



**İNP KATOTLU MİKROPLAZMA HÜCRESİNİN HE PLAZMA
ORTAMINDA İNCELENMESİ**

Fuat KARİP

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
FİZİK ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Fuat KARİP

24/01/2023

INP KATOTLU MİKROPLAZMA HÜCRESİNİN HE PLAZMA ORTAMINDA İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Fuat KARİP

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ocak 2023

ÖZET

Bu çalışmada yarıiletken katotlu mikroboşalma düzeneğinin (YKMD) çeşitli parametreler altında akım-voltaj ve ısıma-voltaj karakteristikleri incelenmiştir. Fotodedektör olarak da kullanılabilen bu tür cihazlarda dışarıdan yapılan müdahalelerin verimlilik açısından etkileri araştırılmıştır. Deneyde Fe katkılı InP yarıiletken kullanılmıştır. Farklı boşalma çaplarında ($D = 9$ mm, $D = 12$ mm ve $D = 18$ mm değerlerinde), farklı elektrotlar arası mesafelerde ($d = 50$ μ m, $d = 100$ μ m, $d = 240$ μ m, $d = 340$ μ m, $d = 440$ μ m ve $d = 525$ μ m değerlerinde), farklı aydınlatma şiddetleri altında (K , A_1 , A_3), geniş bir basınç aralığı için (7 Torr-760 Torr), He gaz ortamında çalışılmış ve ölçümler değerlendirilmiştir. Ayrıca $D = 12$ mm çap değeri altında hava gazı ortamında da çalışılmış ve bu çap değerinde He ve hava gazları kıyaslanmıştır. Hava gazı plazmasında He gazı plazmasına göre gerek Paschen eğrilerindeki kırılma voltajı (V_K) ile basınç arasındaki lineer artış, gerekse akım-voltaj karakteristiklerindeki kararsızlıkların fazlalığı, mikroboşalma hücresinde kullanılan gazın önemli bir parametre olduğu gerçeğini gözler önüne sermektedir. He plazması hava plazmasına göre daha kararlı bir boşalma karakteristiği elde etmemizi sağlamaktadır. Ek olarak boşalma çapının ve katot aydınlatma şiddetinin artmasının akımı arttırdığı, elektrotlar arası mesafenin ve basıncın artmasının ise akım değerlerini düşürdüğü sonucuna genellikle ulaşılmaktadır.

Bilim Kodu : 20227

Anahtar Kelimeler : Mikroboşalma, He plazma, fotodedektör, InP yarıiletkeni, breakdown

Sayfa Adedi : 129

Danışman : Prof. Dr. Hatice Hilal KURT

THE INVESTIGATION OF MICROPLASMA CELL WITH INP CATHODE IN HE
PLASMA MEDIA

(M. Sc. Thesis)

Fuat KARİP

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

January 2023

ABSTRACT

In this study, current-voltage and light emission-voltage characteristics of semiconductor cathode microdischarge setup were investigated under various parameters. In such devices, which can also be used as photodetectors, the effects of external interventions in terms of efficiency have been investigated. In the experiment, Fe-doped InP semiconductor was used. The measurements were evaluated at different discharge diameters ($D = 9$ mm, $D = 12$ mm and $D = 18$ mm) and inter-electrode distances ($d = 50$ μm , $d = 100$ μm , $d = 240$ μm , $d = 340$ μm , $d = 440$ μm and $d = 525$ μm), under different lighting intensities (K , A_1 , A_3), for a wide pressure range (7 Torr-760 Torr), in a He gas environment. In addition, air gas environment was also studied under $D = 12$ mm diameter value and He and air gases were compared at this diameter value. The linear increase between the breakdown voltage (V_B) and pressure in the Paschen curves and the excess of instabilities in the current-voltage characteristics in the air gas plasma compared to the He gas plasma reveal the fact that the gas used in the microdischarge cell is an important parameter. Helium plasma provides a more stable discharge characteristic than air plasma. In addition, it is generally concluded that increasing the discharge diameter and cathode illumination intensity increases the current, while increasing the inter-electrode distance and the pressure decreases the current values.

Science Code : 20227

Key Words : Microdischarge, He plasma, photodetector, InP semiconductor, breakdown

Page Number : 129

Supervisor : Prof. Dr. Hatice Hilal KURT

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince büyük bir sabır ve özveriyle bana yol gösteren, deneyimleri ve bilgisinden ziyadesiyle yararlandığım çok değerli danışmanım ve hocam Prof. Dr. Hatice Hilal KURT'a çok teşekkür ederim. Ayrıca deney ve ölçümlerim süresince yol gösteren, yardımcı olan ve engin bilgisinden yararlandığım kıymetli hocam Prof. Dr. Bahtiyar SALAMOV'a teşekkür ederim. Destek ve sabırlarından dolayı aileme, sağladıkları kolaylıklar açısından çalıştığım kurumlardaki idarecilerime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvi
1. GİRİŞ.....	1
2. PLAZMA VE ÖZELLİKLERİ	3
2.1. Plazma Nedir?	3
2.2. Plazma ve Gaz Boşalmasının Tarihçesi	5
2.3. Plazma Oluşumları	7
2.4. Plazma Çeşitleri	8
2.5. Plazma Kaynakları	9
2.5.1. DC (doğru akım) deşarjlar	10
2.5.2. RF (radyo frekans) deşarjlar	10
2.5.3. MW (mikrodalga) deşarjlar.....	12
2.6. Plazmaların Kullanım Alanları	12
3. DC PLAZMALAR.....	17
3.1. Çarpışma Çeşitleri.....	18
3.2. DC Plazma Bölgeleri.....	19
3.3. Kendini Besleyen ve Beslemeyen Plazmalar	21

	Sayfa
3.4. Gazın Kırılması (Breakdown)	22
3.5. Townsend, Glow, Arc Boşalma Bölgeleri	24
4. MİKRODEŞARJ ÜNİTELER	27
4.1. Hücre Parametreleri	27
4.2. Mikrodeşarjların Kullanım Alanları.....	28
5. KIZILÖTESİ (IR) DEDEKTÖRLER	31
5.1.Kızılötesi (IR) Dedektör Çeşitleri.....	32
5.1.1. Termal dedektörler.....	32
5.1.2. Foton dedektörler	33
5.2.Kızılötesi Dedektör Kalite Parametreleri.....	35
5.3. Kızılötesi Dedektör Teknolojileri	37
5.4. Nanotel (Nanowire) Yapılı Fotodedektör Teknolojisi.....	38
5.5. Yarıiletken Katot Etkisi	40
5.6. InP Yarıiletkeninin Özellikleri.....	40
6. DENEYSEL SİSTEM	45
6.1. Deney	50
7. FOTODEDEKTÖRÜN MİKRODEŞARJ HÜCRESİ PARAMETRELERİNE BAĞLILIĞI	53
7.1. Mikrodeşarj Hücresinin Akım – Voltaj Karakteristiklerinin İncelenmesi.....	53
7.1.1. Akım – voltaj karakteristiğinin aydınlatma şiddetine bağlılığı	53
7.1.2. Akım – voltaj karakteristiğinin hücre basıncına bağlılığı.....	63
7.1.3. Akım – voltaj karakteristiğinin boşalma çapına bağlılığı.....	66
7.1.4. Akım – voltaj karakteristiğinin elektrotlar arası mesafeye bağlılığı	74
7.2. Mikrodeşarj Hücresinin Işıma – Voltaj Karakteristiklerinin İncelenmesi.....	81

Sayfa

7.2.1. Işıma – voltaj karakteristiğinin aydınlatma şiddetine bağlılığı.....	81
7.2.2. Işıma – voltaj karakteristiğinin hücre basıncına bağlılığı.....	84
7.2.3. Işıma – voltaj karakteristiğinin boşalma çapına bağlılığı.....	88
7.2.4. Işıma – voltaj karakteristiğinin elektrotlar arası mesafeye bağlılığı.....	95
7.3. Mikrodeşarj Hücresinde Kırılma Eğrileri (Paschen Eğrileri)	101
7.4. He ve Hava Gazlarının Karşılaştırılması	106
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	117
KAYNAKLAR	120
ÖZGEÇMİŞ	126

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Başlıca çarpışma türleri	18
Çizelge 3.2. İç enerjideki değişime göre tepkimenin sınıflandırılması.....	19
Çizelge 5.1. Bazı IR dalgaboyu aralıkları	31
Çizelge 7.1. Sabit elektrotlar arası mesafe ve basınç değeri için farklı çap değerlerindeki akım – voltaj değerleri tablosu	73
Çizelge 7.2. Elektrot çapı $D = 12$ mm, aydınlatma şiddeti K için farklı elektrotlar arası mesafelerde kırılma voltajı – basınç tablosu	105
Çizelge 7.3. Farklı elektrotlar arası mesafeler için helyum ve hava plazmasına ait grafiklerdeki kritik basınç değerleri	113
Çizelge 7.4. $D = 12$ mm elektrot çapı ve aydınlatma şiddeti K 'da farklı elektrotlar arası mesafeler için helyum ve hava plazmasına ait Paschen grafiklerinde minimum kırılma voltajları	116

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. a) Topolojisi küre olan Güneş. b) Topolojisi torus olan toroidal plazma reaktörü	4
Şekil 2.2. Railway tüpü	6
Şekil 2.3. DC deşarjın basit gösterimi	10
Şekil 2.4. RF plazma çeşitleri. a) ICP şeması. b) CCP şeması	11
Şekil 2.5. MW plazma kaynağı	12
Şekil 2.6. Bir plazma jetin çalışma prensibi	13
Şekil 3.1. Glow deşarjında yük üretim işlemler şeması.....	17
Şekil 3.2. Normal glow deşarjında görünür alanlar	20
Şekil 3.3. Sabit elektrotlar arası mesafede Paschen eğrileri	23
Şekil 3.4. Farklı elektrotlar arası mesafe için Paschen eğrileri	23
Şekil 3.5. Düşük basınç DC boşalma akım-voltaj karakteristiği	24
Şekil 4.1. Bir mikrop plazma hücresinde karışımdaki gazların kromatografik analiz verileri	29
Şekil 5.1. Termal bir dedektörün şeması	33
Şekil 5.2. IR dedektör ve sistemlerin tarihi gelişimi.....	34
Şekil 5.3. Bazı yarıiletkenlerin enerji bant aralıkları ve kafes parametreleri.....	41
Şekil 5.4. ZB ve WZ örgü yapıları.....	42
Şekil 6.1. Yarıiletken katotlu mikroboşalma hücresinin basit gösterimi	46
Şekil 6.2. Deneysel sistemi oluşturan birimler. 1. Işık kaynağından gelen görünür ışık. 2. Si filtre. 3. Kızılötesi ışık hüzmesi. 4. Yarısaydam Au kontak. 5. Yarıiletken InP katot. 6. Gaz deşarj hücresi. 7. Yalıtkan mika malzeme. 8. UV ve görünür bölge ışması. 9. Yarısaydam SnO ₂ kontak. 10. Cam disk.....	47
Şekil 6.3. Yarıiletken katotlu mikroboşalma düzeneğine ait elektriksel devre. 1. Yarıiletken katotlu gaz boşalma hücresi. 2. Dijital multimetre. 3. Güç kaynağı. 4. Fotoçoğaltıcı. 5. Dijital elektrometre	49

Şekil	Sayfa
Şekil 6.4. Basınç ayar ünitesi. 1. Gaz tüpü. 2. Regülatör. 3. Gaz vanası. 4. Dijital manometre. 5. Vakum pompası. 6. Vakum vanası. 7. Gaz boşalma hücresi	50
Şekil 6.5. Görüntü çeviricinin elemanları. 1. Kızılötesi ışık hüzmesi. 2. Au kontak. 3. InP yarıiletkeni. 4. Gaz boşalma hücresi. 5. Yalıtkan mika yüzük. 6. SnO ₂ kontak. 7. Cam disk. 8. UV ışık hüzmesi	51
Şekil 7.1. Farklı çap değerlerinde, farklı basınçlarda, $d = 240 \mu\text{m}$ ve $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafelerde, farklı aydınlatma şiddetleri için iki boyutlu AVK grafikleri	53
Şekil 7.2. Farklı çap değerlerinde, $d = 240 \mu\text{m}$ ve $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafelerde, farklı basınçlarda, farklı aydınlatma şiddetlerine göre üç boyutlu AVK grafikleri.....	60
Şekil 7.3. $D = 18 \text{ mm}$ çap değerinde A_1 aydınlatma şiddetinde $50 \mu\text{m}$, $d = 100 \mu\text{m}$, $240 \mu\text{m}$, $340 \mu\text{m}$, $440 \mu\text{m}$, $525 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafe için basınca bağlı iki boyutlu AVK grafikleri.....	63
Şekil 7.4. $D = 18 \text{ mm}$ çap değerinde, $d = 50 \mu\text{m}$, $d = 100 \mu\text{m}$, $d = 240 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede, farklı basınç değerleri için aydınlatma şiddetine göre üç boyutlu AVK grafikleri.....	64
Şekil 7.5. Aydınlatma şiddeti K altında, $D = 18 \text{ mm}$ çap için, farklı elektrotlar arası mesafede, basınca göre üç boyutlu AVK grafikleri.....	65
Şekil 7.6. Aydınlatma şiddeti K altında, farklı elektrotlar arası mesafelerde, $p = 66 \text{ Torr}$, $p = 220 \text{ Torr}$, $p = 410 \text{ Torr}$ ve $p = 760 \text{ Torr}$ basınç değerlerinde farklı çap değerlerine göre iki boyutlu AVK grafikleri.....	67
Şekil 7.7. Farklı elektrotlar arası mesafelerde, farklı çap değerlerinde, $p = 66 \text{ Torr}$, $p = 220 \text{ Torr}$, $p = 410 \text{ Torr}$ ve $p = 760 \text{ Torr}$ basınç değerlerinde, aydınlatma şiddetine göre üç boyutlu AVK grafikleri.....	70
Şekil 7.8. $D = 9 \text{ mm}$ çap değeri için, $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $240 \mu\text{m}$, $340 \mu\text{m}$, $440 \mu\text{m}$, $525 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafelerde aydınlatma şiddeti A_3 için iki boyutlu AVK grafikleri	74
Şekil 7.9. Aydınlatma şiddeti K için farklı elektrotlar arası mesafe değerlerinde ve farklı basınç değerlerinde değişen çap değerleri için üç boyutlu AVK grafikleri.....	76
Şekil 7.10. Aydınlatma şiddeti K için farklı elektrot çaplarında ve farklı basınç değerlerinde değişen elektrotlar arası mesafe için üç boyutlu AVK grafikleri.....	78

Şekil	Sayfa
Şekil 7.11. Aydınlatma şiddeti K için farklı elektrot çaplarında, $p = 360$ Torr basınç değeri için ve değişen elektrotlar arası mesafeye göre üç boyutlu AVK grafiklerinin yan arka profilden görünümü.....	79
Şekil 7.12. Farklı çap, basınç ve elektrotlar arası mesafe altında farklı aydınlatma şiddetleri için üç boyutlu AVK grafikleri	80
Şekil 7.13. Farklı çap değerlerinde, farklı basınçlarda, $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede, farklı aydınlatma şiddetleri için iki boyutlu IVK grafikleri.....	82
Şekil 7.14. $D = 18$ mm elektrot çapı ve aydınlatma şiddeti A_3 'de, farklı elektrotlar arası mesafelerde basınç değişimine göre iki boyutlu IVK grafikleri	84
Şekil 7.15. Farklı elektrot çapı değerlerinde, $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede, farklı basınç değerlerinde, farklı aydınlatma şiddetlerine göre üç boyutlu IVK grafikleri.....	86
Şekil 7.16. $D = 12$ mm elektrot çapı, $d = 240 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafe ve A_3 aydınlatma şiddeti altında basınca göre üç boyutlu IVK grafikleri	87
Şekil 7.17. Aydınlatma şiddeti K'da, $d = 240 \mu\text{m}$, $d = 340 \mu\text{m}$, $d = 440 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafe değerlerinde, farklı basınçlarda, farklı çap değerleri için iki boyutlu IVK grafikleri	88
Şekil 7.18. Aydınlatma şiddeti K'da, farklı elektrotlar arası mesafelerde, farklı basınç değerlerinde, elektrot çapına göre üç boyutlu IVK grafikleri.....	91
Şekil 7.19. Aydınlatma şiddeti K'da, $d = 525 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede, 410 Torr – 760 Torr basınç değerleri aralığında elektrot çapına göre üç boyutlu IVK grafiği.....	94
Şekil 7.20. Aydınlatma şiddeti A_3 'de, farklı elektrot çaplarında, farklı basınç değerlerinde, farklı elektrotlar arası mesafe için iki boyutlu IVK grafikleri.....	95
Şekil 7.21. Aydınlatma şiddeti K'da, farklı basınç ve farklı elektrot çapı değerlerinde, elektrotlar arası mesafeye göre üç boyutlu IVK grafikleri	98
Şekil 7.22. Aydınlatma şiddeti K'da, $p = 690$ Torr basınç değerinde, farklı elektrot çap değerlerinde elektrotlar arası mesafeye göre üç boyutlu IVK grafiği	99
Şekil 7.23. $D = 12$ mm sabit elektrot çapı değerinde, farklı basınçlarda, farklı elektrotlar arası mesafe için aydınlatma şiddetine göre üç boyutlu IVK grafikleri.....	100
Şekil 7.24. Farklı elektrotlar arası mesafelerde, aydınlatma şiddeti K'da, elektrot çapına (D) göre Paschen eğrileri.....	103

Şekil	Sayfa
Şekil 7.25. Farklı aydınlatma şiddetlerinde, farklı çap değerlerinde, elektrotlar arası mesafeye (d) göre Paschen eğrileri.....	104
Şekil 7.26. Bazı gazlara ait Paschen eğrileri.....	107
Şekil 7.27. $D = 12$ mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K 'da, farklı basınçlarda, elektrotlar arası mesafeye göre helyum ve hava plazmalarına ait iki boyutlu AVK'ların karşılaştırması.....	108
Şekil 7.28. $D = 12$ mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K 'da, farklı basınçlarda, elektrotlar arası mesafeye göre helyum ve hava gazlarına ait 3 boyutlu AVK'ların karşılaştırılması.....	111
Şekil 7.29. $D = 12$ mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K 'da, farklı elektrotlar arası mesafelerde, basınca göre helyum ve hava plazmalarına ait 2 boyutlu AVK'ların karşılaştırması.....	112
Şekil 7.30. $D = 12$ mm elektrot çapında, farklı aydınlatma şiddetlerinde, farklı elektrotlar arası mesafeler için helyum ve hava plazmalarına ait Paschen eğrilerinin karşılaştırılması	114
Şekil 7.31. $D = 12$ mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K 'da, farklı elektrotlar arası mesafede helyum ve hava plazmalarına ait Paschen eğrilerinin karşılaştırması	115

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Plazma jetinin insan derisine uygulanması	14
Resim 4.1. Elektrot aralığı 10 μm olan mikrodeşarj hücresinde glowdeşarjı	28
Resim 5.1. 180 elemanlı bir FPA	34
Resim 5.2. Nanoteller. a) Si substrat üzerinde büyütülen GaAs nanotelleri. b) Tek bir GaAs nanoteli. Ölçek boyutu 200 nm'dir	39
Resim 5.3. a) Aynı InP nanotel üzerinde WZ (kırmızı renk ile gösterilen) ve ZB (mavi renk ile gösterilen) yapıların SEM resmi. b) InP nanotelin TEM resmi. Turuncu ölçek sırasıyla 500 nm ve 5 nm'dir	43
Resim 5.4. InP nanotelin TEM görüntüsü. a) ZB kristal yapı. b) WZ kristal yapı.....	44
Resim 5.5. Au katalizörlü nanotel büyütme. a) 450 °C sıcaklıkta. b) 500 °C sıcaklıkta. c) ve d) Nanotel üzerinde yüzen Au parçacıkları	44
Resim 6.1. Yarıiletken katotlu mikroboşalma düzeneği.....	45
Resim 6.2. Gaz boşalma hücresi	47
Resim 6.3. Deneysel ölçüm araçlarının diğer elemanları. 1. Direnç devresini içeren kutu. 2. Fotoçoğaltıcıyı besleyen güç kaynağı. 3. Dijital multimetre. 4. Dijital elektrometre. 5. Güç kaynağı. 6. Görüntü şiddetlendiriciyi besleyen güç kaynağı. 7. CCD'nin kontrol ünitesi. 8. CCD'ye bağlı görüntü monitörü. 9. Bilgisayar	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_1	Birinci kademe aydınlatma şiddeti
A_2	İkinci derece aydınlatma şiddeti
A_3	Üçüncü derece aydınlatma şiddeti
c	Işığın boşluktaki hızı
d	Elektrotlar arası mesafe
D	Boşalma çapı
e	Elektron yükü
E	Elektrik alan
h	Planck sabiti
Hz	Hertz
I_{ph}	Foto akım
i_n	Toplam gürültü akımı
K	Karanlık
p	Basınç
P_{in}	Giriş ışık gücü
p_{min}	Minimum kırılma basıncı
ppm	Milyonda parçacık sayısı
r	Elektrotlar yarıçapı
V_K	Kırılma voltajı
V_{Kmin}	Minimum kırılma voltajı
α	Townsend'in birincil iyonizasyon katsayısı
γ	Townsend'in ikincil iyonizasyon katsayısı
ΔE_p	İç enerji değişimi

Kısaltmalar**Açıklamalar**

AVK	Akım – voltaj karakteristiği
ABC	Antimonit bazlı bileşikler
CBE	Kimyasal ışın epitaksi
CCP	Kapasitif çift plazma
CNT	Karbon nano tüpler
D	Dedektivite
D*	Özel dedektivite
ELOG	Epitaksiyel yanal aşırı büyüme
EQE	Dışsal kuantum verimliliği
FET	Alan etkili transistör
FPA	Odak düzlemi dizileri
IC	Entegre devre
ICP	İndüktif çift plazma
IQE	İçsel kuantum verimliliği
IVK	Işıma – voltaj karakteristiği
LTE	Lokal termodinamik denge
MCT	Civa kadmiyum tellür
MOVPE	Metalorganik buhar faz epitaksi
NDR	Negatif diferansiyel direnç
NEP	Gürültü eşdeğer güç
O/E	Optik/elektronik
QWIP	Kuantum kuyulu kızılötesi fotodedektör
R	Duyarlılık
SNR	Sinyal gürültü oranı
VLS	Buhar-sıvı-katı
VUV	Vakum ultraviyole
YKMD	Yarıiletken katotlu mikroboşalma düzeneği

1. GİRİŞ

Son yıllarda plazma teknolojisi çok çeşitli alanlarda kullanılmaktadır. Bunlardan bazıları yüzey temizleme, ince film kaplama, gaz boşalma lazerleri, gaz sensörleri, ozon sentezi, plazma görüntü panelleri, plazma ışık kaynakları, sterilizasyon, fotonik şeklinde sıralanabilir ve çoğaltılabilir [1-4]. Başlıca plazma kaynakları ise DC plazmalar, RF plazmalar ve MW plazmalar olarak çeşitlendirilebilir [5]. Mikroplazma sistemler, milimetreden daha küçük aralıklarda oluşturulur ve bu plazmalar termal (dengelenmiş) ve termal olmayan (dengelenmemiş) plazma olarak adlandırılır.

Gaz boşalması temelde bir aralıkta iki elektrota gerilim uygulayarak aradaki gazın iyonize hale getirilmesidir [6]. Böylece başlangıçta yalıtkan olan gaz iletken hale geçer. Plazma ortamı pozitif yüklerin negatif yüklere eşit olduğu toplamda nötr bir ortamdır. Gazın iletken hale geçtiği bu eşik voltaj değerine kırılma (breakdown) voltajı denir. Gazın kırılma voltajının, uzay parametreleri ile değişimi ilk olarak Paschen tarafından 1889 yılında formülize edilmiştir. Buna göre kırılma voltajı, gaz basıncı (p) ve elektrotlar arası mesafenin (d) bir fonksiyonu olarak $V_K = f(pd)$ şeklinde ifade edilir [7]. Ancak sonraki çalışmalarda aynı pd değerine sahip olmasına rağmen farklı elektrotlar arası mesafelerde farklı kırılma gerilimleri elde edilmiştir. Kırılma geriliminin, sadece pd 'nin değil aynı zamanda r elektrot yarıçapı olmak üzere, d/r 'nin de bir fonksiyonu olduğunu gösteren çalışmalar vardır [8].

Mikroplazma sistemlerde gaz basıncı atmosferik basınçlara kadar çıkabilir. Bu sistemler etkili bir UV radyasyon kaynağı olarak görev görebilirler. Townsend deşarjında zayıf yoğunlukta ışık emisyonu olduğu bilinmesine rağmen, küçük mikroplazma sistemlerinde VUV (Vacuum Ultraviolet) radyasyonu yoğun olarak yayılabilir [9].

Mikrodeşarj sistemlerden birisi de yarıiletken katotlu mikrodeşarjlardır. Bu yapıda iki paralel elektrot ve bunların arasında deşarj hücresi bulunur. Elektrotlardan biri ışığa duyarlı yarıiletkenidir. Gaz boşalma hücresinde yarıiletken elektrot kullanılması, metal elektrota göre bazı üstünlükler sağlar. Bunlardan en önemlisi gaz boşalma ışık emisyonunun homojenliği yarıiletken katot üzerindeki direnç dağılımı ile kontrol edilebilir. Ayrıca yarıiletken katotun kuantum verimliliği metallerden daha yüksektir [10]. Özellikle

III-V grup birleşik yarıiletkenlerin birçoğu direk bant aralıkları, ışığın kolay emilimi ve yayılımına olanak tanımaları, yüksek elektron mobiliteleri gibi özellikleriyle optoelektronik ve fotonik uygulamalarda Si yarıiletkenine göre daha fazla ön plana çıkmaktadırlar [11]. Deneyimizde katot malzemesi olarak kullandığımız yarıiletken de doğrudan bant aralıklı III-V grubu birleşik yarıiletken olan InP yarıiletkenidir. InP'nin bant aralığı oda sıcaklığında yaklaşık 1,34 eV (918 nm) olup, görünür ve yakın kızılötesi bölgede çalışabilir [12]. InP'nin kafes parametresi değiştirilebildiğinden bu yarıiletken optimize edilebilir ve fiberoptik iletişimde kullanılabilir [13].

Deneyde kullanılan He gazı ise iyi termal iletkenlik, düşük kırılma voltajı, kimyasal olarak kararlılık gibi özelliklerinden dolayı soğuk atmosferik plazmalarda hammadde olarak kullanılır. He ve hava gazlarının belirli oranlarda karıştırılmasıyla oluşturulan soğuk atmosferik plazmalar özellikle biyomedikal uygulamalar için önem arz etmektedir. Plazma jetlerinde sterilizasyon için He ve hava gazları ayrı ayrı veya karışım olarak kullanılabilir. Ancak He gazı pahalı bir gaz olduğundan tek başına kullanılması yerine hava gazı ile karıştırılarak kullanılmaktadır. Böylece hem maliyet düşmekte hem de havadaki oksijen ve nitrojen bileşikleri aktif olarak reaksiyona girerek biyomedikal uygulamalarda antibakteriyel ajan olarak kullanılmaktadır [14-16]. Ancak havadaki oksijen gazı aktif bir gaz olduğu için dengede olmayan plazma jetinin sürdürülebilirliğinin zorlaştığını göz ardı etmemek gerekir [17].

2. PLAZMA VE ÖZELLİKLERİ

2.1. Plazma Nedir?

Yeryüzünde en çok karşılaşılan madde fazları katı, sıvı ve gaz olmasına karşın, evrenin büyük çoğunluğu maddenin dördüncü hali olan plazmadan meydana gelmektedir. Plazma birbirleriyle ve çevreleyen ortamlarla etkileşimlerde bulunan temel veya uyarılmış durumdaki atomlar, moleküller, pozitif ve negatif yüklü iyonlar ve elektronlardan oluşur. Yani plazma, farklı türlerin bir arada bulunduğu kısmen veya tamamen iyonize olmuş bir karışımdır. Plazma toplamda nötr olarak düşünülebilir ancak bazı bölgelerde lokalize olmuş net yük fazlalığı gözlemlenebilir. İyonizasyon derecesi %100 olabileceği gibi, 10^{-4} – 10^{-6} aralığında düşük değerlerde de olabilir [18].

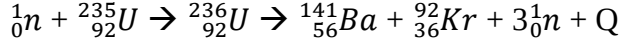
Evrende bulunan plazmaları en genel olarak doğal plazmalar ve insan yapımı yapay plazmalar olarak iki bölüme ayırabiliriz. Doğal plazmalar kendiliğinden oluşan güneş, yıldızlar, solar rüzgarlar vb. olarak sıralanabilir. Yapay plazmalar ise insanlar tarafından laboratuvar ortamlarında üretilen plazmalardır.

Kütle enerjisini termonükleer reaksiyonlarla radyasyon ve ısı enerjisine dönüştüren yıldızlar ve güneş dev plazma toplarıdır. Nispeten daha soğuk solar rüzgarlar, galaksiler arasında bulunabilecek düşük yoğunluklu soğuk plazmalar, dünyamızın iyonosfer tabakası plazma haline örnek olarak verilebilir [19, 20]. Dünyamızda görebileceğimiz plazma örnekleri ise yıldırım, şimşek, elektrik arkları, floresan lambaların içerisindeki ortam, alev, plazma TV'lerdir. Dünya atmosferimizin üst katmanlarına kadar giren solar rüzgarlar ve dış uzay kaynaklı radyasyon, atmosferdeki gazları iyonlaştırarak Aurora Borealis olarak bilinen kutup ışıklarına sebep olur [21].

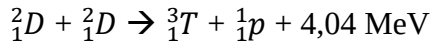
Labaratuvar plazmalarını yüksek sıcaklık (füzyon) plazmaları ve düşük sıcaklık (gaz deşarj) plazmaları olarak iki şekilde inceleyebiliriz [18].

İki çeşit nükleer reaksiyon vardır. Birincisi ağır ve kararsız atomların nötron yakalayarak daha hafif atomlara dönüşmesi ve bu arada enerji açığa çıkarması olayıdır ki bu fisyon (parçalanma) reaksiyonları olarak bilinir. Kontrollü fisyon reaksiyonları uzun bir süreden

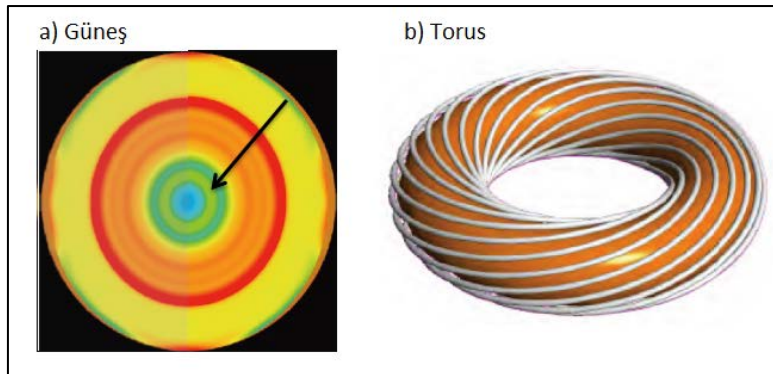
beri yapılabilir. Aşağıda nötron ile bombardıman edilen $^{235}_{92}\text{U}$ çekirdeğinin fisyon reaksiyonu denklemi görülmektedir.



İkinci nükleer reaksiyon tipi ise füzyon olarak bilinir ve hafif çekirdeklerin bir araya gelip kaynaşarak daha büyük ve kararlı bir çekirdek meydana getirmesi olayıdır. Füzyon olayı için yüksek sıcaklık ve basınç değerleri gerekmektedir. Aşağıda iki döteryum çekirdeğinin füzyon reaksiyonunun denklemi görülmektedir.



Kontrollü füzyonun başlatılabilmesi için Coulomb duvarının aşılması gerekir ve bu da plazmanın yüksek sıcaklıklara kadar (yaklaşık 10^8 K mertebelerine) ısıtılmasını gerektirmektedir. Bu yüksek sıcaklıklarda plazma ortamını bir arada tutabilmek zorlaşmaktadır. Ayrıca plazmayı bir arada tutabilmek için oluşturulacak kabın çeperleri ile plazma arasında enerji transferi olacağından kap hasar görecektir ve bu mertebedeki sıcaklıklarda maddesel bir hapis çok zor görülmektedir. Füzyon için oluşturulan plazmayı bir arada tutabilmek için iki yöntem vardır. Bunlar manyetik hapsedme ve eylemsiz hapsedme yöntemleridir. Örneğin Güneş, kütle çekim kuvveti sayesinde plazmayı hapsedmiştir. İnsan yapımı füzyon reaktörlerinde ise plazma Lorentz kuvveti ile manyetik bir torus hapsi içerisinde sınırlandırılır. Şeki-2.1'de Güneş reaktörünün ve toroidal reaktörün çizimleri görülmektedir [22].

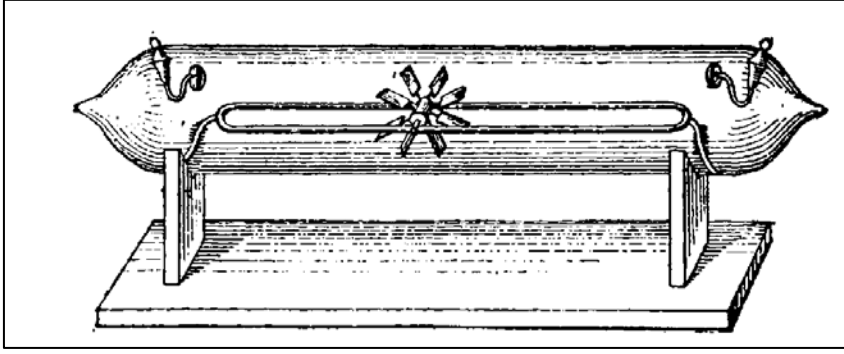


Şekil 2.1. a) Topolojisi küre olan Güneş. b) Topolojisi torus olan plazma reaktörü [22]

Kantrowitz ve Jacobs 1930'lu yılların başında en eski füzyon deneylerinden birini gerçekleştirmiş ancak başarısız olmuşlardır [20]. Özellikle İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra kontrollü füzyon çalışmaları hız kazanmıştır [23]. Her ne kadar başlangıçta nükleer silahlanma, füzyon çalışmalarının tetikleyici faktörü olarak görülse de günümüzde artan enerji talebini en temiz ve verimli yollardan karşılama motivasyonu, nükleer füzyon alanındaki çalışmaların hız kazanmasını sağlamıştır. Deniz suyunda döteryum bol miktarda mevcut olduğundan füzyon enerji kaynağı problemi bulunmamaktadır. Bununla birlikte kontrollü füzyonda belirli bir manyetik alan içine hapsedilmiş sıcak plazmanın kararsızlıkları, gelişmiş taşıma süreçleri, döteryum füzyonunu başlatmak için gerekli olan yüksek sıcaklıklar ve yüksek sıcaklıklara dayanıklı reaktör duvarları sorunu başlıca zorluklar olarak göze çarpmaktadır [21, 23]. Kontrollü füzyon için çalışmalar günümüzde devam etmektedir.

2.2. Plazma ve Gaz Boşalmasının Tarihçesi

Gaz boşalması olayı 18. yüzyıla kadar dayanmaktadır. 1745 yılında E. G. von Kleist, Leyden kavanozunu icat etmiş ve 1750'lerde Benjamin Franklin yıldırımın bir elektriksel olay olduğunu bulmuştur [24]. 1785 yılında Coulomb tarafından yapılan hassas deneylerle iletken bir küreden havaya elektrik yüklerinin geçtiği bulundu [25]. 19. yüzyılda gaz deşarjıyla ilgili önemli ve hızlı gelişmeler meydana gelmiştir. 19. yüzyılın başlarında Sir Hummpy Davy, havadaki ark boşalmalarıyla ilgili çalışmalar yaptı. Yine bu yıllarda Michael Faraday, elektrik arkları ve DC deşarjlarla çalışmış, bulgularının üç cilt halinde kitaplaştırmıştır. 1857'de Alman mühendis W. Siemens, sonradan geniş bir uygulama alanı bulacak olan ozon üretimini ilk kez gaz deşarjı ile gerçekleştirerek patentini almıştır [19]. 1869'da J. W. Hittorf, katot ışınlarının doğasının açıklanmasına yardım eden deneyler tasarlamış ve elektronun keşfinin önünü açmıştır. Şekil 2.2'de görülen Railway tüpünde Crookes, 1879'da katot ışınlarını bir alüminyum folyoya odaklamış ve folyonun akkor hale gelmesiyle katot ışınlarının mekanik etkisini gözlemiş oldu. 1879'da Sir William Crookes, deşarj olmuş gazların, maddenin dördüncü hali olması gerektiği önerisini getirdi [26]. Crookes aynı zamanda 1898'de iyonlaşma terimini ortaya atmıştır.



Şekil 2.2. Railway tüpü [27]

1897’de Sir J.J. Thomson elektronu keşfederek gaz deşarjının daha iyi anlaşılabilmesinin yolunu açtı.

Düşük voltaj değerlerinde gaz deşarjı için düşük basınçlar gerekmekteydi. Düşük basınçlar için ise vakum pompalarının geliştirilmesi gerekiyordu. Faraday tüplerin basıncını 1 Torr’a kadar indirebilmiştir. A. Toepler ve W. Gaede’nin civa pompalarını geliştirmesiyle artık 10^{-5} Torr’a kadar düşük basınçlara ulaşmak mümkün olmuştur [24].

1900’lü yılların başında Wilson ve Townsend, elektronların nötr gaz atomları ya da molekülleriyle çarpışarak onları iyonlaştırmasıyla gazın iletken hale geçtiğini tespit ettiler [25]. Nihayet 1928 yılına gelindiğinde Irving Langmuir, nötr bir gazın kısmen ya da tamamen iyonlaşması sonucu ortamda bulunabilecek iyon ve elektronlardan oluşan, dışarıdan uygulanan elektriksel ve manyetik etkilere tepki gösterebilen ve toplamda nötr olan bu karışıma “plazma” ismini vermiştir. Plazma kelimesi eski Yunancada biçimlendirmek, şekil vermek anlamlarına gelmektedir. Böylece maddenin dördüncü fazı, isimlendirilmiş oldu. 1929’da Langmuir ve L. Tonks aynı zamanda plazma salınımlarını da keşfetmişlerdir. Plazma fiziğindeki gelişmeler bundan sonra daha da hız kazanmıştır. Çeşitli endüstriyel ve teknolojik alanlarda plazma fiziği kullanım alanı bulmuş, bu gelişmeler ayrıca atom fiziği ve nükleer fizikteki gelişmeleri de tetiklemiştir.

19. yüzyıl başlarında gazların deşarjı ve plazma durumu, genellikle aydınlatma amaçlı elektriksel arklar üretmekle sınırlıyken özellikle ticari ve askeri alanlardaki artan ihtiyaçlar modern plazma fiziğinin ortaya çıkmasını sağlamıştır. Plazmanın deşarj tüpleriyle başlayan yolculuğu iyonosfer tabakasının kullanılarak iletişim ihtiyaçlarına çözüm bulmaya kadar varmıştır. Philips ve General Electric gibi şirketler plazma fiziğindeki araştırmaları

desteklemişlerdir [23]. 1920'lerde iyonosferden radyo sinyalleri yansıtılmıştı ve 1959'a gelindiğinde radyo iletişimi başarılı bir şekilde kullanılmaktaydı. 1959 yılında Amerikan Fizik Derneği, plazma fiziği ana bilim dalını kurmuştur ve böylece plazma fiziği resmi bir alt dal haline gelmiştir [20]. 1970'lerden sonra ise plazmalar mikroelettronik endüstride yoğun bir şekilde kullanılmıştır. Günümüzde ise plazma fiziği füzyon enerjisi konusunda önemli bir çalışma sahası haline gelmiştir.

2.3. Plazma Oluşumları

Genel olarak bir katıya ısı enerjisi verildiğinde eriyerek sıvı hale geçer. Isı enerjisi vermeye devam edildiğinde sıvı haldeki madde gaz hale de geçebilir veya iki veya üç fazın karışımı şeklinde de bulunabilir. Gaz halindeki ortama ısı enerjisi verilmeye devam edilirse gazdaki atom ya da moleküller iyonlaşmaya başlar ve eşit sayıda pozitif ve negatif parçacıklar oluşur. Plazma hali temelde budur. 10 000 K sıcaklık üzerinde maddenin genel olarak fazı plazma olarak kabul edilir. Ancak ısı enerjisi vererek plazma oluşturmak yöntemlerden sadece birisidir. Mekaniksel, kimyasal, elektriksel ve nükleer kaynaklar aracılığıyla da plazmalar üretilebilir [21]. Ortamdaki elektronlar ve fotonlar yeterli enerjiyi sağladıkları takdirde iyonizasyona sebep olabilirler.

Teknolojik uygulamalarda gaz deşarjını sağlamak ve devam ettirmek için kullanılan en önemli yöntemlerden biri elektriksel deşarjlardır. Nötr bir gaz içerisinde kozmik radyasyon veya etrafta bulunan radyoaktif parçacıklardan kaynaklanan ısınım nedeniyle oluşmuş bir miktar elektron bulunabilmektedir. Bu elektronlar uygulanan bir elektrik alan nedeniyle ivmelenerek ortamdaki atom ya da moleküllerle iyonlaştırıcı çarpışmalar yapabilirler. Tez içerisinde bu konu sonraki başlıklar altında ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

Elektriksel deşarjlarda iyonlaşma verimliliğini arttırmak için dışarıdan bir manyetik alan uygulamak katkı sağlayabilir. Manyetik alan varlığında yüklü parçacıklar Lorentz kuvveti etkisiyle hareket ederken daha uzun yörüngeler takip ederler. Böylece nötr atom ya da moleküllerle çarpışma oranları artmaktadır. Ayrıca manyetik alan hapsi sayesinde difüzyonla yük kaybı azaltılmış olur [28].

2.4. Plazma Çeşitleri

Plazmaları basınçlarına göre yüksek ya da atmosferik basınçlı plazmalar ve düşük basınçlı plazmalar olarak; parçacıkların termal denge durumuna göre ise termal dengede olan (dengelenmiş) ve termal dengede olmayan (dengelenmemiş) plazmalar olarak incelemek kolaylık sağlayacaktır.

Düşük basınçlı plazmalar genellikle 100 Pa basınca kadar olan plazmalardır. Öncelikle plazmanın oluşturulacağı haznenin vakumlanması gerekir. Dolayısıyla pahalı vakum sistemlerine bağımlılığı söz konusudur [10]. Vakumlanan ortama gönderilen gaz üzerine DC, RF veya MW kaynaklar vasıtasıyla enerji aktarımı gerçekleştirilerek gaz plazma haline dönüştürülür. Mikroelektronik sistemlerde genellikle düşük basınçlı plazmalar kullanılır. Glow deşarjı genellikle düşük basınçlarda elde edilebilir. Yüksek basınçlarda elde edilen glow deşarjının, çarpışma frekansının yüksekliği nedeniyle sürdürülebilirliği daha zordur [17].

Atmosferik basınçlı plazmalar ise 1 atm basınç mertebesinde dir. Pahalı vakum sistemlerine ihtiyaç duymazlar [29]. Yüksek basınçtan dolayı uygulanan işlemlerde çıktılar daha verimli ve hızlı bir şekilde elde edilir. İşlevsel ve düşük maliyetlidir. Yüksek basınçlarda gazın kırılması için daha yüksek voltajlar gereklidir. Yüksek voltajlar ise ark oluşumuna neden olabilir.

Termal (dengelenmiş ya da equilibrium) plazmalarda dışarıdan verilen enerji ile elektronlar hareketlenir ve etraftaki diğer parçacıklarla elastik çarpışmalar yaparlar. Elektronlar ayrıca iyonizasyon, rekombinasyon, uyarma, bağlanma, ayrılma gibi inelastik çarpışmalara da neden olabilirler [30]. Böylece enerjilerinin bir kısmını diğer parçacıklara aktarabilirler. Eğer çarpışma frekansı büyükse parçacıklar arasındaki enerji transferi verimli olur ve böyle bir durumda parçacıkların ortalama kinetik enerjisi ve dolayısıyla sıcaklığı aynı olur. Termal plazmalarda sıcaklık 10^4 K mertebelerine kadar çıkabilir. Bu nedenle sıcak (hot) plazma olarak da isimlendirilmektedir. Plazma içerisindeki elektronlar ve ağır parçacıklar için tek bir sıcaklık değeri söz konusudur. Plazma yüksek bir iyonizasyon durumundadır. Elektron yoğunluğu çok fazladır ve elektronlar Maxwell-Boltzman enerji dağılım fonksiyonuna uyma eğilimindedirler. Termal plazmalar güçlü bir şekilde görünür ve UV bölgelerinde ışıma yadıklarından elektrotların ve plazma

duvarlarının aşırı ısınmasına neden olurlar [31]. Genellikle ortalama serbest yolun kısa olduğu atmosferik basınçlı plazmalardan elde edilirler. Termal plazmalara elektrik ark kaynakları örnek olarak verilebilir.

Termal plazmalarda sıcaklık yüksek olduğundan yüzey işlemlerinde bu tür plazmalar çok kullanışlı değildir [32]. Yüksek sıcaklıklar substratın zarar görmesine sebep olabilir. Bu nedenle termal olmayan (dengelenmemiş ya da non-equilibrium) plazmaları kullanmak avantaj sağlamaktadır. Esnek çarpışma yoğunluğu termal plazmalara göre daha azdır. Termal olmayan plazmalarda ortamdaki ağır parçacıklar yaklaşık oda sıcaklığında kalırken elektronların sıcaklığı 10^4 K mertebesine kadar çıkabilir. Dolayısıyla plazmada tek bir sıcaklık değerinden bahsedilemez. Bu yüksek enerjili elektronlar çeşitli reaksiyonları tetikleyebilmektedir. Bu tür plazmalar soğuk (cold) plazma olarak da adlandırılmaktadırlar. Substratın soğuk kalması gereken plazma tıbbı, kaplama (coating), aşındırma (etching) vb. uygulamalarda bu tür plazmalar kullanışlı olmaktadır [33].

2.5. Plazma Kaynakları

Bir plazmada, plazmanın kullanım amacına göre ebat, gaz medyası, elektrot özellikleri gibi parametreler çeşitlilik gösterebilir. Plazmanın tutuşması için ortama yapılan müdahale çeşitleri plazma kaynakları olarak incelenecektir. Bu müdahaleler aşağıdaki şekilde kategorize edilebilir.

DC (doğru akım) deşarjlar

RF (radyo frekans) deşarjlar

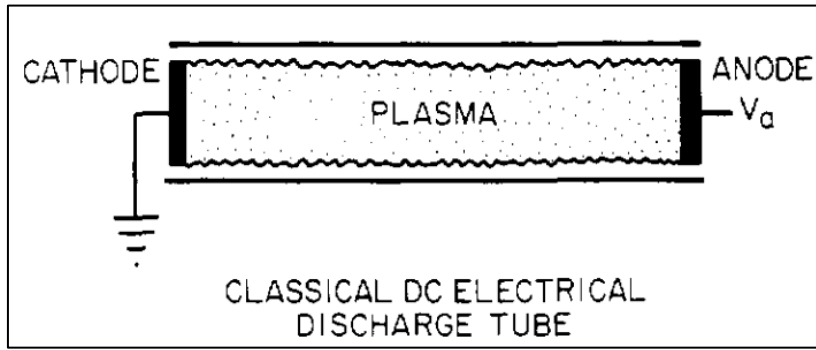
- ICP (Inductively coupled plasma)
- CCP (Capacitively coupled plasma)

MW (mikrodalga) deşarjlar

Bu müdahaleler elektronların kinetik enerjisini artırır, çarpışmalar artar ve yeni ürünlerin oluşmasını sağlar [34].

2.5.1. DC (doğru akım) deşarjlar

DC deşarj sistemleri genellikle silindirik bir tüpün iki ucuna yerleştirilmiş disk şeklindeki iletken elektrotlara, bir direnç yardımıyla DC güç kaynağı bağlanarak oluşturulur [21]. Ancak elektrotlar yalıtkan ya da yarıiletken olarak da seçilebilir. Bu durumda elektrotlarda yük birikimi sonucu glow deşarjının durma riski vardır. DC deşarjlarda akım, iyonların ve elektronların katkısıyla elektrotlar arasında akar. DC deşarjlarda duvarlardaki difüzyonla oluşan yük kayıplarını azaltmak için magnetron plazmalarda olduğu gibi manyetik alan vasıtasıyla yüklü türler belirli bir yörünge izleyecek şekilde yönlendirilebilirler [18]. DC glow deşarjlarında akım şiddeti genellikle $10^{-3} \text{ A} - 1 \text{ A}$ aralığında olup, deşarjın sürdürülebilirliği açısından ikincil elektron salınımının önemi büyüktür. Şekil 2.3’de basit bir DC deşarj tüpü görülmektedir.



Şekil 2.3. DC deşarjın basit gösterimi [24]

DC plazmaların bazı avantajları, gelişim ve sürdürülebilirlik süreçlerinin iyi bilinmesi, DC güç kaynaklarının yaygın bir şekilde bulunabilmesidir. Ancak plazma ile etkileşim halinde olan elektrotların aşınmaya uğrayabileceği de göz ardı edilmemelidir. [28]. Ayrıca sistemin girdi parametrelerinin değiştirilerek plazma süreçlerinin kontrol edilebilmesi çeşitli uygulamalarda kolaylık sağlamaktadır.

2.5.2. RF (radyo frekans) deşarjlar

RF plazmalar, radyo frekansı bölgesinde (yaklaşık $10^5 \text{ Hz} - 10^9 \text{ Hz}$ aralığı) çalışan jeneratörler ile manipüle edilerek oluşturulur. Bu jeneratörler genellikle de $1 \text{ MHz} - 100 \text{ MHz}$ aralığında çalıştırılırlar. RF plazmalarda iletken elektrot kullanma zorunluluğu yoktur. Bu nedenle elektrotların plazma ile reaksiyona girme durumu yoktur. Dolayısıyla

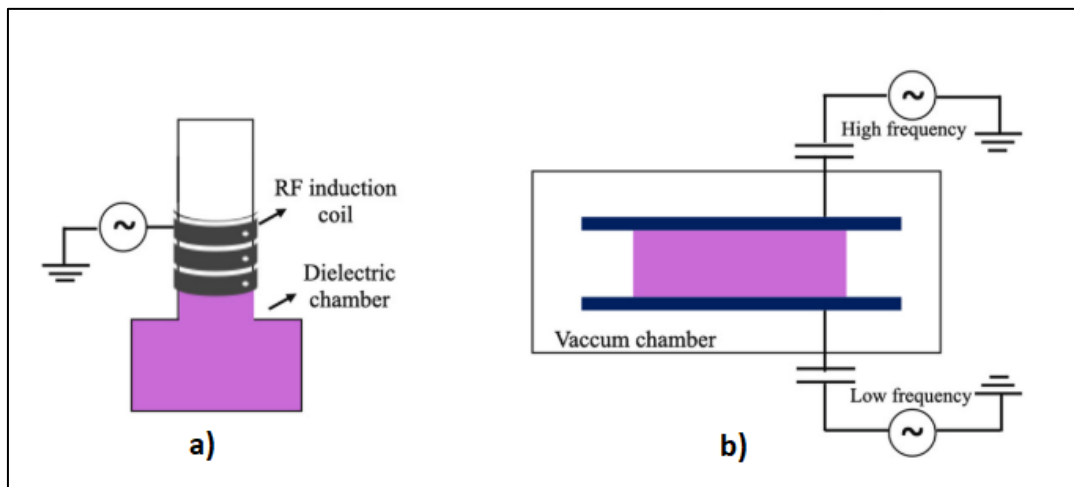
RF plazmalar uzun ömürlüdürler [28]. RF plazma frekansları çok yüksek olduğundan elektronlar bu frekanslara ayak uydurabilirken iyonlar neredeyse hareketsiz kalırlar [33]. İki çeşit RF deşarj söz konusudur. ICP (Inductively coupled plasma) ve CCP (Capacitively coupled plasma).

ICP’de bir bobin, plazma odasını kapsayacak şekilde yerleştirilir ve RF kaynakla bu bobine zamanın fonksiyonu olacak şekilde değişen bir potansiyel fark uygulanır. Bobindeki değişen elektrik alan, plazma odası içerisinde değişen bir manyetik akı indükler. Eş. 2.1’de Faraday Kanunu gereği zamanla değişen manyetik akı, plazma içerisinde bir RF plazma akımı oluşturur.

$$\varepsilon = -\frac{d\varphi}{dt} \quad (2.1)$$

ICP plazmalarda sıcaklık DC plazmalara göre düşüktür. Nanoteknolojik uygulamalar için uygundur [31]. Ayrıca elektrot kullanmaya da gerek yoktur. Şekil 2.4 (a)’da basit bir ICP şeması verilmiştir.

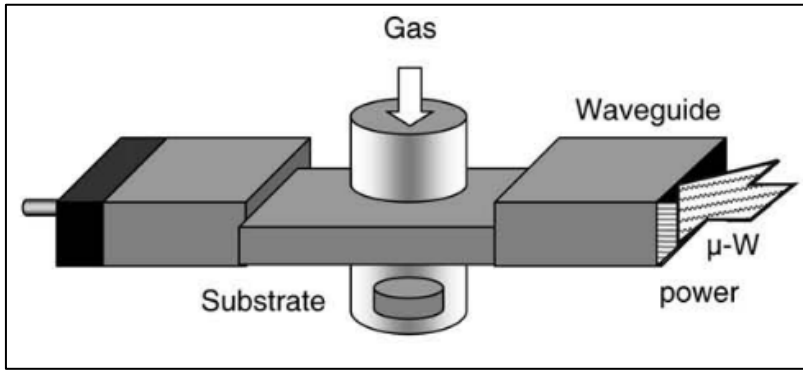
CCP’lerde elektrotlarından biri topraklanmış, diğeri RF jeneratöre bağlı kapasitör şeklindeki plazma türüdür [33]. Zamanla değişen bir RF akım söz konusu olduğundan elektrotların etkinliği DC deşarja göre daha azdır. Şekil 2.4 (b)’de basit bir CCP şeması verilmiştir.



Şekil 2.4. RF plazma çeşitleri. a) ICP şeması. b) CCP şeması [35]

2.5.3. MW (mikrodalga) deşarjlar

MW deşarjlar elektromanyetik spektrumda 10^9 Hz – 10^{11} Hz aralığında bulunan mikrodalga aralığına denk gelen frekanslarda çalışan reaktörler ile elde edilir. Genelde 2,45 GHz frekanslı reaktörler kullanılır ve dalgalar, dalga kılavuzları ile gaz hücresine taşınırlar. Bundan daha düşük frekanslarda iyonlar elektrotlara ulaşır ikincil elektron salınımına neden olabilirler [28]. Elektrot kullanmaya gerek yoktur. Şekil 2.5’de basit bir mikrodalga dalga kılavuzu kaynağı görülmektedir.



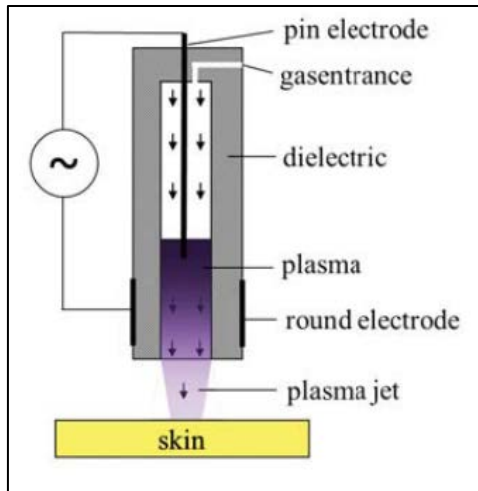
Şekil 2.5. MW plazma kaynağı [32]

2.6. Plazmaların Kullanım Alanları

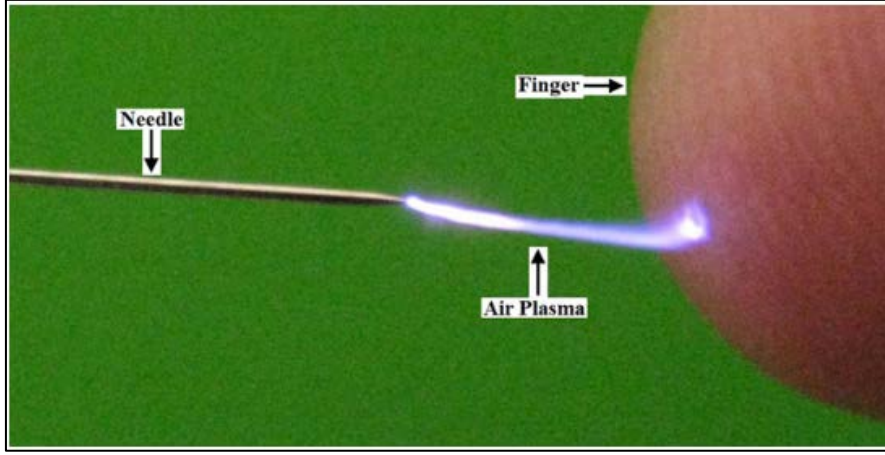
Termal ya da termal olmayan plazmalar, tıp, astrofizik, biyomedikal, mikroelettronik, tekstil, kimya, optik, metalürji, görüntüleme gibi endüstriyel, teknolojik ve medikal alanlarda çalışma sahası bulmaktadır. Plazma parametreleri (voltaj, kullanılan gaz, elektrot tipi vb.) değiştirilerek fiziksel ve kimyasal reaksiyonlar yardımıyla yüzey üzerinde amaçlanan etkiler kontrollü bir şekilde gerçekleştirilebilir. Özellikle uygulamalarda atmosferik basınçlı plazmaların kullanılması vakum ihtiyacını ortadan kaldırdığından pratik ve daha az maliyetli olmaktadır. Kuşkusuz plazma teknolojilerinin kullanım sahası çok geniştir. Bu sebepten ötürü tezde bazı önemli uygulamalardan kısaca bahsedilecektir. Yapılan bir çalışmada Almanya’da on binlerce çalışma alanının doğrudan plazma teknolojisiyle ilişkili olduğu ve Almanya ekonomisine %10’luk bir büyüme katkısı sağladığı bildirilmiştir [19].

Soğuk plazmaların bakteriler üzerindeki pasivize edici etkisi bilinmektedir. Ayrıca

plazmaların su ile tepkimesi sonucu açığa çıkan OH^- iyonları, ozon (O_3), hidrojen peroksit (H_2O_2) gibi reaktif ve zararlı türler, mikroorganizmalarda DNA'ya zarar verebilmekte ve kanser hücrelerinin ölümüne neden olabilmektedir [16, 34]. Özellikle O^- ve OH^- gibi reaktif oksijen türleri biyomedikal uygulamalarda araçlardaki ve protezlerdeki bakterilerin dezenfektanı için kullanılmaktadır [14]. Plazmalar ayrıca retina yırtıkları tedavisi, hasar görmüş doku ve hücrelerin onarılması, yaraların iyileştirilmesi ve sterilizasyonu, kanın pıhtılaştırılması, diş beyazlatma, cilt temizleme, endoskopi, anjiyogenez, ablasyon gibi alanlarda termal plazma ve termal olmayan plazma şeklinde kullanılmaktadır [14-16, 36]. Termal olmayan plazmalar cilde zarar vermeden bakterileri pasivize edebilmektedir. Özellikle plazma jetleri biyomedikal uygulamalarda insan cildinde tedavi ve iyileştirme için yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da bir plazma jeti şematik olarak gösterilmiştir. Resim 2.1'de ise plazma jetinin insan parmağının derisine uygulanışı gösterilmiştir. Bu plazma yaklaşık oda sıcaklığında olduğundan insan derisinde herhangi bir yanmaya sebep olmamaktadır.



Şekil 2.6. Bir plazma jetin çalışma prensibi [37]



Resim 2.1. Plazma jetinin insan derisine uygulanması [17]

Güneş lekelerinin ve kutuplara yakın bölgelerde oluşan Auroraların açıklanmasında plazma fiziğinden yararlanılmıştır[20]. Mikroelektronikte anizotropik aşındırma, biriktirme, yüzey temizleme, bilgisayar çiplerinin üretimi, entegre devrelerin (IC) üretimi, yarıiletkenlerin üretimi ve işlenmesi gibi alanlarda kullanılır [18, 23, 32, 38].

Tekstilde boya ve mürekkeplerin malzemeye daha verimli ve çevreci bir şekilde işlenebilmesi için yüzeylerin hidrofili özelliğini artırıcı veya ıslanmayı engelleyici modifikasyonlarda kullanılır [18, 32].

Plazma ortamı normalde elde edilmesi güç olan farklı kimyasal türlerin oluşturulabilmesi için bir laboratuvar görevi görür. Zararlı baca gazlarının, kloroflorokarbonun (CFC), dioksinin ayrıştırılması, ozon üretimiyle su arıtma, yüzeylerin oksit tabakayla kaplanması (oksidasyon), metanol üretimi gibi alanlarda plazmalar kullanılır [32, 39].

Floresan lambalar, tasarruflu ampuller, plazma ekranlar, fotokopi makineleri, güneş pilleri, lazerler, yansıma önleyici film kaplama, optik hizalama, optik diskler gibi alanlarda plazma fiziği kullanılır.

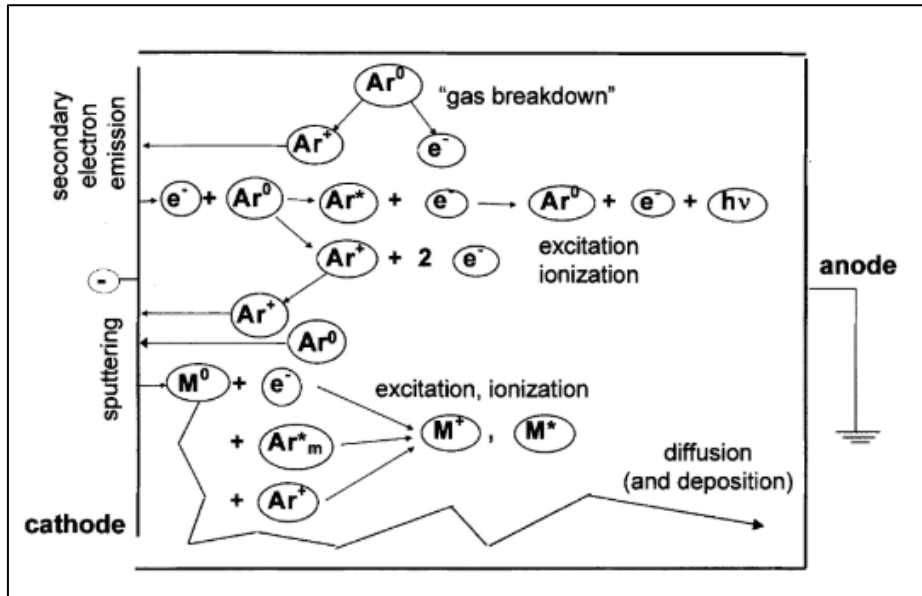
Ark fırınlarında hurdaların eritilmesi, metal kesme, kaçak akım devre kesici, ark kaynağı (lehim) gibi kullanım alanları vardır [31].

Bunların dışında elementlerin analizinde, ambalajlamada, excimer radyasyon üretiminde, dedektör ve kamera sistemlerinde, gıda endüstrisinde mikroorganizmaların inaktivitesinde yüksek verimli ve çevreci şekilde kullanılırlar.

3. DC PLAZMALAR

Basitçe bir DC plazma hücresi, anot ve katot olarak karşılıklı yerleştirilmiş iki adet elektrot ve bunların sınırladığı alanda genelde silindirik bir gaz odasından oluşur. Elektrotlara birkaç bin volta kadar DC voltaj uygulanır ve odadaki gazın plazma hale getirilmesi amaçlanır. Gazın içerisinde önceden bulunan az miktardaki elektron ve iyonlar zıt yönlerde hareket ederek gaz molekülleriyle esnek ya da esnek olmayan çarpışmalar yaparlar. Böylece atomları iyonize ederek yeni elektronlar oluştururlar ve bu elektronlar da başka atomları iyonlaştırarak üstel olarak gelişen bir elektron çığgı mekanizmasını meydana getirirler. Elektronların iyonlara göre daha küçük kütleli olmalarından dolayı daha çabuk hareketlenmeleri, plazma akımında elektronların iyonlardan daha fazla katkı yaptığı anlamına gelmektedir.

İyonların ise çok daha önemli bir görevi vardır. Hızlanan iyonlar katota çarptıklarında katottan çeşitli mekanizmalarla elektronlar (ikincil elektronlar) veya bazen katotun kendi atomlarını püskürtme ile sökebilirler. Şekil 3.1’de çeşitli mekanizmalarla yüklü türlerin üretimi gösterilmiştir. İyonların katota çarpmasıyla ikincil elektron emisyonu, salınan ikincil elektronların atomları uyarması ve iyonlaştırması, iyon ve hızlı atomların katota çarpmasıyla katot malzemesinden püskürtme ile atom salınımı gibi süreçler özetlenmiştir.



Şekil 3.1. Glow deşarjında yük üretim işlemler şeması [18]

Deşarjın karakterini belirleyen bazı önemli parametreler vardır. Bunların başlıcaları gaz basıncı ve tipi, elektrot cinsi ve çapı, elektrotlar arası mesafe ve voltajdır.

DC deşarjında yüklü türlerin sayısı, rekombinasyonlar sonucu ve elektronların difüzyonla plazmayı çevreleyen duvarlara sızmasıyla azalmaktadır. Sürecin devamlılığı açısından dışarıdan uygulanan voltajı değiştirmek veya fotoiyonizasyon ile yeni yüklerin oluşması önemlidir.

3.1. Çarpışma Çeşitleri

Parçacıkların birbirleriyle çarpışmaları plazma içinde ortalama bir kinetik enerji sağlanana kadar enerji transferini sağlayan süreçtir. Düşük voltajlarda genelde toplam enerjinin korunduğu esnek çarpışmalar gerçekleşir. Ancak iyonlaşma ve uyarılma işlemleri için esnek olmayan çarpışma süreçleri gereklidir ve bu, enerji aktarımının bir yoludur. Böylece türler arasındaki çarpışmaları esnek çarpışmalar ve esnek olmayan çarpışmalar olarak iki şekilde incelemek mümkündür. Çizelge 3.1’de bazı çarpışma türleri verilmiştir.

Çizelge 3.1. Başlıca çarpışma türleri [24]

Electrons	
$e + A \rightarrow A^+ + 2e$	Ionization
$e + A \rightarrow e + A^* \rightarrow e + A + h\nu$	Excitation
$e + A^* + B \rightarrow 2e + A + B^+$	Penning ionization
$e + A \rightarrow e + A$	Elastic scattering
$e + AB \rightarrow e + A + B$	Dissociation
$e + AB \rightarrow 2e + A^+ + B$	Dissociative ionization
$e + AB \rightarrow A^- + B$	Dissociative attachment
$e + A^+ + B \rightarrow A + B$	Recombination
Ions	
$A^+ + B \rightarrow A + B^+$	Charge Exchange
$A^+ + B \rightarrow A^+ + B$	Elastic scattering
$A^+ + B \rightarrow A^+ + B^+ + e$	Ionization
$A^+ + B \rightarrow A^+ + B^* \rightarrow A^+ + B + h\nu$	Excitation
$A^+ + e + B \rightarrow A + B$	Recombination
$A^+ + BC \rightarrow A^+ + B + C$	Dissociation
$A + BC \rightarrow C + AB$	Chemical reaction

Esnek çarpışmalarda çarpışma öncesindeki toplam enerji çarpışma sonrasındaki toplam enerjiye eşittir. Dolayısıyla çarpışan parçacıkların yörüngesi değişse bile iç enerjileri korunmuş olur. Bilaro toplarının çarpışmasına benzetilebilir.

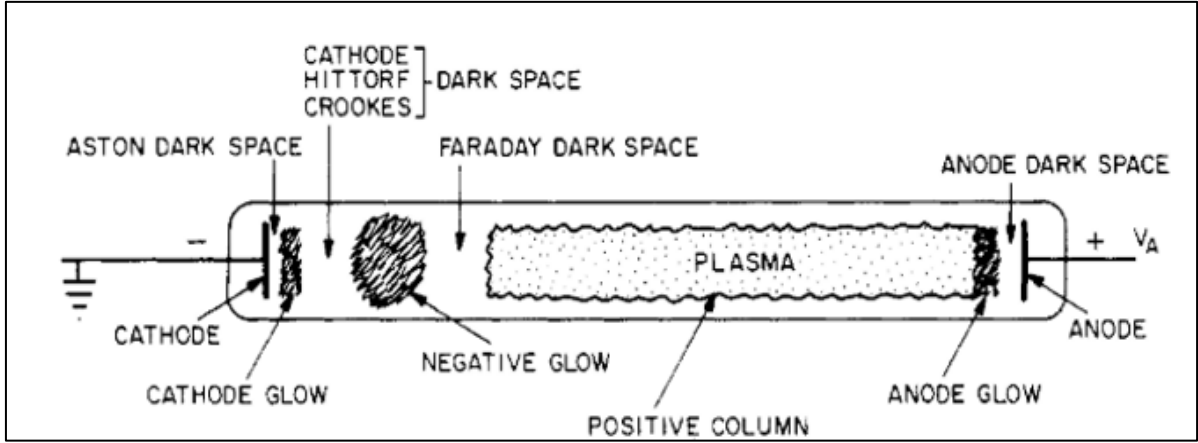
Esnek olmayan çarpışmalarda iki parçacık çarpıştıktan sonra, birinin veya ikisinin de iç enerjilerinde değişiklikler olur. Bu tür çarpışmalara iyonizasyon, uyarılma, rekombinasyon vb. örnek verilebilir. Çizelge 3.2’de iç enerjideki net değişimin ($\Delta\epsilon_p$) işaretine göre tepkimeler sınıflandırılmıştır.

Çizelge 3.2. İç enerjideki değişime göre tepkimenin sınıflandırılması [40]

$\Delta\epsilon_p$	Classification
0 (no change in K.E.)	Elastic
> 0	Endothermic (inelastic)
< 0	Exothermic (inelastic)
0 (change in K.E.)	Resonant (inelastic)
Note: $\frac{1}{2} M_a^2 = \frac{1}{2} M_a'^2 + \frac{1}{2} M_b'^2 + \Delta\epsilon_p$	

3.2. DC Plazma Bölgeleri

Bir DC deşarjın kendine has özelliklere sahip bölgeleri mevcuttur. Bölüm 3.5’de bu bölgeler daha sonra ayrıntılı olarak ele alınacaktır. Bu bölgelerin en önemlilerinden biri glow boşalma bölgesidir. Glow deşarjı plazmada uyarıcı çarpışmalar sonucunda gözle görülebilecek düzeyde ışık salınımının olduğu parlak bir bölgeyi işaret eder. Düşük basınç glow deşarjı ile ilgili çalışmalar Faraday, Hittrof, Crookes gibi bilim insanları tarafından çalışılmıştır. Şekil 3.2’de normal glow deşarjında görünür alanların çizimi gösterilmiştir. Burada karartmalar, ışık emisyonunun fazla olduğu anlamına gelmektedir.



Şekil 3.2. Normal glow deşarjında görünür alanlar [24]

Aston karanlık bölgesi (Aston dark space); katottan kopan yavaş ikincil elektronların toplandığı bu bölge, güçlü bir elektrik alana sahiptir. Elektronların enerjisi küçük olduğundan atomları uyaramazlar ve dolayısıyla bu bölge karanlık görülür.

Katot glow bölgesinde, katottan sökülmiş elektronlar elektrik alan tarafından ivmelendirilerek atomları çeşitli seviyelerde uyarabilecek miktarda enerji kazanmışlardır. Bu bölgede katota gitmekte olan iyonlar açısından da zengindir.

Katot karanlık bölge (cathode dark space) nispeten karanlıktır. Elektronlar atomları uyarmayı bırakmışlardır. İyon yoğunluğu fazladır.

Negatif glow bölgesinde elektrik alan çok düşüktür. Katottan gelen hızlandırılmış elektronlar bu bölgede yoğun bir uyarma ve iyonizasyona neden olurlar. Bu nedenle çok parlak bir bölgedir.

Faraday karanlık bölgesi (Faraday dark space), negatif glow bölgesinde yoğun bir şekilde uyarma ve iyonlaştırma işlemlerine katılan elektronların yeni uyarmaya ya da iyonlaştırma yapamayacak kadar enerjilerinin azaldığı bölgedir.

Pozitif sütun (positive column); deşarj tüpü yeterince uzunsa bu parlak bölge görülür, tüp uzadıkça bu bölgenin uzunluğu da artar ve aydınlık-karanlık çizgiler görülebilir. Bir miktar enerjili elektron vasıtasıyla emisyon devam eder. Duvarlarda difüzyonla yük kayıpları da gerçekleşir. Bu bölge deşarjı, renkli TV görüntü panellerinde kullanılmış ancak verimi

düşük kalmıştır [9]. Ayrıca lazerler ve floresan lambaların ışımasında da bulunur [18].

Anot glow bölgesinde elektronlar anot tarafından çekilir, iyonlar ise itilirler. Pozitif sütundan biraz daha parlak olabilir. Bu bölge anot kılıfının sınırındadır ve her zaman bulunmayabilir.

Anot karanlık bölge (anode dark space), elektronların pozitif sütundan anota doğru ayrılıp hareket ettiği bölgedir ve bu nedenle negatif bir yük yoğunluğu söz konusudur. Yine pozitif sütuna göre elektrik alan daha büyüktür.

3.3. Kendini Besleyen ve Beslemeyen Plazmalar

Bir gaz deşarjında deşarjın ilerlemesini etkileyen birçok parametre vardır. Bu parametreler bir yandan da deşarjda kararsızlıklara yol açabilir. Gaz deşarjının kendi kendisini idame ettirmesi için rekombinasyonlar ve difüzyon sonucu meydana gelen yük kayıplarının yeni yük üretim mekanizmalarıyla giderilmesi ve dengelenmesi gereklidir. Bu yük üretim mekanizmaları gaz hacminde fotoiyonizasyon ve Penning iyonizasyonu ile olabileceği gibi katoda bağlı süreçlerle de gelişebilir [40]. Özellikle katot kaynaklı ikincil elektron emisyonu sürecin devamlılığı açısından kritik bir önem taşır. Buna göre plazma hacminde üretilen iyonlar ivmelenerek katot materyaline çarparlar ve oradan elektron emisyonuna neden olurlar. Bu elektronlar elektrik alan etkisiyle ivmelenip gaz hacmi içerisinde yeni iyonlaşmalara ve dolayısıyla yeni yüklü parçacıkların oluşumuna katkı sağlayarak deşarjın devamlılığına yardımcı olurlar. Katottan başka yöntemlerle de elektron salınımı gerçekleştirilebilir. Örnek olarak termiyonik emisyon, fotoelektrik emisyon, alan emisyonu vb.

Townsend, gaz deşarjının devamlılığını iki parametre ile açıklamıştır. Townsend'in birincil iyonizasyon katsayısı (α), elektrik alan boyunca belirli bir mesafe hareket eden elektronun ortalama yapmış olduğu iyonlaştırıcı çarpışma sayısıdır. Townsend'in ikincil iyonizasyon katsayısı (γ) ise katoda çarpan iyon başına salınan elektron sayısıdır.

10 μm 'den büyük mikrobeşarj hücrelerde deşarjın sürdürülebilirliği ikincil elektron emisyonu ile mümkündür [41]. Kendini besleyen boşalma şartı Eş. 3.1'de verilmiştir.

$$\gamma[\exp(\alpha \cdot d) - 1] = 1 \quad (3.1)$$

3.4. Gazın Kırılması (Breakdown)

Hücrede bulunan elektronlar elektrik alan tarafından hızlandırılırlar ve yeterli enerjiyi elde etmeleri halinde iyonlaştırıcı etkilerde bulunurlar. Bir elektrondan bir iyon ve yeni bir elektron daha oluşturulmuş olur. Bu iki elektron da yeterli enerjiyi kazanacak duruma gelene kadar hızlanıp başka atomları iyonlaştırırlar ve böylece elektron miktarı üstel bir şekilde artarak elektron çığını meydana getirir. Ancak bu çığ katot ile anot arasında ilerleyerek anota ulaşır ve böylece etkisini yitirir. Bir başka azaltıcı etki ise yanal duvarlarda difüzyonla yük kayıplarıdır. Yanal kayıplar elektrik alana paralel bir manyetik alan yardımıyla azaltılarak elektronların olay hacminin içerisinde tutulması sağlanabilir [42]. Deşarjın devamlılığı için yeni elektronlar ve yeni bir çığ gereklidir. Elektronların iyonlaştırıcı etkisi sonucu oluşan iyonlar katota çarparak buradan ikincil elektron salınımına neden olurlar. Bu ikincil elektronlar, yeni bir çığı oluşturmak için adaydırlar. Bir anlamda deşarjın devamlılığı ikincil elektron emisyonuna bağlıdır.

Plazmadaki iyonlar tarafından çığ üretimini devam ettirebilecek sayıda elektron üretilmesi deşarj devamlılığı için gereklidir ve bu Paschen kriteri olarak bilinir. 1889'da Paschen, gaz kırılma voltajının yalnızca basınca (p) veya yalnızca elektrotlar arası mesafeye (d) bağlı olmadığını, bu ikisinin çarpımına (p.d) bağlı olduğunu deneysel olarak göstermiştir ($V_K = f(pd)$). 1915'de ise Townsend, iyonizasyon katsayısı α 'nın, indirgenmiş elektrik alanın (E/p) bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir [41]. Buna göre kırılma voltajı Eş. 3.2'de verilmiştir.

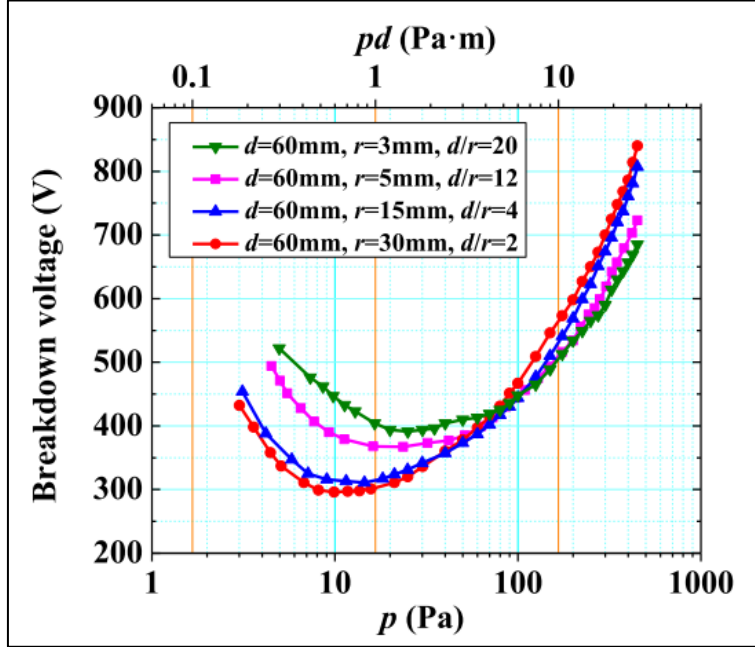
$$V_K = \frac{Bpd}{\ln(Apd) - \ln[\ln(1 + \frac{1}{\gamma})]} \quad (3.2)$$

Townsend'in Eş. 3.3'deki kriteri ile gazın kırıldığı düşünülür [29].

$$\gamma (e^{\alpha \cdot d} - 1) = 1 \quad (3.3)$$

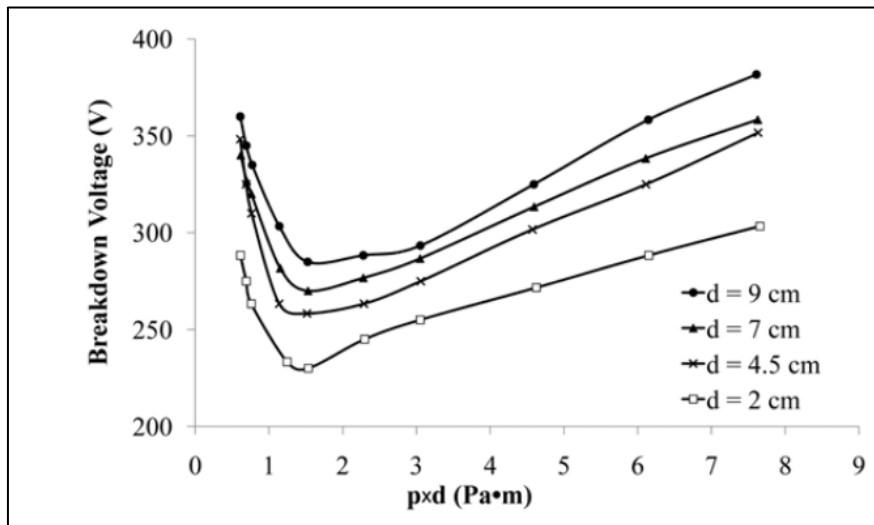
Elektrotlar arası mesafe sabit tutulup breakdown voltajının basınca göre grafiği çizilirse geleneksel Paschen kanununa göre eğrilerin üst üste binmesi beklenir. Ancak Şekil 3.3'de görüldüğü üzere Paschen eğrileri üst üste binmemiştir. Bu durum breakdown voltajının

sadece $p \cdot d$ çarpımına bağlı olamayacağını, diğer değişkenlerin de eğrilerin oluşumunda etkisi olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3.3. Sabit elektrotlar arası mesafede Paschen eğrileri [41]

Şekil 3.4’de ise farklı elektrotlar arası mesafeler için Paschen eğrileri çizilmiştir. Buna göre aynı $p \cdot d$ değerlerinde olmasına rağmen farklı elektrotlar arası mesafeye göre farklı eğriler oluşmuştur. Bu grafiğe göre Paschen eğrisinin tek başına elektrotlar arası mesafenin de bir fonksiyonu olduğu görülmektedir.



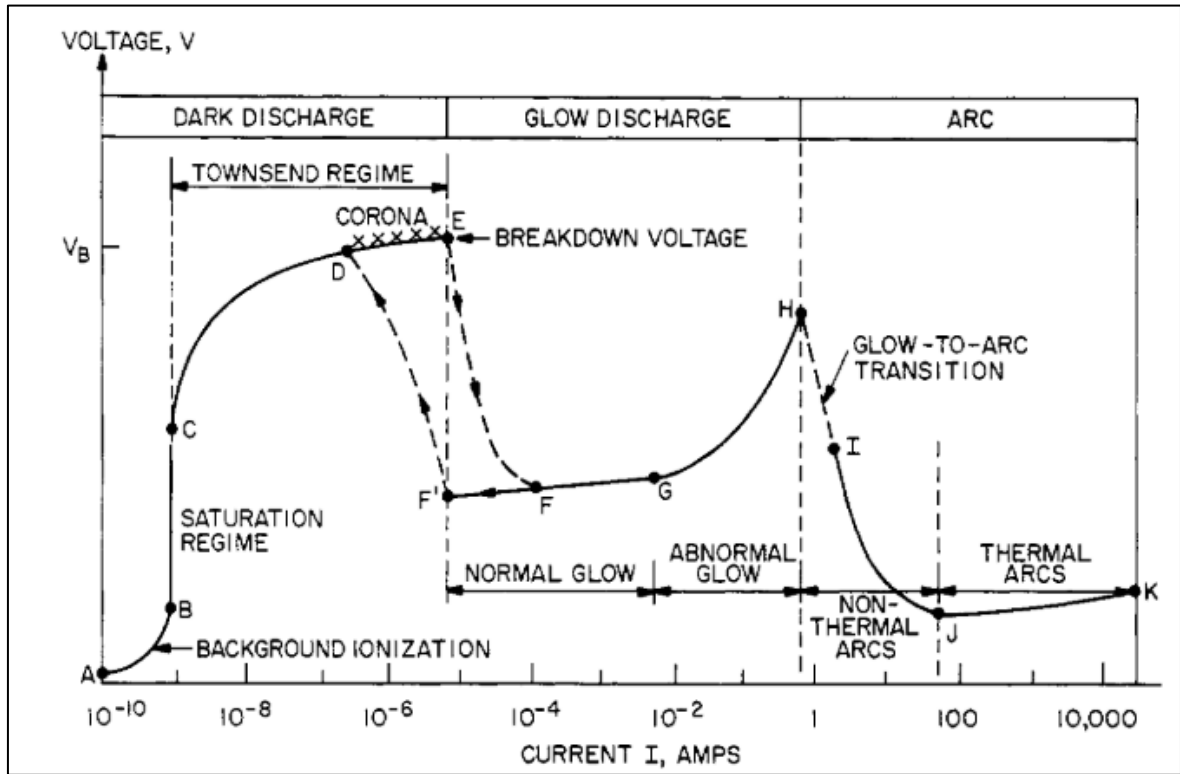
Şekil 3.4. Farklı elektrotlar arası mesafe için Paschen eğrileri [43]

Özellikle küçük elektrotlar arası mesafe için Paschen eğrisinden sapmaların görülmesi, alan emisyonunun bu sapmalardan sorumlu olduğu sonucunu ortaya çıkarmıştır. 1 μm 'den küçük aralıklarda alan emisyonunun toplam akıma katkısı %50'den fazladır [44].

Ayrıca breakdown voltajının d/r 'nin de bir fonksiyonu olduğunu gösteren deney sonuçları vardır [8, 41, 45].

3.5. Townsend, Glow, Arc Boşalma Bölgeleri

Bir gaz deşarj tüpünde DC gaz deşarjı temelde Townsend bölgesi, glow bölgesi ve arc bölgesi olarak üç kısımda incelenebilir [46]. Şekil 3.5'de bir DC düşük basınç deşarjının akım-voltaj karakteristiği görülmektedir.



Şekil 3.5. Düşük basınç DC boşalma akım-voltaj karakteristiği [24]

Karanlık deşarjın Townsend deşarj bölgesinde zayıf bir akım (10^{-10} A – 10^{-5} A) ve gözle görülemeyecek kadar zayıf bir ışıma oluşur. A ve B bölgeleri arasında arkafon iyonizasyonu gözlenir. Normalde nötr bir gaz içerisinde kozmik radyasyon ya da çevredeki radyoaktif etkilerden dolayı bir miktar elektron ve iyon bulunmaktadır. Townsend

bölgesinde uzay yükü etkisi ihmal edilebilir.

B ve C noktaları arasında voltaj arttırıldıkça iyonlaşma hızı ve rekombinasyon hızı birbirini dengeler ve akım doyum bölgesinde sabit bir değerde kalır.

C ve E noktaları arasında elektrik alanda ivmelenen elektronlar iyonlaştırıcı çarpışmalar yaparak voltajla birlikte akımın artmasına sebep olurlar. Bu bölgede iyonizasyon oranı rekombinasyon oranından fazladır ve boşalma kendini besleyen hale gelmiş olur. Voltaj arttırılmaya devam edilirse E noktasında gazın kırılması gerçekleşir.

D ve E noktaları arasında elektriksel potansiyelin yüksek olduğu sivri ya da keskin bölümlerde taç şeklinde soluk parıltılar (korona) görülür. Korona deşarjı yüksek gerilim hatlarının etrafında oluşarak enerji kaybına neden olabilir. Öte yandan bu deşarj çeşitli uygulamalarda da kullanım alanı bulur [25].

E noktasında gazın kırılmasıyla Townsend deşarjı glow deşarjına dönüşür. Bu bölgede voltajda düşüş akımda yükseliş görülür. Yaklaşık 10 mA'lık bir akım değerinde deşarjda parıltılar gözlenir [40]. Büyük kütleli iyonlar katot bölgesinde birikerek elektrik alanının homojenliğini bozarlar. Glow bölgesinde akım değeri 10^{-5} A – 10^{-1} A arasındadır.

Glow bölgesinden sonra akım arttırılmaya devam edilirse H noktasından sonra ark bölgesine geçiş olur. Bu bölgede yüksek akım ve düşük voltajla deşarj devam eder. Plazmadaki akımın büyüklüğü katodun ısınmasına ve termiyonik salınım yapmasına neden olur. I ve J noktaları arasında elektronlarla diğer büyük kütleli parçacıkların sıcaklıklarının aynı olmadığı termal olmayan ark bölgesi mevcuttur. Akım daha fazla artarsa J noktasından sonra plazma lokal termodinamik dengeye (LTE) yaklaşır ve bu durumda elektronlar ve diğer parçacıkların sıcaklıkları yaklaşık olarak eşittir.

4. MİKRODEŞARJ ÜNİTELER

Son yıllarda mikrodeşarj üniteler (mikroplazmalar), çevreci ve uygulanabilir olması açısından, plazma kimyası, minyatür ışık kaynağı, dezenfekten olarak ve fotonik uygulamalarda dikkat çekmektedir [47, 48]. Mikroplazmalarda hücre boşluğu 1 mm'nin altındadır ve küçük akımlarda çalıştırılır. Atmosferik basınçlarda özellikle hava gazıyla çalışırken glowdeşarjının bir arkdeşarjına dönüşme ihtimali makroskobik sistemlerde çok fazladır. Ancak mikroplazma sistemler glowdeşarjının devamlılığını sağlar ve arkdeşarjına geçişi büyük oranda önler [48]. Yüksek akımlarda artan katot sıcaklığından dolayı yüksek erime noktasına sahip molibden gibi malzemeler katot malzemesi olarak kullanılabilir. Ek olarak akım kararsızlıklarını ve flamantasyonu önlemek için yüksek öz dirençli bir yarıiletken katot malzemesi kullanmak da yarar sağlamaktadır [49].

4.1. Hücre Parametreleri

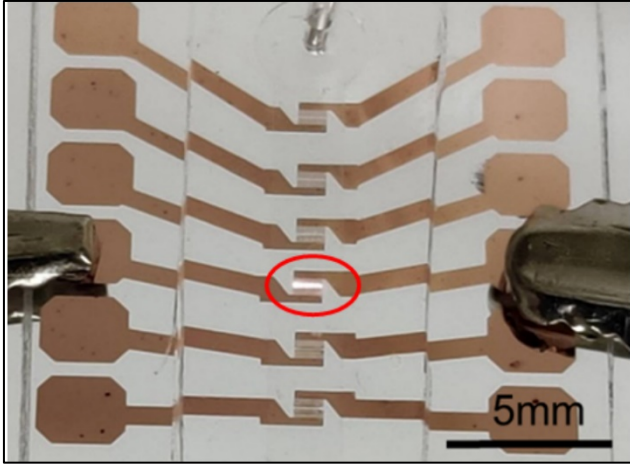
Atmosferik basınçlarda mikroplazmalarda hücre boşluğu çok kısa olduğundandeşarjı başlatmak için 30 kV/cm büyüklüğünde elektrik alana ihtiyaç vardır. Bu nedenle mikrodeşarj hücre boşluğu genellikle cm veya mm mertebesinde seçilir [17]. Daha küçük mesafelerde alan emisyonu devreye girer ve iyonlaştırıcı etkilerle ikincil elektron emisyon süreçlerine katkıda bulunur. Kırılmayı gerçekleştirebilmek için düşük basınçta uzun hücre aralığı, kısa hücre aralığında ise yüksek basınç tercih edilmelidir [42]. Ancak hücre aralığının artmasının, artan hücre duvarı yüzey alanıyla birlikte difüzyon sonucu yük kayıplarını arttırdığı gerçeği unutulmamalıdır [50].

Alan emisyonunun (field emission) 10 μm 'den daha kısa hücre aralıklarında ve 10^9 V/m mertebesindeki elektrik alan büyüklüklerinde etkin olduğu, bundan daha düşük elektrik alan ve daha uzun hücre aralıklarında ikincil elektron emisyonu sürecinin etkin olduğu söylenebilir. Ayrıca katot malzemesindeki pürüzler veya sivri uçlar da elektrik alanda artışla birlikte alan emisyonuna sebep olabilir ve kırılma voltajının düşmesini sağlayabilir [51].

Katot çapındaki artış, iyonlaşmalar sonucu oluşan pozitif iyonların katoda sürüklenip daha fazla alanı bombardıman etmesini ve ikincil elektron salınımının artmasını sağlar. Böylece

yeni iyonlaştırıcı tohum elektronların sayısı artmış olur [29]. Ayrıca katot çapındaki artış ile plazmanın uzaysal hacmi de arttığından daha fazla çarpışma ve iyonlaşma meydana gelmektedir [52].

Bir mikrodeşarj ünitesi UV kaynağı olarak çalıştırılabilir. Mikroplazmalardan salınan ışınım, elektrotlara uygulanan voltaj ve devreden geçen akım şiddeti gibi parametreler plazmadaki süreçler hakkında tahminde bulunmamızı kolaylaştırmaktadır [53]. Resim 4.1’de 10 μm elektrot aralıklı mikrodeşarj jeneratör uygulamasında bir glowdeşarjının örneği gösterilmiştir.

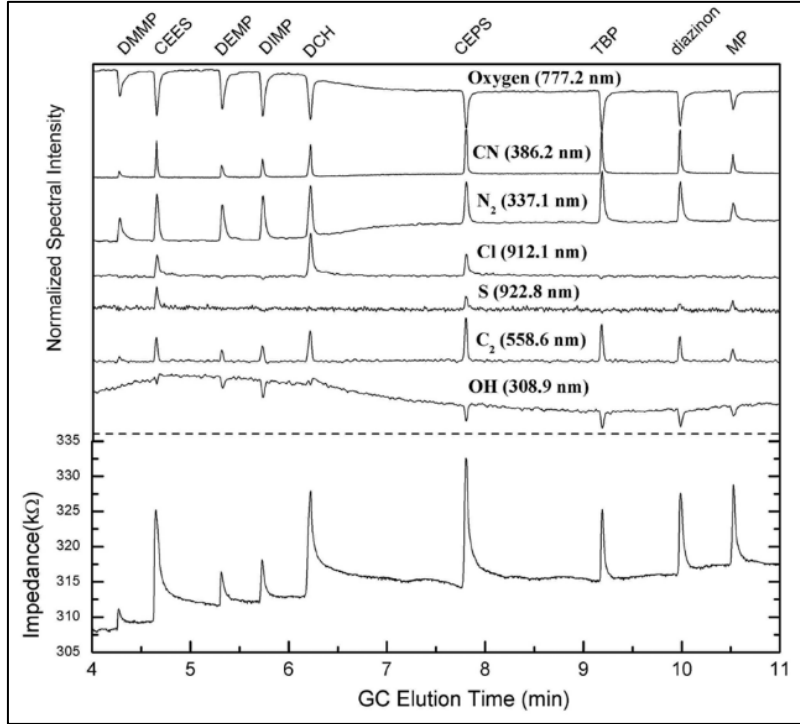


Resim 4.1. Elektrot aralığı 10 μm olan mikrodeşarj hücresinde glowdeşarjı [54]

4.2. Mikrodeşarjların Kullanım Alanları

Son yıllarda mikroplazmadeşarjları düşük güç tüketimi ve yerinde uygulanabilirliği sayesinde birçok alanda çalışma sahası bulmuştur ve farklı alanlarda yüksek potansiyel barındırmaktadır.

Mikroplazmalar atıkların iyileştirilmesi gibi çevresel konularda, gaz dedektörü olarak, malzeme işleme ve yüzey modifikasyonu, kızılötesi görüntü çevirici olarak, CF_4 gibi sera gazlarının ayrıştırılması gibi alanlarda kullanılır [48, 49]. Ayrıca yüksek enerjili iyon ve elektronların üretimi sayesinde ısıya ve UV’ye dayanıklı mikroorganizmalarda sterilizasyon amaçlı ve mikrotahrikli iticilerde kullanılmaktadır [3, 4]. Şekil 4.1’de dedektör olarak kullanılan mikroplazmanın molekül tespiti konusunda potansiyeli resmedilmiştir.



Şekil 4.1. Bir mikroplazma hücresinde karışımdaki gazların kromatografik analiz verileri [48]

Aşındırma, biriktirme, mikroçipler, mikro anahtarlar, ozon üretimi, görüntüleme, ışık kaynağı, ekranlar, lazerler gibi alanlarda hem pille çalıştırılabilir şekilde taşınabilir olması hem de ekonomik olması açısından yaygın olarak kullanılmaktadır [47, 51, 53, 55]. Mikroplazmalar yüksek elektrik alanları düşük voltajlarda sağladıklarından düşük güç tüketimine sahiptir, stabil çalışır, bir kez yapıldıktan sonra fabrikasyona uygundur ve diziler halinde çalıştırılmaya müsaittir [54, 56].

5. KIZILÖTESİ (IR) DEDEKTÖRLER

Kızılötesi (IR) dedektörler, elektromanyetik spektrumun kızılötesi bölgesindeki dalgaları tespit etmeye yarayan dedektörlerdir. Kızılötesi bölgede dedektörler açısından en çok ilgilenilen bölgeler Çizelge 5.1’de görülmektedir.

Çizelge 5.1. Bazı IR dalgaboyu aralıkları

Aralık	Dalgaboyu (μm)
SWIR (kısa dalga kızılötesi)	1 – 2,5
MWIR (orta dalga kızılötesi)	3 – 5
LWIR (uzun dalga kızılötesi)	8 – 12

MWIR ve LWIR bölgelerindeki ışımlar, bu bölgelerdeki atmosferik pencerelerden dolayı atmosferde fazla miktarda tutulmaya maruz kalmadan yeryüzüne ulaşabilirler [57].

Kızılötesi (IR) dedektörlerin kökeni II. Dünya Savaşı’na kadar dayanmaktadır ve özellikle yarıiletken teknolojinin gelişimi, entegre devrelerde başarılı sonuçlar ve askeri alandaki ihtiyaçlar neticesinde soğuk savaş döneminde IR dedektör teknolojisi önemli aşamalar kaydetmiştir [58]. Daha sonraki yıllarda ise askeri alandan ziyade astronomi ve diğer sivil alanlardaki uygulamalarda IR dedektörlerin kullanımı artmıştır.

Aslında IR ışınların varlığı 1800 yılında Frederick William Herschel tarafından termometrelerden oluşan ilkel bir monokromatör ile deneysel olarak bulunmuştur. Herschel, güneş ışığını bir prizmadan geçirip renklerine ayırmış, bu farklı renklerin düştüğü noktalara termometreler yerleştirerek termometrelerdeki sıcaklık değişimlerini ölçmüştür.

Günümüzde kızılötesi dedektörler ticari, askeri, endüstriyel ve medikal alanlarda yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Güvenlik, gözetleme, optik iletişim, kimyasal/biyolojik algılama, enstrümantasyon ile malzeme inceleme, füze takibi, yangın haritalama, uzay araştırmaları gibi uygulama alanları vardır [59-63].

5.1. Kızılötesi (IR) Dedektör Çeşitleri

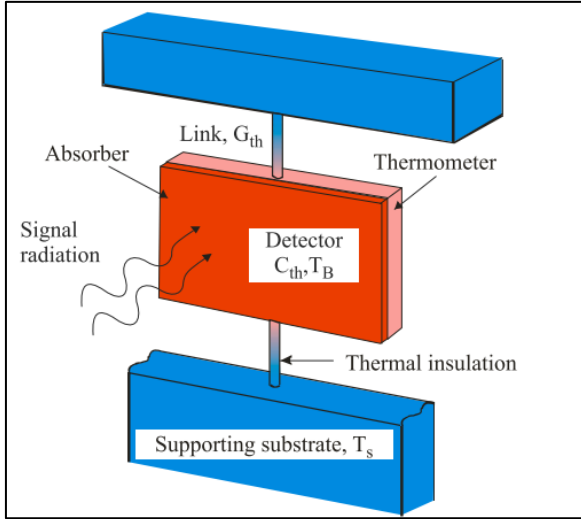
1800 yılında Herschel'in deneyinden sonra kızılötesi dedektörler daha çok termal dedektör olarak kendisini göstermiştir. Işık etkisiyle iletkenlik değişimi (photoconductive effect) 1873 yılında W. Simith tarafından deneysel olarak gösterilmiştir [64].

Temelde kızılötesi dedektörler, üzerlerine düşen kızılötesi radyasyonun ortaya çıkarmış olduğu etki bakımından iki başlık altında incelenebilir. Bunlar termal dedektörler ve foton detektörleridir.

5.1.1. Termal dedektörler

Absorbe edilen radyasyon, materyalin sıcaklığında değişikliklere neden olur. Bu değişiklikler de farklı fiziksel parametrelerin değişimi aracılığıyla elektronik bir sinyale dönüştürülür [65]. Termal dedektörler sıcaklık değişimlerine göre tepki oluşturdıklarından yavaş tepki verirler ve multispektral algılamaları zayıftır [61]. Oda sıcaklığında çalışabilirler. Yüksek performans ve hızın beklenmediği uygulamalarda düşük maliyetli bir seçenek olarak kullanılabilirler [65].

Termal dedektörler üç kısımda incelenebilir. Bolometreler (bolometer), piroelektrikler (pyroelectric) ve termoelektrikler (thermoelectric). Her ne kadar TV görüntüleme hızlarında büyük termal dedektör dizilerinin iyi sonuçlar verdiği gösterilmiş olsa da kriyojenik soğutmalı dizilerin yerini alması beklenmemektedir [62, 65]. Bir termal dedektör şeması Şekil 5.1'de görülmektedir.



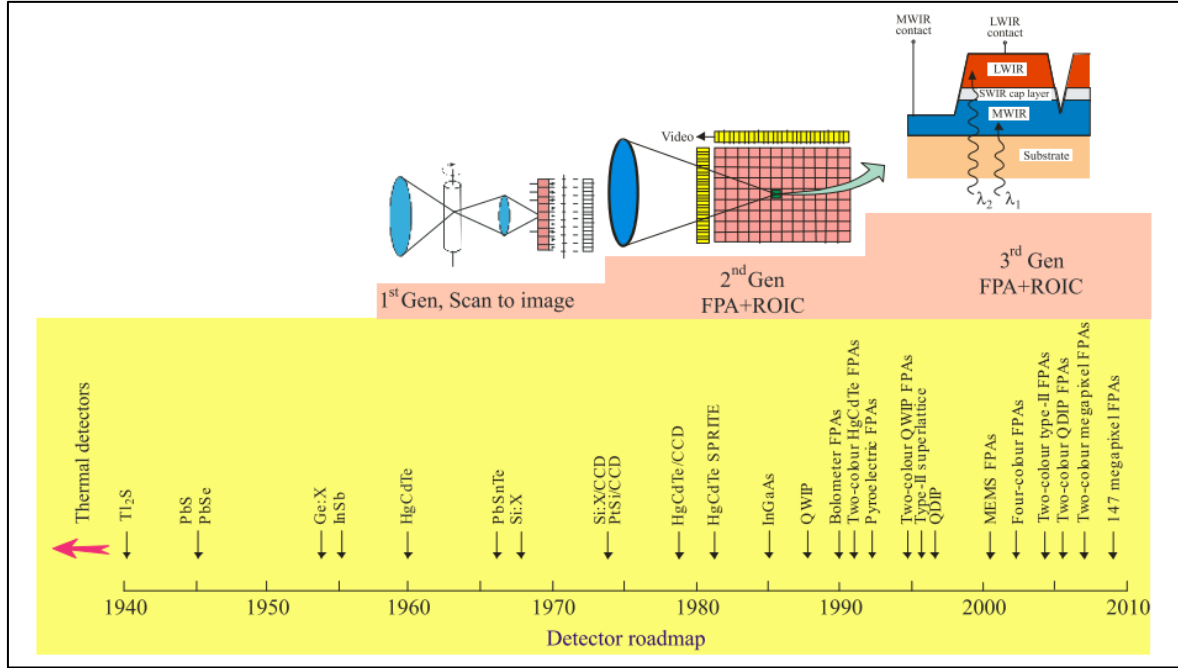
Şekil 5.1. Termal bir dedektörün şeması [64]

5.1.2. Foton dedektörler

Fotodedektörler optik sinyalleri elektrik sinyallerine dönüştüren O/E dönüştürücülerdir [66, 67]. Fotodedektörlerin yapısında bulunan yarıiletkenin bant aralığının üzerinde enerjilerle absorbe edilen fotonlar, elektron ve deşik çifti oluştururlar. Daha sonra dışarıdan uygulanan bir elektrik akım etkisiyle bu elektronlar ve deşikler zıt yönlerde hareket ederek bir fotoakıma neden olurlar. Piyasadaki fotodedektörler çoğunlukla Si ve Ge tabanlıdır [59]. Ancak bu fotodedektörlerin bazı sınırlılıkları vardır. Son yıllarda düşük maliyet ve esneklik açısından organik fotodedektörler ile ilgili umut verici çalışmalar yapılmış olmakla beraber, gelecekte inorganik-organik hibrit dedektörlerin her iki türün de avantajlarını alarak yüksek performanslı cihazların üretilmesine katkıda bulunacağı tahmin edilmektedir [60, 68].

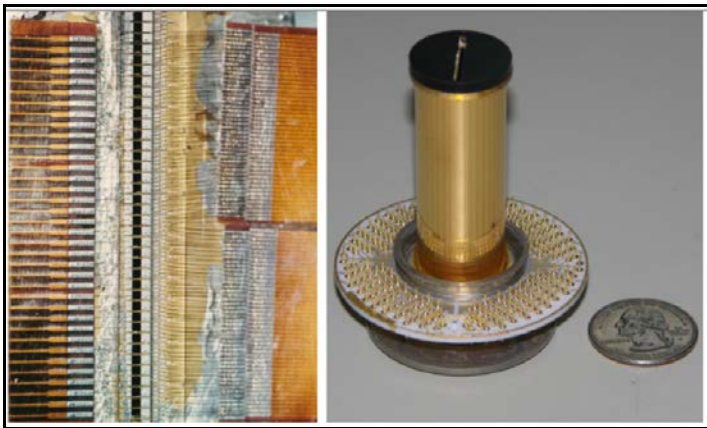
Foton dedektörler her ne kadar soğutmasız termal dedektörlere göre üstün görünseler de dar spektral duyarlılık, dedektör gürültüsünü azaltmak için kriyojenik sıcaklıklarda çalışmayı gerektiren büyük hacimli ve pahalı soğutma sistemlerine bağımlılık, foton dedektörler için önemli bir yük teşkil etmektedir [61, 62].

Şekil 5.2’de de görüldüğü gibi kızılötesi dedektörleri üç nesil altında incelemek uygun olacaktır.



Şekil 5.2. IR dedektör ve sistemlerin tarihi gelişimi [64]

Birinci nesil dedektörler tarama amaçlı tasarlanmışlardır. Odak düzleminde çoğullama fonksiyonlarını içermez. HgCdTe (MCT) teknolojisinin gelişmesiyle 60, 120, 180 veya 240 elemanlı lineer diziler kullanılmıştır. Bu tür dedektör dizilerinin hassasiyeti düşüktür. Resim 5.1’de dewar gövdesine monte edilmiş 180 elemanlı bir FPA (focal plane arrays) görülmektedir.



Resim 5.1. 180 elemanlı bir FPA [64]

İkinci nesil dedektörlerde ise elemanlar iki boyutlu dizilerden oluşur. Daha hafif ve düşük güç tüketimine sahip yüksek performanslı çalışan bu dedektörler birinci nesil dedektörlerin

yerini almıştır [64, 69]. Diziler entegre devrelerle taranır [58].

Üçüncü nesil dedektörler ise daha hızlı, daha çok pikselden oluşan ve multispektral hassasiyeti olan cihazlardır. III-V grup yarıiletkenler üçüncü nesil dedektörler için adaydırlar [58]. Ayrıca HgCdTe (MCT), QWIP (quantum well infrared photodetector)'ler, antimonid bazlı bileşikler (ABC) ve soğutmasız mikrobolometre dedektörleri üçüncü nesil dedektörlerde geliştirilen teknolojiler arasındadır [64, 69].

Üç tip fotodedektör vardır. Bunlar sırasıyla fotoiletkenler (photoconductors), fototransistörler ve fotodiyotlardır.

Fotoiletkenler iki terminalli omik elektrot kontaklarından oluşan yapılardır [67]. Tepki hızı yavaş ve sürücü voltajı yüksektir. Ancak bir fotonun absorbe edilmesiyle birden çok elektron akıma katılabileceğinden EQE (external quantum efficiency) 1'den büyük olabilir [60].

Fotodiyotlar, fotoiletkenler gibi iki terminalli anot ve katot elektrotlarından oluşur. Düşük sürücü voltajında yüksek tepkisellikle çalışabilirler. Foton absorpsiyonu ile en fazla bir adet elektron-deşik çifti oluşabilir. Düşük foton absorpsiyonu ve taşıyıcı sızıntıları nedeniyle EQE genellikle 1'den küçüktür [66]. Tepki hızları fotoiletkenlerden daha iyidir ve dış beslemesiz çalışabilirler [60]. Optik iletişim sistemlerinde genellikle yüksek tepkiselliği ve düşük boyutları nedeniyle fotodiyotlar sıklıkla kullanılır [66].

Fototransistörler diğer iki fotodedektörden farklı olarak üç terminalli yapıya sahiptirler. Bu terminaller source, drain ve gate olarak isimlendirilir. Gate terminaline voltaj uygulayarak kanalın iletkenliği kontrol edilebilir. Ayrıca ışık absorbe edilmesi, yük taşınımını etkileyip yüksek fotoakım ve tepkiselliğe yol açabilir [60, 67].

5.2. Kızılötesi Dedektör Kalite Parametreleri

Kızılötesi dedektörlerin gelişiminde önceden var olan dedektörlerin olumlu ve/veya olumsuz yönlerini bilmek yeni dedektör sistemlerinde hedef belirlemede önemli bir rol oynamaktadır. Ayrıca dedektör performansları arasında kıyaslama yapabilmek için bazı kalite parametrelerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Kuantum verimliliği (quantum efficiency), foton başına üretilen taşıyıcı (elektron veya deşik) sayısını belirtir. Optik sinyalden elektrik sinyali oluşturma verimliliğinin bir ölçüsüdür. İki tip kuantum verimliliğinden söz edilebilir. İçsel kuantum verimi (IQE) ve dışsal kuantum verimi (EQE). Dışsal kuantum verimi bağıntısı Eş. 5.1’de verilmiştir. Burada “R” duyarlılık, “h” Planck sabiti, “c” ışık hızı ve “e” elektron yüküdür.

$$EQE = \frac{R.h.c}{e} \quad (5.1)$$

Duyarlılık (responsivity), ışıkla üretilen fotoakımın veya ışıkla oluşturulmuş voltajın optik giriş güce oranı olarak tanımlanır. Eş. 5.2’de duyarlılık bağıntısı verilmiştir. I_{ph} üretilen foto akım, P_{in} ise giriş ışık gücüdür.

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{in}} \quad (5.2)$$

Sinyal-gürültü oranı (SNR), sinyal gücünün arka plan gürültüsüne oranı veya fotodedektörler için fotoakımın karanlık akıma oranı olarak tanımlanabilir. Karanlık koşullarda bir cihazdan geçen akıma karanlık akım denir ve dedektör için önemli bir gürültü kaynağıdır. Genel olarak 1 μA ’den küçük karanlık akımlar hızlı bir alıcı için kabul edilebilirdir [60]. SNR, hassasiyetle ilgili bir parametredir ve Eş. 5.3’deki gibi hesaplanabilir. Burada i_n , toplam gürültü akımıdır.

$$SNR = \frac{R.P_{in}}{i_n} \quad (5.3)$$

Gürültü eşdeğer güç (NEP), gürültü ölçümünün elektriksel bant genişliği 1 Hz’e eşit olduğunda cihazın gürültüsüyle karşılaştırılabilir bir sinyal (yaklaşık 1 olan SNR’de) üretmek için gereken en düşük ışık gücü miktarını gösterir. Gelen ışık tarafından üretilen fotoakımın algılanabilmesi için gürültü seviyesinin üzerinde olması gerekir. Eş. 5.4’de görüldüğü gibi gürültü akımını duyarlılığa oranlayarak NEP bulunabilir.

$$NEP = \frac{i_n}{R} \quad (5.4)$$

Dedektivite (D), gürültüye eşdeğer en küçük algılanabilir sinyali tanımlar. $D=1/NEP$ olarak formüle edilir. Dedektör performansı ile doğrudan ilişkilidir. Özel dedektivite (D^*) bir dedektörün bant genişliğine (f) ve aktif alanına (S) göre normalleştirilmiş halidir. Bu parametre ile fotodedektörlerin birbirleri ile karşılaştırılması sağlanır. Eş. 5.5’de özel dedektivite formülleştirilmiştir.

$$D^* = \frac{R\sqrt{S \cdot f}}{i_n} \quad (5.5)$$

Tepki hızı (response speed), cihazın değişen fotoğraf karelerinden gelen ışığa ne kadar hızlı tepki verdiği ile ilgili bir parametredir. Optik iletişim ve kızılötesi görüntülemelerde yüksek tepki hızı istenmektedir. Fotoğraf karesinden gelen ışığa göre çıkış akımı artıp azalabilmektedir. Buna göre maksimum akımın %10’undan %90’ına çıkış süresi veya %90’ından %10’una düşüş süresi olarak tanımlanan süreler, fotodedektör tepki hızını temsil eder.

5.3. Kızılötesi Dedektör Teknolojileri

Daha önce de bahsedildiği gibi üçüncü nesil fotodedektörlerde yüksek tepki hızı, piksel hassasiyeti ve miktarı, soğutma sistemlerine daha az bağlılık ve multispektral hassasiyet gibi beklentiler oluşmaktadır [58]. Günümüzde bu yönde çalışmalar hızla devam etmektedir. Geçmişten günümüze ise en kullanışlı dedektör teknolojileri olarak InSb (1955), HgCdTe (1960), QWIP (1987) ve mikrobolometreler (1970’lerin sonu) incelenmesi gereken yapılardır.

InSb dar bant aralıklı, düşük enerjili ışığa duyarlı bir malzemedir. Üretim teknikleri gelişmiş ve cihaz performansı yüksektir [70]. MWIR ve LWIR bölgelerdeki dedeksiyon için önemli bir oranda kullanılmışlardır. Ancak maliyet QWIP’lere göre yüksektir. Astronomi alanında kızılötesi teleskoplarda kullanılmış bir malzemedir.

HgCdTe (MCT) SWIR, MWIR ve LWIR bölgelerinde çalışabilen bir dedektör

malzemesidir. Multispektral (çok renkli) görüntüleme olanağı sunar. $1\ \mu\text{m} - 30\ \mu\text{m}$ aralığında uyarlanabilir enerji bandı aralığı, yüksek kuantum verimliliği, uzun taşıyıcı ömrü, yüksek elektron mobilitesi, yüksek sıcaklıklarda çalışabilmesi gibi özelliklerinden ötürü soğutulmuş dedektörler içerisinde en iyi performansı sunar ve ideale yakın bir dedektördür [58, 62, 71]. Bu nedenle pazara hakimdir. Ancak her ne kadar Si ve GaAs substratları üzerinde büyütülmesi yönünde çalışmalar olsa da halihazırda pahalı bir substrat olan CdZnTe üzerinde büyütülmeye bağımlıdır. Bu nedenle daha çok askeri alanda kullanılır. Bunun yanında Hg kullanımına bağlı olarak stabilite ve toksisite problemleri vardır [57].

QWIP (quantum well infrared photodetector)'ler MWIR ve LWIR bölgelerinde çalışabilen multispektral özelliğe sahip dedektörlerdir. Temeli III-V grubu birleşik yarıiletkenlere dayanır ancak daha düşük enerjili radyasyonu algılayabilmek için bu gruptaki bileşiklerin bant aralığı fazladır. AlGaAs/GaAs kuantum kuyulu yapılar ile geniş bant aralıklı malzemelerle de bu algılamanın olabileceği gösterilmiştir [58]. QWIP'ler askeri ve ticari alanda kullanılmaktadırlar. HgCdTe'e göre yüksek dedektivite, yüksek verim, düşük maliyet, ayarlanabilir dalgaboyu, gerçekte var olmayan $1/f$ gürültü oranı, yüksek radyasyon sertliği ve geniş FPA dizileri için uygun olması gibi avantajlara sahiptir. Ancak kuantum verimi düşüktür [58, 71].

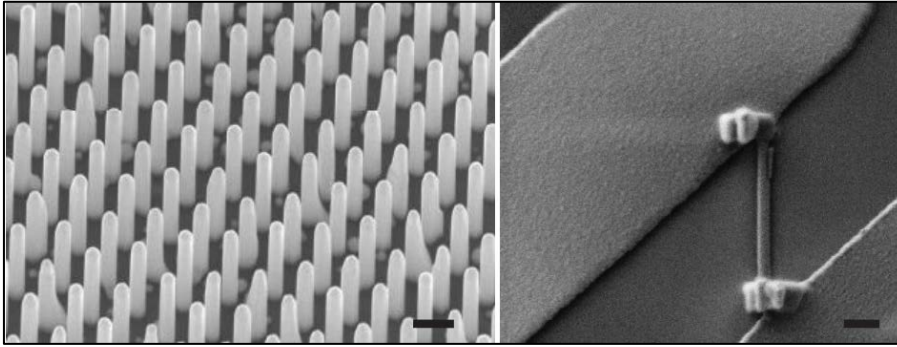
Mikrobolometreler, yukarıdaki diğer dedektörlerden farklı olarak soğutmasız bir kızılötesi dedektördür. Yani kızılötesi ışıyım, devredeki direncin ısınmasına ve direnç değerinin değişmesine neden olmaktadır. Bu mekanizma nedeniyle tepki süresi yavaş ve soğutmalı dedektörlere göre dedektivitesi ve performansı düşüktür [71]. 1970'lerden itibaren ABD ordusunda her personel için termal görüntüleme sağlamak amacıyla ucuz ve taşınabilir bir yöntem araştırılmıştır. Texas Instruments tarafından yapılan çalışmalar mikrobolometrelerin gelişimine önemli katkı sağlamıştır. 2010 yılı itibari ile soğutmasız kızılötesi dedektör teknolojisinin %95'inden fazlasını mikrobolometreler oluşturmuştur [58].

5.4. Nanotel (Nanowire) Yapılı Fotodedektör Teknolojisi

Günümüzde kullanılan geleneksel fotodedektörler Si, Ge, InGaAs, HgCdTe gibi yığın düzlemsel dedektörler olup sınırlı spektral aralık, düşük fototepkisellik, yüksek gürültü

seviyesi gibi birçok olumsuzluklara sahiptir. III-V birleşik kristal yapıları yarıiletkenler yüksek absorpsiyon, ayarlanabilir bant aralığı, taşıyıcı mobilitesi sayesinde en umut verici fotodetektör malzemeler arasındadır. Ancak üretimi maliyetlidir [59]. Ayrıca geleneksel fotodetektörler Si ile entegre edilirken kafes uyumsuzluk gerilimleri nedeniyle doğrudan Si üzerinde büyütülemezler. Bu nedenle pahalı substratlara ihtiyaç duyarlar [57].

Nanoyapılı fotodetektörler ise yüksek yüzey-hacim oranı sayesinde yığın kristallere göre daha duyarlıdır. Tepki süresinin kısa, fototaşıyıcı ömrünün uzun olması gürültü seviyesini iyileştirebilir [61, 66]. Heteroyapı oluşturmada esnekliğe sahiptir. Belirli bir çapa kadar III-V nanoteller Si üzerinde büyütülebilirler. Nanotellerdeki kafes uyumsuzluğu elastik gevşeme ile giderilebilir [57]. Bu avantajlar düzlemsel fotodetektörler yerine nanoyapılı fotodetektörlerin daha fazla ilgi çekmesine yol açmıştır. Resim 5.2’de GaAs nanotellerin yapısı görülmektedir.



Resim 5.2. Nanoteller. a) Si substrat üzerinde büyütülen GaAs nanotelleri. b) Tek bir GaAs nanoteli. Ölçek boyutu 200 nm’dir [57]

Özellikle karbon nanotüpler (CNT) bir boyutlu geçişe izin veren ve üstün bir geometriye sahip kuantum verimliliği ve hassasiyeti artırılabilir bir nanofotodetektör adayıdır. Ayrıca bu malzemelerde bant aralığı enerjileri çap ile ters orantılı olduğundan spektral aralıkları üretim aşamasında çap kontrolü ile ayarlanabilir [61].

Nanotellerdeki bu yüksek potansiyel, kızılötesi kamera teknolojisinde yüksek çözünürlük ve hız parametrelerindeki gelişim başta olmak üzere güneş pilleri ve verimli ledler gibi alanlarda beklentiyi yükseltmektedir. Henüz yeni sayılabilecek bir teknoloji olan nanotel tabanlı fotodetektör teknolojisi ile ilgili çalışmalar devam etmektedir.

5.5. Yarıiletken Katot Etkisi

DC mikrobeşarj hücrelerde gazın kırılabilmesi için bulunduğu hücrenin uçlarına bir gerilim uygulanması gerekir. Bu durumda uçlarda elektrotlara ihtiyaç vardır. Genellikle elektrotlardan biri metal olurken, diğeri metal ya da yarıiletken olabilmektedir.

Katot malzemesi olarak ışığa duyarlı bir yarıiletken (fotokatot) tercih etmek bazı avantajlar sağlar. Yarıiletken katot malzemesinin öz direnci yüksektir ve bu durum akımda flamantasyonların oluşmasını bir ölçüde geciktirir [72]. Özellikle atmosfer basıncındaki mikrobeşarjlarda flamantasyon olasılığı daha yüksektir. Yüksek basınçlarda yüksek öz dirençli yarıiletken katot büyük avantaj sağlar [29].

Gazın kırılması ile kullanılan katot malzemesi arasında da önemli bir ilişki vardır. Katot malzemesine gönderilen fotonlar, fotoelektrik etki ile malzemeden elektron sökerler ve bu elektronlar gaz ortamına geçerek deşarj işleminde rol alırlar. Yüksek bir elektrik alan varsa alan emisyonu ile katot malzemesinden gaz ortamına elektron geçişi olabilir. Ayrıca IR aydınlatma ile yarıiletkenin valans bandından elektronların iletkenlik bandına geçmesi ile yarıiletkenin direnci azalır, iletkenliği artar. Böylece gazın kırılması daha düşük voltajlarda gerçekleşebilir. Ayrıca devre akımı artar [10, 29, 46]. Bir anlamda dışarıdan uygulanan bir IR radyasyonla devre akımı, gazın kırılması ve plazma ile ilgili diğ er süreçler kontrol edilebilir.

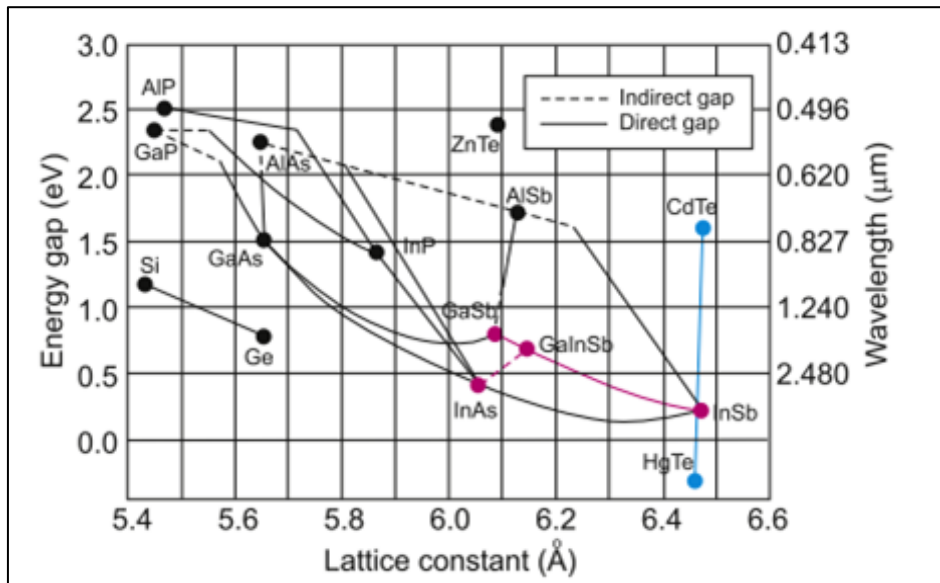
Yarıiletken katotların kuantum verimi metallere göre daha büyüktür. Ancak kullandıkça yüzeyleri oksit tabakayla kaplanır (oksidasyon) ve ömürleri kısılır. Metalik elektrotların kuantum verimi düşüktür ancak hazırlanması kolay, uzun ömürlü ve sağlamdırlar. Metal elektrotlar kararsızlıklara ve flamantasyona neden olurlar. Özellikle küçük elektrotlar arası mesafede yarıiletken elektrot ile metal elektrot arasındaki farklılık daha belirgin olur [47, 49].

5.6. InP Yarıiletkeninin Özellikleri

Mikroelektronik ve dedektör teknolojisinde Si, malzeme olarak uzun yıllar boyunca piyasayı domine etmiştir. Si bolca bulunur ve ucuzdur. Mekanik olarak sağlam, uzun zamandır bilinen ve olgun, yüksek termal geçirgenliğ e sahip ve mikroelektronik sanayide

en çok kullanılan malzemedir. Ancak indirekt bant yapısına sahiptir ve optik özellikleri zayıftır. Si üzerine entegre edilen Ge fotodedektörler ise telekom penceresinde hızlı yanıt verebilse de yüksek karanlık akım gürültüsüne sahiptir [73].

Doğrudan bant aralığına ve yüksek mobiliteye sahip III-V grubu birleşik yarıiletkenlerde (GaAs, InAs, InP, GaN vb.) yüksek seviyede absorpsiyon ve ışık emisyonu onları FET (alan etkili transistör) gibi yüksek hız gerektiren cihazlarda aranan malzeme haline getirir [13, 74, 75]. Düşük karanlık akım gürültüsü sayesinde fotonik endüstrisinde yaygın olarak kullanılırlar. Ayrıca termal iletkenlikleri yüksek olduğundan istenmeyen ısının uzaklaştırılması kolaylaşır ve bu da performansı olumlu yönde etkiler [75]. Ancak III-V grubu birleşik yarıiletkenler kırılmandır ve küçük boyutlarda üretilebilirler. Hammaddesi pahalıdır. Bu nedenle Si ve III-V grup birleşik yarıiletkenlerin entegrasyonu ile her iki tipin de özelliklerini barındıran yüksek radyasyon dirençli, sağlam, optiksel duyarlılığı iyi ve maliyeti düşük malzemeler üretmek daha akılcıdır [11]. Şekil 5.3’de bazı yarıiletkenlerin enerji bant aralığı ve kafes parametreleri grafiği verilmiştir.

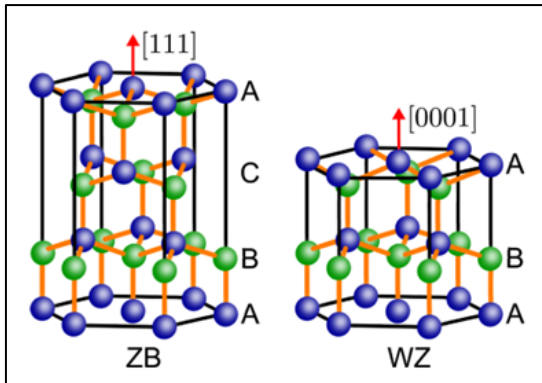


Şekil 5.3. Bazı yarıiletkenlerin enerji bant aralıkları ve kafes parametreleri [58]

Si'nin mikroelettronikteki büyük başarısına rağmen optoelektronik uygulamalarda III-V grup malzemeleri tartışmasız bir konumdadır. Bu malzemeleri Si üzerinde entegre etmede iki yöntem kullanılmaktadır. Bunlar monolitik yaklaşım (heteroepitaksiyel büyüme ile) ve hibrit bağlamadır. Monolitik yaklaşım III-V malzemelerin Si üzerinde farklı heteroepitaksi

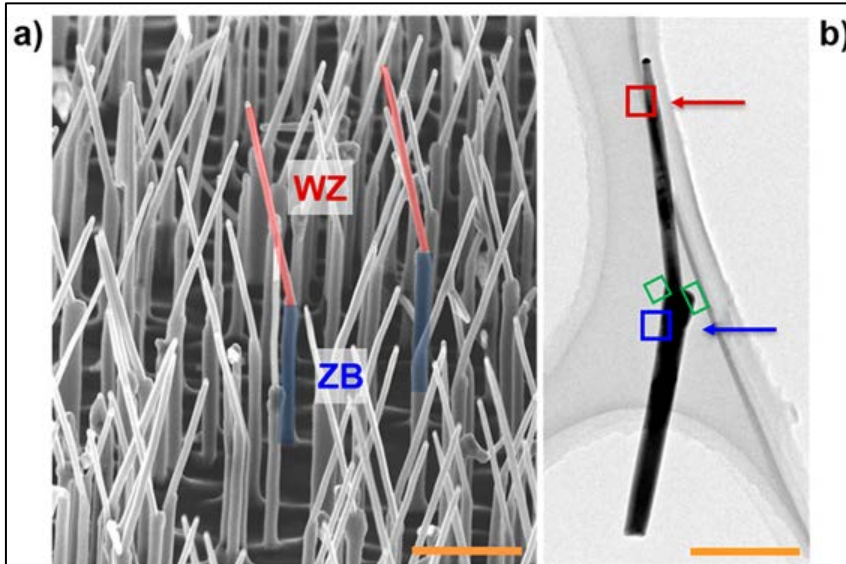
yöntemleriyle bağlanmasını sağlar. Bu yöntemlerden ELOG (epitaksiyel yanıl aşırı büyüme) aktif III-V malzemeleri Si üzerine entegre etmede en çekici yöntem olarak bilinir. Bu, düşük maliyet ve kolay işleme açısından arzulanan bir yöntemdir ancak kafes parametresindeki uyumsuzluklar, termal genişleme farklılıkları gibi zorluklar vardır. Hibrit bağlamada ise kalıptan gofrete ya da gofretten gofrete bağlama söz konusudur. Silikon gofret boyutu, III-V gofretlerinden büyük olduğundan gofretten gofrete bağlamada büyük silikon boyutundan tam olarak yararlanılamaz [11, 76]. İki gofret bir araya gelince ara yüzde bağlar oluşur. Daha iyi tutunum için yüksek sıcaklıkla tavlama gerçekleştirilir. Ancak bu tavlama işlemi malzemelerde bozulmalara ve termal genişleme farklılıklarından dolayı termal strese neden olabilir [13, 77].

InP direkt bant aralıklı, 1.30 μm veya 1.55 μm iletişim dalga boyunda çalışan optoelektronik araçlar için yarıiletken lazer diyotlarda substrat görevi görür. Fotodedektör ve yüklü parçacık dedektörü olarak kullanılmada yüksek potansiyele sahiptir. Güneş hücreleri, LED'ler, fotodiyotlar, fotodedektörler ve FET'lerin yapısına katılır. Absorbsiyon kapasitesi ve elektron hızı GaAs'den daha iyidir [78]. InP kristali iki yapıya sahiptir. Bunlardan biri birbirine geçen iki yüz merkezli kübik kafesten oluşan çinko blend (zinc blende), diğeri ise birbirine geçen altıgen sıkı paketlenmiş iki kafesten oluşan wurtzite (WZ) yapısıdır [79, 80]. Yığın InP'nin termodinamik olarak kararlı fazı kübik çinko blend (ZB) yapısı iken büyüme sıcaklığındaki artışla kristal yapı WZ'ye geçebilmektedir [81, 82]. WZ ve ZB yapılarının bant aralığı enerjisi, kritik nokta simetrisi, taşıyıcı etkin kütle ve gyromagnetic faktör gibi parametrelerinde farklılıklar vardır [83]. Örneğin oda koşullarında WZ ve ZB formların bant aralıkları sırasıyla 1.42 eV ve 1.35 eV'dir [84]. Şekil 5.4'de ZB ve WZ yapıları görülmektedir.



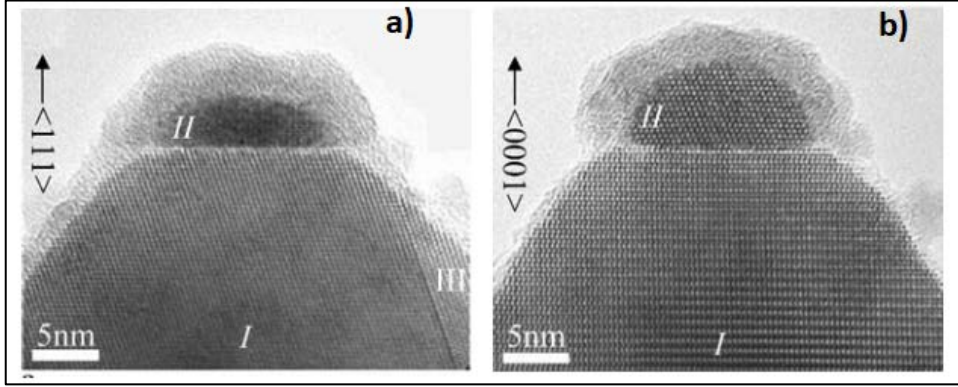
Şekil 5.4. ZB ve WZ örgü yapıları [85]

Yığın yapılara göre nanoteller yüksek yüzey/hacim oranı, mekanik esneklik ve tek boyutlu geometrisi ve daha duyarlı yapısı ile avantajlara sahiptir. İlk nanotel üretimi kayıtlarda 1964 yılında Wagner ve Ellis tarafından Au damlacıklar kullanılarak Si mikro boyutlu tel üretimi olarak görülmektedir [86]. Yığın yapıların aksine III-V yarıiletken nanoteller daha çok WZ yapısını benimsemektedirler [85, 86]. InP nanotelleri ise kübik ZB veya altıgen wurtzite (WZ) ya da ZB/WZ homoyapı şeklinde bulunabilir [87]. InP nanotellerinin büyüme sırasında kristal yapısını kontrol etmek için doping konsantrasyonu, sıcaklık veya nanotel çapı gibi parametrelerin kullanılabileceği gösterilmiştir [81, 88, 89]. Büyüme sırasında yapılan değişiklikler ile yapıda her iki kristal faz bulunabilir ki buna politipizm denilmektedir [85]. Resim 5.3'de InP nanotelin WZ yapısı kırmızı renkle, ZB yapısı mavi renkle gösterilmiştir.



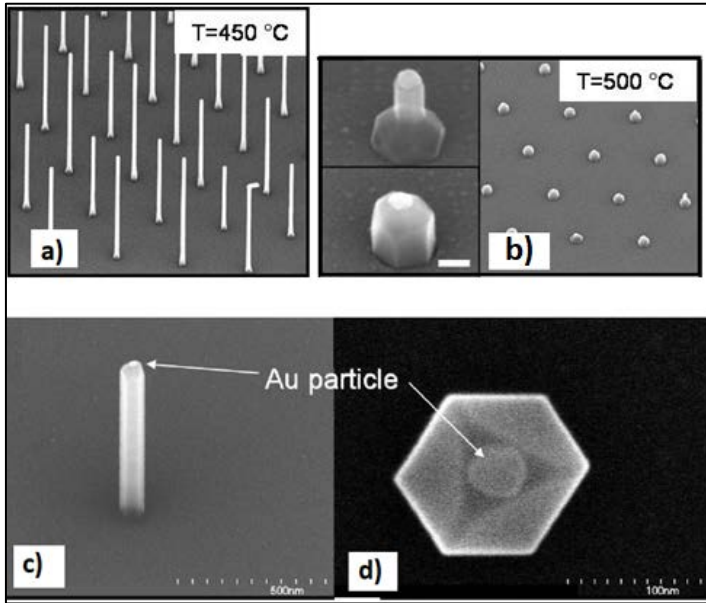
Resim 5.3. a) Aynı InP nanotel üzerinde WZ (kırmızı renk ile gösterilen) ve ZB (mavi renk ile gösterilen) yapıların SEM resmi. b) InP nanotelin TEM resmi. Turuncu ölçek sırasıyla 500 nm ve 5 nm'dir [90]

Bu tür nanotellerin büyütülmesinde koloidal nanopartiküller (örneğin Au) kullanılarak VLS (vapour-liquid-solid) mekanizması veya MOVPE (metalorganic vapour phase epitaxy) ve CBE (chemical beam epitaxy) gibi epitaksiyel büyütme metotları kullanılır [89]. Resim 5.4'de InP nanotelin TEM (transmission electron microscope) görüntüsü verilmiştir. Burada I ile belirtilen kısım InP nanotel kristalidir. II ile belirtilen bölümde ise Au katalizör parçacığı görülmektedir.



Resim 5.4. InP nanotelin TEM görüntüsü. a) ZB kristal yapı. b) WZ kristal yapı [91]

Resim 5.5’de a) ve b)’de sırasıyla 450 °C ve 500 °C sıcaklıklarda VLS metodu ile Au katalizörlü InP nanotel büyütme örnekleri gösterilmektedir. Resim 5.5’de c) ve d)’de ise VLS metodu kullanılarak büyütülmekte olan InP nanotelin üzerinde yüzen Au parçacıkları görülmektedir.



Resim 5.5. Au katalizörlü nanotel büyütme. a) 450 °C sıcaklıkta. b) 500 °C sıcaklıkta. c) ve d) Nanotel üzerinde yüzen Au parçacıkları [92]

6. DENEYSEL SİSTEM

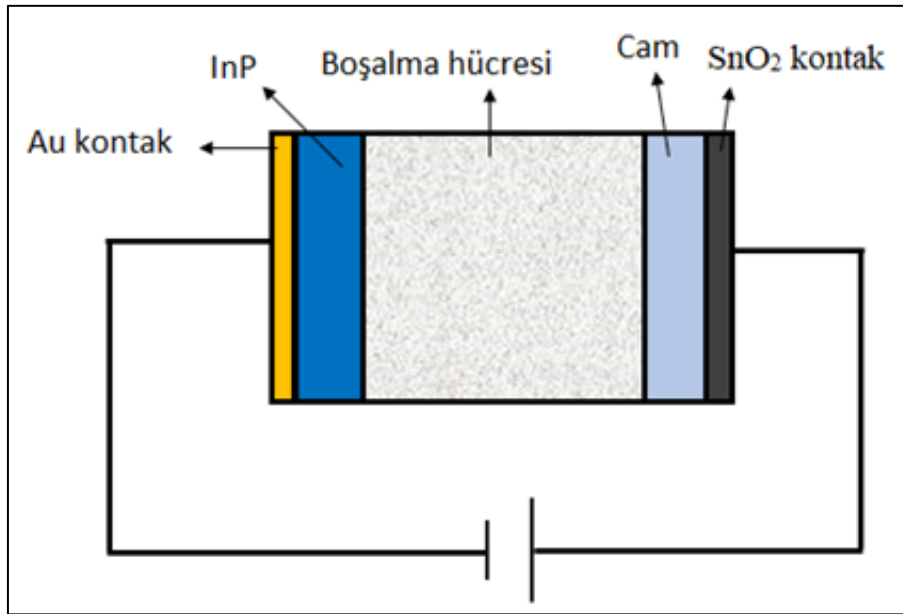
Deneysel sistemimizin bir kısmı kabaca Resim 6.1’de görülmektedir. Yarıiletken katotlu mikroboşalma düzeneği (YKMD) çeşitli mekanik, optik ve elektronik bölümler içermektedir. Bunlar;

- 1- Halojen lamba
- 2- Si filtre
- 3- Mercek sistemi
- 4- Mikroboşalma hücresi
- 5- Fotoçalıştırıcı (Thorn EMI 9235 QA)
- 6- Ray
- 7- Regülatör
- 8- Gaz tüpü
- 9- Dijital manometre (Vacuubrand CVC 2)
- 10- Vakumlama vanası
- 11- Vakum pompası (ULVAC SINKU KIKO Gvd-050A)



Resim 6.1. Yarıiletken katotlu mikroboşalma düzeneği

Mikroboşalma hücresi, püskürtme yoluyla içi ve dışı siyaha boyanmış sacdan bir kutunun içinde ray üzerine yerleştirilmiştir. Sac kutunun kapağı kapanabilmektedir. Dış etkilere karşı deneysel sistemin en az etkilenmesi amaçlanmaktadır. Kutunun sağ tarafında ışık kaynağından gelen ışınların içeriye girebilmesi için bir delik mevcuttur. Işık kaynağı olarak gücü 150 W olan bir halojen lamba, kızılötesi ışık elde etmek amacıyla rayın, kutunun dışında kalan kısmında yer almaktadır. Halojen lambayı çalıştırmak için kutunun dışında ayrı bir devre hazırlanmış ve bu devre manuel olarak 3 farklı kademede ışık şiddeti verecek şekilde anahtarlanmıştır. Halojen lambadan gelen ışık ışınları, mercek sisteminden geçirilerek ışınların homojen bir dağılımı sağlanmaktadır. Bu ışınlar daha sonra Si filtreden geçirilerek sadece kızılötesi bölgeye ait ışınların mikroboşalma hücresine ulaşması hedeflenmiştir. Kızılötesi ışınlar yarıiletken katotlu mikroboşalma hücresine ulaştıklarında burada öncelikle yarıiletken katotumuz olan Fe katkılı ($<001>$) büyüme yönelimli InP yarıiletkeni ile karşılaşırlar. InP katotun, kızılötesi ışınların geldiği tarafa bakan bölgesi yüksek vakumda evaporasyon yöntemiyle 40 nm kalınlıkta Au tabakayla kaplanmıştır. Elektriksel kontak görevi gören bu tabaka, kızılötesi ışınların kısmi geçişine (yaklaşık %10'una) izin verecek şekilde yarısaydamdır [93]. InP yarıiletkeni, 1 mm kalınlıkta ve 30 mm çapında silindirik disk şeklindedir. Yarıiletken katotlu mikroboşalma hücresinin basit bir gösterimi Şekil 6.1'de görülmektedir.



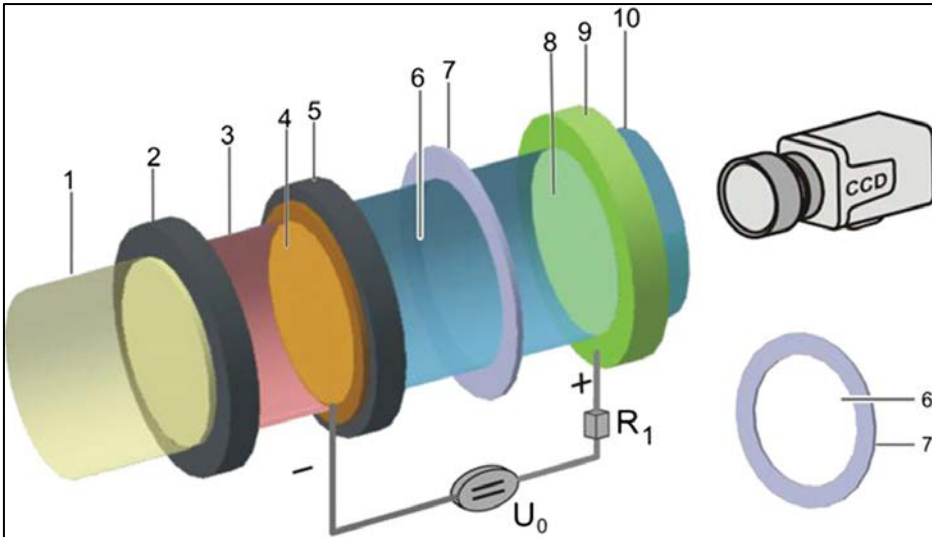
Şekil 6.1. Yarıiletken katotlu mikroboşalma hücresinin basit gösterimi

Gaz boşalma hücresinin resmi ise Resim 6.2’de görülmektedir.



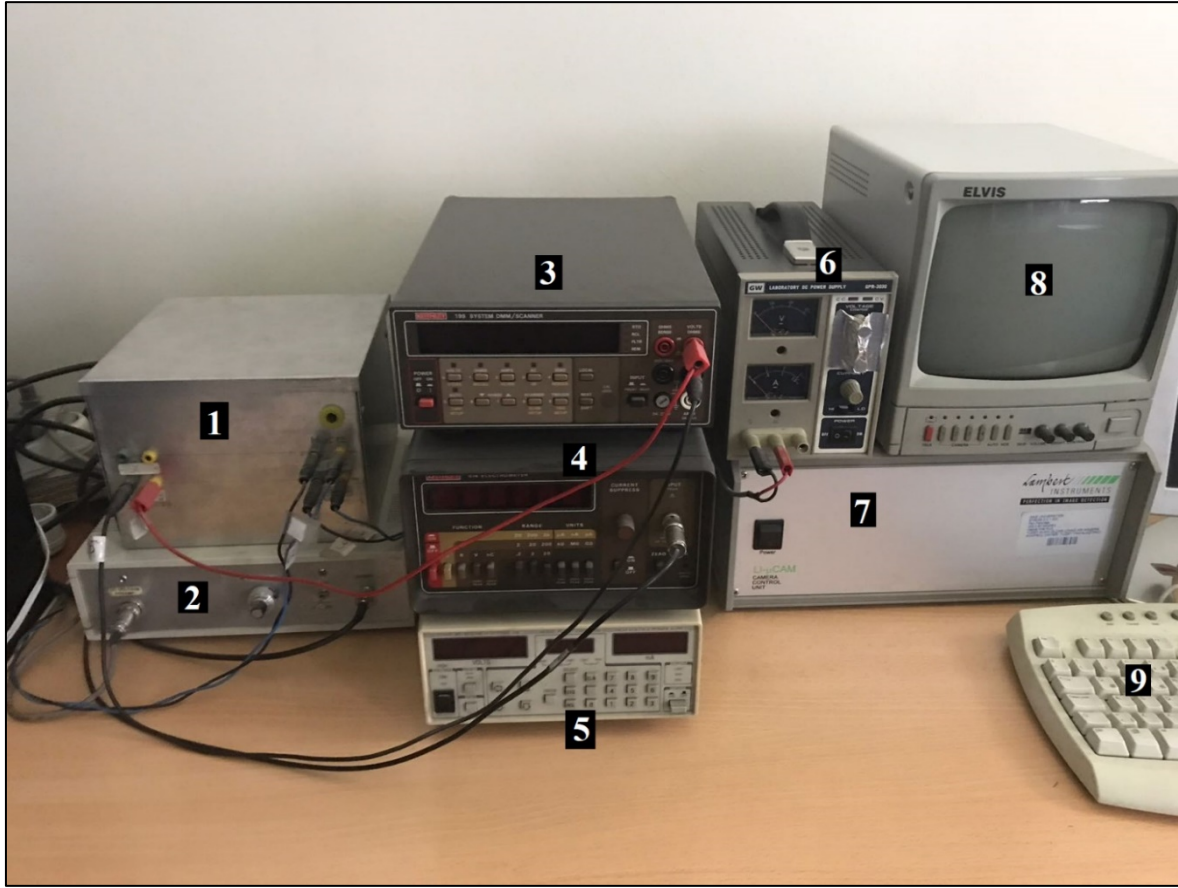
Resim 6.2. Gaz boşalma hücresi

InP yarıiletken katotun diğer yüzü gaz boşalma hücresine dönüktür. Fotokatot görevi gören bu materyalin, dışarıdan gelen kızılötesi dalgaboyundaki aydınlatmaya bağlı olarak iletkenliğinde değişiklikler meydana gelir. Kızılötesi ışıyım, valans banttaki elektronların iletim bandına geçişini sağlar ve böylece taşıyıcı miktarının artmasına katkıda bulunur. Ayrıca fotokatot malzeme boşalma hücresini yük açısından besleme görevi de görür. Deneysel sistemi içeren birimlerin bir diğer detaylı gösterimi Şekil 6.2’de görülmektedir.



Şekil 6.2. Deneysel sistemi oluşturan birimler. 1. Işık kaynağından gelen görünür ışık. 2. Si filtre. 3. Kızılötesi ışık hüzmesi. 4. Yarısaydam Au kontak. 5. Yarıiletken InP katot. 6. Gaz deşarj hücresi. 7. Yalıtkan mika malzeme. 8. UV ve görünür bölge ışıması. 9. Yarısaydam SnO₂ kontak. 10. Cam disk [29]

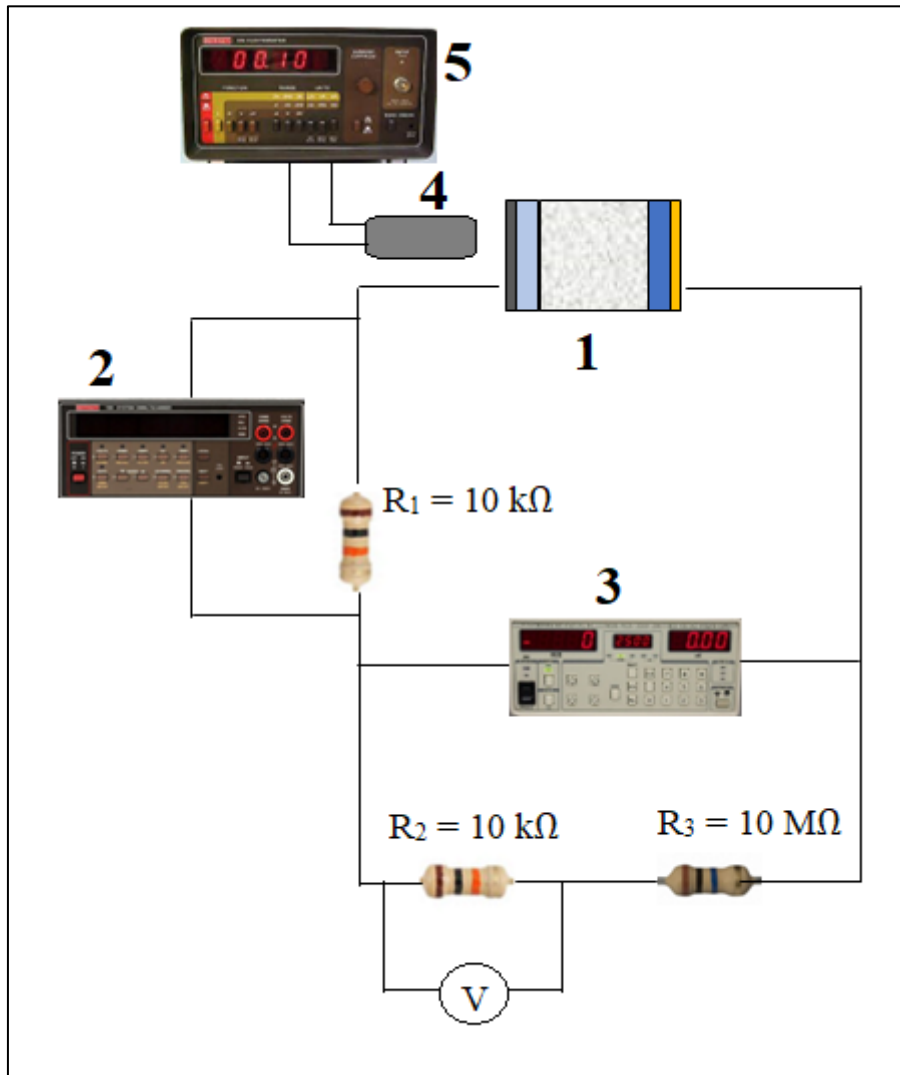
Kızılötesi ışınının yoğunluğu, halojen lambanın bağlı olduğu kademeli anahtar ile değiştirilerek ayarlanabilmektedir. Ayrıca devreye kontaklar vasıtasıyla bir elektrik alan uygulanmaktadır. Bu iki faktör,deşarj akımının değişimine ve dolayısıyla çıkan UV ve görünür bölge ışımalarının yoğunluğuna etkide bulunmaktadır. Gaz boşalma hücresindeki plazmada oluşan UV ışıma, 30 mm çapında ve 2 mm kalınlıkta SnO₂ tabakayla kaplı yarısaydam cam diskten geçerek fotoçoğaltıcıya ulaşmaktadır. Bu ışımının yoğunluğu Thorn EMI 9235 QA model fotoçoğaltıcı ile ölçülmektedir. Fotoçoğaltıcıda ölçülen ışıma yoğunluğu, Keithley 614 model dijital elektrometre ile sayısallaştırılarak bilgisayara aktarılmaktadır. Deneyde kullanılan ölçüm araçlarının diğer bir kısmı ise Resim 6.3’de görülmektedir.



Resim 6.3. Deneysel ölçüm araçlarının diğer elemanları. 1. Direnç devresini içeren kutu. 2. Fotoçoğaltıcıyı besleyen güç kaynağı. 3. Dijital multimetre. 4. Dijital elektrometre. 5. Güç kaynağı. 6. Görüntü şiddetlendiriciyi besleyen güç kaynağı. 7. CCD'nin kontrol ünitesi. 8. CCD'ye bağlı görüntü monitörü. 9. Bilgisayar

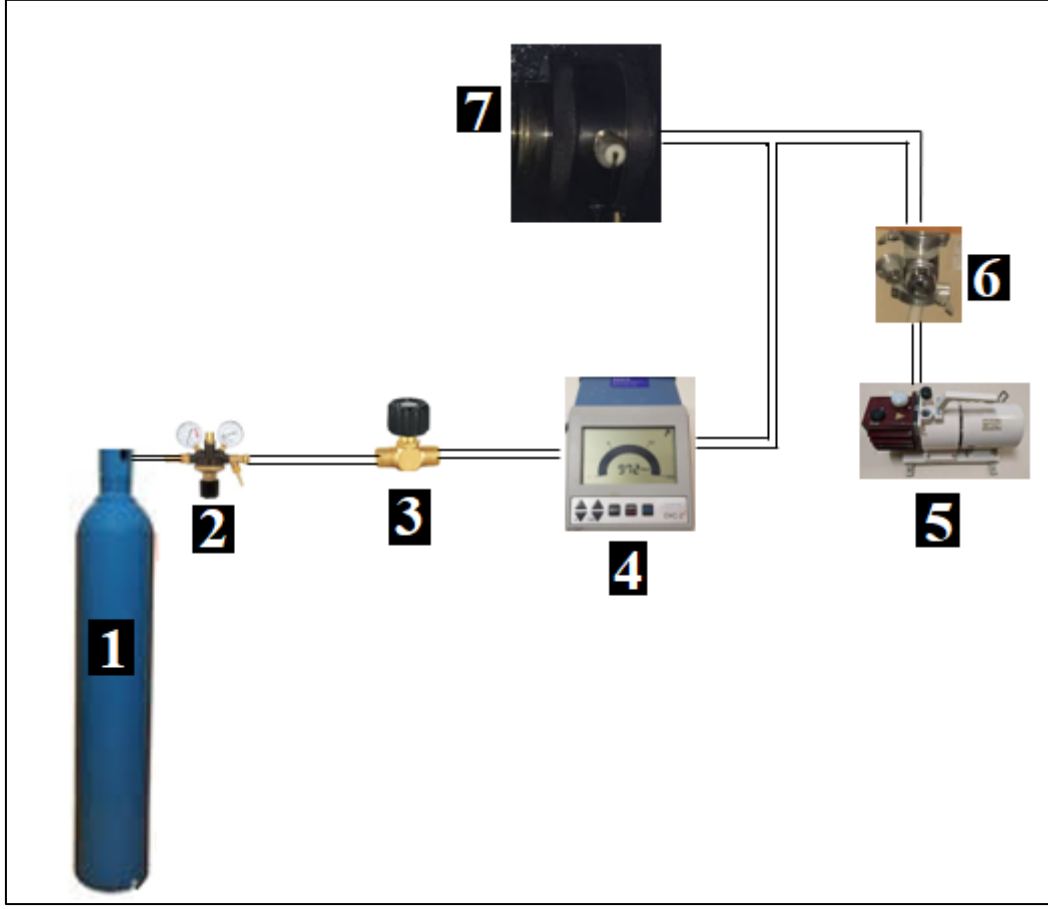
Sisteme güç sağlayan kaynağımız Stanford PS 325. 2500 V – 25 W modelidir. Bu güç

kaynağı saniyede 1 V hassasiyetle ve 2500 V değerine kadar besleme yapabilmektedir. Akım değerlerini ölçmek için ise Keithley 199 model dijital multimetre kullanılmıştır. Devrenin elektriksel şeması Şekil 6.3’de görülmektedir. Burada $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ direnci gaz boşalma hücresinin akımını sınırlar ve bunun yardımıyla gaz boşalma hücresindeki akım şiddeti dijital multimetre kullanılarak ölçülmektedir. $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ direnci üzerinden ise gaz boşalma hücresinin elektrotları arasındaki voltaj farkı ölçülmektedir.



Şekil 6.3. Yarıiletken katotlu mikroboşalma düzeneğine ait elektriksel devre. 1. Yarıiletken katotlu gaz boşalma hücresi. 2. Dijital multimetre. 3. Güç kaynağı. 4. Fotoçoğaltıcı. 5. Dijital elektrometre

Yarıiletken katotlu gaz boşalma hücresindeki gaz basıncını ayarlamak için Şekil 6.4’deki gibi basınç ayar ünitesi kurulmuştur.

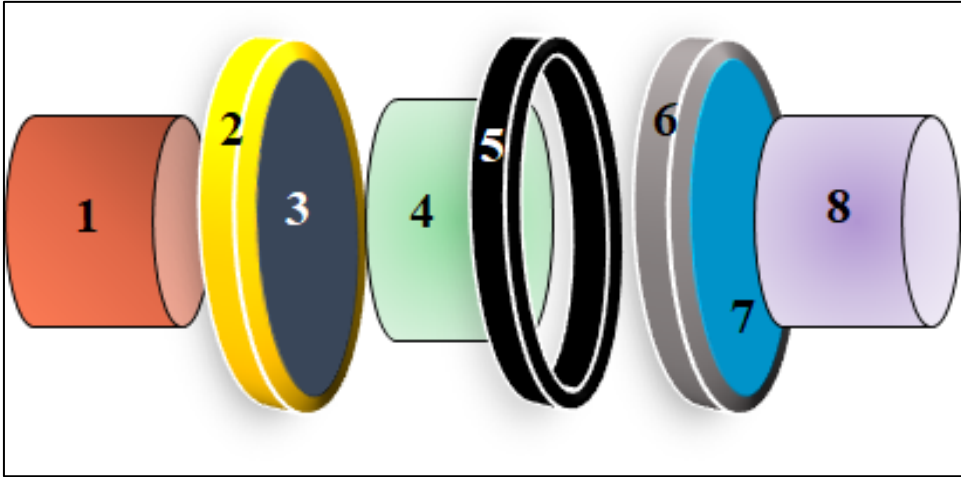


Şekil 6.4. Basınç ayar ünitesi. 1. Gaz tüpü. 2. Regülatör. 3. Gaz vanası. 4. Dijital manometre. 5. Vakum pompası. 6. Vakum vanası. 7. Gaz boşalma hücresi

Şekil 6.4’de gaz tüpünde yüksek basınçlı gaz vardır. Regülatör yardımıyla basınç uygun değerlere düşürülerek dijital manometrenin ve gaz boşalma hücresinin zarar görmesi engellenmektedir. Gaz vanası açılarak boşalma hücresinin içerisi çalışılmak istenen basınç değerine kadar gaz ile doldurulur. Bu sırada Vacuubrand CVC 2 marka dijital manometre ile gaz basıncı gözlenebilir. Boşalma hücresindeki gazı tahliye etmek için ise vakum pompası çalıştırılıp vakum vanası açılır.

6.1. Deney

Yukarıda yarıiletken katotlu mikroboşalma düzeneği açıklanmıştır. Bu düzenek aslında kızılötesi ışınları UV ışınlarına dönüştüren bir görüntü çevirici fotoalgılayıcı olarak çalıştırılabilmektedir. Görüntü çeviricinin elemanlarını gösteren şema Şekil 6.5’de görülmektedir.



Şekil 6.5. Görüntü çeviricinin elemanları. 1. Kızılötesi ışık hüzmesi. 2. Au kontak. 3. InP yarıiletkeni. 4. Gaz boşalma hücresi. 5. Yalıtkan mika yüzük. 6. SnO₂ kontak. 7. Cam disk. 8. UV ışık hüzmesi

Öncelikle boşalma hücresi kutunun içindeki raydan çıkarılarak içerisine yarıiletken katot takılır. Katot ile anot arasındaki yalıtkanlığı sağlamak için araya yalıtkan mika yüzük yerleştirilir. Bu mikanın çapı boşalma çapını (D), kalınlığı ise boşalma aralığını (d) oluşturur. Farklı çap ve kalınlıkta mika yüzükler tek tek ya da birlikte araya yerleştirilerek istenilen boşalma çapı ve aralığı oluşturulur. Hazır hale getirilen yarıiletken katotlu boşalma hücresi raydaki yerine sabitlenir. Muhafaza kutusunun kapağı kapatılır. Direnç devresinin bağlantıları kontrol edilerek güç kaynağı açılır ve devrenin beslenmesi sağlanır. Fotoçoğaltıcıyı besleyen güç kaynağı da aktif hale getirilir. Akım ve ışıma ölçümlerini yapacağımız dijital multimetre ve dijital elektrometreye güç verilir. Halojen lambayı çalıştıran dış devre 3 kademede aydınlatma yapabilmektedir. Devre kapalı olduğunda aydınlatma şiddeti K iken, devre açılarak ve kademeler değiştirilerek sırasıyla A_1 , A_2 ve A_3 aydınlatma şiddetleri elde edilebilmektedir. Güç kaynağı, saniyede 5 V gerilim artacak şekilde ve herhangi bir voltaj başlangıç değeri seçilerek çalıştırılır ve deney başlatılır. Dijital multimetre ve elektrometre üzerinde okunan akım ve ışıma değerleri bir arayüzle bilgisayarda da görülür ve kayıt altına alınır. Her bir voltaj değerine karşılık gelen akım şiddeti ve ışıma şiddeti bilgisayar tarafından MS Office Excel programı ile kayıt altına alınarak deney sonlandırıldığında veriler depolanır. Diğer bir basınç değerine geçmek için gaz vanası açılarak hücredeki basınç artırılır. Deney tekrar baştan başlatılarak ölçümler kaydedilir. Eğer daha düşük basınçlarda çalışmak gerekiyorsa da vakum pompası çalıştırılıp vakum vanası açılarak hücredeki gaz tamamen boşaltılır. Daha sonra vakum pompası ve vakum vanası kapatılır, gaz vanası yavaşça açılarak istenilen basınç değeri

ayarlanır. Boşalma çapı veya boşalma aralığını değiştirmek gerektiğinde devre tamamen kapatılır. Muhafaza kutusu açılarak boşalma hücresi raydan sökülür. İçerisindeki mika yüzükler değiştirilerek istenilen çap ve boşluk mesafesi ayarlanarak deney tekrarlanır.

Deneyde çap değerleri $D = 9$ mm, $D = 12$ mm ve $D = 18$ mm olacak şekilde değiştirilmiş ve buna uygun mika yüzükler kullanılmıştır. Elektrotlar arası mesafe ise sırasıyla $d = 50$ μ m, $d = 100$ μ m, $d = 240$ μ m, $d = 340$ μ m, $d = 440$ μ m ve $d = 525$ μ m olarak ayarlanmış ve ölçümler alınmıştır. Basınç değerleri ise 7 Torr, 12 Torr, 15 Torr, 18 Torr, 24 Torr, 28 Torr, 35 Torr, 44 Torr, 55 Torr, 66 Torr, 100 Torr, 160 Torr, 220 Torr, 290 Torr, 360 Torr, 410 Torr, 480 Torr, 550 Torr, 620 Torr, 690 Torr ve 760 Torr olarak çalışılmıştır. Ancak bazı parametrelerde bazı basınç değerleri için ölçümler yapılamamıştır. Plazma ortamı olarak tüm çap ve elektrotlara arası mesafelerde He gazı kullanılmıştır. Ek olarak $D = 12$ mm çapta ve bu çap için bütün elektrotlar arası mesafelerde hava gazı kullanılmıştır. Deneyler oda koşullarında gerçekleştirilmiştir. Gerilim 2500 V değerine yaklaşacak seviyede devre beslenmiştir. Yarıiletken katotun zarar görmemesi açısından devre akımının maksimum 10^{-4} A seviyelerine çıkmasına izin verilmiştir. MS Office Excel programında kayıt altına alınan veriler Origin 8.5.0 analiz ve çizim programıyla bilgisayar ortamında düzenlenip grafikler yorumlanmıştır.

7. FOTODEDEKTÖRÜN MİKRODEŞARJ HÜCRESİ PARAMETRELERİNE BAĞLILIĞI

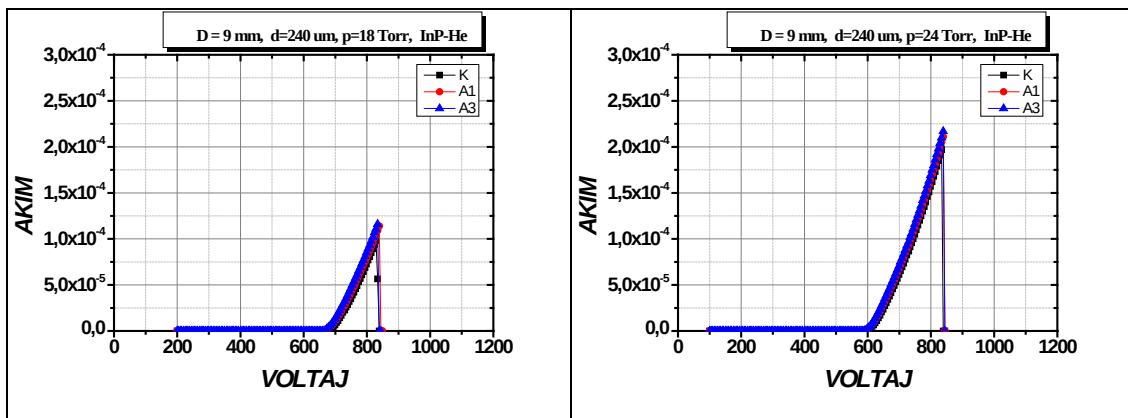
Mikrodeşarj hücresinin çalışma parametrelerindeki değişiklikler sistemin verimliliğini ve uygun çalışma aralığını belirler. Bu parametreler katotun aydınlatılma şiddeti, hücre basıncı, boşalma çapı ve boşalma aralığı (elektrotlar arası mesafe) olarak incelenmektedir. Bunların yanında mikrodeşarj hücresinde kullanılan gazın cinsi de önemlidir. $D = 12$ mm çap değeri içindeşarj gazının türünün sistem üzerindeki etkileri incelenebilmiştir.

7.1. Mikrodeşarj Hücresinin Akım – Voltaj Karakteristiklerinin İncelenmesi

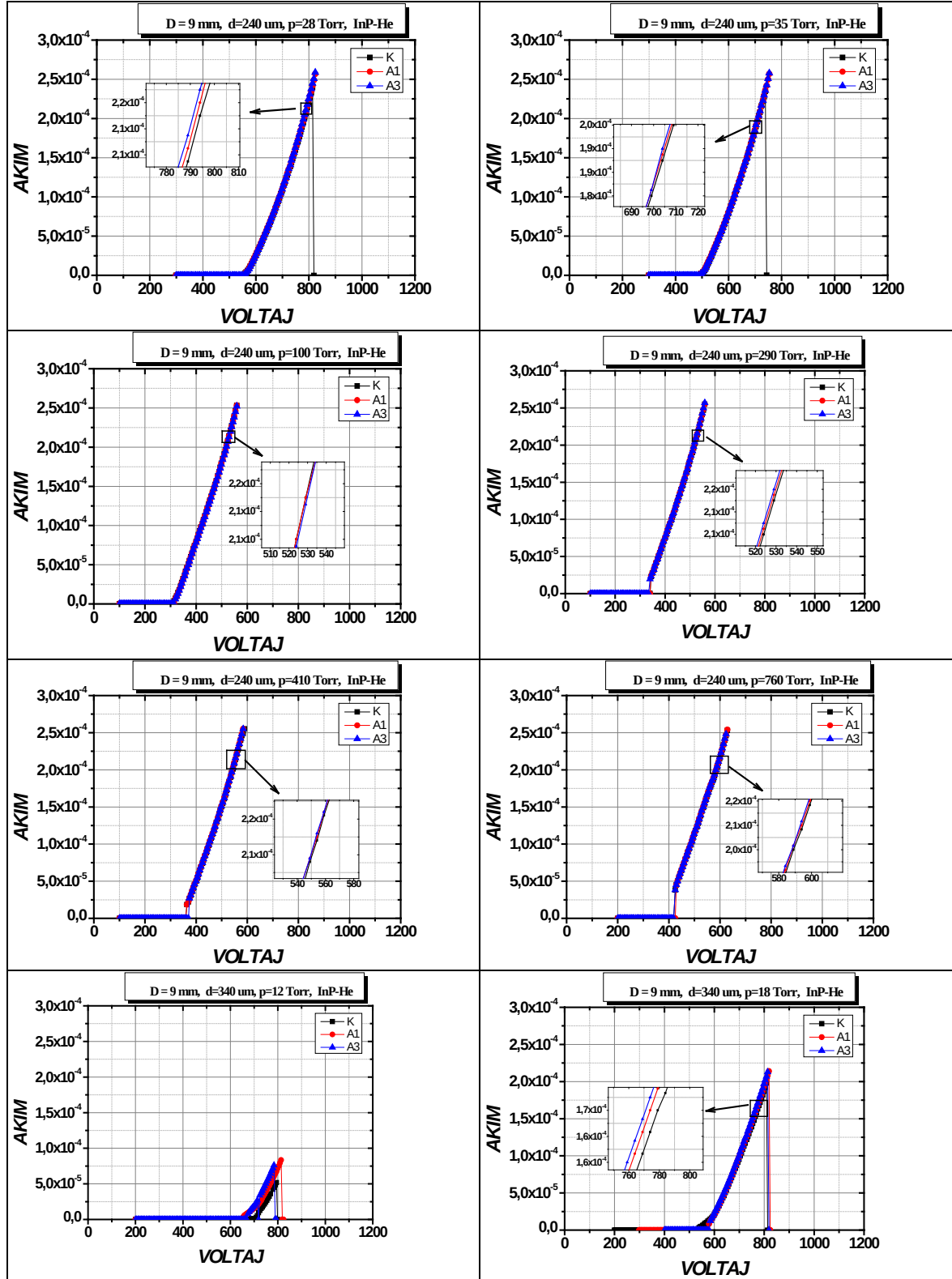
Daha önce mikrodeşarj hücresini meydana getiren bileşenlerden biri olan elektrotların sisteme nasıl entegre edildiğine değinilmiştir (Bkz. Şekil 6.3). Burada elektrotlara bir potansiyel fark uygulanarak R_1 ve R_2 dirençleri üzerinden akım ve voltaj değerleri okunup ölçümler kaydedilmiştir. Bu ölçümler, hücre parametreleri değiştirilerek tekrarlanmış ve analiz edilmiştir. Akım – voltaj karakteristiklerine etki eden hücre parametrelerinin analizlerini aşağıdaki başlıklar altında incelemek uygun olacaktır.

7.1.1. Akım – voltaj karakteristiğinin aydınlatma şiddetine bağlılığı

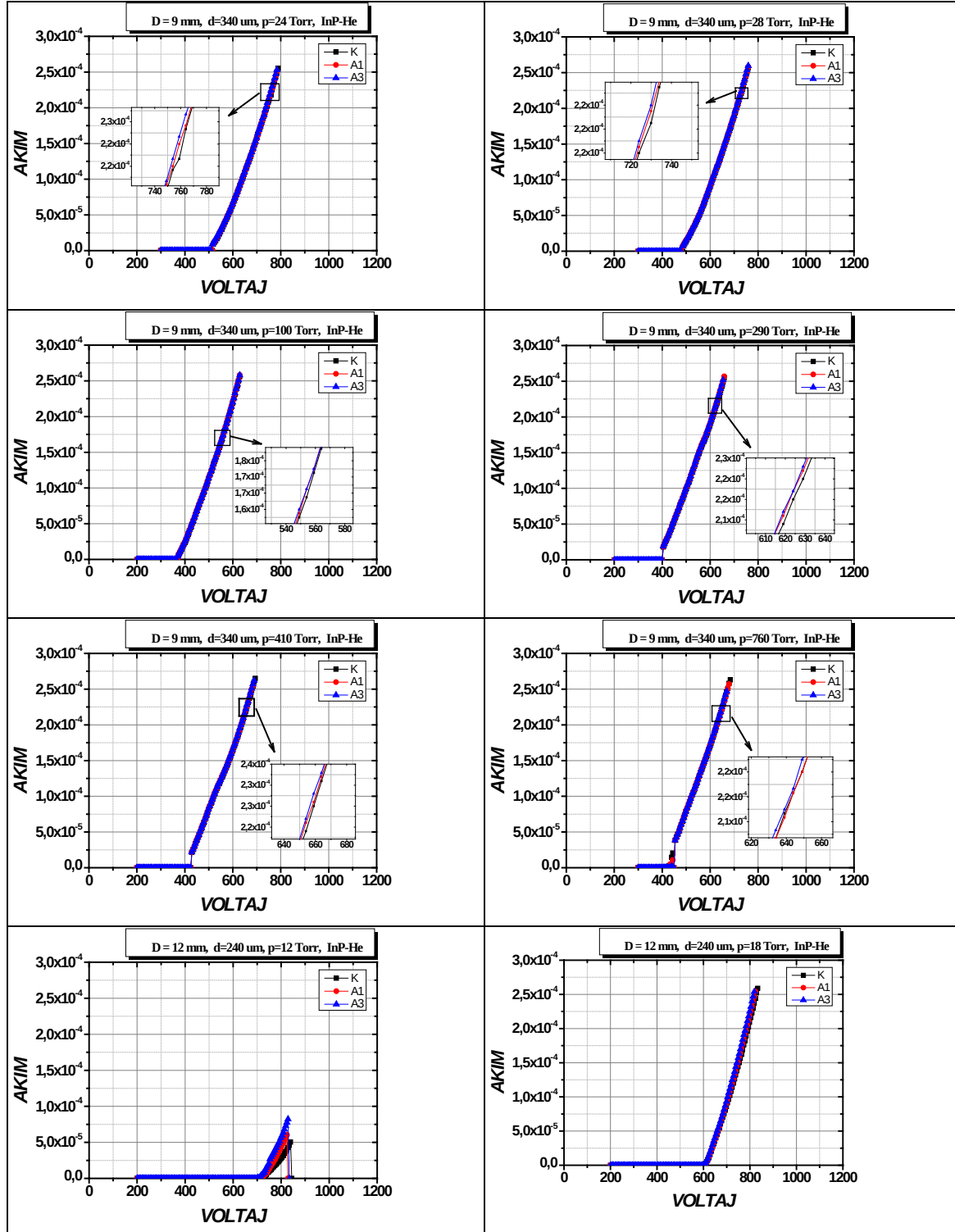
Deşarj hücresine ait akım – voltaj karakteristiklerinin aydınlatma şiddetine göre 2 boyutlu grafikleri Şekil 7.1’deki gibidir.



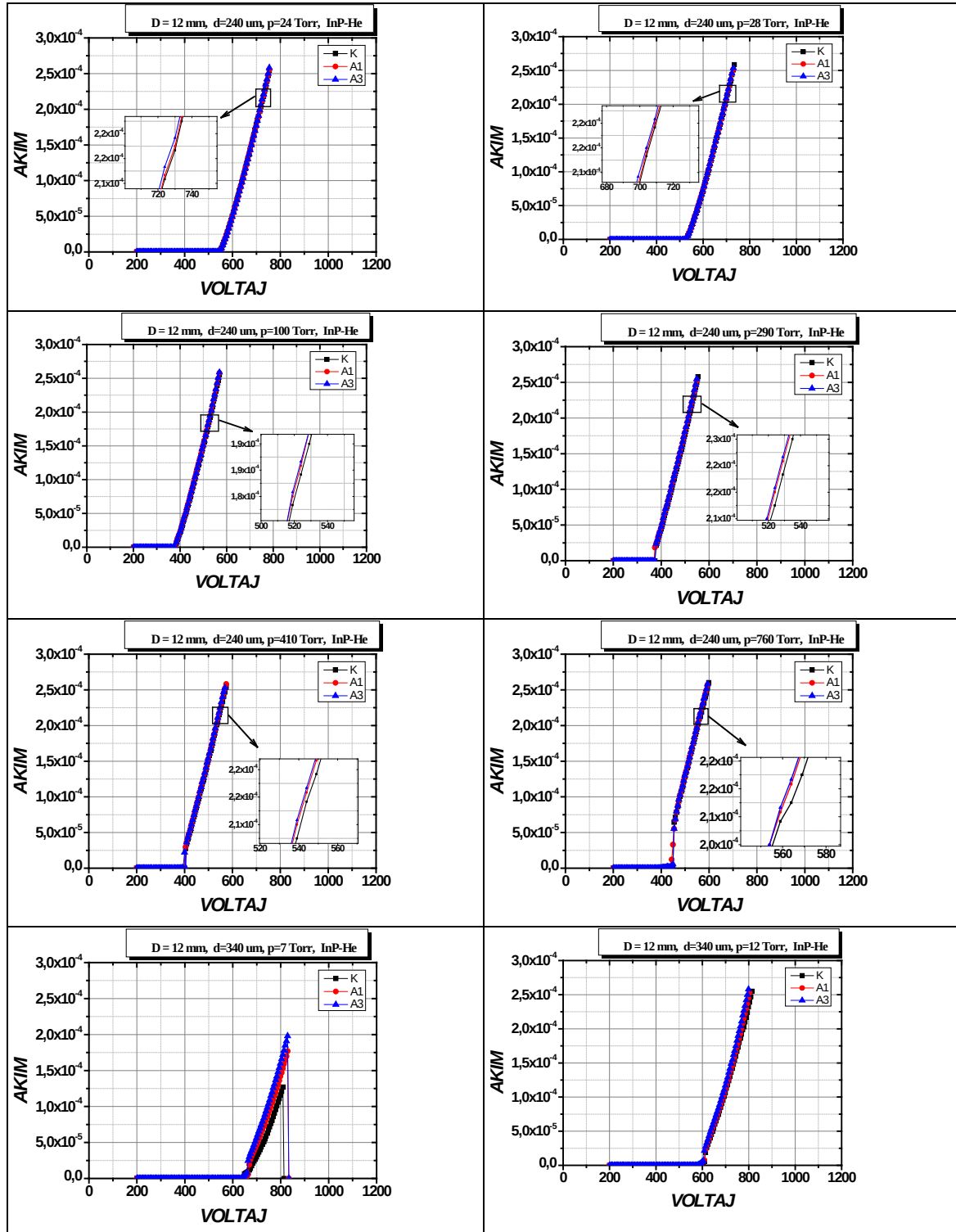
Şekil 7.1. Farklı çap değerlerinde, farklı basınçlarda, $d = 240$ μm ve $d = 340$ μm elektrotlar arası mesafelerde, farklı aydınlatma şiddetleri için iki boyutlu AVK grafikleri



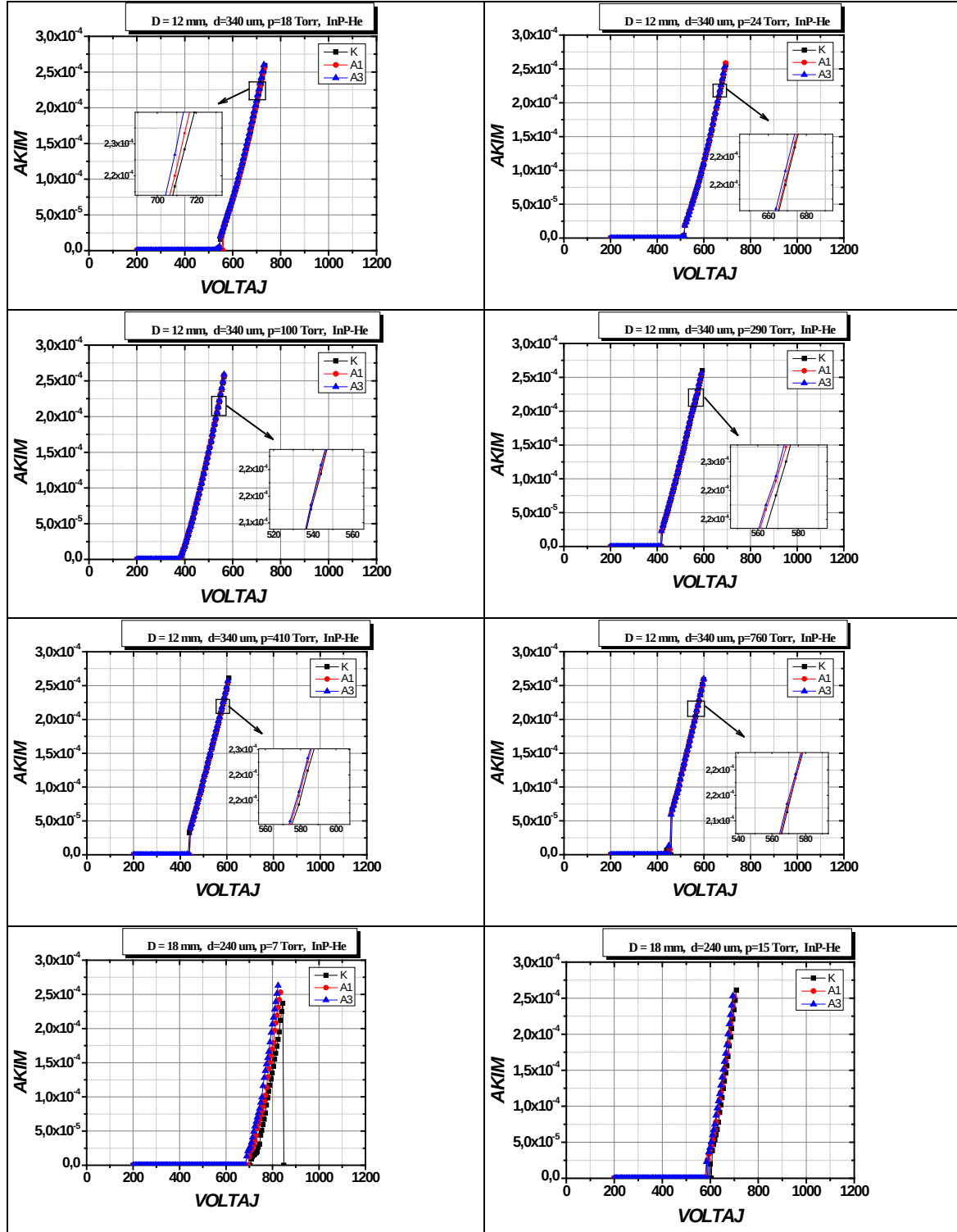
Şekil 7.1. (devam) Farklı çap değerlerinde, farklı basınçlarda, $d = 240 \mu\text{m}$ ve $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafelerde, farklı aydınlatma şiddetleri için iki boyutlu AVK grafikleri



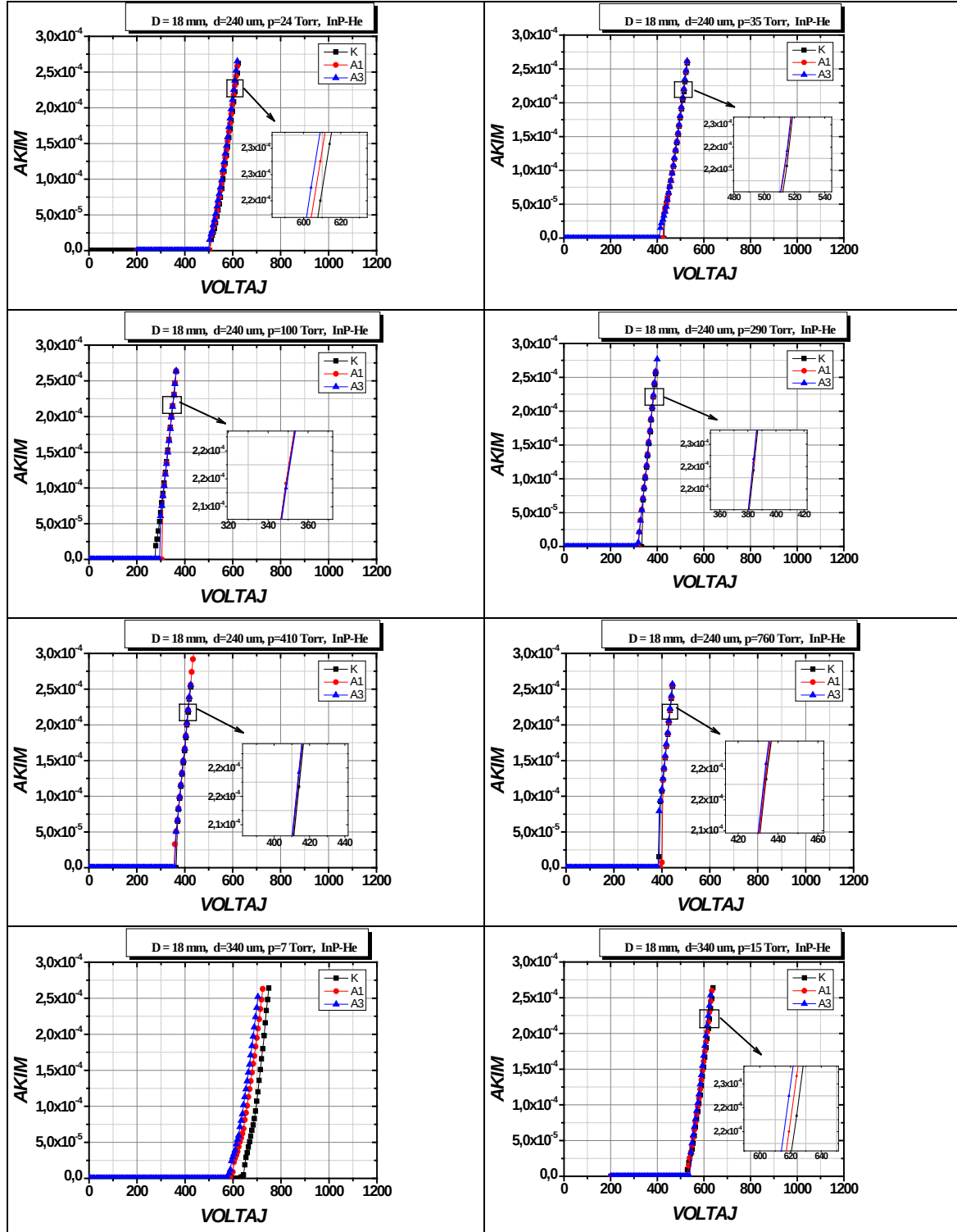
Şekil 7.1. (devam) Farklı çap değerlerinde, farklı basınçlarda, d = 240 μ m ve d = 340 μ m elektrotlar arası mesafelerde, farklı aydınlatma şiddetleri için iki boyutlu AVK grafikleri



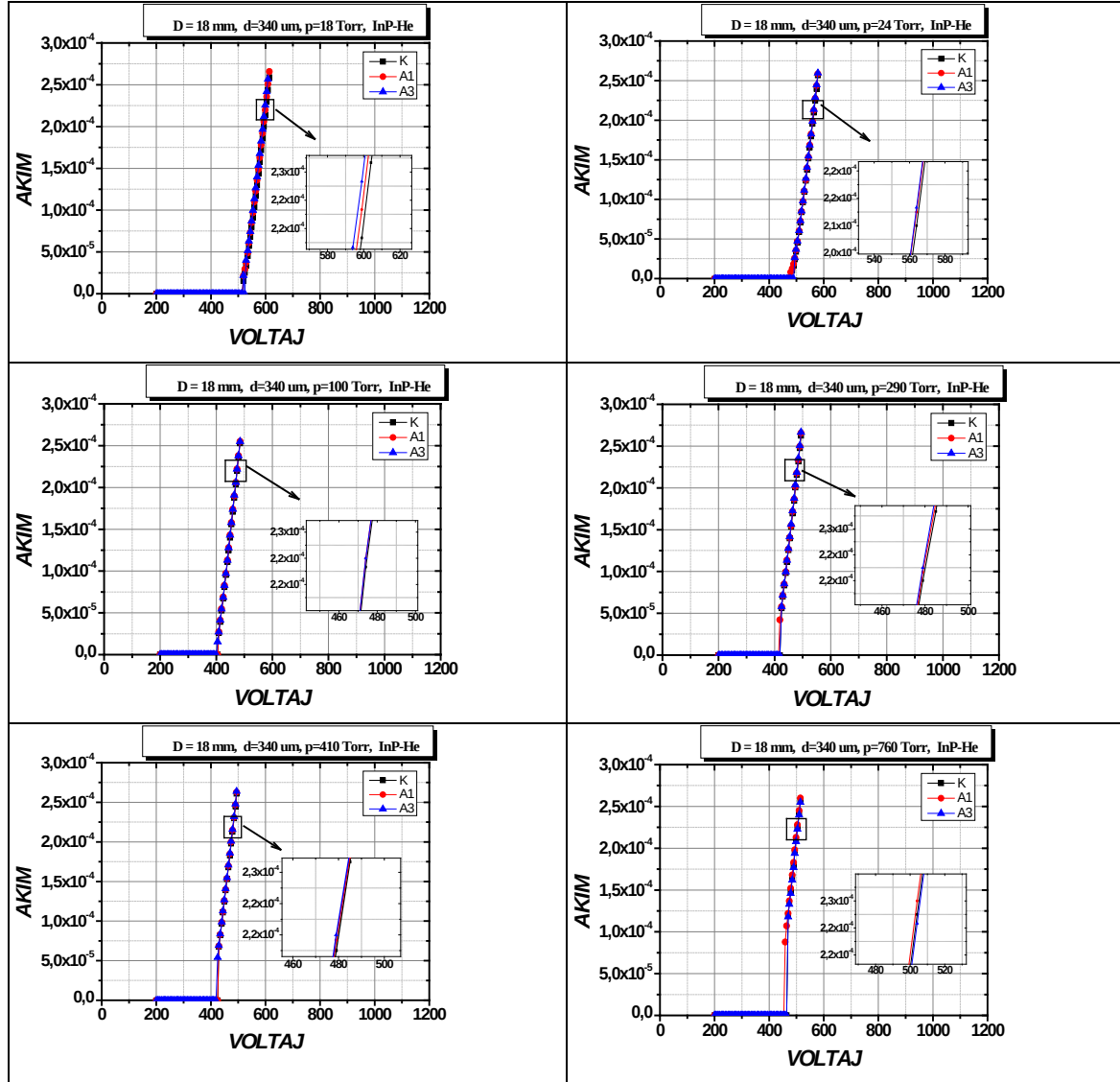
Şekil 7.1. (devam) Farklı çap değerlerinde, farklı basınçlarda, d = 240 μ m ve d = 340 μ m elektrotlar arası mesafelerde, farklı aydınlatma şiddetleri için iki boyutlu AVK grafikleri



Şekil 7.1. (devam) Farklı çap değerlerinde, farklı basınçlarda, d = 240 μ m ve d = 340 μ m elektrotlar arası mesafelerde, farklı aydınlatma şiddetleri için iki boyutlu AVK grafikleri

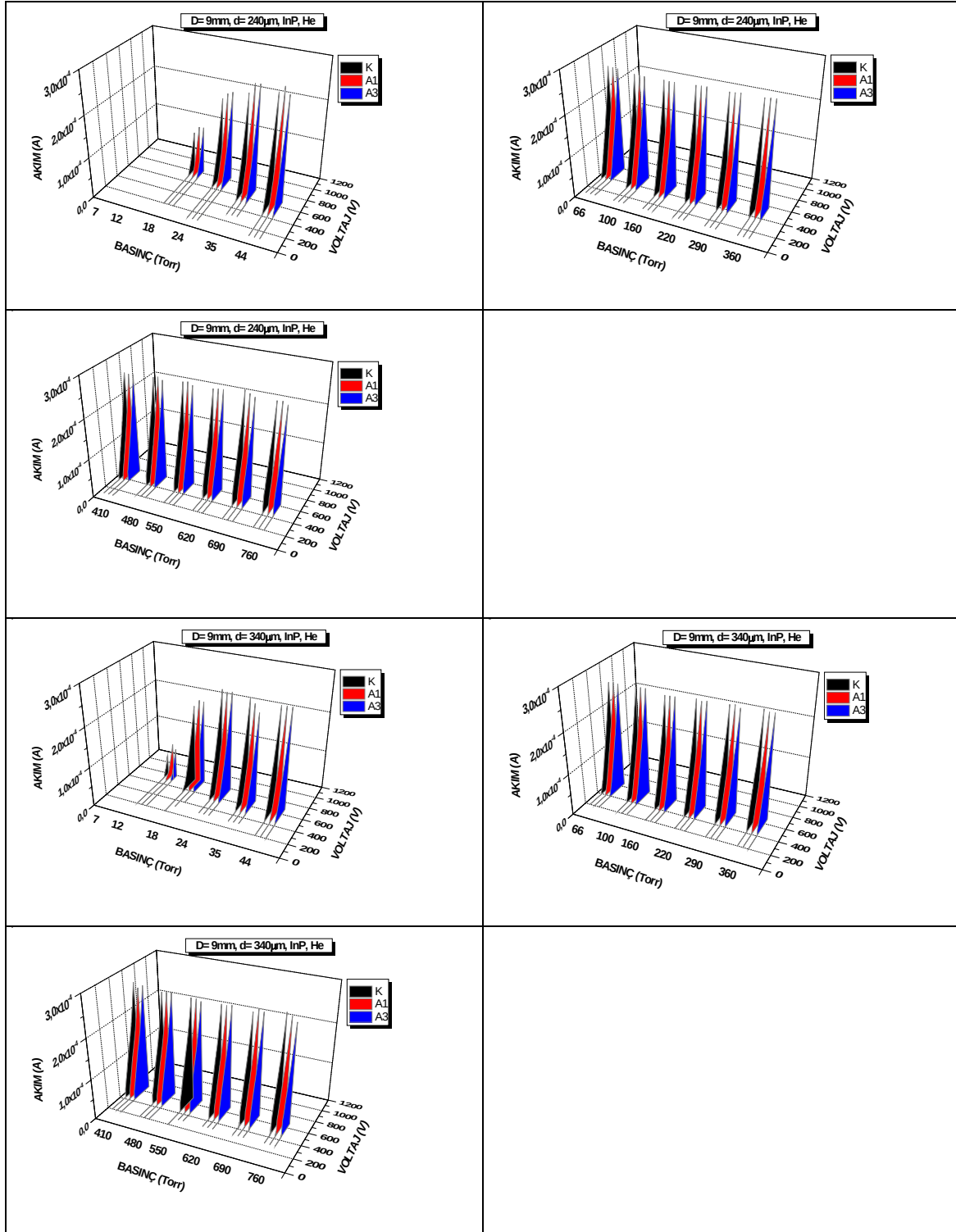


Şekil 7.1. (devam) Farklı çap değerlerinde, farklı basınçlarda, d = 240 μ m ve d = 340 μ m elektrotlar arası mesafelerde, farklı aydınlatma şiddetleri için iki boyutlu AVK grafikleri

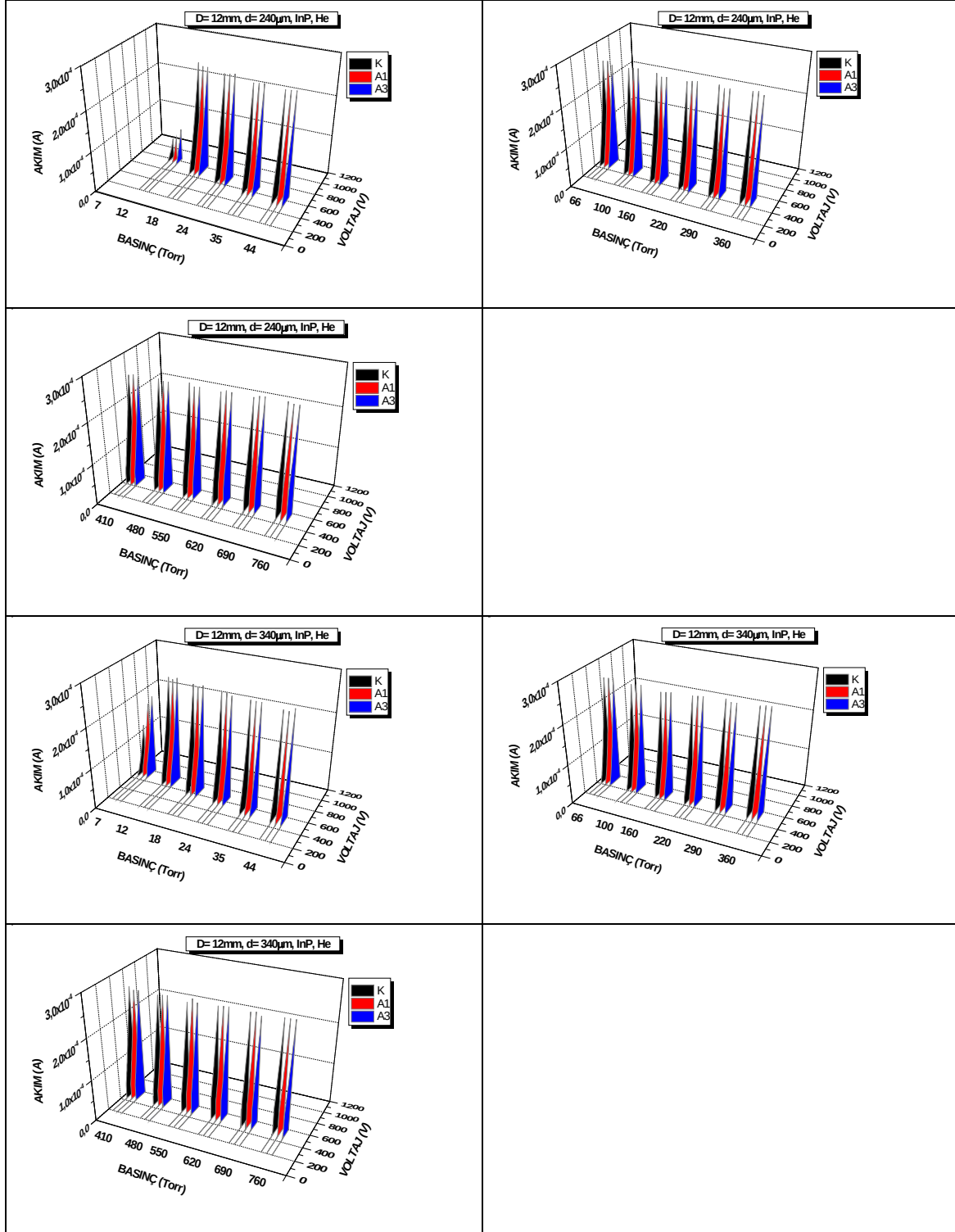


Şekil 7.1. (devam) Farklı çap değerlerinde, farklı basınçlarda, $d = 240 \text{ }\mu\text{m}$ ve $d = 340 \text{ }\mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafelerde, farklı aydınlatma şiddetleri için iki boyutlu AVK grafikleri

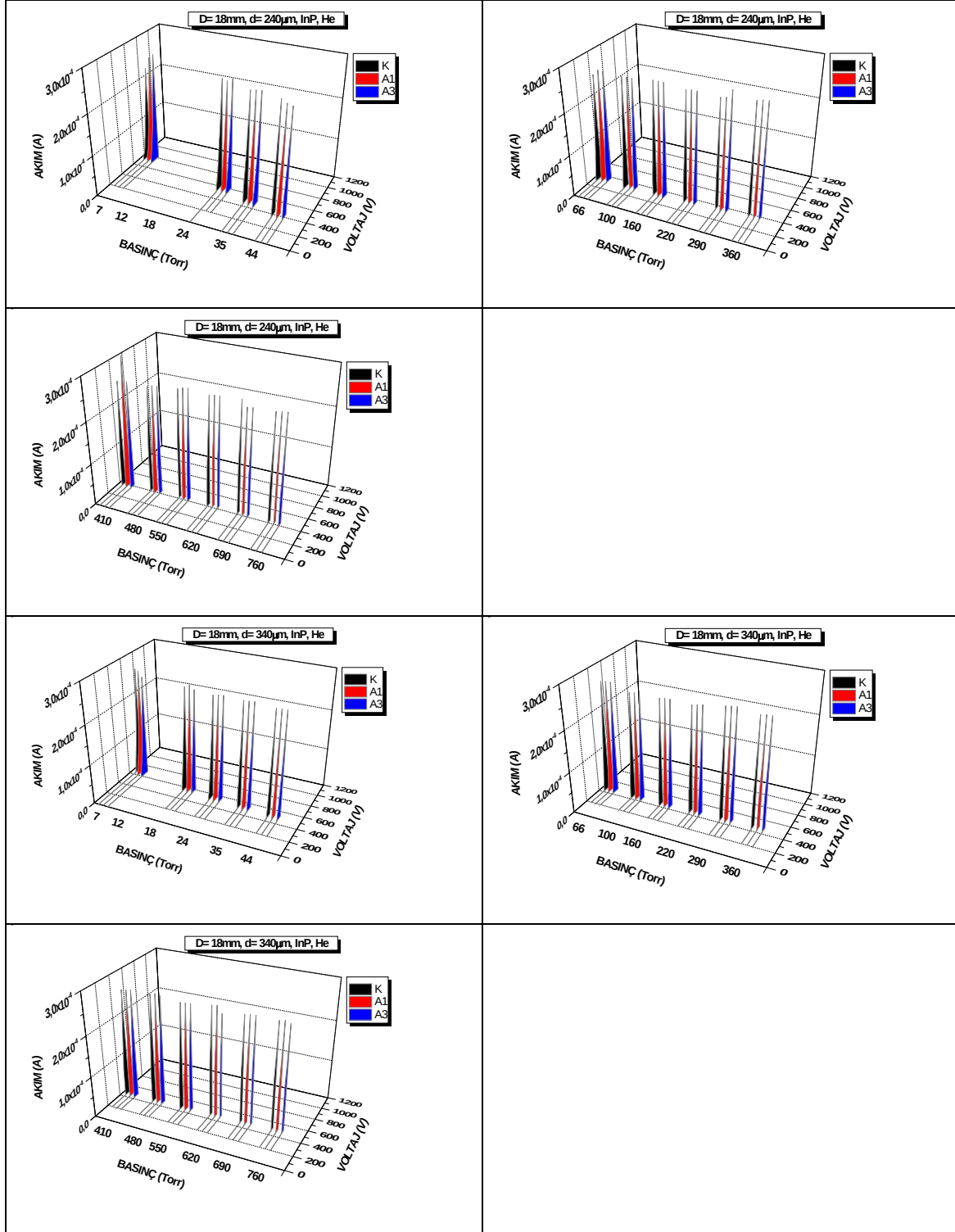
Deşarj hücresine ait akım – voltaj karakteristiklerinin aydınlatma şiddetine göre 3 boyutlu grafikleri Şekil 7.2’deki gibidir.



Şekil 7.2. Farklı ϕ değerlerinde, $d = 240 \mu\text{m}$ ve $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafelerde, farklı basınçlarda, farklı aydınlatma şiddetlerine göre üç boyutlu AVK grafikleri



Şekil 7.2. (devam) Farklı çap değerlerinde, $d = 240 \mu\text{m}$ ve $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafelerde, farklı basınçlarda, farklı aydınlatma şiddetlerine göre üç boyutlu AVK grafikleri



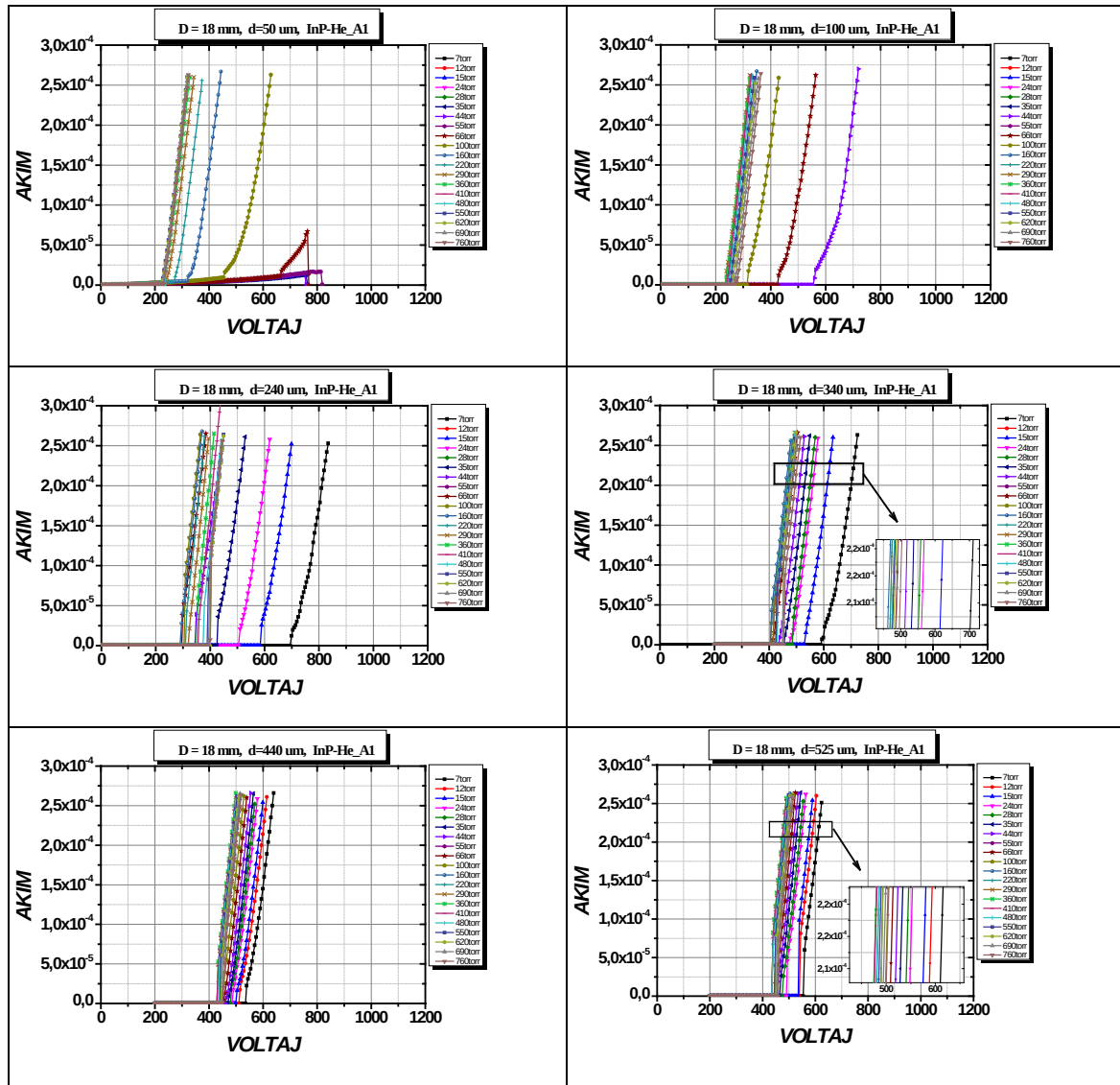
Şekil 7.2. (devam) Farklı çap değerlerinde, $d = 240 \mu\text{m}$ ve $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafelerde, farklı basınçlarda, farklı aydınlatma şiddetlerine göre üç boyutlu AVK grafikleri

Yukarıdaki grafiklerde $D = 9 \text{ mm}$, $D = 12 \text{ mm}$ ve $D = 18 \text{ mm}$ çaplar için $d = 240 \mu\text{m}$ ve $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafeler için düşük basınçlarda ve nispeten yüksek basınçlarda bazı ölçüm değerleri görülmektedir. Düşük basınçlarda kızılötesi aydınlatmaya bağımlılık daha

net görülmektedir. Düşük basınçlarda katot etkili ikincil elektron salınımı ve katot malzemesinden plazma ortamına elektronların geçişi ile ışığa duyarlılığın arttığı görülmektedir. Özellikle 35 Torr basınç değerlerinden sonra farklı aydınlatma şiddetlerine göre grafiklerde ayrılmalar olsa da düşük basınçlardaki kadar belirgin değildir.

7.1.2. Akım – voltaj karakteristiğinin hücre basıncına bağlılığı

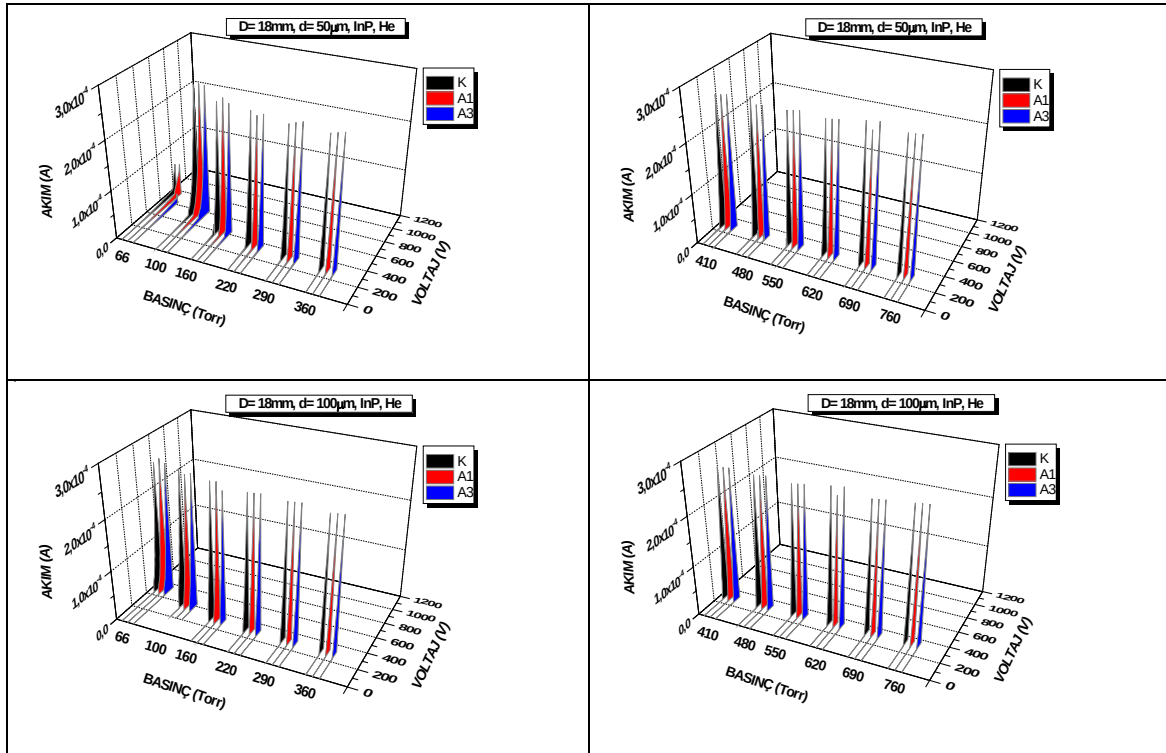
Deşarj hücresine ait akım – voltaj karakteristiklerinin basınca göre 2 boyutlu grafikleri Şekil 7.3’deki gibidir.



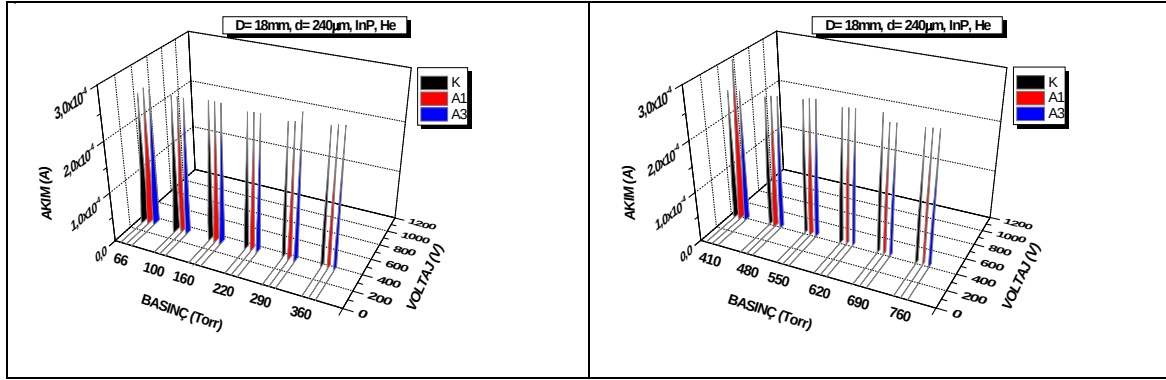
Şekil 7.3. D = 18 mm çap değerinde A₁ aydınlatma şiddetinde 50 μm, 100 μm, 240 μm, 340 μm, 440 μm, 525 μm elektrotlar arası mesafe için basınca bağlı iki boyutlu AVK grafikleri

Şekil 7.3’deki grafiklerde farklı basınçlara ait AVK eğrilerinin küçük elektrotlar arası mesafelerde daha geniş bir voltaj aralığına dağılmışken, elektrotlar arası mesafenin artmasıyla daha dar voltaj aralıklarına sıkıştığı görülmektedir. Küçük basınçlarda bu eğriler artan basınç değerleriyle birlikte daha düşük voltaj değerlerine kayarken, basıncın belirli bir değerden sonra artmasıyla eğriler daha yüksek voltajlara kaymaktadırlar. Yani küçük basınçlar için artan basınçla devre akımının arttığı, yüksek basınçlarda ise artan basınçla birlikte devre akımının azaldığı görülebilmektedir. Örneğin $D = 18$ mm çap, $d = 340$ μm elektrotlar arası mesafe için $p = 160$ Torr basınç kritik basınçtır. Yani bu basınç değerine kadar artan basınçla birlikte akımın arttığı görülmektedir. Bu basınç değerinden sonra ise artan basınçla birlikte akımın azaldığı görülmektedir. Yine $D = 18$ mm ve $d = 525$ μm değerleri için de kritik basınç değerinin $p = 360$ Torr olduğu görülmektedir.

Deşarj hücresine ait akım – voltaj karakteristiklerinin basınca göre 3 boyutlu grafikleri Şekil 7.4’deki gibidir.



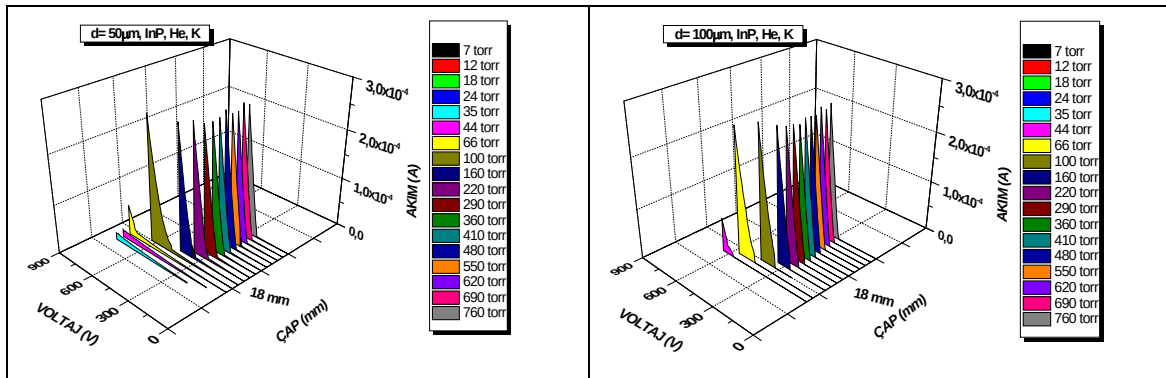
Şekil 7.4. $D = 18$ mm çap değerinde, $d = 50 \mu\text{m}$, $d = 100 \mu\text{m}$ ve $d = 240 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede, farklı basınç değerleri için aydınlatma şiddetine göre üç boyutlu AVK grafikleri



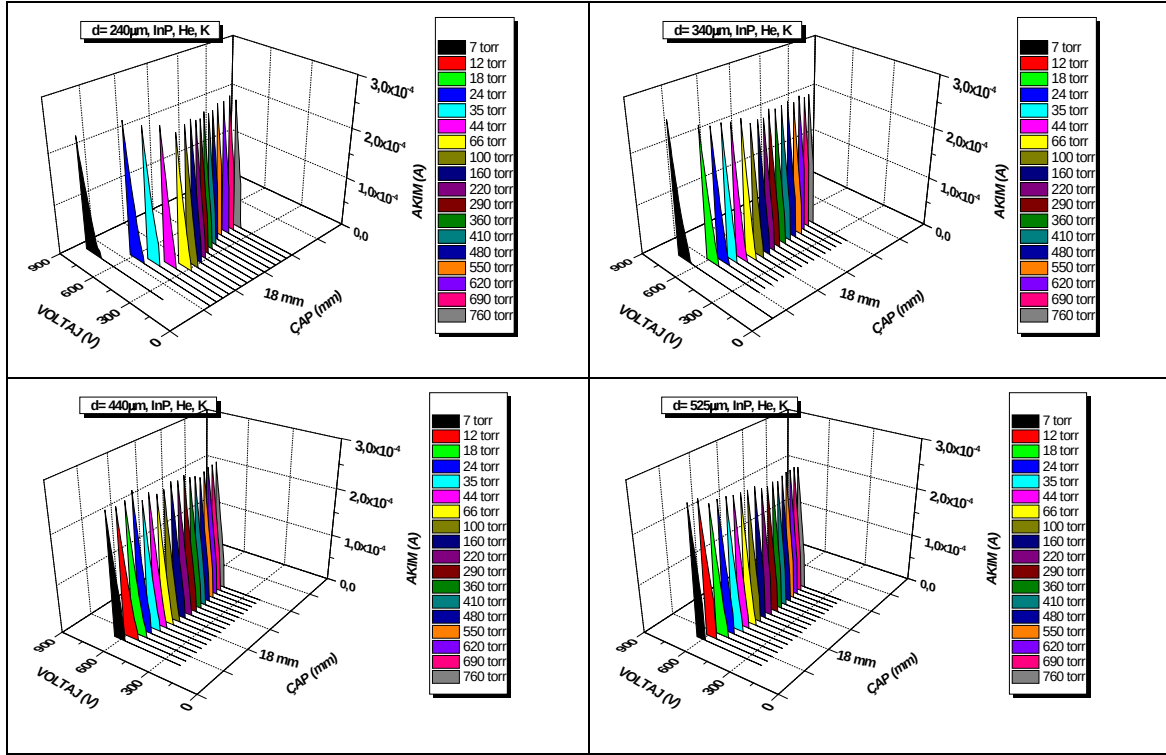
Şekil 7.4. (devam) $D = 18$ mm çap değerinde, $d = 50$ μm , $d = 100$ μm ve $d = 240$ μm elektrotlar arası mesafede, farklı basınç değerleri için aydınlatma şiddetine göre üç boyutlu AVK grafikleri

Şekil 7.4’de $D = 18$ mm çap değerinde, $d = 50$ μm , $d = 100$ μm ve $d = 240$ μm elektrotlar arası mesafede, farklı basınç değerleri için aydınlatma şiddetine göre üç boyutlu AVK grafikleri verilmiştir. Grafikler incelendiğinde yığın eğrilerin basıncın belirli bir kritik değerine kadar öne (düşük voltajlara) doğru geldiği, basıncın bu kritik değerinden sonra arkaya (yüksek voltajlara) doğru gerilediği görülmektedir. Kritik basınç değerleri $d = 50$ μm için $p = 360$ Torr; $d = 100$ μm için $p = 160$ Torr; $d = 240$ μm için ise $p = 100$ Torr olarak gözlenmektedir.

Deşarj hücresine ait akım – voltaj karakteristiklerinin $D = 18$ mm sabit çap değerinde basınca göre 3 boyutlu grafikleri Şekil 7.5’deki gibidir.



Şekil 7.5. Aydınlatma şiddeti K altında, $D = 18$ mm çap için, farklı elektrotlar arası mesafede, basınca göre üç boyutlu AVK grafikleri

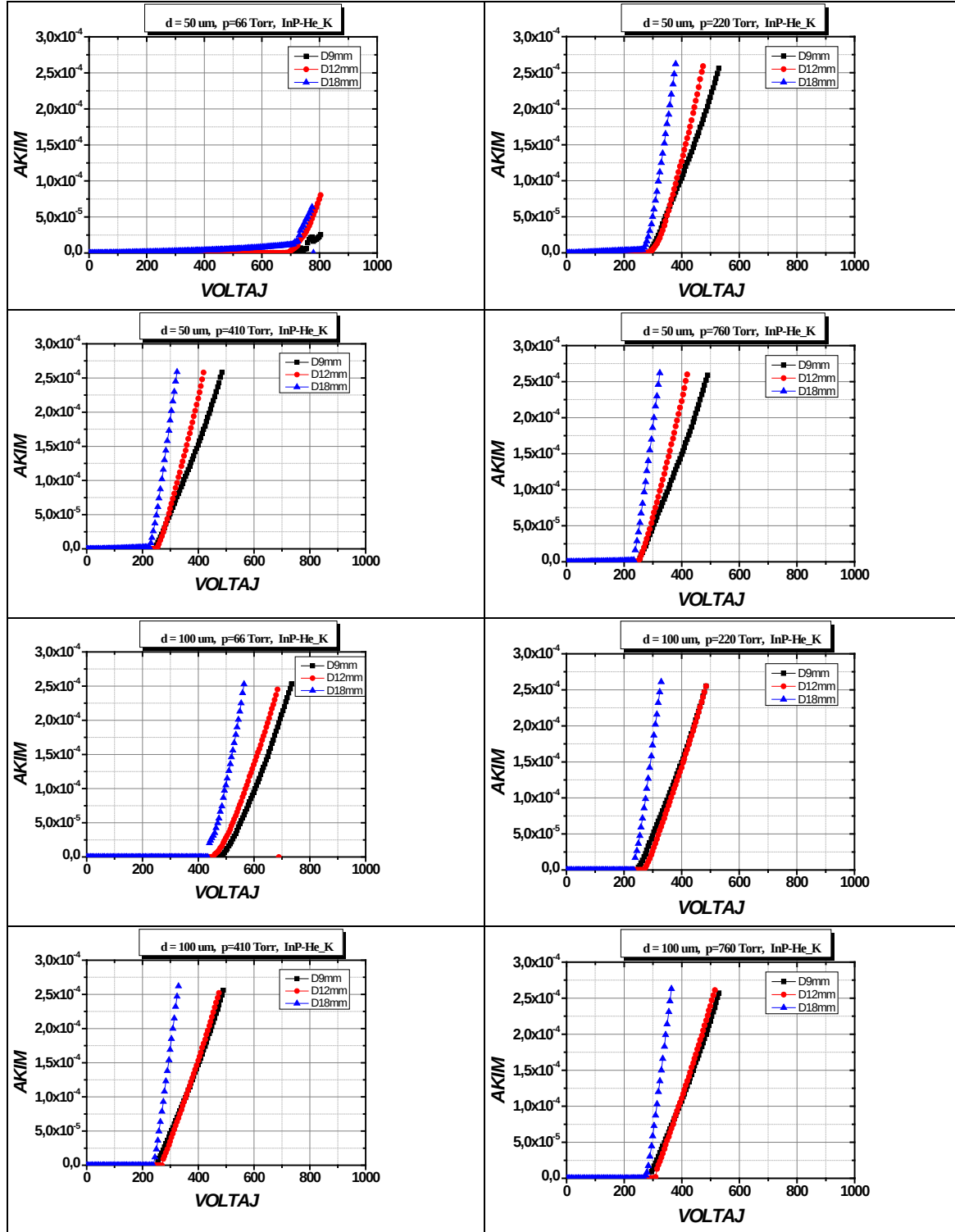


Şekil 7.5. (devam) Aydınlatma şiddeti K altında, D = 18 mm çap için, farklı elektrotlar arası mesafede, basınca göre üç boyutlu AVK grafikleri

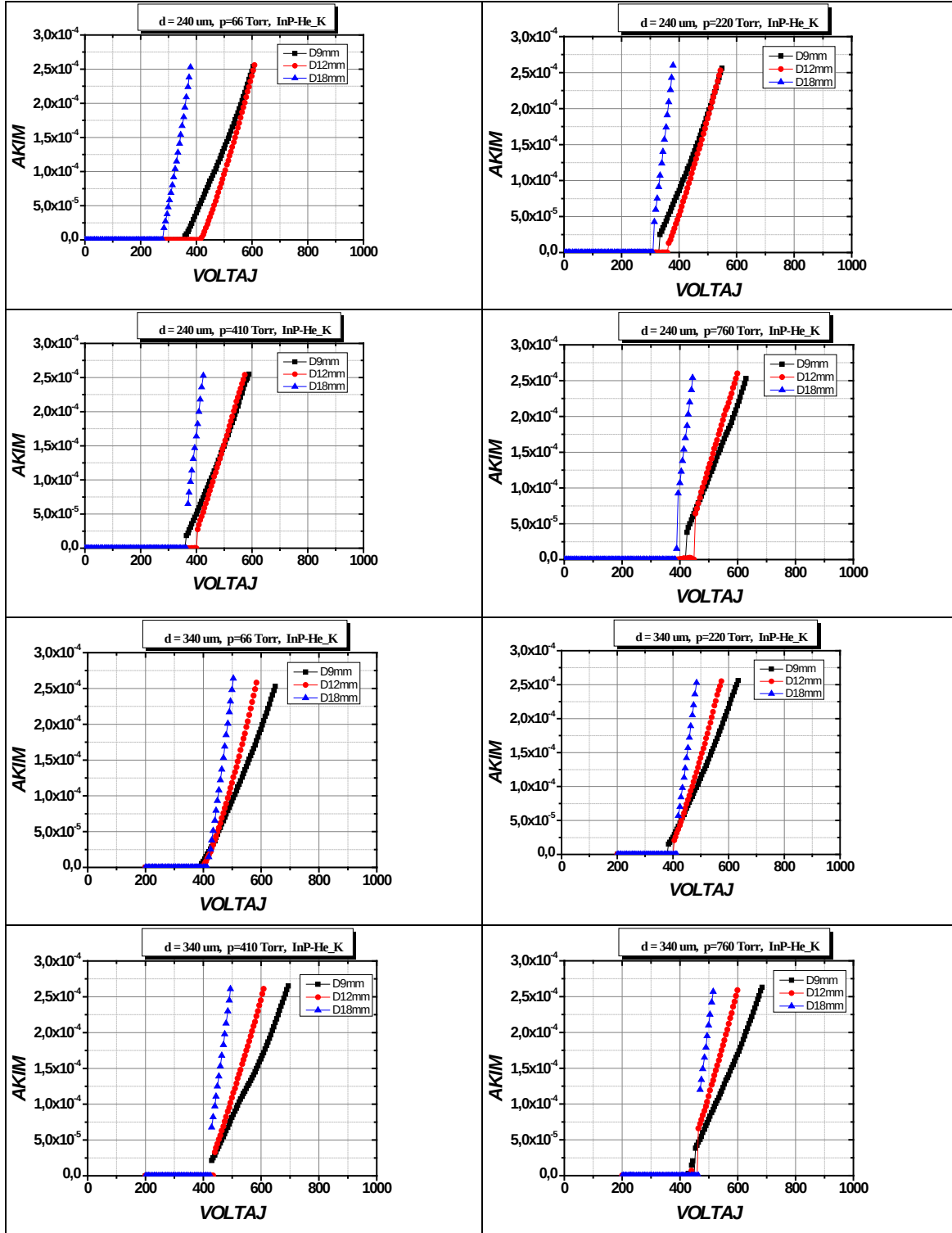
Şekil 7.5’de D = 18 mm çap ve aydınlatma şiddeti K için, farklı elektrotlar arası mesafelerde basınca göre üç boyutlu AVK grafikleri görülmektedir. Grafiklerden basıncın belirli bir değerine kadar eğrilerin ön tarafa (düşük voltajlara) doğru hareket ettiği, basıncın bu kritik değerinden sonra ise geriye (yüksek voltajlara) doğru hareket ettiği görülmektedir. Elektrotlar arası mesafe $d = 340 \mu\text{m}$ değerine kadar $p = 66$ Torr değerinden küçük nispeten düşük basınç eğrilerinin yüksek voltajlar yönünde dağınık olarak dizildiği, elektrotlar arası mesafenin $d = 340 \mu\text{m}$ değerinden büyük olduğu durumlarda ise eğrilerin birbirlerine yakın olarak dizildiği görülmektedir. Ayrıca elektrotlar arası mesafe arttıkça grafiklerdeki yığın eğrilerin geriye (yüksek voltajlara) doğru kaydığı da görülmektedir.

7.1.3. Akım – voltaj karakteristiğinin boşalma çapına bağlılığı

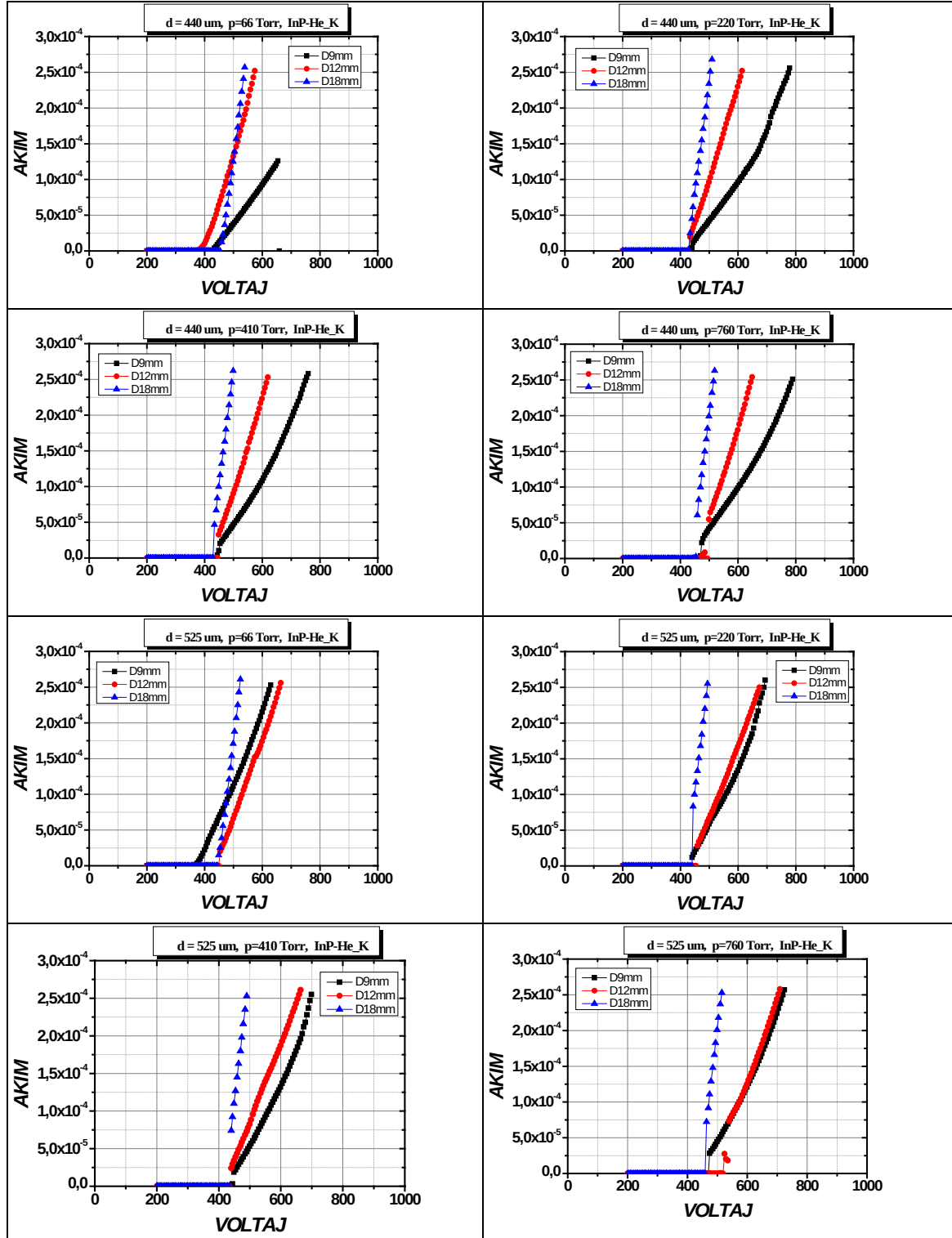
Deşarj hücresine ait akım – voltaj karakteristiklerinin boşalma çapına göre 2 boyutlu grafikleri Şekil 7.6’daki gibidir.



Şekil 7.6. Aydınlatma şiddeti K altında, farklı elektrotlar arası mesafelerde, $p = 66$ Torr, $p = 220$ Torr, $p = 410$ Torr ve $p = 760$ Torr basınç değerlerinde farklı çap değerlerine göre iki boyutlu AVK grafikleri

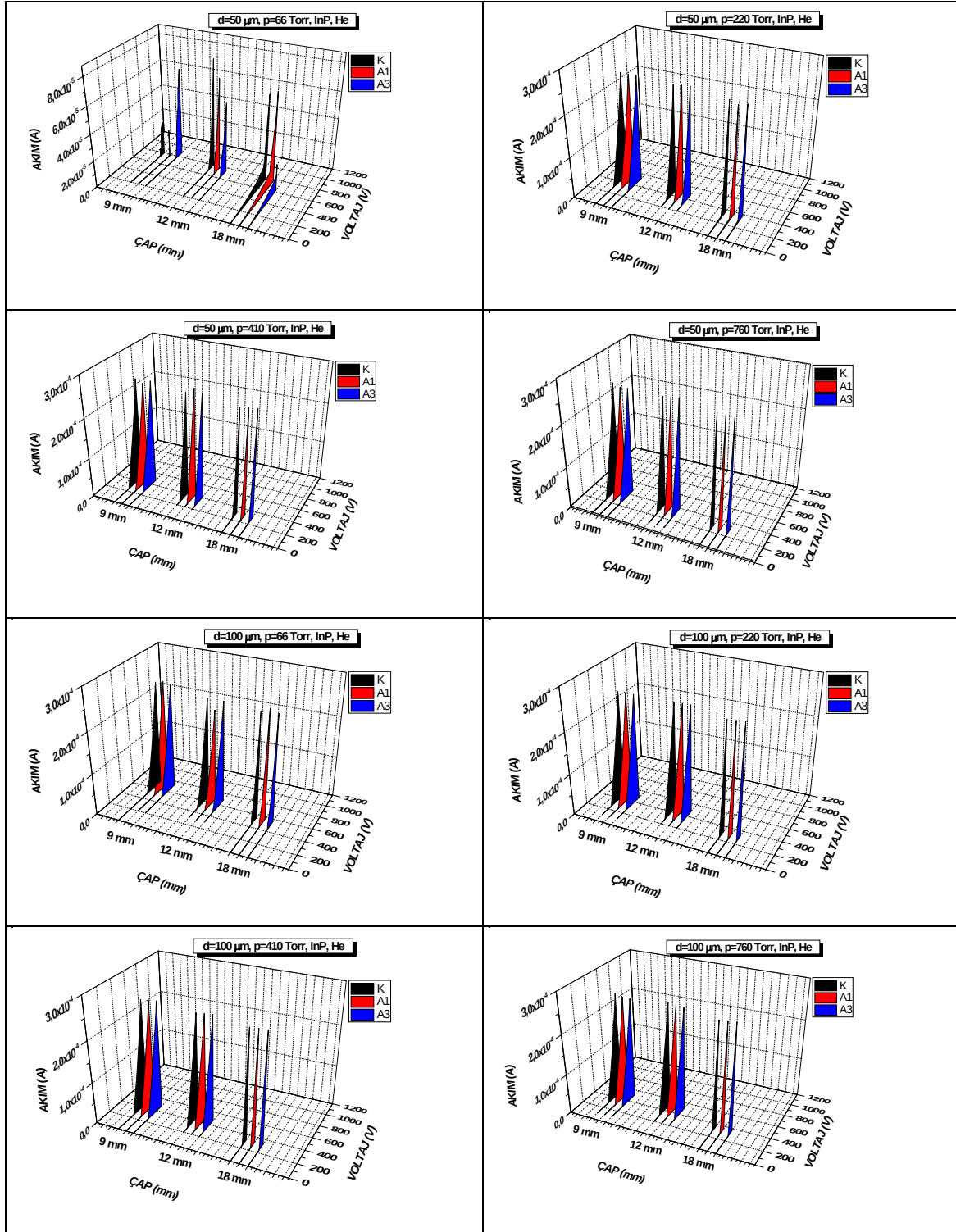


Şekil 7.6. (devam) Aydınlatma şiddeti K altında, farklı elektrotlar arası mesafelerde, p = 66 Torr, p = 220 Torr, p = 410 Torr ve p = 760 Torr basınç değerlerinde farklı çap değerlerine göre iki boyutlu AVK grafikleri

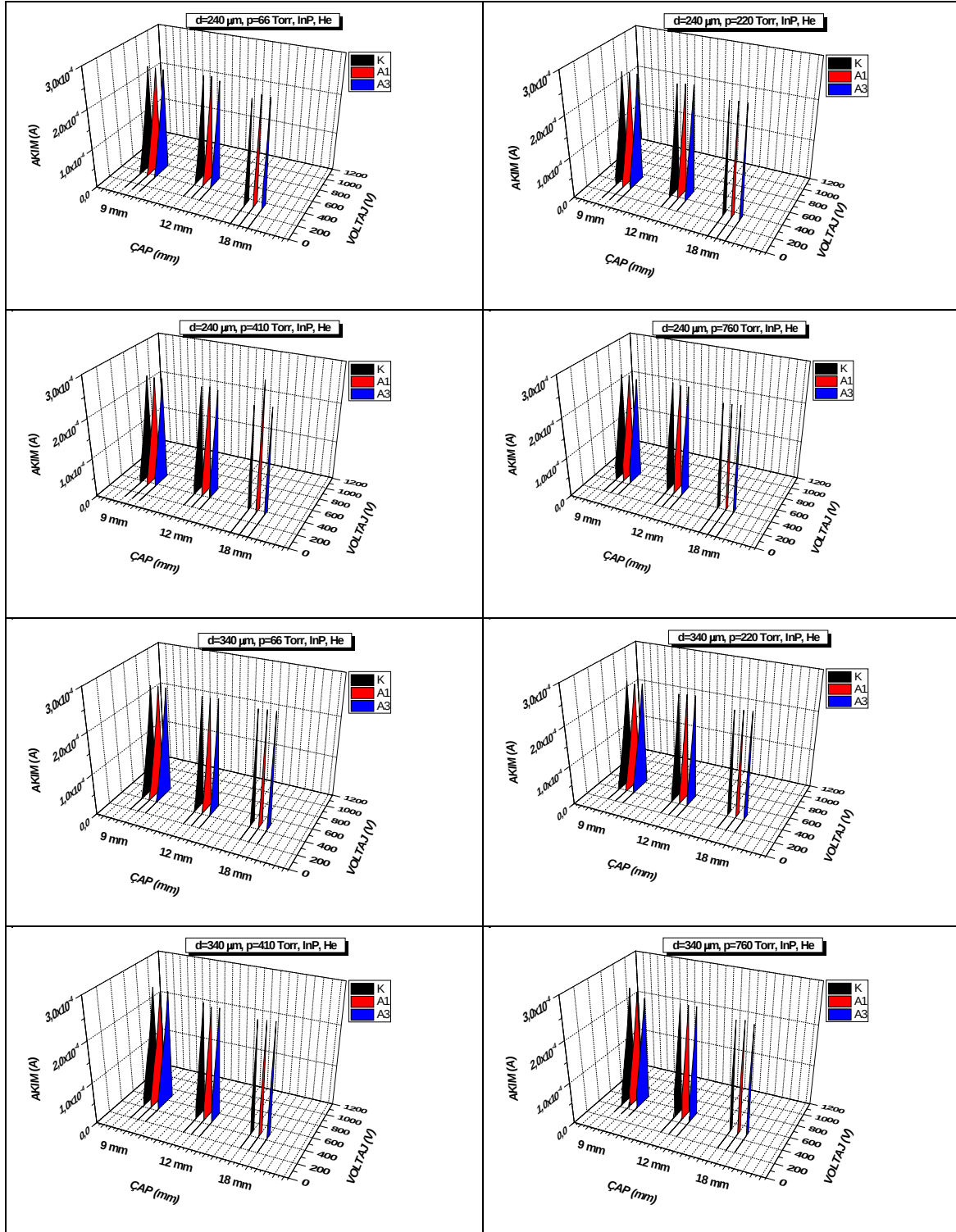


Şekil 7.6. (devam) Aydınlatma şiddeti K altında, farklı elektrotlar arası mesafelerde, $p = 66$ Torr, $p = 220$ Torr, $p = 410$ Torr ve $p = 760$ Torr basınç değerlerinde farklı çap değerlerine göre iki boyutlu AVK grafikleri

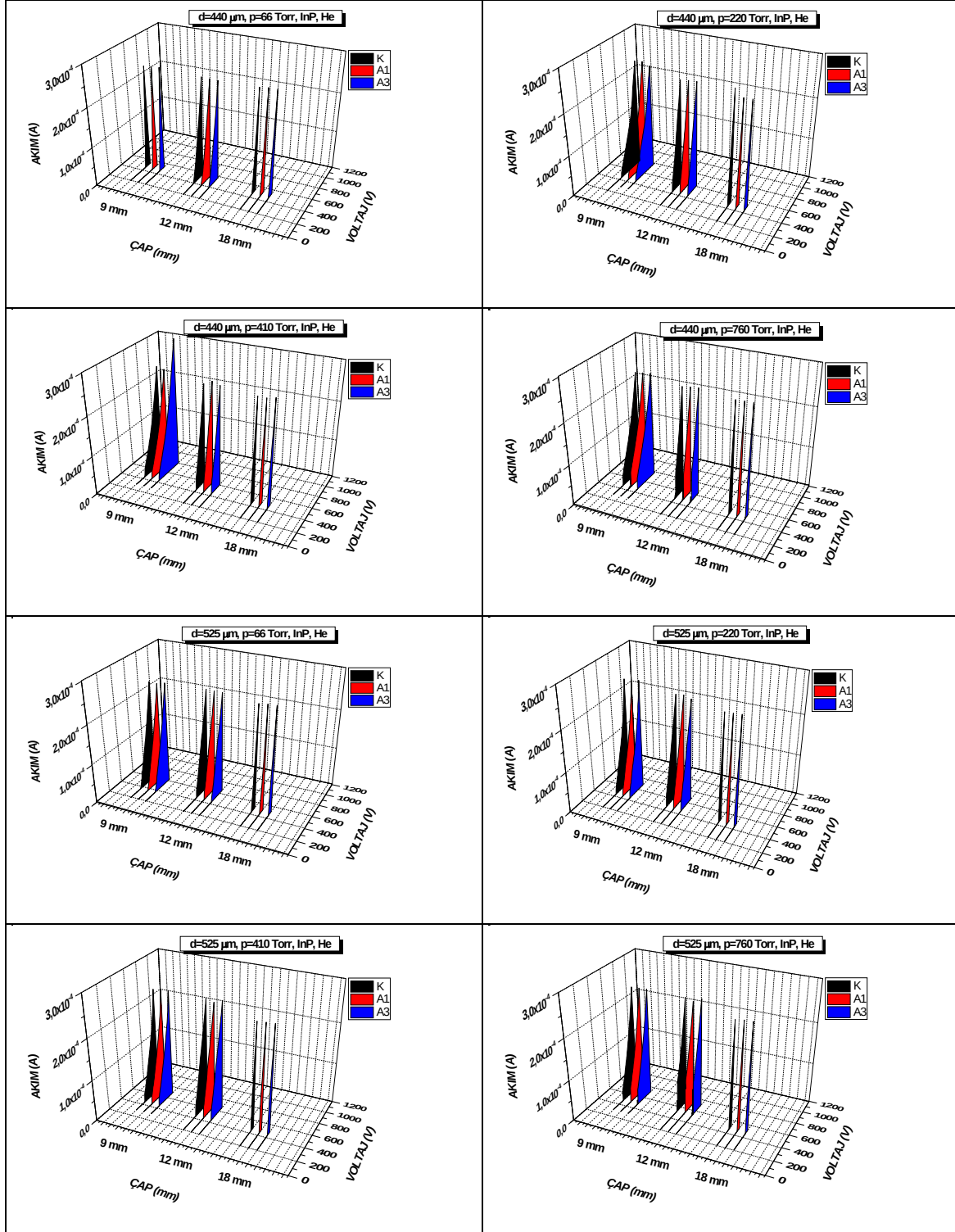
Deşarj hücresine ait akım – voltaj karakteristiklerinin boşalma çapına göre 3 boyutlu grafikleri Şekil 7.7’deki gibidir.



Şekil 7.7. Farklı elektrotlar arası mesafelerde, farklı çap değerlerinde, $p = 66$ Torr, $p = 220$ Torr, $p = 410$ Torr ve $p = 760$ Torr basınç değerlerinde, aydınlatma şiddetine göre üç boyutlu AVK grafiği



Şekil 7.7. (devam) Farklı elektrotlar arası mesafelerde, farklı ϕ değerlerinde, $p = 66 \text{ Torr}$, $p = 220 \text{ Torr}$, $p = 410 \text{ Torr}$ ve $p = 760 \text{ Torr}$ basınç değerlerinde, aydınlatma şiddetine göre üç boyutlu AVK grafiği



Şekil 7.7. (devam) Farklı elektrotlar arası mesafelerde, farklı ϕ değerlerinde, $p = 66 \text{ Torr}$, $p = 220 \text{ Torr}$, $p = 410 \text{ Torr}$ ve $p = 760 \text{ Torr}$ basınç değerlerinde, aydınlatma şiddetine göre üç boyutlu AVK grafiği

Şekil 7.6'da aydınlatma şiddeti K altında farklı elektrotlar arası mesafelerde $p = 66 \text{ Torr}$, $p = 220 \text{ Torr}$, $p = 410 \text{ Torr}$ ve $p = 760 \text{ Torr}$ basınç değerlerinde farklı ϕ değerlerine göre iki boyutlu AVK grafikleri görülmektedir. Şekil 7.7'de ise farklı elektrotlar arası

mesafelerde, farklı çap değerlerinde, $p = 66$ Torr, $p = 220$ Torr, $p = 410$ Torr ve $p = 760$ Torr basınç değerlerinde, aydınlatma şiddetine göre üç boyutlu AVK grafikleri görülmektedir. Grafikler incelendiğinde elektrot çapı büyüdükçe akım değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca $D = 18$ mm en büyük çap değeri için kırılma voltajının genellikle en küçük olduğu görülmektedir. Elektrot çapının büyümesi boşalma aktif alanını arttırmaktadır. Böylece plazma katot tarafından daha çok beslenmekte ve akım değerlerinde artış görülmektedir.

Çizelge 7.1’de ise $d = 440$ μm elektrotlar arası mesafe, $p = 220$ Torr basınç ve aydınlatma şiddetinin K olduğu durumda $D = 9$ mm, $D = 12$ mm ve $D = 18$ mm çap değerlerine karşılık gelen akım – voltaj tablosu görülmektedir. Tabloya göre sarı renkle boyanmış değerler kırılma voltajlarıdır. Çap değeri arttıkça kırılma voltajlarının azaldığı görülmektedir. Ayrıca kırılma voltajlarına kadar sabit voltaj altında akımın çap ile ilişkisi net olarak görülemezken, kırılma olayından sonra aynı voltaj değerlerinde çap arttıkça akım değerlerinin de arttığı görülmektedir. Örneğin 459 volt değeri için $D = 9$ mm çapta akım $2,05 \times 10^{-5}$ A, $D = 12$ mm çapta akım $4,86 \times 10^{-5}$ A ve $D = 18$ mm çapta akım $1,09 \times 10^{-4}$ A değerleri okunmaktadır. Yani çap arttıkça sabit voltaj altında akım değeri de artmıştır.

Çizelge 7.1. Sabit elektrotlar arası mesafe ve sabit basınç değeri için farklı çap değerlerindeki akım – voltaj değerleri tablosu

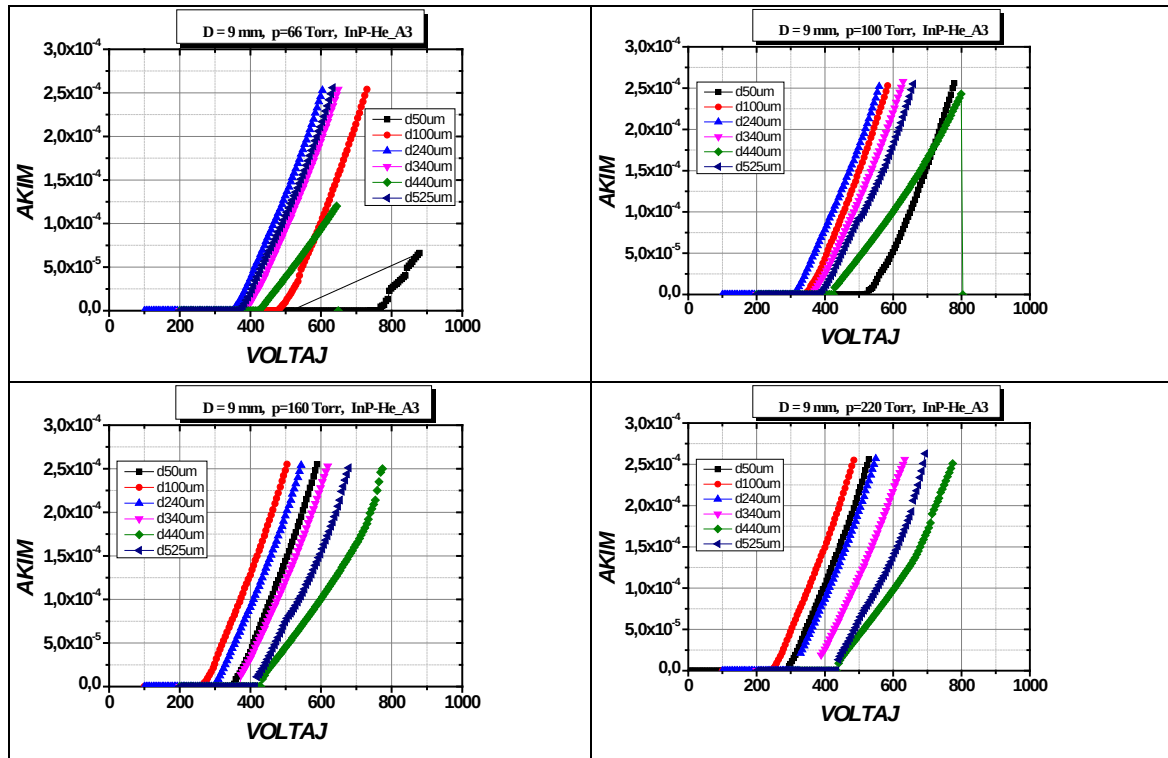
$d = 440$ μm , $p = 220$ Torr, Karanlık	$D = 9$ mm	$D = 12$ mm	$D = 18$ mm
Voltaj (v)	Akım (A)		
399	1,50E-07	6,60E-08	1,41E-08
405	-1,49E-07	-8,32E-08	-1,33E-08
409	1,45E-07	1,23E-07	3,10E-08
414	-8,48E-08	-1,13E-07	2,21E-08
419	1,79E-07	1,60E-07	1,70E-09
425	-4,12E-08	-7,70E-08	3,57E-07
429	9,24E-08	1,57E-07	1,99E-06
434	4,44E-08	1,95E-05	2,51E-05
439	4,42E-06	2,74E-05	4,49E-05
444	1,17E-05	3,25E-05	6,15E-05
449	1,48E-05	3,80E-05	7,89E-05
454	1,78E-05	4,29E-05	9,47E-05
459	2,05E-05	4,86E-05	1,09E-04
465	2,36E-05	5,42E-05	1,25E-04
470	2,61E-05	6,01E-05	1,40E-04

Çizelge 7.1. (devam) Sabit elektrotlar arası mesafe ve sabit basınç değeri için farklı çap değerlerindeki akım – voltaj değerleri tablosu

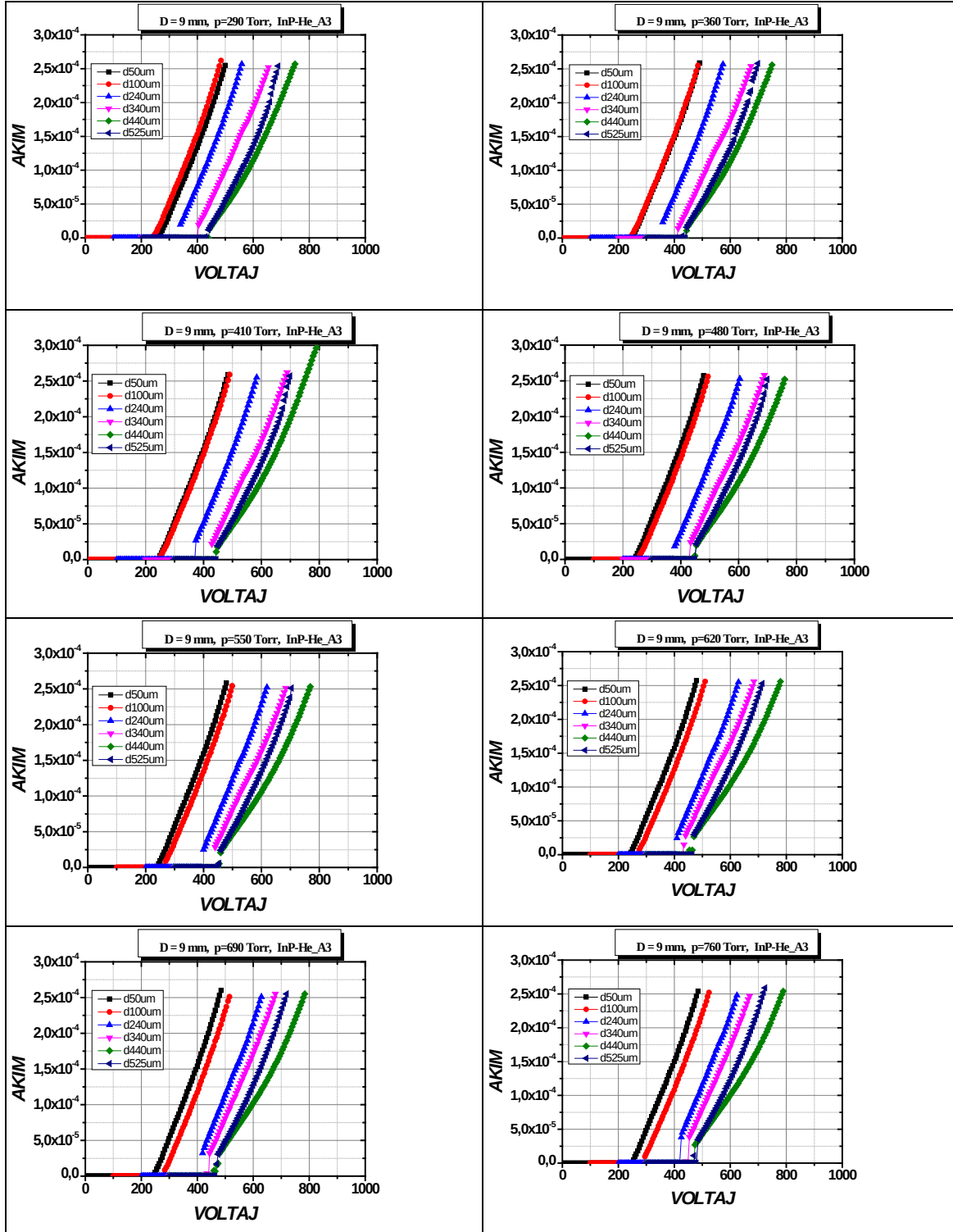
474	2,89E-05	6,57E-05	1,55E-04
479	3,13E-05	7,18E-05	1,71E-04
485	3,43E-05	7,82E-05	1,87E-04
489	3,66E-05	8,43E-05	2,02E-04
494	3,94E-05	9,04E-05	2,18E-04
499	4,17E-05	9,64E-05	2,34E-04

7.1.4. Akım – voltaj karakteristiğinin elektrotlar arası mesafeye bağlılığı

Deşarj hücresine ait akım – voltaj karakteristiklerinin elektrotlar arası mesafeye göre 2 boyutlu grafikleri Şekil 7.8’deki gibidir.



Şekil 7.8. D = 9 mm çap değeri için, 50 µm, 100 µm, 240 µm, 340 µm, 440 µm, 525 µm elektrotlar arası mesafelerde aydınlatma şiddeti A₃ için iki boyutlu AVK grafikleri

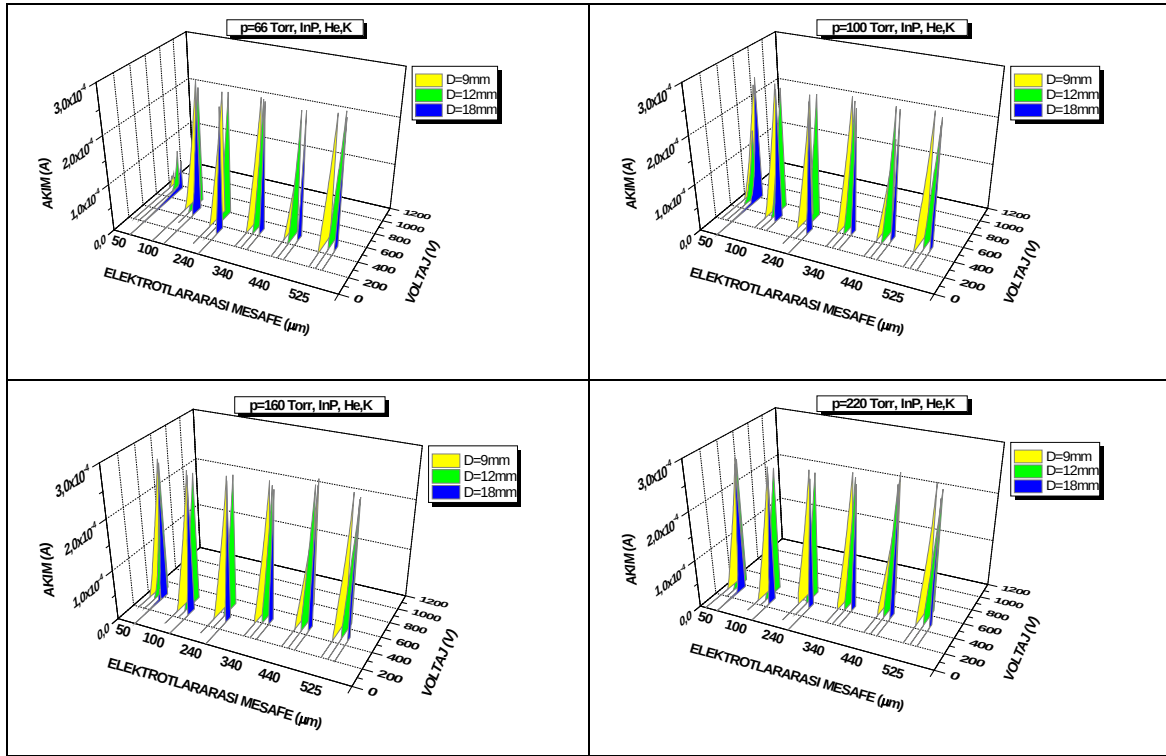


Şekil 7.8. (devam) $D = 9$ mm çap değeri için, 50 μm , 100 μm , 240 μm , 340 μm , 440 μm , 525 μm elektrotlar arası mesafelerde aydınlatma şiddeti A_3 için iki boyutlu AVK Grafikleri

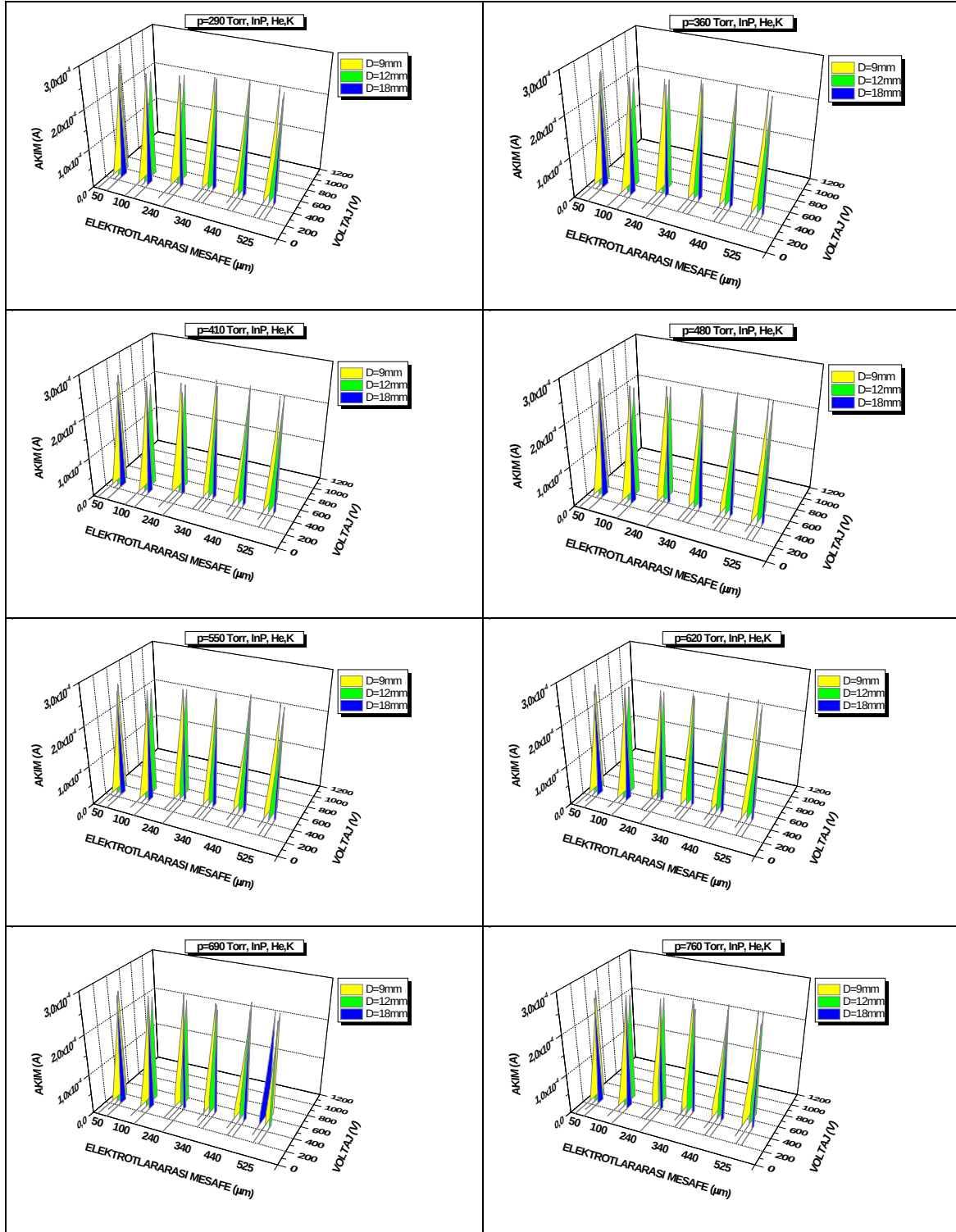
Şekil 7.8’de $D = 9$ mm çap değeri ve A_3 aydınlatma altında ölçülen veriler görülmektedir. Diğer çap ve aydınlatma değerleri için de benzer bir durum görüldüğünden sadece bu grafikleri yorumlamak yeterli olacaktır. Genel olarak elektrotlar arası mesafenin artması

aynı akım değerini yakalamak için daha yüksek voltajlara ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Ayrıca kırılma voltajları da elektrotlar arası mesafenin artmasıyla artmıştır. Boşalma aralığının artması, yan duvar etkin yüzey alanının artmasına ve bu da difüzyonla yük taşıyıcı kaybının atmasına sebep olmaktadır. Böylece taşıyıcı kayıplarının artması yüksek akım değerlerine ulaşmak için yüksek voltajlar gerektirmiştir. Grafiklerden $p = 410$ Torr basınca kadar olan basınçlarda özellikle $d = 50 \mu\text{m}$ ve $d = 100 \mu\text{m}$ mesafelere ait eğrilerin yüksek voltajlardan başlayarak diğer mesafelere ait eğrilerin önüne geçtiği yani düşük voltajlara doğru hareket ettiği görülmektedir.

Deşarj hücresine ait akım – voltaj karakteristiklerinin aydınlatma şiddeti K 'da, farklı elektrotlar arası mesafelerde ve basınçlarda, çapa göre 3 boyutlu grafikleri Şekil 7.9'daki gibidir.



Şekil 7.9. Aydınlatma şiddeti K için farklı elektrotlar arası mesafe değerlerinde ve farklı basınç değerlerinde değişen çap değerleri için üç boyutlu AVK grafikleri

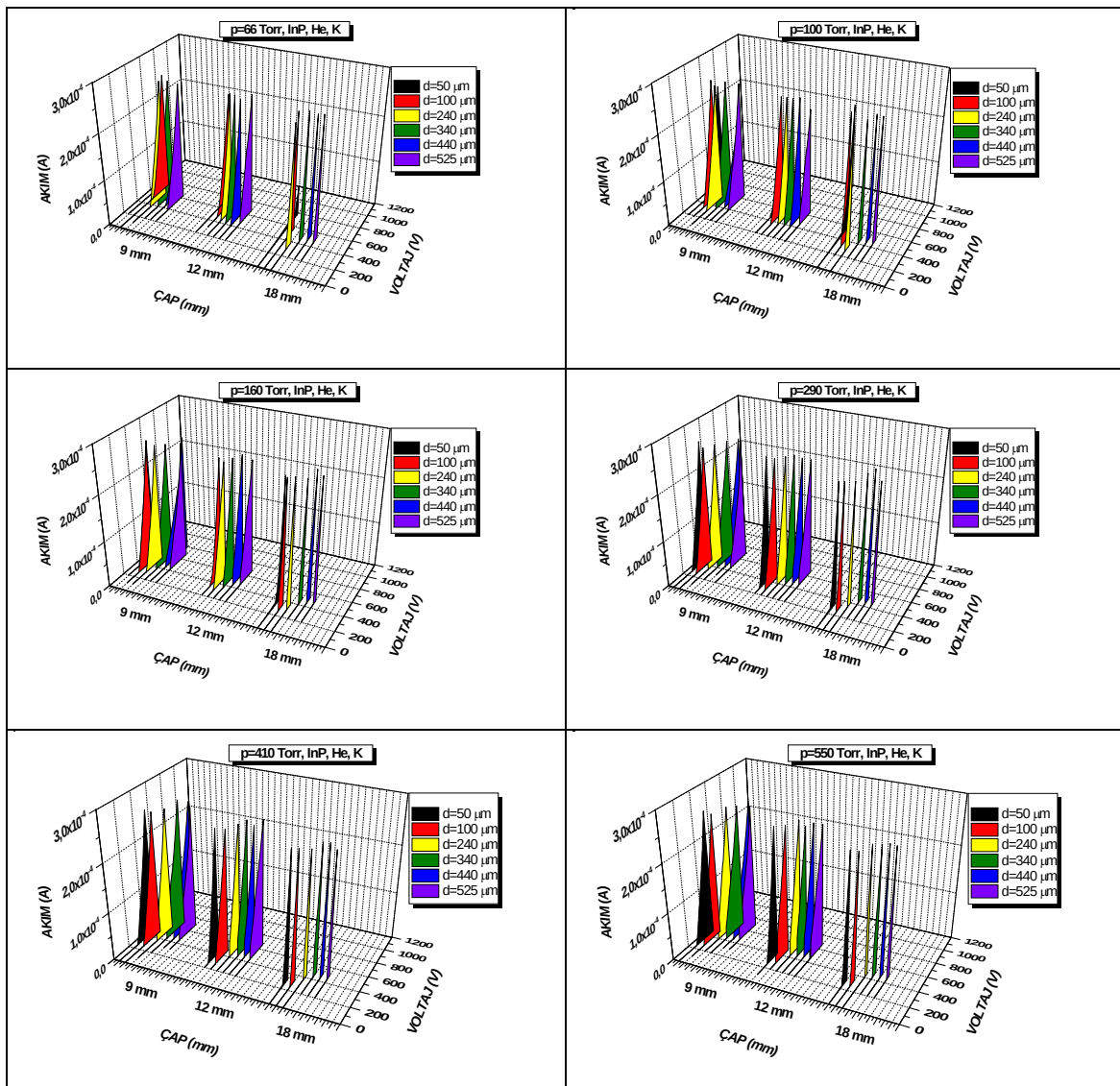


Şekil 7.9. (devam)Aydınlatma şiddeti K için farklı elektrotlar arası mesafe değerlerinde ve farklı basınç değerlerinde değişen çap değerleri için üç boyutlu AVK grafikleri

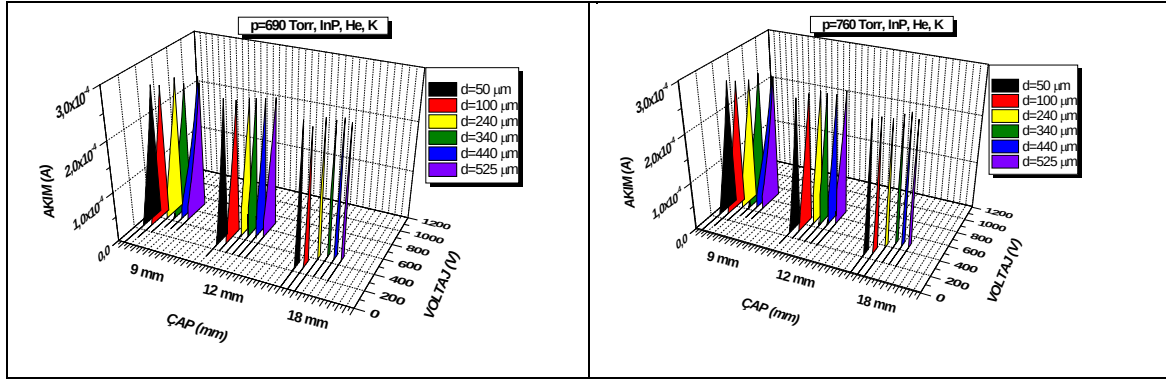
Şekil 7.9’da aydınlatma şiddeti K için farklı elektrotlar arası mesafelerde her bir basınç değeri için üç boyutlu AVK grafiklerinin çapa göre değişimi görülmektedir. Burada da Şekil 7.8’deki iki boyutlu grafiklerde olduğu gibi p = 410 Torr basınç değerine kadar olan

basınç ölçümlerinde $d = 50 \mu\text{m}$ ve $d = 100 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafelere ait eğrilerin geriden (yüksek voltajlardan) gelerek öne (düşük voltajlara) geçtiği görülmektedir. Ayrıca elektrotlar arası mesafe arttıkça yığın eğrilerin geriye (yüksek voltajlara) kaydığı genel bir görünüm olarak tespit edilebilmektedir.

Deşarj hücresine ait akım – voltaj karakteristiklerinin aydınlatma şiddeti K’da, farklı elektrot çaplarında ve basınçlarda, elektrotlar arası mesafeye göre 3 boyutlu grafikleri Şekil 7.10’daki gibidir.



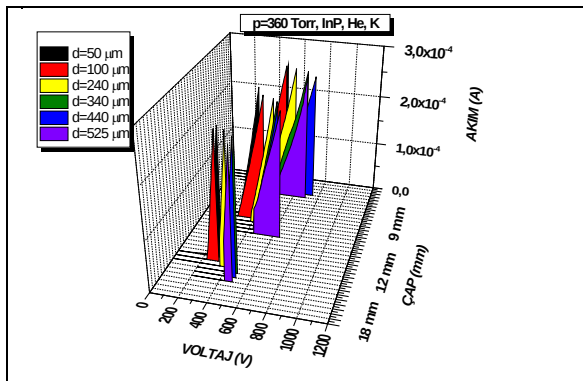
Şekil 7.10. Aydınlatma şiddeti K için farklı elektrot çaplarında ve farklı basınç değerlerinde değişen elektrotlar arası mesafe için üç boyutlu AVK grafikleri



Şekil 7.10. (devam) Aydınlatma şiddeti K için farklı elektrot çaplarında ve farklı basınç değerlerinde değişen elektrotlar arası mesafe için üç boyutlu AVK grafikleri

Şekil 7.10'da aydınlatma şiddeti K için farklı elektrot çaplarında her bir basınç değeri için üç boyutlu AVK grafiklerinin elektrotlar arası mesafeye göre değişimi görülmektedir. Bu grafiklerde de herhangi bir basınç değerinde sabit bir çap değeri için artan elektrotlar arası mesafelerde AVK grafiklerinin geriye (yüksek voltaj değerlerine) kaydığı görülmektedir.

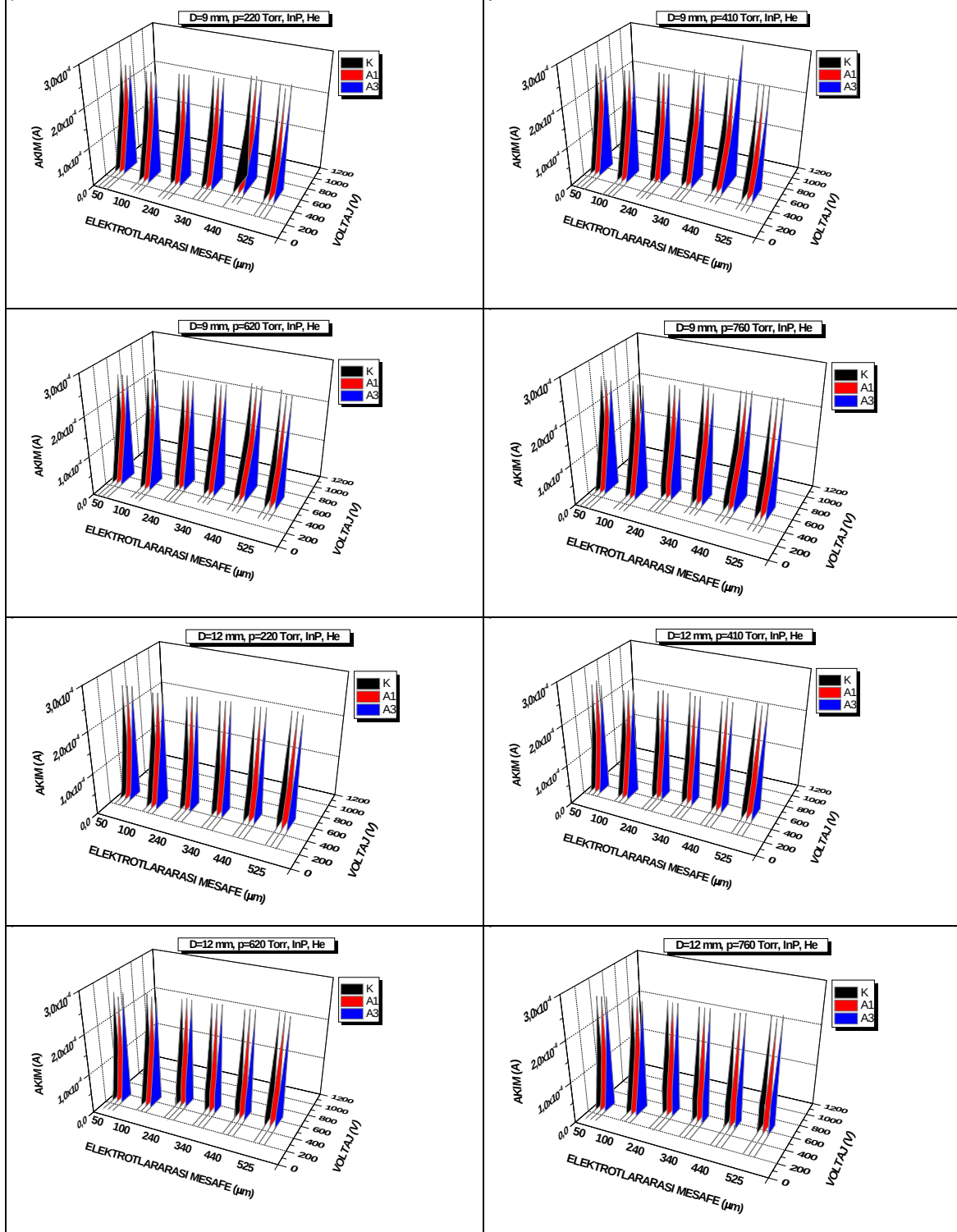
Şekil 7.11'deki grafikte $p = 360$ Torr basınç değeri için değişen çap ve elektrotlar arası mesafeye göre AVK grafiklerinin yan arka profilden görünümü verilmiştir. Bu grafikte yukarıda da bahsedildiği gibi hem her bir çap değeri için artan elektrotlar arası mesafelerde eğrilerin yüksek voltajlara (arka tarafa) doğru kaydığı, hem de elektrot çapı arttıkça yığın eğrilerin düşük voltajlara (ön tarafa) doğru kaydığı net olarak görülebilmektedir.



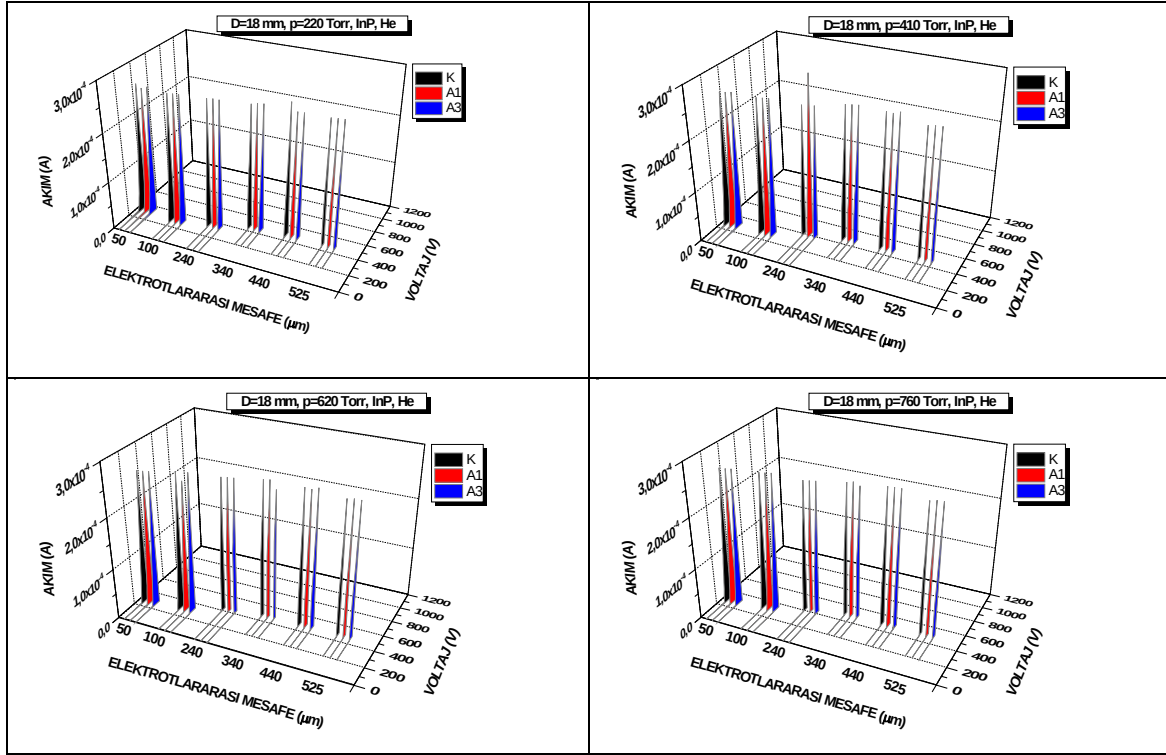
Şekil 7.11. Aydınlatma şiddeti K için farklı elektrot çaplarında, $p = 360$ Torr basınç değeri için ve değişen elektrotlar arası mesafeye göre üç boyutlu AVK grafiklerinin yan arka profilden görünümü

Şekil 7.12'de $D = 9$ mm, $D = 12$ mm ve $D = 18$ mm çap değerlerinde, $p = 220$ Torr, $p = 410$ Torr, $p = 620$ Torr, $p = 760$ Torr basınç değerlerinde aydınlatma şiddeti K, A_1 ve A_3

altında elektrotlar arası mesafe değişimine göre üç boyutlu AVK grafikleri görülmektedir. Bu grafiklerin de her birinde artan elektrotlar arası mesafe sonucunda eğrilerin yüksek voltajlara doğru kaydığı açıkça görülmektedir.



Şekil 7.12. Farklı çap, basınç ve elektrotlar arası mesafe altında farklı aydınlatma şiddetleri için üç boyutlu AVK grafikleri



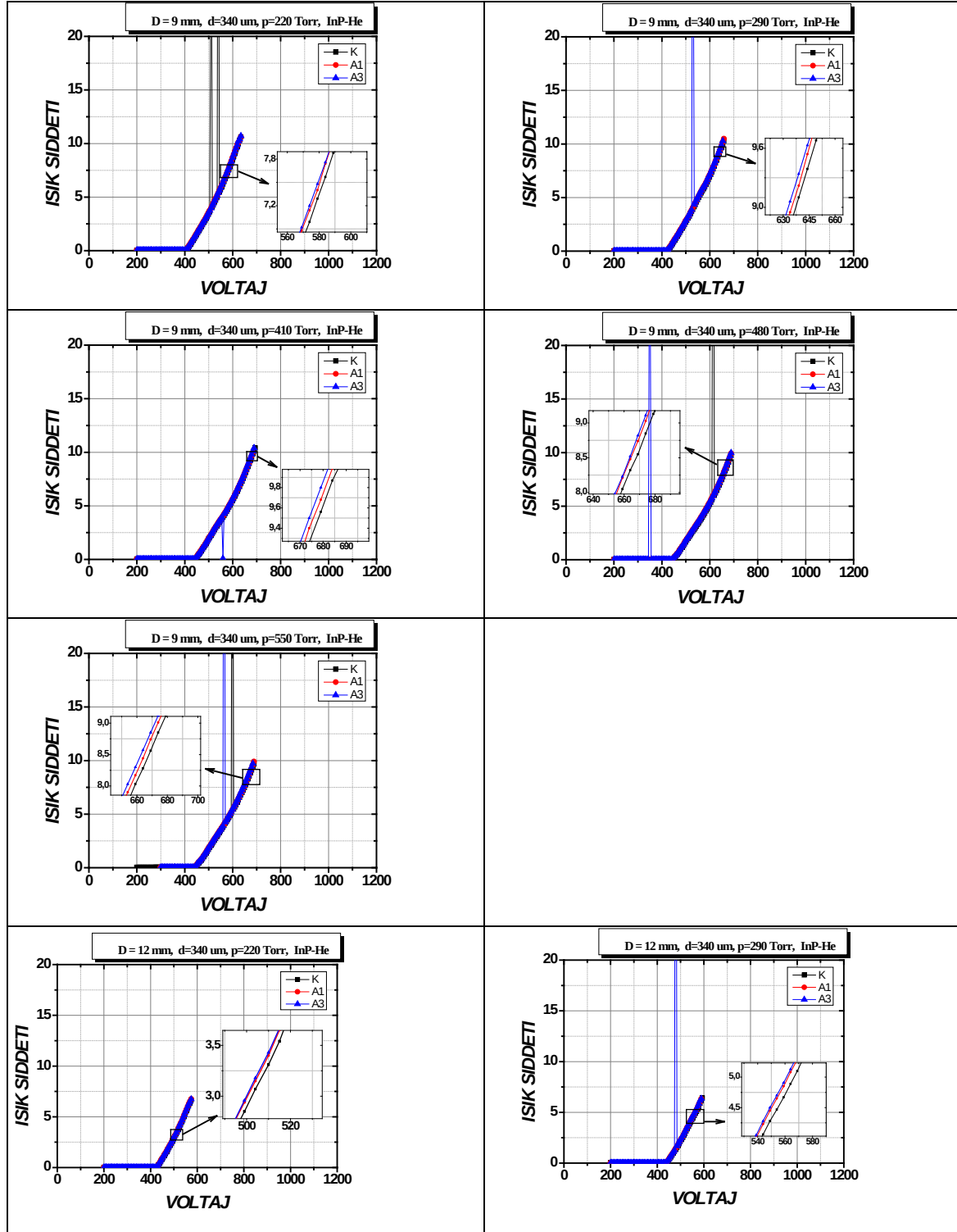
Şekil 7.12. (devam) Farklı çap, basınç ve elektrotlar arası mesafe altında farklı aydınlatma şiddetleri için üç boyutlu AVK grafikleri

7.2. Mikrodeşarj Hücresinin Işıma – Voltaj Karakteristiklerinin İncelenmesi

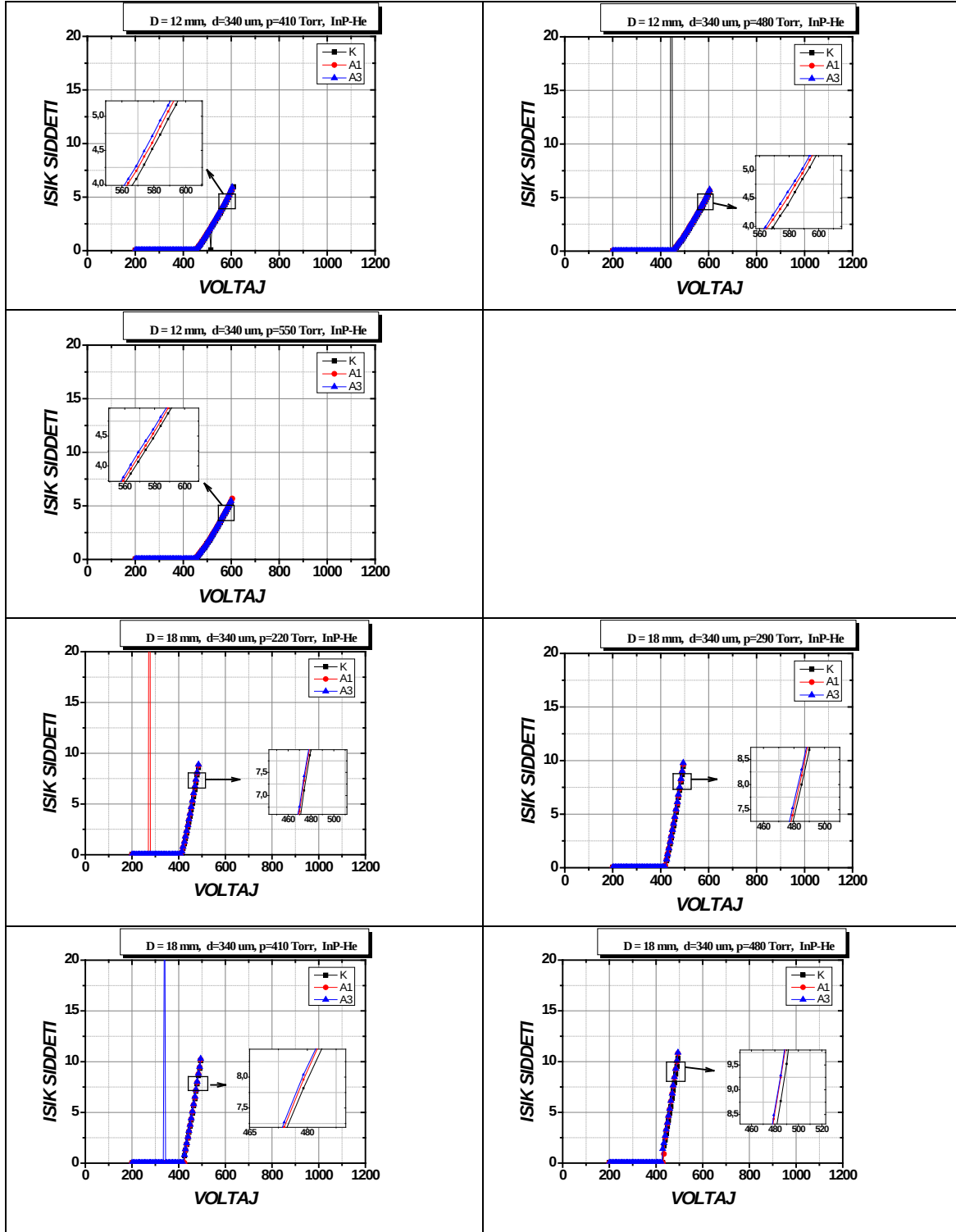
Mikrodeşarj hücresi iki taraftan ışığa karşı yarı saydam malzemeler tarafından oluştuğundan bir taraftan kızılötesi ışıının girmesine, diğer taraftan ise SnO₂ ince film ile kaplı cam disk sayesinde UV ve görünür bölge spektrumundaki ışımaların sistemi terk etmesine olanak sağlamaktadır (Bkz. Şekil 6.5). Sistemi terk eden bu UV ışımalarının tespit ve ölçümü için bir fotoçoğaltıcı ve dijital elektrometre kullanılmaktadır. Sistem parametreleri değiştirilerek deneyler tekrarlanmıştır. Işıma – voltaj karakteristiklerine etki eden hücre parametrelerinin analizlerini aşağıdaki başlıklar altında incelemek uygun olacaktır.

7.2.1. Işıma – voltaj karakteristiğinin aydınlatma şiddetine bağlılığı

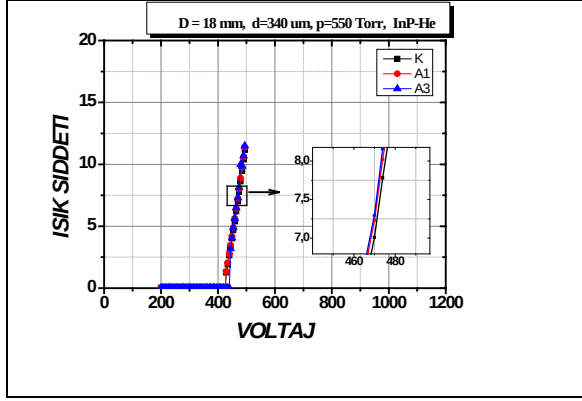
Deşarj hücresine ait ışıma – voltaj karakteristiklerinin aydınlatma şiddetine göre 2 boyutlu grafikleri Şekil 7.13’deki gibidir.



Şekil 7.13. Farklı ϕ değerlerinde, farklı basınçlarda, $d = 340 \mu$ m elektrotlar arası mesafede, farklı aydınlatma şiddetleri için iki boyutlu IVK grafikleri



Şekil 7.13. (devam) Farklı çap değerlerinde, farklı basınçlarda, $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede, farklı aydınlatma şiddetleri için iki boyutlu IVK grafikleri

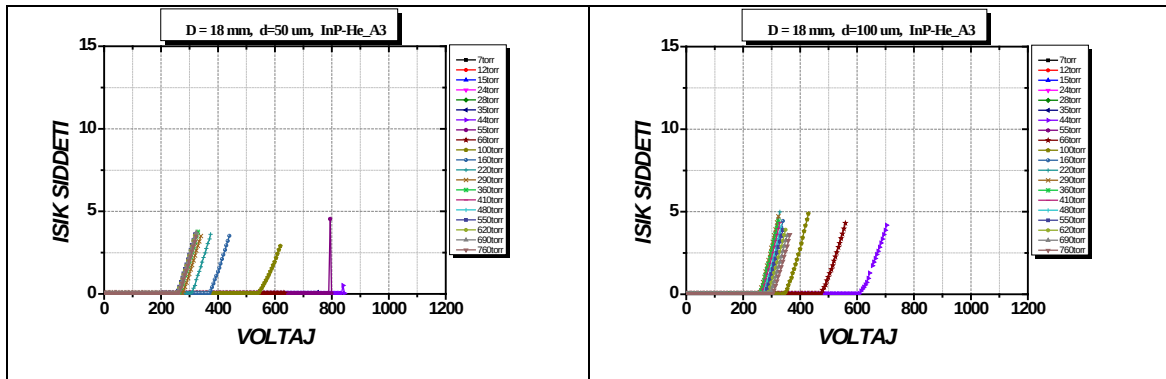


Şekil 7.13. (devam) Farklı çap değerlerinde, farklı basınçlarda, $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede, farklı aydınlatma şiddetleri için iki boyutlu IVK grafikleri

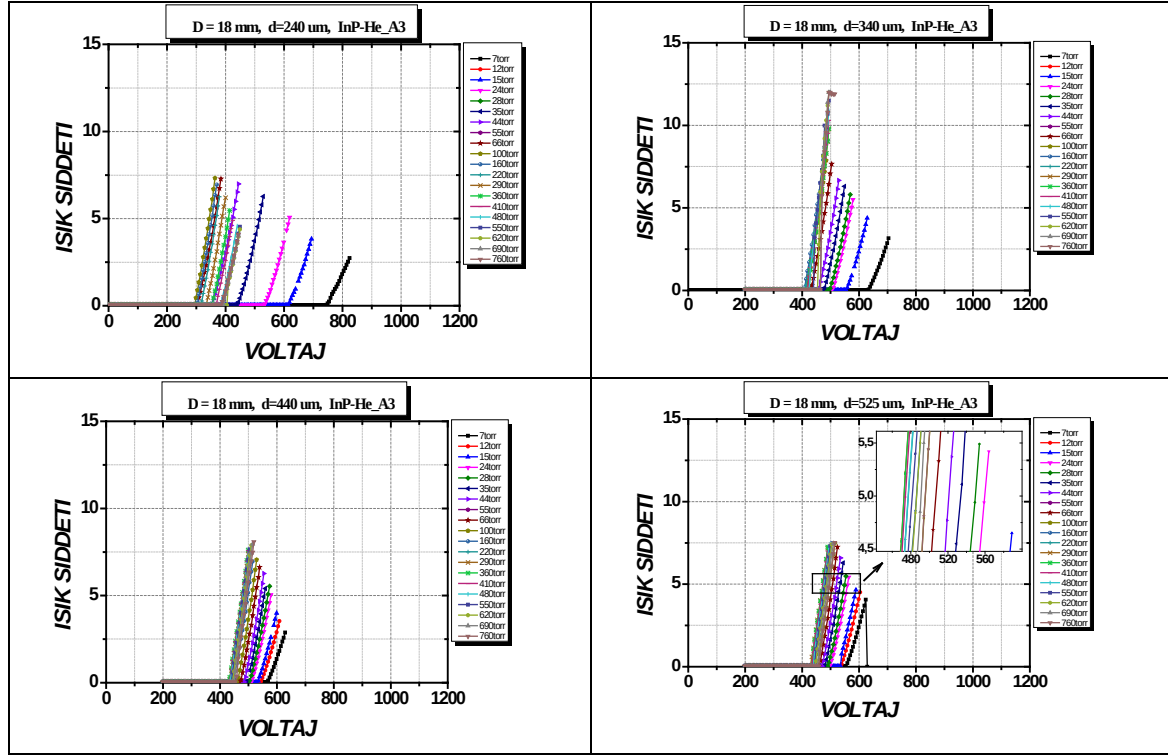
Şekil 7.13’de görüldüğü gibi aydınlanma şiddetinin artmasıyla ışıma miktarı da artmıştır. Kızılötesi aydınlatma yarıiletken katotun direncini düşürerek devre akımını artırır. Bu da çarpışma enerjisini ve frekansını arttıracaktır. Böylece elektronlar tarafından uyarılan atomların sayısı ve dolayısıyla ışıma miktarı artmaktadır.

7.2.2. Işıma – voltaj karakteristiğinin hücre basıncına bağlılığı

Deşarj hücresine ait ışıma – voltaj karakteristiklerinin $D = 18 \text{ mm}$ çap değeri, aydınlatma şiddeti A_3 ’de, farklı elektrotlar arası mesafelerde hücre basıncına göre 2 boyutlu grafikleri Şekil 7.14’deki gibidir.



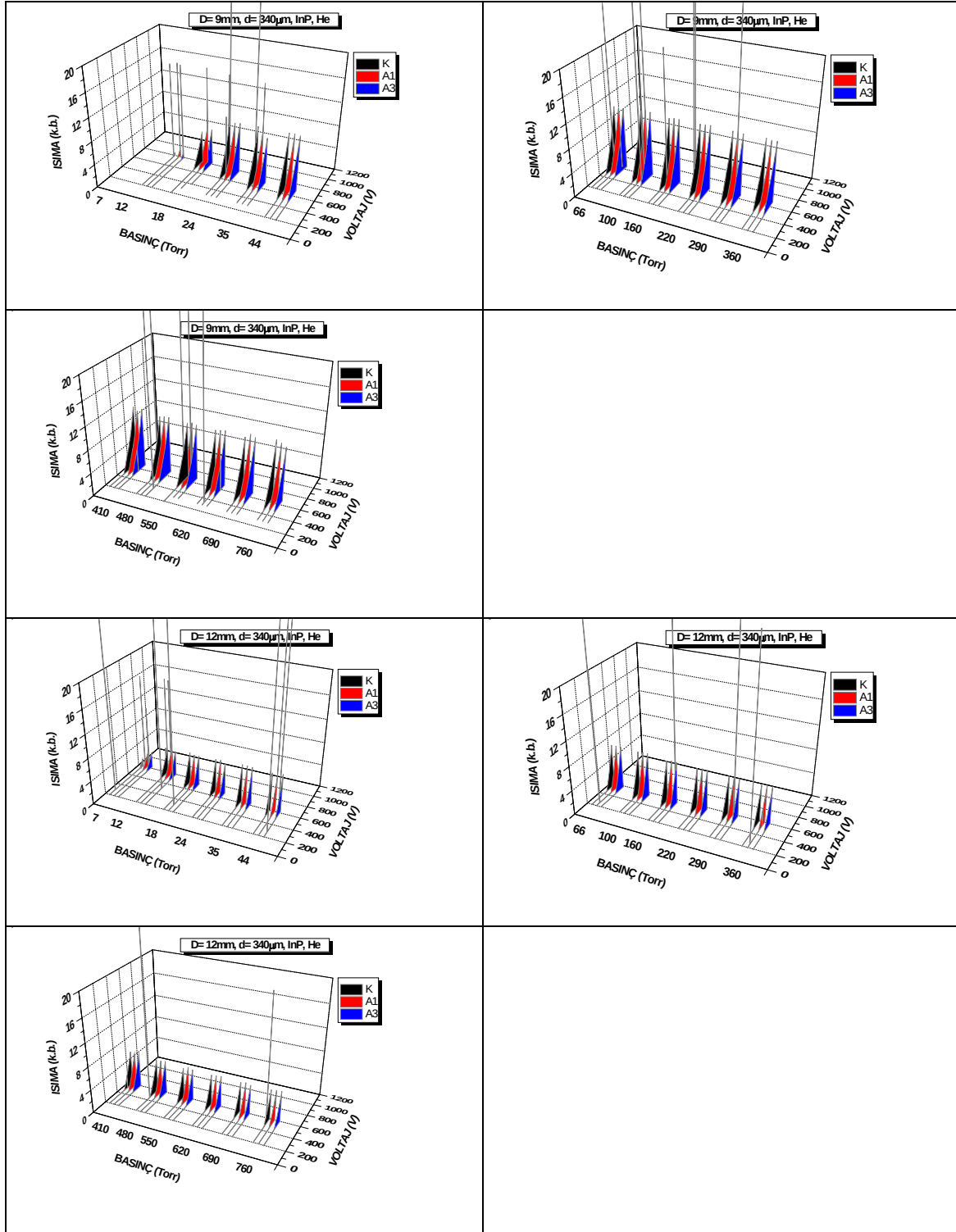
Şekil 7.14. $D = 18 \text{ mm}$ elektrot çapı ve aydınlatma şiddeti A_3 ’de, farklı elektrotlar arası mesafelerde basınç değişimine göre iki boyutlu IVK grafikleri



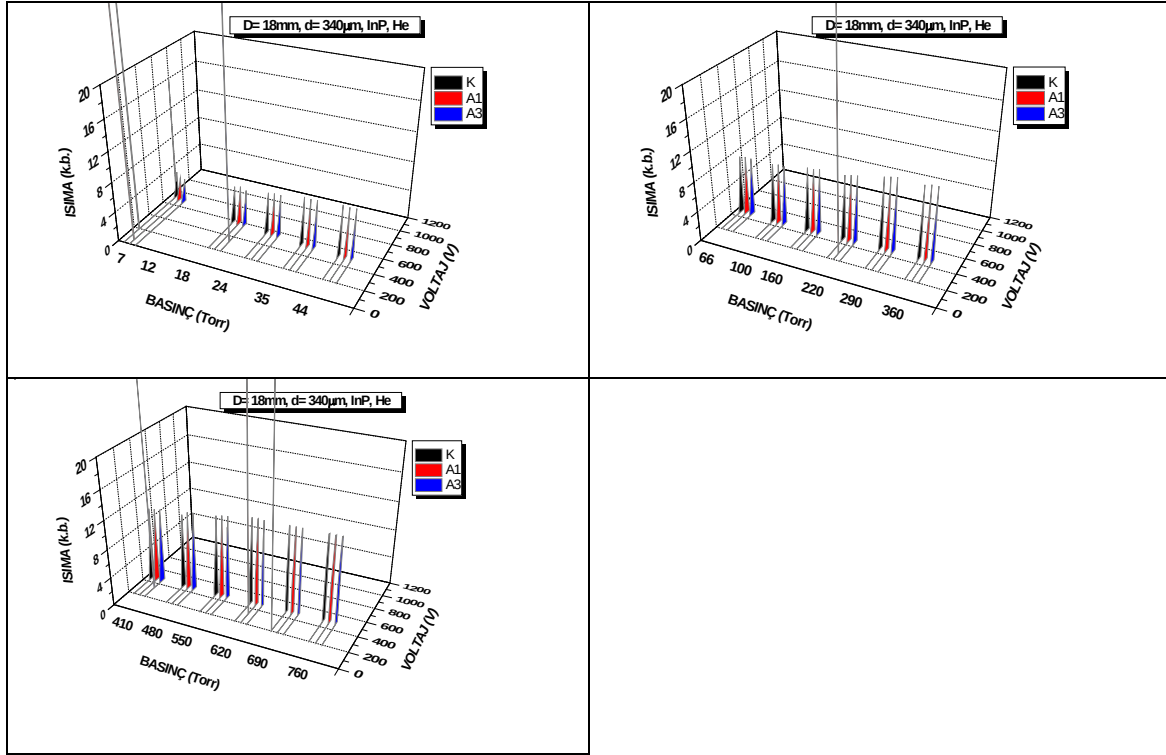
Şekil 7.14. (devam) $D = 18$ mm elektrot çapı ve aydınlatma şiddeti A_3 'de, farklı elektrotlar arası mesafelerde basınç değişimine göre iki boyutlu IVK grafikleri

Şekil 7.14'de $D = 18$ mm elektrot çapı ve A_3 aydınlatma şiddeti altında farklı elektrotlar arası mesafelerde farklı basınçlar için çizilmiş iki boyutlu IVK grafikleri görülmektedir. Elektrotlar arası mesafenin $d = 440 \mu\text{m}$ ve $d = 525 \mu\text{m}$ gibi büyük değerlerinde farklı basınçlara ait eğrilerin daha sıkı bir şekilde yerleştikleri görülmektedir. Grafiklerden genel olarak belirli bir basınç değerine kadar eğrilerin düşük voltajlara doğru kaydığı, daha sonrasında yüksek voltajlar tarafına kaydığı görülmektedir. Yani sabit elektrot çapı ve aydınlatma şiddeti altında belirli bir kritik değere kadar basıncın artması ışımayı da arttırmış, sonrasında ise basıncın artmasıyla ışıma miktarı azalmıştır. Şekil 7.14'de $d = 525 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafe için çizilen grafikte basıncın bu kritik değeri $p = 360$ Torr olarak görülmektedir.

Şekil 7.15'de $D = 9$ mm, $D = 12$ mm ve $D = 18$ mm elektrot çap değerlerinde, $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede, farklı basınçlarda, farklı aydınlatma şiddetleri için üç boyutlu IVK grafikleri görülmektedir. Bu grafikler incelendiğinde basıncın belirli bir kritik değere kadar artmasıyla ışıma miktarının arttığı ve eğrilerin düşük voltajlara kaydığı, basıncın bu kritik değerinden sonra artmasıyla ise ışıma miktarının azaldığı ve eğrilerin yüksek voltaj değerlerine doğru kaydığı görülmektedir.

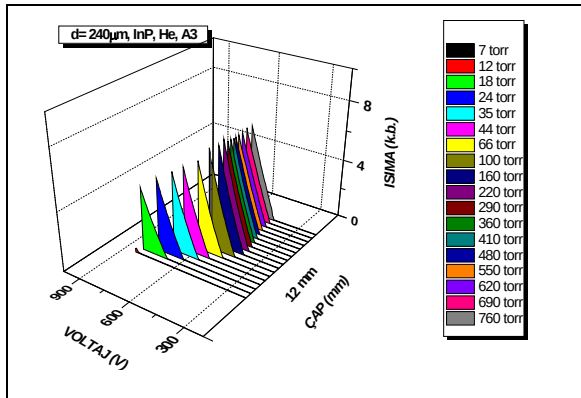


Şekil 7.15. Farklı elektrot çapı değerlerinde, $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede, farklı basınç değerlerinde, farklı aydınlatma şiddetlerine göre üç boyutlu IVK grafikleri



Şekil 7.15. (devam) Farklı elektrot çapı değerlerinde, $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede, farklı basınç değerlerinde, farklı aydınlatma şiddetlerine göre üç boyutlu IVK grafikleri

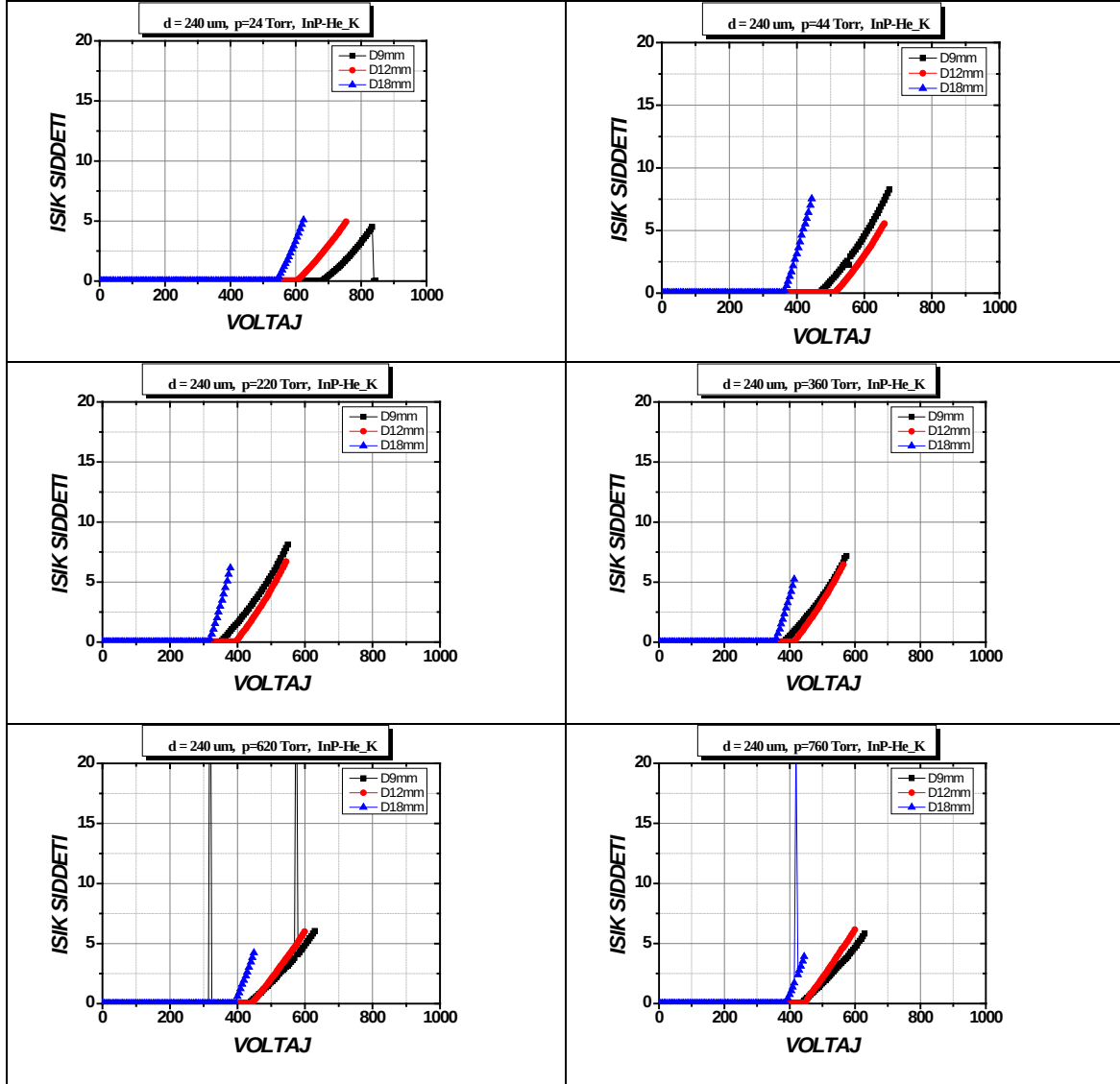
Şekil 7.16'da $D = 12 \text{ mm}$ elektrot çapı, $d = 240 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafe ve A_3 aydınlatma şiddeti altında basınca göre üç boyutlu IVK grafiği farklı bir açıdan görülmektedir. Bu grafikte eğrilerin, basıncın belirli bir değere kadar artmasıyla düşük voltajlar yönünde öne gelmeleri, basıncın belirli bir değerinden sonra artmaya devam etmesiyle eğrilerin geriye doğru yani yüksek voltajlar yönünde kaydığı görülmektedir.



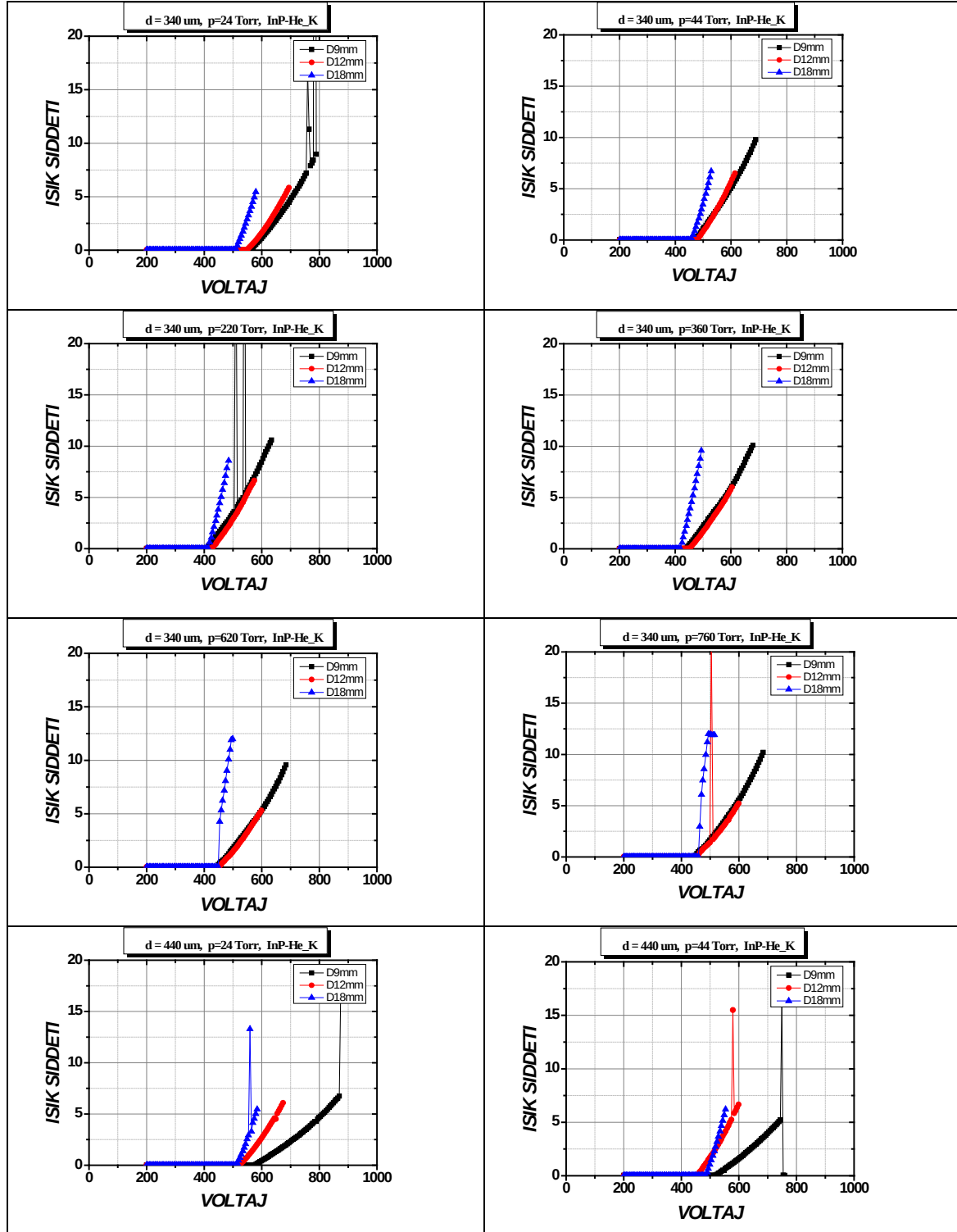
Şekil 7.16. $D = 12 \text{ mm}$ elektrot çapı, $d = 240 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafe ve A_3 aydınlatma şiddeti altında basınca göre üç boyutlu IVK grafiği

7.2.3. Işıma – voltaj karakteristiğinin boşalma çapına bağlılığı

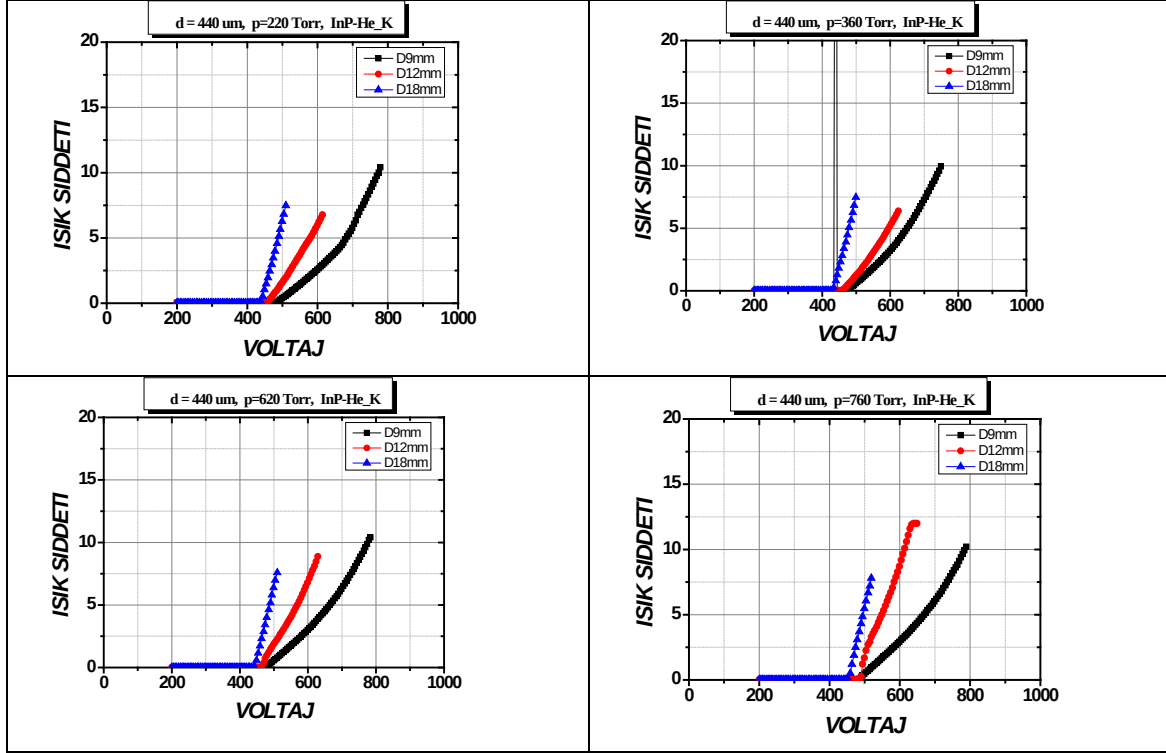
Deşarj hücrelerine ait ışıma – voltaj karakteristیکlerinin boşalma çapına göre 2 boyutlu grafikleri Şekil 7.17’deki gibidir.



Şekil 7.17. Aydınlatma şiddeti K’da, d = 240 μm, d = 340 μm, d = 440 μm elektrotlar arası mesafede değerlerinde, farklı basınçlarda, farklı çap değerleri için iki boyutlu IVK grafikleri



Şekil 7.17. (devam) Aydınlatma şiddeti K'da, $d = 240 \mu\text{m}$, $d = 340 \mu\text{m}$, $d = 440 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede değerlerinde, farklı basınçlarda, farklı çap değerleri için iki boyutlu IVK grafikleri



Şekil 7.17. (devam) Aydınlatma şiddeti K'da, $d = 240 \mu\text{m}$, $d = 340 \mu\text{m}$, $d = 440 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede değerlerinde, farklı basınçlarda, farklı çap değerleri için iki boyutlu IVK grafikleri

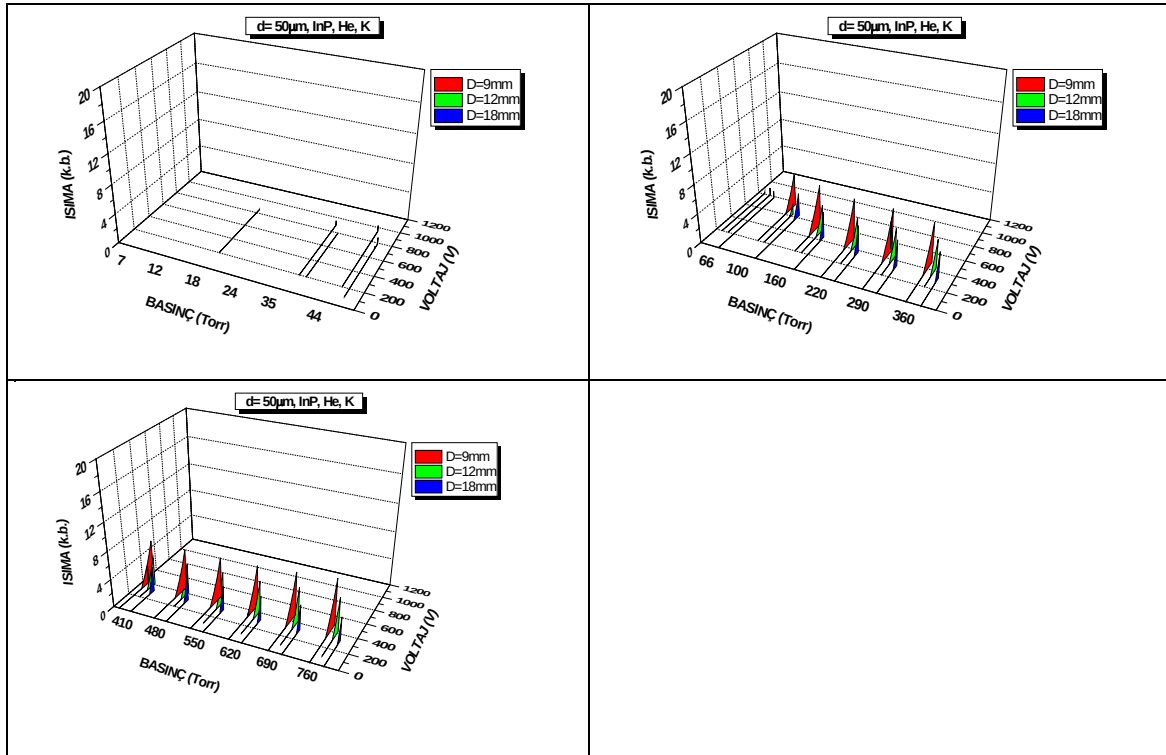
Elektrot çapının artması çarpışmaların gerçekleştiği hacmi arttırdığı için uyarılmalar sonucu ışık emisyonunun artmasına sebep olmaktadır. Şekil 7.17'deki grafikler incelendiğinde $d = 240 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede $p = 44 \text{ Torr}$, $p = 220 \text{ Torr}$, $p = 360 \text{ Torr}$ basınç değerleri için $D = 9 \text{ mm}$ çap değerine ait eğrinin, $D = 12 \text{ mm}$ çap değerine ait eğrinin önüne geçtiği görülmektedir. Elektrotlar arası mesafenin $d = 340 \mu\text{m}$ olduğu grafiklerde $D = 9 \text{ mm}$ çap değerine ait eğri ile $D = 12 \text{ mm}$ çap değerine ait eğrinin çoğunlukla çakıştığı görülmektedir. Ancak her üç elektrotlar arası mesafeye ait grafiklerde de $D = 18 \text{ mm}$ çap değerine ait eğrinin diğer çap değerlerine ait eğrilere göre önde (düşük voltaj değerlerinde) olduğu ve eğiminin daha büyük olduğu görülmektedir. Yani $D = 18 \text{ mm}$ çap değerinde ışık emisyonu, diğer çap değerlerindeki ışık emisyonlarına göre daha büyüktür.

Elektrotlar arası mesafenin $d = 440 \mu\text{m}$ olduğu grafiklerde farklı çap değerlerine ait eğrilerin, çapın artmasıyla ışıma miktarı değerlerinin de arttığını gösterecek şekilde birbirlerinden ayrıldıkları görülmektedir. Ek olarak, $d = 440 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafe ve $p = 760 \text{ Torr}$ basınçta $D = 12 \text{ mm}$ çap değerine ait eğri incelendiğinde ışık emisyonunun

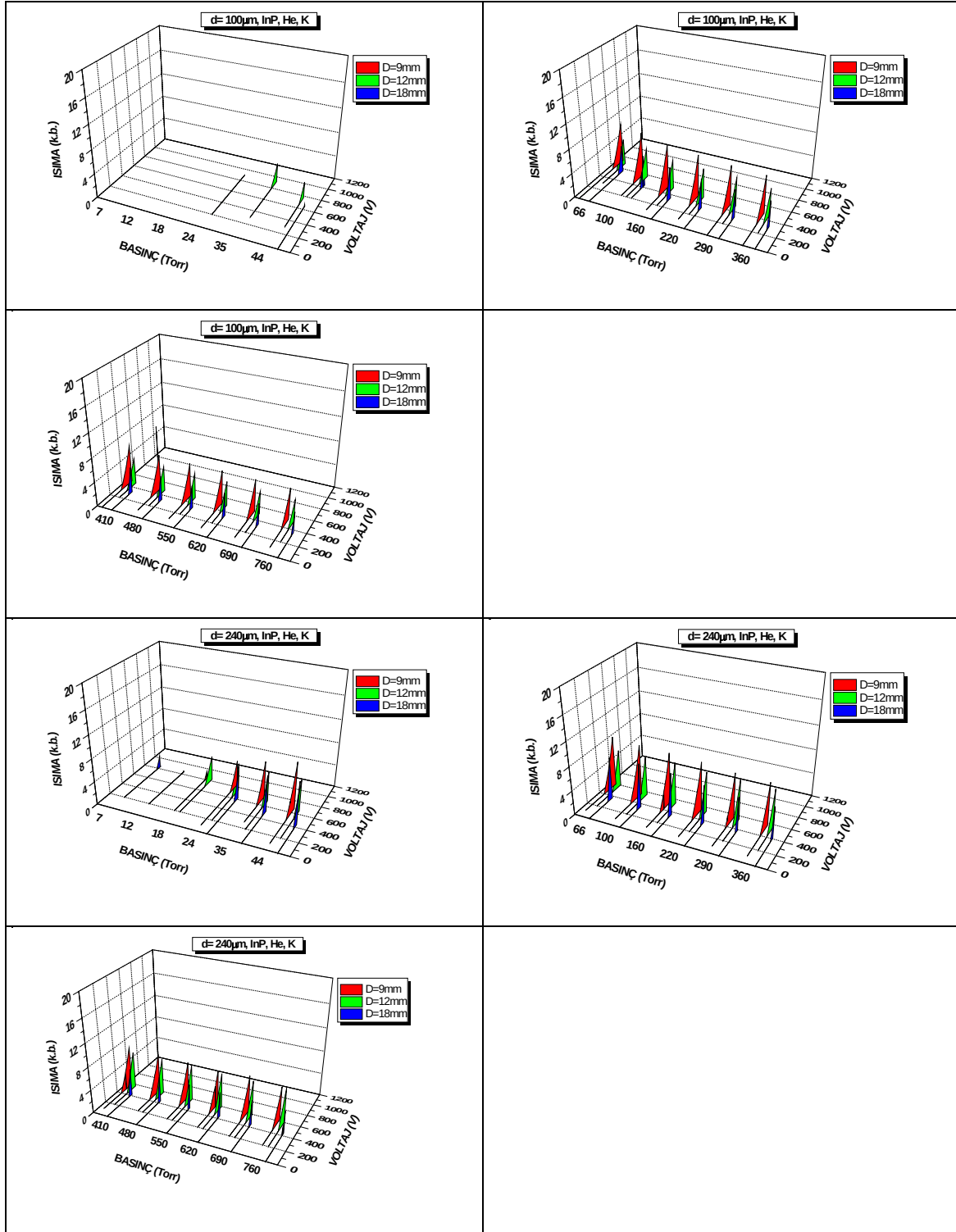
belirli bir değere kadar eğrinin yükseldiği ancak sonrasında sistemdeki fotoçoğaltıcının ölçüm limitlerine ulaşılmasından ötürü sabit bir değerde kalma eğilimi gösterdiği görülmektedir. Diğer elektrotlar arası mesafelere ait grafiklerle birlikte incelendiğinde elektrotlar arası mesafe arttıkça da farklı çaplara ait eğrilerin birbirlerinden daha net bir şekilde ayrılma eğiliminde oldukları görülebilmektedir.

Deşarj hücresine ait ışıma – voltaj karakteristiklerinin boşalma çapına göre 3 boyutlu grafikleri aşağıdaki gibidir.

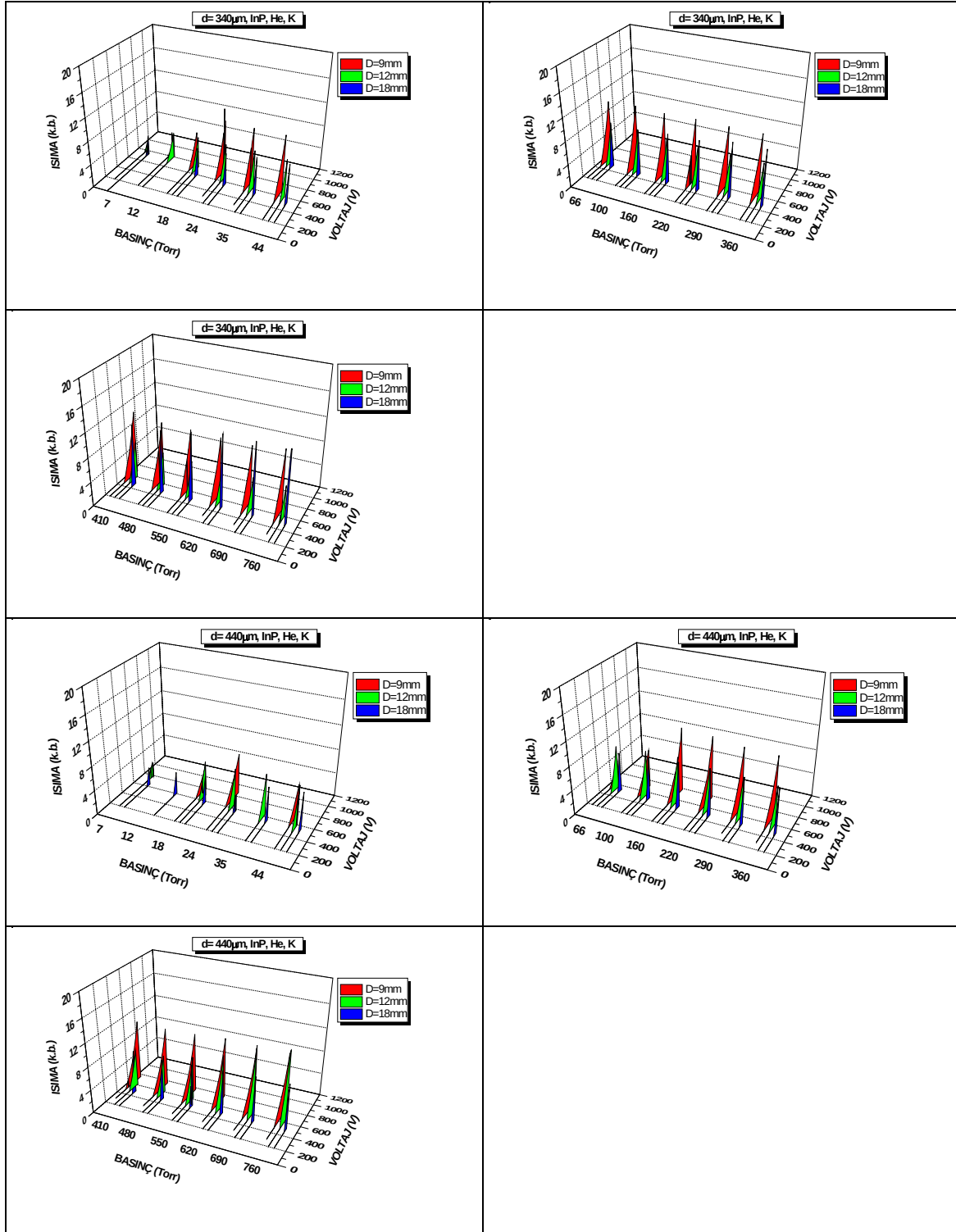
Şekil 7.18’de aydınlatma şiddeti K' ’da farklı elektrotlar arası mesafede farklı basınçlar için elektrot çapına bağlı üç boyutlu IVK grafikleri verilmiştir. Bu grafikler incelendiğinde düşük basınçlarda ışık emisyonunun düşük kaldığı görülmektedir. Elektrotlar arası mesafeler $d = 50 \mu\text{m}$ ve $d = 100 \mu\text{m}$ gibi nispeten düşük değerlerde düşük basınçlarda ışıma gözlenmemiş ya da küçük miktarlarda gözlenmiştir. Ayrıca grafiklerden çap değerleri arttıkça genel olarak ışık emisyonunun da arttığı gözlenmektedir.



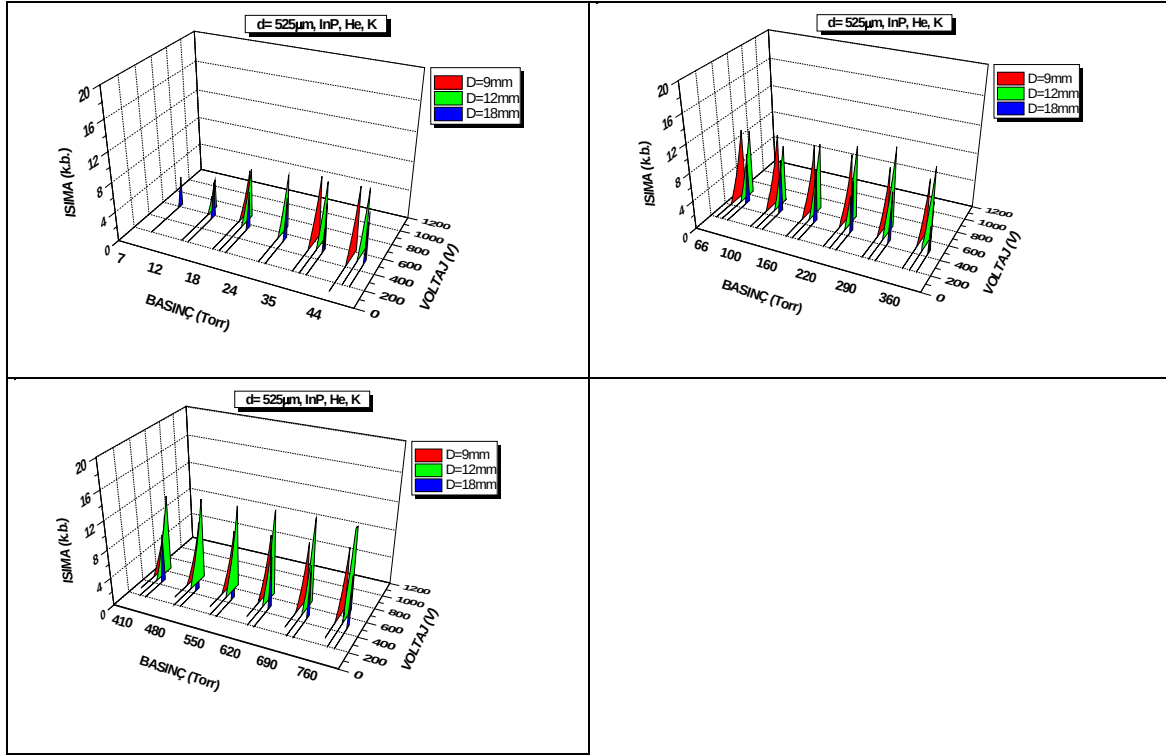
Şekil 7.18. Aydınlatma şiddeti K' ’da, farklı elektrotlar arası mesafelerde, farklı basınç değerlerinde, elektrot çapına göre üç boyutlu IVK grafikleri



Şekil 7.18. (devam) Aydınlatma şiddeti K'da, farklı elektrotlar arası mesafelerde, farklı basınç değerlerinde, elektrot çapına göre üç boyutlu IVK grafikleri

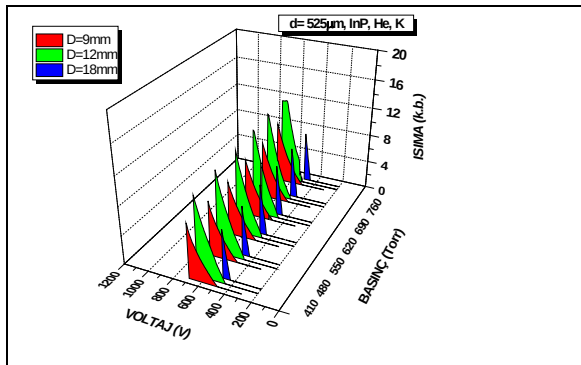


Şekil 7.18. (devam) Aydınlatma şiddeti K'da, farklı elektrotlar arası mesafelerde, farklı basınç değerlerinde, elektrot çapına göre üç boyutlu IVK grafikleri



Şekil 7.18. (devam) Aydınlatma şiddeti K'da, farklı elektrotlar arası mesafelerde, farklı basınç değerlerinde, elektrot çapına göre üç boyutlu IVK grafikleri

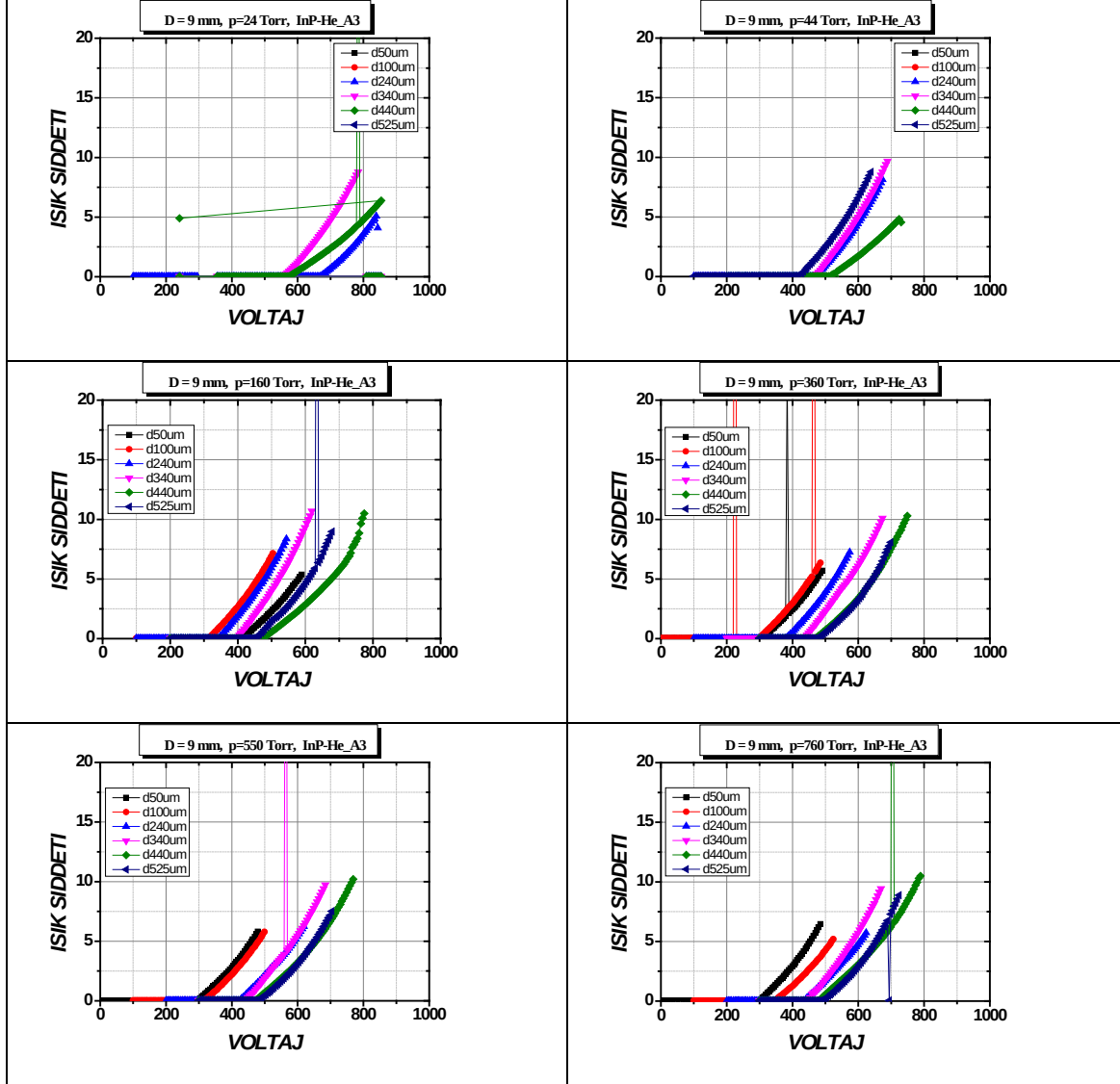
Şekil 7.19'da $d = 525 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafe ve aydınlatma şiddeti K koşullarında farklı basınçlarda elektrot çapına göre üç boyutlu IVK grafiği farklı bir açıdan örnek olarak sunulmaktadır. Grafikte sabit bir basınç değeri için elektrot çapı arttıkça eğrilerin ön tarafa (düşük voltaj tarafına) kaydığı görülmektedir. Ek olarak $p = 760$ Torr basınç altında $D = 12$ mm elektrot çapı değerine ait eğrinin üst tarafının düzleştiği görülmektedir. Bunun sebebi daha önce de açıklandığı gibi sistemimizde ışık emisyonunu ölçen fotoçoğaltıcının limit ölçüm değerine ulaşılmasıdır.



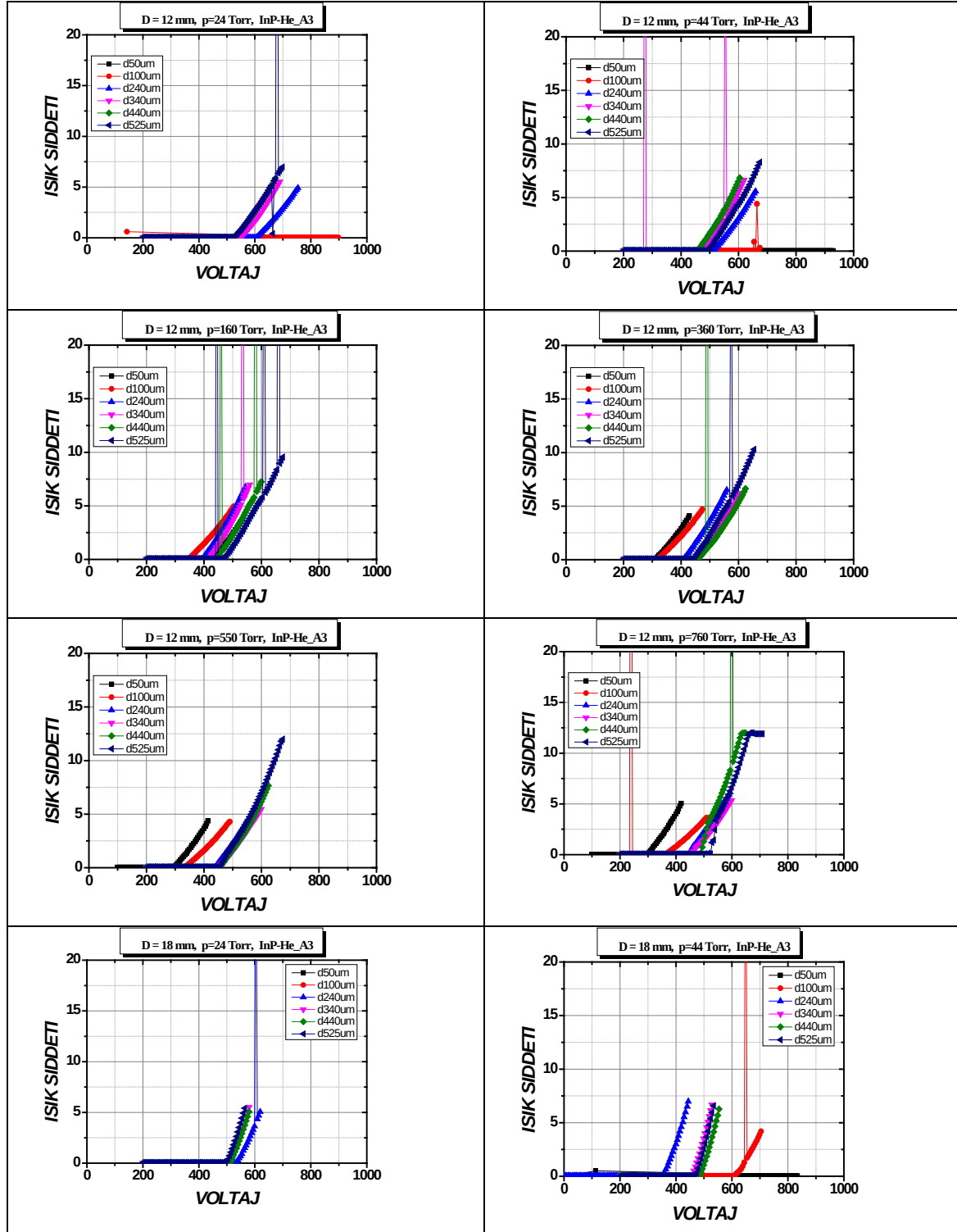
Şekil 7.19. Aydınlatma şiddeti K'da, $d = 525 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafede, 410 Torr – 760 Torr basınç değerleri aralığında elektrot çapına göre üç boyutlu IVK grafiği

7.2.4. Işıma – voltaj karakteristiğinin elektrotlar arası mesafeye bağlılığı

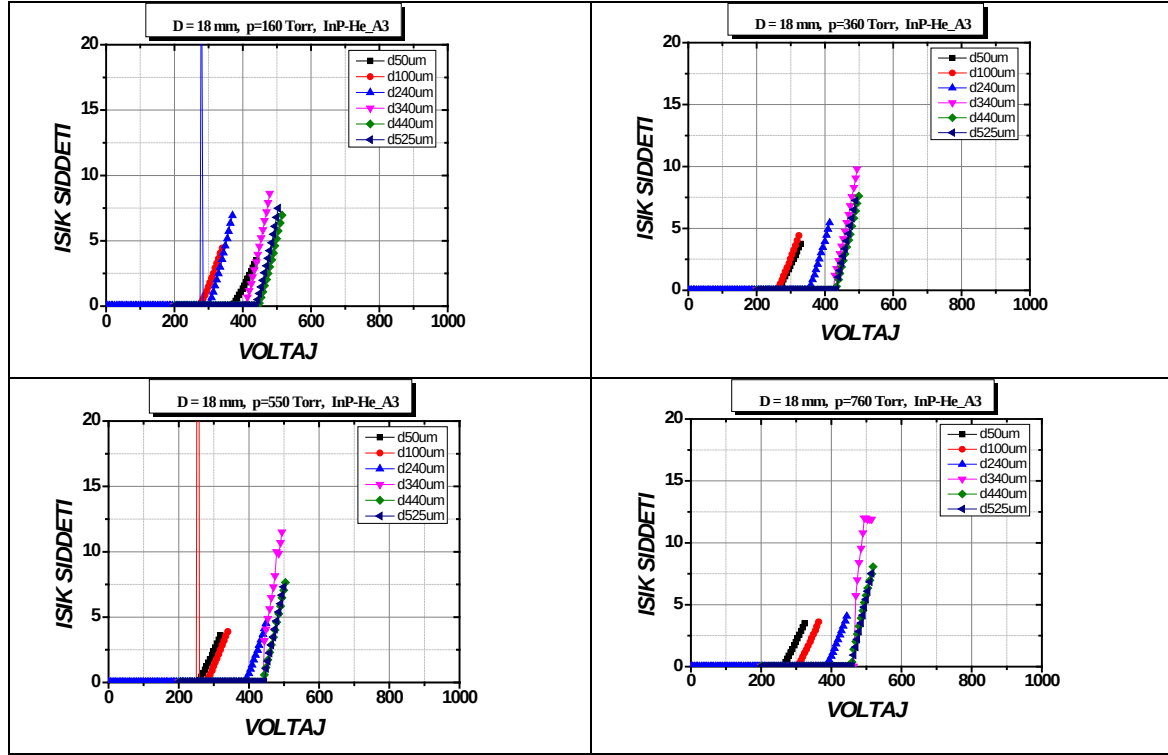
Deşarj hücresine ait ışıma – voltaj karakteristiklerinin elektrotlar arası mesafeye göre 2 boyutlu grafikleri Şekil 7.20’deki gibidir.



Şekil 7.20. Aydınlatma şiddeti A₃’de, farklı elektrot çaplarında, farklı basınç değerlerinde, farklı elektrotlar arası mesafe için iki boyutlu IVK grafikleri



Şekil 7.20. (devam) Aydınlatma şiddeti A₃'de, farklı elektrot çaplarında, farklı basınç değerlerinde, farklı elektrotlar arası mesafe için iki boyutlu IVK grafikleri



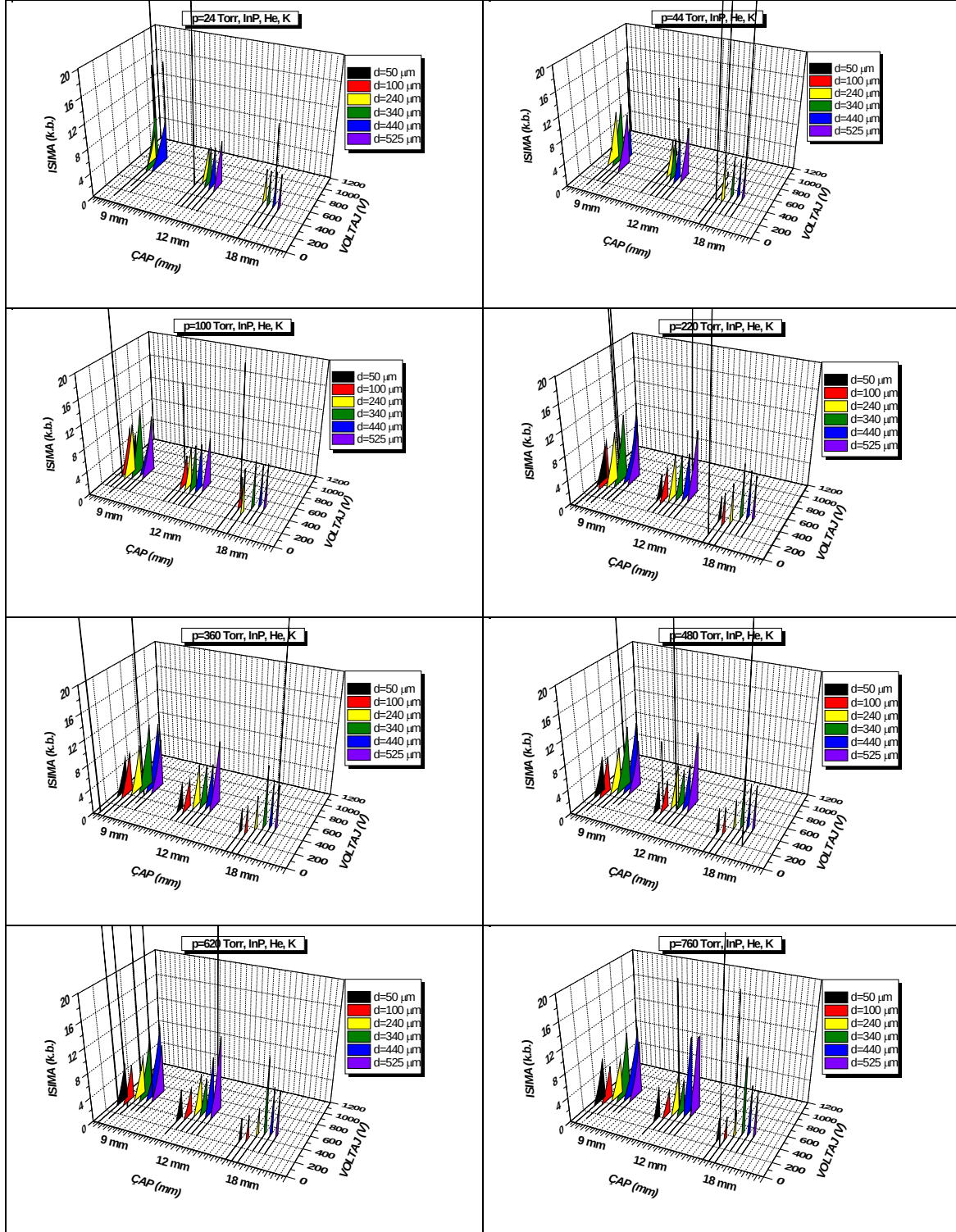
Şekil 7.20. (devam) Aydınlatma şiddeti A_3 'de, farklı elektrot çaplarında, farklı basınç değerlerinde, farklı elektrotlar arası mesafe için iki boyutlu IVK grafikleri

Şekil 7.20'de A_3 aydınlatma şiddeti altında, $D = 9$ mm, $D = 12$ mm ve $D = 18$ mm elektrot çaplarında, $p = 24$ Torr, $p = 44$ Torr, $p = 160$ Torr, $p = 360$ Torr, $p = 550$ Torr ve $p = 760$ Torr basınç değerlerinde farklı elektrotlar arası mesafeler için iki boyutlu IVK grafikleri çizilmiştir. Basıncın $p = 360$ Torr değerinden sonra elektrotlar arası mesafenin artmasıyla genel olarak hem ışımanın görülebildiği voltaj değerlerinin arttığı hem de kırılma voltajlarının arttığı görülmektedir. Elektrotlar arası mesafe $d = 50 \mu\text{m}$ 'ye ait eğrinin her bir elektrot çapı için yüksek voltajlardan başlayarak düşük voltajlara kaydığı görülmektedir. Elektrot çapı $D = 9$ mm için çizilen eğrilerin, diğer çap değerlerindeki eğrilere göre birbirlerinden daha iyi ayrıldıkları görülmektedir. Ek olarak $D = 18$ mm çap değerindeki eğrilerin eğiminin, diğer çap değerlerindeki eğrilerin eğimine göre daha büyük olduğu görülmektedir.

Deşarj hücresine ait ışıma – voltaj karakteristiklerinin elektrotlar arası mesafeye göre 3 boyutlu grafikleri aşağıdaki gibidir.

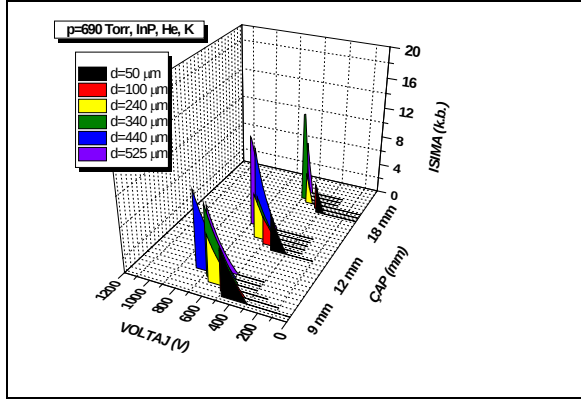
Şekil 7.21'de aydınlatma şiddeti K'da, farklı basınç ve elektrot çapı değerlerinde, elektrotlar arası mesafeye göre üç boyutlu IVK grafikleri görülmektedir. Grafiklerden

elektrotlar arası mesafe arttıkça eğrilerin geriye (yüksek voltaj değerlerine) doğru kaydığı görülebilmektedir. Bu ayrım özellikle yüksek basınç değerlerinde daha net olmaktadır.



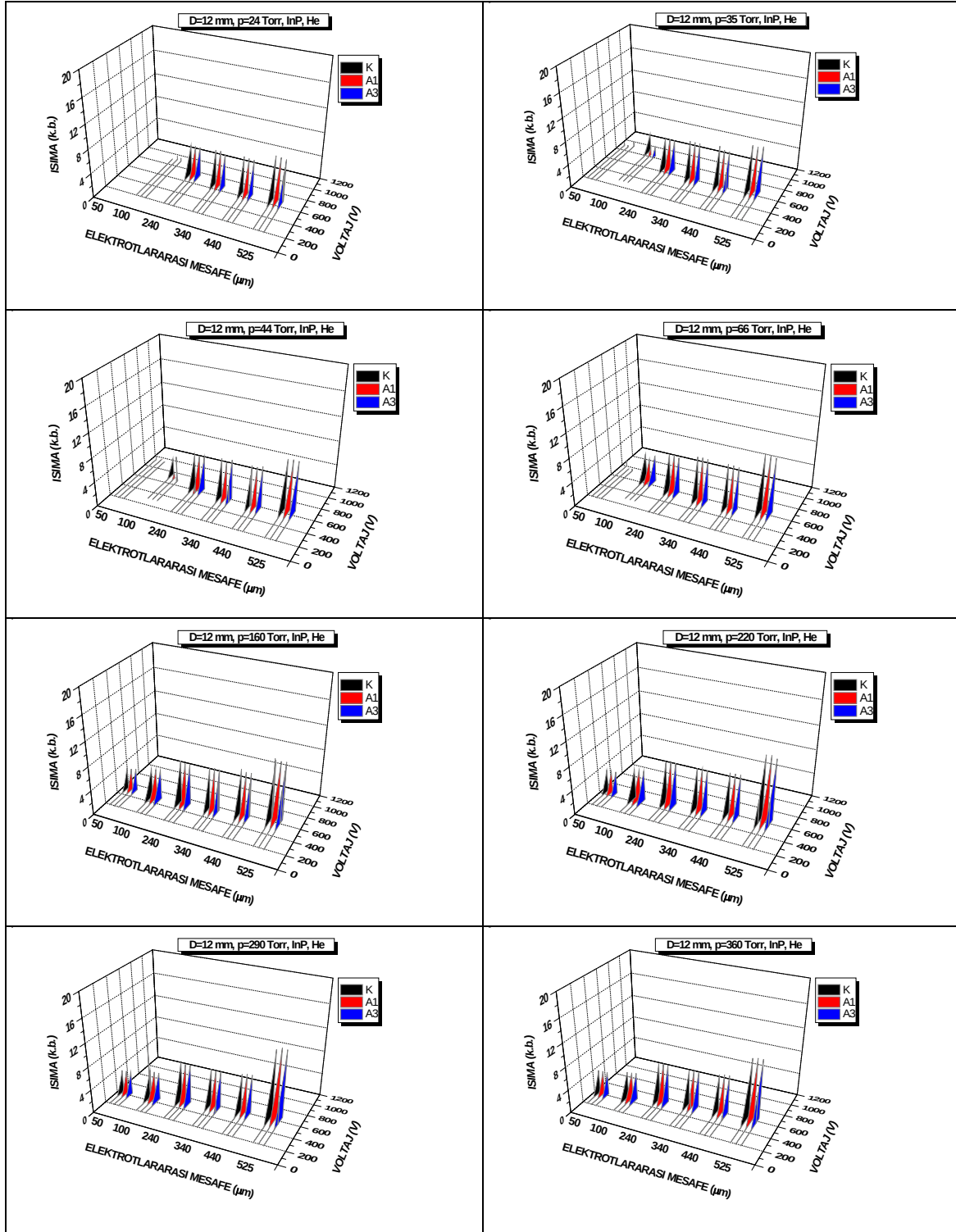
Şekil 7.21. Aydınlatma şiddeti K'da, farklı basınç ve farklı elektrot çapı değerlerinde, elektrotlar arası mesafeye göre üç boyutlu IVK grafikleri

Şekil 7.22’de aydınlatma şiddeti K’da, $p = 690$ Torr basınç değerinde, farklı elektrot çap değerlerinde, elektrotlar arası mesafeye göre üç boyutlu IVK grafiğinin farklı bir açıdan görünümü verilmiştir. Grafikten her bir çap değerinde elektrotlar arası mesafe arttıkça eğrilerin yüksek voltajlara doğru kaydığı görülmektedir. Yani sabit bir çap ve basınç değerinde elektrotlar arası mesafe arttıkça ışıma değerlerinin düştüğü görülmektedir.

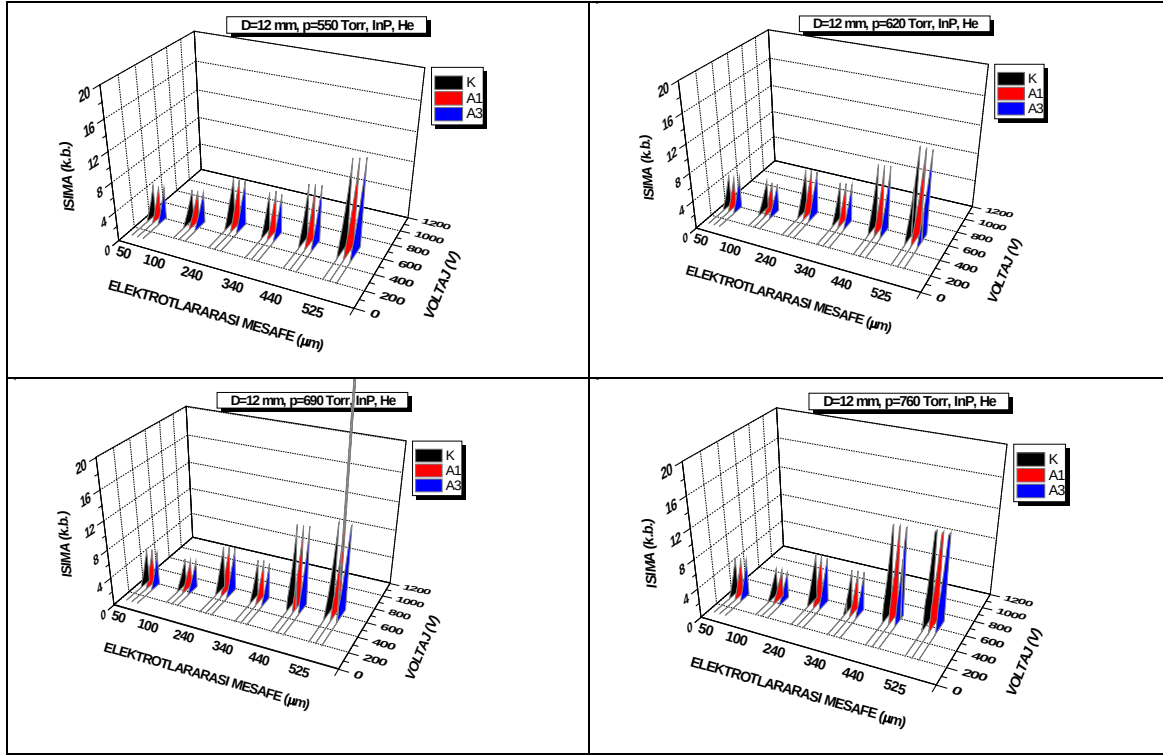


Şekil 7.22. Aydınlatma şiddeti K’da, $p = 690$ Torr basınç değerinde, farklı elektrot çap değerlerinde elektrotlar arası mesafeye göre üç boyutlu IVK grafiği

Şekil 7.23’de $D = 12$ mm sabit elektrot çap değerinde, farklı basınçlarda, farklı elektrotlar arası mesafelerde, farklı aydınlatma şiddetleri için üç boyutlu IVK grafikleri görülmektedir. Grafiklere göre düşük basınçlarda ($p = 66$ Torr değerine kadar) elektrotlar arası mesafe arttıkça eğriler düşük voltaj değerlerine doğru kaymış, yani ışıma artmıştır. Basıncın $p = 66$ Torr değerinde $d = 440$ µm elektrotlar arası mesafeye kadar eğriler yine düşük voltajlara kaymakla beraber $d = 525$ µm elektrotlar arası mesafede eğrilerin yüksek voltaj değerlerine kaydığı görülmektedir. Basıncın $p = 360$ Torr değerinden sonraki grafiklerde ise genel olarak elektrotlar arası mesafenin artmasıyla grafikler yüksek voltajlara doğru kaymış yani ışıma miktarı azalmıştır.



Şekil 7.23. D = 12 mm sabit elektrot çapı değerinde, farklı basınçlarda, farklı elektrotlar arası mesafe için aydınlatma şiddetine göre üç boyutlu IVK grafikleri



Şekil 7.23. (devam) $D = 12$ mm sabit elektrot çapı değerinde, farklı basınçlarda, farklı elektrotlar arası mesafe için aydınlatma şiddetine göre üç boyutlu IVK grafikleri

7.3. Mikrodeşarj Hücresinde Kırılma Eğrileri (Paschen Eğrileri)

Paralel plakalı bir mikrodeşarj hücresindeki elektronlar, dışsal bir kaynak tarafından uygulanan elektrik alan vasıtasıyla ivmelenirler ve yeterli bir enerjiye ulaştıklarında çarpışmalar sonucu atomları iyonlaştırabilirler. Böylece bir iyon ve iki yavaş elektron oluşur. Bu elektronlar da yine elektrik alan içerisinde ivmelenip başka iyonlaşmalara neden olabilirler. Ancak bir yandan da rekombinasyonlar yüklü tanecik sayısını azaltan bir etken olarak işlev görürler. Deşarjın büyümesi ve devamlılığı açısından pozitif iyonların katoda çarparak oradan ikincil elektronların serbest bırakılmasını sağlamaları gerekir. Bu ikincil elektronlar da çığ mekanizmasına katılarak gazın kırılmasına yardımcı olurlar. Böylece deşarj, kendini besleyen modda devam eder.

Kendini besleyen boşalma şartı daha önceki başlıklarda da incelenmiş ve $\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1$ koşulu ortaya konulmuştu. Bu bağıntı düzenlenip aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\alpha d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \quad (7.1)$$

Townsend'in birincil iyonizasyon katsayısı α , Eş. 7.2'deki gibidir.

$$\alpha = A \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) \quad (7.2)$$

Eş. 7.2, Eş. 7.1'de yerine yazılırsa;

$$A p d \exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)$$

$$\exp\left(-\frac{Bp}{E}\right) = \frac{\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)}{A p d}$$

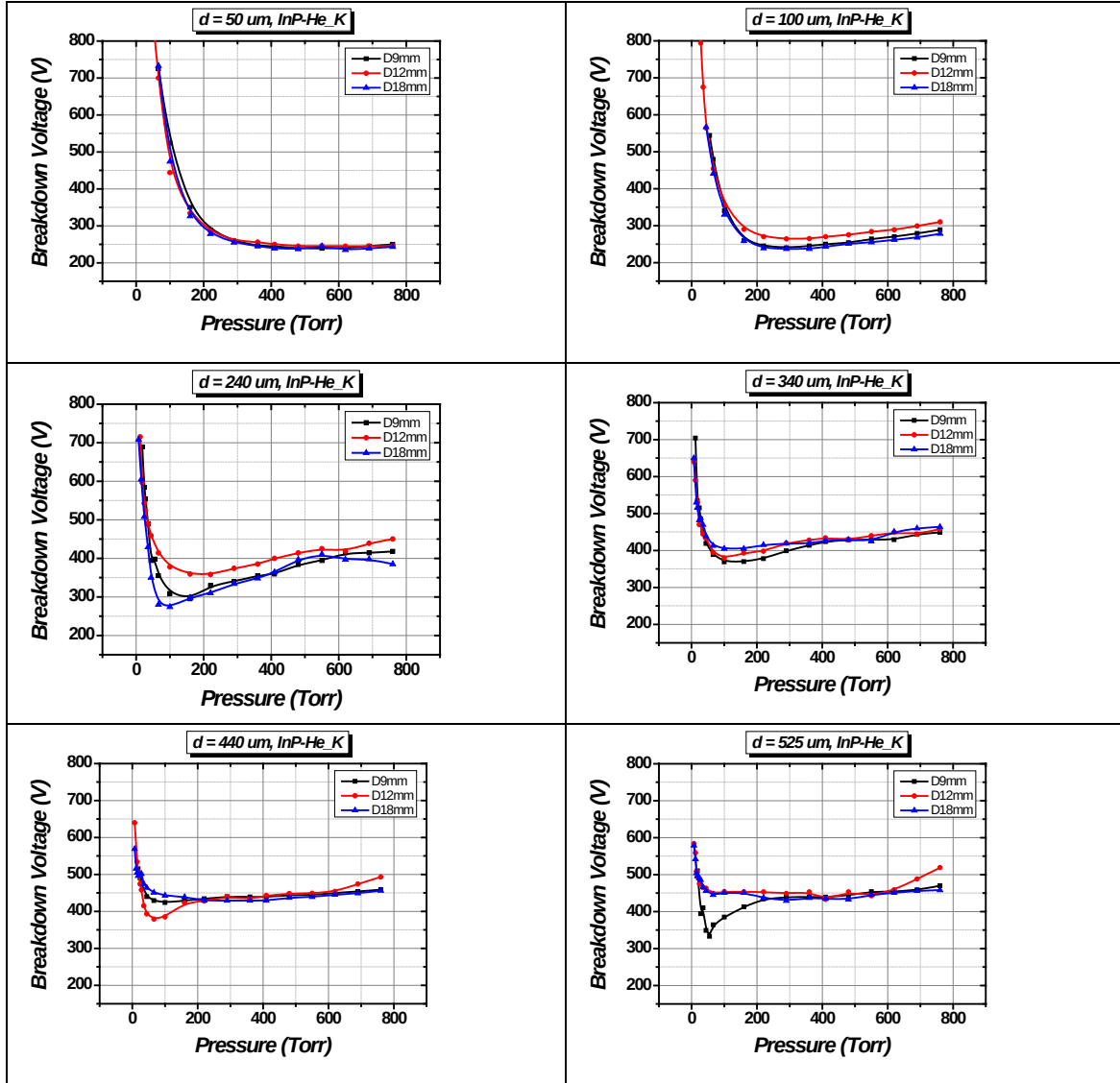
$$-\frac{Bp}{E} = \ln\left[\frac{\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)}{A p d}\right]$$

$$E = \frac{Bp}{\ln[A p d - \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)]}$$

$$V_K = \frac{B p d}{\ln[A p d - \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)]} \quad (7.3)$$

Eş. 7.3'de kırılma (breakdown) voltajının bağıntısı verilmiştir [94]. Burada p basınç, d elektrotlar arası uzaklık, A ve B sabitleri ise farklı gazlar için farklı deneysel sabitlerdir.

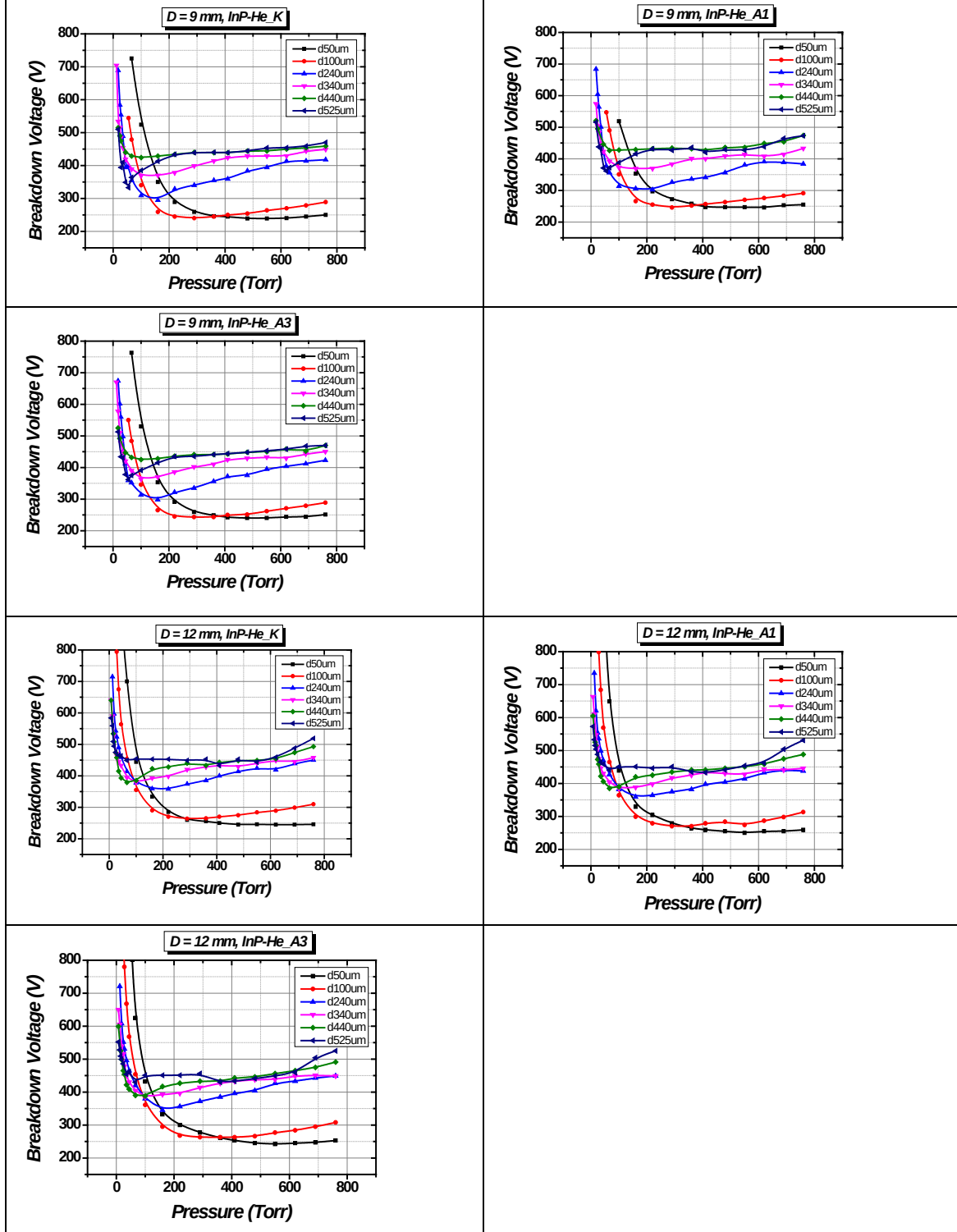
Şekil 7.24'de farklı elektrotlar arası mesafede, aydınlatma şiddeti K'da, elektrot çapına (D) göre Paschen eğrileri görülmektedir. Öncelikle elektrotlar arası mesafenin $d = 240 \mu\text{m}$ değerine kadar en küçük kırılma voltajlarının $D = 18 \text{ mm}$ çap değerine ait eğrilerde olduğu görülmektedir. Elektrotlar arası mesafenin $d = 340 \mu\text{m}$ ve $d = 525 \mu\text{m}$ olduğu değerlerde en düşük kırılma voltajları $D = 9 \text{ mm}$ çap değerlerine ait eğrilerde görülürken, elektrotlar arası mesafenin $d = 440 \mu\text{m}$ olduğu değerde en düşük kırılma voltajları $D = 12 \text{ mm}$ çap değerine ait eğride görülmektedir. Ayrıca elektrotlar arası mesafenin $d = 50 \mu\text{m}$ değeri için eğrilerde bir Paschen minimumu görülmezken, diğer elektrotlar arası mesafeler için bu minimumlar en az bir çap değeri eğrisi için görülebilmektedir. Özellikle elektrotlar arası mesafenin $d = 240 \mu\text{m}$ olduğu değerde her üç elektrot çap değeri için de Paschen minimumu ve bu minimumun sağ ve sol kolları net bir şekilde görülebilmektedir.



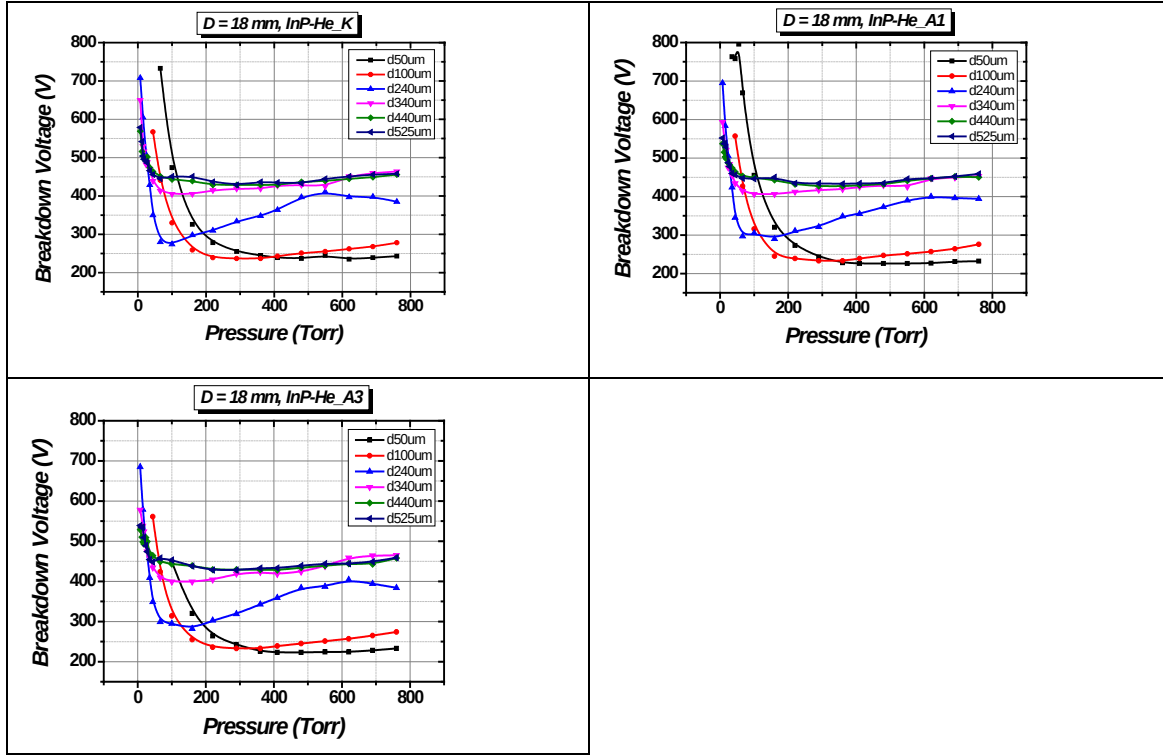
Şekil 7.24. Farklı elektrotlar arası mesafelerde, aydınlatma şiddeti K’da, elektrot çapına (D) göre Paschen eğrileri

Şekil 7.25’de farklı aydınlatma şiddetlerinde, farklı çap değerlerinde, elektrotlar arası mesafeye göre Paschen eğrileri görülmektedir. Grafiklerden görüldüğü kadarıyla elektrotlar arası mesafenin artmasıyla eğriler yüksek voltaj değerlerine çıkmaktadır. Yani elektrotlar arası mesafe arttıkça kırılma voltajı da artmıştır. Ayrıca elektrotlar arası mesafenin artmasıyla Paschen minimumlarının genellikle düşük basınç değerlerine kaydığı görülmektedir. Yani elektrotlar arası mesafe arttıkça V_{Kmin} (minimum kırılma voltajı) artmakta, p_{min} (minimum kırılma basıncı) azalmaktadır. Paschen minimumlarının sağ kolu, yatay bir yol takip etme eğilimindedir. Elektrotlar arası mesafenin $d = 50 \mu\text{m}$ ve $d = 100 \mu\text{m}$ olduğu durumlara ait eğrilerin birbirlerine yakın bir seyir izlediği, diğer elektrotlar

arası mesafelere ait eğrilerin ise bunlardan ayrı bir şekilde bir arada bulunduğu görülmektedir.



Şekil 7.25. Farklı aydınlatma şiddetlerinde, farklı çap değerlerinde, elektrotlar arası mesafeye (d) göre Paschen eğrileri



Şekil 7.25. (devam) Farklı aydınlatma şiddetlerinde, farklı çap değerlerinde, elektrotlar arası mesafeye (d) göre Paschen eğrileri

Çizelge 7.2’de $D = 12$ mm elektrot çap değerinde, aydınlatma şiddeti K altında, farklı elektrotlar arası mesafelere göre kırılma voltajı – basınç değerleri gösterilmiştir. Tabloda minimum kırılma voltajları sarı renk ile vurgulanmıştır. Bu tabloya göre elektrotlar arası mesafenin artmasıyla minimum kırılma voltajlarının (V_{Kmin}), düşük basınç değerlerine kaydığı görülmektedir.

Çizelge 7.2. Elektrot çapı $D = 12$ mm, aydınlatma şiddeti K için farklı elektrotlar arası mesafelerde kırılma voltajı – basınç tablosu

D = 12 mm						
	d = 50 μ m	d = 100 μ m	d = 240 μ m	d = 340 μ m	d = 440 μ m	d = 525 μ m
Basınç (Torr)	V_K (volt)	V_K (volt)	V_K (volt)	V_K (volt)	V_K (volt)	V_K (volt)
7				640	640	584
12			715	590		559
15					534	509
18			597	530	508	494
24		870	543	470	474	475
28		794	524	471	458	
35		675	490	444	415	465

Çizelge 7.2. (devam) Elektrot çapı $D = 12$ mm, aydınlatma şiddeti K için farklı elektrotlar arası mesafelerde kırılma voltajı – basınç tablosu

44		564	459	433	393	463
66	700	454	414	394	379	449
100	444	355	378	379	385	454
160	334	290	359	393	423	453
220	285	270	358	398	428	453
290	260	264	374	420	440	449
360	256	265	385	428	433	453
410	250	270	400	434	443	433
480	245	275	414	429	448	453
550	246	284	425	440	449	443
620	245	289	419	449	454	459
690	245	299	439	444	474	488
760	246	310	450	458	493	519

7.4. He ve Hava Gazlarının Karşılaştırılması

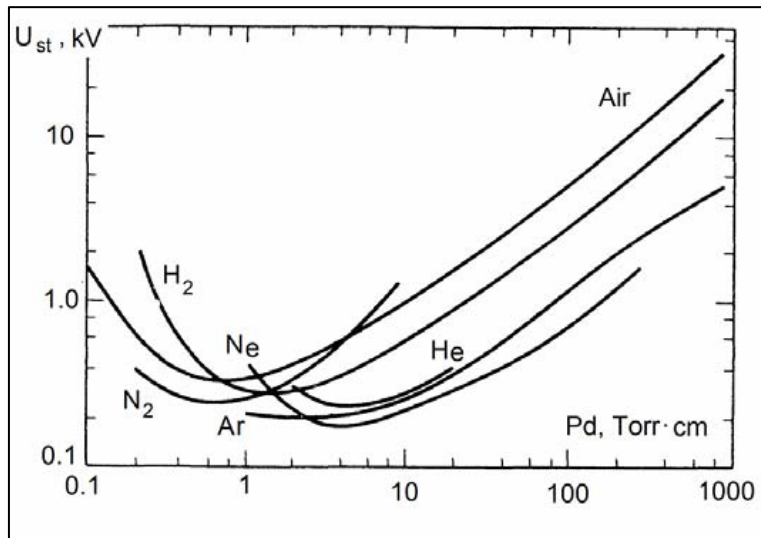
Bir deşarj hücrelerinde deşarjın gelişimini etkileyen en önemli parametrelerden biri de gazın cinsidir. Tezimizde He gazı ağırlıklı olmak üzere hava gazı da bazı parametreler altında kullanılmıştır. Bu iki gazın deşarj özelliklerinden kısaca bahsetmek faydalı olacaktır.

Çalışma gazında nemli hava olması OH radikalleri, O atomu, O_3 molekülü ve H_2O_2 gibi çeşitli reaktif türler üretir. Biyotıpta plazma jetlerinin kullanımında reaktif türlerin fazlalığı istenilen bir özelliktir [15].

Plazma jetlerinde kullanılan gaz genellikle pahalı bir gaz olan He gazıdır. He gazının termal iletkenliği iyi, kırılma voltajı düşük ve kimyasal olarak aktif olmayan bir gazdır [35]. He gazı hava gazı ile safsızlaştırılarak hem maliyet düşürülür, hem He gazının stabil boşalma özellikleri kullanılır, hem de hava gazından üretilen reaktif türlerin kimyasal özelliklerinden yararlanılmış olur. Hava gazındaki oksijen, nitrojen ve su kaynaklı reaktif türler dezenfeksiyon açısından önemlidir. Zaten endüstriyel He gazının içinde 10 ppm (parts per million) kadar hava gazı bulunduğundan safsızlık kaçınılmazdır. Helyum – hava karışımının yanı sıra daha ucuz bir gaz olan Ar gazına ek olarak bir miktar oksijen gazı kullanılmasıyla reaktif ürün zenginliği oluşturularak sterilizasyon özelliği artırılmış olur [14, 16].

Hava safsızlığı deşarj voltajını artırır, reaktif türlerin üretiminin artmasıyla antimikrobiyal etki artar. Ayrıca bu reaktif türler katot malzemesiyle de etkileşime girerek yüzeyin elektron emisyon özelliklerini değiştirebilirler. Oksidasyon etkisi bu duruma örnek olarak verilebilir. Ek olarak bu etkileşim sonucunda yeni türler meydana gelebileceğinden hava plazmasında kararsızlıklar görülür [29, 50].

Soygazlar ise hava gazına göre daha kararlı bir deşarj rejimine sahiptir. Özellikle atmosferik basınçlı plazmalarda ark deşarj rejimine geçiş daha olası olduğundan bu plazmalarda hava gazındansa soygaz kullanmak bu olumsuzluğu geciktirebilir [18, 29, 32]. Şekil 7.26’de bazı gazlara ait Paschen eğrileri gösterilmektedir.

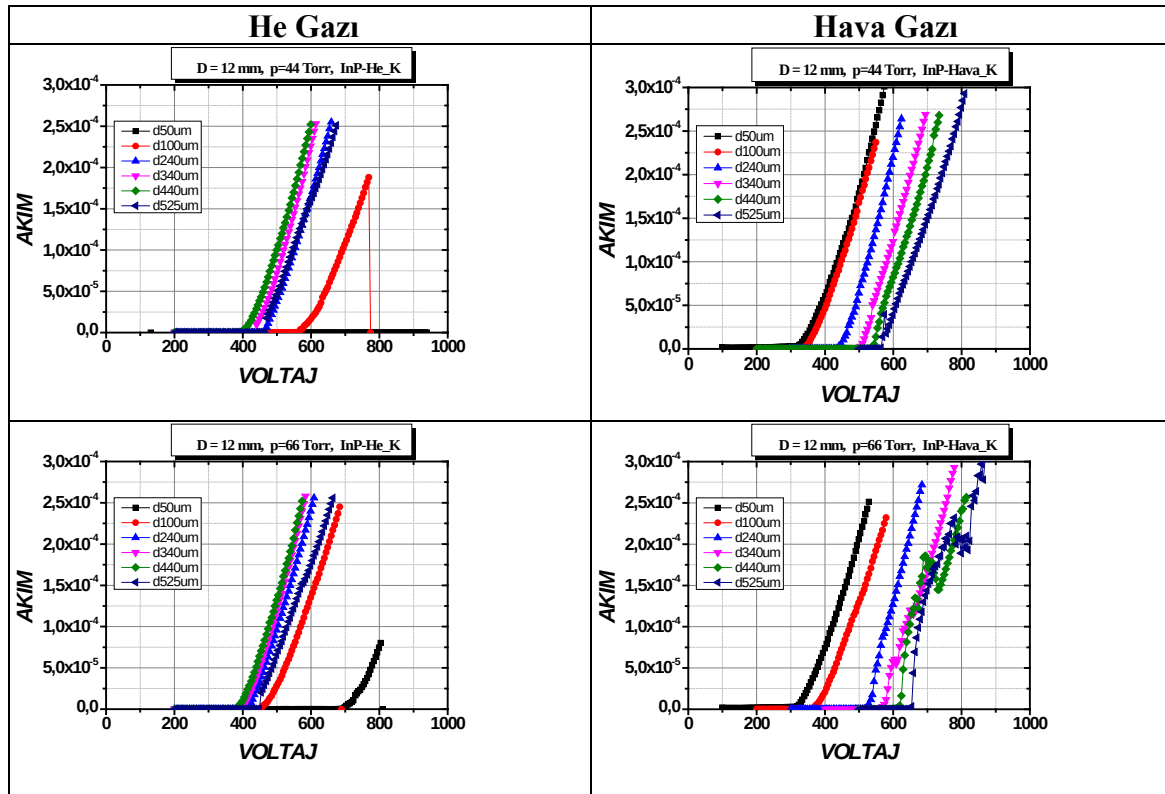


Şekil 7.26. Bazı gazlara ait Paschen eğrileri [95]

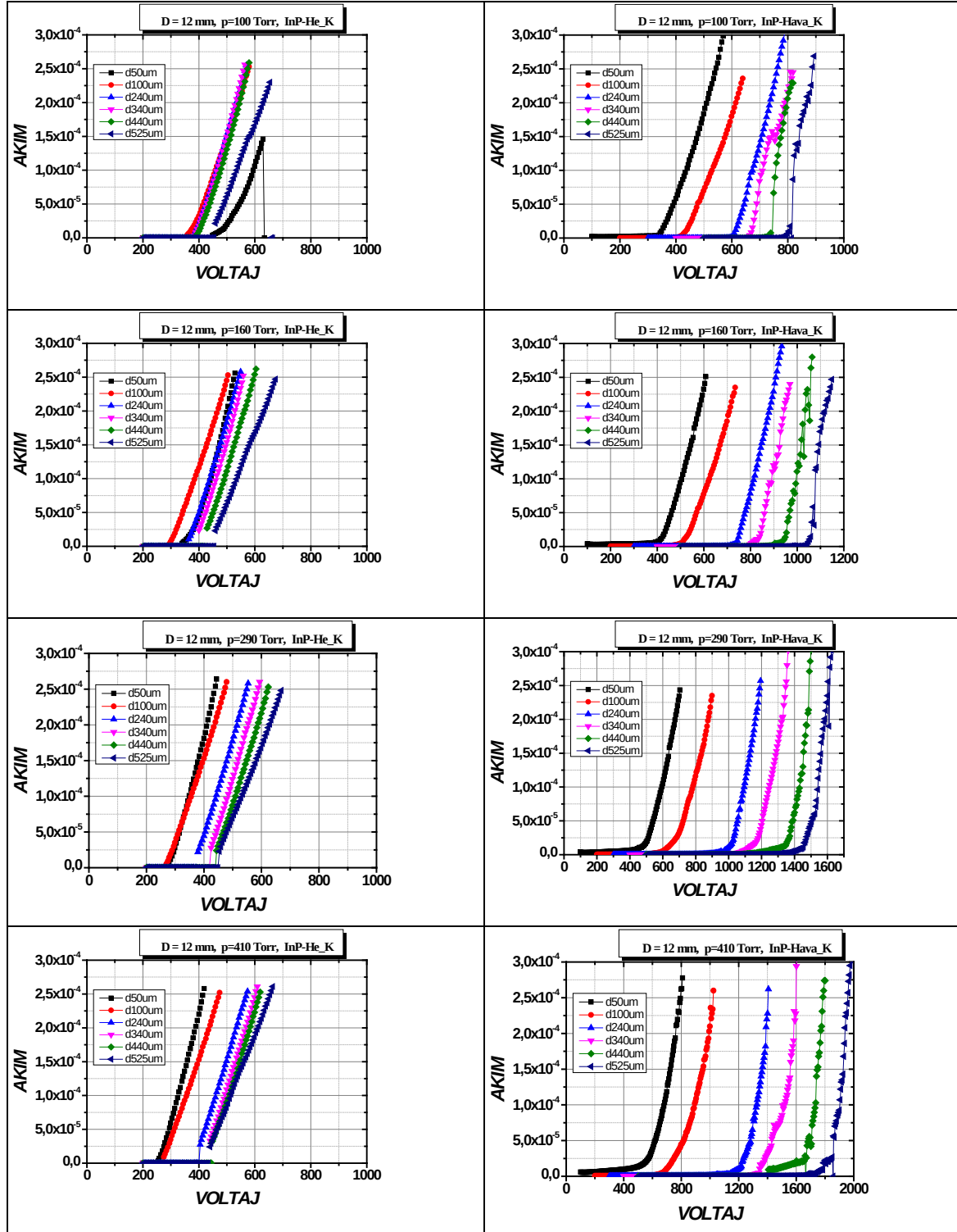
Tez kapsamında hava gazı için yalnızca $D = 12$ mm çap değerinde ölçümler alınabildiğinden helyum ve hava gazlarının karşılaştırılması yalnızca bu çap değerinde yapılacaktır. Ayrıca helyum gazı ile yapılan deneylerimizdeki tüm elektrotlar arası mesafeler için hava gazında da ölçümler alınmıştır. Basınç değerleri 7 Torr ile 760 Torr arasında değiştirilmiştir.

Şekil 7.27’de $D = 12$ mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K ’da, farklı basınçlarda, elektrotlar arası mesafeye göre helyum ve hava plazmalarına ait 2 boyutlu AVK’lar görülmektedir. Grafiklerden helyum gazına ait eğrilerin dar bir aralıkta (200 volt – 800 volt aralığı) dizildiği görülürken hava gazına ait eğrilerin ise düşük basınçlarda dar bir

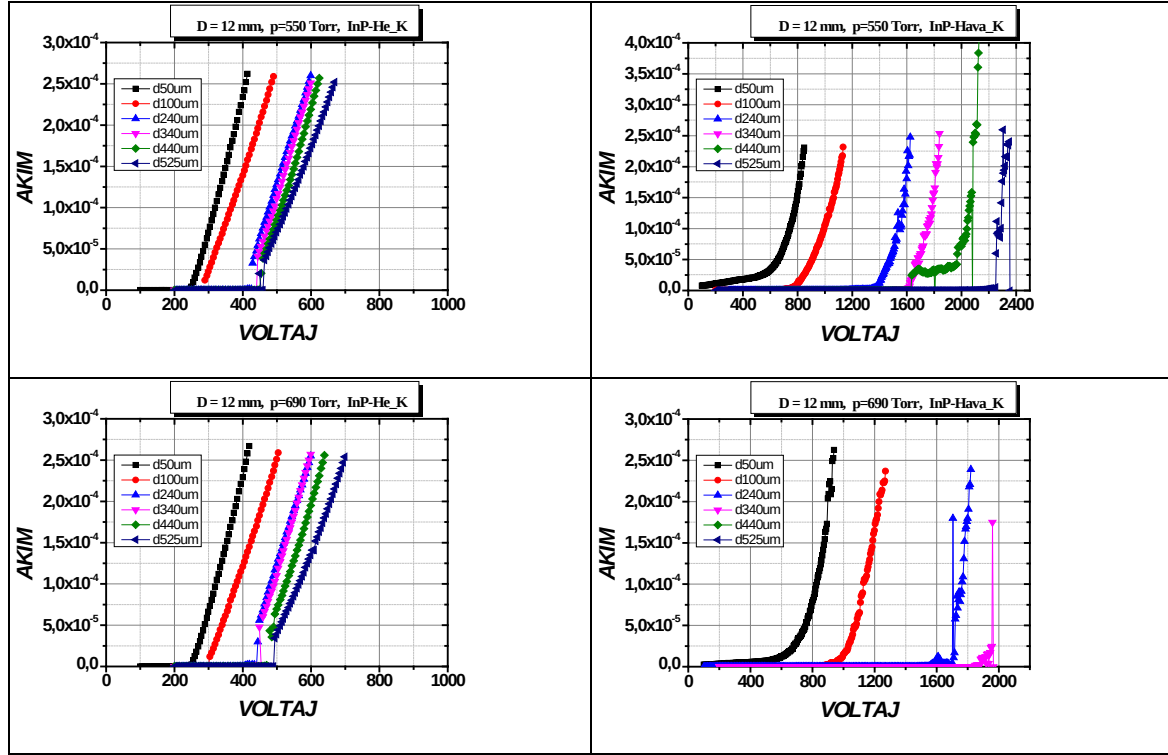
aralıkta dizilmelerinin yanında yüksek basınçlarda ise geniş bir aralığa yayıldığı (200 volt – 2400 volt aralığı) görülmektedir. Elektrotlar arası mesafenin artışı hava gazı plazmasında kırılma voltajları arasındaki farkın helyum gazı ortamına göre daha fazla artmasına neden olmuştur. Ayrıca helyum plazma ortamına ait eğriler lineer bir düzen sergilerken hava plazmasına ait eğrilerde kararsızlıklar ve NDR'ler (Negative Differential Resistance) gözlenmektedir. Özellikle hava gazı plazması için çizilen $p = 66$ Torr basınçta $d = 440 \mu\text{m}$ ve $d = 525 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafelere ait eğrilerde; $p = 100$ Torr basınçta $d = 340 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafeye ait eğride; $p = 160$ Torr basınçta $d = 440 \mu\text{m}$ ve $d = 525 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafelere ait eğrilerde; $p = 290$ Torr basınçta $d = 525 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafeye ait eğride; $p = 550$ Torr basınçta $d = 525 \mu\text{m}$ elektrotlar arası mesafeye ait eğride NDR varlığı net bir şekilde görülebilmektedir.



Şekil 7.27. $D = 12$ mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K 'da, farklı basınçlarda, elektrotlar arası mesafeye göre helyum ve hava plazmalarına ait 2 boyutlu AVK'ların karşılaştırması

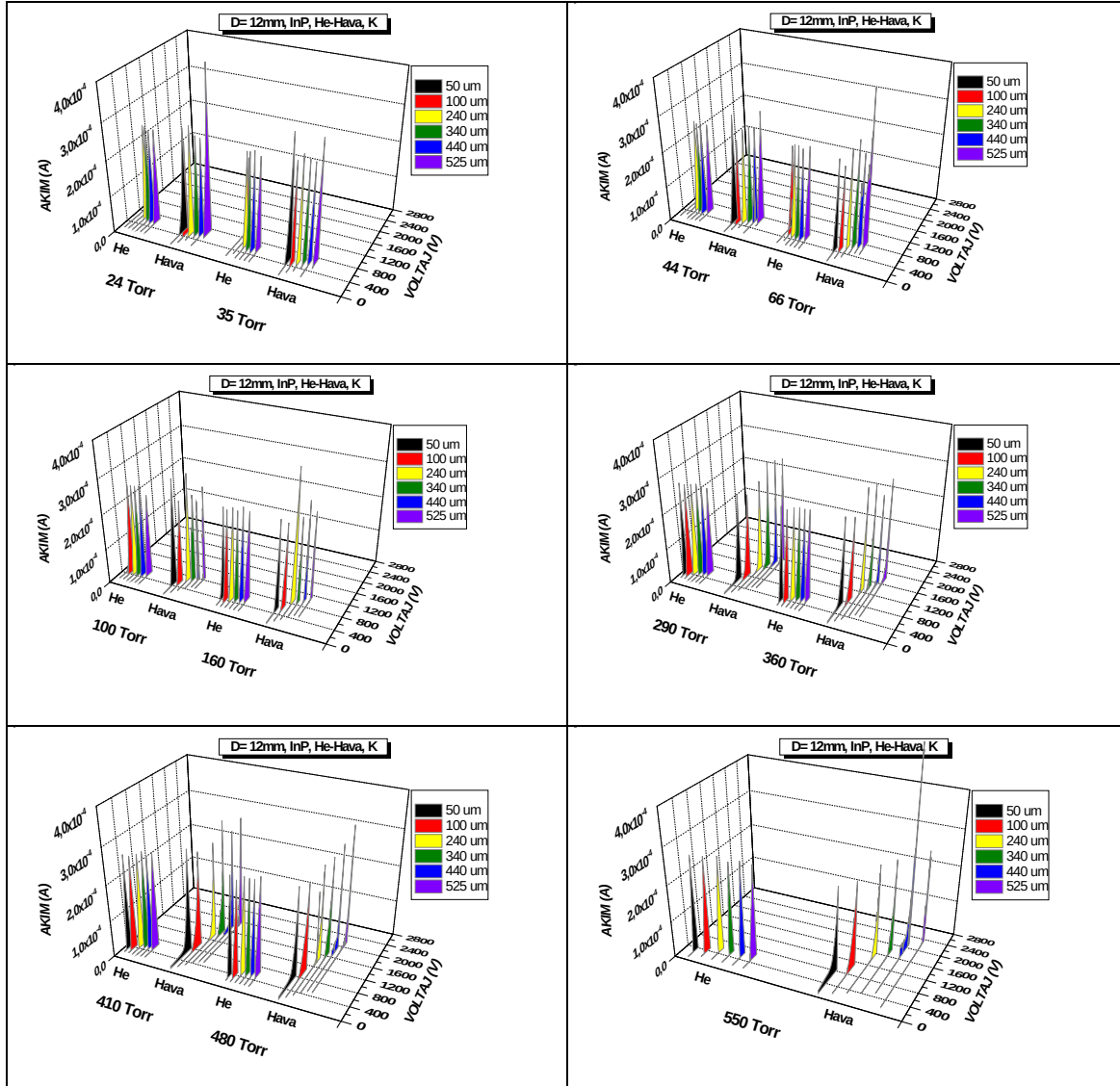


Şekil 7.27. (devam) D = 12 mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K'da, farklı basınçlarda, elektrotlar arası mesafeye göre helyum ve hava plazmalarına ait 2 boyutlu AVK'ların karşılaştırması



Şekil 7.27. (devam) D = 12 mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K'da, farklı basınçlarda, elektrotlar arası mesafeye göre helyum ve hava plazmalarına ait 2 boyutlu AVK'ların karşılaştırması

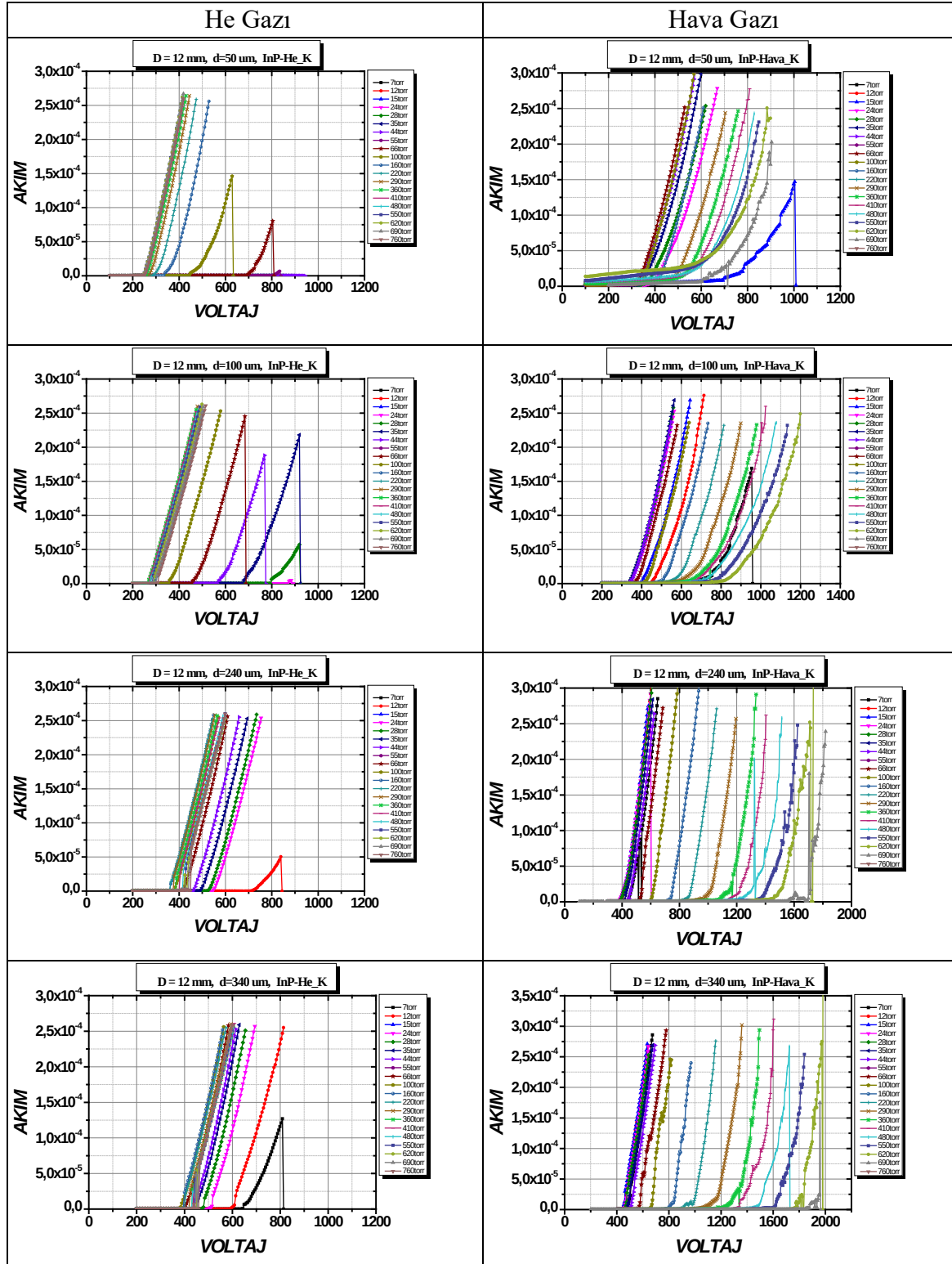
Şekil 7.28'de D = 12 mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K'da, farklı basınçlarda, elektrotlar arası mesafeye göre helyum ve hava gazlarına ait 3 boyutlu AVK'ların karşılaştırılması görülmektedir. Grafiklere göre düşük basınçlarda helyum ve hava plazmalarına ait eğrilerin birbirlerine yakın olduğu görülürken artan basınç değerlerinde helyum plazmasına ait eğrilerin nispeten birbirlerine yakın olmaya devam ettiği, ancak hava plazmasına ait eğrilerin birbirlerinden net bir şekilde ayrıldığı görülmektedir. Yani yüksek basınçlarda artan elektrotlar arası mesafe ile eğrilerin de yüksek voltajlara kayması, hava plazmasında helyum plazmasına göre daha net tespit edilmektedir.



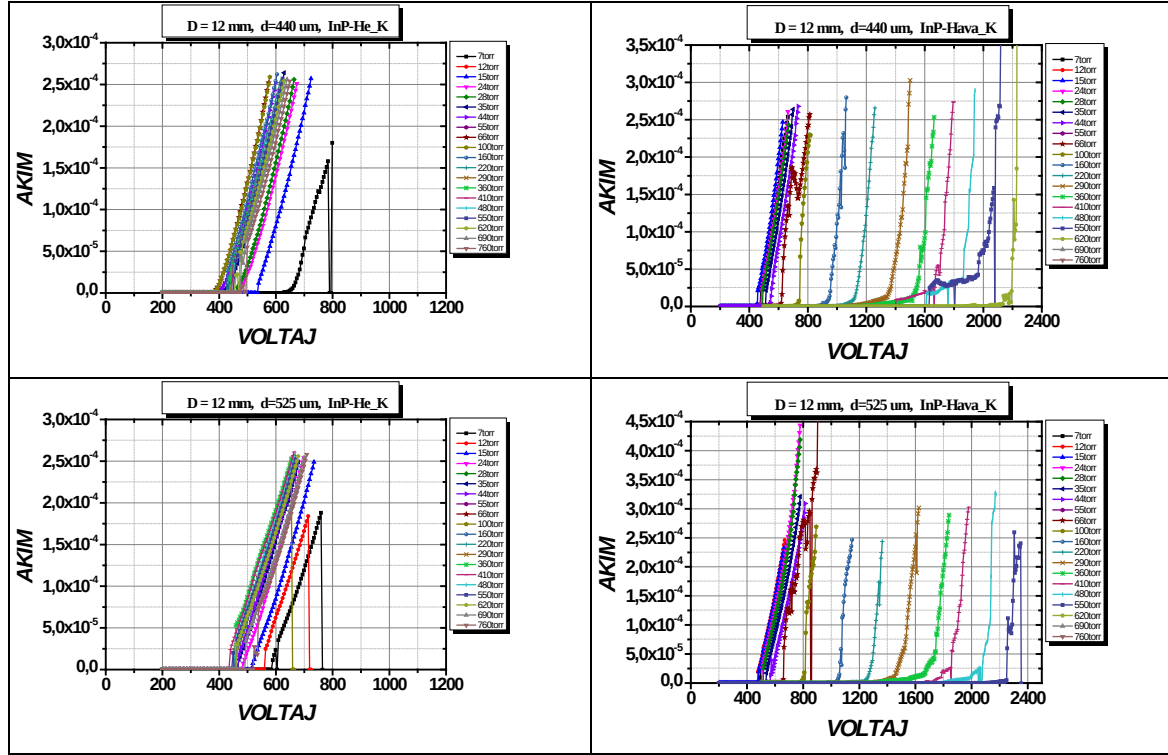
Şekil 7.28. D = 12 mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K’da, farklı basınçlarda, elektrotlar arası mesafeye göre helyum ve hava gazlarına ait 3 boyutlu AVK’ların karşılaştırılması

Şekil 7.29’da D = 12 mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K’da, farklı elektrotlar arası mesafelerde, basınca göre helyum ve hava plazmalarına ait 2 boyutlu AVK’ların karşılaştırması görülmektedir. Grafikler incelendiğinde helyum plazmasına ait eğrilerin artan elektrotlar arası mesafelerle birlikte daha dar bir voltaj aralığına yığıldıkları görülürken, hava plazmasına ait eğrilerin ise artan elektrotlar arası mesafelerle birlikte daha geniş bir voltaj aralığına yayıldığı görülmektedir. Hava plazmasına ait eğrilerde kararsızlıklar ve NDR’ler, helyum plazmasına göre daha belirgindir. Her iki plazma ortamı içinde basıncın belirli bir kritik değerine kadar eğriler düşük voltajlara kaymış, bu kritik basınç değerinden sonra basıncın artmasıyla eğriler yüksek voltaj değerlerine kaymıştır.

Yani basıncın belirli bir kritik değere kadar artması akımı artırırken, bu kritik değerden sonra basıncın artmasıyla akım azalmaktadır.



Şekil 7.29. D = 12 mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K'da, farklı elektrotlar arası mesafelerde, basınca göre helyum ve hava plazmalarına ait 2 boyutlu AVK'ların karşılaştırması



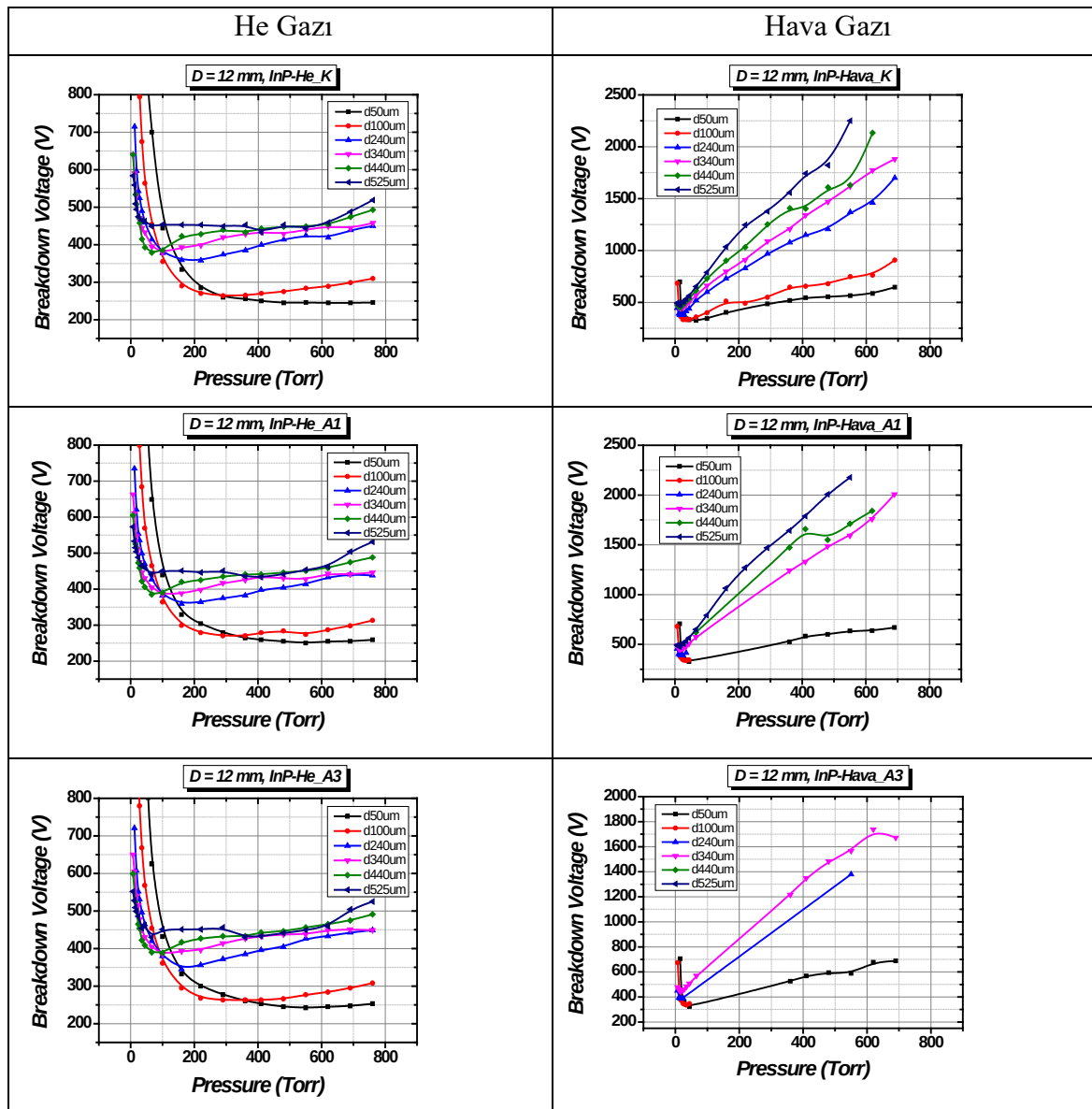
Şekil 7.29. (devam) D = 12 mm elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K'da, farklı elektrotlar arası mesafelerde, basınca göre helyum ve hava plazmalarına ait 2 boyutlu AVK'ların karşılaştırması

Çizelge 7.3'den de görüleceği gibi dönüm noktası sayılabilecek bu kritik basınç değeri helyum plazmasında yüksek değerler alırken, hava plazmasında daha düşük değerler almıştır. Her iki plazma ortamında da elektrotlar arası mesafe arttıkça kritik basınç değeri genel olarak azalmıştır.

Çizelge 7.3. Farklı elektrotlar arası mesafeler için helyum ve hava plazmasına ait grafiklerdeki kritik basınç değerleri

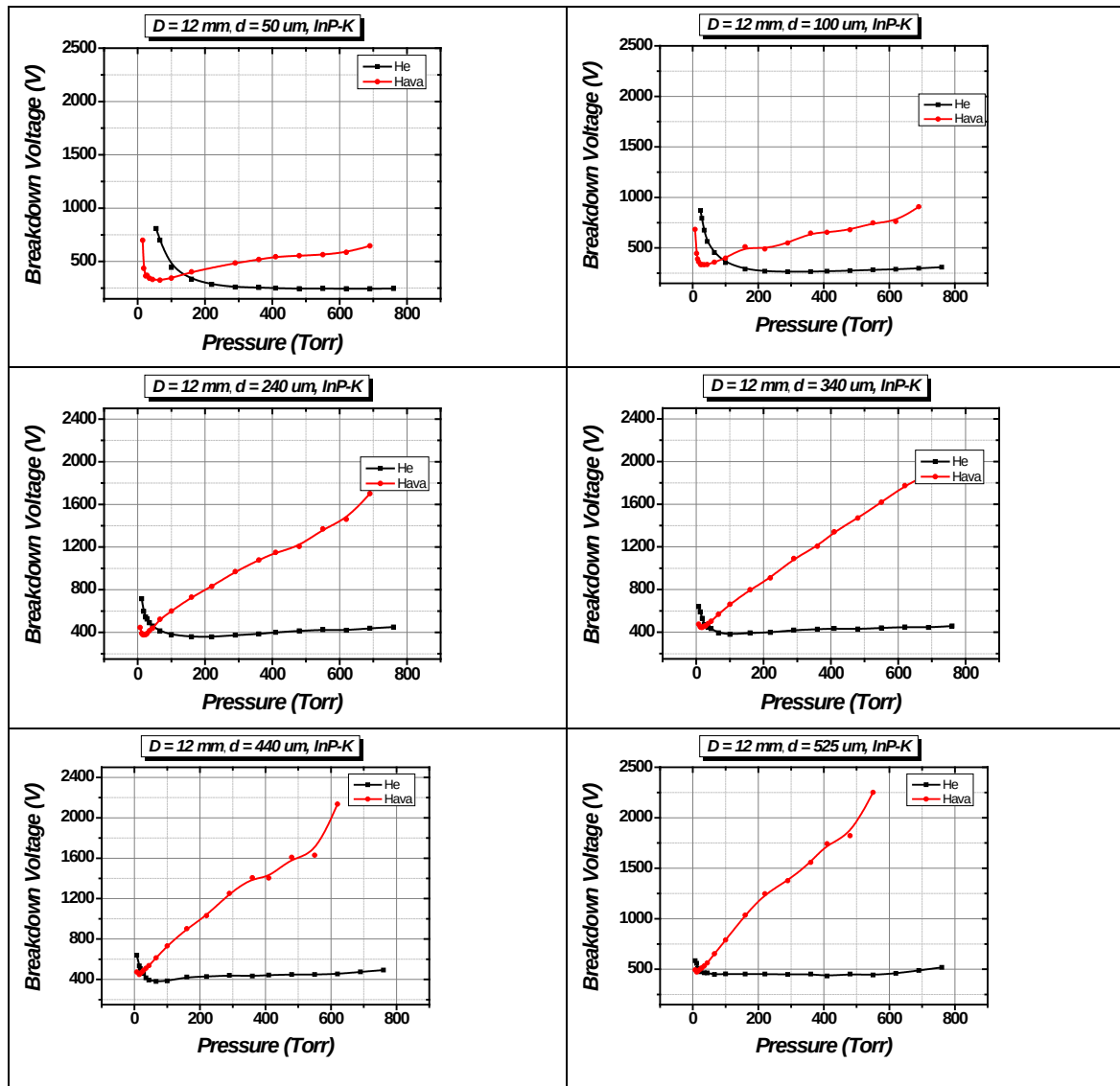
Elektrotlar Arası Mesafe	Kritik Basınç Değerleri (Torr)	
	He	Hava
d = 50 μm	620 Torr	66 Torr
d = 100 μm	360 Torr	35 Torr
d = 240 μm	220 Torr	15 Torr
d = 340 μm	160 Torr	15 Torr
d = 440 μm	66 Torr	15 Torr
d = 525 μm	360 Torr	12 Torr

Şekil 7.30'da $D = 12$ mm elektrot çapında, farklı aydınlatma şiddetlerinde, farklı elektrotlar arası mesafeler için helyum ve hava plazmalarına ait Paschen eğrilerinin karşılaştırılması görülmektedir. Grafikler incelendiğinde eğrilerdeki Paschen minimumunun sağ kolu helyum gazında yatay bir seyir izlerken, hava gazında üstel bir şekilde artmıştır. Ayrıca hava plazmasındaki eğrilerin 2250 volt değerine kadar çıkabildiği görülmektedir. Hava plazması için gerekli kırılma voltajı genellikle helyum plazması için gerekenden daha büyüktür. Her iki gaz plazmasına ait grafiklerde de elektrotlar arası mesafe arttıkça kırılma voltajlarının arttığı görülmektedir.



Şekil 7.30. $D = 12$ mm elektrot çapında, farklı aydınlatma şiddetlerinde, farklı elektrotlar arası mesafeler için helyum ve hava plazmalarına ait Paschen eğrilerinin karşılaştırılması

Her bir elektrotlar arası mesafe için helyum ve hava plazmalarını aynı grafikte Şekil 7.31'deki gibi karşılaştırmak gazların Paschen eğrileri arasındaki farkı algılamak açısından daha iyi bir görsel sunmaktadır. Şekil 7.31'deki grafikler incelendiğinde hava ve helyum plazmalarına ait eğriler arasındaki açı elektrotlar arası mesafe arttıkça büyümektedir. Elektrotlar arası mesafenin $d = 50 \mu\text{m}$ olduğu grafikte hava plazmasına ait eğri neredeyse yatay bir seyir izlerken, elektrotlar arası mesafe büyüdükçe eğrinin giderek eğimi artmaktadır. Hava plazmasına ait eğride Paschen minimumu helyum plazmasına ait olana göre daha düşük basınçlara karşılık gelmektedir. Ayrıca hava plazmasına ait Paschen eğrisinin sağ kolu ile sol kolu arasındaki ayrım, helyum plazmasına göre daha net görülmektedir.



Şekil 7.31. $D = 12 \text{ mm}$ elektrot çapında, aydınlatma şiddeti K 'da, farklı elektrotlar arası mesafede helyum ve hava plazmalarına ait Paschen eğrilerinin karşılaştırması

Çizelge 7.4’de $D = 12$ mm elektrot çapı ve aydınlatma şiddeti K ’da farklı elektrotlar arası mesafeler için helyum ve hava plazmasına ait Paschen grafiklerinde minimum kırılma voltajları karşılaştırılmıştır. Buna göre elektrotlar arası mesafe arttıkça hem helyum plazması için hem de hava plazması için V_{Kmin} değerleri artmıştır. Ayrıca tüm elektrotlar arası mesafelerde hava plazmasına ait V_{Kmin} değerleri, helyum plazmasına ait V_{Kmin} değerlerinden büyüktür.

Çizelge 7.4. $D = 12$ mm elektrot çapı ve aydınlatma şiddeti K ’da farklı elektrotlar arası mesafeler için helyum ve hava plazmasına ait Paschen grafiklerinde minimum kırılma voltajları

Elektrotlar Arası Mesafe	Minimum Kırılma Voltajı V_{Kmin} (volt)	
	Helyum	Hava
$d = 50 \mu m$	250 v	325 v
$d = 100 \mu m$	264 v	334 v
$d = 240 \mu m$	358 v	377 v
$d = 340 \mu m$	379 v	445 v
$d = 440 \mu m$	379 v	449 v
$d = 525 \mu m$	449 v	473 v

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

Yarıiletken katotlu mikroboşalma düzeneği (YKMD) ile yapılan deney ve ölçümler hem boşalma hücresindeki plazma özelliklerini incelemek, hem de yarıiletken katotlu fotodedektör kalitesini araştırmak için önem arz etmektedir. Yapılan araştırmalar mikrop plazmalar hakkındaki bilgilerimizin ve fotodedektör teknolojilerinin gelişmesine katkı sağlamaktadır.

Uygun fotodedektör yapımında atmosferik basınçlarda pahalı vakum sistemleri gerektirmeden ve soğutma sistemlerine ihtiyaç duymadan stabil olarak çalışabilen taşınabilir ve yüksek verimli sistemler yapmak temel amaç haline gelmiştir. Katot malzemesi olarak kullanılan yarıiletkenin plazma ile uyumu da önemli bir durumdur. Mikroboşalma hücresindeki geometrik ve optik parametrelerin değiştirilerek plazma süreçlerinin nasıl etkilendiğini araştırmak önemlidir. Deneyimizde yarıiletken katot yüzey genişliği, boşalma aralığı, yarıiletkenin kızılötesi ışınlarla aydınlatılma şiddeti, plazma olarak kullanılan gazın cinsi ve basıncı gibi parametreler değiştirilerek çeşitli ölçümler alınıp analiz edilmiş ve optimal çalışma için gerekli şartlar araştırılmıştır. Yapılan analizler dikkate alınarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

- Düşük basınçlarda katot etkili süreçlerin plazma üzerinde etkili olduğu gözlenmektedir. Kızılötesi aydınlatma şiddetine bağlı olarak akımın arttığı tespit edilmiştir. Düşük basınçlarda katot duyarlılığının fazla olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.
- Düşük basınçlarda artan basınçla devre akımının arttığı, basıncın belirli bir değerinden sonra ise artan basınçla birlikte devre akımının azaldığı tespit edilmiştir.
- Elektrotlar arası mesafenin artmasıyla birlikte akım değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca kırılma voltajı da elektrotlar arası mesafenin artmasıyla birlikte artmıştır.
- Elektrot çapı büyüdükçe akım değerlerinin arttığı görülmektedir. Çap değerlerinin artması aynı zamanda kırılma voltajının azalmasına neden olmuştur.

- Katodu kızılötesi ışınlarla aydınlatma miktarı arttıkça mikrobeşarj hücresinin ışık emisyonu da artmıştır.
- Basıncın belirli bir değere kadar artması ışık emisyonunu arttırırken basıncın belirli bir değerden sonra artması ışık emisyonunu azaltmaktadır.
- Elektrot çapının artması, ışık emisyonu arttırmıştır. $D = 18$ mm katot çapı için ışık emisyonu maksimum olarak ölçülmüştür.
- Elektrotlar arası mesafenin artması ışıma miktarını azaltmıştır.
- He gazı için Paschen grafiklerinde en az bir çap değeri için Paschen minimumu gözlenebilmiştir. Özellikle $d = 240$ μm elektrotlar arası mesafe için Paschen eğrisinin sağ ve sol kolları, her bir çap değeri için net bir şekilde gözlenebilmiştir.
- Elektrotlar arası mesafenin artması kırılma voltajını arttırmıştır.
- Elektrotlar arası mesafenin artmasıyla Paschen minimumları genellikle düşük basınç değerlerine kaymıştır.
- Paschen eğrilerinin sağ kolunun He gazı için yatay bir yol izlediği görülmüştür.
- Paschen grafiklerinde $d = 50$ μm ve $d = 100$ μm elektrotlar arası mesafeler için çizilen eğrilerin birbirlerine yakın olduğu ve diğer eğrilerden ayrıldıkları görülmüştür.
- He plazmasında AVK'lar dar bir voltaj aralığında sıralanırken, hava plazmasında ise AVK'lar özellikle yüksek basınçlarda geniş bir voltaj aralığına yayılmışlardır. Bu durum hava plazmasının daha geniş bir voltaj aralığında çalışabildiğini ve hava plazmasının voltaj değişimlerine daha duyarlı olduğunu göstermektedir.
- Elektrotlar arası mesafenin artması kırılma voltajları arasındaki farkı, hava plazmasında, He plazmasına göre daha fazla arttırmıştır. Dolayısıyla elektrotlar arası mesafe değişimine karşı hava plazması daha hassastır.

- He plazmasına göre hava plazmasında kararsızlıklar ve NDR'ler daha fazla görülmektedir. Dolayısıyla He plazması daha stabil bir boşalma ortamı sağlamıştır.
- Her iki plazma ortamında da basıncın belirli bir kritik değere kadar artması akımı arttırırken, bu kritik değerden sonra basıncın artması akımı azaltmaktadır. Bu kritik basınç değerleri He plazmasında hava plazmasına göre daha büyüktür. Ayrıca elektrotlar arası mesafenin artmasıyla bu kritik basınç değerleri genel olarak azalmıştır.
- Paschen eğrisinin sağ kolu He plazmasında yatay bir seyir izlerken hava plazmasında üstel bir eğri şeklinde görülmektedir.
- Hava plazması için kırılma voltajı He plazması için gerekenden genellikle büyüktür.
- Elektrotlar arası mesafe arttıkça He plazmasına ait Paschen eğrisinin sağ kolu yatay seyrini korurken hava plazmasına ait Paschen eğrisinin sağ kolunun eğimi giderek artmıştır.
- Paschen grafiklerinde hava plazmasına ait Paschen minimumu, He plazmasına ait Paschen minimumuna göre daha düşük basınçlara karşılık gelmektedir.
- Paschen eğrilerinin sağ ve sol kollarındaki ayırım hava plazmasında He plazmasına göre daha net görülmektedir.
- Elektrotlar arası mesafe arttıkça her iki plazma ortamı için de minimum kırılma voltajı (V_{Kmin}) artmıştır. Tüm elektrotlar arası mesafelerde hava plazmasına ait V_{Kmin} değerleri, He plazmasına ait V_{Kmin} değerlerinden büyüktür.

KAYNAKLAR

1. Wang, J., Lei, B., Li, J., Xu, Y., Wang, Y., Tang, J., Zhao, W., and Duan, Y. (2020). Numerical simulation of multiple-current-pulse dielectric barrier discharge with ring electrodes in helium at atmospheric pressure. *American Institute of Physics*, 27(4), 1-12.
2. Schoenbach, K.H., and Becker, K. (2016). 20 years of microplasma research: a status report. *European Physical Journal D*, 70(2), 1-22.
3. Pai, P., and Tabib-Azar, M. (2014). Micro-Plasma Field Effect Transistor Operating With DC Plasma. *Ieee Electron Device Letters*, 35(5), 593-595.
4. Baars-Hibbe, L., Sichler, P., Schrader, C., Gericke, K. H., and Buttgenbach, S. (2005). Micro-structured electrode arrays: Characterization of high frequency discharges at atmospheric pressure. *Plasma Processes and Polymers*, 2(3), 174-182.
5. Go, D.B., and Venkatraman, A. (2014). Microscale gas breakdown: ion-enhanced field emission and the modified Paschen's curve. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 47(50), 1-24.
6. Raizer, Y.P. (1991). *Gas discharge physics*. (First edition). Berlin:Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1-7.
7. Noori, H., Rahmanipour, R., and Ranjbar, A. H. (2017). A theoretical model for effect of electron radial diffusion on breakdown characteristics of DC Townsend discharge in uniform axial magnetic field. *Journal of Applied Physics*, 122(22), 1-6.
8. Fu, Y.Y., Yang, S., Zou, X. B., Luo, H. Y., and Wang, X. X. (2016). Intersection of Paschen's curves for argon. *Physics of Plasmas*, 23(9), 1-4.
9. Mikoshiba, S., Shinada, S., and Shirai, S. (1985). An intense and efficient source of vacuum ultraviolet radiation: Low-pressure Xe Townsend discharge. *Journal of Applied Physics*, 58(10), 3720-3726.
10. Aktas, K., Acar, S., and Salamov, B. G. (2011). Hydrogen discharges operating at atmospheric pressure in a semiconductor gas discharge system. *Plasma Sources Science & Technology*, 20(4), 1-9.
11. Metaferia, W., Kataria, H., Sun, Y. T., and Lourdudoss, S. (2015). Growth of InP directly on Si by corrugated epitaxial lateral overgrowth. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 48(4), 1-9.
12. Song, Y., Cao, L., Peng, B. D., Song, G. Z., Yue, Z. Q., Ma, J. M., Sheng, L., Li, B. K., and Wang, H. X. (2017). Investigation of an InP-based image converter with optical excitation. *Review of Scientific Instruments*, 88(3), 1-4.
13. Pasquariello, D., and Hjort, K. (2002). Plasma-assisted InP-to-Si low temperature wafer bonding. *Ieee Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8(1), 118-131.

14. Liu, Y.F., Liu, D. X., Zhang, J. S., Sun, B. W., Yang, A. J., and Kong, M. G. (2020). 1D fluid model of RF-excited cold atmospheric plasmas in helium with air gas impurities. *Physics of Plasmas*, 27(4), 1-5.
15. Liu, Y.D., Tan, Z. Y., Wang, X. L., and Liu, X. T. (2020). A Numerical Investigation on the Reactive Species Generation and Its Correlation With Electron Energy in Atmospheric-Pressure Helium/Humid Air Plasma Jets. *Ieee Transactions on Plasma Science*, 48(4), 1001-1007.
16. Heneral, A.A., and Avtaeva, S. V. (2020). Atmospheric pressure plasma jets generated by the DBD in argon-air, helium-air, and helium-water vapour mixtures. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 53(19), 1-3.
17. Lu, X., Laroussi, M., and Puech, V. (2012). On atmospheric-pressure non-equilibrium plasma jets and plasma bullets. *Plasma Sources Science & Technology*, 21(3), 1-17.
18. Bogaerts, A., Neyts, E., Gijbels, R., and van der Mullen, J. (2002). Gas discharge plasmas and their applications. *Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy*, 57(4), 609-658.
19. d'Agostino, R., Favia, P., Oehr, C., and Wertheimer, M. R. (2005). Low-temperature plasma processing of materials: Past, present, and future. *Plasma Processes and Polymers*, 2(1), 7-15.
20. Weisel, G. J. (2017). The Plasma Archipelago: Plasma Physics in the 1960s. *Physics in Perspective*, 19(3), 183-226.
21. Denes, F.S., and Manolache, S. (2004). Macromolecular plasma-chemistry: an emerging field of polymer science. *Progress in Polymer Science*, 29(8), 815-885.
22. Kikuchi, M. (2013). *Plasma Physics - A Frontier in Science of Matter*. 4th International Meeting on Frontiers of Physics (IMFP), Kuala Lumpur, 39-54.
23. Kawabe, T., and Hayashi, T. (1998). Plasma physics and plasma technology. *Physica Scripta*, T75, 72-74.
24. Roth, J.R. (1995). *Industrial Plasma Engineering: Volume 1: Principles*. (First edition). Bristol: Institute of Physics Publishing, 542.
25. Becker, K. H., Kogelschatz, U., Schoenbach, K. H., and Barker, R. J. (2004). *Non-Equilibrium Air Plasmas at Atmospheric Pressure*. (First edition). London: Institute of Physics Publishing, 682.
26. Vajpayee, M., Singh, M., and Ledwani, L. (2021). *Non-thermal plasma treatment of cellulosic biopolymer to enhance its surface property for various applications: A review*. International Conference on Cutting-Edge Research in Material Science and Chemistry (CRMSC), Jaipur, 3250-3255.
27. Brown, S.C. (1978). *Gaseous Electronics*. (First edition). New York: Academic Press, 1-18.

28. Conrads, H., and M. Schmidt. (2000). Plasma generation and plasma sources. *Plasma Sources Science & Technology*, 9(4), 441-454.
29. Kurt, H.H. (2018). Exploration of Gas Discharges with GaAs, GaP and ZnSe Electrodes Under Atmospheric Pressure. *Journal of Electronic Materials*, 47(8), 4444-4454.
30. Gleizes, A., Gonzalez, J. J., and Freton, P. (2005). Thermal plasma modelling. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 38(9), R153-R183.
31. Murphy, A.B., and Uhrlandt, D. (2018). Foundations of High-Pressure Thermal Plasmas. *Plasma Sources Science & Technology*, 27(6), 1-20.
32. Bardos, L., and Barankova, H. (2008). Plasma processes at atmospheric and low pressures. *Vacuum*, 83(3), 522-527.
33. von Keudell, A., and Gathen, V. S. V. (2017). Foundations of low-temperature plasma physics-an introduction. *Plasma Sources Science & Technology*, 26(11), 1-16.
34. Thirumdas, R., Sarangapani, C., and Annapure, U. S. (2015). Cold Plasma: A novel Non-Thermal Technology for Food Processing. *Food Biophysics*, 10(1), 1-11.
35. Laroque, D.A., Seo, S. T., Valencia, G. A., Laurindo, J. B., and Carciofi, B. A. M. (2022). Cold plasma in food processing: Design, mechanisms, and application. *Journal of Food Engineering*, 312, 1-24.
36. Kalghatgi, S., Kelly, C., Cerchar, E., Sensenig, R., Brooks, A., Fridman, A., Morss-Clyne, A., Azizkhan-Clifford, J., and Friedman, G. (2009). *On the Interaction of Non-Thermal Atmospheric Pressure Plasma with Tissues*. 17th IEEE International Pulsed Power Conference, Washington, 1130-1135.
37. Tiede, R., Hirschberg, J., Daeschlein, G., von Woedtke, T., Vioel, W., and Emmert, S. (2014). Plasma Applications: A Dermatological View. *Contributions to Plasma Physics*, 54(2), 118-130.
38. Braithwaite, N.S.J. (2000). Introduction to gas discharges. *Plasma Sources Science & Technology*, 9(4), 517-527.
39. Cohn, D.R. (1993). Environmental cleanup applications of hot and cold-plasmas. *Journal of Fusion Energy*, 12(4), 375-378.
40. Raju, G.G. (2005). *Gaseous Electronics: Theory and Practice*. (First edition). Boca Raton: CRC Press, 680.
41. Fu, Y.Y., and Verboncoeur, J. P. (2019). On the Similarities of Low-Temperature Plasma Discharges. *Ieee Transactions on Plasma Science*, 47(5), 1994-2003.
42. Petraconi, G., Maciel, H. S., Pessoa, R. S., Murakami, G., Massi, A., Otani, C., Uruchi, W. M. I., and Sismanoglu, B. N. (2004). Longitudinal magnetic field effect on the electrical breakdown in low pressure gases. *Brazilian Journal of Physics*, 34(4B), 1662-1666.

43. Ledernez, L., Olcaytug, F., and Urban, G. (2012). Inter-Electrode Distance and Breakdown Voltage in Low Pressure Argon Discharges. *Contributions to Plasma Physics*, 52(4), 276-282.
44. Semnani, A., Venkatraman, A., Alexeenko, A. A., and Peroulis, D. (2013). Pre-breakdown evaluation of gas discharge mechanisms in microgaps. *Applied Physics Letters*, 102(17), 1-5.
45. Lisovskiy, V.A., Yakovin, S. D., and Yegorenkov, V. D. (2000). Low-pressure gas breakdown in uniform dc electric field. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 33(21), 2722-2730.
46. Kurt, H.H., and Tanriverdi, E. (2017). The Features of GaAs and GaP Semiconductor Cathodes in an Infrared Converter System. *Journal of Electronic Materials*, 46(7), 4024-4033.
47. Portsel, L. M., Lodygin, A. N., and Astrov, Y. A. (2009). Townsend-like discharge: the suppression of instabilities by a semiconductor electrode. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 42(23), 9.
48. Becker, K. H., Schoenbach, K. H., and Eden, J. G. (2006). Microplasmas and applications. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 39(3), R55-R70.
49. Lodygin, A. N., Portsel, L. M., and Astrov, Y. A. (2012). DC Townsend Discharge in Nitrogen: Temperature-Dependent Phenomena. *Contributions to Plasma Physics*, 52(8), 682-691.
50. Kurt, H., Koc, E., and Salamov, B. G. (2010). Atmospheric Pressure DC Glow Discharge in Semiconductor Gas Discharge Electronic Devices. *Ieee Transactions on Plasma Science*, 38(2), 137-141.
51. Fu, Y. Y., Krek, J., Zhang, P., and Verboncoeur, J. P. (2019). Gas Breakdown in Microgaps With a Surface Protrusion on the Electrode. *Ieee Transactions on Plasma Science*, 47(5), 2011-2019.
52. Mixon, P. D., Griffin, S. T., and Williams, J. C. (1993). Breakdown voltage scaling characteristics of an argon hollow-cathode discharge. *Applied Spectroscopy*, 47(10), 1567-1570.
53. Sakurai, T., Kobayashi, S., Ogura, J., Inoue, Y., and Hori, H. (1995). Dissociation processes of SiCl_4 and plasma parameters measured by transient spectroscopy at the beginning of a SiCl_4 -helium dc-discharge. *Australian Journal of Physics*, 48(3), 515-526.
54. Jiang, L. W., Zhang, C. X., Fang, C. A., Li, H. P., and Wang, Z. Y. (2021). An atmospheric microplasma generator with low breakdown voltages. 34th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), Electr Network, 595-598.
55. Blajan, M., and Shimizu, K. (2012). Phenomena of Microdischarges in Microplasma. *Ieee Transactions on Plasma Science*, 40(6), 1730-1732.

56. Yuan, X., Tang, J., and Duan, Y. X. (2011). Microplasma Technology and Its Applications in Analytical Chemistry. *Applied Spectroscopy Reviews*, 46(7), 581-605.
57. LaPierre, R. R., Robson, M., Azizur-Rahman, K. M., and Kuyanov, P. (2017). A review of III-V nanowire infrared photodetectors and sensors. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 50(12), 1-10.
58. Rogalski, A. (2011). Recent progress in infrared detector technologies. *Infrared Physics & Technology*, 54(3), 136-154.
59. Li, Z. Y., Allen, J., Allen, M., Tan, H. H., Jagadish, C., and Fu, L. (2020). Review on III-V Semiconductor Single Nanowire-Based Room Temperature Infrared Photodetectors. *Materials*, 13(6), 1-20.
60. Miao, J. L., and Zhang, F. J. (2019). Recent Progress on Photomultiplication Type Organic Photodetectors. *Laser & Photonics Reviews*, 13(2), 1-38.
61. Chen, H. Z., Xi, N., Song, B., Chen, L. L., Zhao, J. G., Lai, K. W. C., and Yang, R. G. (2013). Infrared Camera Using a Single Nano-Photodetector. *Ieee Sensors Journal*, 13(3), 949-958.
62. Martyniuk, P., and Rogalski, A. (2013). Hot infrared photodetectors. *Opto-Electronics Review*, 21(2), 239-257.
63. Senesac, L. R., Corbeil, J. L., Rajic, S., Lavrik, N. V., and Datskos, P. G. (2003). IR imaging using uncooled microcantilever detectors. *Ultramicroscopy*, 97(1-4), 451-458.
64. Rogalski, A. (2012). History of infrared detectors. *Opto-Electronics Review*, 20(3), 279-308.
65. Rogalski, A. (1996). *Infrared thermal detectors versus photon detectors .1. Pixel performance*. Conference on Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics, Uzhgorod, 14-25.
66. Dardano, P., and Ferrara, M. A. (2020). Integrated Photodetectors Based on Group IV and Colloidal Semiconductors: Current State of Affairs. *Micromachines*, 11(9), 1-24.
67. Tian, W., Sun, H. X., Chen, L., Wangyang, P. H., Chen, X. R., Xiong, J., and Li, L. (2019). Low-dimensional nanomaterial/Si heterostructure-based photodetectors. *Infomat*, 1(2), 140-163.
68. Han, S. G., Lee, H., Choi, W., Lee, D., Kim, S., Sung, Y. M., Kim, S., and Cho, K. (2021). Photomultiplication-Type Organic Photodetectors with Fast Response Enabled by the Controlled Charge Trapping Dynamics of Quantum Dot Interlayer. *Advanced Functional Materials*, 31(31), 1-9.
69. Sarusi, G. (2002). *Choosing detectors for third generation infrared systems*. Conference on Infrared Technology and Applications XXVIII, Seattle, 919-928.
70. Ismailov, N. J. (2011). Performance Improving of Small-Dimension IR Photodetectors. *Technical Physics Letters*, 37(5), 458-460.

71. Claiborne, L. T. (1997). *Improved performance III-V quantum well IR photodetectors: Review of current and potential focal plane technology*. Conference on Photodetectors - Materials and Devices II., San Jose, 94-102.
72. Kurt, H. H., Tanriverdi, E., and Kurt, E. (2016). Theoretical and Experimental Exploration of Breakdown Phenomena in an Argon-Filled GaP Device. *Journal of Electronic Materials*, 45(8), 3970-3977.
73. Xue, Y., Wang, Y., Luo, W., Huang, J., Lin, L. Y., Tsang, H. K., and Lau, K. M. (2021). Telecom InP-based quantum dash photodetectors grown on Si. *Applied Physics Letters*, 118(14), 1-5.
74. Taylor, M. J., Lile, D. L., and Nedoluha, A. K. (1984). High mobility insulated gate transistors on InP. *Journal of Vacuum Science & Technology B*, 2(3), 522-526.
75. Kuech, T. F. (2016). III-V compound semiconductors: Growth and structures. *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*, 62(2), 352-370.
76. Metaferia, W., Junesand, C., Gau, M. H., Lo, I., Pozina, G., Hultman, L., and Lourdudoss, S. (2011). Morphological evolution during epitaxial lateral overgrowth of indium phosphide on silicon. *Journal of Crystal Growth*, 332(1), 27-33.
77. Caimi, D., Tiwari, P., Sousa, M., Moselund, K. E., and Zota, C. B. (2021). Heterogeneous Integration of III-V Materials by Direct Wafer Bonding for High-Performance Electronics and Optoelectronics. *Ieee Transactions on Electron Devices*, 68(7), 3149-3156.
78. Prochazkova, O., Grym, J., Pekarek, L., Zavadil, J., and Zdansky, K. (2008). InP based semiconductor structures for radiation detection. *Journal of Materials Science-Materials in Electronics*, 19(8-9), 770-775.
79. Vurgaftman, I., Meyer, J. R., and Ram-Mohan, L. R. (2001). Band parameters for III-V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*, 89(11), 5815-5875.
80. Luo, Y., Sun, C., Hao, Z., Han, Y., Xiong, B., Guo, W., and Wu, T. (2003). *Research on III-V compound semiconductor based optoelectronic devices*. 6th Chinese Optoelectronics Symposium, Kowloon, 11-14.
81. Pozuelo, M., Prikhodko, S. V., Grantab, R., Zhou, H., Gao, L., Sitzman, S. D., Gambin, V., Shenoy, V. B., Hicks, R. F., and Kodambaka, S. (2010). Zincblende to wurtzite transition during the self-catalyzed growth of InP nanostructures. *Journal of Crystal Growth*, 312(16-17), 2305-2309.
82. Wang, Y. D., Jackson, H. E., and Smith, L. M. (2014). Carrier Thermalization Dynamics in Single Zincblende and Wurtzite InP Nanowires. *Nano Letters*, 14(12), 7153-7160.
83. Zilli, A., De Luca, M., Tedeschi, D., Fonseka, H. A., Miriametro, A., Tan, H. H., Jagadish, C., Capizzi, M., and Polimeni, A. (2015). Temperature Dependence of Interband Transitions in Wurtzite InP Nanowires. *American Chemical Society Nano*, 9(4), 4277-4287.

84. Zafar, F., and Iqbal, A. (2016). Indium phosphide nanowires and their applications in optoelectronic devices. *Proceedings of the Royal Society a-Mathematical Physical and Engineering Sciences*, 472(2187), 1-18.
85. Faria, P. E., and Sipahi, G. M. (2012). Band structure calculations of InP wurtzite/zinc-blende quantum wells. *Journal of Applied Physics*, 112(10), 1-10.
86. Li, A., Zou, J., and Han, X. D. (2016). Growth of III-V semiconductor nanowires and their heterostructures. *Science China-Materials*, 59(1), 51-91.
87. Maharjan, A., Pemasiri, K., Kumar, P., Wade, A., Smith, L. M., Jackson, H. E., Yarrison-Rice, J. M., Kogan, A., Paiman, S., Gao, Q., Tan, H. H., and Jagadish, C. (2009). Room temperature photocurrent spectroscopy of single zincblende and wurtzite InP nanowires. *Applied Physics Letters*, 94(19), 1-3.
88. Paiman, S., Gao, Q., Tan, H. H., Jagadish, C., Pemasiri, K., Montazeri, M., Jackson, H. E., Smith, L. M., Yarrison-Rice, J. M., Zhang, X., and Zou, J. (2009). The effect of V/III ratio and catalyst particle size on the crystal structure and optical properties of InP nanowires. *Nanotechnology*, 20(22), 1-7.
89. Mattila, M., Hakkarainen, T., Mulot, M., and Lipsanen, H. (2006). Crystal-structure-dependent photoluminescence from InP nanowires. *Nanotechnology*, 17(6), 1580-1583.
90. Tedeschi, D., Fonseka, H. A., Blundo, E., del Aguila, A. G., Guo, Y. N., Tan, H. H., Christianen, P. C. M., Jagadish, C., Polimeni, A., and De Luca, M. (2020). Hole and Electron Effective Masses in Single InP Nanowires with a Wurtzite-Zincblende Homojunction. *American Chemical Society Nano*, 14(9), 11613-11622.
91. Kobayashi, N. P., Wang, S. Y., Santori, C., and Williams, R. S. (2006). Growth and characterization of indium phosphide single-crystal nanoneedles on microcrystalline silicon surfaces. *Applied Physics a-Materials Science & Processing*, 85(1), 1-6.
92. Poole, P. J., Dalacu, D., Lapointe, J., Kam, A., and Mnaymneh, K. (2011). *Positioned growth of InP nanowires*. Conference on Quantum Dots and Nanostructures - Synthesis, Characterization, and Modeling VIII, San Francisco, 1-8.
93. Kurt, H. H., and Salamov, B. G. (2020). Breakdown Phenomenon and Electrical Process in a Microplasma System with InP Electrode. *The Journal of The Minerals, Metals and Materials Society*, 72(2), 651-657.
94. Pejovic, M. M., Ristic, G. S., and Karamarkovic, J. P. (2002). Electrical breakdown in low pressure gases. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 35(10), R91-R103.
95. Babich, L. P., and Loiko, T. V. (2016). Generalized Paschen's Law for Overvoltage Conditions. *Ieee Transactions on Plasma Science*, 44(12), 3243-3248.



Gazili olmak ayrıcalıktır