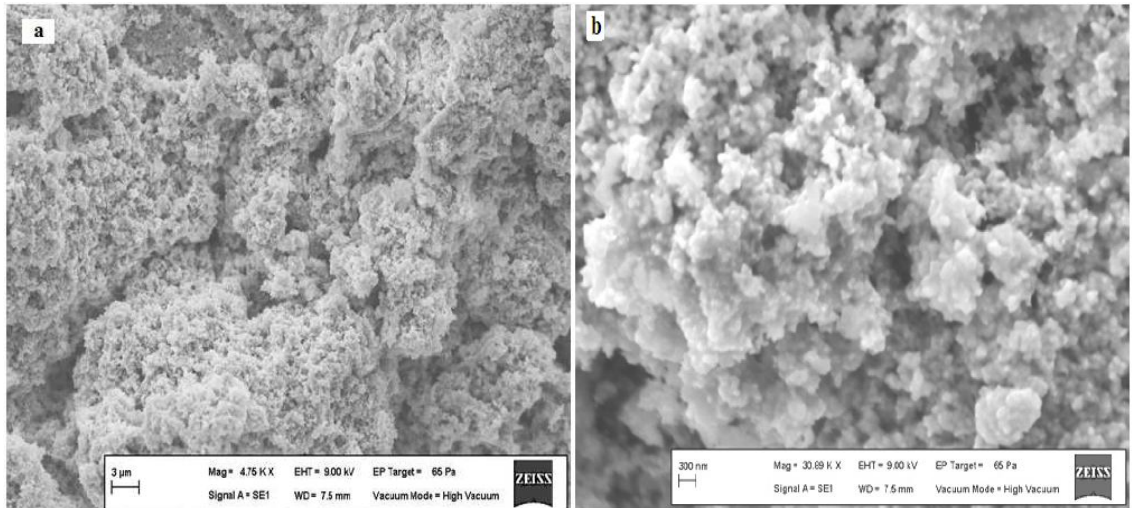
b) Bu adımda $CoCl_2.6H_2O$ çözeltisi, farklı konsantrasyonlardaki $NaOH$ çözeltisi içeren $v=50\text{ mL}$ 'lik $NaBH_4$ çözeltisine doğrudan eklenmiştir. Bu işlem kapalı bir sistemde gerçekleştirilmiştir. Tepkime sonucunda zamana bağlı olarak meydana gelen hidrojen gazı ölçülerek alınan değerlerin karşılaştırılması sonucu üretilen katalizörün etkinliği belirlenmiştir. Daha sonra bu katalizörlerin *SEM* görüntüleri çekilerek yüzey şekillenmeleri incelenmiştir.

Şekil 2.11'de DBB ortamında üretilmiş olan $Co(0)$ katalizörünün etkinliğini gösteren grafik verilmiştir. Grafiğe göre plazmaya tabi tutulmuş olan katalizörün oluşturduğu hidrojen gazının normal metotla üretilmiş olan katalizörün oluşturduğu hidrojen gazından daha kısa sürede açığa çıktığı görülmektedir. Deneysel sonuçlara göre DBB'nin katalizör üretimi üzerinde önemli bir etki gösterdiği ve Şekil 2.11'deki grafikten de görüldüğü üzere DBB ortamında üretilen katalizörün normal kimyasal metotlarla elde edilen katalizöre göre daha etkin olduğu görülmüştür. DBB yöntemiyle elde edilen katalizörün etkinliğinin en uygun koşullarının belirlenebilmesi için boşalmanın uygulama süresi ve uygulanan gerilim değerleri önemli bir rol oynar. Özetle, $Co(0)$ katalizörü için oluşturulan DBB sisteminin en etkin uygulama süresi $t=15\text{ dk}$ ve boşalmanın en etkin gücü ise $P=2800\text{ W}$ olarak belirlenmiştir [51].



Şekil 2.11. DBB plazma ortamında üretilen $Co(0)$ katalizörünün, $NaBH_4$ çözeltisinden hidrojen üretimi üzerindeki etkisi [51]

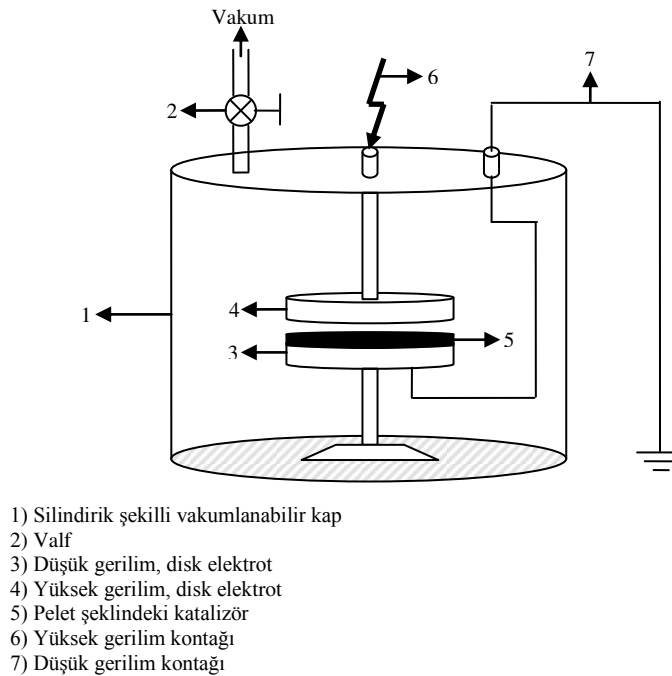
Kimyasal reaksiyonlarda katalizörün yüzey alanının büyüklüğünün katalizör etkinliğini doğru orantılı olarak arttırdığı bilinmektedir. Bu çalışmada üretilen $Co(0)$ katalizörünün karşılaştırmalı *SEM* görüntüleri ise Şekil 2.12’de verilmiştir. Normal yolla elde edilen katalizör yüzeyinin *SEM* görüntüsü Şekil 2.12a’da verilmiştir. DBB ortamında elde edilmiş katalizörün *SEM* görüntüsü ise Şekil 2.12b’de yer almaktadır. Şekillerden de görüldüğü gibi DBB’ye tabi tutulmuş katalizör yüzeylerinin boşalmanın bombardıman etkisiyle önemli derecede pürüzlenererek arttığı gözlenmiştir [51].



Şekil 2.12. $Co(0)$ katalizörü için a) Normal metotla elde edilen katalizörün *SEM* görüntüsü b) DBB etkisiyle üretilen katalizörün *SEM* görüntüsü [51]

2.6.5. DBB'nin Kullanılmasıyla Nikel ($Ni(0)$) Katalizörü Ortamında Sodyumborhidrür ($NaBH_4$) Çözeltisinden Hidrojen Üretimi

DBB ortamında gerçekleştirilen kimyasal deneylerle katalizör üretimi kapsamındaki çalışmanın bu kısmında ise DBB ortamında üretilen $Ni(0)$ katalizörünün $NaBH_4$ çözeltisinden hidrojen üretimi üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Bu uygulamada toz halinde üretilen $Ni(0)$ katalizörü, 1.5 Ton'luk pres yardımıyla pellet disk şekline getirilmiş olup Şekil 2.13'te gösterilen deney düzeneyindeki elektrotlar arasına, tek bariyer tabaka şeklinde yerleştirilerek vakumlanmıştır. Daha sonra $t=5-15$ dk arasındaki belirli sürelerle ve $V=3-5$ kV gerilimindeki DBB plazma bombardımanına tabi tutulmuştur [52].



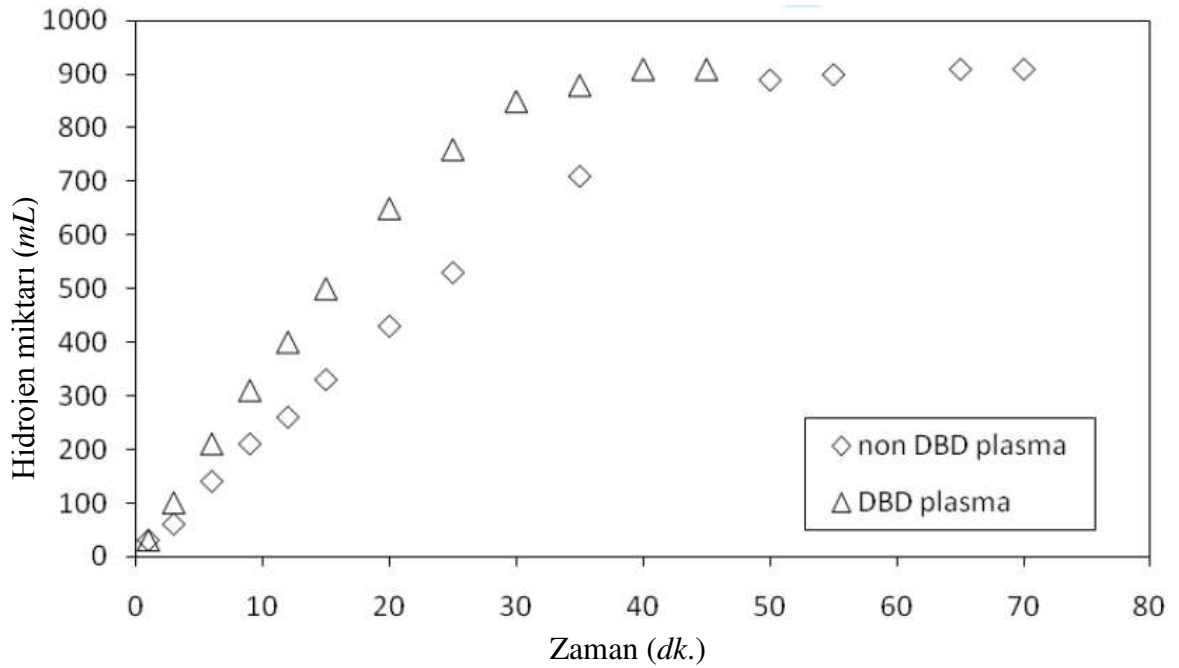
Şekil 2.13. DBB ortamında $Ni(0)$ katalizörünün üretimi için hazırlanan hücre [52]

Bu çalışmada boşalma ortamında $NiCl_2.6H_2O$ çözeltisinin indirgenmesi sonucu $Ni(0)$ katalizörünün sentezlenmesi işlemi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan katalizör maddenin özelliklerine göre, farklı gerilim değerlerinde ve uygun özellikteki (DC veya AC) DBB plazma oluşturulmuştur. Daha sonra çalışma kapsamında kimyasal metotlarla üretilen $Ni(0)$ katalizörünün üretim işlemi tamamlanarak elde edilen bu katalizör, uygun özellikteki plazma bombardımanına tabi tutulmuştur.

Bu çalışmanın içerdiği işlem basamakları ise aşağıdaki gibidir:

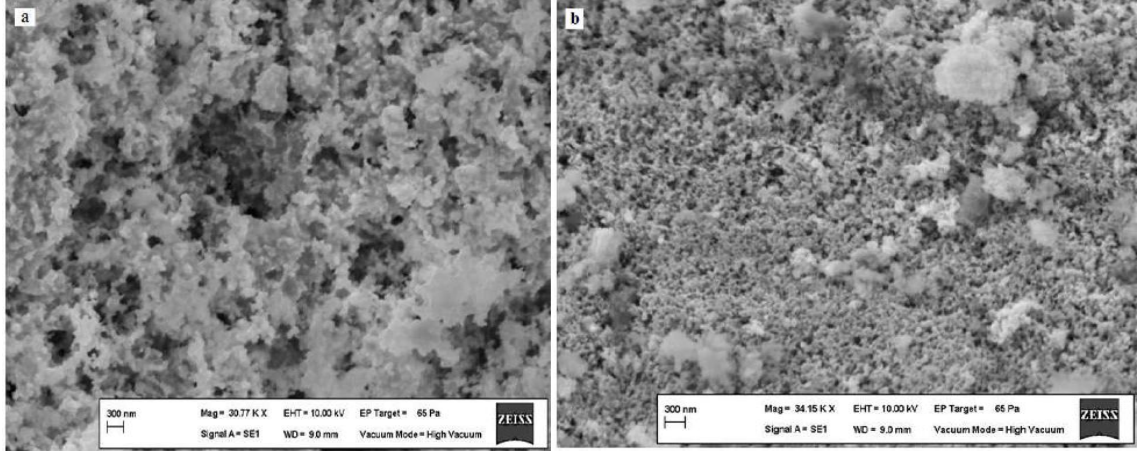
- Çalışmada öncelikle normal yöntemlerle ve argon gazı ortamında $Ni(0)$ katalizörü indirgenmiş olup aynı gaz ortamında ve $T=120^{\circ}C$ 'de kurutulmuştur. Daha sonra toz şeklinde elde edilmiş olan bu katalizör maddesi 1.5 Ton'luk pres yardımıyla DBB sisteminin elektrot boyutlarına uygun olacak şekilde preslenerek, $r =15\text{ mm}$ yarıçapında ve $d =1\text{ mm}$ kalınlığındaki disk şekline getirilmiştir.
- Hazırlanan bu madde daha sonra Şekil 2.14'te verilmiş olan vakumlanabilir özellikteki reaktörde bulunan elektrot sistemi arasına yerleştirilir. Bu reaktör vakumlandıktan sonra, elektrot sistemine belirli sürelerle, farklı gerilimlerdeki plazma uygulanmış olup katalizör verimliliği için en uygun koşullar belirlenmiştir.

Şekil 2.14'te verilen grafiğe göre DBB plazmaya tabi tutulmuş olan $Ni(0)$ katalizörünün normal ortam koşullarında üretilen katalizöre göre daha etkin olduğu sonucuna varılmıştır. Grafikten de görüldüğü gibi DBB plazmaya tabi tutulmuş olan katalizör, reaksiyondaki hidrojen gazı üretimini yaklaşık olarak $t=45\text{ dk}$ süresinde tamamlarken; normal metotla üretilen katalizör, bu işlemi yaklaşık olarak $t=70\text{ dk}$ 'da tamamlamaktadır [52].



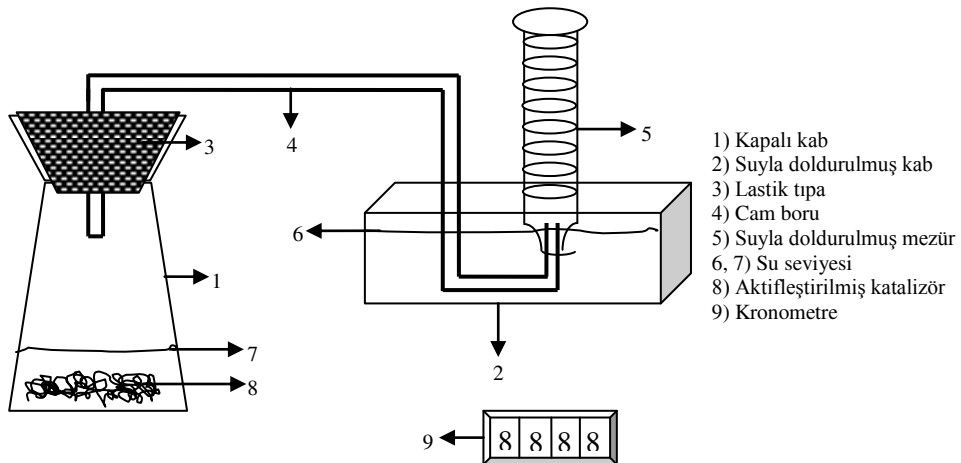
Şekil 2.14. DBB plazma etkisiyle üretilen $Ni(0)$ katalizörünün, $NaBH_4$ çözeltisinden hidrojen üretimi üzerindeki etkisi [52]

$Ni(O)$ katalizörünün normal metotla üretilmiş örnekleri ve DBB bombardımanına tutulmuş örneklerinin *SEM* görüntüleri Şekil 2.15'te verilmiştir. Şekil 2.15a'da normal metotla üretilmiş katalizörün yüzey görüntüsü verilmiştir. Şekil 2.15b'de ise pres yardımıyla sıkıştırılıp plazma bombardımanına tabi tutulmuş olan $Ni(O)$ katalizörünün, önemli derecede artmış olan yüzey görüntüsü verilmiştir [52].



Şekil 2.15. $Ni(O)$ katalizörü için a) Normal metotla elde edilen katalizörün *SEM* görüntüsü b) DBB etkisiyle üretilen katalizörün *SEM* görüntüsü [52]

Deneylerde üretilen hidrojen gazını ölçmek için Şekil 2.16'da verilen sistemden yararlanılmıştır. Sistemde bulunan 1 numaralı kaptaki $NaBH_4$ çözeltisine belirli miktarda (3-5 gr.) katalizör maddesi eklenerek reaksiyon başlatılır. Reaksiyon süresince üretilen hidrojen gazı, kapalı bir sistem yardımıyla hacmi belli olan su dolu bir mezüre aktarılır. Üretilen gazın miktarına bağlı olarak her durumda mezür içerisindeki azalmakta olan su miktarı okunarak üretilen hidrojen gazının hacmi belirlenir [52].



Şekil 2.16. DBB katalizör deneylerinde kullanılan hidrojen gazı ölçüm sistemi [52]

2.6.6. DBB'nin Diğer Uygulamaları

DBB'nin son yıllarda NO_x ve SO_x gazlarının filtrelenmesi, organik bileşiklerin eliminasyonu, kirli sıvı ve katı atıkların temizlenmesi amacıyla kullanılması bilim adamlarının büyük dikkatini çekmektedir [53]. Ayrıca bu metotla formaldehid temizlenmesi, pestisitler ve sinir gazlarının temizlenmesi işlemleri de yapılmaktadır [54]. Bu uygulamalarda DBB plazmasındaki iyon ve radikaller, etkin bir davranış göstererek kirlilik konsantrasyonunu azaltırlar. Çoğu durumlarda O , H , N ile ıslak havadaki H_2O ve OH radikalleri kimyasal reaksiyonlarda hızlı bir etki gösterirler ve oldukça seçicidirler. Ayrıca Ref. [55]'te H_2S 'in DBB yöntemiyle ayrıştırılmasının mekanizması incelenmiştir. Buradaki çalışmada DBB, $T=560$ °C'lik yüksek bir sıcaklıkta kullanılarak, buhar veya sıvı haldeki sülfür ayrıştırılır. H_2S bileşiği birçok doğal gaz kaynağında bulunur ve enerji verimliliği açısından bu gazlardan ayrıştırılması önemli bir avantaj sağlar. Bu işlem sırasında kullanılan gaz hacmi çok büyük olup bu miktar pratik uygulamada oldukça önemlidir. Eğer H_2S bileşiği küçük bir enerji harcanarak S ve H_2 şeklinde ayrıştırılabilirse gelecekte enerji kaynağı olabilecek çok değerli ürünler elde edilebilir [56].

DBB'nin önemli uygulama alanlarında biri de boşalmanın yüzey aktivasyonunda kullanılmasıdır. Bu tür boşalmalar ince polimerik malzemelerin yüzey modifikasyonunda ve yüzey parlatma işlemlerinde genişçe kullanılmaktadırlar. Buna karşılık nonhomojen DBB, iyon bombardımanı proseslerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir [57].

DBB'nin diğer bir uygulama alanı da CO_2 lazerleridir. Bu lazerlerde geniş aralık ve geniş boyutlu soğutucu bariyer sistemine sahip elektrot sistemi kullanılır. Gaz karışımı olarak (CO_2 , CO , N_2 , He) gazları kullanılır ve en düşük basınç değerleri $p=6$ kPa civarındadır. Genel uygulamalarda $P=5-10$ kW güçlerinde imal edilirler ve bu güçlü lazerler, kaynak ve metal kesme işlemlerinde kullanılırlar [58].

Kimya alanında çeşitli türlerde katalizör üretimi, bazı metanol bileşiklerinin ayrıştırılması, biyodizel üretimi ve endüstriyel yağların temizlenmesi gibi işlemlerin yanı sıra, normal şartlarda gerçekleştirilemeyen bazı kimyasal reaksiyonlar da günümüzde DBB yöntemi kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir [59].

3. MATERYAL ve YÖNTEM

3.1. Materyal

Bariyer boşalması genel olarak, akımın geçiş yolunu sağlayan elektrotların arasına en az bir katı dielektrik malzemenin (*poliimid, cam, kuars, seramik vb.*) yerleştirilip bariyer olarak kullanılması ile oluşan dengesiz bir gaz boşalması olarak bilinir. Boşalma mekanizmasının daha iyi incelenebilmesi için elektrot sisteminin bulunduğu ortama genellikle bir gaz ilave edilir. İlave edilen gazın türü ve özelliği, boşalmanın kararlılığı ve gelişimi açısından önemlidir. Konuyla ilgili yapılan çalışmalara göre, bariyer boşalması mekanizmasının hava veya azot gazı ortamlarında incelenmesinin, diğer gaz ortamlarına nazaran daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Azot ortamında gerçekleştirilen homojen bariyer boşalmaları çoğu zaman Atmosferik Basıncılı Townsend Boşalması olarak da adlandırılırlar. Boşalma geriliminin basınca göre değişimini karakterize eden Paschen eğrisine göre ortamdaki gazın basıncı, boşalmanın tutuşma ve sönümlenme gerilimleri açısından büyük öneme sahiptir. Yapılan deneysel çalışmalara göre, boşalma aralığındaki gazın basıncında meydana gelen herhangi bir değişim, boşalma akımında ve geriliminde de belirli bir değişime neden olur. Paschen eğrisi de bu olayı doğrulamaktadır. DBB'nin yüzey modifikasyonunda kullanılması durumunda ise boşalmanın homojenliği oldukça önemlidir. Boşalmanın homojenliğini veya non-homojenliğini belirleyen ve elektrot yüzeylerine yakın mesafelerdeki lokal yük yoğunluklarının oluşmasına bir çok neden sayılabilir. Fakat elektrot sistemi ve elektrot yüzeylerini kaplayan bariyer malzemesinin kimyasal, fiziksel ve elektriksel özelliklerinin bilinmesi, boşalmanın homojenliği açısından büyük öneme sahiptir.

3.1.1. Deneysel Çalışmada Kullanılan Hava ve Azot Gazlarının Özellikleri

3.1.1.1. Hava

Genel anlamda dünyayı saran hava tabakası, yaşam için gerekli kimyasal maddelerin temel kaynağını oluşturur. Hava homojen bir gaz karışımıdır ve moleküler bir yapıya sahiptir. Havada bulunan gazların yüzde oranları Tablo 3.1'de gösterilmiştir. Havada en bol olarak bulunan azot gazı, tepkimelere karşı ilgisiz bir gaz olarak davranır. Yaklaşık % 21 oranında bulunan oksijen gazı ise iyi bir yükseltgendir. Tabiattaki yanma olaylarının tümü oksijen gazı ortamında gerçekleşir [60].

Tablo 3.1. Havada bulunan kimyasal gazlar ve yüzde oranları [60]

HAVADA BULUNAN KİMYASAL GAZLAR ve YÜZDE (%) ORANLARI		
N ₂		78.084
O ₂		20.946
Ar		0.934
CO ₂		0.035
Diğer Soygazlar		0,002428
CH ₄		0,00015
H ₂		0,00005
NO		0,0000251
CO		0,00001
O ₃		0,000002
SO ₂		0,00000002

Elektrik gaz boşalmalarının çoğu farklı basınç değerlerindeki hava ortamında gerçekleşir. Hava ortamında meydana gelen boşalma sırasında oksijen molekülleri kendi aralarında reaksiyona girerek ozon (O_3) gazını meydana getirirler. Elektrik gaz boşalmalarının hava ortamında gerçekleşmesi durumunda, katottan kopan elektronlar anoda doğru yol alırken hava molekülleriyle çarpışarak ilerlerler. Başlangıçtan ilk çarpışmanın gerçekleşmesine kadar aldıkları yola serbest yol denir ve bu yol, havanın düşük basınç değerlerinde uzun, yüksek basınç değerlerinde ise çok kısadır.

Havanın sabit bileşenlerini oluşturan gazların mol ağırlığı, kaynama noktası, erime noktası, kritik sıcaklık ve kritik basınç gibi özellikleri ise Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.2. Havanın sabit bileşenlerinin özellikleri [60]

GAZ	MOL AĞIRLIĞI	KAYNAMA NOKTASI (°C)	ERİME NOKTASI (°C)	KRİTİK SICAKLIK (°C)	KRİTİK BASINÇ (ATM)
Azot	28,0	-195,80	-210,0	-146,95	33,5
Oksijen	32,0	-182,97	-218,8	-118,38	50,14
Argon	39,9	-185,86	-189,4	-122,29	48,34
Neon	20,2	-245,9	-248,6	-228,7	26,9
Helyum	4,0	-268,93	-	-267,37	2,27
Kripton	83,7	-153,40	-157,7	-63,8	54,2
Ksenon	131,3	-108,12	-111,8	16,6	57,8
Hidrojen	2,0	-252,77	-259,2	-239,97	12,98
CO ₂	44,0	-----	- - - - -	31,04	72,85

3.1.1.2. Azot

Azot doğada serbest halde ve bileşikleri halinde bulunarak doğanın % $4,6 \times 10^{-3}$ ' ünü oluşturur. Atmosferin hacimce % 78'i, ağırlıkça ise %75'i azottur. Yeryüzünde sodyum nitrat ($NaNO_3$) ve potasyumnitrat (KNO_3) gibi bileşikleri halinde bulunur. Ayrıca bitki ve hayvan bünyelerinde proteinler halinde bulunur. Azot endüstride havadan elde edilir. Bunun için iki değişik yöntem uygulanır. Birinci yöntemde hava basınç altında sıvılaştırılır. Daha sonra ayırmsal damıtma yöntemiyle oksijenden ayrılır. Azotun kaynama noktası ($-195,8\text{ }^{\circ}\text{C}$) oksijeninkinden ($-183\text{ }^{\circ}\text{C}$) daha düşük olduğundan dolayı önce azot buharlaşır. Ancak bu azot çok saf değildir; içinde bir miktar oksijen ve soygazlar bulunur. İkinci yöntemde ise hava yüksek sıcaklıkta fosfor veya aktif metaller üzerinden geçirilerek oksijenden ayrıştırılır. Bu yöntemle elde edilen azot içinde argon başta olmak üzere %1 kadar soygaz bulunur. Çok saf azot ise bazı azot bileşiklerinin ısıtılarak bozulmasıyla elde edilir. Azot normal koşullarda renksiz, kokusuz ve tatsız bir gazdır. Havadan biraz daha az yoğundur. Normal koşullarda 100 litre suda 1,5 litre azot çözünür. Azot elemental olarak tepkimelere fazla girmez. Azotun elektronegatifliği çok büyük olduğu için (Sadece flor ve oksijenin elektronegatifliği azotunkinden büyüktür.) normal olarak çok aktif olması beklenir. Tepkimelere ilgisizliğinin nedeni ise 2 azot atomunun 3 kovalent bağ oluşturarak 2 atomlu moleküller yapmasıdır. Azot gazının fiziksel özellikleri ise Tablo 3.3'te verilmiştir [60].

Tablo 3.3. Azot gazının fiziksel özellikleri [60]

FİZİKSEL ÖZELLİKLER	N ₂
Atom numarası	7
Atomik kütle	14.00
Erime noktası (°C)	-209,86
Kaynama noktası (°C)	-195,8
Öz kütle (0 °C, 1 atm' de g/L)	1.25
Renk	Renksiz (gaz)
Elektron düzeni	[He], 2s ² , 2p ³
Atom yarıçapı (Å)	0.70
Standart indirgenme	0.96
Potansiyeli (volt)	NO ₃ , H ⁺ /NO
Yükseltgenme basamağı	-3, +3, +5
Bulunuşu (Dünya'da %'si yer kabuğu, denizler, atm.)	0.03

Genel olarak, elektrik gaz boşalmalarının gerçekleşmesi sırasında, ortamda bulunan gazın özelliklerinin büyük öneme sahip oldukları bilinir. Boşalma ortamındaki gazın elektronegatifliği ve kararlılığı, boşalmanın gelişimini önemli ölçüde etkiler. Kontrolsüz olarak meydana gelen elektrik gaz boşalmalarının çoğu atmosferik ortamlarda gerçekleşir. Bu nedenle havada yaklaşık olarak % 78 oranında bulunan azot gazı ortamında gerçekleşen boşalma parametrelerinin belirlenmesi, boşalma mekanizmalarının analizi için büyük öneme sahiptir. Genelde dış faktörlerin etkisiyle bir gaz ortamında gerçekleşen kanal boşalmasının dinamiğini karakterize eden matematiksel modeller, *difüze-drift* veya hidrodinamik akış tabanlı modellerdir. *Difüze-drift* yaklaşımı belirlendiğinde, ortamda bulunan parçacıkların her biri için ayrı ayrı hidrodinamik kütle denge denklemleri elde edilir. Bu denklemlerde parçacıkların drift (sürüklenme), difüzyon, birleşme ve dağılımları da hesaba katılır [61, 62].

Kanal boşalmasında oluşan yüklü parçacık yoğunluğunun uzaysal dağılımını belirlemek için ve boşalma sırasındaki dielektrik bariyer yüzeyinin yüklenme dinamiğinin hesaplanması için boşalma kanalı geometrisinin en az iki boyutunun tanımlanması gerekir. Genelde kütle dengesi ve süreklilik denklemleri, gaz ortamındaki yüklü parçacık türlerinin oluşumunu ve taşınmasını ifade etmek için yeterlidir. Bu denklemleri çözmek için, her bir zaman periyodu için Poisson denkleminin bir çözümü gereklidir. Bunun nedeni ise, modeldeki bütün kinetik olayların yerel elektrik alan kuvvetine bağımlı olmasıdır [62].

3.1.2. Poliimid Bariyer Tabakalar

Endüstriyel uygulamalarda geniş kullanım alanına sahip polimerlerden biri de poliimidlerdir. Bu tez çalışmasında incelenen bariyer boşalması mekanizmasında bariyer tabaka olarak Poliimid film tabakalar kullanılmıştır. Poliimid malzemeler yüksek termal kararlılık, yüksek elektriksel ve mekanik dayanım, düşük iletkenlik ve permitivite, çeşitli kimyasallara ve korozyona karşı yüksek direnç gibi sıra dışı özellikleri nedeniyle yüksek performanslı polimerler sınıfındadır. Poliimidler günümüzde gelişmiş lojik yongalarda yüksek sinyal iletim hızı nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedirler [63].

Mikroelektronikte kullanılan poliimidler bazı durumlarda uygulama alanlarına göre yüzey modifikasyonuna tabi tutulduktan sonra da kullanılabilirler. Poliimidler dalga kılavuzu olarak çeşitli *opto-elektronik* uygulamalarda da sıklıkla kullanılmaktadır. Yapılan bilimsel çalışmalarda poliimid, çeşitli malzemelerle katkılanarak optik kayıpların çok daha düşük değerlere çekilmesi sağlanmıştır [64].

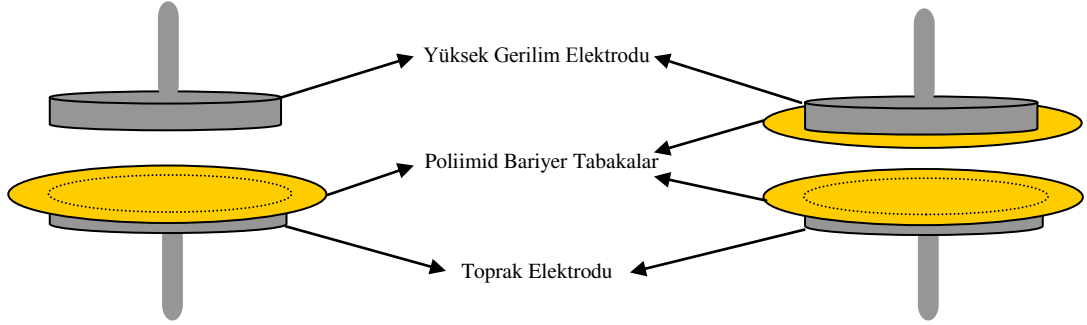
Son yıllarda klasik *Langmuir-Blodgett* yöntemiyle üretilen tek ve çok katmanlı ince poliimid filmler elektronik uygulamalarda *foto-diyot* olarak, tünel bariyeri olarak ve *moleküler-elektronik* aletlerde hafıza elemanı olarak sıklıkla kullanılmaktadırlar [65].

Poliimidler kendine özgü geçirgenlikleri nedeniyle gaz ayrıştırma tesislerinde membran olarak [66]; yalıtkanlık özelliklerinin neme karşı hassas olması ve gözenekli yapıları nedeniyle nem sensörü olarak [67]; uzay ve havacılık uygulamalarında zor çalışma koşullarına uyumlulukları nedeniyle elektriksel ve termal yalıtım malzemesi olarak [68]; elektrik makinelerinde stator ve rotor sargılarında kenar noktalara denk gelen bölgelerde stres sonucu meydana gelen kısmi boşalmaları önleyici yalıtım malzemesi olarak [69] ve sensörler, aktuatörler gibi pek çok mikro ölçekli yapıyı içeren *mikro-elektromekanik* sistemlerde (*MEMS*) farklı amaçlara yönelik olarak sıklıkla kullanılmaktadırlar [70]. Poliimidlerin farklı özelliklerde ve çeşitli şekillerde üretilmeleri, bu malzemelerin farklı alanlarda yaygın olarak kullanılmalarına yol açmıştır [71].

Endüstriyel uygulamalarda en çok karşılaşılan problemlerden biri, talep edilen polimerik dielektrik malzemenin kullanım alanına göre belirli özellikleriyle istenilen verimi sağlamasına rağmen bazı özellikleri yüzünden aynı uygulama alanı için dezavantaj oluşturmalarıdır. Böyle durumlarda gerekli görüldüğü takdirde malzemeye çeşitli fiziksel veya kimyasal modifikasyonlar uygulanarak, malzeme istenilen özelliklere uygun bir hale dönüştürülebilir. Bu tip modifikasyonları gerçekleştirmek amacıyla termal buharlaşma, saçılma, elektriksel boşalma ve plazma etkisi gibi çeşitli fiziksel ve kimyasal modifikasyon yöntemleri kullanılır [72–79].

Şekil 3.1’de bu tez kapsamındaki deneysel çalışmalarda kullanılan poliimid tabakaların görüntüleri verilmiştir. 12.7 mikrometre (μm) kalınlığında ve *DuPont* firmasından temin edilen poliimid (*PMDA-ODA*) örnekler, dairesel olarak kesilerek

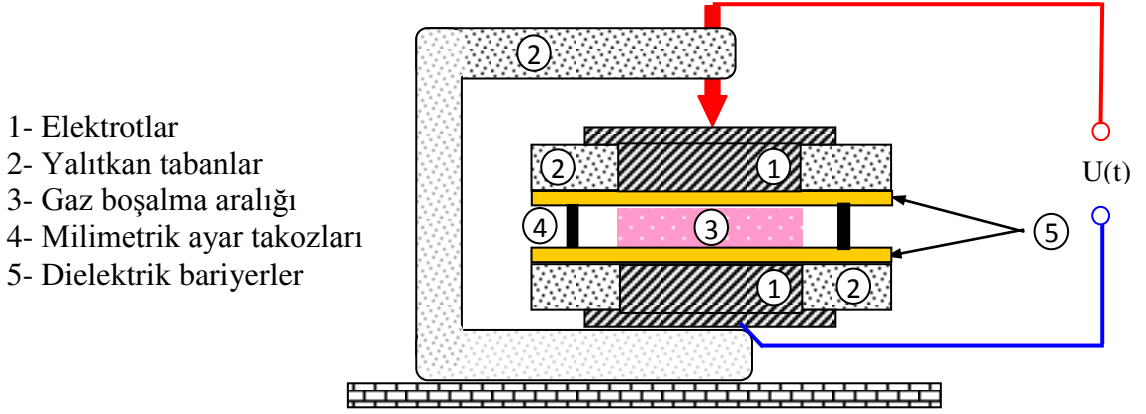
elektrotlar arasında bariyer olarak kullanılmışlardır. Şekil 3.1a'da hazırlanan tek tabakalı bariyer görüntüsü, Şekil 3.1b'de ise çift tabakalı bariyer görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.1. a) Tek tabaka poliimid bariyer b) Çift tabaka poliimid bariyer görüntüsü

3.1.3. DBB Elektrot Sistemi

Tez çalışmamızın bu kısmında deney düzeneğinde kullanılan elektrot sistemi ele alınmıştır. Dielektrikle sınırlanmış gaz aralığında gerçekleşen bariyer boşalmasının incelenmesi şematik olarak Şekil 3.2'de verilen elektrot sistemi kullanılarak yapılmıştır. Boşalma devresi $d=500 \mu m$ aralıklı iki metal elektrottan oluşmaktadır. Bu elektrotlar yüksek saflıktaki demir tabaka şeklinde olup hassas torna makinelerinde özel olarak imal edilmişlerdir. Elektrotlar geometrik olarak $25 mm$ çapında ve $5 mm$ kalınlığındaki disk şeklinde imal edilmişlerdir (Şekil 3.2-1). Elektrik alanının kararlı ve düzgün bir şekilde dağılımını sağlamak için bu elektrotların yüzeyleri iyice parlatılarak pürüzsüz hale getirilmiştir. Bu işlem için, sıfır numara zımpara kâğıdı ve otomotiv sanayisinde kullanılan ince kumlu subap macunu kullanılmıştır. Parlatılmış elektrot yüzeyleri ise $12.7 \mu m$ kalınlığında ve dairesel olarak kesilmiş olan poliimid bariyer tabakalarla kaplanmıştır. Elektrotların dış kısımları ise boşalma sırasında oluşabilecek muhtemel gerilim atlamalarına karşı yalıtkan *plexiglas* malzemeyle kaplanmıştır (Şekil 3.2-2). Elektrotların arası, yüksek yoğunluklu yalıtkan *PVC* malzemeden imal edilmiş hassas ayar takozları (Şekil 3.2-4) kullanılarak $d=500 \mu m$ aralıklı sınırlandırılmıştır. Boşalma olayı, içerisi belirli bir gazla dolu olan ve bir silindir geometrisi şeklindeki bu aralıkta gerçekleşir (Şekil 3.2-3). Elektrot yüzeyleri ise dairesel olarak kesilmiş olan dielektrik bariyer tabakalarla, boşluksuz olarak kaplanmıştır (Şekil 3.2-5). Bariyer tabakaların elektrot yüzeylerine boşluksuz olarak yapışmalarını sağlamak için, elektrot yüzeyleri ve bariyer tabakalar arası ince bir yağ tabakası ile kaplanmıştır. Kullanılan bu yağ, boşalma parametrelerini etkilemeyecek özelliğe sahiptir.



Şekil 3.2. DBB deneyinde kullanılan elektrot sisteminin yapısı

3.1.4. DBB Deney Sistemi

Tez çalışması için bariyer boşalmasının incelendiği deney sisteminin genel görüntüsü Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Sistem, elektrik gaz boşalmalarının incelenmesi için özel olarak hazırlanmış olup 0–15 kV ile 0–34.5 kV, 50 Hz. AC gerilim ve 0–10 kV DC gerilim verebilen üç adet gerilim kaynağını içermektedir. Gerilim kaynakları birbirleriyle bağımsız olarak sisteme bağlanabilecek ve belirtilen aralıklarda ayarlanabilen gerilim verebilecek şekilde düzenlenmiştir. Deney sırasında kV mertebesindeki yüksek gerilim değerlerinde de çalışıldığı için sisteme uygun özel bir topraklama ve koruma sistemi kurulmuştur. Yüksek gerilim atlamalarına karşı, çalışma alanının zemini ise 10 mm kalınlığındaki yalıtkan halı ile döşenmiştir. Bağlantı iletkenlerinde ise her türlü kıvılcım atlamasına dayanıklı olan özel başlıklar kullanılarak yüksek gerilim atlamalarına karşı maksimum koruma sağlanmıştır. Boşalmanın incelenmesi sırasında devre üzerindeki direnç ve kapasite değerleri ayarlanarak gerekli en uygun parametreler belirlenmiştir. Akım osilasyonlarının kararlı durumlarında sistem için ideal direnç değeri $R_v=50 \text{ k}\Omega$ ve kondansatör değeri ise $C_v=0.033 \text{ }\mu\text{F}$ olarak belirlenmiştir. Genel olarak bu değerler esas alınarak gerekli ölçüm ve analizler yapılmıştır. Deney sisteminin önemli bir parçası olan elektrot sisteminin yapısı ve boyutlanması, boşalmanın çeşidi ve homojenliği açısından büyük önem taşır. Deneysel parametrelerin elde edilmesi ve bazı ölçümlerin kararlı olarak elde edilebilmesi için elektrot sisteminin saf malzemeden yapılmış olması ve elektrot yüzeylerinin pürüzsüz olması önemli bir koşuldur. Bu nedenle bariyer boşalmasının bazı mikroskopik parametrelerinin belirlenebilmesi ve kararsız akım osilasyonlarının hassas olarak ölçülebilmesi için elektrotlar, deney sistemimizin koşullarına uygun olarak 25 mm

apındaki disk şeklinde imal edilmiş olup yüzeyleri olabildiğince parlatılmıtır. Daha sonra bu elektrot yüzeylerine dielektrik bariyer tabakası olan ve dairesel olarak kesilmiş ince ($12.7 \mu\text{m}$ kalınlığında) poliimid tabakalar, boşluksuz olarak yerleştirilmiştir.

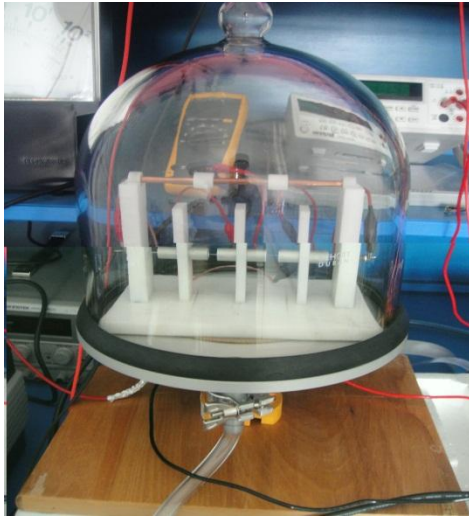


Şekil 3.3. DBB mekanizmasını incelediğimiz deney sisteminin genel görünümü

Elektrotlar arasındaki gaz (boşalma) aralığının uzunluğ, $d=500 \mu\text{m}$ kalınlığındaki ince ayar takozları kullanılarak sabitlenmiştir. Bu takozların montaj yerleri tamamen elektrot yüzeylerinin dışında olup boşalma aralığına herhangi bir fiziksel engel teşkil etmemektedirler. Elektrot yüzeylerinin dışındaki kısımlar ise boşalmanın elektrot aralığının dış kısmında tutumasını önlemek amacıyla *pleksiglas* malzemeden yapılmış

kılıflarla izole edilmiştir. Deneysel çalışmalar ortam sıcaklığında (ortalama 27°C) yapılmıştır. Sistemde iki tip voltmetre kullanılmıştır. 0–1000 Volt arası (düşük) gerilimlerde, daha hassas sonuçlar verebilen Fluke 111 (0–1000 V) dijital tip AVO metre kullanılmıştır. 1 kV ve daha yukarı değerdeki (yüksek) gerilimlerde ise 0–25 kV arası ölçüm yapabilen analog tip (OGSM 64: 0–25000 V) kilovoltmetre kullanılmıştır. Deneysel verilerin görüntüleri ise Gwinstek GOS 652 G tip analog osiloskop ve Tektronix TDS 1002, 60 MHz dijital tip hafızalı osiloskop yardımıyla elde edilmiştir. Sistemdeki vakum değerleri ise PHYWE (10^{-3} – 10^3 hPa) dijital tip hassas vakumölçer yardımıyla ölçülmüştür. Gaz-Vakum sistemi ise iğne uçlu hassas vanalar yardımıyla, ortama bağımsız olarak hava veya azot gazı verebilecek şekilde düzenlenmiştir.

Elektrot sistemini istenilen vakum değerlerinde çalıştırmak için Şekil 3.4'te gösterilen vakumlanabilir tüpler kullanılmıştır. Şekil 3.4a'da gösterilen cam tüp geniş hacimli olup yüksek vakum değerlerine dayanabilecek tiptedir. Şekil 3.4b'de gösterilen tüp ise daha küçük hacimli olup plexiglas malzemeden üretilmiştir.



a) Cam tüp

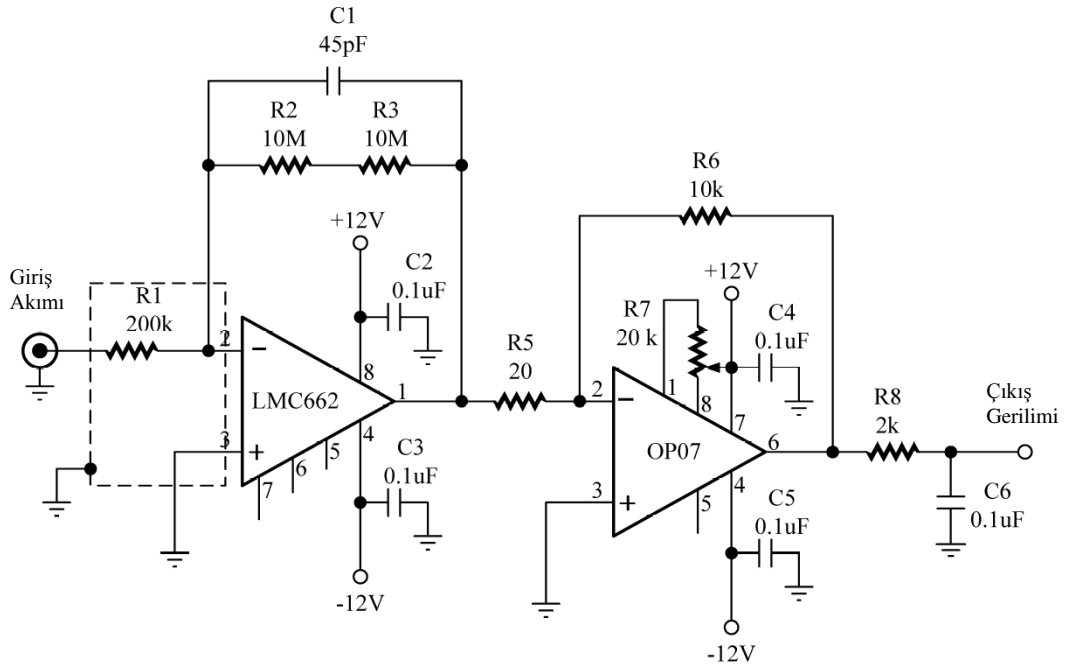


b) Plexiglas tüp

Şekil 3.4. DBB deney sisteminde kullanılan vakumlanabilir boşalma tüpleri

Bariyer boşalmasının akım değerleri çok küçük olduğu için direk olarak ölçülmesi zordur. Bu nedenle boşalma akımının çok küçük değerlerinin hassas olarak ölçülebilmesi için Şekil 3.5'te verilmiş elektronik yükselteç devresi hazırlanmıştır. Hazırlanan yükselteç devre 1 pikoamper (pA) ile 1 nanoamper (nA) aralığındaki akım değerlerini ölçebilecek özelliğindedir. Devre aynı zamanda bir Akım/Gerilim dönüştürücü özelliğinde olup temelde bir dirençten geçen akımın o direnç üzerinde oluşturduğu

gerilim düşümünün ölçülmesi prensibiyle çalışmaktadır. Devre temelde iki adet negatif geri beslemeli seri (kaskad) bağlı yükselteçten oluşmuştur ve *Giriş/Çıkış* kısadevre korumalı özelliğe sahiptir. Beslemesi $\pm 12\text{ V DC}$ ve 100 mA çıkış verebilen bir güç kaynağıyla sağlanmaktadır. C_1 geribesleme kondansatörü ve RC alçak geçiren filtre özelliği sayesinde, çıkışta oluşabilecek yüksek frekanslı elektriksel gürültüleri azaltıcı özelliğe sahiptir. Devrede çok küçük akımları ölçebilecek hassasiyete sahip *LMC 662* tip monolitik OPAMP kullanılmıştır. Bu OPAMP'ın temel özelliği, girişte maksimum 2 femtoamper (fA) gibi çok küçük bir besleme akımı ve $1.3\text{ }\mu\text{V}^\circ\text{C}$ hassasiyetinde ayarlanabilir *offset* gerilimine sahip olmasıdır. Devrenin girişine uygulanan her bir pA akım değerine karşılık çıkışta 10 mV değerinde bir gerilim sinyali üretilir. Devrenin sinyal *Giriş-Çıkış* terminalleri ise dış ortamdaki elektriksel gürültülere karşı korunmuş özel başlıklı koaksiyel kablolar yardımıyla sağlanmıştır [80].



Şekil 3.5. DBB deneylerindeki küçük akımları ölçmek için hazırlanmış olan yükseltici devre şeması [80]

3.1.5. Deneyisel Çalışmada Kullanılan Araç-Gereçler

Elektrik gaz boşalmalarının incelendiği laboratuvarındaki deney sisteminin içerdiği temel elemanlar şunlardır: Ayarlanabilen AC gerilim kaynağı ($0\text{--}33\text{ kV}$), filtre elemanı, R_p direnci ($50\text{ k}\Omega$), RD_1 direnci ($60\text{ M}\Omega$), RD_2 direnci ($1\text{ M}\Omega$), ayarlanabilen direnç

kutusu (0–10 $M\Omega$), ayarlanabilen kondansatör kutusu (1000 pF –1 μF), V_1 voltmetre (OGSM 64: 0–25000 V), V_2 voltmetre (Fluke 111 0–1000 V), osiloskoplar (Gwinstek GOS 652 G tip analog osiloskop ve Tektronix TDS 1002, 60 MHz. tip dijital osiloskop), yüksek hassasiyetli amplifikatör devre ve yüksek frekanslı AC akım probu CT6), vakum pompası (RZ 8 / 8,6 m^3/h – 4×10^{-4}), vakum tüpleri (Cam ve plexiglas tüp), azot gazı tüpü, silikon vakum hortumları, yüksek gerilim sistemine uygun özel başlıklı iletkenler ve gerilim atlamalarına karşı kullanılan yalıtkan (kauçuk) halı.

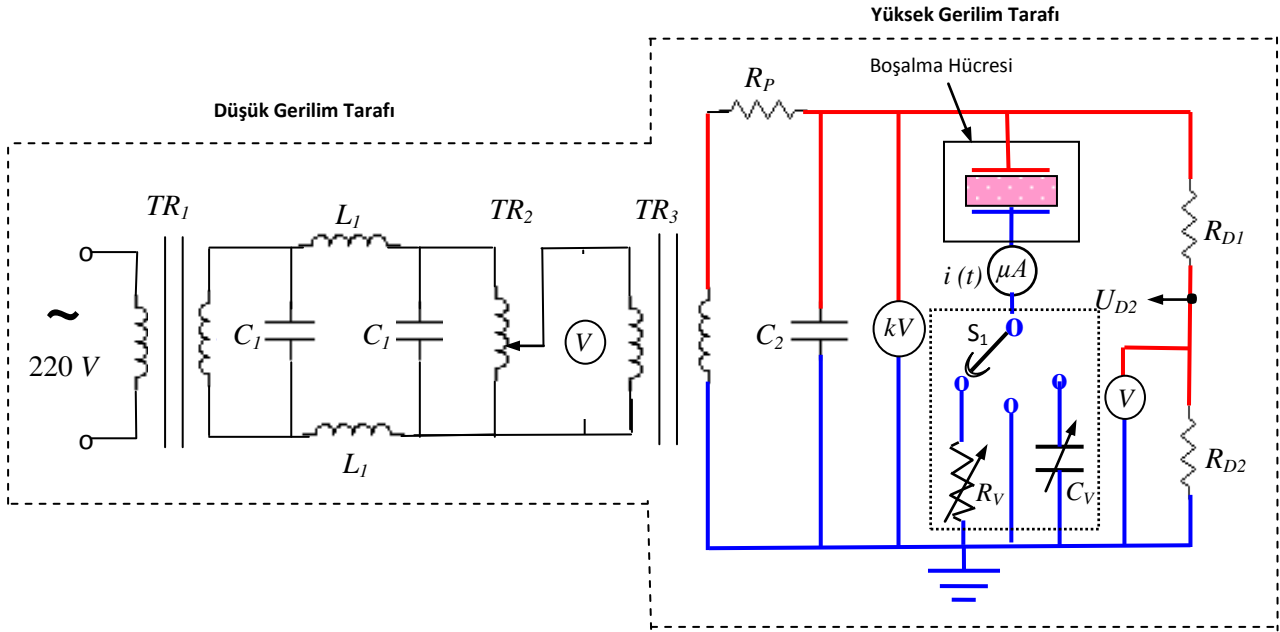
3.2. Yöntem

Bariyer boşalması mekanizmasının incelenmesi ve analizi için gerekli olan materyal ve fiziksel koşulların sağlanmasının yanısıra uygulanan yöntem de oldukça önemlidir. Konuyla ilgili literatürde daha önce yapılmış bazı temel çalışmalar incelendiğinde; DBB mekanizmasının daha iyi açıklanabilmesi için Gibalov ve ekibi mikroboşalmaların zamansal ve noktasal gelişimleri, boşalma akımı, akım yoğunluğu ve enerji dağılımını esas alarak bazı modellemeler yapmışlardır [81]. Sjöberg ve ekibi de boşalma ara işlemlerini inceleyerek yüzeyde yük oluşumu ile ilgili fiziksel bir model oluşturup akışkan denklemlerini kullanmayı esas alan bir yöntem izlemişlerdir. Fakat fiziksel model birçok gaz iyonizasyon işlemleri ve karmaşık hesaplamalar içerdiğinden dolayı, oldukça karmaşık bir yapıdadır. Buna karşılık elektriksel modellemeler, daha basit ve daha doğru sonuçlar vermektedirler [82]. Naude ve ekibi ise, ardarda bağlanmış iki zener diyot modelini oluşturup *PSpice* yazılımı yardımıyla atmosferik Townsend boşalmasının Flama boşalmasına geçişini esas alan benzetim yoluyla DBB'yi modellemeye çalışmışlardır [83]. Teschje ve ekibi ise boşalmanın karakteristiklerini belirlemek amacıyla bir *ON-OFF* gerilim kontrollü anahtarlama eşdeğer modelini esas alıp *PSpice* programı yardımıyla benzetim yapmışlardır [84]. Chen ve Liu ekipleri de benzer şekilde *PSpice* yazılımını kullanarak dış gerilim ve akımın pozitif ve negatif alternaslardaki değişimlerini inceleme yöntemini kullanarak DBB karakteristiklerini incelemişlerdir [85]. Valdivia-Barrientos ve ekibi tarafından geliştirilen modelde ise, silindirik yapıda gelişen DBB'nin 10 kHz ile 125 kHz frekans aralığındaki dinamik modeli incelenmiştir. Bu modelde *SIMULINK* yazılımı kullanılarak boşalma aralığının gerilimi ve frekansı ile boşalma reaktörünün boyutları arasındaki bağıntıların bulunması amaçlanmıştır [86]. Yapılan tüm bu çalışmalarda kullanılan farklı yaklaşımlara rağmen bariyer boşalmasının parametrelerine ilişkin sistematik sonuçlar henüz yeterince

açıklığa kavuşturulamamıştır. Dolayısıyla konuyla ilgili araştırmalar ve çalışmalar yoğun bir şekilde sürdürülmektedir. DBB ile ilgili günümüze kadar kullanılan yöntemler ve geliştirilen mevcut modellerden farklı olarak bu tez çalışması kapsamında kullanılan yöntem ve geliştirilen modelin temeli, boşalma kanalının dinamik iletkenliğinin hesaba katılması esasına dayanır. Önerilen yöntemin temel mantığı, boşalma aralığının dinamik iletkenliğinin zamana bağlı değişiminden hareketle, boşalma akımı üzerinde meydana gelen kararsız akım osilasyonlarının davranışlarının incelenmesi ve bu akım kararsızlıklarının temel nedenlerinden yola çıkarak boşalma aralığının parametrelerini belirlemektir. Çalışma kapsamında geliştirilen bu modelle ilgili geniş bilgi, tez çalışmamızın 3.2.8 Kısımında verilmiştir.

3.2.1. DBB Deneyinin Kapsamı ve İçeriği

Gaz aralığındaki boşalmanın incelenmesi için deney düzeneğinin prensip şeması Şekil 3.6'da verilmiştir. Düzeneğin beslemesi 30 kV'a kadar gerilim verebilen TR_3 yüksek gerilim trafosu üzerinden sağlanır. TR_3 trafosunun çıkışındaki gerilimin yumuşak bir şekilde değişimini sağlamak amacıyla bu trafonun alçak gerilim girişi TR_2 varyakı üzerinden beslenir. Şemadaki TR_1 trafosu yalıtım trafosu olup, TR_3 yüksek gerilim trafosunun çıkışlarından birinin topraklanabilmesini sağlar. Şebeke geriliminin içerdiği yüksek harmoniklerin, devrenin yüksek gerilim kısmına geçmesini engellemek amacıyla TR_1 ve TR_2 trafoları arasına LC tipi filtre bağlanmıştır. Devredeki R_p direnci koruma direnci olup olası kısa devre durumlarına karşı TR_3 trafosunun çıkış sargısını korur. Deney hücresi vakumlanabilir cam tüpün içine yerleştirilir. Tüp içerisindeki basınç 1–100 hPa aralığında olup dijital tip vakum ölçer ve iğne uçlu hassas vanalar yardımıyla kontrol edilir. R_V direnci üzerindeki gerilim ise 60 MHz bant aralığına sahip Tektronix TDS-1002 dijital tip hafızalı osiloskop yardımıyla ölçülmüştür. Boşalma akımı, S_1 anahtarının uygun pozisyona getirilmesiyle ayarlanabilir direnç kutusu veya ayarlanabilir kondansatör kutusu üzerinden ya da mikroampermetre ile direk olarak ölçülebilir. Boşalmanın ortalama akım değeri ise Gwinstek GDM-8245 dijital tip çok fonksiyonlu ortalama değer avometresi yardımıyla ölçülmüştür. Devredeki kondansatör kutusu ise boşalmanın Gerilim-Yük karakteristiğini belirlemek amacıyla kullanılmıştır. Deney hücresi üzerindeki gerilim değeri V_1 voltmetresi (OGSM 64: 0–25000 V) yardımıyla ölçülmüştür. Şemadaki değişken C_V kapasitansı ise gerilim ve akım arasında oluşacak ek faz kaymasını kompanze etmek amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 3.6. AC dielektrik bariyer boşalmasının tipik devre şeması

DBB deney sisteminin elektrik devresi, akım ve gerilim eğrilerinin yanısıra $i=f(u)$ ve $q=f(u)$ bağıntılarının görüntülenmesini gerçekleştirebilecek şekilde tasarlanmıştır. Boşalmanın $i(t)$ ve $u(t)$ değişim eğrileri eşzamanlı olarak osiloskop yardımıyla görüntülenmiş olup, resimler hızlı çekim yapabilme özelliğine sahip olan Sony T90 dijital tip fotoğraf makinesi ile kayda alınmıştır. Ayrıca ölçülen $i(t)$ akımı çok küçük değerlerde (μA) olduğu için özel olarak hazırlanmış yüksek duyarlılıktaki bir kuvvetlendirici yükselteç devre yardımıyla ölçülmüştür.

DBB deney sistemi üzerinde yer alan S_1 anahtarı elle kumanda edilebilir özellikte olup ölçümlerin R_v direnci ya da C_v kondansatörü üzerinden alınmasına olanak sağlar. Ayrıca gerekli durumlarda boşalma hücresinin direk olarak topraklama elektroduna bağlanmasını sağlar. R_v direnci ve C_v kondansatörü ise ayarlanabilen direnç kutusu ve ayarlanabilen kondansatör kutusu üzerinden sisteme dışarıdan bağlanmışlardır.

Sistem üzerinde yer alan R_p direnci, deney sistemini besleyen yüksek gerilim trafosunu muhtemel kısa devre durumlarında aşırı akıma karşı korumak amacıyla devreye seri olarak bağlanmıştır. Direnç değeri ise yaklaşık olarak $53 k\Omega$ 'dur.

Sistemin girişine paralel olarak bağlanmış olan C_2 kondansatörü ise şebeke üzerinden gelebilecek herhangi bir gürültü sinyalinin filtrelenmesi için kullanılmıştır. Böylece sistem üzerinden alınan hassas ölçümler, dışarıdan gelebilecek elektriksel

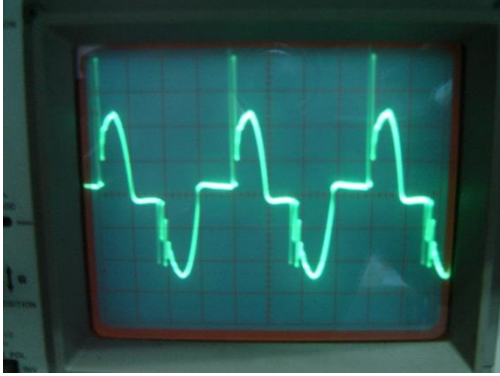
gürültülere karşı korunmuş olurlar. Genel olarak yapılan ölçümlerin hassasiyeti dikkate alınarak deney sisteminde iyi bir topraklama sistemi ve elektriksel gürültülere karşı ekranlama yapılmasına özen gösterilmiştir.

Dielektrik bariyer boşalmasının gerçekleştirildiği sistemde kullanılan materyal ve yöntem, parametrelerin hatasız olarak belirlenmesi açısından büyük önem arz eder. Sistemin önemli bir parçasını oluşturan yüksek gerilim trafosunun gücünün yeterli değerinde olması önemli bir gerekliliktir. Çünkü boşalmanın başlamasıyla birlikte oluşan plazmanın sürekli olabilmesi için kaynak akımının kararlı olması ve geniş bir değer aralığına sahip olması şarttır. Plazmanın gelişmesi sonucu zaman zaman oluşan arklar, kaynaktan daha fazla akımın çekilmesi anlamına gelir. Bu akımlar kısa süreli osilasyonlara yol açar. Kaynak akımının yeterince sağlanamaması durumu, gerilimde istenmeyen bir takım dalgalanmalara sebebiyet verir ve bu durum, parametrelerin belirlenmesinde hatalı sonuçlara yol açar. Dolayısıyla kaynak gücünün fazla olması, daha kararlı sonuçlar elde etmek için büyük avantaj sağlar. Deney sistemi üzerindeki tüm iletken başlıkları ve bağlantı terminallerinin sivri kısımları muhtemel gerilim atlamalarına karşı yalıtılmıştır. Sistemde kullanılan ölçüm aletlerinin iç empedanslarının deney sonuçlarını etkilememesi için gerekli olan kompanzasyon işlemi yapılmıştır.

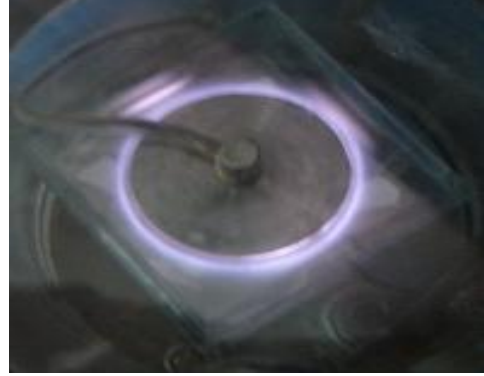
3.2.2. DBB Akım Osilasyonlarının Deneysel Olarak Görüntülenmesi

Bariyer boşalmasının akım osilasyonlarının biçimlerini ve elektrot aralığında oluşan boşalmanın çıplak görüntülerini elde etmek için deney düzeneğine bağlı elektrot sistemine, uygun ortam koşullarında farklı değerlerdeki gerilimin uygulanması sonucu boşalma işlemi gerçekleştirilerek Şekil 3.7'deki görüntüler elde edilmiştir. Sistem üzerinde elektrot aralığı, gerilim değeri, ortamdaki gazın basıncı ve gazın türü gibi parametreler değiştirilerek farklı akım osilasyon görüntüleri elde edilmiştir. Bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, homojen DBB'nin akım osilasyonlarının biçimleri ile Flama tipi DBB'nin akım osilasyonlarının biçimlerinin birbirinden oldukça farklı olduğu gözlenmiştir. Şekil 3.7a ve b'den görüldüğü gibi homojen DBB sadece tek gruplu bir osilasyona sahiptir ve bu görüntü hızlı çekim yapabilen *Sony T90* dijital tip fotoğraf makinesiyle elde edilmiştir. Şekil 3.7c ve d'de ise aynı yöntemle, sistem parameterlerinin uygun olarak değiştirilmesi sonucu yüksek

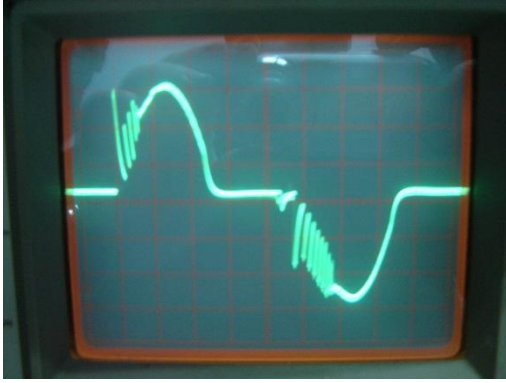
frekanslı çoklu akım osilasyonlarına sahip Flama tipi DBB'nin görüntüleri elde edilmiştir.



a) Homojen DBB akım osilasyonu



b) Homojen DBB görüntüsü



c) Flama tipi DBB akım osilasyonu



d) Flama tipi DBB görüntüsü

Şekil 3.7. Homojen ve Flama tipi DBB'nin akım osilasyonları ve bazı çıplak görüntüleri

Bariyer boşalmasının nümerik olarak modellenenebilmesi için çeşitli sayısal metotlar kullanılmaktadır. Bunlardan biri de zaman tabanında sonlu fark yaklaşımı olarak bilinen ve İngilizce ismi *Finite Difference Time Domain* olan kelimelerin başharflerinden oluşmuş *FDTD* yöntemidir. Bu tez çalışmasında bariyer boşalması, *FDTD* metodu kullanılarak *MATLAB* ortamında modellenmiştir.

Literatürde kısaca *FDTD* olarak bilinen zaman tabanında sonlu farklar yöntemi, diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerinin doğrudan zamanda ve konumda, merkezi farklar yöntemine göre ayrıklaştırılıp, iteratif olarak adım adım çözülmesine dayanır. İlk kez 1966 yılında ortaya atılmasından bu yana *FDTD*, günümüzde elektrik gaz boşalmalarının modellenmesinde de yaygın olarak kullanılan bir yöntem olmuştur.

Sonlu farklar çözümü temel olarak 3 adım içerir;

1. Düğümlerden oluşan ızgara şeklinde bir çözüm bölgesinin oluşturulması.
2. Diferansiyel denklemin çözüm bölgesindeki herhangi bir noktadaki değerinin komşu noktalarındaki değerlere bağlı olarak değişen bir sonlu farklar denklemine dönüştürülmesi.
3. Önceden bilinen sınır koşulları ve/veya başlangıç koşullarına bağlı olarak fark denklemlerinin çözülmesidir.

İki parametreye bağlı $f(x,t)$ fonksiyonunun sonlu farklar metodu ile çözümünü bulmak için, $x-t$ düzlemi üzerindeki çözüm bölgesi yüzeyi, Δx ve Δt şeklinde eşit biçimde dikdörtgenlere ya da ağlara bölünerek yapılır [87].

FDTD yönteminde zaman adımının hesaplanma yöntemi çok önemli bir kavramdır. Yöntem, diferansiyel formdaki Maxwell denklemlerinin doğrudan zamanda ve konumda, merkezi farklar yöntemine göre ayrıklaştırılıp iteratif olarak adım adım çözülmesi esasına dayanır. Genel olarak serbest uzayda yayılan bir elektromanyetik dalga, ışık hızından daha hızlı gidemediğinden dolayı, yayılımda gerekli olan hücre mesafesi için minimum $\Delta t = \Delta x / c_0$ kadarlık bir zaman gerektirir. Eğer iki boyutlu benzetim yapılıyorsa, çift yönde yayılıma izin verilmesi zorunlu olur. Bu durumda gereken zaman $\Delta t = \frac{\Delta x}{\sqrt{2}.c_0}$ ifadesiyle belirlenir. 3 boyutlu benzetim için de

$\Delta t = \frac{\Delta x}{\sqrt{3}.c_0}$ ifadesiyle belirlenir. Bu durum, literatürde iyi bilinen “*Courant Condition*”

ile ifade edilebilir. Bu koşul matematiksel olarak, aşağıda verilmiş olan Denklem 3.1 ile ifade edilebilir [87].

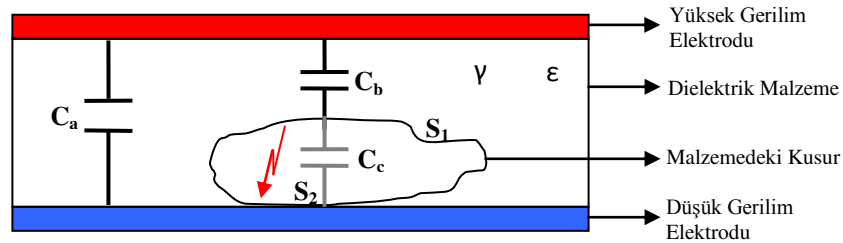
$$\Delta t \leq \frac{\Delta x}{\sqrt{n}.c_0} \quad (3.1)$$

3.2.3. Yalıtım Sistemlerinde Kullanılan Dielektrik Malzemelerdeki Kusurlar

Günümüzde endüstrinin farklı alanlarında pasif veya aktif dielektrik malzemeler yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Genellikle sentetik polimer veya polimer esaslı karışımlardan oluşan bu malzemelerin kendilerine özgü fizikokimyasal özelliklerinden

dolayı güvenli kullanılabilmeleri için elde edilişleri ile yapıları arasında ilişki kurularak, bunların sentez mekanizmalarının açıklanması güncel bir problemi oluşturmaktadır. Çoğu kez sentez durumunda çok iyi elektrofiziksel özellikler gösteren bu tür aktif ve pasif dielektrik malzemeler, çalışma ortamında belli zamanlardan sonra ilk özelliklerini kaybetmeye başlamaktadırlar. Bu tür sistemlerdeki deneysel sonuçların yorumlarında önemli zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu sonuçların daha iyi açıklanabilmesi için birçok elektriksel model geliştirilmiştir [88, 89].

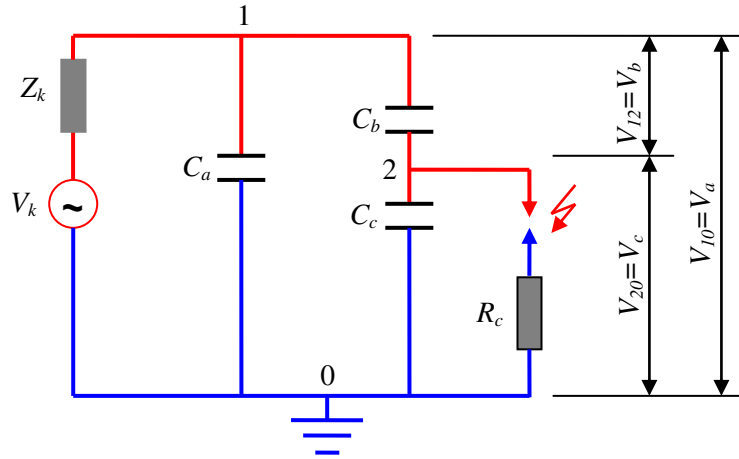
Genel olarak elektrik alanı uygulanmış bir dielektrik malzemenin belirli bir bölgesinde elektrik alanının artarak delinme sınırını aşması durumunda kısmi boşalma (KB) meydana gelir. Bu boşalmaların mekanizmalarının daha iyi anlaşılabilmesi için geliştirilmiş modellerin doğruluk derecelerinin artırılması yönündeki çalışmalar hızlı bir biçimde artarak sürdürülmektedir. Dielektrik malzemedeki kısmi boşalmalar daha çok malzemenin kusurlu bölgesinde meydana gelir. Kusurlu bir dielektrik malzemenin tipik görüntüsü Şekil 3.8’de verilmiştir. Bu malzemeye delinme gerilimi sınırından daha büyük değerli bir sinüsoidal gerilim uygulanması durumunda, dielektrikte bir boşalma olayı gerçekleşir. Meydana gelen kısmi boşalmanın mekanizması, yaygın olarak kullanılan bu elektrik eşdeğer model yardımıyla kolaylıkla modellenebilir.



Şekil 3.8. Dielektrik malzemedeki kusur görüntüsü

Dielektrik malzemelerdeki kusurların fiziksel ve elektriksel özelliklerinin belirlenmesi, kısmi boşalmaların reel elektriksel modelinin oluşturulabilmesi için büyük kolaylık sağlar. Kısmi boşalmaların meydana geldiği kusurların bir modeli Şekil 3.9’da verilmiştir. Şekil 3.10’da ise bu modele karşılık gelen akım ve gerilim eğrilerinin biçimleri verilmiştir. Bu modelde, dielektrik malzemedeki kusurun gaz ortamı dinamik C_c kapasitansı ile (bu kapasitans, boşalma anında kısa devre gibi davranır) gösterilir. Kusur ile dielektrik bariyer arasındaki kapasitans C_b ve dielektriğin geometrik kapasitansı ise C_a ile karakterize edilmiştir. Elektrik kıvılcım boşalma direnci ise R_c ile

gösterilmiştir. Bu modele göre kısmi boşalma mekanizmasının genel tanımı şöyledir: Eğer yalıtım sistemine bir $V_a(t)$ alternatif gerilimi uygulanırsa yalıtım sisteminde bir $E_a(t)$ elektrik alanı meydana gelir ve bu alanın etkisiyle kusurun içinde de bir $E_c(t)$ elektrik alanı oluşur. Daha sonra yalıtım sistemindeki tüm kapasitanslar V_a , V_b ve V_c 'ye bağlı olarak şarj olurlar. V_c gerilimi U_p kritik değerine ulaştığında (U_p , pozitif yarım periyottaki gerilimi; U_n ise negatif yarım periyottaki gerilimi karakterize eder) elektrik alanı da kritik değerine ulaşır ve kusurun içinde bir kısmi boşalma başlar. Bu durumda delinme gerçekleşir ve gerilimde ani bir düşüş meydana gelir. Eğer kusur içinde kısmi boşalma olmasaydı gerilim V_c eğrisi şeklinde devam ederdi. Kusurdaki V_c gerilimi, V_p pozitif sönümleme gerilimi değerine kadar düşer. Aynı zamanda C_b kapasitansı üzerindeki V_b gerilimi hızla yükselir. (Şekil 3.10'da V_b gerilimi gösterilmemiştir fakat $V_b = V_a - V_c$ bağıntısıyla bulunabilir). Boşalma esnasında oluşan hacim yükleri dış devrede bir akım osilasyonu meydana getirir. Bir kısmi boşalma osilasyonu C_b ve C_a kapasitanslarını tekrar şarj eder. V_a dış geriliminin artmasından dolayı C_c kapasitansı da tekrar şarj olur. Bu durumda V_c gerilimi, U_p kritik değerine ulaşır ve kısmi boşalma tekrar başlar. Bu boşalma esnasındaki U_p ve V_p gerilimlerinin durumları Şekil 3.10'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. KB'nin gerçekleştiği dielektrik malzemedeki kusurun elektrik eşdeğer devresi [88, 89]

Fiziksel anlamda iyonizasyon işlemlerinin oluşmasında yüksek elektrik alanı altındaki dielektrik polimerin eşdeğer kapasitansı $C=(C_c+C_b)$ ve boşalma kanalının direnci ise R_c ile gösterilmiştir.

$$R_c = \frac{l}{\pi r_c^2 \sigma} \quad (3.4)$$

Eğer boşalmanın $t=0$ 'da başladığı varsayılırsa, boşalma sırasındaki uzay hacim yüklerinin dağılımı kararlı bir duruma ulaşır. Bu yüzden boşalma kanalının iletkenliği σ sabit olur ve direnci ise akıma bağlı bir fonksiyon olarak değişir. Bu durumda akımda meydana gelebilecek herhangi bir değişim oranı, boşalma kanalının direncinin değişim miktarını belirlemeye olanak sağlar.

Bir DBB hücresinde gerçekleşen iç iyonizasyon sonucu oluşan boşalma kanalının direncinin değişimi için elde edilen Denklem 3.4, bariyer boşalmasının matematiksel modeli için türetilen formüllerin fiziksel analizi açısından oldukça önemlidir.

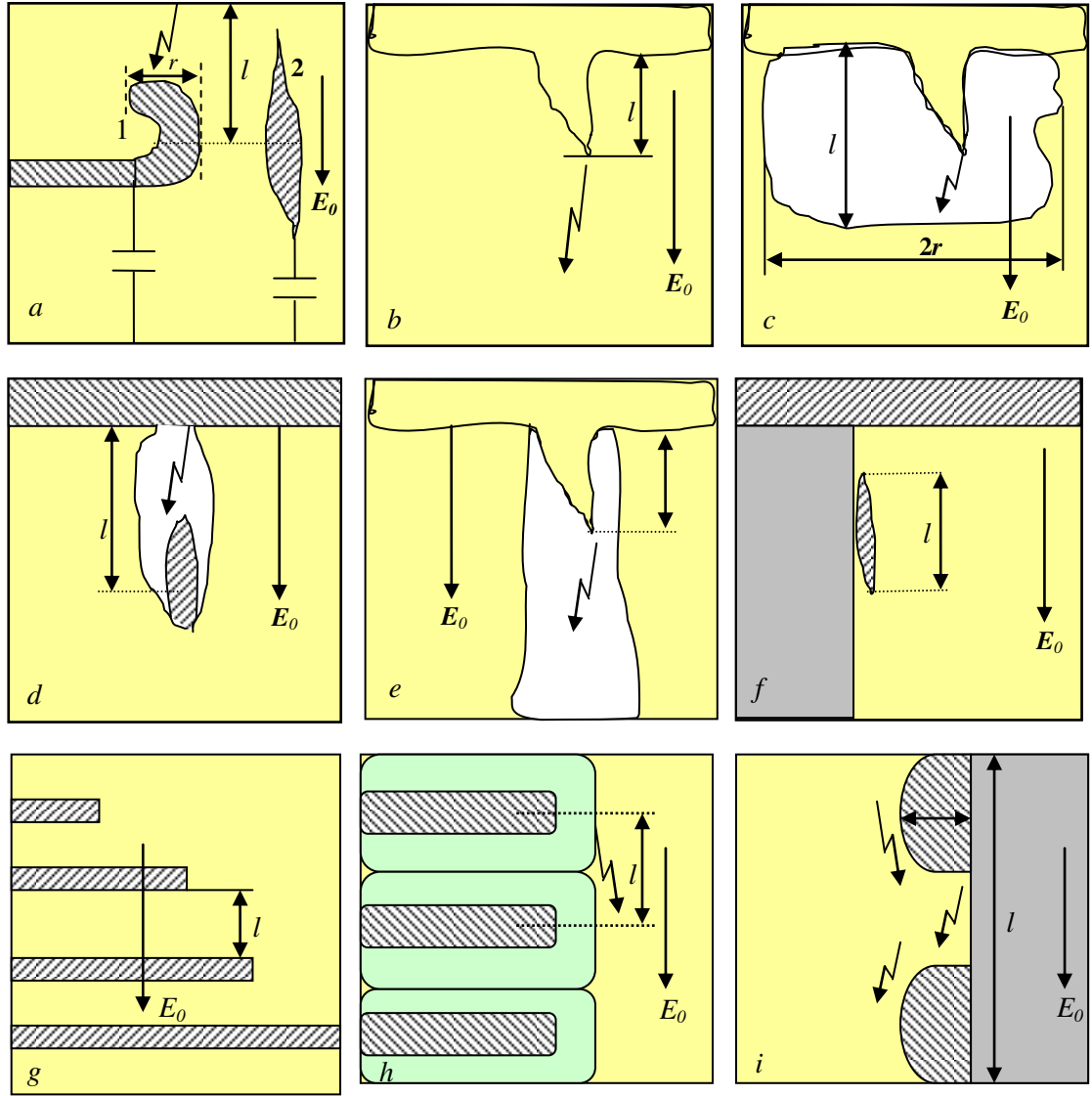
3.2.4. Dielektrik Malzemelerdeki Kusurların Sınıflandırılması

İzolasyon malzemelerinin yapısında imalat hatasından kaynaklanan değişik geometrik boyutlara ve farklı şekillere sahip kusurlar oluşmaktadır. Genel durumlarda, yapıdaki kusurların sınıflandırılması, boşalma olayını sınırlandıran iki temel esasa dayanır. Bunlar sırasıyla:

- a) Elektrik alanının normal ve teğet bileşenlerinin yönleri
- b) Dış elektrik alanı E_0 'a paralel katı yalıtkan yüzeylerin pürüzlülük derecesidir. Yüzeyin etkisi olmaksızın boşalma olayının gaz ortamında gelişmesi pratik durumlar için önemlidir.

Şekil 3.11'deki kusur matrisinin sol alt köşesindeki kusur tipi için elektriksel dallanma olayı olağandışı bir durum olarak nitelendirilir. Tasarım faktörü, imalat aşamaları, montaj aşamaları ve servis özelliklerine bağlı olarak herhangi bir özel yalıtım sistemi Şekil 3.11'deki kusur matrisinin bir alt kümesini içerir [90-91].

Sıkıştırılmış SF_6 yalıtımında rastlanılan kusur tipleri Şekil 3.11'deki a , b ve c harfleriyle işaretlenmiştir. Makine yalıtımı, kuru tip transformatör yalıtımı ve reçineli yalıtımda rastlanılan kusur tipleri c , d ve e şeklindedir. Karışık yalıtım sistemlerinde ise, kusur tipleri g ve h ile birlikte c , d ve e şekillerinde de görülebilir. Atmosfer kirliliği nedeniyle dış ortam yalıtımında gözlemlenen kusur tipleri ise, Şekil 3.11'deki i tipindedir [91].



Şekil 3.11. Dielektrik malzemelerde oluşan kusur çeşitlerini gösteren kusur matrisi

3.2.5. Dielektrik Malzemelerin Kusur Parametreleri

Kusuru karakterize eden parametreler kusur geometrisi dikkate alınmadan sadece kusurun niteliğine ve miktarına bağlı olarak seçilmelidir. Bu durum, kusur yerindeki E_0 dış elektrik alanına ve kısmi boşalma (KB) işlemindeki malzemeye bağlıdır. Bu malzeme yeterince seçilmiş integral parametreleri ile karakterize olmuş gaz, katı veya bu ikisinin arayüzeyinden oluşabilir. Bu durumlara karşılık gelen parametreler gurubu Tablo 3.1'de listelenmiştir. Birinci gruptaki parametreler geometrik parametreler olup, kusurun yerini ve boyutunu karakterize ederler. Kusur konumu U_0 ve A_0 gibi iki boyutsuz skaler olan nicelikler ile karakterize edilir. Birincisi, kusur konumundaki uygulanan voltaj U_a 'ya normallenmiş olan elektrostatik potansiyel (U), yani

$U_0=U / U_a$ 'dır. Bu ifade, yalıtılmış sistem tasarımının kusur konumundaki elektrik alanını nasıl kontrol edeceğini nicel olarak hesaplar [92].

$$E_0 = U_0 \nabla U_0 \quad (3.5)$$

Denklem 3.5, sisteme U_0 gerilimi uygulandığında kusurdaki E_0 alanını verir.

$$\Delta U_0 = \frac{E_0}{U_0} \quad (3.6)$$

Denklem 3.6 ise niceliği azaltılmış başlangıç elektrik alanını ifade etmektedir. Boyutsuz skaler alan U_0 , Laplace denkleminin yüksek gerilim (HV) elektrodunda $U_0=1$ ve topraklanmış elektrotta ise $U_0=0$ sınır koşulları dikkate alınarak çözülmesiyle elde edilir [92].

Tablo 3.4. Genel kusur parametreleri ve kontrol faktörlerinin özeti [91]

<i>Kategori</i>	<i>Parametre</i>	<i>Sembol</i>	<i>Faktör</i>
	<i>Kapladığı alan</i>	$\nabla U_0=E_0/U_0$	<i>Plan</i>
<i>Geometri</i>	<i>PMC fonksiyonu</i>	$\nabla \lambda_o$	<i>Üretim</i>
	<i>Kusur ölçümü II</i> ∇U_0	l	<i>Kalite</i>
	<i>Kusur ölçümü ∇U_0</i>	R	<i>Kalite I</i>
	<i>Geçirgenlik</i>	ϵ_r	
<i>Külçe malzemeler</i>	<i>Basınç</i>	P	<i>Malzeme</i>
	<i>Gaz iyonlaşması</i>	$(E/p)_{kr}, B, n, \gamma$	
	<i>Yüzey iyonlaşması</i>		
<i>Yüzey</i>	<i>Elektron emisyonu</i>	$\Phi, X_i \tau_{dt}$	<i>Malzeme</i>
	<i>Yüzey iletimi</i>	K_s	

İkinci parametre ise, boyutsuz skaler olan λ_0 'dır. Bu katsayı, kısmi boşalma (KB) sinyali ölçüldüğünde, kusur konumunun elektroda bağlanmasını karakterize eder. Son iki geometrik parametre sırasıyla E_0 başlangıç alanı veya ∇U_0 yönündeki uzunluk ölçümleri l ve r ile kusur boyutunu ve buna dikliğini karakterize eder. Kusur ölçümü genellikle tüm ölçümle kıyaslandığında daha küçük olduğu kabul edilir. E_0

başlangıç alanının az miktarda değişmesi, kusurun bölgesel olarak düzgün E_0 başlangıç alanı içinde yerleştiği varsayılır [92].

Parametrelerin ikinci grubu ise, boşalmaya neden olan katı ve gaz malzemelerin döküm özelliğidir. Bunlar katı dielektriklerin kısmi geçirgenliği ϵ_r , gazın türünü, p basıncını ve gaz ara yüzlerinin iyonlaşma özelliklerini tümüyle karakterize eden $(E/p)_k$, B , n ve γ gibi parametreleri içerir. Bu parametreler izolasyon üretiminde etkili olup, katı ve gaz izolasyon malzemelerinin seçiminde belirleyici özellik gösterirler [92].

Parametrelerin üçüncü grubu ise, boşalmaya neden olan ara yüzleri karakterize ederler ve yüzey katkısıyla iyonlaşma özelliklerini, yüzeyden yük yayma ve yüzey boyunca yük taşınması olaylarını kapsar. Bu ara yüzey verileri, sadece malzeme seçimiyle tayin edilmez, aynı zamanda yüzeylerin çeşitli fiziksel ve kimyasal işlemlerinden de etkilenir. Bu durum, teorik olarak nicelleştirmeyi zorlaştırır ve normalde deneysel verilerin olmasını da gerektirir [92].

3.2.6. Bariyer Boşalmasının Modellenmesi

Hava ortamındaki dielektrik tabakanın yüzey yüklenme mekanizmasının daha iyi açıklanabilmesi için bariyer boşalmasının nümerik modellenmesi oldukça isabetli bir yöntemdir. Bariyer boşalmasının gelişimi fiziksel olarak belirli bir miktarda gerilim uygulanmış, saf malzemeden imal edilmiş iki elektrot arasındaki Streamer kanalının oluşumuna benzer. Dolayısıyla, elektrotlar arasında gerçekleşen boşalma olaylarının incelenmesi, gerçek fiziksel olayların iki ve üç boyutlu nümerik modellenmesini gerektirmektedir.

Bariyer boşalmasının pratikteki uygulama şekillerinden hareketle, çalışmanın bu bölümünde iki tür boşalma hücre modeli incelenmiştir. Bunlar:

- i) Tek bariyerli iki tabakalı Metal-Gaz-Dielektrik-Metal (*MGDM*) hücre modeli
- ii) Çift bariyerli üç tabakalı Metal-Dielektrik-Gaz-Dielektrik-Metal (*MDGDM*) hücre modeli

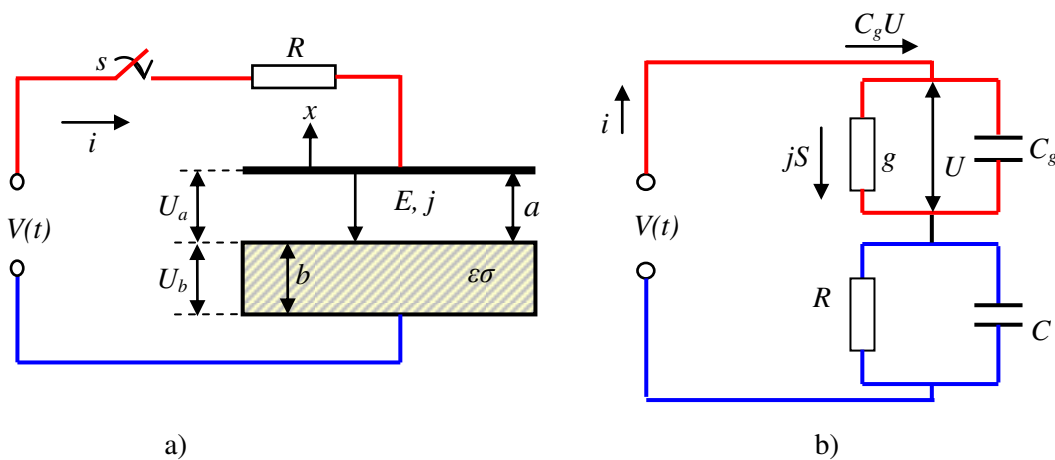
Bu boşalma hücre modelleri için gerekli eşdeğer devreler ile bu eşdeğer devrelere karşılık gelen ifadeler, aşağıdaki kısımlarda detaylı olarak ele alınmıştır.

3.2.7. Tek Bariyerli İki Tabakalı Metal-Gaz-Dielektrik-Metal (MGDM) DBB Hücre Modeli

Tez çalışmasının bu kısmında, tek bariyerli iki tabakalı Metal-Gaz-Dielektrik-Metal (*MGDM*) DBB hücre modelinde gerçekleşen fiziksel olaylar incelenmiştir. Bu modelin, Şekil 3.12a’da verilen elektrik eşdeğer devre örneği üzerinde, $U_G < U_D$ koşulunda incelenmesi durumunda, aşağıda sıralanmış olan parametrelerin belirlenmesi hedeflenmiştir.

- i) Tabakalarda meydana gelen elektrik alan şiddetinin zamana bağlı olarak değişim karakteri,
- ii) Dielektiklerin arasınır yüzeylerindeki serbest ve bağlı elektrik yüklerinin zamana bağlı olarak değişimleri,
- iii) DBB hücre modeli üzerinden geçen akımın zamana bağlı olarak değişimi,
- iv) *MGDM* sistemi üzerinde depolanan enerjinin belirlenmesi ve bu enerji balansının (dengesinin) gösterilmesi.

MGDM sistemi için verilen $U_G < U_D$ koşulundaki U_G parametresi, gaz aralığı üzerinde meydana gelen gerilim düşümünü ve U_D ise dielektrik tabaka üzerinde oluşan gerilim düşümünü ifade etmektedir. Ayrıca incelenen parametrelerden U - sisteme uygulanan gerilimi; a - elektrotlar arasındaki açıklığı; b - dielektrik tabakanın kalınlığını; σ - dielektrik tabakanın elektriksel iletkenliğini ve $j(t)$ ise, akım yoğunluğunu ifade etmekte olup, bu parametreler Şekil 3.12a’da verilmiş olan eşdeğer devre şeması üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3.12. a) Devre şeması b) Boşalmanın elektrik eşdeğer devresi

Tek tabakalı *MGDM* hücre sistemi için Şekil 3.12a'da verilen, tek bariyerli iki tabakalı Metal-Gaz-Dielektrik-Metal (*MGDM*) DBB hücre modelinin eşdeğer devre şemasından hareketle, sisteme ait devre denklemleri aşağıdaki yöntemlerle oluşturulabilir. Kirchoff'un ikinci yasasına istinaden sistemin devre şemasının denklemi aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$iR + U_a + U_b = iR + E_a \cdot a + E_b \cdot b = U \quad (3.7)$$

Denklem 3.7'deki parametrelerden, a - tek bariyerli iki tabakalı *MGDM* sisteminde boşalma aralığının uzunluğunu; E_a - bu aralığa karşılık gelen elektrik alan şiddetini; U_a - bu aralığın gerilim düşümünü; b - tek bariyerli iki tabakalı *MGDM* sisteminde dielektrik bariyer tabakasının kalınlığını; E_b - bu tabakanın elektrik alan şiddetini; U_b - bu tabakanın gerilim düşümünü karakterize eder. Eşdeğer devre modelinden de görüldüğü gibi, U - *MGDM* sistemine R direnci üzerinden uygulanan gerilim ve i ise, *MGDM* sistemi üzerinden geçen akım şiddeti olup, değeri $i = jS$ şeklinde belirlenir. Statik alanlarda, iki yalıtkanın arasınır yüzeyindeki akım yoğunluğunun hesaplanabilmesi için Denklem 3.8'de verilen koşul yazılabilir.

$$J_{1n} + \frac{\partial D_{1n}}{\partial t} = J_{2n} + \frac{\partial D_{2n}}{\partial t} \quad (3.8)$$

Denklem 3.8'de verilen süreklilik koşulundan hareketle, incelenen *MGDM* sistemi için akım yoğunluğunu karakterize eden ifadeler Denklem 3.9'daki şekilde yazılabilir.

$$J_a = \sigma_a E_a + \epsilon_{ra} \epsilon_0 \frac{dE_a}{dt} = J_b = \sigma_b E_b + \epsilon_{rb} \epsilon_0 \frac{dE_b}{dt} \quad (3.9)$$

Burada σ_a , σ_b ve ayrıca ϵ_{ra} , ϵ_{rb} ve J_a , J_b sırasıyla, tabakaların elektriksel iletkenliklerini, dielektrik sabitlerini ve tabaka üzerinden geçen akım yoğunluklarını ifade etmektedirler. Denklem 3.7 ve Denklem 3.8'den hareketle, E_a ve E_b bilinmeyenlerini içeren ve aşağıda belirtilen birinci mertebe birinci derece homojen olmayan iki diferansiyel denklem elde edilir.

$$\begin{aligned} \frac{dE_a}{dt} &= -\frac{a}{RS\epsilon_0\epsilon_{ra}} E_a - \frac{b}{RS\epsilon_0\epsilon_{ra}} + U \\ \frac{dE_b}{dt} &= -\frac{a}{RS\epsilon_0\epsilon_{rb}} E_b - \frac{(b+RS\sigma_b)}{RS\epsilon_0\epsilon_{rb}} + U \end{aligned} \quad (3.10)$$

MGDM sisteminde, tabakaların parametrelerinin dikkate alınmasıyla Denklem 3.10 ile tanımlanan ve lineer olmayan diferansiyel denklemler sistemine karşılık gelen karakteristik denklemin kökleri belirlenerek, tabakalardaki elektrik alan şiddetinin zamana göre değişimini veren denklem takımları ise Denklem 3.11a ve b’de verilmiştir.

$$E_a = E_{ak} + A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} \quad (3.11a)$$

$$E_b = E_{bk} + B_1 e^{p_1 t} + B_2 e^{p_2 t} \quad (3.11b)$$

Denklem 3.11 ile verilmiş ifadelerdeki E_{ak} ve E_{bk} , tabakalardaki elektrik alan şiddetinin kararlılaşmış değerleri (sistemin kalıcı rejimi); p_1 ve p_2 , karakteristik denklemin kökleri; A_1 , A_2 , B_1 ve B_2 ise başlangıç koşullarından hareketle belirlenmesi gereken integral sabitleridir. DBB hücre modelinin birinci tabakasının $U_G < U_D$ koşulunda, ideal dielektrik malzemede $\sigma_a = 0$ olması nedeniyle, kararlılaşmış rejimde *MGDM* sistemi üzerinden geçen akım sıfır olur. Dolayısıyla bu durumda,

$$E_{ak} \cdot a + E_{bk} \cdot b = U \quad (3.12)$$

olur. Denklem 3.12’de, *MGDM* sistemindeki dielektrik tabakanın ideal dielektrik malzemeden oluşması nedeniyle $\sigma_b = 10^{-10} S \cdot cm^{-1} \neq 0$ ve $E_{bk}=0$ olur. Bu durumda DBB hücresinin a tabakasındaki elektrik alan şiddetinin kararlılaşmış değeri,

$$E_{ak} = \frac{U}{a} = \frac{1}{0.05} = 20 \frac{kV}{cm} \quad (3.13)$$

olur. *MGDM* sisteminin DBB hücresi için başlangıç koşulları $U_a 0 = U_b 0 = 0$ olduğu gözönüne alınarak; ayrıca sistemin uygun parametreleri ve elektrot sistemine uygulanan gerilim değeri dikkate alınarak, sistem üzerinden geçen başlangıç akım yoğunluğu ve akım şiddetinin değerleri ise aşağıdaki şekilde hesaplanabilir:

$$i 0 = \frac{U}{R} = \frac{10^3}{103 \cdot 10^3} = 9,71 mA \quad (3.14a)$$

$$J_a 0 = J_b 0 = \frac{i(0)}{S} = \frac{9,71}{4,9} = 1,98 \frac{mA}{cm^2} \quad (3.14b)$$

Başlangıç akım yoğunluklarının hesaplanan bu değerlerinden hareketle, DBB hücresinin tabakalarındaki elektrik alan şiddetinin, $t=0$ anındaki zamana göre değişimleri ise aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

$$\frac{dE_a}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{J_a(0)}{\epsilon_{ra}\epsilon_0} = 22,372 \cdot 10^9 \frac{V}{cm \cdot s}, \quad (3.15a)$$

$$\frac{dE_b}{dt} = \frac{J_b(0)}{\epsilon_{rb}\epsilon_0} = 6,2845 \cdot 10^9 \frac{V}{cm \cdot s}. \quad (3.15b)$$

Sonuç olarak, yukarıda belirlenen parametreler Denklem 3.11a ve Denklem 3.11b'de yerlerine yazılarak, tek bariyerli iki tabakalı Metal-Gaz-Dielektrik-Metal (*MGDM*) DBB hücre modeli örneği üzerinde $U_G < U_D$ koşulunda, tabakalarda meydana gelen elektrik alan şiddetinin zamana bağlı olarak değişim karakterini belirlemeye olanak sağlayan Denklem 3.16a ve Denklem 3.16b ifadeleri elde edilir.

$$E_a(t) = 1,724 \cdot 10^4 - 291e^{-7,87 \cdot 10^3 t} - 19,71 \cdot 10^3 e^{-1135 \cdot 10^3 t} \quad (3.16a)$$

$$E_b(t) = 5,5756 \cdot 10^3 e^{-7,87 \cdot 10^3 t} - 5,5756 \cdot 10^3 e^{-1135 \cdot 10^3 t} \quad (3.16b)$$

Metal-Gaz-Dielektrik-Metal (*MGDM*) DBB hücre modeli örneği üzerinde $U_G < U_D$ koşulunda, tabakaların arasınır yüzeyinde meydana gelen serbest ve bağlı elektrik yüklerinin zamana bağlı değişim karakterleri ise Denklem 3.17a ve b'de verilen ifadeler yardımıyla belirlenir.

$$q_s(t) = D_b(t) - D_a(t) \quad (3.17a)$$

$$q_s^{bağlı}(t) = P_a(t) - P_b(t) \quad (3.17b)$$

Denklem 3.17a ve Denklem 3.17b ifadelerindeki D_a , D_b ve P_a , P_b parametreleri sırasına uygun olarak, *MGDM* sisteminde tabakalardaki deplasman akı vektörlerinin ve tabakaların polarizasyon vektörlerinin büyüklüklerini temsil etmekte olup bu parametreler, aşağıda verilmiş olan Denklem 3.18a-d formülleriyle belirlenebilirler.

$$D_a(t) = \epsilon_0 \epsilon_{ra} E_a(t) \quad (3.18a)$$

$$D_b(t) = \epsilon_0 \epsilon_{rb} E_b(t) \quad (3.18b)$$

$$P_a(t) = \epsilon_0 (\epsilon_{ra} - 1) E_a(t) \quad (3.18c)$$

$$P_b(t) = \epsilon_0 (\epsilon_{rb} - 1) E_b(t) \quad (3.18d)$$

DBB hücre modelinin tabaka parametrelerinin ve tabakalardaki elektrik alan şiddetinin zamana bağlı olarak değişimini belirlemeye olanak sağlayan Denklem 3.16a ve Denklem 3.16b ifadelerinin dikkate alınmasıyla, Denklem 3.17a ve Denklem 3.17b ifadeleri yeniden düzenlenecek olursa, tabakaların arasını yüzeylerinde meydana gelen serbest ve bağlı elektrik yüklerinin zamana bağlı değişim karakterini belirlemeye olanak sağlayan Denklem 3.19a ve Denklem 3.19b ifadeleri elde edilir.

$$q_s t = 88,5 \cdot 20,14 \cdot e^{-7,87 \cdot 10^3 t} - 0,141 \cdot e^{-1135 \cdot 10^3 t} - 20 \quad \frac{pC}{cm^2} \quad (3.19a)$$

$$q_s^{bağlı} t = 1,26 \cdot e^{-7,87 \cdot 10^3 t} - e^{-1135 \cdot 10^3 t} - 20 \quad \frac{nC}{cm^2} \quad (3.19b)$$

DBB hücre modelinin *elektro-fiziksel* parametreleri ve tabakalardaki elektrik alan şiddetleri ve bu alan şiddetlerinin zamana göre türevlerinin dikkate alınmasıyla, *MGDM* sistemi üzerinden geçen akımın zamana bağlı değişimi, aşağıda verilen Denklem 3.20 ifadesiyle belirlenebilir.

$$\begin{aligned} i t &= \epsilon_{ra} \epsilon_0 S \frac{dE_a t}{dt} = \sigma_b S E_b t + \epsilon_{rb} \epsilon_0 S \frac{dE_b t}{dt} \\ &= 0,009 e^{-7,87 \cdot 10^3 t} + 9,7 e^{-7,87 \cdot 10^3 t} \text{ mA} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Ayrıca, Metal-Gaz-Dielektrik-Metal (*MGDM*) DBB hücre modeli örneği üzerinde $U_G < U_D$ koşulunda, Denklem 3.13, Denklem 3.16a-b ve Denklem 3.20 ifadelerinden hareketle, *MGDM* sistemi üzerinde depolanan enerjiyi ve enerji balansını (dengesini) Denklem 3.21a, b, c ve d' de verilen şekilde hesaplamak mümkündür.

Genel durumda kaynağın sağladığı enerji,

$$W_k = \int_0^{\infty} U i t dt = 10^3 \int_0^{\infty} 0,009 e^{-7,87 \cdot 10^3 t} + 9,7 e^{-7,87 \cdot 10^3 t} dt = 9,68 \mu J \quad (3.21a)$$

Aktif direnç üzerinde açığa çıkan enerji,

$$\begin{aligned} W_R &= \int_0^{\infty} R i^2 t dt = 103 \cdot 10^3 \int_0^{\infty} 0,009 e^{-7,87 \cdot 10^3 t} + 9,7 e^{-7,87 \cdot 10^3 t}^2 dt \\ &= 4,807 \mu J \end{aligned} \quad (3.21b)$$

İdeal dielektrik (*Gaz*) tabakadaki enerji kaybı,

$$W_G = E_{ak} \cdot D_{ak} \cdot S \cdot a_2 = \epsilon_{ra} \epsilon_0 E_{ak}^2 \cdot S \cdot a_2 = 4,336 \mu J \quad (3.21c)$$

İdeal dielektrik (*Poliimid*) bariyer tabakadaki enerji kaybı ise,

$$W_D = \int_0^\infty \sigma E_b^2(t) \cdot S \cdot b \cdot dt = \sigma b S \int_0^\infty (5,5756 \cdot 10^3 e^{-7,87 \cdot 10^3 t} - 5,5756 \cdot 10^3 e^{-1135 \cdot 10^3 t})^2 dt = 0,536 \mu J \quad (3.21d)$$

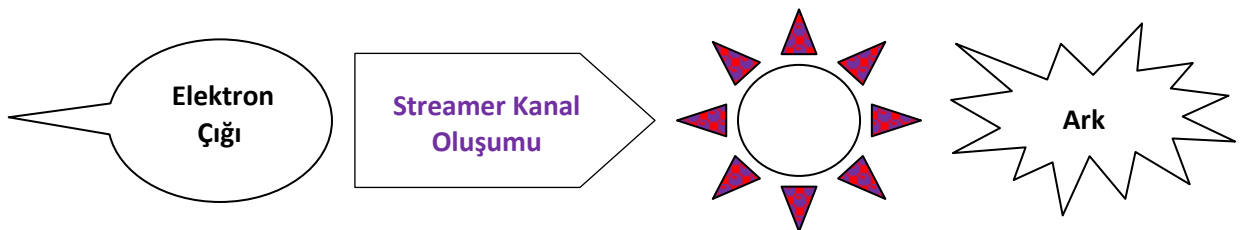
olarak belirlenmiştir.

Tez çalışmasının bu kısmında, *MGDM* DBB hücre modelinin yapılan analizinden hesaplanmış olan bu sonuçlardan görüldüğü gibi, $W_k = W_R + W_G + W_D$ enerji denklemi sağlanmıştır ve dolayısıyla sistemdeki enerji balansı (dengesi) korunmuştur.

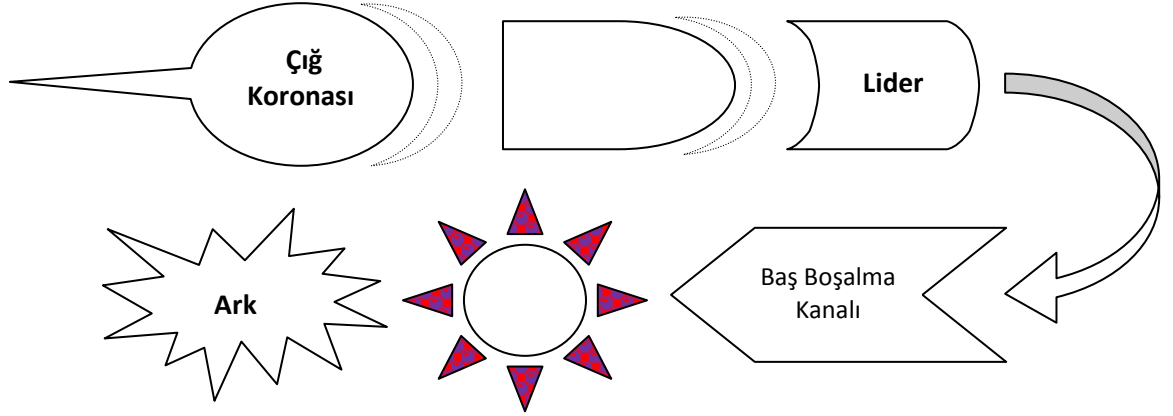
3.2.8. Çift Bariyerli Üç Tabakalı Seri Metal-Dielektrik-Gaz-Dielektrik-Metal (*MDGDM*) DBB Hücre Modeli

Yalıtım koordinasyonu açısından elektrik sistemlerinde gerçekleşen çeşitli *Açma-Kapama (Komutasyon)* olaylarında, tabakalı elektrot sistemlerinde meydana gelen arızaların temel nedeni olarak nitelendirilen elektrik boşalmalarının analizi, yüksek gerilim tekniğinde kullanılan ekipmanların güvenilirliği açısından son derece önemlidir. Tabakalı elektrot sistemlerinin geometrisine bağlı olarak, elektrotlar arasında oluşan elektrik alanı genelde, homojen (düzgün) ve nonhomojen (düzgün olmayan) olmak üzere iki gruba ayrılır. Burada dikkat edilmesi gereken husus, düzgün ve düzgün olmayan elektrik alanlarında, elektrik boşalmasının gerçekleşmesi ve gelişmesi aşamalarının farklı olmasıdır. Bu aşamalar aşağıda verilen şekillerde olup bunlara karşılık gelen blok akış diyagramı sırasıyla aşağıda verilmiştir.

i) ***Elektron çığı → Streamer kanal oluşumu → Kıvılcım → Ark***



ii) **Çığ Koronası** → **Streamer Koronası** → **Lider** → **Baş Boşalma Kanalı** → **Kıvılcım** → **Ark**



Tasarım veya çalışma koşullarında, tabakalı yalıtım sistemlerinde meydana gelen elektriksel boşalma olaylarının sistem üzerine olan etkisinin elektriksel zorlanma açısından analiz edilebilmesi için, konuya ilişkin mevcut modellerin daha da geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bu durumda oluşturulan yeni modeller, sistemin gerçek durumuna karşılık gelen *elektro-fiziksel* olayları da hesaba katan özelliklere sahip olmalıdır. Günümüz koşullarında boşalma olaylarını analiz etmek için bilim adamları tarafından genel kabul gören hidrodinamik yaklaşımda elektronlar ve iyonlar için süreklilik denklemleri ve Poisson denklemleri birlikte kullanılmakta olup, aşağıdaki gibi ifade olunurlar [93].

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot (n_e \mathbf{v}_e + D_e \nabla n_e) = \alpha n_e |\mathbf{v}_e| - \eta n_e |\mathbf{v}_e| - \beta_{ep} n_e n_p + S_{ph} \quad (3.22)$$

$$\frac{\partial n_p}{\partial t} + \nabla \cdot (n_p \mathbf{v}_p) = \alpha n_e |\mathbf{v}_e| - \beta_{ep} n_e n_p - \beta_{np} n_n n_p + S_{ph} \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial n_n}{\partial t} + \nabla \cdot (n_n \mathbf{v}_n) = \alpha n_e |\mathbf{v}_e| - \beta_{np} n_n n_p \quad (3.24)$$

$$\Delta \varphi = -4\pi e (n_{iyon} - n_e) \quad (3.25)$$

Burada t zaman; φ potansiyel; e elektronun yükü; n_e elektron yoğunluğu; n_p pozitif iyonların yoğunluğu; n_n negatif iyonların yoğunluğu; $\mathbf{v}_e$, $\mathbf{v}_p$ ve $\mathbf{v}_n$ ise bunlara karşılık

gelen ortalama sürüklenme hızlarını karakterize ederler. D_e ise elektronların difüzyon katsayısıdır.

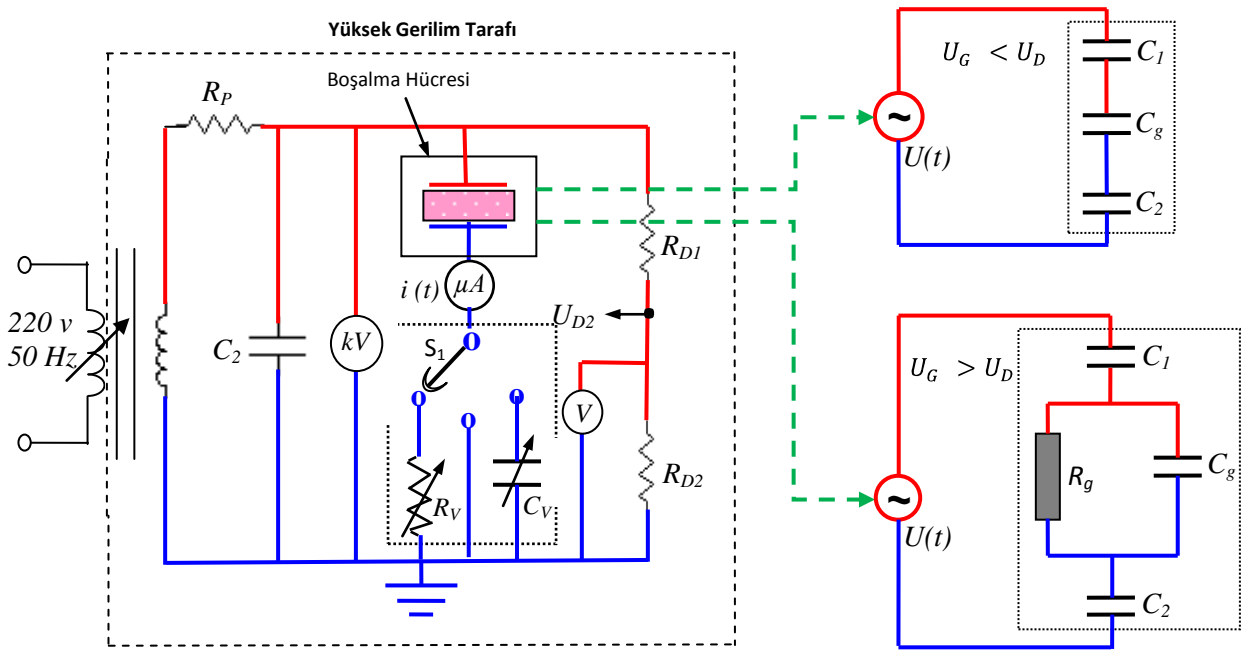
Denklem 3.22 ve Denklem 3.25'teki eşitliklerin sağ tarafındaki kaynak terimleri, gaz ortamındaki her bir yüklü parçacığın farklı çarpışma süreçlerindeki birleşmesini veya ayrışmasını karakterize ederler. Başka bir deyişle, iyonlaşma ve rekombinasyon (tekrar birleşme) olaylarını karakterize ederler. Denklemlerdeki α , Townsend'in iyonlaşma katsayısıdır; η ise elektronegatif gaz ortamları için (Örneğin SF_6 , CO_2 , O_2 vb.) elektronların molekül üzerine konmasını karakterize eden sabit bir katsayıdır. β_{ep} elektron-iyon, β_{pn} ise iyon-iyon tekrar birleşmesini tanımlayan birer katsayıdır. S_{ph} ise fotoiyonizasyon oranını karakterize eden bir katsayıdır [93].

Düzlemsel elektrot sisteminde gerçekleşen Glow boşalmasının stasyonær pozitif gövdesi için ve milimetrik boşluklarda gerçekleşen Kısmi boşalmalar (KB) için yapılan son çalışmalarda [93-95], yukarıda bahsi geçen denklemler *Monte-Carlo* yöntemiyle nümerik olarak çözülmüştür. Genelde elektrotlar arası açıklıkta elektronların ve iyonların yoğunluğunu belirlemeye olanak sağlayan bu yöntem, boşalma olayı sırasında meydana gelen bazı hususların; örneğin, i) boşalama akımında oluşan kararsızlıkların, ii) elektrotlar arası açıklığın sabit değerinde ortamın basınç değerine bağlı olarak, boşalmanın *Gerilim-Akım* öz eğrisinin basamak şekilli olmasının sebepleri ve iii) boşalmanın gerçekleştiği ortamın parametrelerine bağlı olarak, boşalmanın Townsend veya Streamer (kanal) mekanizmalarıyla açıklaması konularında yetersiz kalmaktadır.

Tabakalı elektrot sistemini temsilen, bariyer boşalma hücresinin temel elektrik problemlerinden biri, hücre üzerinden geçen akım şiddetinin elektrotlar sistemine uygulanan gerilimin büyüklüğüne, biçimine ve frekansına göre değişimini belirlemeye olanak sağlayan ifadelerin belirlenmesidir. Bu nedenle bariyer hücresinde gerçekleşen *elektro-fiziksel* olayları hesaba katan eşdeğer elektrik devresine ihtiyaç duyulur.

Yukarıda bahsedilen problemlerin çözümlenmesi için, tez çalışmamızda boşalmanın deneysel olarak belirlenen *Gerilim-Akım* öz eğrisinden hareketle ve elektriksel boşalmanın gerçekleşmesinin yeterlilik koşulundan yola çıkarak, boşalmanın gerçekleştiği ortamın dinamik iletkenliğinin, ortam parametrelerine bağlı

olarak değişimini hesaba katan yeni ve basit bir model tanımlanmıştır. İki yalıtkanlı ve üç tabakalı seri *MDGDM* sisteminde elektrotlara uygulanan gerilim değerine bağlı olarak bariyer boşalma hücresi $U_G < U_D$ ve $U_G > U_D$ koşullarına bağlı olarak Şekil 3.13'teki eşdeğer elektrik devresiyle modellenenebilir. Şekilden de görüldüğü üzere elektrot aralığında boşalma yokken ($U_G < U_D$ durumunda) sistemin eşdeğer devresi, seri bağlanmış üç tane statik (durgun) kondansatör gibi bir davranış sergiler. Boşalma olduğu durumlarda ise ($U_G > U_D$ durumunda) sistemin eşdeğer devresi şekildeki gibi dinamik direnç, dinamik kondansatör ve statik kondansatörlerin *seri-paralel* bağlanmaları şeklinde olur.



Şekil 3.13. DBB'nin $U_G < U_D$ ve $U_G > U_D$ koşullarındaki eşdeğer devreleri

MDGDM sisteminin, oluşturulan bu eşdeğer modelinden hareketle, sistem üzerinden taşınan elektrik yükünün $U_G > U_D$ durumuna karşılık gelen diferansiyel denklemi türetilir. Bunun nedeni, dış devre üzerinden birim zamanda taşınan elektrik yükün belirlenen değerine göre, DBB'nin diğer temel parametrelerinin (birim zamandaki boşalmaların sayısı, birim boşalma kanalında açığa çıkan aktif, reaktif ve tam güç, *MDGDM* seri düzeninin parametreleri, boşalma kanalının parametreleri vb.) belirlenmesinde çok büyük öneme sahip olmasıdır. *MDGDM* sisteminin Şekil 3.13'te belirlenen eşdeğer devre modeline göre, Kirchoff'un birinci yasasına istinaden, DBB hücresi üzerinden birim zaman zarfında geçen yük miktarı aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$\frac{dQ}{dt} = C_g \frac{dU_g}{dt} + \left(U - \frac{Q}{C_d} \right) \frac{1}{R} \quad (3.26)$$

Burada $C_d = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$ bariyer tabakalarının eşdeğer sığası (kapasitesi), C_g -gaz aralığının sığası, U_g - boşalma aralığı üzerindeki gerilim, Q - dielektrik bariyer tabakalar üzerindeki dış yük, U - iki yalıtkanlı üç tabakalı *MDGDM* sistemine uygulanan gerilim ve R_g - gaz aralığının dinamik direncini temsil eder. Bu denklemdeki U_g gerilimi, Kirchoff 'un gerilimler yasasından hareketle belirlenerek denklemde dikkate alınacak olursa, aşağıdaki diferansiyel denklem elde edilir.

$$\frac{dQ}{dt} = C_g \frac{d}{dt} \left(U - \frac{Q}{C_d} \right) + \left(U - \frac{Q}{C_d} \right) \frac{1}{R} \quad (3.27)$$

Denklemin sağ tarafındaki birinci bileşenin zamana göre diferansiyeli alınıp, denklem yeniden düzenlenirse, iki yalıtkanlı üç tabakalı seri *MDGDM* sisteminde bariyer hücresi üzerinden birim zamanda taşınan elektrik yükünün diferansiyel denklemi aşağıdaki gibi olur.

$$\frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{R(C_g + C_d)} = \frac{C_d}{C_g + C_d} \left(\frac{U}{R} + C_g \frac{dU}{dt} \right) \quad (3.28)$$

Birinci mertebe birinci derece diferansiyel denklem biçimindeki bu ifadede, R_g - dinamik direnç değeri ortamın mikro (mobilité, elektron ve iyon yoğunlukları, iyonlaşma, tekrar birleşme, difüzyon vb.) ve makro (P - basınç, T - sıcaklık ve d - elektrotlar arası açıklık vb.) parametrelerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Dolayısıyla bu non lineer diferansiyel denklemi çözebilmek için öncelikle, R_g - dinamik direnç değerinin ortamın mikro ve makro parametrelerine bağlı olarak değişim karakterinin belirlenmesi gerekmektedir.

MDGDM sistemlerinde farklı bileşenler (değişik dielektrik bariyer tabakaları ve farklı gazlar) için farklı ortam koşullarında gerçekleşen boşalma olaylarına karşılık gelen deneysel *Gerilim-Akım* öz eğrisinin incelenmesi sonucu, elektrotlar sistemine uygulanan gerilimin belirli bir kritik değerinde sistem üzerinden geçen akım şiddetinin çok hızlı bir artışı görülmektedir. Bu durum, incelenen sistemde ortamın dinamik

direncinin ve dolayısıyla da dinamik iletkenliğinin $G = \frac{1}{R}$ değişmesiyle açıklanabilir. Öte yandan iletkenliğin artması, boşalmanın gerçekleştiği ortamda hareketli yük taşıyıcıların (elektronların ve iyonların) yoğunluklarında meydana gelen değişimle açıklanabilir. Elektrotlar sistemine uygulanan gerilim değerinin kritik değere ulaşması sonrasında ortamdaki yük artışı, birim zamanda meydana gelen iyonlaşma ve iyonlaşmaya zıt olan tekrar birleşme ve difüzyon olayları ile belirlenecektir. Elektrotlar arası açıklığın küçük değerlerinde ($d \sim 10^{-2} m$) ve ortamdaki elektrik alan şiddetinin büyük değerlerinde ($E \sim 10^6 V/m$), ortamdaki yük taşıyıcıların yoğunluğunda difüzyon olayı dolayısıyla gerçekleşen değişim ihmal edilebilir. Bu durumda elektrotlar sistemine uygulanan ve $U_G > U_D$ koşulunu sağlayan gerilim değerinde, *MDGDM* sisteminde meydana gelen boşalma olayı ağırlıklı olarak iyonlaşma ve tekrar birleşme olayları ile belirlenir. İyonlaşma olayının ortamdaki elektron yoğunluğu n_e ile ve tekrar birleşme olayının da ortamdaki elektron ve iyon yoğunluklarının $n_e n_{iyon}$ çarpımıyla orantılı olduğu dikkate alınmalıdır. *MDGDM* sisteminde meydana gelen boşalma kanalında elektronların ve iyonların genel sayısı birbirine eşit olup boşalma aralığının iletkenliğini karakterize eden G ile orantılıdır. Pozitif ve negatif yüklerin dinamik denge ($n_e \approx n_i$ veya $G_e t \approx G(t)_{iyon}$) durumuna karşılık gelen bu durum, plazma kanalının *elektro-nötrlük* koşulu olarak tanımlanır. Bu hususların dikkate alınmasıyla birlikte, iki yalıtkanlı üç tabakalı seri *MDGDM* sisteminde meydana gelen boşalma kanalının iletkenliğini belirlemeye olanak sağlayan ifadeyi belirleyelim. Varsayalım ki, *MDGDM* sisteminde iyonlaşma olayının başlamasını takiben keyfi bir t anında ortamın elektriksel iletkenliği $G(t)$ 'dir. O halde yukarıdaki açıklamalar doğrultusunda, ortamda çarpışma suretiyle gerçekleşen iyonlaşma olayı ve dolayısıyla ortamın elektriksel iletkenlik değerindeki değişim miktarı, $\propto \frac{E}{p} G(t)$ ifadesiyle belirlenir. Burada $\propto \frac{E}{p}$ elektrik alan şiddeti ve ortamın basınç değerine bağlı olarak değişen etkin iyonlaşma katsayısıdır. Boşalma aralığında iyonlaşma olayı ve dolayısıyla birim zamanda eşit miktarda pozitif ve negatif yük yoğunluğu meydana gelir. Burada dikkat edilmesi gereken başlıca husus, iyonlaşmanın başlaması için *MDGDM* deney düzeneğinde elektrotlar sistemine uygulanması gereken kritik gerilim değerinin istatistiksel bir dağılıma sahip olmasıdır. Bu husustan dolayı anlık değişim sergileyen iyonlaşma olayına karşın, ortamın elektriksel iletkenlik değerindeki değişim miktarı $h U_g - U_d$ *Hevesaide* birim basamak fonksiyonu olmak üzere $\propto \frac{E}{p} . G t . h U_g - U_d$ ifadesi ile

orantılı olarak değişir. Boşalma ortamında pozitif ve negatif yükler arasında gerçekleşen tekrar birleşme olayı ve dolayısıyla ortamın elektriksel iletkenlik değerindeki değişim miktarı ise $\beta G(t)_e G(t)_{iyon}$ ifadesi ile orantılı olarak değişir. Bu durumda t ve $t + \Delta t$ zaman zarfında boşalma kanalının elektriksel iletkenliğindeki toplam değişim miktarı $\alpha \frac{E}{p} G t_1 h U_g - U_d \Delta t - \beta(t_1)_e G(t_1)_{iyon} \Delta t$ farkıyla orantılı olarak değişir. Burada $t_1 \in (t, t + \Delta t)$ ve $G(t_1)$ *MDGDM* sisteminde boşalma kanalının $G(t)$ ve $G(t + \Delta t)$ değerleri arasındaki bir elektriksel iletkenlik ara değeridir. Öte yandan bu değişim miktarı aşağıdaki ifadeyle tanımlanır.

$$G(t + \Delta t) - G(t) = \alpha \frac{E}{p} G t_1 \Delta t - \beta(t_1)_e G(t_1)_{iyon} \Delta t \quad (3.29)$$

Bu ifadede, boşalma kanalı iletkenliği $G(t)$ 'nin zamana göre değişiminin sürekli olduğu varsayılarak, $\Delta t \rightarrow 0$ limit değerine geçilirse, iki yalıtkanlı üç tabakalı seri *MDGDM* sisteminde meydana gelen boşalma kanalının dinamik iletkenliğini karakterize eden aşağıdaki diferansiyel denklem elde edilir:

$$\frac{dG}{dt} = \alpha \left(\frac{E}{p} \right) \cdot G \cdot h (|U_G| - U_d) + \beta \cdot G^2 \quad (3.30)$$

Denklem 3.29'daki G , boşalma kanalının iletkenliğini; α , iyonlaşma katsayısını; U_G , boşalma aralığının gerilimini; β , elektronların birleşme katsayısını ve h ise boşalmanın oluştuğunu veya oluşmadığını (varlığını veya yokluğunu) belirleyen ve birim basamak fonksiyonuna benzeyen *Hevesaide* fonksiyonunu karakterize eder.

Alınan Denklem 3.28 ve Denklem 3.30, tez çalışmamız sırasında elde edilen deneysel verilerin nümerik benzetimi için referans alınan temel denklemler olarak nitelendirilirler.

3.2.9. Bariyer Boşalmasının Nümerik Modeli

Bariyer boşalmasının nümerik modelini oluşturmak için temelde, sistemin eşdeğer devre denklemleri olan Denklem 3.28 ve Denklem 3.30'dan yararlanılmıştır. Bu denklemlerin *Euler* yöntemine bağlı olarak *FDTD* metoduyla genişletilmesi sonucu aşağıdaki nümerik denklemler elde edilmiştir:

$$\frac{Q^{n+1} - Q^n}{\Delta t} = f(U, Q), \quad (3.31a)$$

$$\frac{Q^{n+1} - Q^n}{\Delta t} = \frac{C_d}{C_d + C_g} \left(\frac{U}{R} + C_g \frac{dU}{dt} \right) - \frac{Q}{R(C_g + C_d)}, \quad (3.31b)$$

$$Q^{n+1} = Q^n + \Delta t \left[\frac{C_d}{C_g + C_d} \left(\frac{U}{R} + C_g \left(\frac{U^n - U^{n-1}}{\Delta t} \right) \right) - \frac{Q}{R(C_g + C_d)} \right]. \quad (3.31c)$$

Benzer şekilde iletkenlik denklemi için ise Denklem 3.30 genişletilerek aşağıdaki denklem takımları elde edilmiştir:

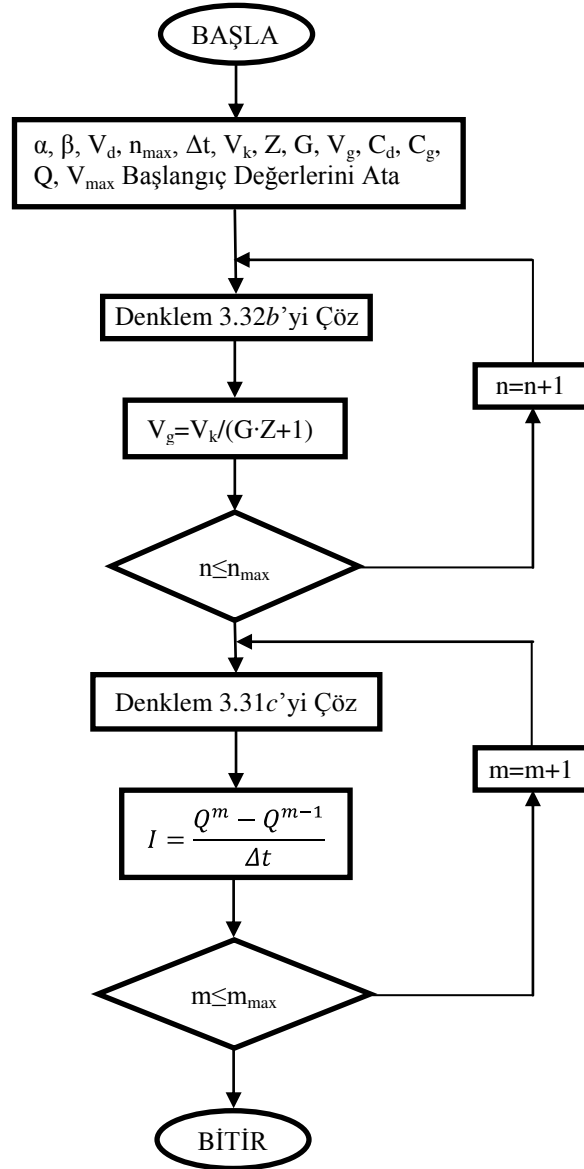
$$\frac{G^{n+1} - G^n}{\Delta t} = \alpha \cdot h \cdot G(U_g | -U) - \beta \cdot G^2, \quad (3.32a)$$

$$G^{n+1} = G^n + \Delta t \left[\alpha \cdot h \cdot G(U_g | -U) G^n - \beta (G^n)^2 \right]. \quad (3.32b)$$

Alınan Denklem 3.31c ve Denklem 3.32b'nin Ek 1'de verilmiş olan Matlab programı yazılarak, iki bariyerli üç tabakalı seri MDGDM sisteminin nümerik benzetimleri elde edilmiştir.

İki bariyerli üç tabakalı seri MDGDM sisteminin nümerik programı temelde iki aşamalı olarak yapılmıştır. Birinci aşamada *Hevesaide* fonksiyonuna bağlı olarak iletkenlik denklemi olan Denklem 3.32b çözülür ve programı yazılır. Bu çözümden alınan veriler kaydedilir. İkinci aşamada ise Denklem 3.31c'ye göre boşalmanın ana eşdeğer devre modelinin programı yazılır. Daha sonra birinci aşamada kaydedilmiş olan iletkenlik (G) değerleri bu ana programda dikkate alınarak ana program çalıştırılır. Programın çalıştırılması sonucunda gerilim, akım, yük ve *Gerilim-Akım* parametrelerinin nümerik benzetim grafikleri elde edilmiştir.

Denklem 3.31c ve Denklem 3.32b'nin nümerik çözümleri için hazırlanmış olan ve EK 1'de verilmiş olan Matlab programının algoritması (akış şeması) ise Şekil 3.14'te verilmiştir. Bu şemada verilen sıralamaya göre birinci adımda, oluşturulan program yardımıyla iletkenlik denklemi çözülür. İkinci adımda ise, alınan bu iletkenlik değerleri kullanılarak akım denklemi çözülür.



Şekil 3.14. DBB Eşdeğer Modelinin Nümerik Benzetim Programı Akış Şeması

3.2.10. DBB'nin Hava ve N₂ Gaz Ortamlarındaki Bazı Parametrelerinin Hesabı

Bariyer boşalmasının hava ve azot ortamlarında incelenmesi için oluşturulan eşdeğer modele göre bazı parametrelerin hesaplanması aşağıdaki denklemlerle sağlanabilir. Bu modele göre boşalmanın frekansı verilmiş olan Denklem 3.33 ile belirlenebilir [96, 97].

$$n = 2f \left[\frac{2 \left(\frac{C_d}{C_d + C_g} U_m - U_s \right)}{U_t - U_s} \right]. \quad (3.33)$$

Bu denklemde n , boşalma kanal sayısını; f , boşalmanın frekansını; C_d , eşdeğer kapasitansı; C_g , boşalma aralığının kapasitansını; U_m , sisteme uygulanan gerilimi; U_t , boşalmanın tutuşma gerilimini ve U_s ise boşalmanın sönümlenme gerilimini karakterize eder. Boşalmanın gücü ise aşağıda verilmiş olan Denklem 3.34 ile belirlenebilir [96, 97].

$$P = 2f C_d \left[U_m - \frac{C_d + C_g}{C_d} U_s \right] (U_t + U_s); \quad (3.34)$$

Denklem 3.34'ten görüldüğü gibi boşalmanın gücü frekansa, tutuşma ve sönümlenme gerilimlerine doğru orantılı olarak bağlıdır. Ayrıca elektrot aralığına ve bariyer tabakanın kalınlığına da dolaylı olarak bağlıdır.

Birim boşalmada oluşan yük miktarı da Denklem 3.35 ile hesaplanabilir. Bu denkleme göre boşalmanın yükü, boşalmanın tutuşma ve sönümlenme gerilimlerinin farkıyla orantılıdır. Aynı zamanda boşalmanın yükü, elektrotlar arası açıklığa bağlı olan kapasitans değeriyle de doğru orantılı olarak değişir [96, 97].

$$\Delta Q = (C_d + C_g)(U_t - U_s); \quad (3.35)$$

Boşalmada yarım periyotta elektrotlara iletilen yük ise Denklem 3.36 ile belirlenir. Denklemde, boşalmanın yükünü karakterize eden q_m ifadesinin boşalmanın gücüyle doğru orantılı olduğu görülmektedir.

$$2q_m = \Delta Q \cdot N_{T/2}; \quad (3.36)$$

Birim boşalmada açığa çıkan enerji miktarı da Denklem 3.37 ile belirlenir. Bu denkleme göre boşalmada açığa çıkan enerjinin, tutuşma ve sönümlenme gerilimlerinin karelerinin farkıyla orantılı olduğu görülmektedir. Ayrıca açığa çıkan enerji miktarı, elektrotlar arası açıklık ve bariyer tabakanın kalınlığı ile doğru orantılı olarak değişim gösterir.

$$\Delta W = \frac{1}{2} (C_d + C_g)(U_t^2 - U_s^2); \quad (3.37)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI

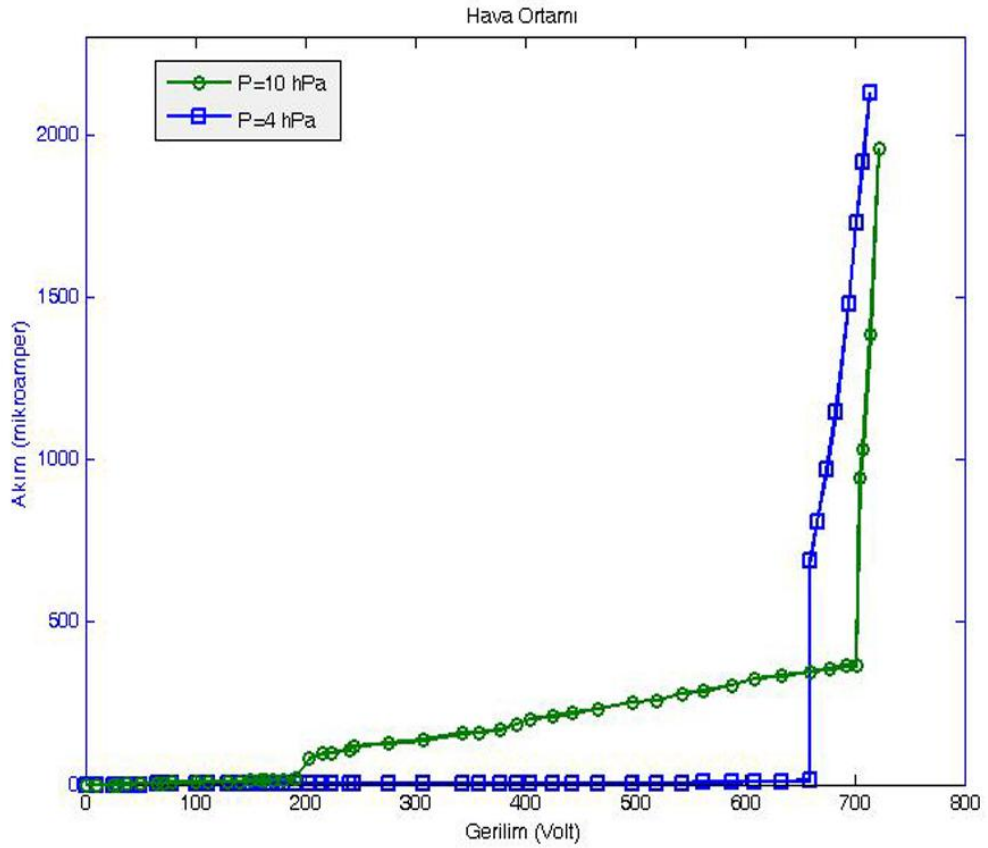
Bariyer boşalmasıyla ilgili günümüze kadar yapılan deneysel çalışmalarda farklı araştırmacılar, yaklaşımlarını boşalmayı karakterize eden esas parametrelerden biri olan $(pd)_{kr}$ parametresini hesaba katmadan değerlendirme yöntemini izlemişlerdir. Ayrıca DBB'nin modellenmesiyle ilgili bazı çalışmalar yapılmıştır fakat akımın kararsızlığının daha iyi açıklanabilmesi için mevcut modellemeler yetersiz kalmaktadır. Dolayısıyla bu tez çalışmasında, daha önce yapılan modellemelerden farklı bir yöntem olarak ilk kez boşalma kanalının iletkenliğinin hesaba katılmasıyla daha hassas sonuçlar verebilen yeni bir model geliştirilmiştir. *MDGDM* hücre modelinde, farklı bileşenler (değişik dielektrik bariyer tabakaları ve farklı gazlar) için farklı ortam koşullarında gerçekleşen boşalma olaylarına karşılık gelen deneysel *Gerilim-Akım* öz eğrisinin incelenmesi sonucu, elektrotlar sistemine uygulanan gerilimin belirli bir kritik değerinde sistem üzerinden geçen akım şiddetinin çok hızlı bir artışı görülmektedir. Bu durum, incelenen sistemde ortamın dinamik direncinin ve dolayısıyla da dinamik iletkenliğinin $G = \frac{1}{R}$ değişmesiyle açıklanabilir. Bu Bölüm'de genel olarak, dielektrikle sınırlı gaz aralığında gerçekleşen bariyer boşalmasının $(pd) < (pd)_{kr}$ ve $(pd) > (pd)_{kr}$ durumları için elektrot sistemine AC gerilimin uygulanması durumunda, gaz aralığında gerçekleşen boşalmanın statik ve dinamik *Gerilim-Akım* öz eğrileri ve *Gerilim-Yük* karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiş olup, elde edilen bazı önemli karakteristik eğrilerin nümerik benzetimi yapılarak gerekli karşılaştırmalar yapılmıştır.

4.1. Bariyer Boşalmasının Deneysel Ölçümler Sonucunda Elde Edilmiş Olan *Gerilim-Akım* Öz eğrileri

Bariyer boşalmasının parametrelerinin belirlenebilmesi ve daha iyi modellenebilmesi için *Gerilim-Akım* öz eğrilerinin belirlenmesi büyük önem arz etmektedir. Bu eğrilerin belirlenmesi için İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'ndeki Yüksek Gerilim Araştırma laboratuvarında özel olarak hazırlanan deney sisteminden yararlanılmıştır. Sistem üzerindeki parametrelerin uygun olarak ayarlanmasıyla, gerekli olan yüksek gerilim sağlanarak, hazırlanmış olan elektrot sistemi yardımıyla istenilen boşalma işlemi gerçekleştirilmiş olup, gerekli olan ölçümler yapılarak boşalmanın bazı önemli parametreleri elde edilmiştir.

4.1.1. DBB'nin $pd < pd_{kr}$ Değerlerinde Ölçülen Gerilim-Akım Özeğrileri

Bariyer boşalmasının hava ortamında ve $pd < pd_{kr}$ değerlerindeki Gerilim-Akım ($V-I$) karakteristikleri iki kanallı osiloskop yardımı ile sağlanmıştır. Bunun için osiloskopun dikey saptırıcı eksenine $i(t)$ sinyali, yatay saptırıcı eksenine ise $u(t)$ sinyali uygulanmıştır. Bu durumda sistemin şönt direnci R_v , kapasite değeri $1 \mu F$ olan kondansatör ile değiştirilmiştir. Bu yöntemle elde edilen Gerilim-Akım karakteristiği örneği Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Grafik üzerinde gösterilen 10 hPa basıncındaki eğriyi oluşturan ölçüm değerleri çok küçük değerlerde olduğu için, bir $k=12.9$ katsayısı ile çarpılmıştır. Bunun nedeni, eğrinin grafik üzerinde daha belirgin olarak görünmesini sağlayarak doğru bir karşılaştırma yapmayı sağlamaktır.

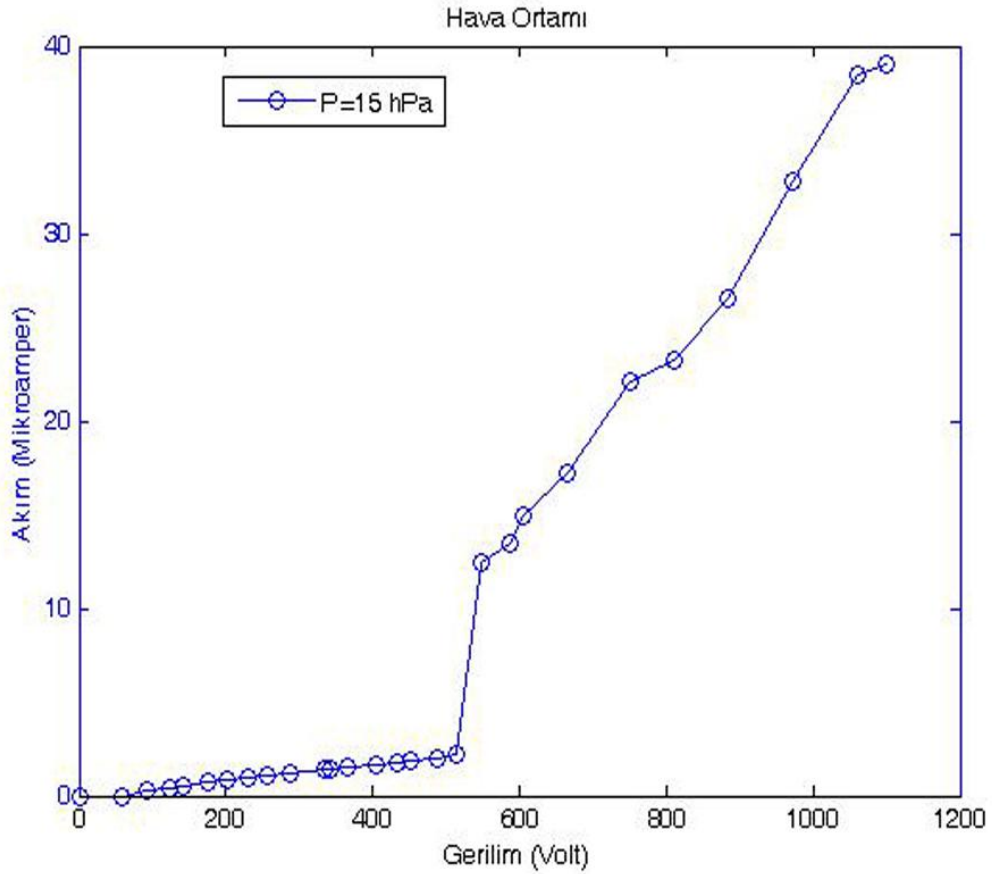


Şekil 4.1. DBB'nin hava ortamında ve $pd < pd_{kr}$ değerlerindeki $V-I$ karakteristikleri

Grafikten de görüldüğü gibi hava ortamında ve $p=4$ hPa basıncındaki egride, gerilimin yaklaşık $V=715$ volt olması durumunda boşalma başlamıştır. Bu durumdaki akımda, artma yönünde hızlı bir sıçrayış gözlenmiştir. Aynı ortamın $p=10$ hPa basınç değerlerinde ise gerilim $V=200$ volt değerlerinde iken boşalma gerçekleşmiştir.

Bariyer boşalmasının *Gerilim-Akım* ($V-I$) karakteristiği genel durumda basamak şeklindeki bir yapıya sahiptir. Gerilimin sıfırdan başlayarak boşalmanın başlangıç gerilimi sınırına kadar olan bölgede grafiğin değişimi Ohm Kanunu'yla uyuşacak şekilde değişir. Ancak boşalmanın tutuşmasıyla birlikte akım kararsız bir şekilde artarak keskin bir sıçrayış gösterir. Kaynağın gücünün yeterli olması ve gerilimin daha da artırılması sonucu boşalma daha da kuvvetlenerek ark olayı meydana gelir.

Hava ortamında gerçekleşen DBB'nin $p=15$ hPa basıncındaki *Gerilim-Akım* karakteristiği Şekil 4.2'de verilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi yaklaşık olarak $V=530$ volt gerilim değerinde boşalmanın başladığı gözlenmiştir. Gerilimin artan değerleriyle beraber akım değeri de basamak şeklindeki ani bir sıçrayışla artarak değişim göstermiştir.



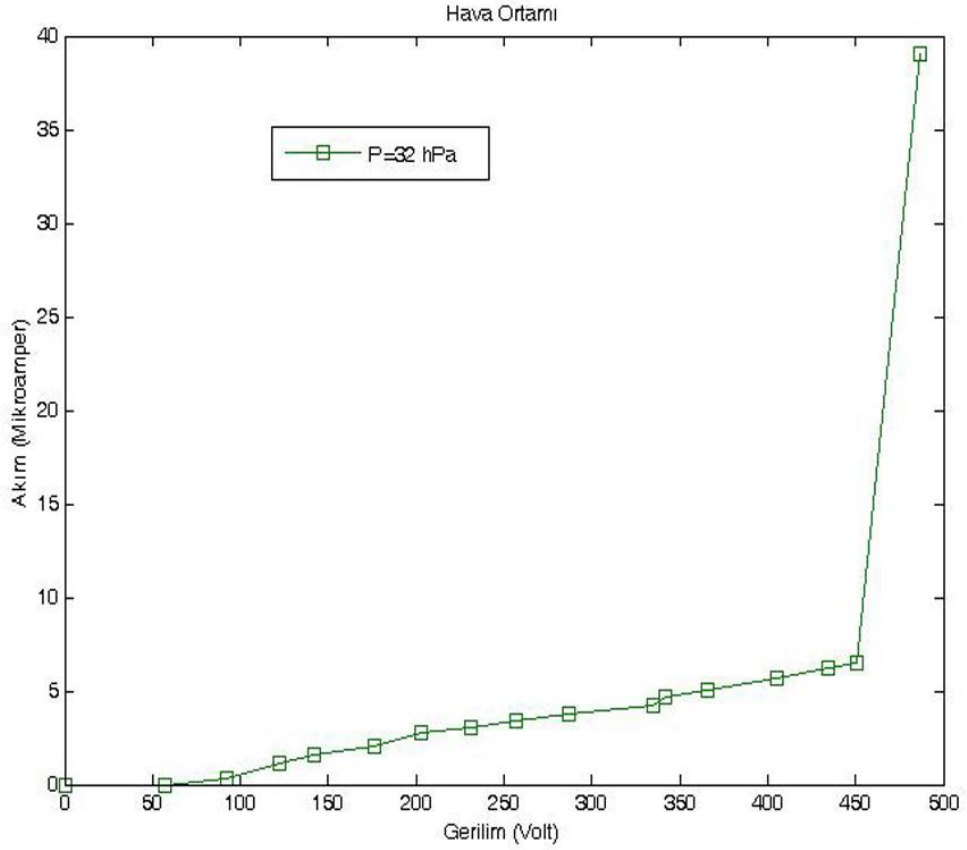
Şekil 4.2. DBB'nin hava ortamındaki $pd < pd_{kr}$ değerindeki $V-I$ karakteristiği

Elektrik gaz boşalmalarının tutuşma ve sönümlenme gerilimleri daima birbirinden farklıdır. Genel durumda boşalmanın tutuşma gerilimi, sönümlenme geriliminden daha yüksektir. Bunun nedeni, elektrik alanının etkisiyle ortamda oluşan dinamik yüklerin

davranışlarıdır. Boşalmanın tutuşmasıyla birlikte ortamda bir plazma kanalı oluşur ve ortam yükleri tamamen aktif hale gelir. Gerilimin azaltılması ve tutuşma gerilimi seviyesinin altına düşürülmesi halinde boşalma belli bir süre daha yanmaya devam ederek kendi kendini besler. Gerilimin daha da azaltılarak sönümlenme değerinin altına indirilmesi sonucunda boşalma sönümlenir. Buradan varılan sonuca göre boşalmanın etkisiyle ortamda oluşan uzay hacim yüklerinin, boşalma mekanizması üzerinde önemli bir etkiye sahip oldukları görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken diğer bir önemli nokta ise boşalmanın başlamasıyla birlikte oluşan akım osilasyonlarının, dış gerilimin sinüsoidal olmasının aksine sinüsoidal olmayan bir davranış göstermesidir. Bunun nedeni ise büyük olasılıkla, ortamda aktif hale gelen uzay hacim yüklerinin homojen olmayan kararsız davranışları ve boşalma aralığının kapasitif etkisidir.

4.1.2. DBB'nin $pd > pd_{kr}$ Değerlerinde Ölçülen Gerilim-Akım Özeğrileri

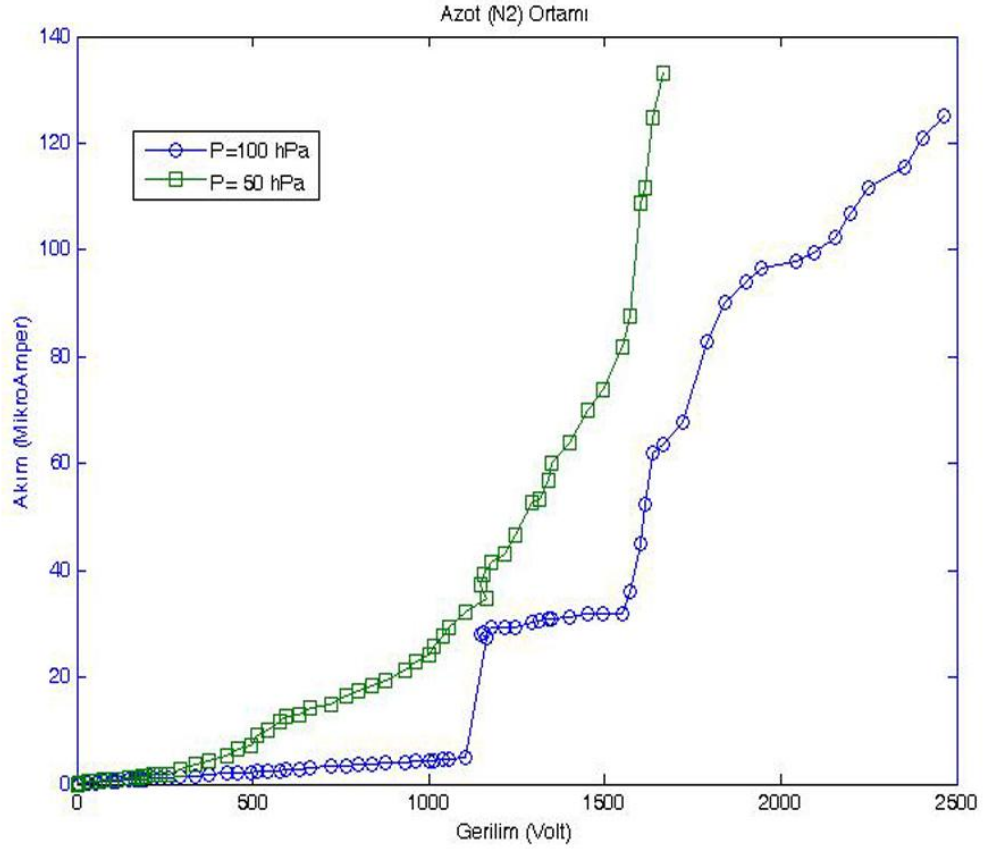
Bariyer boşalmasının $pd > pd_{kr}$ değerlerindeki hava ortamında elde edilmiş olan Gerilim-Akım ($V-I$) karakteristiği Şekil 4.3'te gösterilmiştir. Grafikten de görüldüğü gibi, basıncın yüksek değerlerinde boşalma başlangıç gerilimi önceki koşullara ($pd < pd_{kr}$) göre daha düşük seviyelere inmiştir ($U_b \approx 440$ v). Şekildeki grafikte, hava ortamında gerçekleşen bariyer boşalmasının, basıncın $p=32$ hPa değerindeki etkisini incelemek amacıyla deneysel olarak ölçülmüş olan Gerilim-Akım eğrisi verilmiştir. Şekilde verilen $p=32$ hPa eğrisinin ölçülen akım değerlerinin daha belirgin görünebilmesi için bu değerler, bir $k=2.86$ katsayısıyla çarpılmıştır. Basıncın yüksek değerlerinde boşalma başlangıç gerilimi daha küçük olduğu için boşalma daha erken başlamaktadır. Kaynağın gücünün sınırlı olması nedeniyle gerilimin yüksek değerlerinde ölçüm alınması pratik açıdan oldukça zordur. Çünkü gerilimin ve pd 'nin büyük değerlerinde, boşalma büyük akımlara sahip olur ve bu tür durumlarda boşalma, tahrip gücü yüksek olan Ark moduna geçebilir. Dolayısıyla böyle durumlarda boşalma, incelenen Townsend modunun dışına çıktığı için, doğru ölçüm alınması oldukça zor olmaktadır. Basıncın $p=32$ hPa değerinde ölçülmüş olan Gerilim-Akım eğrisinde, gerilimin 550 volttan büyük değerlerinde eğrinin düzgün alınamamasının nedeni, akım kararsızlıklarının yüksek değerlerde olmalarından kaynaklanmaktadır. Ayrıca basıncın ve gerilimin yüksek değerlerinde boşalma akımı da çok yüksek değerlere ulaşacağı için, bu akımlar elektrot sistemini tahrip ederek hassasiyetini bozabilir. Dolayısıyla böyle bir durumda kararlı ölçüm yapmak oldukça zordur.



Şekil 4.3. DBB'nin hava ortamında ve $pd > pd_{kr}$ değerindeki $V-I$ karakteristiği

Bariyer boşalmasının azot gazı ortamında ve $pd > pd_{kr}$ değerlerinde ölçülmüş olan Gerilim-Akım eğrileri Şekil 4.4'te verilmiştir. $pd > pd_{kr}$ koşulundaki basıncın iki farklı değerinde ölçülmüş olan grafiklere göre boşalma başlangıç gerilim değerinin, basıncın artmasıyla birlikte tekrardan arttığı gözlenmiştir. Bunun nedeni, boşalma ortamındaki serbest yük taşıyıcılarının sayısının artması ve buna bağlı olarak bu yük taşıyıcılarının serbest hareket yollarının azalması olabilir. Bu durum ayrıca, Basınç-Gerilim değişimini gösteren Paschen Eğrisi'ni doğrulamaktadır. $p=100 \text{ hPa}$ basınç değerinde alınmış olan eğride, gerilimin belirli bir değere kadar ($V=1550 \text{ Volt}$) lineer arttırılmasıyla birlikte boşalma akımı da Ohm kanununa uyumlu bir şekilde lineer olarak artmaktadır. Gerilimin yaklaşık $V=1145 \text{ volt}$ değerinde ise boşalma başladığı için akım ani bir sıçrayış göstermiştir. Gerilimin daha da arttırılmasıyla birlikte boşalma akımı tekrar lineer bir artış göstermekte ve gerilimin artarak $V=1550 \text{ volt}$ değerini aşması durumunda ise boşalma akımı ikinci kez ani bir sıçrayışla artmıştır. Bu durumdaki grafik basamak şeklindeki bir yapıya sahip olup teorik hesaplamaları ve varsayımları doğrulamaktadır. Şekilde verilen $p=50 \text{ hPa}$ basıncındaki boşalma eğrisinin tutuşma gerilimi ise $V=376$

volt olarak ölçülmüştür. DBB'nin azot ortamında ve $pd > pd_{kr}$ koşulundaki iki farklı basınç değerinde incelenmesi sonucunda, basıncın boşalma başlangıç gerilimi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu açıkça görülmüştür.

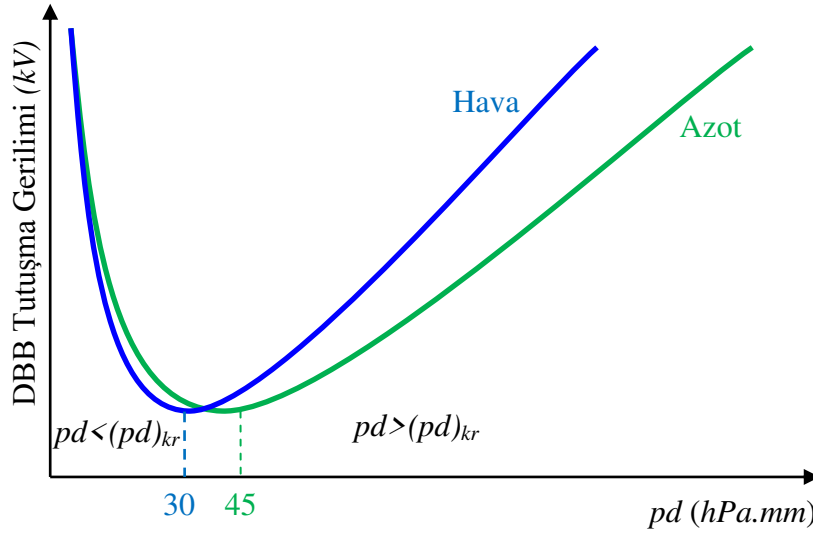


Şekil 4.4. DBB'nin azot ortamında ve $pd > pd_{kr}$ koşulundaki V-I karakteristikleri

4.1.3. pd 'nin DBB Tutuşma ve Sönümlenme Gerilimleri Üzerindeki Etkisi

Boşalmanın tutuşma ve sönümlenme gerilim değerlerini etkileyen önemli faktörlerden biri de ortamın basınç değerine bağlı olan pd (*basınç ile elektrotlar arası açıklığın çarpımı*) değeridir. DBB tutuşma geriliminin pd 'ye bağlı değişimini gösteren ve Paschen Eğrisi olarak da adlandırılan grafik Şekil 4.5'te verilmiştir. Bu grafiğe göre, sabit elektrot açıklığında ($d=\text{sabit}$) ve $pd < (pd)_{kr}$ durumundaki düşük basınç değerlerinde boşalma yüksek tutuşma gerilimine sahip iken, yüksek basınç değerlerinde bu değer daha düşüktür. Ayrıca sabit elektrot açıklığında ve çok yüksek basınç değerlerindeki $pd > (pd)_{kr}$ durumunda ise bu olayın tam tersi bir durum söz konusudur. Yani $(pd)_{kr}$ noktasına yakın noktalarındaki yüksek basınç değerlerinde boşalma başlangıç gerilimi

düşük iken bu noktaya uzak olan yüksek basınç değerlerinde, boşalma başlangıç gerilim değeri daha yüksek olur. Dolayısıyla deneysel sonuçlara göre boşalmanın başlangıç geriliminin, parabolik karaktere sahip olan Paschen Eğrisi'yle uyumlu olarak değiştiği sonucuna varılmıştır. Bu eğrinin kritik noktalarının belirlenebilmesi için çok sayıda deney yapılmış olup alınan sonuçların ortalama değeri alınarak $(pd)_{kr}$ noktası belirlenmiştir. Tez çalışmamızda deneysel olarak elde ettiğimiz bu kritik değerler, hava için yaklaşık olarak $(pd)_{kr} = 30 \text{ hPa.mm}$; ve azot gazı için ise $(pd)_{kr} = 45 \text{ hPa.mm}$ 'dir.



Şekil 4.5. DBB tutuşma geriliminin pd 'ye bağlı değişimini gösteren Paschen Eğrisi

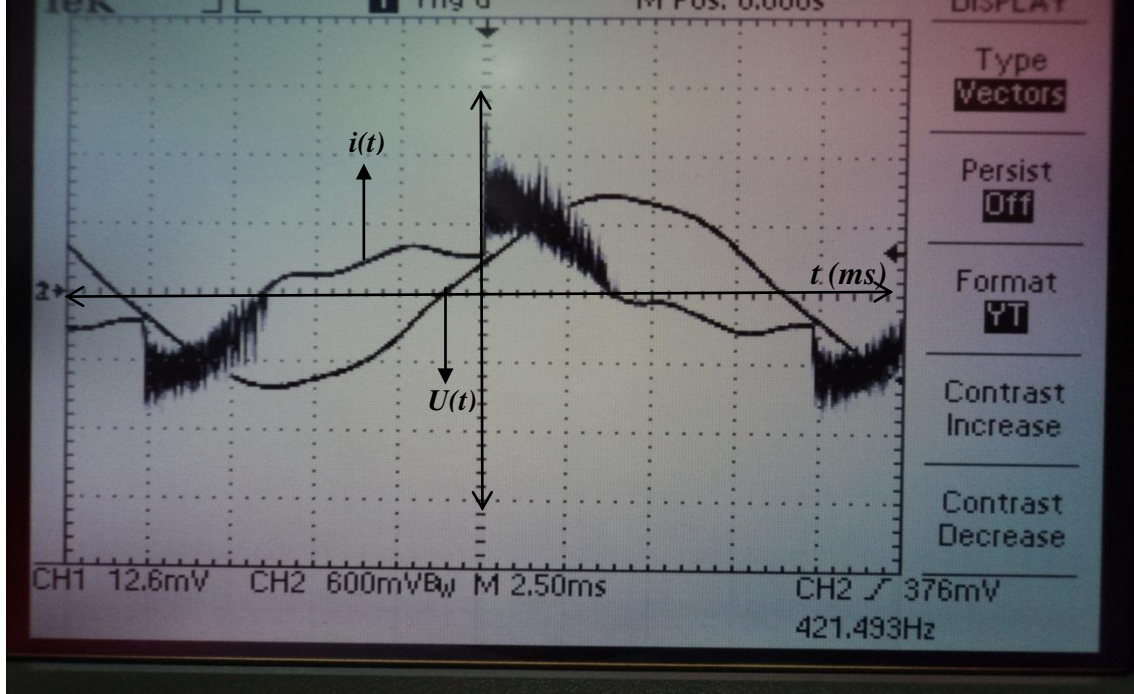
4.2. DBB'nin Deneysel Olarak Görüntülenen Gerilim-Akım Osilasyonları

Tez çalışmamızın bu kısmında DBB ile ilgili farklı basınç değerlerinde ve farklı gaz ortamlarında yapılmış olan deneysel çalışmalar sonucunda osiloskop yardımıyla elde edilmiş olan *Gerilim-Akım* ve *Gerilim-Yük* osilasyonlarının görüntüleri verilmiştir.

4.2.1. R_v Direncinin Devrede Olması Durumunda Görüntülenen Osilasyonlar

Bariyer boşalmasının akım osilasyonlarının görüntülenebilmesi için osiloskobun ölçüm probu uygulamanın türüne bağlı olarak direnç ya da kondansatör üzerine bağlanarak gerekli ölçümler alınabilir. Boşalmanın başlaması durumunda R_v direnci üzerinden alınan gerilim ve akım osilasyonlarının görüntüleri Şekil 4.6'da verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi, hava veya azot gazı ortamında gerçekleştirilen boşalmanın tutuşmasıyla birlikte, boşalmanın akım dalgasının pozitif ve negatif polariteleri üzerinde yüksek frekanslı osilasyonlar meydana gelmiştir. Bu osilasyonlar, sisteme uygulanan

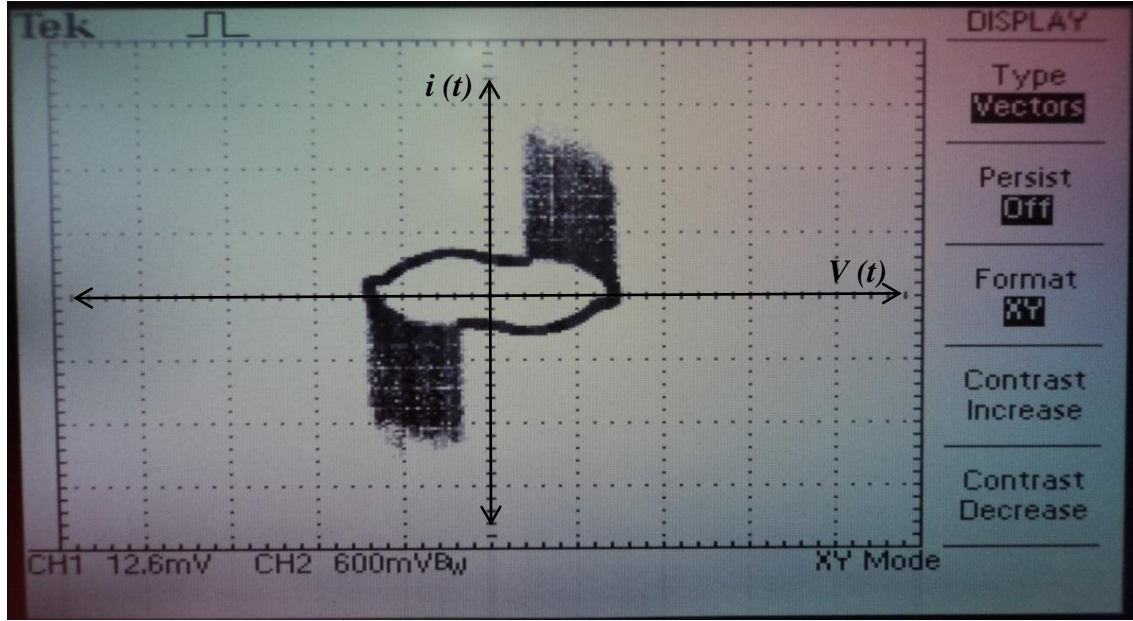
gerilimin arttırılmasıyla birlikte artarak gelişir ve gerilimin azaltılması sonucu boşalmanın sönümlenmesiyle birlikte yok olurlar. Uygulamada bu osilasyonların her birine “*Trichell Pulse*” adı verilir.



Şekil 4.6. R_v direnci üzerinden alınan $V-I$ osilasyonlarının zamana bağlı değişim eğrileri

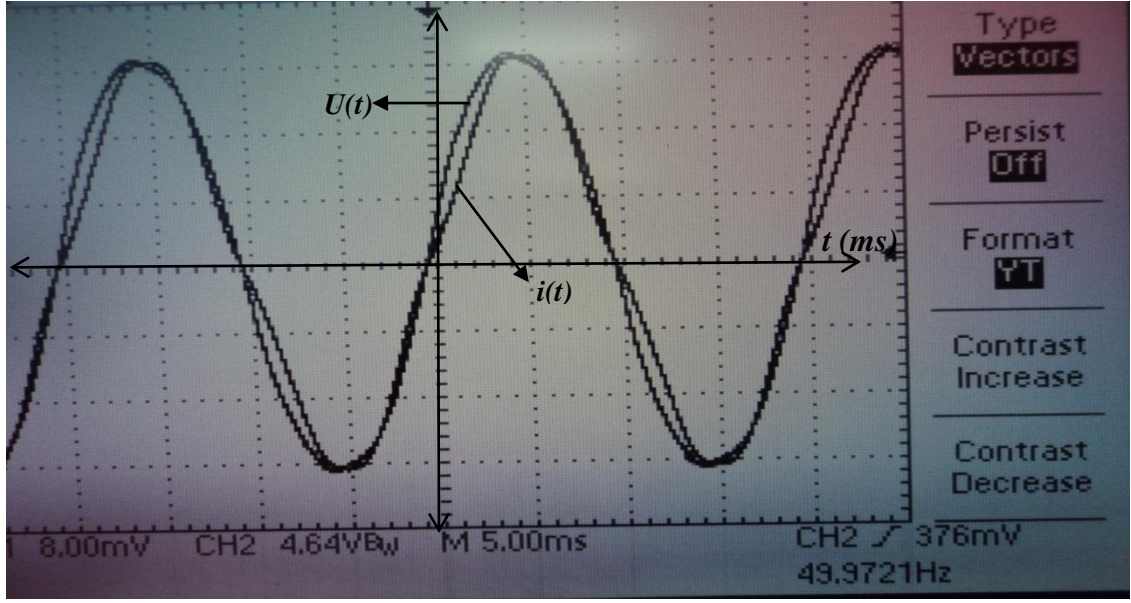
Belirli bir gaz ortamında elektrot sistemine uygun değerde bir AC gerilim uygulanmasıyla gerçekleştirilen boşalmanın karakteristiğini belirlemek için akım osilasyonlarının incelenmesi en doğru yol olarak düşünülmektedir. Ancak bu osilasyonların kararsız davranışları ölçüm alma işlemini oldukça zorlaştırmaktadırlar. Osilasyonların kararsızlıklarına yol açan temel sebep ise artan gerilime bağlı olarak, boşalma ortamındaki uzay hacim yüklerinin kararsız ve düzensiz davranışlarıdır. Gerilimin arttırılmasıyla birlikte elektrot aralığında belirli bir elektriksel alan oluşur ve gerilimin delinme gerilimi sınırını aşması durumunda boşalma işlemi gerçekleşir. Tutuşan boşalmanın kararlılaşması durumunda, sisteme uygulanan gerilimin arttırılmasıyla birlikte, başlangıçta pasif bir davranış sergileyen uzay hacim yükleri aniden aktif hale geçerek düzensiz ve kararsız bir şekilde hareket etmeye başlarlar. Bu yüklerin kararsız hareketleri, dış elektrik alanına, artma ve azalma şeklinde bir etki göstererek kararsız yapıdaki akım osilasyonlarının oluşmasına neden olurlar. Bu osilasyonların $x-y$ modunda alınmış görüntüleri Şekil 4.7’de verilmiştir. Bu görüntüye

göre akım osilasyonları elipsoidal şekildeki eğrinin kenar kısımlarında tutuşmaktadırlar. Ortamın pd değerinin değiştirilmesiyle birlikte bu osilasyon gurupları, elipsoidin kenarı üzerinden bir uçtan diğer uca doğru kayarak yer değiştirirler. Daha sonra pd değerinin daha da arttırılmasıyla beraber elipsoidin alt kenarına doğru kayarak faz değiştirirler.



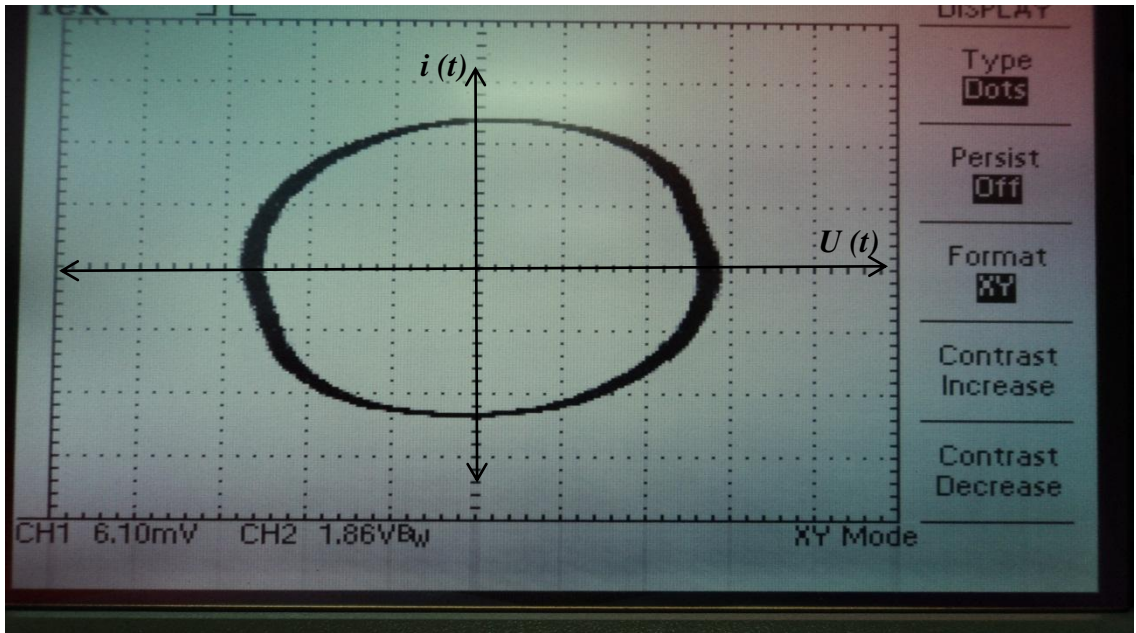
Şekil 4.7. R_v direnci üzerinde meydana gelen osilasyonların V - I grafiği

Boşalmanın henüz tutuşmadığı ve gerilimin belirli bir değere kadar arttırılmasıyla birlikte, sistemdeki R_v direnci üzerinden alınan ölçümlere ait grafik Şekil 4.8’de verilmiştir. Bu durumda devrede sadece R_v direnci olduğu için devre omik özelliklidir ve grafikten görüldüğü gibi sisteme uygulanan gerilim ile boşalma akımı arasındaki faz farkı sıfırdır. Bu eğriler sistemin zamana bağlı olarak değişen *Gerilim-Akım* karakteristikleri olarak adlandırılırlar. Şekildeki akım ($i(t)$) eğrisi üzerinde görülen hafif bozulma, sistemde çok zayıf bir boşalmanın yanmakta olduğunu ifade eder. Bu durumda sistemden çok küçük değerlerde (*pikoAmper* seviyelerinde) bir akım geçtiği için sistemdeki güç kaybı çok küçüktür. Elektrotlar arasında aktif hale gelen yüklü parçacıklar ise dış elektrik alanının kontrolünde yönleneren elektrot yüzeylerinde tabaka şeklindeki bir dağılıma sahip olurlar. Dış elektrik alanının yüklü parçacıklar üzerinde oluşturduğu kuvvetin etkisiyle, aralıktaki yüklerin bir kısmı, yüzeyde bir tabaka şeklinde yayılırken, diğer bir kısmı ise dielektrik tabaka üzerine absorbe olurlar. Bu durumda sistemin pd değeri sabittir. Bu çalışma kapsamında alınan ölçümler için deney devresi üzerindeki R_v direncinin en uygun değeri $R_v=50\text{ k}\Omega$ olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.8. Sistemin omik durumdaki *Gerilim-Akım* eğrilerinin zamana göre değişimi

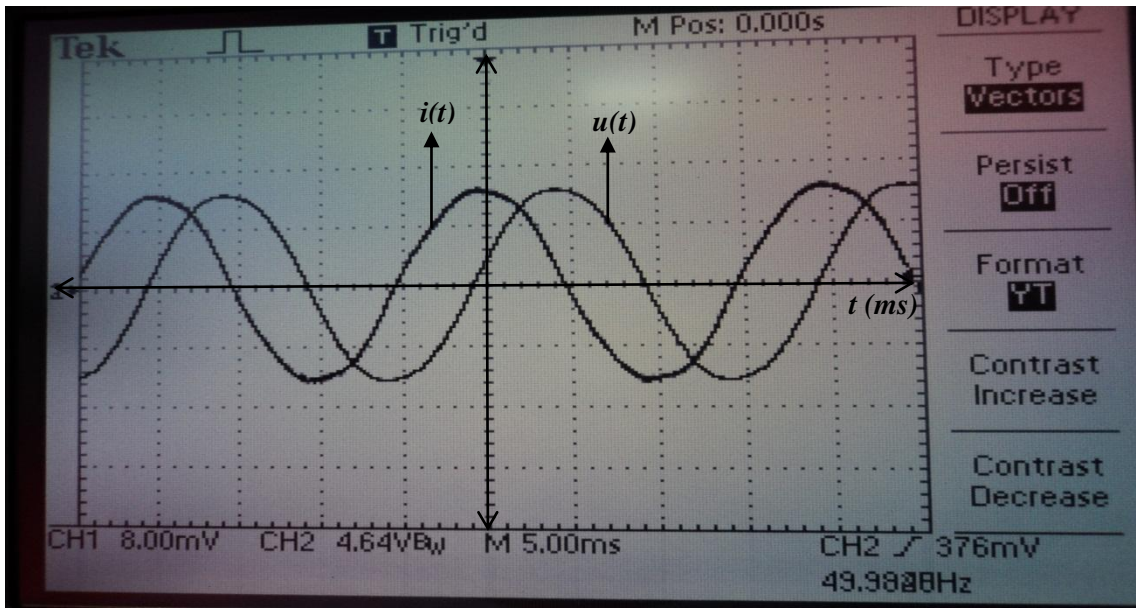
Deney devresinin omik özellikte olduğu durumda alınan *Gerilim-Akım* eğrilerinin, osiloskobun *x-y* konumundaki görüntüsü ise Şekil 4.9’da verilmiştir. Bu durumda boşalma yokken, grafik bir elips şeklinde olup akım osilasyonları henüz oluşmamıştır. Gerilimin değiştirilmesiyle beraber elipsoidin yarıçapları da buna paralel olarak aynı oranda değişir. Boşalmanın bu koşullardaki *Gerilim-Akım* eğrisi, Ohm Kanunu’nuyla uyumlu bir şekilde değişim gösterir.



Şekil 4.9. Sistemin omik devre durumunda oluşan osilasyonların *V-I* grafiği

4.2.2. C_v Kondansatörünün Devrede Olması Durumunda Görüntülenen Osilasyonlar

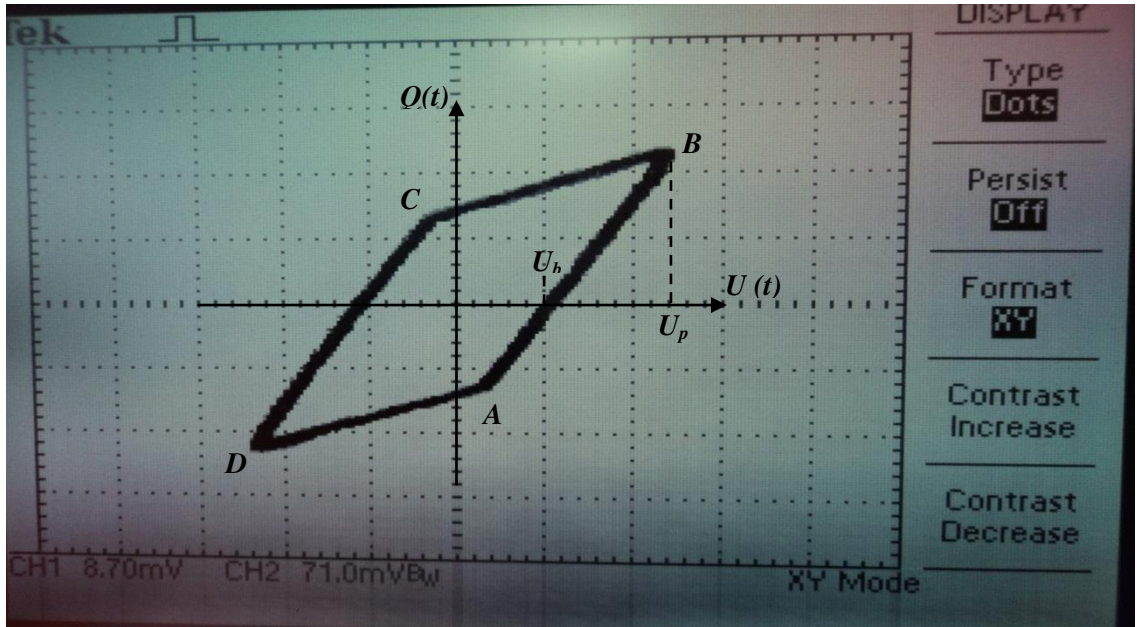
DBB sisteminin C_v kondansatörü üzerinden ölçülen değerler sonucu görüntülenmiş olan *Gerilim-Akım* eğrileri Şekil 4.10'da verilmiştir. Bu durumda sistem kapasitif özellikli olduğu için, şekilden de görüldüğü gibi *Gerilim-Akım* eğrileri arasında 90° faz farkı meydana gelmiştir. Başlangıçta sisteme uygulanan gerilim boşalma başlangıç geriliminden daha düşük olduğundan dolayı elektrot aralığında herhangi bir osilasyon gözlenememiştir. Çünkü böyle bir durumda uzay hacim yükleri pasif haldedir. Gerilimin artırılarak boşalma başlangıç gerilimi seviyesini aşması halinde ise boşalma tutuşur ve sistem üzerinden kapasitif özellikli bir akım akar. Sisteme bağlı kondansatör üzerinden alınan bu ölçüm değerleri, sistemin *Gerilim-Yük* karakteristiğinin elde edilmesine olanak sağlar.



Şekil 4.10. C_v kondansatörü devredeyken, $V-I$ grafiklerinin zamana bağlı değişimleri

Kapasitif devre durumunda alınmış olan *Gerilim-Akım* eğrisinin $x-y$ konumundaki görüntüsü ise Şekil 4.11'de verilmiştir. Bu durumdaki ölçümlerden hareketle sistemin *Gerilim-Yük* karakteristiği elde edilebilir. Şekilden de görüldüğü gibi kapasitif devre durumunda alınan grafik bir paralelogram şeklindedir. Uygulamada bu paralelograma Lissajous Diyagramı da denir. Gerilim değerinin artırılıp azaltılmasıyla birlikte paralelogramın alanı genişleyip daralmaktadır. Genel durumda paralelogram şeklindeki *Gerilim-Yük* karakteristiğinin alanı, sistemde harcanan gücü ifade eder. Paralelogram

şeklinin düzgün olması ise boşalmanın kararlı olduğu anlamına gelir. DBB'nin Şekil 4.11'de verilmiş olan grafiğinden yararlanarak boşalmanın gücü, her yarım periyotta iletilen yük miktarı, her yarım periyottaki boşalma süresi, tutuşma ve sönümlenme gerilimlerinin değerleri gibi elektriksel parametreler hesaplanabilir. Şekildeki paralelkenarın AB ve CD kenarları, boşalmanın tutuştuğunu ifade ederler. Benzer şekilde BC ve DA kenarları da boşalmanın oluşmadığı fazı karakterize etmektedirler. A ve C noktaları ise sırasıyla pozitif ve negatif alternaslardaki boşalmanın tutuşma zamanını karakterize ederler ve bu zamana karşılık gelen tutuşma geriliminin değeri U_b ile karakterize olunur. Benzer şekilde B ve D noktaları ise sırasıyla pozitif ve negatif polaritedeki boşalmanın sönümlenme zamanını karakterize ederler ve bu zamana karşılık gelen sönümlenme geriliminin değeri ise U_p ile gösterilir. AB ve CD kenarlarının birbirlerine paralel olması, boşalma sırasında elektrotlar arasındaki gerilimin sabit olduğu anlamına gelir. Bu durumda paralelogramın genişliği aralıktaki tutuşma geriliminin iki katına eşit olur. Paralelogramın yüksekliği ise elektrot sistemine uygulanan gerilimin genliğini karakterize eder. Şekil 4.11'de verilmiş olan *Gerilim-Yük* karakteristiğinden yararlanarak DBB parametrelerinin belirlenme yöntemleri ile ilgili detaylı açıklamalar tez çalışmamızın 4.3 Kısımında verilmiştir.



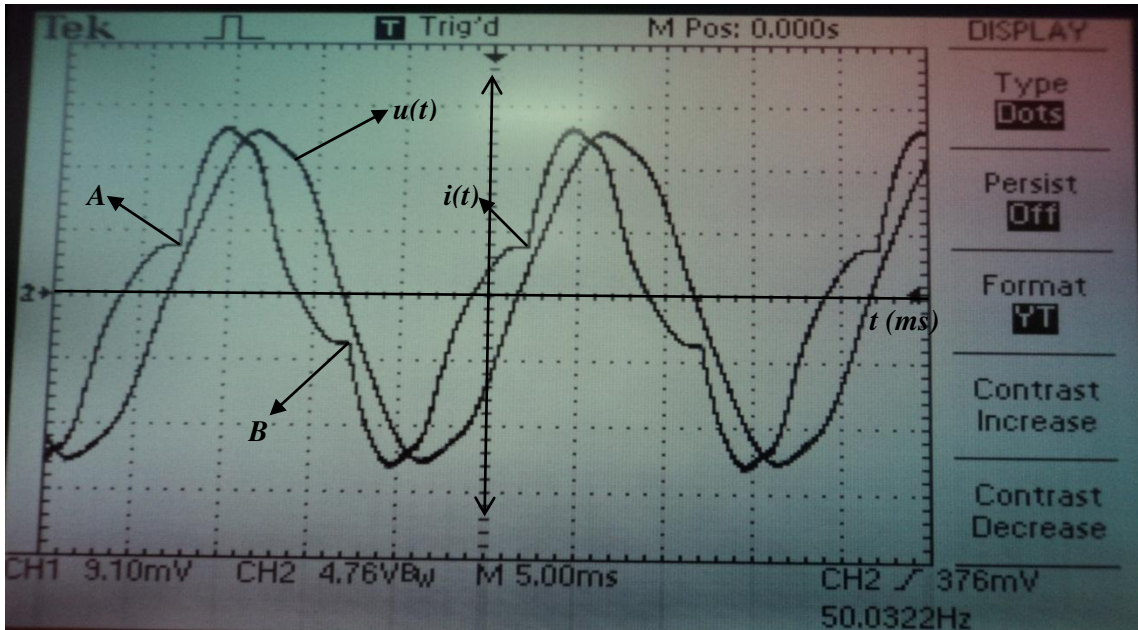
Şekil 4.11. DBB'nin *Gerilim-Yük* eğrisinin karakteristik görüntüsü

Manley ve *Philipov-Yemelyanov*'un [98–99]'da yaptıkları çalışmalarda, bariyer boşalmasının dinamik karakteristiklerini detaylı olarak incelemişlerdir. Bu

araştırmacılar, boşalmanın *Gerilim-Yük* karakteristiğinin paralelkenar şeklinde olduğunu deneysel olarak göstermişlerdir. Çalışmalarında ayrıca, paralelkenarın düşey kenarlarının birbirine paralel olması durumunu, boşalma sırasında ateşleme geriliminin sabit olduğu şeklinde yorumlamışlardır. Oysa *Golubovskii*, *Maierov* ve *Behnke* ise, gaz aralığında gerçekleşen bariyer boşalmasının ayrı ayrı osilasyonlar (impulsler) şeklinde gerçekleştiğini ve her bir boşalma sonrasında, ateşleme geriliminin azalarak sıfıra kadar düştüğünü belirtmişlerdir [100].

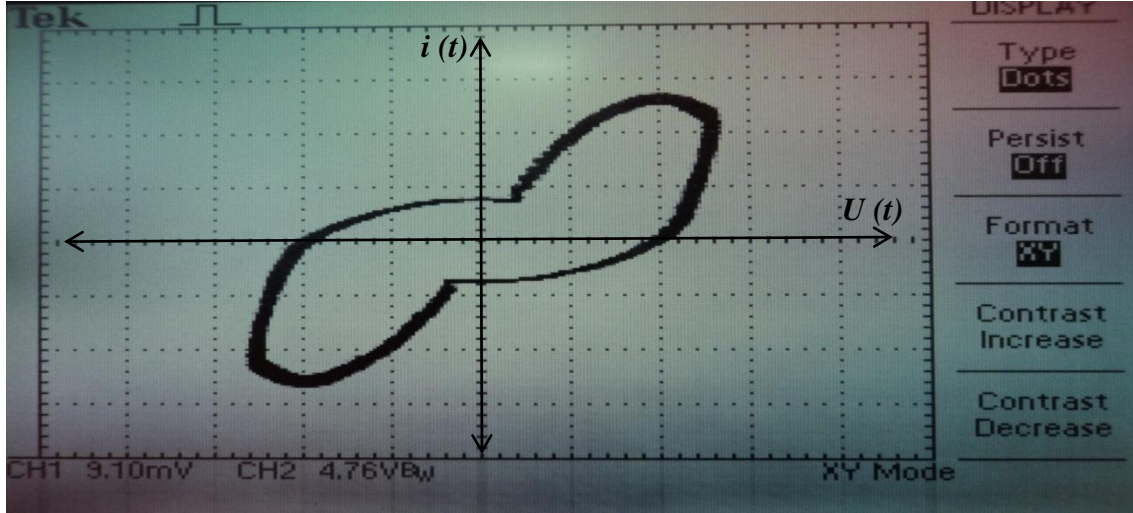
4.2.3. R_v Direnci ve C_v Kondansatörünün Birlikte Devrede Olması Durumunda Görüntülenen Osilasyonlar

DBB deney sistemindeki boşalma hücresinin çıkışına bağlı bulunan direnç ve kondansatörün beraber devrede oldukları durumda görüntülenen *Gerilim-Akım* karakteristikleri Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekilden görüldüğü gibi ölçülen toplam akımın osilasyon biçimi, biri rampa ve diğeri ise pik olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır. Bu akımların rampa kısmı deplasman akımını (kapasitif etki sonucu oluşan akım) ve pik kısmı ise boşalma akımını karakterize etmektedir. Akım eğrisinin pozitif ve negatif alternansları üzerindeki *A* ve *B* noktaları ise boşalmanın tutuşmaya başladığı noktalarlardır. Sistemin bu durumdaki ölçüm kondansatörü ve ölçüm direncinin değerleri ise sırasıyla $C_v=0,033 \mu F$ ve $R_v=50 k\Omega$ ’dur.



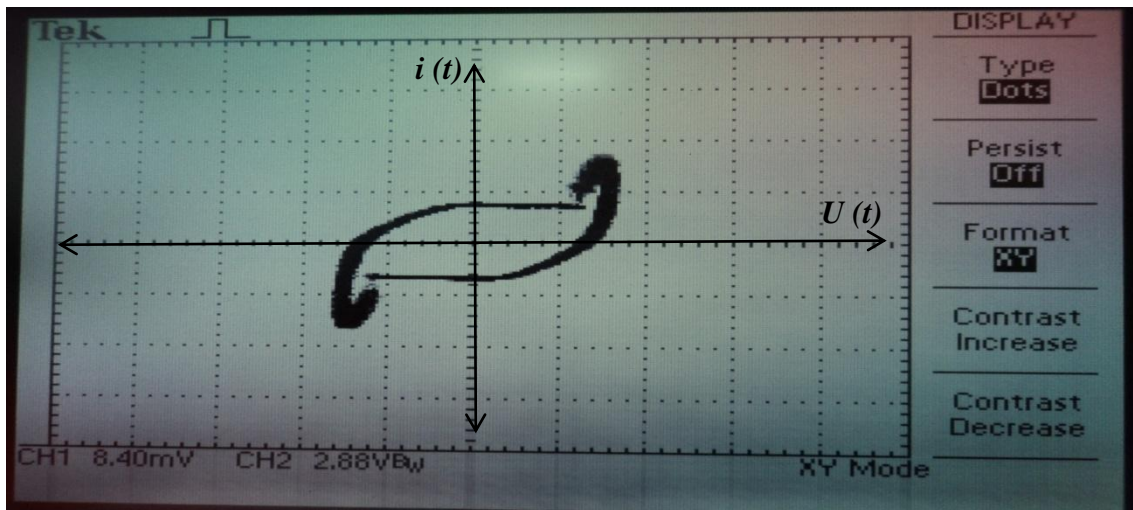
Şekil 4.12. Sistemde R_v ve C_v kondansatörü birlikte devredeyken alınan *Gerilim-Akım* grafiklerinin zamana bağlı değişimleri

Sistemin, yukarıda verilmiş olan parametrelere karşılık gelen *Gerilim-Akım* eğrilerinin x - y konumundaki görüntüleri ise Şekil 4.13'te verilmiştir. Deneysel olarak alınan bu eğriye karşılık gelen akım değerlerinin integrasyonundan hareketle, DBB'nin Q - yük karakteristiğini belirlemek mümkündür.



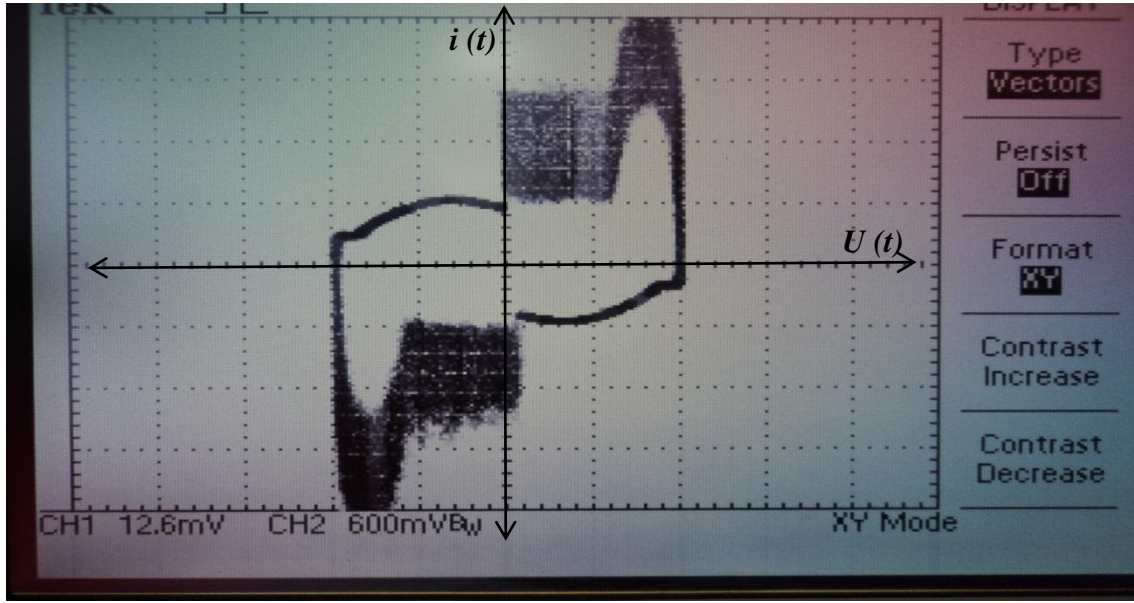
Şekil 4.13. Sistemde R_v ve C_v kondansatörü birlikte devredeyken alınan osilasyonların V - I grafiği

Sisteme uygulanan geriliminin arttırılmasıyla birlikte boşalma tutuşur ve akım osilasyonları meydana gelir. Bu osilasyonlar, eğrinin uç kısımlarında tutuşmaya başlarlar ve gerilimin arttırılmasıyla beraber sayıları da artar. Bu duruma karşılık gelen görüntü Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Sistemde R_v direnci ve C_v kondansatörü birlikte devredeyken boşalmanın varlığında oluşan osilasyonların V - I grafiği

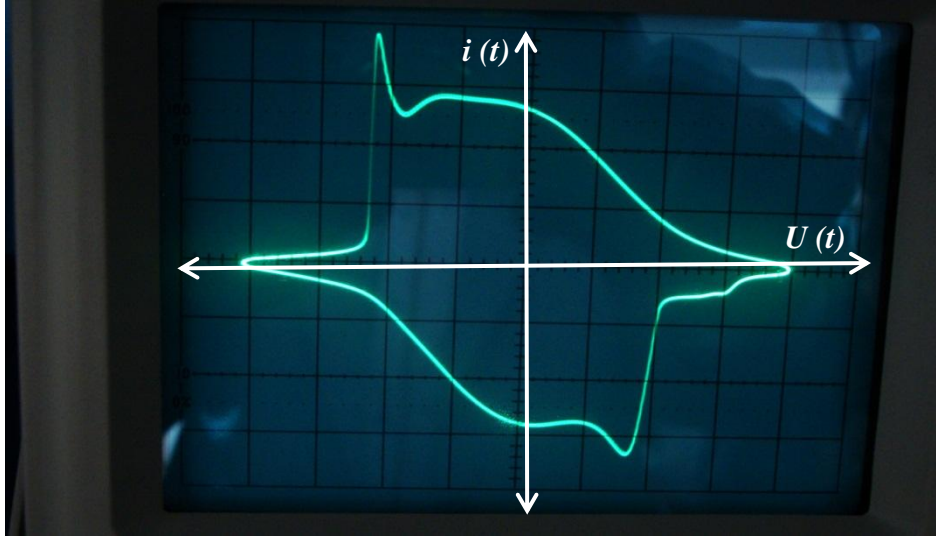
R_v ve C_v kondansatörü birlikte devredeyken, DBB sisteminin gerilimi boşalma tutuşma geriliminin üzerinde olduğu sürece, elektrotlar arasındaki boşalma olayı yanmaya devam eder. Bu durumda gerilimin arttırılmasıyla birlikte oluşan kararsız akım osilasyonlarının sayıları da artar. Sistemin pd değerinin arttırılmasına bağlı olarak bu osilasyonlar, Şekil 4.15'te gösterildiği gibi x eksenı boyunca elipsoid üzerinde sağdan sola doğru hareket ederek yer değıştirirler. Elipsoidin en solundaki noktada ise, bu osilasyonlar faz değıştirerek ters yöne doğru hareket ederler.



Şekil 4.15. Sistemde R_v ve C_v birlikte devredeyken, boşalmanın varlığında pd 'nin arttırılması sonucunda oluşan osilasyonların V - I grafiğı

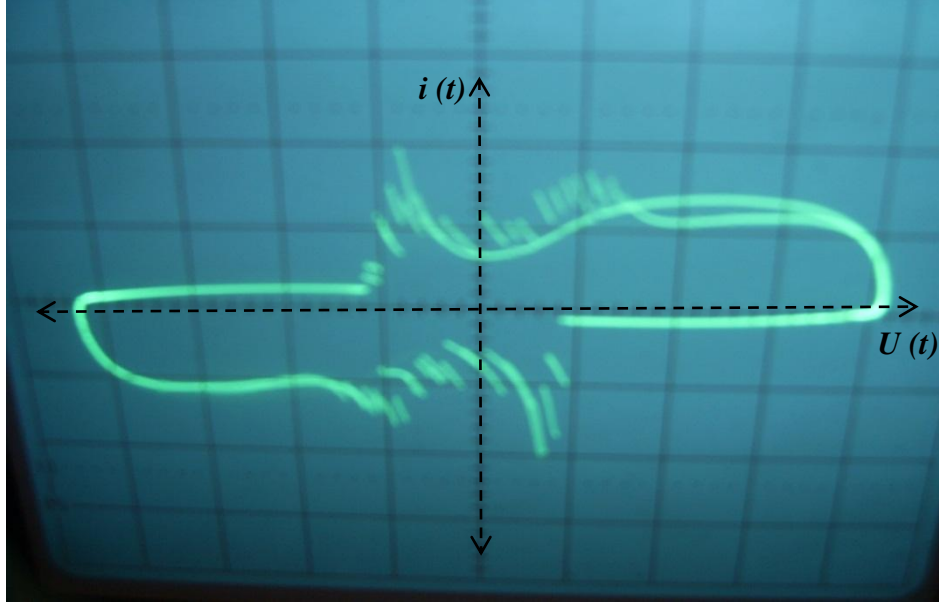
Sistemde sadece R_v direnci devredeyken boşalmanın varlığında, pd 'nin uygun miktarda azaltılması sonucunda elde edilen osilasyon görüntüsü Şekil 4.16'da verilmiştir. Bu durumda pd değeri ($p=0.18$ hPa ve $d=500$ μm) $pd=0.09$ hPa.mm olarak belirlenmiştir. Sistemin bu durumdaki diğer parametreleri ise $R_v=50$ k Ω ve $U=205$ Volt değeriindedir. Şekilden görüldüğü gibi boşalma olayı bu durumda sadece tek grup şeklinde tutuşmaktadır. Konuyla ilgili daha önce yapılmış olan çalışmalara göre bariyer boşalmasının çiftli gruplar şeklinde tutuştuğı bilinmekteydi ancak deneysel olarak gerçekleştirdiğimiz bu tez çalışması sonucunda, pd parametresinin uygun olarak ayarlanması sonucunda boşalmanın tekli gruplar halinde de tutuşabildiğı görülmüştür. Bu sonuçtan hareketle, DBB'nin kararsız akım osilasyonlarının pd parametresine önemli ölçüde bağılı olduğu söylenebilir. Boşalma esnasında elektrotlar arasındaki

mesafenin değiştirilmesi pratik açıdan zor olduğu için, pd parametresinin ayarlanması basınç parametresinin değiştirilmesiyle sağlanır.



Şekil 4.16. Sistemde R_v direnci devredeyken boşalmanın varlığında, pd 'nin azaltılması sonucu alınan tek guruplu osilasyonun $V-I$ grafiği

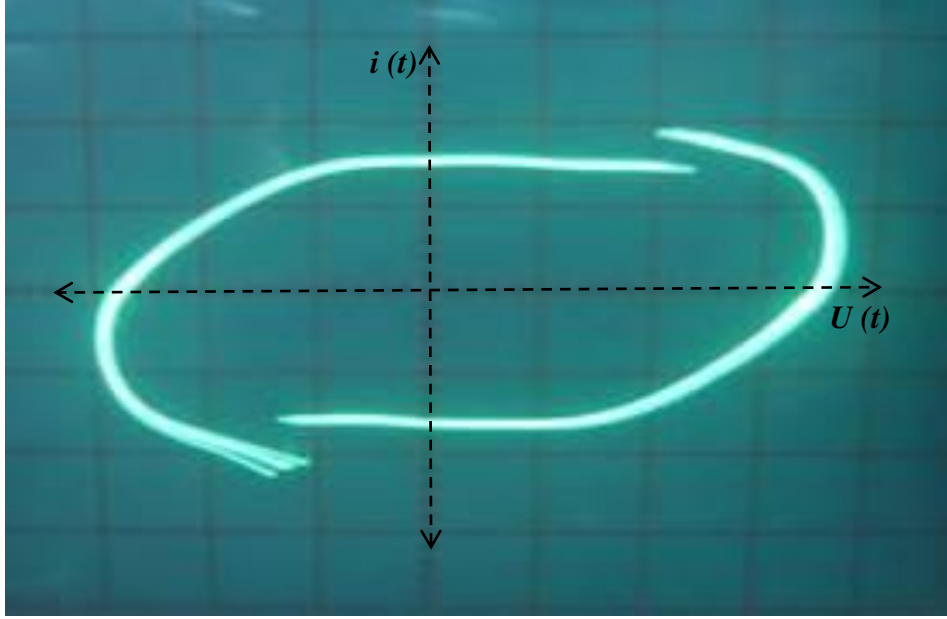
Sistemde sadece R_v direnci devredeyken boşalmanın tutuşması sırasında pd 'nin arttırılması sonucu elde edilen görüntü ise Şekil 4.17'de verilmiştir. Bu durumda pd değeri ($p=50$ hPa ve $d=500$ μm) $pd=25$ hPa.mm'dir. Ayrıca $R_v=50$ k Ω ve $U=376$ Volt değerlerindedir. Sistemde pd parametresinin arttırılması sırasında boşalma aralığına dahil olan gaz molekülleri, boşalmanın tutuşması ve gelişmesini önemli derecede etkilerler. Böylece boşalma ortamındaki serbest yük taşıyıcılarının sayısı artar ve dış elektrik alanının etkisiyle bu yük taşıyıcıları, boşalmanın gelişimini sağlayan çığların oluşumunu kolaylaştırırlar. Buna bağlı olarak boşalma ortamında akımın geçişi de kolaylaşır. Böylece boşalma olayı, dış faktörlerin de etkisiyle elektrotların bütün yüzeyleri boyunca, çok sayıdaki iletken kanal şeklinde yayılarak tutuşur. Boşalma ortamının büyük pd değerlerinde, ortamda yeterli miktarda yüklü parçacık olması nedeniyle taşınan akım miktarı da büyük değerlerde olur. Buna bağlı olarak boşalma akımının değeri de artarak *pikoamper* değerlerinden *miliamper* düzeylerine kadar yükselebilir. Şekilden görüldüğü gibi boşalma olayı bu durumda, çoklu osilasyon gurupları şeklinde tutuşur. Gaz ortamının sınırlı hacmindeki yük taşıyıcı moleküllerin çokluğu nedeniyle, iyon ve elektronların serbest yolları önemli oranda azalır. Böylece ortamdaki yüklerin çarpışma olasılıkları artar. Bu çarpışmaların etkisiyle harekete geçen uzay hacim yüklerinin sebep olduğu akım kararsızlıkları da büyük oranda artar.



Şekil 4.17. Sistemde R_v direnci devredeyken boşalmanın varlığında, pd 'nin artırılması sonucu alınan osilasyon guruplarının $V-I$ grafiği

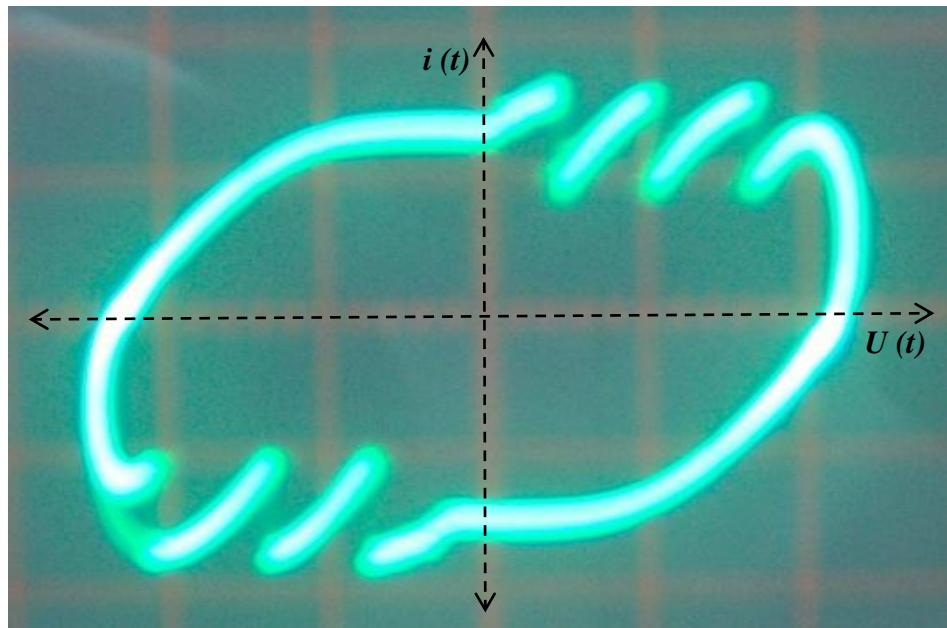
4.2.4. R_v ve C_v 'nin Devrede Olmadığı ve Gerilim Sabit Olduğu Durumunda, pd 'nin Değiştirilmesi Sonucu Görüntülenen Osilasyonlar

Tez çalışmamızın bu kısmında, R_v direnci ve C_v kondansatörünün devrede olmadığı durumda ve sadece elektrot sisteminin kapasitif etkisi sonucunda elde edilen akım osilasyonlarının görüntüleri incelenmiştir. Bu kısımda ayrıca, daha önce incelenmiş olan yöntemlerden farklı olarak; DBB deneylerindeki elektrot sistemine belirli oranlarda uygulanan gerilimin sabit tutulması ve pd parametresinin değiştirilmesi yöntemiyle boşalmanın tutuşması sağlanarak, elde edilen bazı osilasyon görüntüleri verilmiştir. Bu durumda ölçüm işlemi, uygun olarak elektrot sistemi üzerinden alınmıştır. Elektrot sistemine boşalma başlangıç geriliminden daha az miktarda bir gerilim uygulanarak bu değer sabitlenmiştir. Gerilimin artırılması sonucunda görüntülenen eğri başlangıçta düzgün bir elips şeklindedir. Bu durumda delinme olayının henüz gerçekleşmediği söylenebilir. Daha sonra pd parametresinin artırılarak kritik değerine ulaşması sonucunda, elektrot aralığında ilk delinme olayı gerçekleşir ve bu delinmenin gerçekleştiği durum, elipsoid üzerinde meydana gelen tek gurup şeklindeki akım osilasyonu ile belirlenir. Bu osilasyonun görüntüsü Şekil 4.18'de verilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi pd 'nin artırılması sonucunda (yaklaşık olarak $pd=6 \text{ hPa.mm}$) delinme işlemi, elipsoidin kenar noktalarına yakın yerlerde ve gerilimin hem pozitif hem de negatif alternansları üzerinde tek gurup şeklinde gerçekleşmiştir.



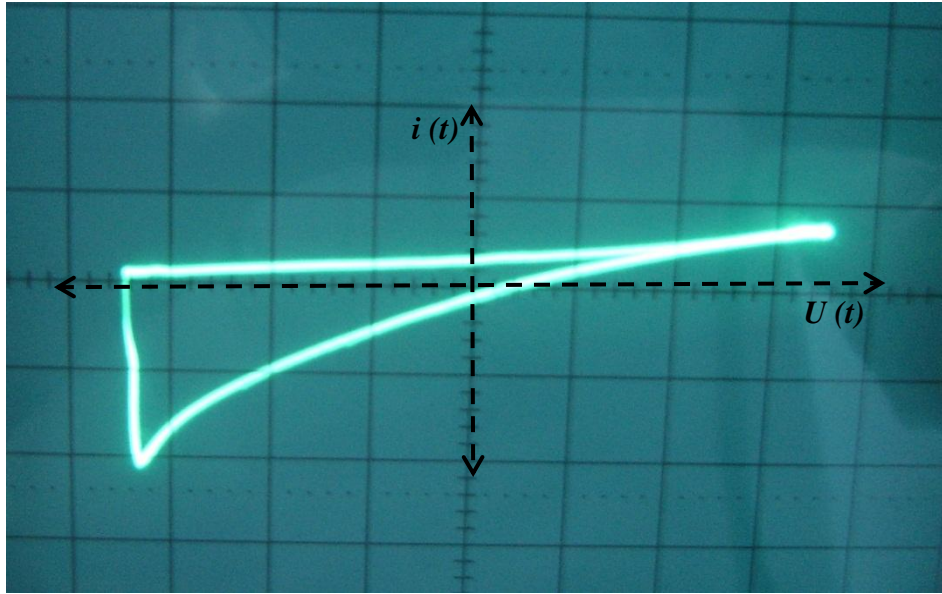
Şekil 4.18. Sistemde R_v ve C_v yokken sabit gerilim varlığında, pd 'nin değiştirilmesi ile oluşan ilk osilasyonun $V-I$ grafiği

Boşalmanın kararlı olarak yanmakta olduğu bir sistemde, pd değerinin artırılmasıyla birlikte, ortamdaki delinme kanallarının sayısı da buna bağlı olarak artar ve neticede çoklu osilasyon gurupları meydana gelir. Bu durumda gerilimin artırılmasıyla birlikte hem osilasyonların genlik miktarı hem de akım kararsızlıkları artar. Bu osilasyon gurupları, Şekil 4.19'da verilen elipsoid üzerinden görülmektedir.



Şekil 4.19. Sistemde R_v ve C_v yokken boşalmanın varlığında, pd 'nin artırılmasıyla birlikte artan osilasyon guruplarının $V-I$ grafiği

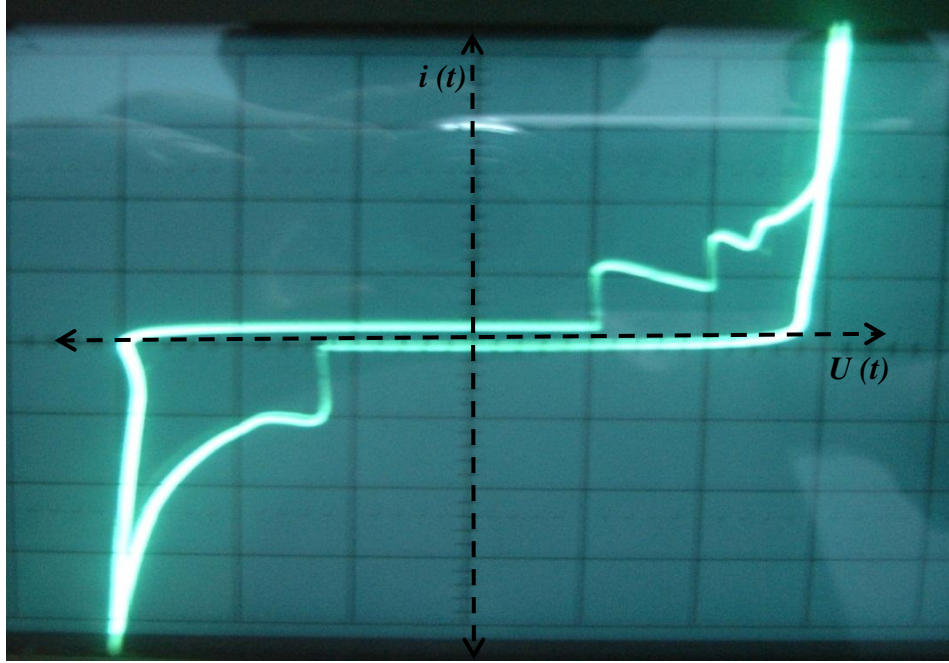
Boşalma henüz yokken, pd parametresinin belirli bir değerde sabit tutulup gerilimin arttırılmasıyla birlikte, boşalma osilasyonları ilk olarak gerilimin negatif alternasında tutuşmaya başlarlar. Bu durumda boşalma tutuşma eğiliminde olur. Gerilimin negatif alternasında osilasyonların baskın olması, büyük olasılıkla gaz aralığındaki uzay hacim yüklerinin etkisindendir. Bu koşullarda boşalma aşırı derecede kararsızdır ve böyle bir durumu görüntüleyebilmek için sistemin gerilimini çok dar bir aralıkta değiştirmek gerekir. Boşalmanın tutuşma anını karakterize eden bu durumun deneysel olarak görüntülenmiş *Gerilim-Akım* eğrisi Şekil 4.20’de verilmiştir.



Şekil 4.20. Sabit pd değerinde, sistemin geriliminin arttırılmasıyla birlikte, ilk olarak negatif alternasta tutuşan boşalmanın *Gerilim-Akım* eğrisi

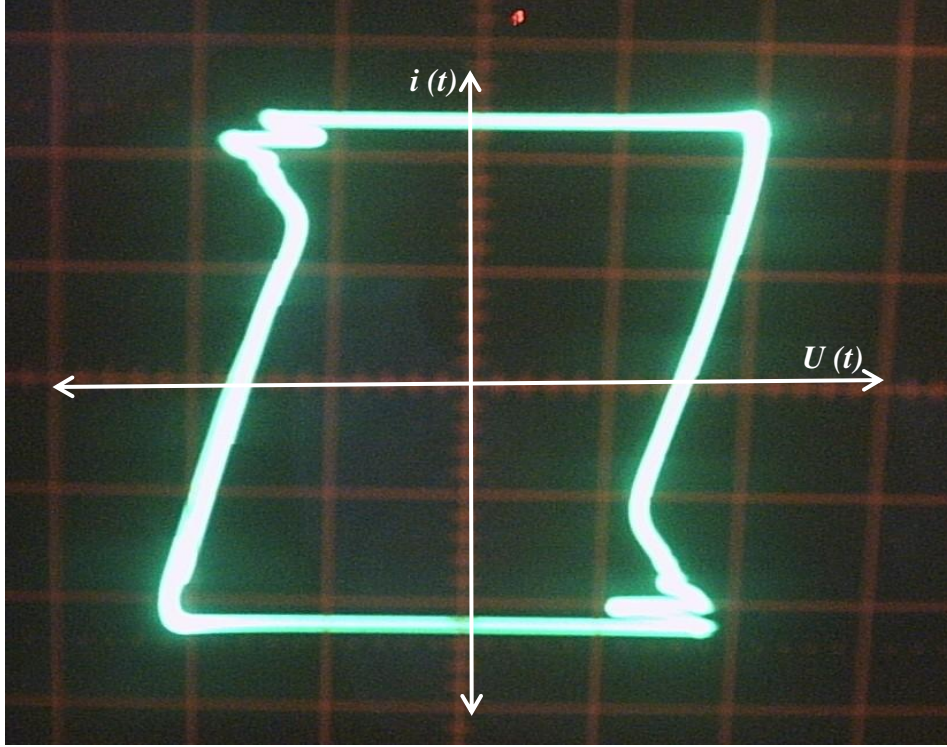
DBB sisteminin pd parametresinin ve geriliminin birlikte arttırılarak kritik değerlerine ulaşmaları durumunda, boşalma osilasyonları gerilimin her iki alternasında da tutuşmaya başlar. Bu durumda pd 'nin değerine bağlı olarak boşalmanın *Gerilim-Akım* eğrisi üzerinde bazı kararsız osilasyon grupları oluşur. Bu koşullarda sistemin geriliminin ve pd parametresinin değerleri kritik değerlerinde oldukları için boşalma kararlılık bölgesinde yanmaya devam eder. Dolayısıyla bu koşullarda oluşan osilasyon gruplarını gözlemek veya bu osilasyonları, pd parametresine bağlı olarak kontrol etmek nisbeten daha kolaydır. Bu durumdaki boşalma akımı ise kararsız yapıda ve yüksek değerlerde (*miliAmper*) olur. Boşalmanın gerilim ve pd parametrelerinin kritik değerlerinde olduğu durumlarda deneysel olarak alınmış olan *Gerilim-Akım* eğrisi Şekil 4.21’de verilmiştir. Verilen koşullarda boşalma henüz tam olarak kararlılaşmadığı

için normalde paralelkenar şeklinde olması beklenen *Gerilim-Akım* eğrisi, şekilde görüldüğü gibi kararsız bir durum sergiler.



Şekil 4.21. Sistemin geriliminin ve pd 'nin kritik değerlerinde, boşalmanın tutuşma eğiliminde olduğu durumdaki $V-I$ grafiği

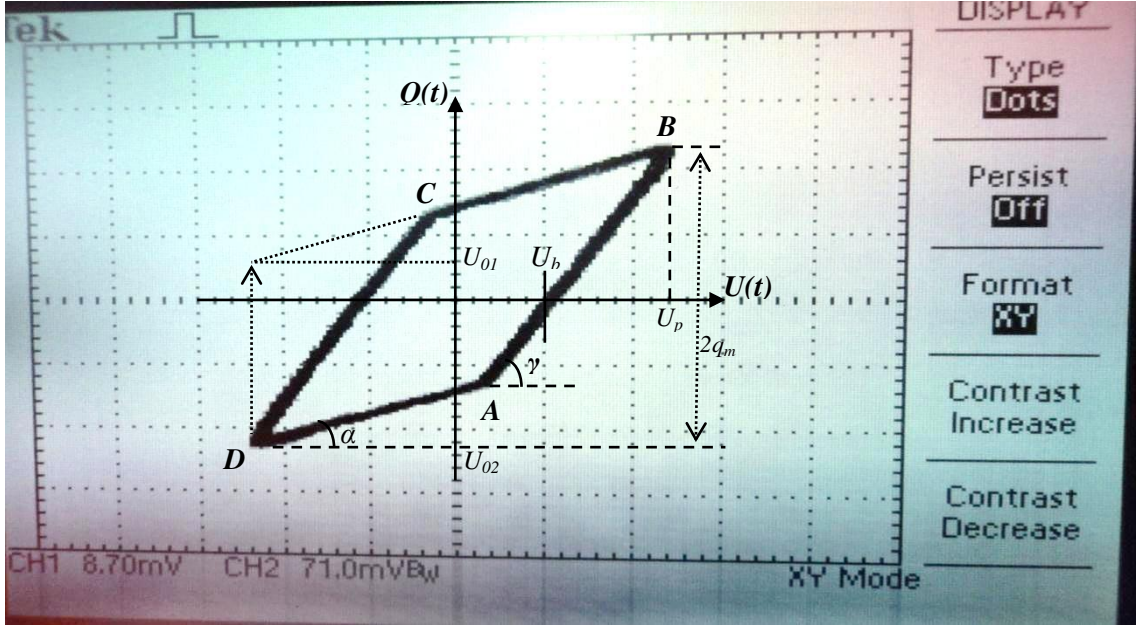
DBB'nin kararlılık kuşağında olduğu durumda, sistemin gerilim değerinin daha da artırılması sonucunda, boşalma kararlı olarak yanmaya başlar. Bu durumu karakterize eden *Gerilim-Akım* eğrisinin görüntüsü ise Şekil 4.22'de verilmiştir. Deneysel olarak görüntülenen bu eğriden hareketle, temelde aynı karaktere sahip olan boşalmanın *Gerilim-Yük* eğrisini hesaplamak mümkündür. Bu durumu sağlamak için sadece grafiğin y eksenine karşılık gelen gerilim değerleri, ölçüm için kullanılan kondansatörün kapasite değeri ile çarpılarak boşalmanın yük değerleri belirlenebilir. Böylece elde edilen *Gerilim-Yük* grafiği, *Gerilim-Akım* eğrisiyle aynı karaktere sahip olan düzgün paralelkenar şeklinde olur. Paralelkenarın şeklinin düzgün olması, elektrotlar arasındaki boşalmanın homojen bir şekilde yanmakta olduğunu ifade eder. Paralelkenarın yatay kenarlarının düzgün olması, boşalma sırasında uygulama geriliminin sabit olduğunu ifade eder. Paralelkenarın sağ alt ve sol üst kenarlarındaki osilasyonlar ise gerilimin pozitif ve negatif alternaslarında meydana gelen kararsız akım osilasyonlarıdır. Kararsız olarak yanmakta olan bu osilasyonları azaltmak için ya pd parametresinin değeri biraz azaltılır, ya da sisteme uygulanan gerilim sönümleme geriliminin üzerindeki belirli bir değere kadar azaltılır.



Şekil 4.22. pd' 'nin sabit değerinde, gerilimin arttırılmasıyla birlikte tutuşan boşalmanın kararlı olarak yanmakta olduğu durumundaki *Gerilim-Akım* eğrisi

4.3. DBB'nin Deneysel Olarak Belirlenen *Gerilim-Yük* Karakteristiğinden Yararlanarak Boşalma Parametrelerinin Sayısal Olarak Belirlenmesi

Bariyer boşalmasının elektriksel parametreleri olan boşalmanın gücü (P), her bir yarım periyotta taşınan yük miktarı (ΔQ), her bir yarım periyottaki boşalma süresi (Δt), boşalmanın tutuşma (U_b) ve sönümlenme (U_p) gerilimleri gibi boşalma parametrelerini, Şekil 4.23'te verilen *Gerilim-Yük* eğrisinden belirlemek mümkündür. Şekildeki paralelkenarda AB ve CD kenarları boşalmanın tutuştuğu durumu, BC ve DA kenarları ise boşalmanın henüz tutuşmadığı durumu gösterir. A ve C noktaları boşalmanın pozitif ve negatif alternaslardaki tutuşma zamanlarını göstermektedirler ve bu zamana karşılık gelen tutuşma geriliminin değeri ise U_b ile karakterize edilir. B ve D noktaları ise boşalmanın sönümlenme zamanlarını göstermekte olup, buna karşılık gelen sönümlenme geriliminin değeri ise U_p ile karakterize edilir. Şekilde verilen paralelkenarda AB ve CD kenarlarının eğimi, sistemin C_d kapasitesini; BC ve DA kenarlarının eğimi ise plazmanın oluşmadığı durumdaki elektrot sisteminin kapasitesini karakterize eder ve C_g ile adlandırılır. DBB'nin *Gerilim-Yük* eğrisinden hareketle, bu parametrelerin belirlenme yöntemleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 4.23. DBB'nin *Gerilim-Yük* eğrisinden yararlanılarak belirlenebilen bazı boşalma parametrelerinin konum grafiği

DBB'nin deneysel verilerden yararlanılarak elde edilen *Gerilim-Yük* eğrisinden hareketle, boşalma parametrelerinin hesaplanabilmesi için grafik değerlerinin uygun olarak gerekli olan büyüklüklere (*gerilimin akıma veya akımın yüke*) çevrilmesi gerekir. Bu koşullar esas alınarak boşalmanın varlığında, C_d ve C_g kapasitelerinin değerleri aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

$$C_d = tg\gamma \quad (4.1a)$$

Deneysel olarak alınmış olan DBB'nin paralelkenar şeklindeki eğrisinden okunan değerlerin uygun olan dönüştürme katsayılarıyla çarpılması sonucunda elde edilen verilerin Denklem 4.1a'daki ifadede yerlerine yazılması neticesinde, DBB sistemindeki bariyer tabakanın kapasite değeri,

$$C_d = \frac{85,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,125 \cdot 10^{-9}}{2 \cdot 8,7 \cdot 10^{-3}} = 0,612 \text{ nF} \quad (4.1b)$$

olarak bulunmuştur. Gaz aralığının kapasite değeri ise aynı koşullardaki deneysel eğriden ve Denklem 4.2a'dan yararlanılarak aşağıdaki şekilde belirlenebilir.

$$C_g = \frac{tg\alpha \cdot tg\gamma}{tg\gamma - tg\alpha} \quad (4.2a)$$

Alınan değerlerin uygun olarak yerlerine yazılması sonucunda, gaz aralığının kapasite değeri yaklaşık olarak,

$$C_g = \frac{0,37 \cdot 10^{-9} \cdot 0,612 \cdot 10^{-9}}{0,612 \cdot 10^{-9} - 0,37 \cdot 10^{-9}} = 0,934 \text{ nF} \quad (4.2b)$$

olarak belirlenmiştir. Gerilimin her yarım periyodunda aktarılan yük miktarı ise Denklem 4.3a yardımıyla belirlenebilir.

$$\Delta Q = 2C_0(U_{02} - U_{01}) \quad (4.3a)$$

Bu durumda aktarılan yük miktarı yaklaşık olarak,

$$\Delta Q = 2 \cdot 0,125 \cdot 10^{-9} \cdot 0,158 - 0,043 = 28,75 \cdot 10^{-12} \text{ C} = 28,75 \text{ pC} \quad (4.3b)$$

olarak bulunur. Boşalmanın aktif gücü ise Denklem 4.4a yardımıyla belirlenebilir.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T U I dt = \frac{C_0}{T} \int_0^T U \frac{dU_{C_0}}{dt} dt = f C_0 \int U dU_{C_0} = f C_0 S \quad W \quad (4.4a)$$

Bu denklemde U_{C_0} , C_0 ölçüm kondansatörü üzerine düşen gerilimi; f - frekansı; T - uygulanan gerilimin periyodu ve S ise paralelkenarın alanını ifade eder. Paralelkenarın alanı grafikten yaklaşık olarak,

$$S = 2 \cdot 8,7 \cdot 10^{-3} \cdot 3,5 \cdot 71 \cdot 10^{-3} = 4,324 \cdot 10^{-3} \text{ br}^2 \quad (4.4b)$$

şeklinde hesaplanır. Böylece boşalmanın gücü yaklaşık olarak,

$$P = 50 \cdot 0,125 \cdot 10^{-9} \cdot 4,324 \cdot 10^{-3} = 0,027 \cdot 10^{-9} \text{ W} \quad (4.4c)$$

olarak belirlenir. Boşalma esnasında oluşan her bir mikroboşalmanın yanma süresi ise Denklem 4.5a ile belirlenebilir.

$$\Delta t = \frac{1}{2\pi f} \sin^{-1} \frac{U_b}{U_p} - \frac{\pi}{2} \quad (4.5a)$$

Şekil 4.23'teki grafikten $U_b = 3,13 \text{ mV}$ ve $U_p = 20,88 \text{ mV}$ olarak okunur. Okunan bu değerlerin denklemde uygun olarak yerlerine yazılması sonucunda;

$$\Delta t = \frac{1}{2\pi 50} \sin^{-1} \frac{3,13}{20,88} - \frac{\pi}{2} = 0,022 \text{ sn} \quad (4.5b)$$

olarak bulunur. Gerilimin her yarım periyodunda sistemde taşınan yük miktarı ise grafik üzerinde gösterildiği şekilde belirlenir ve bu değer Denklem 4.6'da verilmiştir.

$$2q_m \approx 0,04 \cdot 10^{-9} \text{ C} = 0,041 \text{ nC} \quad (4.6)$$

DBB sisteminin C_d ve C_g kapasitelerini, boşalmanın olmadığı durumlar için teorik olarak da hesaplamak mümkündür. Sistemin statik durumunda (boşalma yokken) bu parametreler, Denklem 4.7 ve Denklem 4.8'de verildiği şekilde hesaplanabilirler.

$$C_d = \frac{S_d \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{rd}}{2l_d} \quad (4.7a)$$

Burada S_d elektrot sisteminin yüzey alanı olup değeri,

$$S_d = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 1,25 \cdot 10^{-2}^2 = 4,91 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad (4.7b)$$

olarak hesaplanır. ϵ_0 , boşluğun dielektrik sabiti olup değeri,

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \quad (4.7c)$$

ϵ_{rd} , bariyer tabakanın dielektrik sabitidir ve değeri tablodan,

$$\epsilon_{rd} = 3,56 \quad (4.7d)$$

olarak belirlenir. l_d ise bariyer tabakanın kalınlığıdır ve $12,7 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ 'dir. Böylece C_d kapasitesinin değeri yaklaşık olarak,

$$C_d = \frac{4,91 \cdot 10^{-4} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 3,56}{2 \cdot 12,7 \cdot 10^{-6}} = 0,61 \text{ nF} \quad (4.7e)$$

olarak hesaplanır. Gaz aralığının kapasite değeri ise teorik olarak Denklem 4.8 yardımıyla belirlenir.

$$C_g = \frac{S_g \cdot \epsilon_0 \cdot \epsilon_{rg}}{l_g} \quad (4.8a)$$

Burada S_g gaz aralığının yüzey alanı olup, boşalma kanalının tüm elektrot yüzeyini kaplaması durumunda elektrot yüzeyinin alanıyla aynı değere sahip olur. Dolayısıyla $S_g = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 1,25 \cdot 10^{-2}^2 = 4,91 \cdot 10^{-4} m^2$ olarak alınabilir. ϵ_0 , boşluğun dielektrik sabiti olup değeri $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} F/m$; ϵ_g , gazın dielektrik sabitidir ve değeri tablodan $\epsilon_{rg} = 106,9$ olarak belirlenir; l_g ise gaz aralığının uzunluğunu ifade eder ve değeri $l_g = 0,5 \cdot 10^{-3} m$ 'dir. Bu değerlerin uygun olarak Denklem 4.8a'da yazılması sonucunda, statik durumlar için C_g değeri,

$$C_g = \frac{4,91 \cdot 10^{-4} \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 106,9}{0,5 \cdot 10^{-3}} = 0,93 nF \quad (4.8b)$$

olarak hesaplanır. Boşalmanın tutuşma gerilimi U_b ise Denklem 4.9 yardımıyla belirlenebilir.

$$U_b = 9981,5 \cdot l_g + 2 \cdot l_d \cdot \frac{9981,5}{\epsilon_{rd}} \quad (4.9a)$$

Denklem 4.9a'daki $9981,5 V_{cm}$ katsayısı, azotun delinme gerilimi değeridir. Yukarıda verilen l_g , l_d ve ϵ_{rd} değerlerinin uygun olarak Denklem 4.9a'da dikkate alınması sonucunda elektrik gaz boşalmasının tutuşma geriliminin sınır değeri,

$$U_b = 9981,5 \cdot 0,5 \cdot 10^{-1} + 2 \cdot 12,7 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{9981,5}{3,56} = 501,63 V \quad (4.9b)$$

olarak belirlenir. Deneysel olarak bu değer yaklaşık olarak $U_b = 502 V$ olarak ölçülmüştür. DBB sistemine uygulanan gerilimin anlık değerleri ise Denklem 4.10 ile belirlenebilir.

$$v(t) = U_p \sin \omega t \quad (4.10)$$

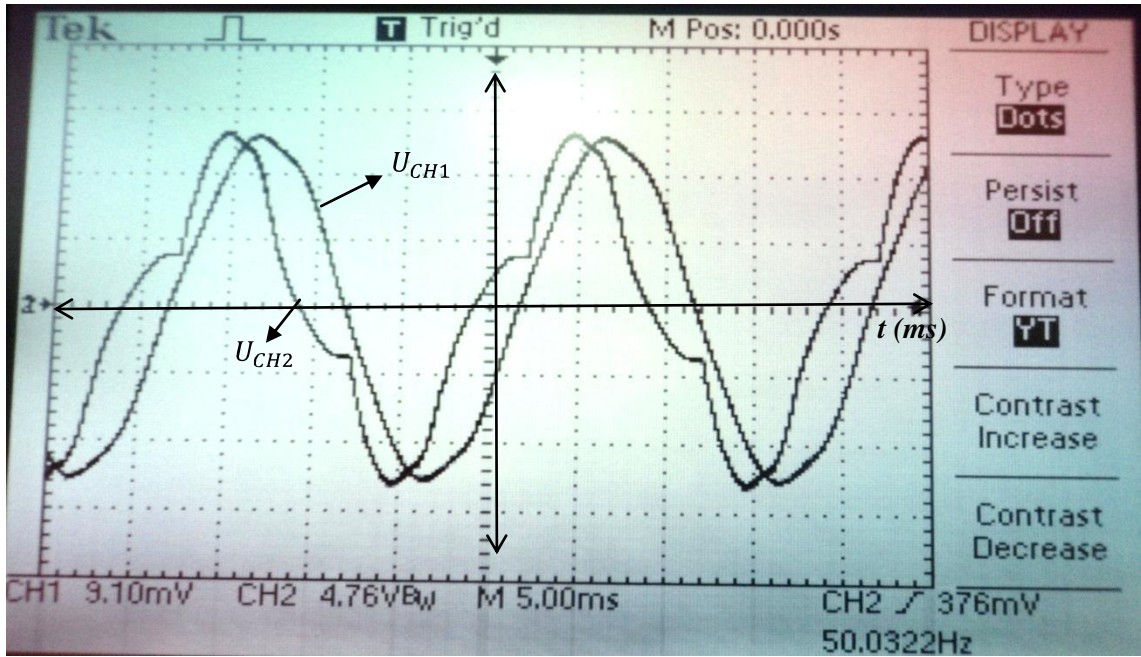
Burada U_p gerilimi, sisteme uygulanan gerilimin maksimum değerini ifade eder. Boşalma geriliminin her bir pozitif yarım periyodunda meydana gelen mikrobeşarjların tutuşma ve sönümlenme süreleri t_1 ve t_2 ile karakterize edilir. t_1 ve t_2 değerleri Denklem 4.11 yardımıyla belirlenir.

$$t_1 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} \frac{U_b}{U_p} \quad t_2 = \frac{\pi}{2\omega} \quad (4.11)$$

Benzer şekilde boşalma geriliminin her bir negatif yarım periyodunda meydana gelen mikrodeşarjların tutuşma ve sönümlenme süreleri ise t_3 ve t_4 ile karakterize edilir. Bu değerler Denklem 4.12 yardımıyla belirlenebilir.

$$t_3 = \frac{1}{\omega} \sin^{-1} - \frac{U_b}{U_p} \quad t_4 = \frac{3\pi}{2\omega} \quad (4.12)$$

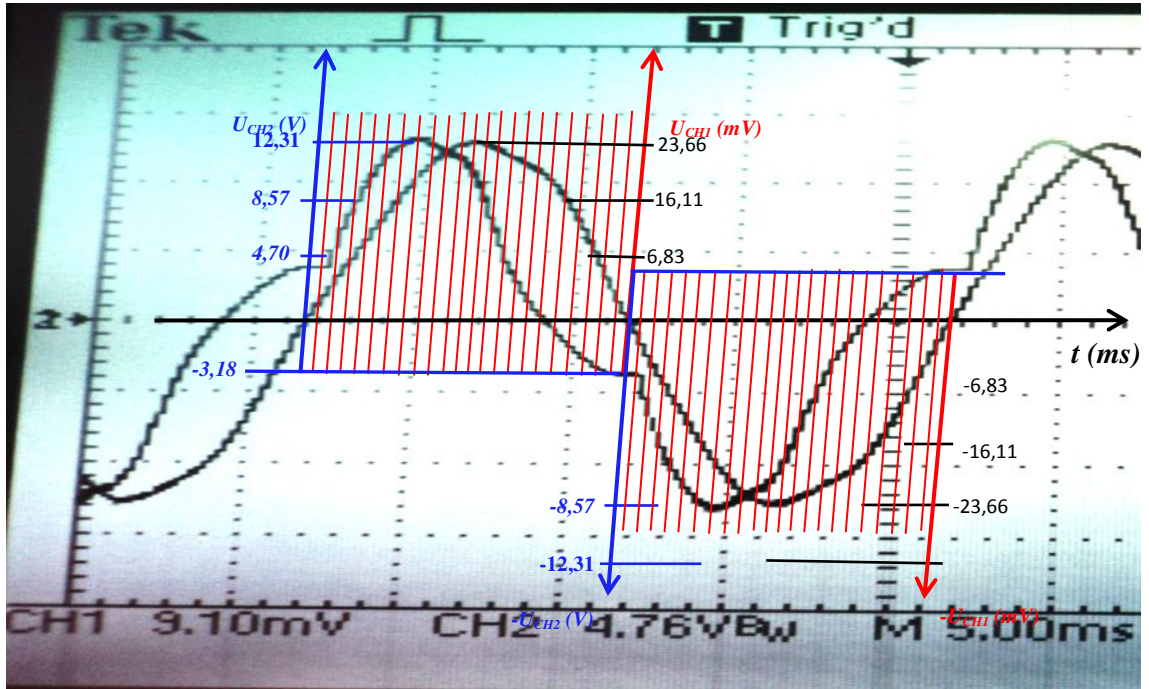
Şekil 4.24'te bariyer boşalmasının osiloskop yardımıyla deneysel olarak alınmış olan U_{CH1} ve U_{CH2} gerilim osilogramları verilmiştir. Bu osilogramların her ikisi de normalde, osiloskop kanalları yardımıyla eşzamanlı gerilim değerleri olarak ölçülür. Ölçülen grafik üzerinden okunan bu değerler, $CH1$ ve $CH2$ kanallarına uygun olan katsayı değerleri ($CH1=9,1 \text{ mV}$ ve $CH2=4,76 \text{ V}$) ile çarpılarak gerilimin ve akımın gerçek değerleri elde edilir. Dolayısıyla, bu eğrilerden akım değerlerini belirlemek için boşalma hücresi üzerinden ölçülmüş olan U_{CH2} geriliminin okunan değerleri, ölçüm direnci olan $R_v = 50 \text{ k}\Omega$ direnç değerine bölünerek boşalmanın gerçek akım değerleri belirlenir. Bu analiz için kullanılan ölçüm kapasitesinin değeri $C_v = 125 \cdot 10^{-12} \text{ F}$ 'tır.



Şekil 4.24. DBB'nin osiloskop yardımıyla ölçülen U_{CH1} ve U_{CH2} gerilim eğrileri

Şekil 4.25'te ise, Şekil 4.24'te verilmiş olan gerilim osilogramlarından hareketle, boşalma geriliminin ve akımının gerçek değerlerini belirlemek için bu osilogramların her bir yarım periyotluk kısmı alınmış ve genişletilerek 23 eşit parçaya bölünmüştür.

Şeklin asıl görünümünün daha da genişletilmesinin nedeni, bölen çizgilerinin sıkışıklığını azaltmak ve şeklin daha net görünmesini sağlamaktır. Verilen şekilde deneysel olarak alınan gerilim osilogramlarının zaman ekseninin her bir yarım periyotluk kısmı, eksene dik olacak şekilde düşey çizgilerle 23 eşit parçaya bölünmüştür. Sonraki aşamada ise, bu parçaların her birine karşılık gelen akım ve gerilim değerleri okunmuş ve gerçek değerlerinin belirlenmesi için osiloskop kanalının bulunduğu konuma göre uygun olan katsayılarla çarpılmıştır ($CH1=9,1 \text{ mV}$ ve $CH2=4,76 \text{ V}$ ile çarpılmıştır). Hem akım için hem de gerilim için, her yarım periyotta elde edilen bu 23 değer, okunma sırası bozulmayacak şekilde tablo haline getirilmiştir. Bu işlem hem pozitif, hem de negatif alternanslar için tekrarlanmış olup her parametre için toplamda 46 değer elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar şebeke frekansında (50 Hz) gerçekleştirildiği için bir periyodun süresi $T=20 \text{ ms}$ olarak alınmıştır.



Şekil 4.25. DBB'nin osiloskopla ölçülen U_{CH1} ve U_{CH2} gerilim eğrilerinin her bir yarım periyodunun ayrı ayrı 23 eşit parçaya bölünmesi durumu

Grafik üzerinden okunan gerilim değerlerinin tam olarak belirlenebilmesi için bu değerlerin, deney sistemimizde yer alan gerilim bölücü direnç sisteminin katsayılarıyla uygun olarak çarpılması gerekir. Bu katsayıların hesaplanmış değerlerine bağlı olarak değişen matematiksel ifadeler, gerilim için Denklem 4.13a, b; akım için Denklem 4.14a, b; ve yük için Denklem 4.15 ile verilmiştir.

Gerilimin anlık değerleri için;

$$U_t = \frac{R_{D1}+R_{D2}}{R_{D2}} U_{CH1} \quad (4.13a)$$

$$U_t = \frac{61 \cdot 10^6 + 0,15 \cdot 10^6}{0,15 \cdot 10^6} U_{CH1} = 407,67 \cdot U_{CH1} \quad (4.13b)$$

akımın anlık değeri için;

$$i_t = \frac{U_{CH2}}{R_v} \quad (4.14a)$$

olarak verilebilir. Deney sisteminde kullanılan R_v ölçüm direncinin değeri $R_v = 50 \text{ k}\Omega$ 'dur. Dolayısıyla;

$$i_t = \frac{U_{CH2}}{50000} \quad (4.14b)$$

olarak alınırsa, yükün anlık değeri aşağıdaki ifadeyle belirlenir:

$$Q(t) = \frac{2}{T} \int_0^T i_t dt \quad (4.15)$$

Yukarıda açıklanan yöntemlerden hareketle, DBB'nin deneysel olarak elde edilmiş olan bir periyotluk gerilim osilogramlarının eşit aralıklarla bölünmesi sonucunda, her bölmeye karşılık gelen gerilim değeri okunarak kaydedilmiştir. Daha sonra kaydedilen bu değerler, belirlenmek istenen parametreye uygun katsayılarla çarpılarak, her bir parametre için toplamda 46 değer elde edilmiştir. Daha sonra bu değerler, sırasına uygun olarak tablo haline getirilmiştir. Bu değerler, belirlenmek istenen parametrenin cinsine (*Gerilim, Akım, Yük*) bağlı olarak gerilimin hem pozitif, hem de negatif alternansları için hesaplanmıştır. Genel durumlarda bu gerilim eğrilerinin her yarım periyodunun 20-25 eşit parçaya bölünmesi, grafiğin şeklinin belirginleşmesi için yeterlidir. Ancak koşulların elvermesi durumunda daha büyük sayılara da bölünebilir. Böyle bir durumda daha net görünümlü bir grafik elde etmek mümkün olur.

DBB'nin analizinde büyük önem taşıyan ve *Gerilim-Zaman* ekseninin her yarım periyodunun 23 eşit parçaya bölünmesi suretiyle hesaplanmış olan bu değerlere ait tablolar aşağıda verilmiştir.

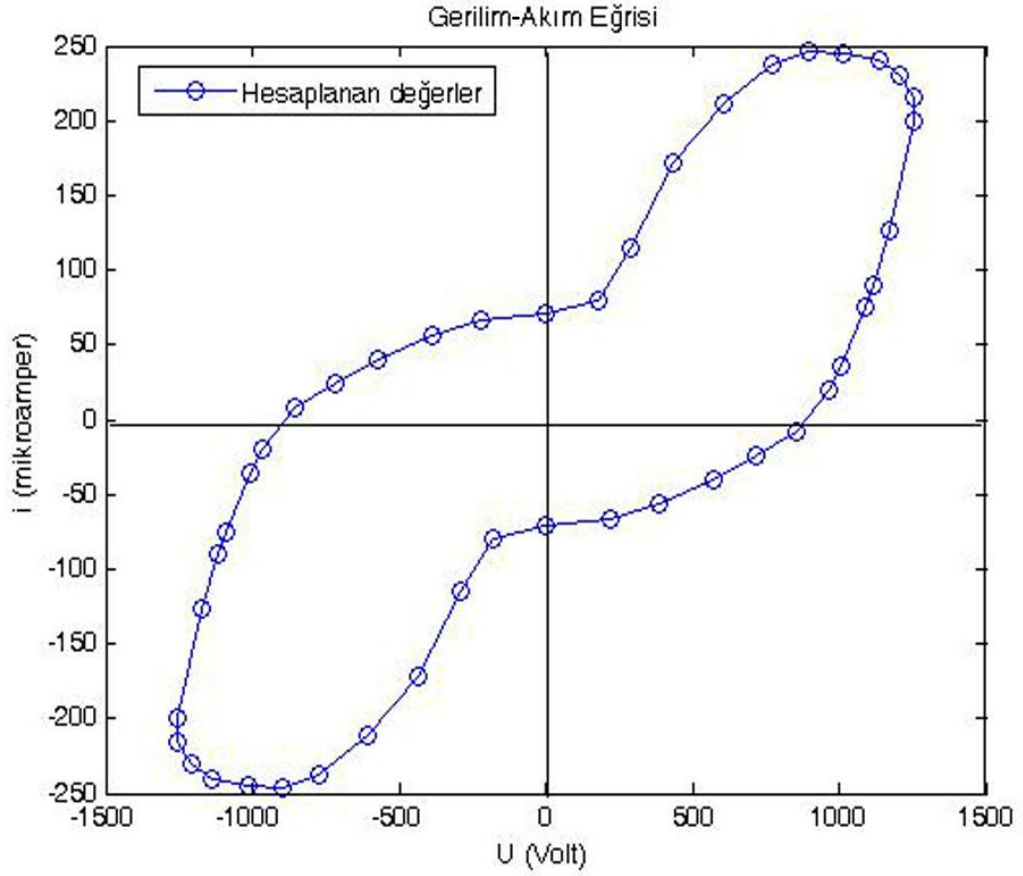
Grafiklerden okunan gerilim ($U(t)$ [V]) ve akım ($i(t)$ [μA]) parametrelerinin uygun katsayılarla çarpılarak pozitif ve negatif alternanslara karşılık gelen, hesaplanmış gerçek değerleri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Tablo 4.1. DBB’nin deneysel grafikteki verilere göre hesaplanmış gerilim ve akım parametrelerinin gerçek değerleri

Pozitif (+) Polarite		Negatif (-) Polarite	
$U(t)$ [V]	$i(t)$ [μA]	$U(t)$ [V]	$i(t)$ [μA]
0	71,4	0	-71,4
182	80	-182	-80
290,33	115	-290,33	-115
435,5	171,4	-435,5	-171,4
605,12	211,4	-605,12	-211,4
774,21	238	-774,21	-238
895,18	246	-895,18	-246
1016,16	245	-1016,16	-245
1137,13	240	-1137,13	-240
1209,7	230	-1209,7	-230
1258	216	-1258	-216
1258,1	200	-1258,1	-200
1170	126	-1170	-126
1116,6	90	-1116,6	-90
1090	75	-1090	-75
1010	36	-1010	-36
968	20	-968	-20
856,6	-7,6	-856,6	7,6
718	-23,8	-718	23,8
571	-40	-571	40
387	-56	-387	56
218	-67	-218	67
0	-71,4	0	71,4

DBB’nin deneysel olarak alınmış olan eğrilerin analizi sonucunda hesaplanmış olan gerilim ve akım parametrelerinin Tablo 4.1’de verilmiş olan gerçek değerleri kullanılarak elde edilmiş olan *Gerilim-Akım* eğrisi Şekil 4.26’da verilmiştir. DBB’nin *Gerilim-Zaman* grafiklerinden yararlanılarak hesaplanmış olan bu değerler *MATLAB* programında yazılarak boşalmanın *Gerilim-Akım* eğrisi elde edilmiştir. Elde edilen grafikten de görüldüğü üzere, teorik hesaplamalar ve deneysel veriler birbirleriyle

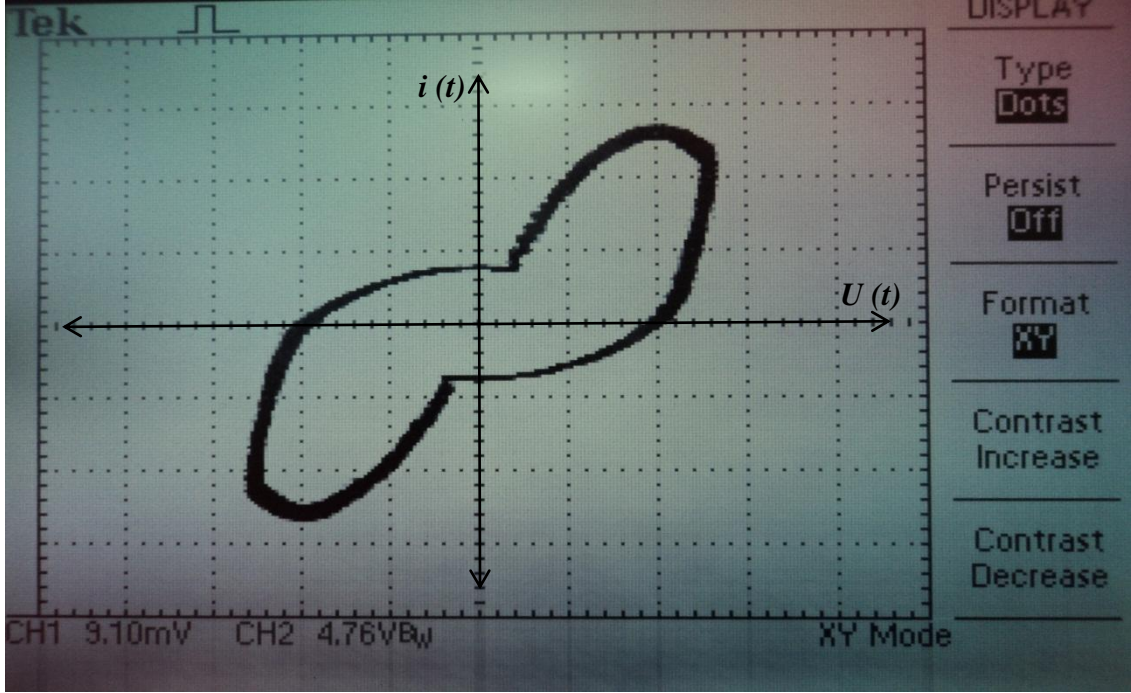
büyük ölçüde uyumludurlar. Bu durum, kullanılan yöntemin ve yapılan hesaplamaların büyük ölçüde isabetli olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 4.26. DBB'nin teorik hesaplamalar sonucunda elde edilen *Gerilim-Akım* karakteristiği

DBB'nin aynı koşullar altında deneysel olarak alınmış olan *Gerilim-Akım* grafiğinin görüntüsü ise Şekil 4.27'de verilmiştir. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27'deki grafiklerden de görüldüğü üzere, teorik ve deneysel sonuçlar birbirleriyle iyice örtüşmektedir. DBB'in *Gerilim-Akım* grafikleri genel olarak Histerezis eğrilerini andıran Lissajous diyagramları şeklindedir. Eğrinin üst ve alt uç kısımlarında boşalmanın gelişimine bağlı olarak Trichell akım darbeleri oluşur. Akım kararsızlıklarını temsil eden bu darbeler, boşalma sistemine uygulanan gerilimin arttırılmasıyla birlikte daha da artarak sıkışık bir durum sergilerler. Sisteme uygulanan gerilimin arttırılmasıyla birlikte grafiğin kapladığı yüzey alanı da artar. *Gerilim-Akım* grafiğinin artan bu yüzey alanı, aynı zamanda sisteme iletilen güç miktarını karakterize eder. *Gerilim-Akım* grafiğini etkileyen bir diğer önemli parametre ise pd değeridir. pd parametresinin değerine bağlı

olarak *Gerilim-Akım* eğrisi üzerindeki akım darbeleri sağa veya sola doğru hareket ederek faz değiştirme yönünde bir eğilim gösterirler. DBB sisteminin tam kapasitif olması durumunda bu eğriler bir paralelkenar şeklini alır. Sistemin tam olarak omik olması durumunda ise eğri bir çember şeklinde veya oval şeklinde olur. Karışık durumlarda ise aşağıda verilen şekilde bir durum sergiler.



Şekil 4.27. DBB'nin deneysel olarak elde edilen *Gerilim-Akım* karakteristiği

DBB'nin deneysel olarak alınmış olan gerilim eğrilerinden hareketle hesaplanmış gerilim ve yük değerleri ise Tablo 4.2'de verilmiştir. Boşalmanın pozitif ve negatif alternanslarındaki gerilim eğrisinin bir periyotluk zaman dilimine karşılık gelen gerilim $[U(t)]$ ve yük $[Q(t)]$ parametreleri hesaplanmış olup gerçek değerlerinin belirlenmesi için bu değerler uygun katsayılarla çarpılmıştır.

Grafiklerden okunan gerilim $[U(t)]$ eğrisine karşılık gelen değerlerden yararlanılarak akım $[i(t)]$ parametresi belirlenir. Daha sonra bu akım parametresi için, hesaplanmış olan her bir değerinin uygun olarak zamana göre integrali alınır. Bu hesaplamalar için $Q(t) = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) dt$ denkleminde yararlanılır. Buradan elde edilen $Q(t)$ değerleri, DBB'nin pozitif ve negatif alternanslara karşılık gelen anlık yük miktarlarıdır. Daha

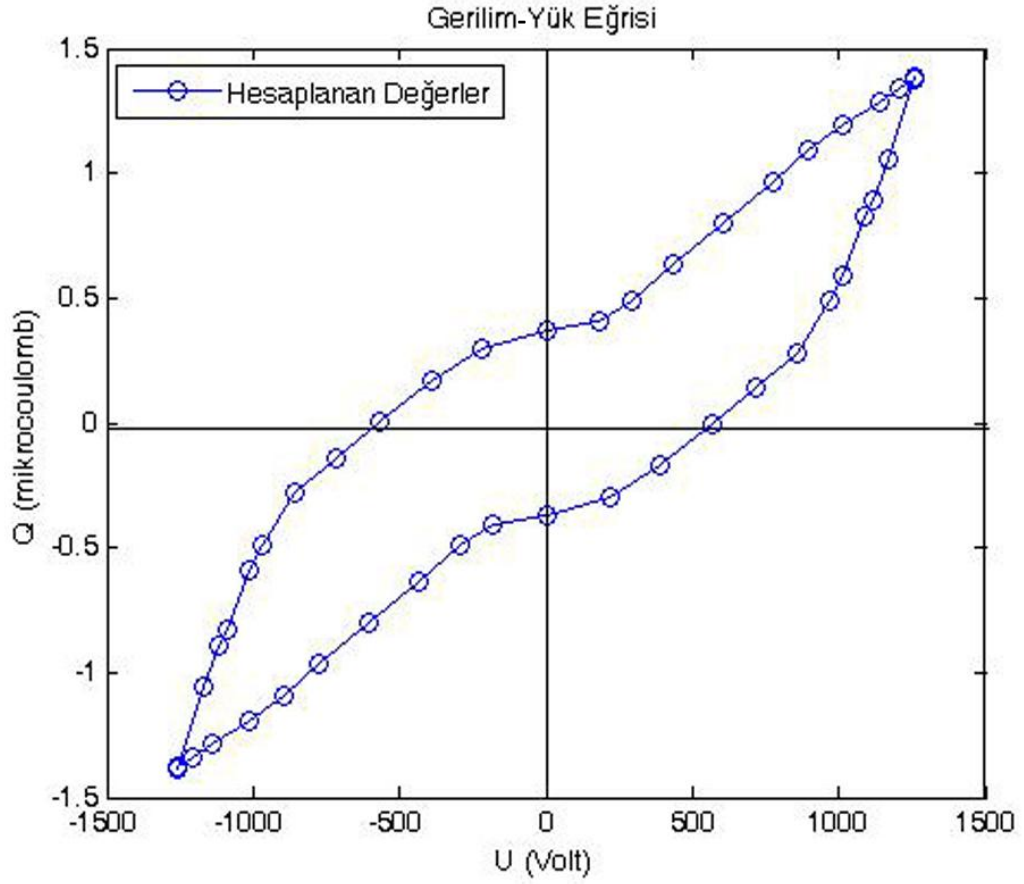
sonra hesaplanmış olan bu değerler sırasına uygun olacak şekilde *MATLAB* programında yazılarak DBB'nin *Gerilim-Yük* grafiği elde edilebilir.

Tablo 4.2. DBB'nin deneysel grafikteki verilere göre hesaplanmış olan gerilim ve yük parametrelerinin gerçek değerleri

<i>Pozitif (+) Polarite</i>		<i>Negatif (-) Polarite</i>	
<i>U(t) [V]</i>	<i>Q(t) [μC]</i>	<i>U(t) [V]</i>	<i>Q(t) [μC]</i>
0	0,3725	0	-0,3725
182	0,4115	-182	-0,4115
290,33	0,4915	-290,33	-0,4915
435,5	0,6395	-435,5	-0,6395
605,12	0,8015	-605,12	-0,8015
774,21	0,9625	-774,21	-0,9625
895,18	1,0905	-895,18	-1,0905
1016,16	1,1935	-1016,16	-1,1935
1137,13	1,2805	-1137,13	-1,2805
1209,7	1,3415	-1209,7	-1,3415
1258	1,3745	-1258	-1,3745
1258,1	1,3845	-1258,1	-1,3845
1170	1,0535	-1170	-1,0535
1116,6	0,8895	-1116,6	-0,8895
1090	0,8305	-1090	-0,8305
1010	0,5915	-1010	-0,5915
968	0,4895	-968	-0,4895
856,6	0,2815	-856,6	-0,2815
718	0,1445	-718	-0,1445
571	-0,0065	-571	0,0065
387	-0,1695	-387	0,1695
218	-0,2995	-218	0,2995
0	-0,3725	0	0,3725

DBB'nin aynı koşullar altında teorik olarak hesaplanmış olan *Gerilim-Yük* grafiği ise Şekil 4.28'de verilmiştir. Tablo 4.2'de yer alan ve daha önce hesaplanmış olan gerilim ($U(t)$ [V]) ve yük ($Q(t)$ [μ C]) değerlerinden yararlanılarak elde edilen *Gerilim-Yük* grafiği temelde histerezis eğrisine benzer bir yapıdadır. Sisteme uygulanan gerilimin arttırılmasıyla birlikte akım artar ve buna bağlı olarak grafiğin kapladığı yüzey alanı da artar. *Gerilim-Yük* grafiğinin artan bu yüzey alanı, aynı zamanda sisteme

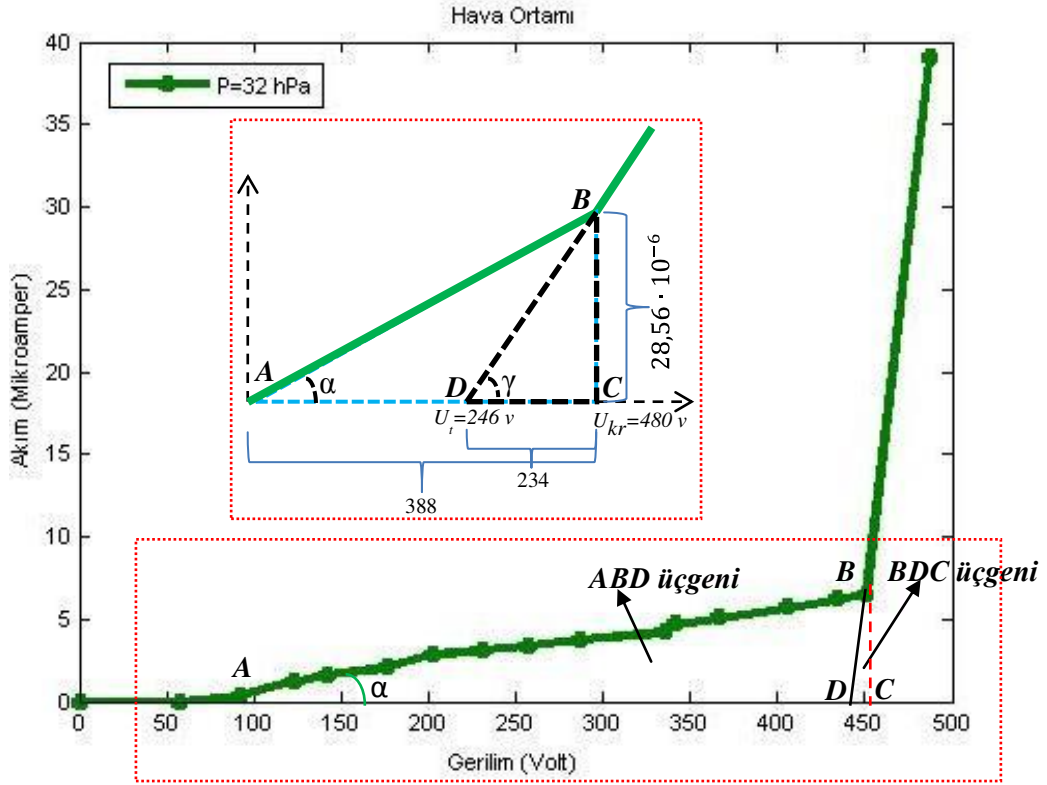
iletilen güç miktarının artması anlamına gelir. DBB sisteminin tam kapasitif olması durumunda, bu eğri düzgün bir paralelkenar şeklini alır.



Şekil 4.28. Teorik hesaplamalar sonucunda oluşturulmuş olan DBB *Gerilim-Yük* eğrisi

DBB'nin temel parametrelerini belirlemek amacıyla kullanılan bir diğer yöntem ise Şekil 4.29'da gösterilen *Gerilim-Akım* grafiğinin analizidir. Şekildeki grafik, gerilim ile akım değerlerinin belirli aralıklarla, deneysel olarak ölçülmüş etkin değerleri kullanılarak oluşturulmuştur. Bu grafik üzerinde gösterilmiş olan ABD ve BDC üçgenlerinin trigonometrik değerlerinden yararlanarak DBB'nin bazı parametrelerini belirlemek mümkündür. Açıklayıcı olması açısından, şekil eğrisi üzerindeki ABD ve BDC üçgenlerinin düzgün ve büyütülmüş modelleri ayrı bir şekil olarak çizilerek, gerekli açılar ve uzunluklar gösterilmiştir. Grafik üzerinde belirtilmiş olan ABD üçgenindeki siyah kenar çizgisi, basamak şekilli grafiğin gerilim eksenine olan uzantısını karakterize eder ve boşalmanın tutuşma gerilimini ifade eden U_t ile işaretlenir. Benzer şekilde BDC üçgeninde kırmızı çizgiyle işaretlenmiş olan kenar ise gerilim eksenini dik bir açıyla keser ve buna karşılık gelen gerilim değeri ise boşalmanın kritik

gerilim değerini ifade eder ve U_{kr} ile işaretlenir. Daha sonra, gerilim ve akımın gerçek değerleri kullanılarak ve üçgenin geometrik kurallarından hareketle, üçgenin kenar uzunluklarının gerçek değerleri belirlenir. Daha sonra bu değerlere uygun olarak α ve γ aıların tanjantlarının alınması sonucunda, DBB'nin aşağıda verilmiş olan bazı parametrelerini belirlemek mümkün olur.



şekil 4.29. DBB'nin deneysel ölçümlerle oluşturulan *Gerilim-Akım* karakteristiği

DBB sisteminin kapasite değeri C_0 'ı belirlemek için Denklem 4.16'dan yararlanılır.

$$\tan \alpha = \frac{2}{\pi} \omega C_0 \quad (4.16a)$$

$$C_0 = \frac{\pi}{2\omega} \cdot \frac{28,56 \cdot 10^{-6}}{480-92} = \frac{\pi}{4\pi f} \cdot \frac{28,56 \cdot 10^{-6}}{388} = 0,368 \text{ nF} \quad (4.16b)$$

Dielektrik bariyerin kapasite değerini belirleyen C_d parametresinin değeri ise Denklem 4.17a ve Denklem 4.17b'de gösterildiği şekilde belirlenebilir.

$$\tan \gamma = \frac{2}{\pi} \omega C_d \quad (4.17a)$$

Bu durumda C_d 'in sayısal değeri Denklem 4.17b'de verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$C_d = \frac{\pi}{2\omega} \cdot \frac{28,56 \cdot 10^{-6}}{234} = 0,61 \text{ nF} \quad (4.17b)$$

DBB'nin sönümlenme geriliminin değeri ise genel olarak tutuşma geriliminin 0.5-0.6 katı kadar olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla boşalmanın sönümlenme geriliminin değeri Denklem 4.18 yardımıyla yaklaşık olarak belirlenebilir.

$$U_{\text{sönümlenme}} \cong 0.6 \cdot U_{\text{tutuşma}} \quad (4.18)$$

Şekil 4.29'daki grafikte verilen parametrelere göre tutuşma geriliminin değeri yaklaşık olarak $U_{\text{tutuşma}} \cong 501,63 \text{ Volt}$ olarak belirlenmiştir. Buna göre boşalmanın sönümlenme geriliminin değeri ise $U_{\text{sönümlenme}} \cong 0,6 \cdot 501,63 \cong 301 \text{ Volt}$ olarak bulunur. Grafik üzerinden teorik olarak belirlenen bu değer, deneysel olarak ölçülen değerle uyumlu olduğu görülmüştür.

DBB'nin deneysel olarak belirlenen *Gerilim-Akım* ve *Gerilim-Yük* eğrilerinden yararlanarak, boşalmanın aşağıda verilen parametrelerini belirlemek mümkündür. Deneysel verilerden hareketle, hesaplanan gerilim ve akım değerlerinden yararlanarak boşalmanın tam gücü Denklem 4.19 yardımıyla belirlenebilir.

$$S = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cdot U(t) dt \quad (4.19)$$

DBB'nin deneysel olarak hesaplanmış olan gerilim ve akım parametrelerinin anlık değerlerinin Denklem 4.19'da dikkate alınmaları sonucunda boşalmanın yarım periyottaki tam gücünün değeri, $S = 2,447 \text{ VA}$ olarak hesaplanmıştır.

Boşalmanın aktif gücü ise Denklem 4.20 yardımıyla belirlenir.

$$P = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) \cdot U(t) dt \quad (4.20)$$

Gerilim ve akım parametrelerinin anlık değerlerinin Denklem 4.20'de dikkate alınmaları sonucunda boşalmanın yarım periyottaki aktif gücünün değeri, $P = 2,281 \text{ W}$ olarak hesaplanmıştır.

Boşalmanın reaktif gücü de Denklem 4.21a ve Denklem 4.21b ile belirlenebilir.

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (4.21a)$$

Denklem 4.19 ve Denklem 4.20'nin Denklem 4.21a'da dikkate alınmaları sonucunda boşalmanın yarım periyottaki reaktif gücünün değeri ise Denklem 4.21b'de verilmiştir.

$$Q = \sqrt{2,447^2 - 2,281^2} = 0,785 \text{ Var} \quad (4.21b)$$

Boşalmanın ortalama akım değeri ise Denklem 4.22a-b yardımıyla belirlenebilir.

$$I_{ort} = \frac{2}{T} \int_0^T i(t) dt = \frac{1}{23} \cdot \int_{-23}^{23} i_i \quad (4.22a)$$

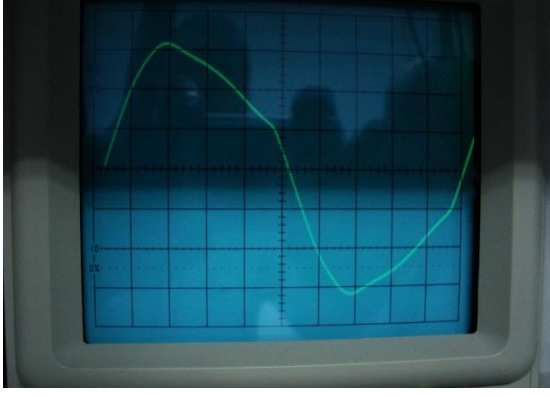
Denklem 4.22a'da verilmiş olan matematiksel ifadeden yararlanılarak boşalmanın yarım periyoduna karşılık gelen ortalama akım değeri Denklem 4.22b ile verilmiştir.

$$I_{ort} = \frac{1}{23} 2877 \cdot 10^{-6} = 125,09 \text{ } \mu A \quad (4.22b)$$

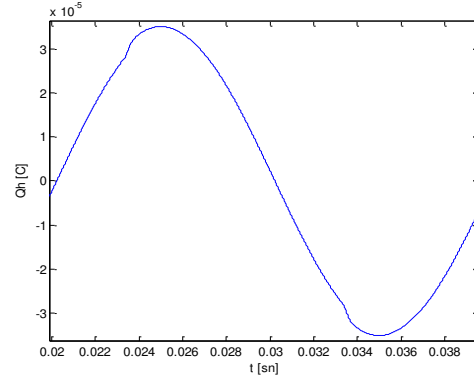
4.4. Bariyer Boşalmasının Deneysel Olarak Belirlenen Grafiklerinin Nümerik Olarak Belirlenen Grafiklerle Karşılaştırılması

Tez çalışmamızın bu kısmında ise deneysel çalışma sonuçları ile nümerik yöntemle alınan sonuçların karşılaştırmaları yapılarak, sonuçların benzerlik dereceleri ile ilgili yorumlara yer verilmiştir. Alınan deneysel sonuçların, nümerik model sonuçlarıyla karşılaştırmaları amacıyla, benzer görüntüler yan yana verilmiştir. Deneysel sonuçlar ile nümerik benzetim sonuçlarının benzerlik göstermesi, DBB sistemi için oluşturduğumuz eşdeğer modelin yeterince isabetli bir model olduğunu göstermektedir.

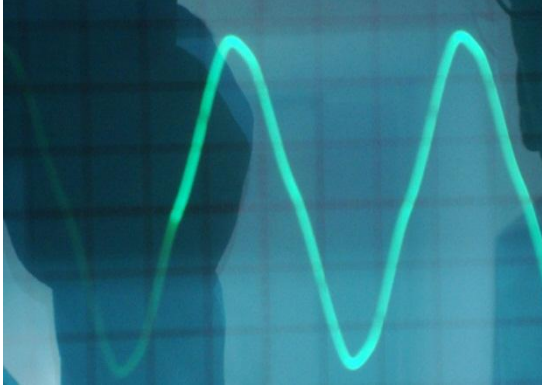
Şekil 4.30a ve b'de bariyer boşalmasının deneysel olarak alınan kapasitif akım eğrisinin gerçek ve nümerik benzetim görüntüleri verilmiştir. Bu eğriler alınırken, ölçümler sisteme seri bağlı olan C_v kondansatörü üzerinden yapılmıştır. Şekil 4.30c ve d'de ise sistemde henüz delinme olayı gerçekleşmemiş iken, DBB'nin R_v direnci üzerinden alınan akım grafiğinin görüntüsü ve nümerik benzetim görüntüsü verilmiştir. Bu durumdaki DBB elektrot sisteminin ayarlanmış parametre değerleri ise $p=2 \text{ hPa}$; $i=2,17 \text{ mA}$; $C=46 \text{ nF}$ ve $R_v=50 \text{ k}\Omega$ olarak belirlenmiştir.



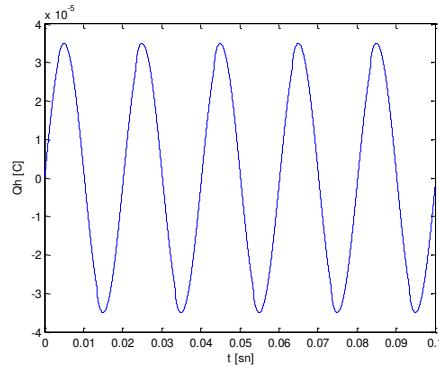
(a)



(b)



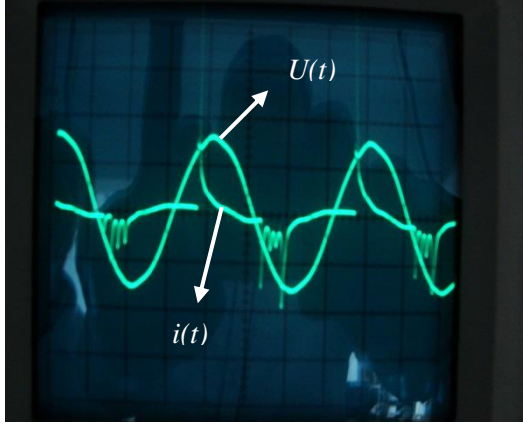
(c)



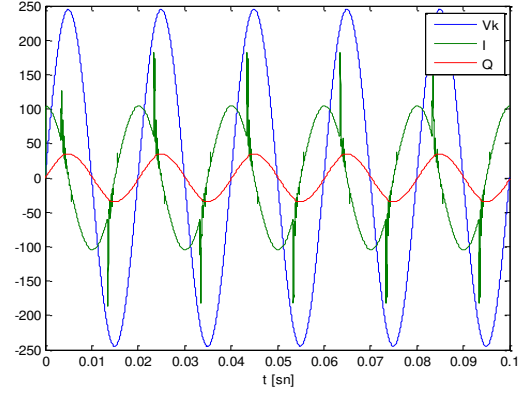
(d)

Şekil 4.30. Sistemde delinme olayı başlamadan önce C_v kondansatörü ve R_v direnci üzerinden ölçülen akım eğrileri ve benzetim sonuçları

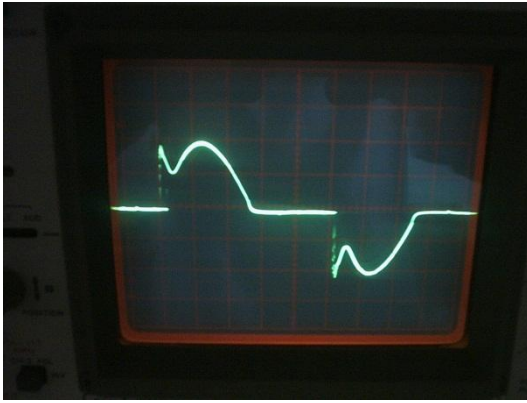
Şekil 4.31a ve b'de bariyer boşalmasının ilk tutuşması anındaki *Gerilim-Akım* eğrilerinin deneysel ve nümerik benzetim görüntüleri verilmiştir. Bu eğriler alınırken ölçümler sisteme seri bağlı olan R_v direnci üzerinden yapılmıştır. Şekil 4.31c ve d'de ise sistemde pd parametresinin azaltılması sonucu oluşan tekli boşalma guruplarının R_v direnci üzerinden alınan akım görüntüsü ve nümerik benzetim görüntüsü verilmiştir. Deney sisteminin bu durumdaki parametre değerleri ise $p=0,18$ hPa; $U=366$ V ve $R_v=100$ k Ω olarak belirlenmiştir. Bu deneyde boşalma akımının, sisteme uygulanan gerilimin pozitif alternasında tek guruplu osilasyon şeklinde; gerilimin negatif alternası durumunda ise ikili veya üçlü guruplar şeklinde tutuştuğu gözlenmiştir. Bu durumun muhtemel nedeni ise ortamın mevcut pd değerinin kritik pd değerine çok yakın değerlerde olması sonucu ortamda etkili olan uzay hacim yüklerinin meydana getirdiği kararsız davranışlardır. Gerilimin arttırılmasıyla birlikte enerjileri artan bu yüklerin kararsız davranışları aynı zamanda boşalma akımına da yansiyarak akım dalgaları üzerinde kararsız osilasyonların oluşmasına sebebiyet verirler.



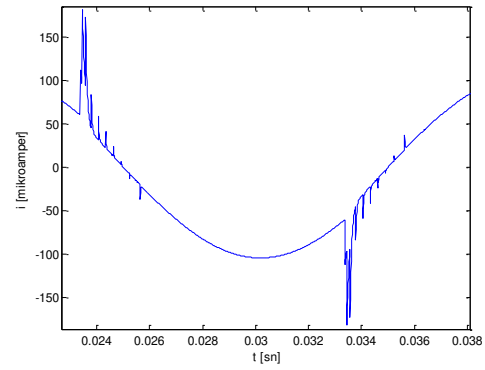
(a)



(b)



(c)

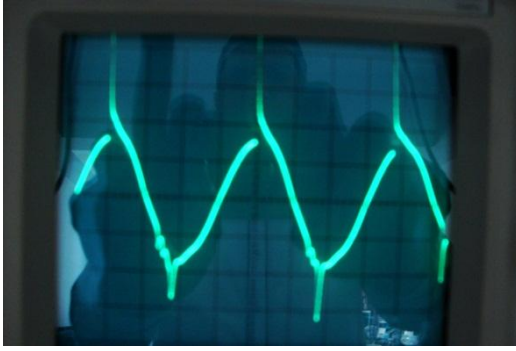


(d)

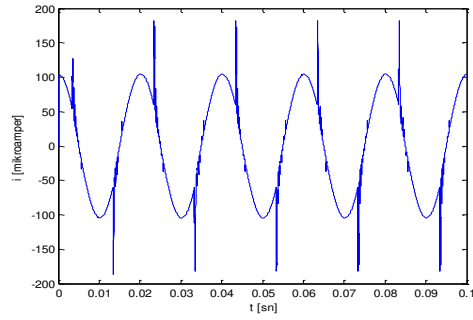
Şekil 4.31. Sistemde pd parametresine bağlı olarak R_v direnci üzerinden ölçülen bazı Gerilim-Akım eğrileri ve benzetim sonuçları

DBB deneylerinde boşalma olayı sırasında meydana gelen akım osilasyonları genelde çoklu guruplar şeklinde gelişir. Fakat bu tez çalışmasında alınan deney sonuçlarına göre boşalmada oluşan gurup sayılarının tekli guruplar şeklinde de gerçekleşebildiği gözlenmiştir. Bu durum Şekil 4.32a ve b’de gösterilmiştir. Bu ölçümler R_v direnci üzerinden alınmıştır. Boşalmanın uygulama gerilimi ve pd parametresinin arttırılmasıyla birlikte bu gurupların sayılarının da buna bağlı olarak arttıkları gözlenmiştir. Bu durum ise Şekil 4.32c ve d’de gösterilmiştir. Boşalma geriliminin tepe değerlerinde oluşan akım osilasyonları, Trichell darbeleri olarak adlandırılırlar. Burada oluşan ilk osilasyon, gerilimin arttırılması sonucu gaz aralığının delinmesiyle birlikte boşalmanın başladığını ifade eder. Şekil 4.32b’de oluşturulmuş olan benzetim sonucunda alınmış olan grafikte akım osilasyonunun bir miktar sağa kaydığı görülmektedir. Bu sorun katsayıların uygun değerlerde ayarlanmasıyla giderilebilir. Fakat bu durumda görüntüde başka osilasyon gurupları da oluşmaya

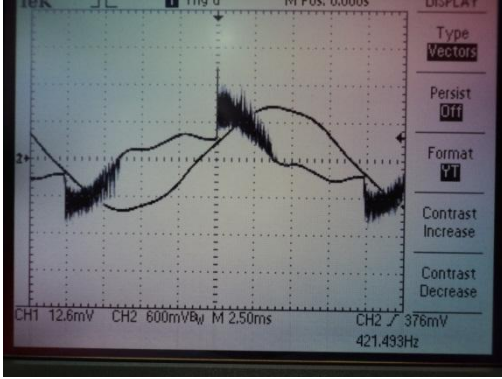
başlar. Genel olarak grafikler incelendiğinde, deneysel ve nümerik sonuçların birbirleriyle uyumlu olduğu görülmüştür.



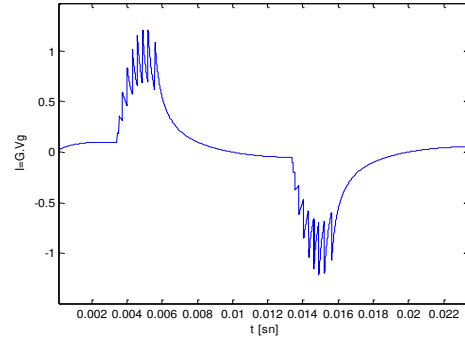
(a)



(b)



(c)



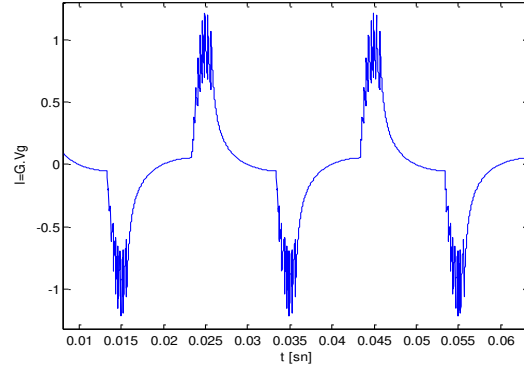
(d)

Şekil 4.32. Sistemde pd değerinin artırılması sonucunda R_v direnci üzerinden ölçülen bazı akım osilasyonları ve benzetim görüntüleri

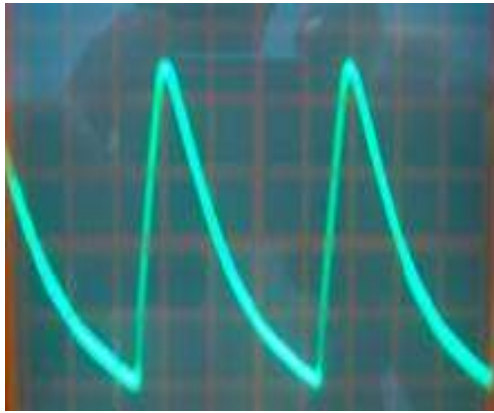
DBB'nin kapasitif özellikli elektrot sisteminde boşalmanın tutuşması durumunda C_v kondansatörü üzerinden alınmış olan boşalmanın kapasitif akım eğrilerinin görüntüleri Şekil 4.33'te verilmiştir. Boşalma sisteminin toplam akımını ve benzetim görüntülerini gösteren eğriler Şekil 4.33a ve b'de; sadece kapasitif akımını gösteren eğriler ve nümerik benzetim görüntüleri ise Şekil 4.33c ve d'de gösterilmiştir. Şekil 4.33a'da boşalmanın toplam akımının görüntüsü verilmiştir. Bu akım, kapasitif akım ve boşalma akımının toplamı şeklindedir. Akım eğrisinin pozitif alternansının sol tarafındaki rampa kısmı boşalma akımını; sağ tarafındaki kısmı ise kapasitif akımı karakterize etmektedir. Kapasitif akımın sade görüntüsü ise Şekil 4.33c'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi bu akım eğrisi genel olarak bir kondansatörün *dolup-boşalma* (*Şarj-Deşarj*) eğrisine benzemektedir. Akımın tepe değerlerinde oluşan osilasyonların sebebi ise elektrot aralığındaki uzay hacim yüklerinin kararsız hareketleridir.



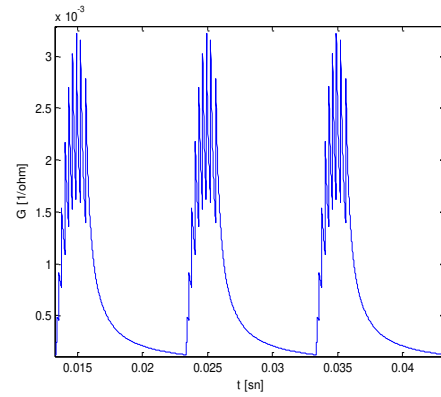
(a)



(b)



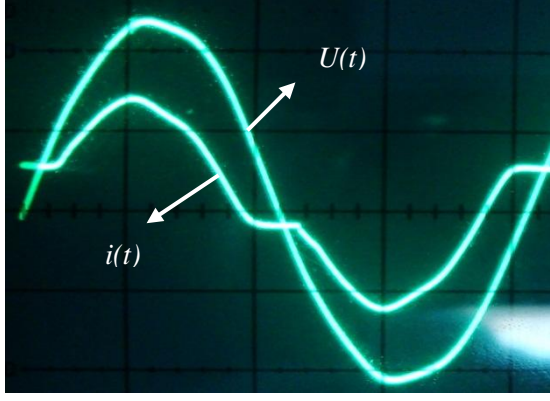
(c)



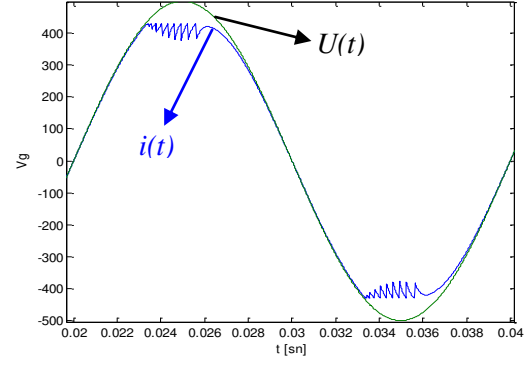
(d)

Şekil 4.33. DBB'nin kapasitif devre durumundaki boşalma akımı ve kapasitif akımının C_v kondansatörü üzerinden ölçülen gerçek görüntüleri ve benzetim görüntüleri

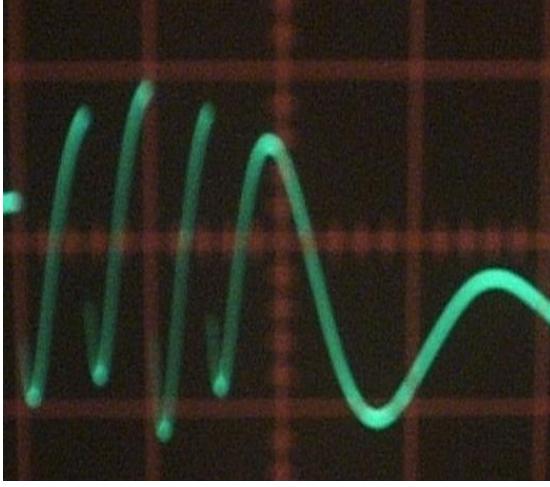
Deneyisel çalışmalar sırasında elde edilen görüntülerde, gerilimin tepe değerlerinde meydana gelen akım osilasyonları çok ince bir yapıya sahip oldukları için resimlerde net olarak görülememektedir. Ancak gerçek durumda bu görüntüler nümerik benzetim sonucu alınan görüntülerle büyük oranda örtüşmektedirler. Bu durumun karşılaştırmalı görüntüsü Şekil 4.34a ve b'de verilmiştir. Şekilde görülen $U(t)$ eğrisi, sisteme uygulanan gerilimi; $i(t)$ ise boşalma akımını karakterize etmektedir. Akım eğrisinden de görüldüğü gibi, gerilimin arttırılarak boşalma başlangıç gerilim değerine ulaşmasıyla birlikte gaz aralığında boşalma tutuşur ve akım eğrisi üzerinde yüksek frekanslara sahip kararsız osilasyon gurupları meydana gelir. Bu osilasyonların fiziksel yapısı incelendiğinde, osilasyonların ilk olanı sinüsoidal bir davranış sergilerken; sonraki osilasyonların ise sinüsoidal olmayan bir davranışa sahip oldukları görülmektedir. Oluşturulan modelin nümerik benzetim sonuçları da bu olayı doğrular niteliktedirler. Bu durumun açık örneği Şekil 4.34c ve d'deki akım osilasyon eğrilerinden görülmektedir.



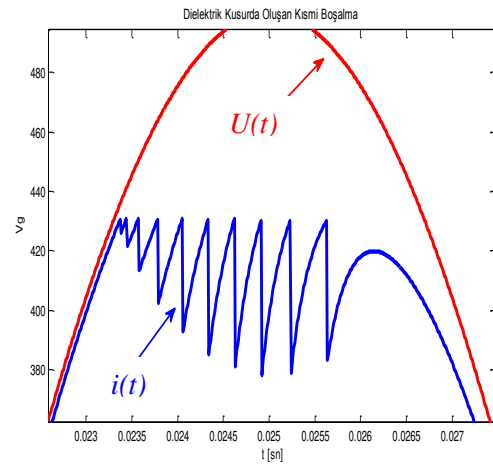
(a)



(b)



(c)

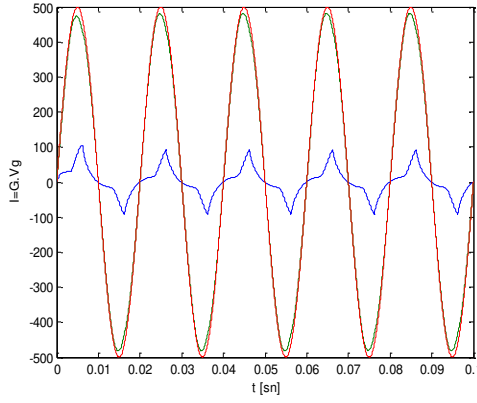


(d)

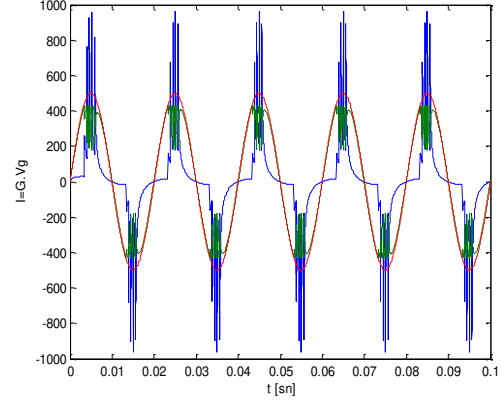
Şekil 4.34. DBB'nin tutuşması sırasında akım eğrisinde meydana gelen kararsız osilasyon guruplarının biçimleri ve nümerik benzetim görüntüleri

4.4.1. α İyonizasyon Katsayısı ve β Elektron Katsayısının Benzetim Sonuçları Üzerindeki Etkileri

DBB'nin iletkenlik denkleminde (Denklem 3.32b) göre yapılan benzetim işlemleri için referans olarak alınan α iyonizasyon katsayısı ve β elektron atışmet (eklenme) katsayısının belirlenmiş olan en uygun değerleri $\alpha=1 \times 10^5$ ve $\beta=1 \times 10^6$ olarak belirlenmiştir. α iyonizasyon katsayısının benzetim sonuçları üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla bu katsayısının yukarıda belirlenmiş olan en uygun değerinin altında ve üstünde iki farklı değer seçilerek benzetim işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.35a'da $\alpha=1 \times 10^3$ ve Şekil 4.35b'de ise $\alpha=1 \times 10^6$ olarak alınmıştır. Yapılan benzetim işlemleri sonucunda, şekillerden de görüldüğü gibi α iyonizasyon katsayısının akım osilasyonlarının genlikleri üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.



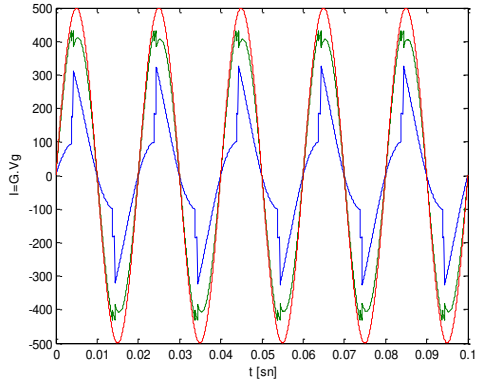
(a) $\alpha=1 \times 10^3$



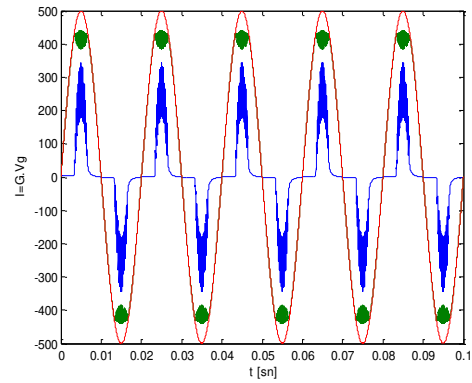
(b) $\alpha=1 \times 10^6$

Şekil 4.35. İyonizasyon katsayısının farklı değerlerindeki nümerik benzetim görüntüleri

Elektron atışement katsayısı olan β 'nın benzetim sonuçları üzerindeki etkisini belirlemek için de Şekil 4.36a'da $\beta=1 \times 10^5$ ve Şekil 4.36b'de ise $\beta=1 \times 10^7$ olarak alınmıştır. Bu katsayıların değiştirilmesi doğrultusunda yapılan benzetim işlemi sonucunda, β 'nın akım osilasyonlarının frekansları üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu görülmüştür.



(a) $\alpha=1 \times 10^3$



(b) $\alpha=1 \times 10^6$

Şekil 4.36. İyonizasyon katsayısının farklı değerlerindeki nümerik benzetim görüntüleri

Tez çalışması kapsamında oluşturulan DBB modeli için yapılan nümerik benzetim ile ilgili alınan teorik sonuçların deneysel sonuçlarla iyi uyum sağladığı görülmüştür. Bu benzetim sonuçlarının kendine has özellikleri, boşalma sırasında kuvvetli bir dış iyonizasyon (elektronların katottan desorpsiyon olmaları) olayının meydana geldiğini göstermektedir. Boşalmada kuvvetli bir iyonizasyonun varlığı ise gerilimin lineer olarak artmasına rağmen serbest osilasyonların bozulmasına yol açar. Bu durumda ortamdaki serbest radikaller nonlinear bir kararsızlık göstererek boşalmanın gelişimini önemli derecede etkilerler. Böyle bir durumda kararsızlık olayını azaltmak ve boşalmanın tutuşma geriliminin sınır değerini yükseltmek amacıyla pd parametresinin doğru bir

şekilde belirlenmesi önemli bir gerekliliktir. Boşalma ortamındaki gazın yüksek kararlılığa sahip nötür bir gaz olması, boşalma esnasında meydana gelen ve akım osilasyonlarının da temel sebebini oluşturan uzay hacim yüklerinin oluşumunu önemli ölçüde azaltan faktörlerden birisidir.

DBB'nin incelenmesi için yapılmış olan deneysel çalışmalar sonucunda elde edilmiş olan veriler, elektron emisyonu ile ilgili varsayımların oluşturulmasına önemli derecede katkı sağlarlar. Örneğin elektrot yüzeylerinden elektron kopararak boşalma çığlarını oluşturan mekanizmanın temelini oluşturan *iyon-elektron* emisyonu, dielektrik bariyer tabaka için gereksiz olabilir. Fakat dielektrik tabakada adsorbe olan elektronların, termal etki veya uyarılmış moleküllerin çarpma etkileri sonucu desorbsiyon olmaları, DBB'nin oluşumunu sağlayan elektron üretim mekanizmalarını etkileyen önemli bir faktördür. Azot ortamında, titreşim etkisiyle uyarılmış moleküller elektron desorpsiyonuna neden olurlar. Bu mekanizmaların etkisiyle meydana gelen elektron emisyonu, doğrudan iyonizasyon olayının küçük olduğu zayıf elektrik alanı durumunda boşalmayı kararlılaştırıcı yönde bir etki gösterir. Kararsızlık durumunun yeterince giderilmesi ve kademeli iyonizasyon işleminin küçük olması durumunda, emisyon yoluyla meydana gelen elektron üretimi, büyük öneme sahiptir. Ayrıca yüzeydeki tekrar birleşme (rekombinasyon) olayı da bariyer boşalmasının gelişimini önemli ölçüde etkileyen faktörlerden birisidir. Rekombinasyon ve desorbsiyon olayları boşalma akımını da doğrudan etkileyen faktörlerdir. Bu durumda ortamdaki uzay hacim yüklerinin hareketleri akım osilasyonlarının oluşumu üzerinde önemli bir etki gösterir.

Özet olarak dielektrik bariyer tabakalar arasında gerçekleşen Townsend boşalmasının analizi ve modellenmesi, dielektrik yüzeyde gerçekleşen olaylar hakkında önemli verilere ulaşılmasını sağlar. Başka bir deyişle bu boşalma mekanizmasıyla ilgili elde edilen veriler, bir dielektrik bariyer tabaka yüzeyinde meydana gelebilecek çeşitli uygulama problemleri ve boşalma aralığında oluşan yüklü parçacıklar arasındaki etkileşimleri karakterize eden eşdeğer modelin geliştirilmesinin hatasız ve isabetli olması açısından önemli bir katkı sağlarlar.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Elektrik Boşalmasının oluşumu ve gelişiminin fiziksel temellerini oluşturan olayların incelenmesi, özellikle tekniğin iki alanı için önem taşımaktadır [101]. Bunlar sırasıyla;

- i) Gazların yaygın ve perspektif izolasyon elemanı gibi kullanıldığı yüksek gerilim tekniği;
- ii) Kuvvetli elektriksel alan ve boşalma olayını temel alan farklı teknolojik prosesler (*İyon-Elektron Teknolojisi*).

Elektrik boşalmalarındaki fiziksel olayların incelenmesinin temel amacı, boşalmanın parametrelerini ve biçimlerini belirleyen faktörlerin açıklanması ve analizidir.

Townsend boşalmasının uzaysal homojen ve stasyoner olarak gerçekleşmesini sağlayan koşulların belirlenmesi, düşük sıcaklıklı plazma fiziği ve tekniğinde son derece pratik öneme sahip problemler arasında yer almaktadır. Fakat boşalma akımının büyük değerlerinde elektrotlar arasında gerçekleşen boşalma, oluşan kararsızlıklar nedeniyle homojenliğini ve stasyonerliğini kısmen veya tamamen kaybeder. Günümüzde Townsend boşalmasının kararsızlığına yönelik çok sayıda çalışmanın olmasına rağmen kararsızlığın gelişme sebepleri ve bu sebeplerin yol açacağı muhtemel sonuçları açıklığa kavuşturacak teorik ve deneysel bilgiler yetersizdir.

Townsend boşalmasının kararsızlığına duyulan pratik ilginin temel sebeplerinden biri, bu boşalma türünün infrared (*IR*) görüntüleri, görünür görüntülere dönüştüren yüksek hızlı transdüserlerde kullanılmasıdır [102]. Bu tür transdüserler $\lambda=(1-10) \mu m$ dalga boyu aralığında yüksek işleme hızına ($\sim 10^{-6} sn$) sahiptirler. Bu aygıtın temelini yarıiletken levha ve boşalma aralığından oluşan ince düzlemsel sistem oluşturur. Yarıiletken levha bir yandan boşalma için katot rolünü oynarken, diğer yandan da balast direnç rolünü sergiler. Boşalmanın uzaysal homojenliğini ve stasyonerliğini engelleyen kararsızlıklar, olası boşalma akım şiddetini sınırlar ve buna bağlı olarak da aygıtın hassasiyetini düşürür. Bu nedenle aralıkta oluşan kararsızlıkların temel sebeplerinin detaylı incelenmesi, güncel olan bu konunun kısmen olsa da açıklığa kavuşturulmasına olanak sağlar. Bu konu ile ilgili detaylı çalışmalar ileriki zamanlarda yapılacak işlemler arasında yer almaktadır.

Metal-Dielektrik-Gaz-Dielektrik-Metal (*MDGDM*) sisteminde elektrot yüzeyi boyunca oluşan homojen akım osilasyonları, bariyer boşalmasının Townsend kararsızlığının bir sonucudur [37, 49]. Çalışmanın temel amaçlarından biri, bu osilasyonları kontrol eden faktörlerin belirlenmesidir. Bu çalışmada DBB hücrelerinde gerçekleşen fiziksel olayların benzetimi için önerilen modelde ve analizlerde, boşalma kanalının dinamik iletkenliği esas alınmıştır. Böylece boşalma kanalını etkileyen iç ve dış faktörlerin oluşturdukları nonlineer kayıpların da hesaba katılmasıyla akım osilasyonlarının kararsızlıklarının daha iyi incelenmesini sağlanmıştır. Bu durum, boşalmanın kontrolü ve kararlılığı açısından büyük öneme sahiptir. Bariyer boşalmasının pratik uygulama alanlarını daha da arttırmak için fiziksel mekanizmasının çok iyi modellenmesi gereklidir. Deneysel olarak aldığımız sonuçların nümerik model sonuçlarıyla uyumlu olması, oluşturulan modelin yeterince isabetli olduğunun bir göstergesidir.

Townsend boşalmasının *Gerilim-Akım* karakteristiğinin azalan karaktere sahip olması, osilasyonların oluşumunun bir göstergesidir. Negatif diferansiyel direnç, *Gerilim-Akım* karakteristiğinin negatif eğim ölçüsüdür. Bu durumda yüklü parçacıkların elektriksel alanda hareketi dolayısıyla oluşan elektriksel direnç pozitif olup, gaz ortamında bulunan nötr durumdaki parçacıkların sürtünme kuvvetiyle doğru orantılı olarak değişir. Öngörülen deneylerden hareketle çoğu durumlarda Townsend boşalmasının *Gerilim-Akım* karakteristiğinin başlangıçta lineer bir düşüşe sahip olduğu gözlenmiştir. Bu doğrunun başlangıç eğimi, akımın çok küçük değerlerinde negatif diferansiyel dirençle karakterize olunur. Boşalmada gerçekleşen osilasyonlarla ilgili problemlerde, negatif diferansiyel direnç anahtar bir parametre olup mekanik sistemlerde osilasyonları gerçekleştiren dış (zorlayıcı) kuvvetin bir benzetimini ifade etmektedir.

MDGDM sisteminde gerçekleşen kararsızlıklar, elektrik boşalmasının uzaysal homojenliğinin bozulmasına neden olurlar. Bu durumda akım, çok sayıda ince boşalma kanallarından oluşur [37, 50, 90]. Literatürde şimdiye kadar yeterli açıklama bulamayan bazı problemlerin; örneğin, başlangıçta elektrotlar yüzeyince homojen olan akımın çok sayıdaki boşalma kanallarına dönüşmesinin sebebinin açıklanması ve bu olayın gerçekleşmesinde katot materyalinin (iletken, yarıiletken veya yalıtkan) önemli olup olmadığının belirlenmesi gerekmektedir.

Elektrotlar arasında yüklü parçacıkların oluşumu, hareketleri, tekrar birleşme ve difüzyon nedeniyle yok olmalarını açıklayan fiziksel olayların bilinir olması sebebiyle; elektriksel gaz boşalmalarının gerçekleşme mekanizmalarının incelenmesi, değişik teknik problemlerin çözümüne yönelik pratik ilgiyi her geçen gün arttırmakta olup bu konunun günümüz koşullarında güncel bir konu haline gelmesine olanak sağlar.

Bu tez çalışmasında elde edilen genel sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- Farklı koşullarda ve farklı ortam parametreleri için Metal-Gaz-Dielektrik-Metal (*MGDM*) ve Metal-Dielektrik-Gaz-Dielektrik-Metal (*MDGDM*) elektrot sistemlerinde gerçekleşen bariyer boşalmasını sağlayan deney hücresi tasarlanmış, hava ve azot ortamlarında gerçekleşen bariyer boşalmasının $(pd)_{kr}$ değerleri ve optimal rejimleri belirlenmiştir.
- Düzlemsel ve iki boyutlu geometriler için *i)* $pd > (pd)_{kr}$ ve *ii)* $pd < (pd)_{kr}$ koşullarında *MGDM* ve *MDGDM* elektrot sistemlerinde gerçekleşen boşalmanın *Gerilim-Akım* özeğrileri ve *Gerilim-Yük* karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiş ve akım osilasyonları incelenmiştir.
- *MGDM* DBB hücre modeli için $U_G < U_D$ koşulunda: *i)* tabakalarda meydana gelen elektrik alan şiddetinin, *ii)* dielektriklerin arasını yüzeylerindeki serbest ve bağlı elektrik yüklerinin, *iii)* DBB hücre modeli üzerinden geçen akımın zamana bağlı olarak değişimini analiz etmeye olanak sağlayan ifadeler türetilmiş ve *iv)* *MGDM* sistemi üzerinde depolanan enerji balansı (dengesi) gösterilmiştir.
- *MDGDM* DBB hücre modeli için $U_G > U_D$ koşulunda; *i)* DBB hücresi üzerinden taşınan elektrik yükünün zamana bağlı olarak değişimini belirlemeye olanak sağlayan diferansiyel denklem türetilmiş ve bu nonlinear diferansiyel denklemin içerdiği dinamik iletkenliği belirleyen yeni bir model önerilmiştir. *ii)* DBB hücresinde birim zamanda meydana gelen boşalmaların sayısı, birim boşalma kanalında açığa çıkan aktif, reaktif ve tam güç parametreleri belirlenmiştir.
- Başlangıç koşullarının dikkate alınmasıyla, *MDGDM* DBB hücre modeline karşılık gelen nonlinear denklemlerin zaman domeynli *FDTD* sonlu farklar yöntemiyle nümerik çözümlenmesi yapılmış ve elde edilen nümerik sonuçların deneysel verilerle karşılaştırması yapılmıştır.

DBB ile ilgili gelecekte yapılması düşünülen çalışmalar:

- ❖ DBB'nin akım osilasyonları, sistemine *DC* gerilim uygulanarak incelenebilir.
- ❖ DBB elektrot sistemine dışarıdan kontrol edilebilen bir elektrik alanı uygulanarak akım osilasyonlarının davranışları incelenebilir.
- ❖ Boşalmanın dinamik ortamındaki uzay hacim yüklerinin ve bunlara bağlı olarak meydana gelen akım osilasyonlarının uzaktan algılama yöntemiyle karakteristikleri belirlenerek modellenenebilir.
- ❖ Boşalmanın akım kararsızlıklarının ultrasonik yöntemlerle belirlenmesi yönünde çalışmalar yapılabilir.
- ❖ Bariyer boşalmasının teknolojik (kimyasal, fiziksel ve biyolojik) uygulama alanlarının daha da artırılması yönünde çalışmalar yapılabilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] Z. WANG, C. REN, Q. NIE, D. WANG. *Effects of Airflows on Dielectric Barrier Discharge in Air at Atmospheric Pressure*. **Plasma Science and Technology**, Vol.11, No.2, Apr. (2009).
- [2] G. M. Kogoma and S. Okazaki, *Low-frequency dielectric-barrier discharge in the Townsend mode* **J. Phys. D** **24**, 1985 (1994).
- [3] M. Laroussi, G. S. Sayler, B. B. Glascock, et al, *Filamentary and diffuse barrier discharges*. **IEEE Trans. Plasma Sci.** **27**, 34 (1999).
- [4] Th. Callegari, R. Ganter, and J. Boeuf, *Diagnostics and modeling of a macroscopic plasma display panel cell*. **J. Appl. Phys.** **88**, 3905 (2000).
- [5] A. Oda, Y. Sakai, and A. H. Sugawara, *Modeling of multifilaments formation in dielectric barrier discharge excimer lamp*. **J. Phys. D** **32**, 2726 (1999).
- [6] S. Yagi and N. Tabata. Proc. IEEE/OSA Conf. on Lasers and Elektro-Opt. Paper WE 5, p. 22, Washington DC (1981).
- [7] K. Yasui, M. Kuzumoto, S. Ogawa, M. Tanaka and S. Yagi. **IEEE Quantum Elektron.** **25**, 836 (1989).
- [8] Y. Takenaka, M. Kuzumoto, K. Yasui, S. Yagi and M. Tagashira. **IEEE J. Quantum Elektron.** **27**, 2482 (1991).
- [9] A. K. Shuaibov and V.S. Shevera. Sov. Phy.-Tech. Phys. **24**, 976 (1979).
- [10] G. A. Volkova, N. N. Kirillova, E. N. Pavlovskaya and A. V. Yakovleva. **J. Appl. Spectrosc.** **41**, 1194 (1984).
- [11] B. Eliason and U. Kogelschatz. Appl. Phys. B. **46**, 299 (1988).
- [12] U. Kogelschatz. Pure & Appl. Chem. **62**, 1667 (1990).
- [13] U. Kogelschatz. Proc. XX. Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases. Invited Papers, Pisa (1991), p.953.
- [14] U. Kogelschatz. Appl. Surf. Sci. **54**, 410 (1992).
- [15] I. Sardja & S. K. Dhali. Appl. Phys. Lett. **56**, 21 (1990).
- [16] M. B. Chang, J. H. Balbach, M. J. Rood and M. J. Kushner. **J. Appl. Phys.** **69**, 4409 (1991).
- [17] M. B. Chang, M. J. Kushner and M. J. Rood. Plasma Chem. Plasma Proc. **12**, 565 (1992).
- [18] F. Massines, C. Mayoux, R. Messaoudi, A. Rabehi and P. Ségur. Proc. Tenth Int. Conf. on Gas Discharges and their Applications..P. 730, (Swansea 1992).
- [19] E. J. Clothiaux, J. A. Koropchak and R. R. Moore. Plasma Chem. Plasma Proc. **4**, 15 (1984).
- [20] D. G. Storch and M. J. Kushner. **J. Appl. Phys.** **73**, 51 (1993).
- [21] B. Eliasson, W. Egli and U. Kogelschatz. **Pure & Appl. Chem. Vol. 66**, No:6. pp. 1275–1286, (1994).
- [22] L. Dongping, M. Tengcai, Y. Shiji, et al., **J. Phys. D** **34**, 1651 (2001).
- [23] F. Massines, A. Rabehi, Ph. Decomps, et al., **J. Appl. Phys.** **83**, 2950 (1998).
- [24] Jichul Shin and Laxminarayan L. Raja, **J. Appl. Phys.** **94**, 7408 (2003).
- [25] Yu. B. Golubosckii, V. A. Maiorov, J. Behnke, and J. F. Behnke, **J. Phys. D** **36**, 39 (2003).
- [26] H. Luo, Z. Liang, X. Wang, Z. Guan and L. Wang. *Homogeneous dielectric barrier discharge in nitrogen at atmospheric pressure*. **J. Phys. D: Appl. Phys.** **43**, 155201. (9pp) (2010).

- [27] D. Wang, Y. Wang, C. Liu.. *Multipeak behavior and mode transition of a homogeneous barrier discharge in atmospheric pressure helium*. **Science Direct Thin Solid Films** 506 –507. 384 – 388 (2006).
- [28] Y. Zhang, B. Gu, X. Peng, D. Wang and W. Wang. *Discharge dynamics and characteristics of atmospheric glow discharge excited by sub-microsecond high voltage pulses* **Science Direct Thin Solid Films** 516 (2008).
- [29] N. V. Viegart, L. Niemeyer, F. Pinnekamp, W. Boeck, J. Kindersberger, R. Morrovv, W. Zaengl, M. Zwicky, I. Gallimberti and S. A. Boggs, " *Inhomogeneous Field Breakdown in SF₆ ", Parts, 1- 3, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 3, (1988), pp. 923-946.*
- [30] E. Cartier and P. Pfluger, " *Charge Storage and Radiation Damage in Thin Dielectric Filrns Studied by Electron Spectroscopy* ", 2nd Intern. Conf. on Conduct. And Breakd. In Sol. Dielectr, (1986), pp. 308-312.
- [31] G. C. Crichton, H. W. Karlsson and A. Pedersen, " *Partial Discharge in Elipsoidal and Spheroidal Voids* ", **IEEE Trans. Insul., Vol.24**, (1989), pp. 335- 342.
- [32] M. B. Chano, M. J. H. Balbach, M. J. Rood, and M. J. Kushner, *Removal of SO₂ from gas streams using a dielectric barrier discharge and combined plasma photolysis*. **Journal of Applied Physics**, **69**, (1991), 4409-4417.
- [33] H. Lentz and F. Müller, *Quasi-continuous flow of solids for extractions or reactions with compressed fluids*, Chem. Eng. Tech. 25 (4), (2002).
- [34] I. Radu, R. Bartnikas, M. R. Wertheimer, **J. Phys. D: Appl. Phys.** **38** (2005) 539.
- [35] C. Zhang, T. Shao, Y. Yu, Z. Niu, P. Yan and Y. Zhou. **Journal of Electrostatics** **68** (2010), 445–452.
- [36] V. I. Gibalov, P. S. Novikov, A. T. Rakhimov, V. B.Saenko, and A. B. Saveliev Moscow State University, Chemical Department, (1989), Moscow, Russia;
- [37] V. G. Samoilovich, V. I. Gibalov and K. V. Kozlov, *Physical Chemistry of the Barrier Discharge (Russ.)*, (Moscow State University, 1989).
- [38] D. S. Nikandrov and L. D. Tsendin. **Technical Physics**, **Vol. 50**, No. 10, (2005), pp. 1284–1294. Translated from **Zhurnal Tekhnicheskoy Fiziki**, **Vol. 75**, No. 10, (2005), pp. 34–43.
- [39] M. Sjo. Berg, Yu. V. Serdyuk, S. M. Gubanski, M. A. S. Leijon, *Experimental study and numerical modelling of a dielectric barrier discharge in hybridair–dielectric insulation*. **Journal of Electrostatics Volume 59, Issue 2**, September (2003), Pages 87-113
- [40] G. Steinle, D. Neundorf, W. Hiller, M. Pietralla, *Two-dimensional simulation of filaments in barrier discharges*, **J. Phys. D** **32** (12) (1999), 1350–1356.
- [41] Alagöz, B. Baykant. *Küre-düzlem elektrot sisteminde gerçekleşen korona olayının nümerik simülasyonu*. Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, (2011).
- [42] Scanavi G. I. Masuda S. et al. *Physics of Dielectrics. A ceramic-based ozonizer using high frequency discharge*. IEEE Trans. Ind. Appl. 24 (Moscow) (in Russian) (1988), 223–231.
- [43] H. Z. Alisoy, A. Yesil, M. Koseoglu, I. Unal " *An approach for unipolar corona discharge in N₂/O₂ gas mixture by considering townsend conditions*" **Journal of Electrostatics** **69 (4)** 284-290 (2011).
- [44] U. Kogelschatz. *Proc. XVI. Int. Conf. on Phenomena in Ionized Gases*. Invited Papers, p. **240**, Düsseldorf (1983).

- [45] U. Kogelschatz. *Proc. Tenth Int. Conf. on Gas Discharges and their applications*, p. **972**, Swansea (1992).
- [46] U. Kogelschatz. *Advanced Ozone Generation*, in: *Process Technologies for Water Treatment* (S. Stucki, ed.) p.**87**, Plenum Press, New York (1988).
- [47] V. Schorpp. *Die dielektrisch behinderte Edelgas-Halogen-Excimer-en fludung: Eine neuartige WStrahlenquelle*. Dissertation. Karlsruhe University (1991).
- [48] K. Stockwald. *Neuartige Xenon- und XenonlQuecksilber-Lumpen im VWI W-Spektralbereich*. Dissertation. Karlsruhe University (1991).
- [49] H. Z. Alisoy, C. Yeroglu, M. Koseoglu, F. Hansu, "Investigation of the characteristics of dielectric barrier discharge in transition region", **J. Phys. D: Appl. Phys.**, vol. **38**, pp.4272-4277, (2005).
- [50] C. M. Juvarly, P. V. Leonov, H. Z. Alisoy, (Aliyev), *Energetically analysis of the expansion of breakdown polymeric films in the treatment them with discharge SF6*, **J. Rep. Acad. Sci. Phys. Tech. Math. XLIV (5)** (1998) 44–47.
- [51] O. SAHIN, F. HANSU et al. *Hydrogen generation from NaBH4 solution with the highperformance Co (0) catalyst using a cold plasma method*. **J. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. UESO–2010–0817.R2**. (08-Jan–2011).
- [52] O. SAHIN, O. BAYTAR, F. HANSU et al. *Hydrogen generation from hydrolysis of sodium borohydride with Ni(0) catalyst in dielectric barrier discharge method* **J. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. UESO–2010–0800. R1**. (12-Jan–2011).
- [53] W. H. Mc Culla, L. A. Rosocha, W. C. Neely, E. J. Clothiaux, M. J. Kushner and M. J. Rood. *Treatment of hazardous organic wastes using wet air plasma oxydation. Proc. 1st INEL Plasma Applications to Waste Treatment Workshop*, Idaho Falls (1991).
- [54] D. G. Storch and M. J. Kushner. **J. Appl. Phys.** **73**, 51 (1993).
- [55] I. Traus and H. Suhr. *Plasma Chem. Plasma Proc.* **12**, 275 (1992).
- [56] U. Kogelschatz. *W production in dielectric barrier discharges for pollution control. Proc. NATO Adv. Res. Workshop on Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control*. Cambridg, (1992).
- [57] Gibalov, V., and Pietsch, G. *The development of dielectric barrier discharges in gas gaps and on surfaces*. **J. Phys.D** **33**, (2000).
- [58] H. Scheytt, H. Esrom, L. Prager, R. Mehnert and C. von Sonntag. *Ultraviolet light and electron beam induced degradation of trichloroethylene. Proc. NATO Adv. Res. Workshop on Non-Thermal Plasma Techniques for Pollution Control*. Cambridge (1992).
- [59] B. Eliasson, W. Egli and U. Kogelschatz. *Modelling of dielectric barrier discharge chemistry*. *Pure & Appl. Chem.*, Vol. 66, No.6, pp. 1275-1286, (1994).
- [60] PETKİM (Petrokimya Holding A.Ş.) Hava Azot Oksijen Üretim Tesislerinin Tanıtılması, Aliğa (2006).
- [61] J.-M. Guo, C.-H. John Wu, *Two-dimensional nonequilibrium fluid models for streamers*, **IEEE Trans. Plasma Sci.** **21 (6)** (1993), 684–694.
- [62] E. M. Bazelyan, Yu. P. Raizer, *Spark Discharge*, CRC Press, Boca Raton, FL, (1998).
- [63] G. Rabilloud, *High-Performance Polymers: Polyimides in Electronics*, Editions Technip, Paris, (2000), 1–85.

- [64] Y. Kuwana, A. Hirose, H. Kurino and M. Koyanagi, *Signal propagation characteristics in polyimide optical wave-guide with micro-mirrors for optical multichip module*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **38** (1999), 2660–2663.
- [65] M. Iwanoto and M. Kakimoto, “*Polyimides as Langmuir-Blodgett Films*”, in *M. K. Ghosh and K. L. Mittal (Ed.), Polyimides- Fundamentals and Applications*, Marcel Dekker, New York, (1996), 815–885.
- [66] H. Ohya, V. V. Kudryavtsev, S. I. Semenova and S. I. Semenova, *Polyimide membranes: applications, fabrications, and properties*, Kodansha, Japan, (1996), 241–295.
- [67] J. Kim, M. Lee, M. Kang, K. Yoo, K. Kwon, V. Singh and N. Min, *Fabrication of high-speed polyimide-based humidity sensor using anisotropic and isotropic etching with ICP*, *Thin Solid Films*, 517:14 (2009) 3879–3882.
- [68] J. L. Suthar, J. R. Laghari, A. N. Hammoud, E. D. Baumann, I. T. Myers and S. Domitz, *Conf. Record of the IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Baltimore, MD USA, June 7–10, (1992), pp. 17–20.
- [69] A. V. Papkov, A. P. Mel’nichenko, V. M. Pak and I.E. Kuimov, *Modern electric insulating materials for the insulation systems of rotating electric machines*, *Russian Elect. Eng.* 80: 3 (2009) 123–127.
- [70] M. Bao and W. Wangb, *Future of microelectromechanical systems (MEMS), Sensor. Actuat. A Phys.* **56: 2** (1996), 135–141.
- [71] E. Sugimoto, *Applications of Polyimide Films to the Electrical and Electronic Industries in Japan*, *IEEE Electr. Insul. M.*, 5:1 (1989), 15-23.
- [72] P. K. Chu, X Tian and L. Li, *Surface Engineering Methods*, in G. E. Totten, K. Funatami and L. Xie (Ed.), *Handbook of Metallurgical Process Design*, Marcel Dekker, USA, (2004), 791–831.
- [73] M. P. Groover, *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*, John Wiley&Sons, USA, (2007), 669–686.
- [74] P. K. Chu and X Tian, *Plasma-Based Surface Modifications*, in G.E. Totten and H. Liang (Ed.), *Surface Modification and Mechanisms*, Marcel Dekker, USA, (2004), 543–601.
- [75] M. R. Wertheimer, H. R. Thomas, M. J. Perri, J. E. K. Sapiuha and L. Martinu, *Plasmas and polymers: From laboratory to large scale commercialization*, *Pure Appl. Chem.* 68:5 (1996), 1047–1053.
- [76] N. Takahashi, A. Goldman, M. Goldman and J. Rault, *Surface modification of LDPE by a DC corona discharge generated in a point-to-grid system: the influence of geometric parameters of the system on modification power*, *J. Electrostat.* **50** (2000), 49–63.
- [77] E. M. Liston, L. Martinu and M. R. Wertheimer, *Plasma Surface Modification of Polymers for Improved Adhesion: A Critical Review*, in M. Strobel, C. S. Lyons and K. L. Mittal (Ed.), *Plasma Surface Modification of Polymers: Relevance to Adhesion*, VSP, Utrecht, (1994), 3–39.
- [78] M. J. Shenton, M. C. Lovell-Hoare and G. C. Stevens, *Adhesion enhancement of polymer surfaces by atmospheric plasma treatment*, *J. Phys. D: Appl. Phys.* **34** (2001), 2754.
- [79] R. Seeböck, H. Esrom, M. Charbonnier and M. Romand, *Modification of Polyimide in Barrier Discharge Air-Plasmas: Chemical and Morphological Effect*, *Plasmas and Polymers* 5:2 (2000), 103–118.

- [80] P. Intra and N. Tippayawong. *Measurements of Ion Current from a Corona-needle Charger Using a Faraday Cup Electrometer*. **Chiang Mai J. Sci.** **36**(1) (2009), 110–119.
- [81] V. I. Gibalov, J. Pietsch, *The development of dielectric barrier discharges in gaps and on surface*, **J. Phys. D: Appl. Phys.** **33** (2000) 2618e2636.
- [82] M. Sjöberga, Y. W. Serdyuka, S. M. Gubanskia, M. Leijon, *Experimental study and numerical modelling of a dielectric barrier discharge in hybrid air-dielectric insulation*, **J. Electrostat.** **59** (2003) 87e113.
- [83] N. Naudé, J. P. Cambreonne, N. Gherardi, F. Massines, *Electrical model and analysis of the transition from an atmospheric pressure Townsend discharge to a filamentary discharge*, **J. Phys. D: Appl. Phys.** **38** (2005) 530e538.
- [84] M. Teschje, D. Korzec, E. G. Finantu-Dinu, J. Engemann, *Influence of electrode layout on performance of insulated surface discharge: modelling by use of PSpice*, **Surf. Coat. Technol.** (2003) 174e175 541e546.
- [85] Z. Y. Chen, *PSpice simulation of one atmosphere uniform glow discharge plasma (OAUGDP) reactor systems*, **IEEE Trans. Plasma Sci.** **31** (2003) 511e520.
- [86] R. Valdivia-Barrientos, J. Pacheco-Sotelo, M. Pacheco-Pacheco, J.S. Benítez-Read, R. Lopez-Callejas, *Analysis and electrical modelling of a cylindrical DBD configuration at different operating frequencies*, **Plasma Sour. Sci. Technol.** **15** (2006) 237e245.
- [87] Çolak, Ö. H., *Kayıplı Ortamlarda Elektromagnetik Dalga Yayılımının Zamanda Sonlu Farklar Metodu İle Analizi ve Simülasyonu*, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 58s, (2003).
- [88] G. T. Alisoy, H. Z. Alisoy, S. A. Rustamov, M. Arkan. **Physica A** **335** (2004), 59 – 69
- [89] N. Kartalovic, D. Kovacevic, and S. Milosavljevic. **SER.: ELEC. ENERG.** vol. **24**, no. 1, April (2011), 43–57
- [90] H. Z. Alisoy, *Elektrikçeskiye yavleniya v gazah (Electrical Phenomenon in Gas)*, Azerbaijan Science Academy, Institute of Physics, Bakü, (1995).
- [91] H. Z. Alisoy (Aliyev), *Change of Electrophysical Properties of Polymer Dielectrics of Which Surface are Bombarded with Negative Charged Ions*, PhD. Thesis, Academy of Science USSR Institute of Physics, Moscow, (1988).
- [92] L. Niemeyer, “A generalized approach to partial discharge modeling”, **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, vol.2 n.4, pp. 510–528, (1995).
- [93] Yu. P. Raizer, *Gas Discharge Physics* (Nauka, Moscow, 1992; Springer, Berlin, 1991).
- [94] M. Radmilović-Radjenović, J. K. Lee, F. Iza and G. Y. Park *Particle-in-cell simulation of gas breakdown in microgaps* **J. Phys. D: Appl. Phys.** **38** (2005) 950–954doi:10.1088/0022-3727/38/6/027
- [95] A. A. Ganjovi, N. Gupta, G. R. G. Raju, “A kinetic model of a PD pulse within voids of sub-millimeter dimensions”, **IEEE TDEI**, Vol. 16, no. 6, pp. 1743-1754, 2009.
- [96] C. M. Juvarlı, G.V. Veçhavzer, P.V. Leonov, *Electrical Discharge in the High Voltage Insulation Gas Voids*, Science Publication, Bakü, Moscow, 1984 (in Russian).
- [97] G. S. Kuchinskii, *Partial Discharge in High Voltage Constructions*, L. Energy, 1979, (in Russian).

- [98] Manley I. C.. *Surface modification of polyethylene by electrical discharge treatment and the mechanism of autoadhesion*. **Trans. Electrochem. Soc.** (1943) 83–84.
- [99] Philipov Yu V. and Yemelyanov Yu M. *Theory of dynamic characteristics of the ozonators*. **J. Phys. Chem.** **16** (7) (1957), 28–35.
- [100] Golubovskii, Y., Maiorov, V. and Behnke, J. *Inuence of interaction between charged particles and dielectric surface over a homogeneous barrier discharge in nitrogen*. **Journal of Physics D: Applied Physics** **35**, (2002).
- [101] M. S. Mokrov and Yu. P. Raizer. *On the mechanical of the negative differantial resistance of a Townsend discharge*. **J. Plasma sources science and technology**. **Volume 17**, 1–8 (2008).
- [102] Madani, M., Bogaerts, A., Gijbels, R., and Vangeneugden, D. *Modelling of a Dielectric Barrier Glow Discharge at Atmospheric Pressure in Nitrogen*. In *International Conference on Phenomena in Ionized Gases*, (2003).

EKLER

Ek 1. Çalışmada Kullanılan Matlab Programı

Hevesaide Fonksiyonu Matlab Kodu:

```
function [h]=Hfonksiyon(Vg, Vd)
% elektrotlar arasi gerilim VG,
% Vd korona inception geriliminden büyük
% ise h=1 yani çig var aksi halde h=0 yani
% açık devre. Bu fonksiyon Vd esik voltajina bagli anahtarlama yapar

if abs(Vg)>Vd
    h=1;

else
    h=0;

end
```

Boşalma Aralığının İletkenlik Denkleminin Nümerik Çözüm Kodları:

```
% Bariyer Bosalması Nümerik Çözümleme
% H.Z. ALİSOY & Fevzi Hansu
% Teorik model
%  $dG/dt = \text{Alfa} \cdot h(|V_c| - V) \cdot G - \text{Beta} \cdot (G^2)$ ;

clear all;

Alfa=1e+5; % impact ionizasyon katsayisi
Beta=1e+6; % elektron attachment katsayisi
Vd=430; % Çig baslama gerilimi

nmax=10000; % iterasyon adimi sayisi
deltaT=1e-5; % zaman adimi [sn]

fk=50; % Kaynak frekansi Hz
A=500; % Kaynak gerilimi [V]
Vk=A*sin(2*pi*fk*(1:nmax)*deltaT); %Kaynak fonksiyonu zamana bagli

% Deney sistemi modeli
Z=100; % Elektrot disinda kalan sistemin ilgili frekanstaki empedansi

G=0.001; % G baslangiç degeri
Vg=0;
```

```

for n=1:nmax
    t(n)=n*deltaT; %zaman adimlari

    % Birinci denklem
    Gs=G+deltaT*(Alfa*Hfonksiyon(Vg,Vd)*G-Beta*G^2);
    G=Gs; % yeni G ile güncellenir
    Gh(n)=G; % hesaplanan G degerleri Gh(i) de saklanir

    % ikinci denklem
    Vg=Vk(n)/(G*Z+1);
    Vgh(n)=Vg;

end

figure(1)
plot(t, Gh)
xlabel(' t [sn]')
ylabel(' G [1/ohm]')

figure(2)
plot(t, Vgh, t, Vk)
xlabel(' t [sn]')
ylabel(' Vg')

figure(3)
plot(t, Vgh.*Gh)
xlabel(' t [sn]')
ylabel(' I=G.Vg')

figure(4)
plot(t, 300*Vgh.*Gh, t, Vgh, t, Vk)
xlabel(' t [sn]')
ylabel(' I=G.Vg')

save Gdegeri Gh

```

DBB Eşdeğer Devresinin Nümerik Çözüm Kodları:

```

% Bariyer Boşalması Nümerik Çözümleme
% Fevzi Hansu, Prof. Dr. Hafız Alisoy
% Teorik model
%  $dG/dt = \text{Alfa} \cdot h(|V_c| - V) \cdot G - \text{Beta} \cdot (G^2)$ ;

clear all;

load Gdegeri

```

```

nmax=10000; % iterasyon adımı sayısı
deltaT=1e-5; %zaman adımı [sn]

Cd=50e-9;
Cg=10e-9;

fk=50; % Kaynak frekansı Hz
Ak=700; % Kaynak gerilimi [V]
Vk=Ak*sin(2*pi*fk*(1:nmax)*deltaT); %Kaynak fonksiyonu zamana bağlı
R=1./Gh;

Q=0; % G başlangıç değeri
V(1)=0;
V(2)=0;
Q(1)=Q;
G=0.0001;

for n=2:nmax
    t(n)=n*deltaT; %zaman adımları
    Qs=Q+deltaT*(Cd/(Cg+Cd)*(Vk(n)/R(n)+Cg*(Vk(n)-Vk(n-1))/deltaT)-
    Q/(R(n)*(Cg+Cd)));
    Q=Qs; % yeni G ile güncellenir
    Qh(n)=Q; % hesaplanan G değerleri Gh(i) de saklanır
    Ih(n)=(Qh(n)-Qh(n-1))/deltaT;

end

figure(1)
plot(t,Qh)
xlabel(' t [sn]')
ylabel(' Qh [C]')
figure(2)
plot(t,Vk)
xlabel(' t [sn]')
ylabel(' Vk')
figure(3)
plot(t,Vk, t, (1e+4)*Ih, t, (1e+6)*Qh)
xlabel(' t [sn]')
legend('Vk','T','Q')
figure(4)
plot(t,Gh)
xlabel(' t [sn]')

```

ÖZGEÇMİŞ

Fevzi HANSU, 1976 Bingöl doğumludur. İlk ve orta öğrenimini Bingöl’de tamamlamıştır. İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Bölümü’nden 2001 yılında mezun olmuştur. 2000-2001 yıllarında Tübitak *MAM* ve Türkiye Teknoloji Geliştirme Vakfı (*TTGV*) kuruluşlarında teknik araştırma ve deneysel çalışmalar yapmıştır. 2002–2004 yılları arasında Ankara Kalyon Plastik Aş. *PVC* profil ve boru fabrikasında işletme müdürü olarak görev yapmıştır. 2005 yılında İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik–Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı yüksek lisans programından mezun olmuştur. Ayrıca, 2001-2005 yılları arasındaki süreçte sırasıyla ODTÜ (*Enerji sistemleri*), Harran Üniversitesi (*Kimya*), Boğaziçi Üniversitesi (*Fizik*), İstanbul Üniversitesi (*Astronomi*) ve İnönü Üniversitesi (*Yüksek Gerilim Tekniği ve Plazmalar*) gibi farklı alanlarda birçok bilimsel araştırma ve deneysel çalışma faaliyetlerine katılmıştır. 2007–2008 yılları arasında uluslararası *MAN/OLP* firmasının Sudan’daki enerji üretim santrali uygulama projesinde “Electrical Maintenance Manager” olarak çalışmıştır. 2009 yılında Siirt Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünde Araştırma görevlisi olarak göreve başlamış ve halen aynı görevine devam etmektedir.