



**SF₆-CF₄-AR GAZ KARIŞIMINDA ELEKTRİKSEL BOŞALMA
PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI VE ÖLÇÜLMESİ**

Hıdır DÜZKAYA

**DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDSİLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ŞUBAT 2019

Hıdır DÜZKAYA tarafından hazırlanan “SF₆-CF₄-AR GAZ KARIŞIMINDA ELEKTRİKSEL BOŞALMA PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI VE ÖLÇÜLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Sungur TEZCAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Nursel AKÇAM

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Haluk GÖZDE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Milli Savunma Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Dr. Öğr. Üyesi İbrahim EKE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kırıkkale Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 11/02/2019

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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.

Hıdır DÜZKAYA

11/02/2019

SF₆-CF₄-AR GAZ KARIŞIMINDA ELEKTRİKSEL BOŞALMA
PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI VE ÖLÇÜLMESİ

(Doktora Tezi)

Hıdır DÜZKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2019

ÖZET

Bu çalışmada elektrik güç uygulamaları, plazma işleme ve gaz izoleli sistemler gibi endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılan SF₆ (kükürt hekzaflorür) gazına alternatif niteliğindeki ikili ve üçlü gaz karışımlarının elektriksel boşalma parametreleri iki terimli Boltzmann eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır. SF₆ gazının yüksek dielektrik dayanımı ve ısı kararlılığına rağmen, diğer yalıtkan gazlarla kıyaslandığında nispeten yüksek maliyeti ve sera gazı etkisi nedeniyle Kyoto Protokolü başta olmak üzere uluslararası anlaşmalarla kullanımının sınırlandırılmış olması güç sistem ekipmanlarında alternatif gaz arayışlarını güncel tutmaktadır. Bu çalışmada, güç sistem ekipmanlarda kullanılabilecek alternatif gaz yalıtkanları için ikili ve üçlü gaz grupları önerilmiş ve her bir gaz grubuna ait elektron ortalama enerjisi, sürüklenme hızı, iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayısı gibi elektriksel boşalma parametreleri Boltzmann eşitlikleri kullanılarak elde edilmiştir. Bu parametreler, saf SF₆, CF₄ ve argon ve ikili SF₆-Ar ve CF₄-Ar gaz karışımları için literatürdeki verilerle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Efektif iyonlaşma katsayısı kullanılarak elde edilen kritik elektrik alan değeriyle hesaplanan delinme gerilimi, deneysel düzenek kullanılarak elde edilen ölçümlerle karşılaştırılmıştır. Ölçüm değerlerinin hem hesaplama sonuçları hem de literatürdeki verilerle doğrulanması sonrası, literatürde daha önce çalışılmayan SF₆-CF₄-Ar üçlü gaz karışımı Boltzmann eşitlikleri metodu ve ölçüm sistemi kullanılarak incelenmiştir. Bu üçlü gaz karışımının elektriksel boşalma parametreleri hesaplanmış ve her iki yöntemle elde edilen delinme gerilimi değerleri literatüre bir katkı olarak sunulmuştur.

Bilim Kodu : 90545
Anahtar Kelimeler : SF₆, CF₄, Ar, SF₆-CF₄-Ar gaz karışımı, elektriksel boşalma parametreleri, delinme gerilimi
Sayfa Adedi : 125
Danışman : Dr. Öğretim Üyesi Süleyman Sungur TEZCAN

CALCULATION AND MEASUREMENT OF ELECTRICAL DISCHARGE
PARAMETERS IN SF₆-CF₄-AR GAS MIXTURE

(Ph. D. Thesis)

Hıdır DÜZKAYA

GAZİ UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2019

ABSTRACT

In this study, the electrical discharge parameters of binary and triple gas mixtures which are used as alternative to SF₆ (sulfur hexafluoride) gas, and are frequently used in industrial applications such as electric power applications, plasma processing and gas insulated systems, were calculated by using two-order Boltzmann equations. Despite the high dielectric strength and thermal stability of SF₆ gas, its relatively high cost compared to other insulating gases and the limited use of it with international agreements, particularly the Kyoto Protocol, due to its greenhouse effect, keep the investigation for alternative gas in power system equipment up to date. In this study, binary and triple gas groups were proposed for alternative gas insulators which could be used in power system equipments and electrical discharge parameters such as electron mean energy, drift velocity, ionization, attachment and effective ionization coefficients of each gas group were obtained by using Boltzmann equations. These parameters were verified by comparing the data in the literature for pure SF₆, CF₄ and argon and binary SF₆-Ar and CF₄-Ar gas mixtures. The breakdown voltage calculated with the critical electric field value obtained using the effective ionization coefficient was compared with the measurements obtained using the experimental set-up. After the measurement values were confirmed by both the calculation results and the data in the literature, the SF₆-CF₄-Ar ternary gas mixture which was not studied before in the literature was investigated by using the Boltzmann equation method and the measurement system. The electrical discharge parameters of this ternary gas mixture were calculated and the breakdown voltage values obtained by both methods were presented as a contribution to the literature.

Science Code : 90545
Key Words : SF₆, CF₄, Ar, SF₆-CF₄-Ar gas mixture, electrical discharge parameters, breakdown voltage
Page Number : 125
Supervisor : Asst. Assoc. Dr. Süleyman Sungur TEZCAN

TEŞEKKÜR

Tez çalışmasının her aşamasında bilimsel desteğini eksik etmeyerek, çalışmanın olgunlaşmasını sağlayan kıymetli hocam Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Sungur TEZCAN'a, tez izleme komitesinde sundukları önerilerle tezin bilimsel yetkinliğinin artmasına katkıda bulunan hocalarım Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU ve Dr. Öğr. Üyesi İbrahim EKE'ye, üniversite eğitimine başladığım günden bu yana elektrik tesisleri ve yüksek gerilim tekniği alanlarında sunduğu değerli bilgilerle eğitimime katkıda bulunan Prof. Dr. M. Sezai DİNÇER'e ve eğitim hayatımın her aşamasında desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen annem, babam ve kardeşime teşekkürü borç bilirim.

Ayrıca tezimin hazırlanması aşamasında 2211-A Genel Yurt İçi Doktora Burs Programı kapsamında maddi destekte bulunan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Bu tez çalışması, Dr. Öğr. Üyesi Süleyman Sungur TEZCAN'ın yürütücülüğünde proje ekibinde aktif olarak çalıştığım TÜBİTAK 3001 kapsamında TÜBİTAK-EEEAG-#113E493 kodlu projenin sonuçlarıyla da desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. GAZ DİELEKTRİĞİ.....	5
2.1. Çarpışma Kesitleri.....	5
2.1.1. Elastik çarpışma kesitleri	7
2.1.2. Elastik olmayan çarpışma kesitleri.....	11
2.1.3. Toplam çarpışma kesit alanı.....	16
2.2. Gazlarda Delinme Mekanizmaları ve Karakteristikleri	16
2.2.1. Townsend mekanizması.....	16
2.2.2. Kanal mekanizması	20
2.2.3. Elektronegatif gazlarda delinme	25
2.2.4. Doğrusal alanlarda delinme karakteristikleri	28
2.2.5. Doğrusal olmayan alanlarda delinme karakteristikleri	33
2.3. SF ₆ , CF ₄ ve Argon Gazlarının Genel Özellikleri.....	38
2.3.1. SF ₆ (Kükürt hekzaflorür).....	39
2.3.2. CF ₄ (Tetraflorometan).....	43

Sayfa

2.3.3. Ar (Argon).....	44
3. HESAPLAMA METODU	47
3.1. Matematiksel Yöntem: Boltzmann Denklemleri Analizi.....	48
3.2. Boltzmann Analizi ile Kritik Elektrik Alan Değerinin Bulunması	52
4. DENEYSEL PROSEDÜR	53
4.1. Deney Düzenegi	53
4.2. Deşarj Geriliminden Kritik Elektrik Alan Değerinin Bulunması	58
5. BULGULAR ve DEĞERLENDİRME	59
5.1. Saf SF ₆ , CF ₄ ve Argon Bulguları	59
5.1.1. Saf SF ₆ bulguları	59
5.1.2. Saf CF ₄ bulguları.....	64
5.1.3. Saf argon bulguları.....	68
5.2. SF ₆ +Argon Bulguları	72
5.3. CF ₄ +Argon Bulguları	79
5.4. SF ₆ +CF ₄ +Argon Bulguları	86
6. SONUÇ	101
KAYNAKLAR	103
EKLER.....	113
EK-1. Avagadro prensibi	114
EK-2. Gaz karışımı deşarj karakteristiği ölçümünde kullanılan test hücresi teknik çizimi.....	116
EK-3. SF ₆ , CF ₄ ve argon için piyasa araştırması ve maliyet hesabı	118
ÖZGEÇMİŞ	122

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. SF ₆ , CF ₄ ve argon gazına ait Paschen minimum değerleri	30
Çizelge 2.2. Yalıtkan gazların karşılaştırmalı elektriksel dayanım katsayıları.....	32
Çizelge 2.3. SF ₆ , CF ₄ ve argonun fiziksel ve çevresel özellikleri.....	38
Çizelge 5.1. SF ₆ gazının 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları	63
Çizelge 5.2. SF ₆ gazının 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme geriliminin karşılaştırılması.....	64
Çizelge 5.3. CF ₄ gazının 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları	68
Çizelge 5.4. CF ₄ gazının 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme geriliminin karşılaştırılması.....	68
Çizelge 5.5. Argon gazının 1 bar/2,5-10,0 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları..	72
Çizelge 5.6. SF ₆ +Ar gaz karışımının 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları.....	79
Çizelge 5.7. CF ₄ +Ar gaz karışımının 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları.....	86
Çizelge 5.8. %40 Argon oranında SF ₆ +CF ₄ +Ar gaz karışımında 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları.....	90
Çizelge 5.9. %50 Argon oranında SF ₆ +CF ₄ +Ar gaz karışımında 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları.....	95
Çizelge 5.10. %60 Argon oranında SF ₆ +CF ₄ +Ar gaz karışımında 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları.....	99
Çizelge 5.11. SF ₆ +CF ₄ +Argon gaz karışımında hesaplanan kritik elektrik alan değerleri	100

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Eşit yarıçaplı iki parçacık arasındaki çarpışma	5
Şekil 2.2. Diferansiyel kesit alanının tanımı	8
Şekil 2.3. Kütle merkezinde iki parçacık arasındaki çarpışma	9
Şekil 2.4. Farklı çarpışma kesitlerinin etkin olduğu enerji aralıkları.....	15
Şekil 2.5. Deşarj öncesi ortalama akım ölçüm düzeneği	17
Şekil 2.6. Deşarj için ortalama akım büyüme	18
Şekil 2.7. Uygulanan elektrik alanda çığın uzay yükünün etkisi	21
Şekil 2.8. Katot-yönlü kanal	22
Şekil 2.9. Anot yönelimli kanal	25
Şekil 2.10. Elektronegatif gazlar için akım-elektrot açıklığı grafiği	27
Şekil 2.11. Paschen delinme karakteristiği	29
Şekil 2.12. Küre-düzlem elektrot sisteminde küre çapı ve elektrot aralığına bağlı olarak delinme ve korona başlama karakteristikleri	35
Şekil 2.13. Havada küre-düzlem elektrot sisteminin delinme ve korona başlangıç karakteristikleri.....	36
Şekil 2.14. Doğrusal olmayan bir elektrot açıklığında elektrik alanın dağılımı	38
Şekil 2.15. SF ₆ gazının çarpışma kesitleri	40
Şekil 2.16. CF ₄ gazının çarpışma kesitleri	43
Şekil 2.17. Argon gazının çarpışma kesitleri	45
Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi.....	54
Şekil 4.2. Deney düzeneğinde kullanılan test hücresi.....	55
Şekil 4.3. 10 mm elektrot açıklığı 0.5 bar basınçta %60 CF ₄ + %40 Ar gaz karışımında ölçüm sonuçlarının iyileştirilmesi	57
Şekil 5.1. SF ₆ elektron ortalama enerjisi.....	61

Şekil	Sayfa
Şekil 5.2. SF ₆ elektron sürüklenme hızı.....	62
Şekil 5.3. SF ₆ efektif iyonlaşma katsayısı.....	62
Şekil 5.4. CF ₄ elektron ortalama enerjisi	66
Şekil 5.5. CF ₄ sürüklenme hızı. Veri noktaları	66
Şekil 5.6. CF ₄ efektif iyonlaşma katsayısı	67
Şekil 5.7. Argon elektron ortalama enerjisi	70
Şekil 5.8. Argon sürüklenme hızı	71
Şekil 5.9. Argon iyonlaşma katsayısı.....	71
Şekil 5.10. SF ₆ +Argon gaz karışımında elektron ortalama enerjisinin literatür ile karşılaştırılması.....	74
Şekil 5.11. SF ₆ +Argon gaz karışımında elektron ortalama enerjisi.....	74
Şekil 5.12. SF ₆ +Argon gaz karışımında elektron sürüklenme hızının literatür ile karşılaştırılması.....	75
Şekil 5.13. SF ₆ +Argon gaz karışımında elektron sürüklenme hızı	76
Şekil 5.14. SF ₆ +Argon gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısının literatür ile karşılaştırılması.....	76
Şekil 5.15. SF ₆ +Argon gaz karışımında iyonlaşma katsayısı	77
Şekil 5.16. SF ₆ +Argon gaz karışımında yapışma katsayısı	78
Şekil 5.17. SF ₆ +Argon gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısı.....	78
Şekil 5.18. CF ₄ +Argon gaz karışımında elektron ortalama enerjisi	81
Şekil 5.19. CF ₄ +Argon gaz karışımında sürüklenme hızının literatür ile karşılaştırılması.....	81
Şekil 5.20. CF ₄ +Argon gaz karışımında sürüklenme hızı.....	82
Şekil 5.21. CF ₄ +Argon gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısının literatür ile karşılaştırılması.....	83
Şekil 5.22. CF ₄ +Argon gaz karışımında iyonlaşma katsayısı.....	84
Şekil 5.23. CF ₄ +Argon gaz karışımında yapışma katsayısı	84

Şekil	Sayfa
Şekil 5.24. CF_4 +Argon gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısı	85
Şekil 5.25. %40 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında elektron ortalama enerjisi	88
Şekil 5.26. %40 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında sürüklenme hızı	88
Şekil 5.27. %40 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında iyonlaşma katsayısı .	89
Şekil 5.28. %40 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında yapışma katsayısı	90
Şekil 5.29. %40 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısı	90
Şekil 5.30. %50 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında elektron ortalama enerjisi	92
Şekil 5.31. %50 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında sürüklenme hızı	93
Şekil 5.32. %50 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında iyonlaşma katsayısı .	93
Şekil 5.33. %50 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında yapışma katsayısı	94
Şekil 5.34. %50 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısı	94
Şekil 5.35. %60 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında elektron ortalama enerjisi	96
Şekil 5.36. %60 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında sürüklenme hızı	97
Şekil 5.37. %60 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında iyonlaşma katsayısı .	97
Şekil 5.38. %60 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında yapışma katsayısı	98
Şekil 5.39. %60 Argon oranında SF_6 + CF_4 +Argon gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısı	98

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

α	Townsend'in birinci iyonlaşma katsayısı
γ	Townsend'in ikinci iyonlaşma katsayısı
η	Yapışma katsayısı
$\alpha - \eta$	Efektif iyonlaşma katsayısı
ϵ	Elektron ortalama enerjisi
W	Elektron sürüklenme hızı
Q_a	Yapışma çarpışma kesiti
Q_{ex}	Uyartım çarpışma kesiti
Q_i	İyonlaşma çarpışma kesiti
Q_m	Momentum çarpışma kesiti
Q_v	Titreşim çarpışma kesiti
ϵ_a	Yapışma eşik enerjisi
ϵ_{ex}	Uyartım eşik enerjisi
ϵ_i	İyonlaşma eşik enerjisi
ϵ_m	Momentum eşik enerjisi
ϵ_v	Titreşim eşik enerjisi
N	Gaz yoğunluğu sabiti
E	Elektrik alan
m	Kütle
Δ	Adım aralığı
V_s	Deşarj gerilimi
p	Basınç
Pa	Pascal
K	Kelvin
kV	Kilovolt
$(E/N)_{limit}$	Kritik elektrik alan değeri
lt	Litre

Simgeler**Açıklamalar****€**

Euro

A

Akım

kHz

Kilo Hertz

Td

Townsend

ms⁻¹

metre/saniye

Kısaltmalar**Açıklamalar****Bakınız**

bkz.

TEİAŞ

Türkiye Elektrik İletim A.Ş.

Ve diğerleri

vd.

1. GİRİŞ

İnsanların geleneksel üretim ilişkilerini terk edip, teknolojik yeniliklerden faydalanarak geliştirdiği sanayi toplumu, on dokuzuncu yüzyılın ikinci yarısından itibaren başta İngiltere olmak üzere Avrupa ve Kuzey Amerika’da üretim ilişkilerinin neredeyse tamamını yönetir konuma gelmiştir. Bu üretim ilişkisi içinde, ürünlerin hareketliliği ve üretim teknolojisindeki değişim kadar bir diğer önemli husus da üretim araçlarında kullanılan enerjinin dönüşümüdür. Bu süreçte geleneksel enerji kaynaklarının kullanımı terk edilerek, elektrik enerjisinin kullanımı yaygınlaşmaktadır. Günümüzde en temel ihtiyaçlardan biri olarak ön plana çıkan elektrik enerjisine erişim, beraberinde üretim ve iletim altyapısını desteklemesi gereken yeni teknolojik yatırımları zorunlu kılmaktadır.

Elektrik enerjisinin üretildiği ve tüketildiği noktaların birbirinden uzaklığı ve gün içinde hızla değişen bölgesel enerji talebi, birbirine entegre bir yüksek gerilim sisteminin hem ulusal hem de uluslararası ölçekte oluşturulmasına neden olmaktadır. Bu yüksek gerilim sistemlerinde enerji verimliliğini yükseltmek, kayıpları ve hat ısınmalarını azaltabilmek için gerilim seviyesi yükseltilmelidir. Gerilim seviyelerinin yükseltilmesi veya daha sınırlı alanlarda etkin çözümler üretilebilmesi amacıyla, yeni yüksek gerilim teçhizatlarının geliştirilmesi çalışmaları günümüzde de devam etmektedir.

Yeni yüksek gerilim teçhizatları geliştirilirken birincil öncelik, güvenlikten kaynaklanan sorunların aşılmasıdır. Güvenlik sorununa neden olan yalıtım problemlerini aşabilmek için, kullanım alanlarına bağlı olarak, katı, sıvı ve gaz yalıtkan malzemeler kullanılır. Çalışma kapsamında katı ve sıvı yalıtkan malzemelere değinilmemekte, yalıtkan özelliği olan gaz ve gaz karışımlarına yoğunlaşmıştır.

Günümüzde sıklıkla karşılaşılan gaz yalıtkan malzemeler arasında SF₆ (kükürt hekzaflorür), Hava, N₂ (nitrojen), H₂ (hidrojen), He, Ar, CO₂ (karbon dioksit), CF₄ (tetraflorometan) ve C₂F₆ (hexafluoroethane) gibi gazlar ön plana çıkmaktadır. Mevcut gazlar arasında SF₆ ve diğer karbon bazlı bileşikler yüksek dielektrik dayanımları ve kimyasal kararlılıkları nedeniyle endüstriyel uygulamalarda geleneksel olarak sıklıkla kullanılır. Fakat 1970 petrol krizi sonrası gelişen ve günümüzde gittikçe yaygınlaşan post-modern yaklaşımlar, sürdürülebilirlik ilkesi çerçevesinde çevresel ve ekonomik kısıtları da ön plana

çıkarmaktadır. SF_6 ve diğer floro-karbon bileşiklerin ifade edilen teknik avantajlarının yanı sıra, küresel ısınmaya etki eden sera gazları içinde olmaları ve yüksek maliyetleri alternatif gazların yüksek gerilim teçhizatlarında kullanımının önünü açmaktadır.

İlgili alternatif gazlar arasında, Ar, He ve Xe gibi soy gazlar ile N_2 gibi bileşik gazlar bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında söz konusu ihtiyacı göz önünde bulundurarak, SF_6 , CF_4 , Argon gazlarının yalıtkanlık davranışını etkileyen boşalma parametreleri saf, ikili ve üçlü karışımlar halinde incelenmiştir. Bu inceleme esnasında, farklı gereksinimlere cevap verme potansiyeli taşıyan ve enerjide sürdürülebilirlik ilkesini ön plana çıkaran gaz karışımları ile ilgili dielektrik dayanım parametreleri teorik ve pratikte hesaplanarak elde edilmiş ve karşılaştırılmıştır.

Tez kapsamında bu inceleme ve karşılaştırma süreçlerine geçilmeden önce öncelikle gazların yalıtkanlık davranışını ve dielektrik özelliklerini tanımlayan temel parametreler tartışılmıştır. Bu parametreler arasında gazların fiziksel davranışını modelleme aşamasında sıklıkla kullanılan çarpışma kesitleri, elastik ve elastik olmayan, kavramları incelenmiş ve toplam çarpışma kesit alanı tanımlanmıştır. Bu bölümü takiben gazlarda delinme mekanizması ve bu mekanizmanın tanımlanması aşamasında ön plana çıkan baskın karakteristikler ifade edilmiştir. Bu delinme mekanizmaları arasında gazlarda delinme süreçlerini açıklayan Townsend ve kanal boşalma mekanizması irdelenmiş ve elektronegatif gazlarda bu mekanizmaların değişimi irdelenmiştir. Tez kapsamında elde edilen ölçümler doğrusal elektrik alanlarda olsa da, hem doğrusal hem de doğrusal olmayan elektriksel alanlarda boşalma karakteristiklerinin değişimi karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İkinci bölümün son kısmında, tez kapsamında çalışılan SF_6 , CF_4 ve argon gazlarına ait genel bilgiler karşılaştırmalı olarak sunulmuş, kullanım yerleri ve çarpışma parametreleri başta olmak üzere temel fiziksel parametreleri verilmiştir.

Tezde kullanılan temel kavramlar ve yalıtkan gazlar hakkında verilen bilgileri izleyen üçüncü ve dördüncü bölümde, tezde kullanılan hesaplama yöntemi ve deneysel prosedür sırasıyla ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Gazların boşalma parametrelerinin hesaplanmasında, neredeyse otuz yıldan bu yana başvurulmuş iki terimli Boltzman eşitliği metodunda, eşitliklerin oluşturulması, elektron enerji dağılım fonksiyonlarının bulunması ve gazlar özelinde elektron ortalama enerjisi, sürüklenme hızı, iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayılarının elde edilmesi süreçleri ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Deneysel

prosedürün anlatıldığı dördüncü bölümde ise, saf, ikili ve üçlü gaz karışımlarında delinme gerilimin ölçümünde kullanılan deney düzeneği ayrıntılı olarak aktarılmış ve deneysel çalışma esnasında izlenen prosedür verilmiştir. Bu bölümün sonunda, delinme gerili değeri kullanılarak kritik elektrik alanın nasıl hesaplanacağı da ifade edilmiştir.

Bulgular ve değerlendirmeleri içeren beşinci bölümde, öncelikle saf SF₆, CF₄ ve argon gazları için boşalma parametreleri üçüncü bölümde aktarılan Boltzmann eşitliği hesaplama metodu kullanılarak hesaplanmış ve literatürdeki değerlerle doğrulanmıştır. Bu hesaplama metoduyla elde edilen kritik elektrik alan değerleri, deneysel düzenek kullanılarak elde edilen delinme gerilimi ve kritik elektrik alan değerleri ile karşılaştırılmış ve birbiriyle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. Tez kapsamında kullanılan gazlara ait boşalma parametreleri ve delinme geriliminin literatürdeki verilerle doğrulanması sonrası, SF₆+Argon ve CF₄+Argon ikili gaz karışımlarında aynı hesaplama metodu ve deneysel prosedür kullanılarak ilgili parametreler hesaplanmıştır. Bu ikili gaz karışımlarında daha önce literatürde elde edilen bulgularla mevcut sonuçlar karşılaştırılmış ve buna ek olarak karışımdaki argon oranı %20'den başlamak üzere %80'e kadar %20'lik adımlarla değişirken ilgili parametreler hesaplanmış ve aktarılmıştır.

Tez kapsamında daha önce çalışılmamış SF₆, CF₄ ve argon gazlarının üçlü gaz karışımlarına ait boşalma parametreleri ve delinme gerilimleri ifade edilen yöntemler kullanılarak elde edilmiştir. Bu gazlar arasında SF₆ ve CF₄'ün kısmen yüksek maliyeti ve sera gazı olması nedeniyle karışımdaki argon oranı sırasıyla %40, %50 ve %60 seviyesinde tutulmuş, diğer iki gazın karışımdaki oranı SF₆'nın %5'ten başlayarak %20 oranına kadar %5'lik adımlarla artırılmasına bağlı olarak değiştirilmiştir.

SF₆, CF₄ ve argon gazlarına ait saf, ikili ve üçlü gaz karışımlarında hesaplanan ve ölçülen boşalma parametreleri sonuç bölümünde ayrıntılı olarak tartışılmıştır. Bu gazların yalıtkanlık maliyetine ait bir piyasa araştırması da ekler arasında sunulmuştur.

Küresel ısınmanın etkisinin her geçen gün daha fazla hissedildiği ve sürdürülebilirlik ilkesi çerçevesinde çevresel ve ekonomik kısıtlılıklarla karşı karşıya olduğumuz günümüz üretim ilişkilerinde, enerji sistemlerinde sıklıkla kullanılan yalıtkan gazların boşalma parametrelerinin incelendiği bu çalışma SF₆ ve CF₄ gibi sera gazlarının kullanımının azaltılması yönünde bir alternatif sunmayı amaçlamıştır. Bu gazların argon gazıyla ikili ve

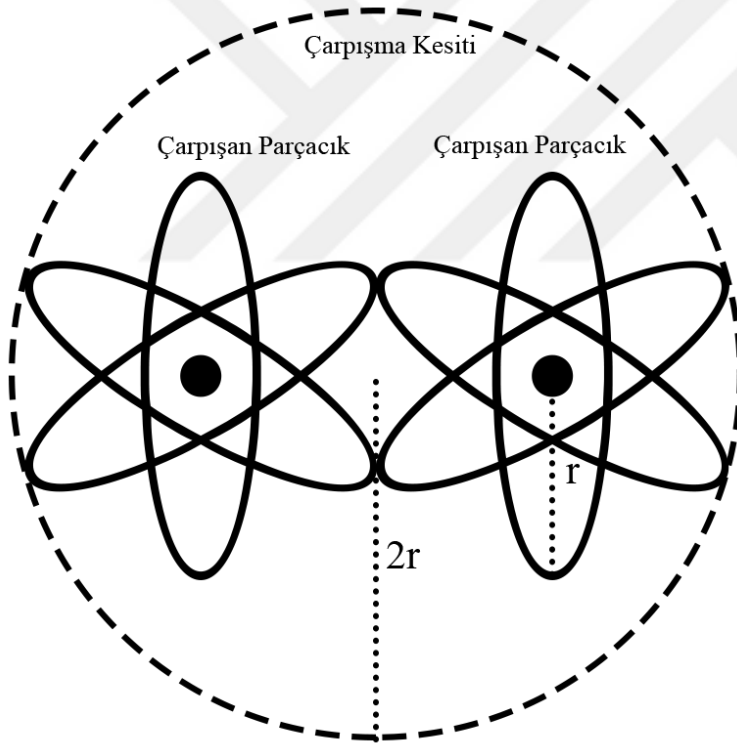
üçlü gaz karışımları, yalıtkan gazların sıklıkla kullanıldığı elektrik güç ekipmanlarında önemli bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır.



2. GAZ DİELEKTRİĞİ

2.1. Çarpışma Kesitleri

Çarpışma kesitleri, atomik düzeyde gaz fiziğinin önemli kavramlarından biridir. Bu kavram, geçen yüzyılın başından bu yana ulusal ve uluslararası bilimsel literatürde deneysel ve teorik düzeyde yaygın olarak çalışılmaktadır. Plazma fiziğinin alt konu başlıklarından biri olan çarpışma kesitleri, elektrik-elektronik mühendisliği alanında yalıtkan gazlara ait karakteristiklerin belirlenmesi başta olmak üzere birçok endüstriyel uygulamada kullanılır. Bu kesitler, elektron ve atom arasındaki ilişkiye bağlı olarak tanımlanır, kullanılan gazın fiziksel özelliğine göre farklı gaz kesitleri ön plana çıkar.



Şekil 2.1. Eşit yarıçaplı iki parçacık arasındaki çarpışma

Çarpışma kesitinin temel düzeyde anlaşılabilmesi için, birbirine eş yarıçaplara sahip iki parçacığın birbiri ile çarpışması örneği incelenebilir, bkz. Şekil 2.1. Bu iki parçacık da aynı yarıçapa sahip olduğundan, çarpışma anında bu iki parçacığa ait kesit alanının toplam yarıçapının $2r$ olduğu kabul edilmelidir. Bu durumda, toplam çarpışma kesitinin alanı $4\pi r^2$ 'dir (Tezcan, 2011: 23). Bu parçacıkların nötr atomlar olduğu kabul edilirse, atom

yarıçapları 10^{-10} m düzeyinde olan bu parçacıklarının çarpışma kesitlerinin 10^{-20} m² düzeyindedir. Bu noktada, parçacıkların nötr yüklenmesinde etkisi olan ve atomun en dış yüzeyinde bulunan elektronların birbirini ittiği için hiçbir zaman tam anlamıyla bir çarpışmanın meydana gelmediğine dikkat edilmelidir (Raju, 2006a: 12, 13).

Gaz fiziğinde parçacıkların en dış katmanında yer alan elektronların etkisiyle çarpışma olmadığında, parçacıkların birbiri ile çarpışması veya bir parçacığın bir elektronla çarpışması durumu saçılma (scattering) olarak tanımlanır. Bu durum, elektronun parçacık davranışı gösterdiğini kanıtlayan kuantum fiziğinin doğal bir sonucudur. Parçacıkların birbiri arasında ve elektronla parçacık arasında tanımlanan bu çarpışma kesitlerinin boyutu fiziksel boyutu itibariyle çok küçük olmakla birlikte, bu parçacıklar arası çarpışma sayısına esas hedef sayısı, sıcaklık ve gaz basıncına bağlı olarak oldukça yüksek sayıda olur. Avagadro prensibine (bkz. Ek-1) göre bu hedef sayısı,

$$N = \frac{7.244 * 10^{22} * p}{T} \quad (2.1)$$

eşitliği ile bulunur (Tezcan, 2011: 24). Eş 2.1’de; T, Kelvin biriminden sıcaklığı, p , Pascal biriminden basıncı ve N , m⁻³ biriminde, birim hacimdeki hedef sayısını ifade etmektedir. Eş. 2.1’e göre, birim hacimdeki hedef sayısı, bu hacimdeki basınç ile doğru, sıcaklıkla ters orantılıdır.

Parçacıklar arasındaki çarpışma kesitinin birim hacimdeki hedef sayısı ile çarpılması sonucu, çarpışma sayısı bulunur. Birim uzunluk başına elde edilen bu sayı, çarpışma kesiti kavramına bir alternatif niteliğindedir.

Parçacıkların birbiriyle veya bir parçacığın elektronla çarpışması durumunda, bu parçacıklardan birinin hareketli diğerinin de durağan olduğu kabul edilir. Bu çarpışmalar esnasında, momentumun ve enerjinin korunduğu elastik ve bu parametrelerin korunmadığı elastik olmayan çarpışmalar gözlemlenir. Bu özelliği ile elektron çarpışma kesitleri, temelde ikiye ayrılır.

Çarpışma esnasında momentum ve enerjinin korunduğu elastik çarpışma kesiti başlığı altında, momentum transfer çarpışma kesitleri bulunur. Bu kesit hem elektronegatif, hem de

elektronegatif olmayan gazlarda gözlenir. Elastik olmayan çarpışma kesitleri arasında ise rotasyon, titreşim, elektronik uyartım, iyonlaşma ve yapışma çarpışma kesitleri bulunur. Bu çarpışma kesitleri arasında yapışma çarpışma kesiti, sadece elektronegatif gazlara özgüdür. Diğer çarpışma kesitleri ise hem elektronegatif, hem de elektronegatif olmayan gazlarda gözlenir. Elastik çarpışmalar, gaz plazma fiziğinde dirence bağlı ısınma ve enerji yayılımı için oldukça önemlidir. Elastik olmayan çarpışmalar ise tüm elektronik uyartım süreçlerinden sorumludur. Elektronik ve iyonik etkilerle elektronların uyarılması ve yörüngesinden ayrılması, elektriksel deşarjlarda çığır gelişmesini sağlar (Gerhard, 2009: 5).

Elastik ve elastik olmayan söz konusu çarpışma kesitleri, gazların atomik düzeyde fiziksel özelliklerine göre farklılıklar gösterirler. Bu nedenle, her gaz için farklı çarpışma kesitleri baskın olabilmekte, bu baskınlık nedeniyle bazı çarpışma kesitleri ihmal edilebilmektedir.

İki parçacığın birbiri ile çarpışması esnasında elastik ve elastik olmayan çarpışma kesitleri ile tanımlanan belirli fiziksel değişimler gözlenir. Bu değişimler arasında parçacıkların iç enerjisi, açısal sapma, kinetik enerji ve momentum değişimleri bulunur (Raju, 2006b: 14). Çarpışmalar sonrası gaz parçacıkları arasında enerji sadece kinetik değişimlere neden oluyorsa elastik, kinetik enerjideki değişimin yanı sıra parçacıkların potansiyel enerjisinde de değişimler ortaya çıkıyorsa elastik olmayan, inelastik, çarpışmalar gözlenir. Elastik çarpışmada, momentum ve enerjinin korunumu sonucu herhangi bir enerji kaybı yoktur. Elastik olmayan çarpışmalar sonrasında ise momentum korunmasına rağmen, enerjinin bir kısmı potansiyel enerjiye dönüştüğünden toplam kinetik enerji korunmaz (Raju, 2007).

2.1.1. Elastik çarpışma kesitleri

Elastik çarpışma, saçılma, kesiti, birinci mertebeden bir yaklaşımla parçacıkların küreler halinde olduğu kabul edilen kinetik gaz teorisinden uyarlanır. Bu parçacıkların saçılma öncesi birbirine yaklaştığı anda kesit alanı parçacık alanının yaklaşık dört katıdır, bkz. Şekil 2.1. Bu kesit alanı tanımı, ortalama serbest yol λ ve parçacık yoğunluğu n arasındaki ilişki ile başlar,

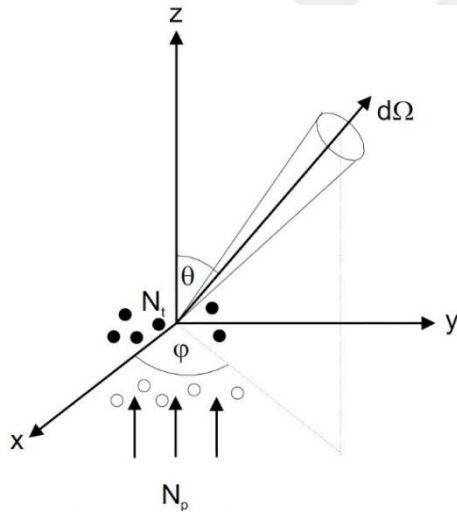
$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} \quad (2.2)$$

σ kesitli parçacık kanalı, I_0 genliğindeki akıyla bir elektron demetine maruz kalır. Bu akı, etkileşimi olmayan parçacık topluluklarını bir araya getirir. x mesafesine bağlı olarak, bu akı değeri azalır,

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.3)$$

burada çift taraflı bir uzunluk olan μ , ortalama serbest yolu olarak tanımlanmaktadır. Eş. 2.2'yle, n parçacık yoğunluğunu ve σ kesit alanını ifade etmektedir. Kesit alanının temel düzeyde anlaşılabilmesi için, elektron demetinin davranışı, bunların açısı ve sonuç olarak bunların enerji bağlamının tanımlanmasına ihtiyaç duyulur (Gerhard, 2009: 6-7).

Öncelikle, bir parçacık bulutunun x -eksenine paralel yerleştirilmiş ve her cm^2 'si başına N sayıda parçacık akışı gösteren bölgeye yönlendirildiği varsayılır, bkz. Şekil 2.2.



Şekil 2.2. Diferansiyel kesit alanının tanımı

N_p parçacıkları N_t hedefleri ile çarpışmakta ve $d\Omega$ açısı ile saçılmaktadır. $d\Omega$, diferansiyel açı parametresidir. $2\pi b db$ alanında açısal bir düzlemde gerçekleşen çarpışmada (b ; iç çap, $b + db$, dış çap), diferansiyel saçılma kesit alanı,

$$\frac{d\sigma(v, \vartheta)}{d\Omega} = \frac{b}{\sin \vartheta} \frac{db}{d\vartheta} \quad (2.4)$$

ve toplam kesit alanı (c , çarpışmayı ifade etmektedir),

$$\sigma_c(v) = 2\pi \int_0^\pi \frac{d\sigma(\vartheta)}{d\Omega} d\Omega \quad (2.5)$$

olarak tanımlanır. Eş. 2.5, herhangi bir açısal bağımlılık ifadesine izin vermez. Ayrıca, çarpışma frekansı da aşağıdaki gibi tanımlanır,

$$v_c(v) = n\sigma_c(v)v \quad (2.6)$$

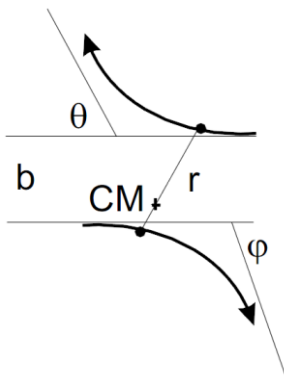
Bu durumda, ortalama serbest yol “c” alt indisi kullanılarak yeniden düzenlenebilir,

$$\lambda \approx \frac{1}{n\sigma_c(v)} \quad (2.7)$$

ve saçılma, çarpışma, olasılığı,

$$P_m = \frac{1}{p\lambda} \quad (2.8)$$

Momentum değişimi, kütle merkezi sisteminde ortaya çıkar, bkz. Şekil 2.3,



Şekil 2.3. Kütle merkezinde iki parçacık arasındaki çarpışma

Şekil 2.3’te b saçılma parametresi, θ ve ϕ saçılma açıları ve CM kütle merkezini temsil etmektedir.

$$\Delta p = mv(1 - \cos \vartheta) \quad (2.9)$$

İleri yöndeki çarpışmalar minimum düzeyde ağırlıklıdır ($\cos 0^\circ = 1$), geriye doğru olanlar da bu çarpışmaların yansımasıdır ($\cos 180^\circ = -1$). Bununla birlikte, geriye doğru olan bu çarpışmaların saçılmayı etkilediği görülür. Difüzyon, geriye doğru yönlendirilen parçacıklarla etkin bir şekilde yavaşlatılır.

Enerji ve momentumun transferinde, en önemli özellik momentum transfer kesit alanıdır. Bu değer, $\sigma_c(v)$, $(1 - \cos \vartheta)$ katsayısı ile ağırlıklandırılır,

$$\sigma_m(v, \vartheta) = 2\pi \int_0^\pi \frac{d\sigma(\vartheta)}{d\Omega} (1 - \cos \vartheta) d\Omega mv \quad (2.10)$$

momentum transfer frekansı,

$$\nu_m = \frac{v}{\lambda} = \nu_c \overline{1 - \cos \vartheta} \quad (2.11)$$

biçiminde ifade edilir. Momentum transfer kesit alanı, σ_m , çarpışma sonrası parçacıklar arasında oluşan açı biliniyorsa toplam çarpışma kesit alanından hesaplanabilir. Aynı doğrultudaki çarpışmalarda ($\vartheta = 180^\circ = \pi$), enerji ve momentumun korunumu kanunlarını kullanarak aktarılan enerji elde edilir (m itici parçacığın, M ise sabit kaldığı kabul edilen parçacığın kütlesi),

$$E_{M,kin} = \frac{4mM}{(m + M)^2} E_{m,kin} \quad (2.12)$$

Langevin'in enerji kaybı parametresi kullanılarak bu ifade yeniden yazılabilir,

$$L = \frac{2m}{m + M} \quad (2.13)$$

sonuç olarak,

$$E_{M,kin} = L \frac{2M}{m + M} E_{m,kin} \quad (2.12)$$

eşitliği elde edilir. Rahatlıkla görülebileceği gibi bu fonksiyon, $m = M$ koşulunda maksimum değerini almaktadır. Yüksek kinetik enerji ve yavaş hareket eden parçacıklar arasındaki çarpışmalar oldukça verimlidir. Bunun yanı sıra, bir elektron ile ağır bir parçacık arasındaki enerji transferi ihmal edilebilir düzeydedir (Gerhard, 2009: 8-10).

Momentum transfer çarpışma kesiti, parçacıkların elektrik alan doğrultusunda hareket ederken kaybettikleri momentumun bir sonucudur. Diferansiyel çarpışma kesiti, parçacıklar arasındaki saçılmada ortaya çıkan açıdan bağımsızsa, momentum diferansiyel kesiti diferansiyel çarpışma kesitinin integralidir (Tezcan, 2011: 19).

2.1.2. Elastik olmayan çarpışma kesitleri

Elastik olmayan çarpışmalar, gaz fiziğinde parçacıklar arası çarpışmaların temel parametreleri arasında yer alır. Momentum ve enerjinin değişmediği elastik çarpışmaların aksine, bu çarpışmalar esnasında parçacıklardan biri veya her ikisinin toplam enerjisi değişir. Bu enerjideki değişimin karakteristiğine bağlı olarak, söz konusu çarpışma sınıflandırılır.

Hareketli olan parçacığın kinetik enerjisi hedef parçacığa çarptıktan sonra azalıyor ve bu enerji hedef parçacığın potansiyel enerjisini arttırıyorsa, elastik olmayan bu tip çarpışmalar endotermik olarak adlandırılır. Benzer bir çarpışma durumunda, hedef parçacığın potansiyel enerjisi azalıyor ve hareketli parçacığın enerjisi artıyorsa ekzotermik bir çarpışma gerçekleşir. Bu parçacıkların her ikisinin potansiyel enerjisi değişmemesine rağmen parçacıkların toplam enerjisinde bir değişim oluyorsa, bu tip çarpışmalar rezonanstır (Raju, 2006a: 23-24).

Elastik olmayan çarpışmalarda enerji kaybı ifadesini elde edebilmek için, elastik çarpışmalarda kullanılan momentum ve sistemin toplam enerjisinin sabit kaldığı kabullerine başvurulmalıdır. Çarpışma esnasında hareketli parçacığın kütlelerinin m ve hızının v_1 , hedef parçacığın kütlelerinin de M olduğu kabul edilirse,

$$mv_1 = mv'_1 + Mv'_2 \quad (2.13)$$

eşitliği, çarpışma sonrasındaki durumu ifade eder. Eş. 2.13'te v'_1 hareketli parçacığın, v'_2 ise sabit parçacığın çarpışmadan sonraki hızlarıdır. Momentumun korunumu kanunu ile birlikte, sistemdeki toplam enerjinin korunumu ifadesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}mv_1'^2 + \frac{1}{2}Mv_2'^2 + e\varepsilon_p \quad (2.14)$$

Eş. 2.14'te $\Delta\varepsilon_p$ terimi, elastik olmayan çarpışmaların doğal sonucu olan enerjideki değişimi temsil eder. Eş. 2.13 ve Eş. 2.14 kullanılarak,

$$\frac{1}{2}m(v_1^2 - v_1'^2) = \frac{m^2}{2M}v_1^2 + e\varepsilon_p \quad (2.15)$$

eşitliği elde edilir. Maksimum enerji transferi için hareketli parçacığın enerjisinin sabit kalması koşuluyla, Eş. 2.15 elektronun çarpışma sonrası hızına, v'_1 , göre türev alınarak bu ifade sıfıra eşitlenir,

$$v'_1 = v_1 \frac{m}{m + M} \quad (2.16)$$

Eş. 2.16'daki hız terimi, Eş. 2.15'te yerine konulduğunda elastik olmayan çarpışma sonrası transfer edilen maksimum potansiyel enerji bulunur. Eş. 2.16, parçacıkların kütesine bağlı olarak iki şekilde yorumlanabilir.

- i. Eğer hareketli parçacığın kütlesi, m , hedef parçacığın kütesinden çok küçük ise, yani $m \ll M$, transfer edilen maksimum potansiyel enerji,

$$\varepsilon_{p_{max}} = \frac{1}{2e}mv_1^2 \quad (2.17)$$

eşitliği ile hesaplanır. Bu durumda hareketli parçacığın, çoğu durumda bir elektron, kinetik enerjisi hedef parçacığa potansiyel enerji olarak transfer edilir.

- ii. Eğer çarpışma esnasında her iki parçacığın kütleleri birbirine neredeyse eşitse, yani $m \approx M$, bu durumda transfer edilen maksimum kinetik enerji,

$$\varepsilon_{p_{max}} \cong \frac{1}{4e} m v_1^2 \quad (2.18)$$

eşitliği ile hesaplanır. Hareketli parçacığın elektron yerine bir iyon olması durumunda Eş. 2.18 geçerlidir. Bu durumda, hareketli olsa da kütlesi fazla olduğu için elektrona nazaran oldukça düşük hızda hareket eden bir iyonun başka bir parçacığa çarpması sonrası transfer edilen enerji oldukça düşüktür (Çekmen, 2010: 16-18).

Elastik olmayan çarpışmalarda temel momentum ve enerji transferi ifadesi elde edildikten sonra, gazların fiziksel özelliklerine bağlı olarak değişen çarpışma kesitleri hakkında da bilgi verilmelidir. Elastik olmayan bu çarpışma kesitleri arasında rotasyon, titreşim, elektronik uyarım, iyonlaşma ve yapışma çarpışma kesitleri bulunur.

Gaz elektroniğinde parçacıklar arasında çarpışma gerçekleştiğinde hareketli parçacık, genellikle yüksek hızlı bir elektron olduğu kabul edilir, hedef parçacığı uyarır. Bu uyarma işlemi esnasında rotasyon, titreşim ve elektronik uyarım çarpışma kesitleri etkindir,



Eş. 2.19, bir atomun bir elektron tarafından uyarılması sürecini ifade eder. Elektronik uyarım, hedef parçacığın son yörüngesindeki elektronların iyonizasyonun gerçekleştiği enerji seviyesinde meydana gelir. Bu hedef parçacık bir atom olabileceği gibi, farklı atomların bir araya geldiği bir molekül de olabilir. Bu durumda, molekülün enerji seviyelerini tanımlayan notasyon daha karmaşıktır. Bu karmaşıklık, parçacığın sahip olduğu elektron ile doğru orantılı olarak artar.

Bu uyarım mekanizması esnasında, çarpışan parçacıklardan birisi elektron ise, enerjisinin tamamı veya tamamına yakını hedef parçacığa aktarır. Bu durumda, hedef parçacık bir üst seviyede uyarılır ve çoğu durumda kısa sürelerle elektronla birlikte hareket eder. Nano saniye mertebesinde bir süre geçtikten sonra, hedef parçacık uyarım gerçekleştirerek temel enerji seviyesine döner. Bu uyarım esnasında ortaya çıkan enerji de çarpışan parçacıkların

ayırışmasında kullanılır. Ayırışmanın gerçekleştiği bu çarpışma kesiti, toplam uyartım çarpışma kesitine eşittir (Tezcan, 2011: 35).

Elastik olmayan bir diğer çarpışma kesiti, iyonlaşma çarpışma kesitidir. Bu çarpışma kesiti, hareketli parçacığın hedef parçacığa çarpması sonucu bu parçacığı iyonlaştırması durumunda ortaya çıkar. Çarpışma teorisine bağlı olarak hareketli parçacığın, elektron, gaz atomu yada molekülüne çarpması sonrası hızı ve dolayısıyla kinetik enerjisi nedeniyle ikinci bir serbest elektronun saçılması ile temel düzeyde iyonlaşma işlemi gerçekleşir.

$$e + A \rightarrow (A)^* + e + e \quad (2.20)$$

Bu iyonlaşmanın gerçekleşebilmesi için, hareketli parçacığın enerjisinin hedef parçacığın iyonlaşma enerjisine eşit veya daha fazla olması gerekir, yani $(1/2)mv_1^2 \geq \varepsilon_i$. Bu süreç sonrası saçılan elektron parçacıklarının enerjileri ve hızları birbirine eşit değildir ve genellikle farklı açılarda saçılırlar. Bazı durumlarda, elektronun toplam enerjisi iyonlaşma enerjisinden fazla olmasa bile hedef parçacık iyonize olabilir.

Bu durumlardan ilki, hareketli elektronun çarpması sonrası uyarılan parçacığın bir diğer elektronla iyonlaşma seviyesinin üzerinde potansiyel enerjiyle yüklenmesidir. Bu süreç, kademeli iyonlaşma olarak adlandırılır. Elektronun yeterli enerjiye sahip olmamasına rağmen iyonlaşmanın gerçekleştiği ikinci durum, uyarılmış bir hedef parçacığın enerjisini elektrona aktararak temel enerji seviyesine inmesi ve elektronun iyonlaşma enerjisi seviyesine yükselmesidir. Üçüncü ve son durum ise, uyarılmış iki parçacığın birbiri ile çarpışması sonrası enerjinin parçacıklardan birisine geçmesi sonrası ortaya çıkar (Çekmen, 2010: 29).

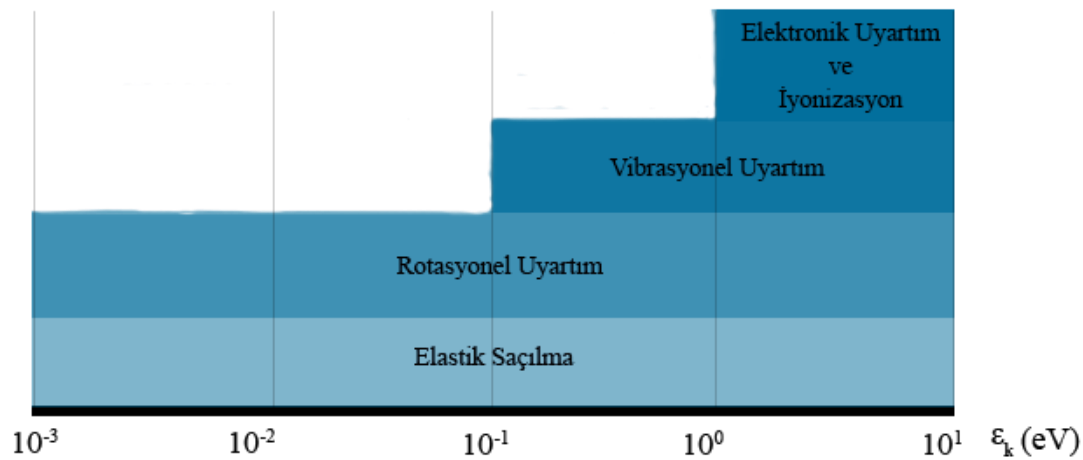
Birim uzunlukta iyonlaşma sayısı, iyonlaşma çarpışma kesitinin bir fonksiyonudur. İyonlaşma çarpışma kesiti, çalışmanın yapıldığı gazın eşik enerji seviyesinden itibaren artmaya başlar ve eşik enerjisinin yaklaşık beş katında maksimum değerine ulaşır.

Elastik olmayan çarpışma kesitleri arasında yapışma çarpışma katsayısı, sadece elektronegatif olan gazlarda gözlenir. Hareketli elektron parçacığı elektronegatif bir gaz parçacığına çarpması sonrası, bu parçacığı iyonlaştıracak enerjisi olmaması durumunda, bu

moleküle yapışır ve negatif bir iyon ortaya çıkar. Bu yapışma işlemi esnasında hedef parçacığın kararsız hale gelmesi durumunda, parçacık ultraviyole ışık saçabilir. Yapışma çarpışma katsayısı, yüksek gerilim sistemlerinde kullanılan gazlar açısından oldukça önemli bir parametredir. Doğada yaygın olarak bulunan H_2 , N_2 ve soy gazlar yapışma çarpışma katsayısına sahip değil, O_2 (oksijen molekülü), CO (karbon monoksit), CO_2 ve hidrokarbonlar kısmen sahip, SF_6 , $CClF_2$ (Chlorodifluoromethyl radical) ve CF_4 gibi halojen grubu atomları içeren gazlar ise üst düzeyde sahiptirler.

Elektron yapışma olayına farklı mekanizmalar sonrası karşılanabilir. Bu mekanizmalardan ilki, hareketli elektron parçacığının enerjisinin oldukça düşük olması nedeniyle ortaya çıkar. Bu durumda, molekül negatif iyon dönüşür. Elektron enerjisine bağlı olarak, bu kesitin büyüklüğü değişebilir. Bu mekanizmalardan ikincisi, ayrıştırıcı yapışmadır. Ayrıştırıcı yapışmada, elektronun çarptığı hedef parçacığın sahip olduğu enerji parçacığın ayrışma enerjisinden büyükse bu parçacık parçalanır. Bu durumda, bir molekül birden fazla parçacığa ayrılır ve parçalardan biri negatif iyondur. Bu ayrışma işlemi esnasında molekülün fiziksel ve kimyasal özelliklerine bağlı olarak, bir pozitif ve bir negatif iyon ile bir elektron da açığa çıkabilir (Tezcan, 2011: 24).

Gazlarda elastik ve elastik olmayan çarpışma kesitlerinin etkin olduğu enerji aralıkları Şekil 2.4’de görülmektedir (Raju, 2007). Bu genel yaklaşıma göre, elastik ve rotasyonel çarpışma kesiti tüm enerji aralıklarında etkinken, titreşim (vibrasyonel) çarpışma kesiti 0,1 eV, elektronik uyartım ve iyonlaşma çarpışma kesiti ise 1 eV’un üzerinde etkin olur.



Şekil 2.4. Farklı çarpışma kesitlerinin etkin olduğu enerji aralıkları

2.1.3. Toplam çarpışma kesit alanı

İki parçacığın birbiri ile gerçekleştirdiği elastik veya elastik olmayan çarpışmalarda kesit alanlarının toplamı, toplam çarpışma kesit alanını verir. Bu parametrenin bulunması için, elastik çarpışmalar sonucu diferansiyel çarpışma kesitinin ihtimal dahilindeki tüm açılarda kesitlerinin toplanması ve bu değere elastik olmayan çarpışma kesitlerinin tüm açılardaki değerlerinin eklenmesi gerekir (Raju, 2006a: 18). Toplam çarpışma kesit alanı,

$$Q_t = \int_{\Omega} \left[Q_{dif}(\theta) + \sum_{i=1}^{i=n} Q_i(\theta) \right] d\Omega \quad (2.21)$$

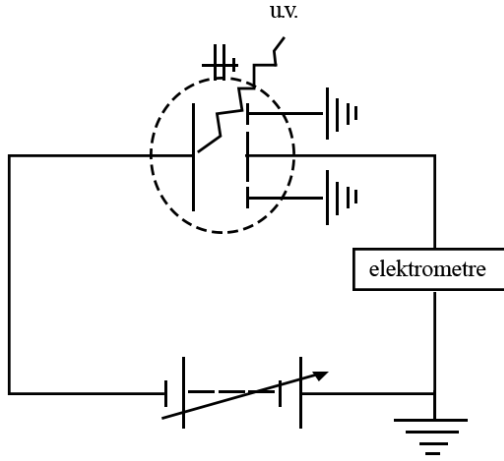
biçiminde verilir. Eş. 2.21’de t alt indisi toplam, n ise elastik olmayan çarpışma sayısını ifade etmektedir. Bu toplamın önemli bir kısmını elastik çarpışma kesiti oluşturur. Elastik olmayan çarpışma kesitlerinin toplam çarpışma kesitleri içindeki oranı küçük olmasına rağmen, bu kesitler iyonlaşma, yapışma ve dolayısıyla efektif iyonlaşma katsayılarının elde edilmesinde kritik önemdedir. Elastik çarpışma kesiti ise ortalama enerji, difüzyon katsayısı ve sürüklenme hızı gibi parametreleri yoğunlukla etkiler (Çekmen, 2010: 27).

2.2. Gazlarda Delinme Mekanizmaları ve Karakteristikleri

Gazlarda delinme, çığ, mekanizmaları temelde iki farklı yöntemle açıklanır. Bunlar, Townsend ve kanal delinme mekanizmalarıdır. Townsend mekanizması delinmenin üretilmesi için başarılı ikincil çığların üretimi prensibine dayanırken, kanal mekanizmasına göre birinci çığın gelişimi ile birlikte delinme hızlıca gelişir.

2.2.1. Townsend mekanizması

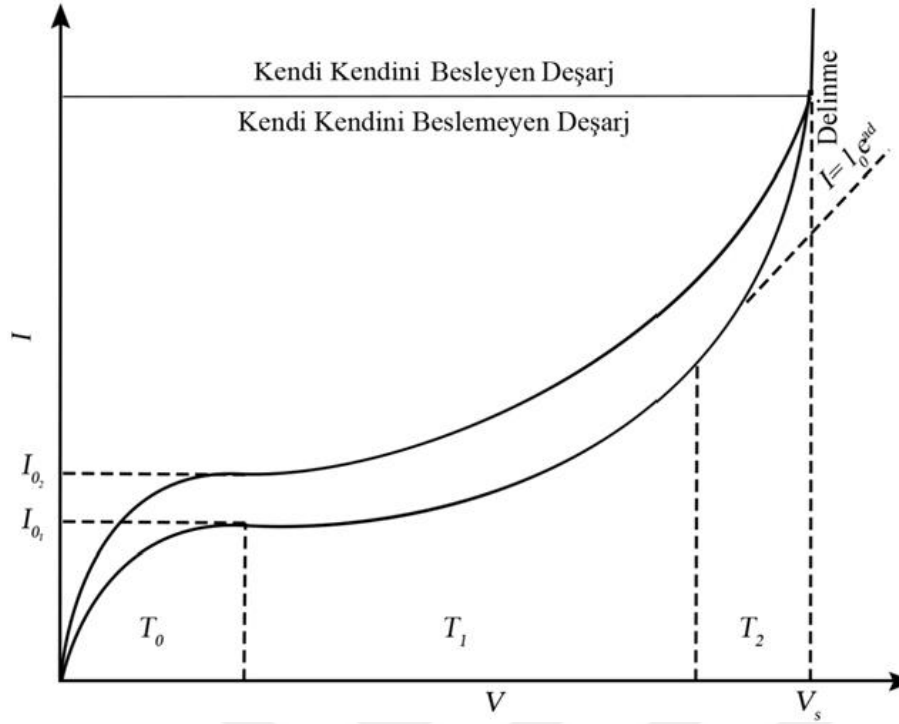
Townsend’in özgün deneyleri uygulanan statik gerilimler ile doğrusal bir alanda ortalama delinme akımının büyümesinin ölçümünü içerir. Şekil 2.5, bu deneyler esnasında kullanılan devre şemasını göstermektedir. Bir koruyucu küre ile çevrelenmiş doğrusal alan elektrotlar, küre üzerindeki kuvars bir pencere üzerinden foto-elektronları yayan ultraviyole bir kaynakla aydınlatılmaktadır. Ayarlanabilir bir gerilim kaynağı şekilde görüldüğü gibi bağlanmakta ve bir elektrometre kullanılarak devre üzerindeki gerilim ölçülmektedir.



Şekil 2.5. Deşarj öncesi ortalama akım ölçüm düzeneği

Gerilim yükseldikçe, elektrotlar arası akım yavaşça artmaktadır. Katottan yayılan elektronlar, gerilime bağlı olarak gelişen alan kuvvetinin neden olduğu elektriksel kuvvetin tetiklediği parçacıklarla birlikte hareket eder ($i = qv/d$). Elektrotlar arası gelişen bu akım bir doyum noktasına ulaşır (doyum bölgesi, bkz. Şekil 2.6) ve daha sonrasında delinme gerçekleşene kadar T_1 ve T_2 bölgeleri boyunca artar. Eğer katot üzerindeki ultraviyole ışığın şiddeti arttırılırsa, başlangıçtaki iyonlaşma akımı daha yüksek bir değerde doyuma gitmektedir (I_{0_1} yerine I_{0_2}). Doyum seviyesi ışık şiddeti ile orantılıdır, ancak deşarj gerilimi değişmeden kalmaktadır (Alston, 1968: 23).

T_1 bölgesinde akımın artması, elektrotlar arasında yoğunlaşmış iyonizasyon işleminden kaynaklanmakta, T_2 bölgesinde ise ikincil akım büyüme süreçleri devreye girerek deşarj kendini beslenmektedir.



Şekil 2.6. Deşarj için ortalama akım büyüme karakteristiği

Townsend'in birincil iyonlaşma katsayısı (α)

Bu katsayı, bir elektronun elektrik alan doğrultusunda bir cm hareketi başına ortalama iyonlaşma gerçekleşen çarpışma sayısını olarak tanımlanır (Dolayısıyla $1/\alpha$, iyonlaşma gerçekleştiren çarpışmalar arasında alan yönündeki ortalama mesafedir). n_0 'ın katottan birim zamanda yayılan elektron sayısı olduğunu kabul edilirse, katottan x mesafe uzaklıkta iyonlaşma gerçekleştiren toplam elektron sayısı n_x 'dir. Bu elektronlar, elektrik alan doğrultusunda açıklık küçük dx parçalarına bölünerek dikkatle incelendiğinde, yeni elektronların (ve pozitif iyonların) iyonize edici yeni çarpışmalarıyla gelişir (Kuffel, Zaengl ve Kuffel, 2000: 295-296). Yani,

$$dn_x = \alpha n_x dx \quad (2.22)$$

dir. Bu eşitlik, $x = 0$ konumunda $n = n_0$ başlangıç koşuluyla doğrusal bir alanda (sabit α) çözülürse,

$$n_x = n_0 e^{\alpha x} \quad (2.23)$$

birim zamanda anoda çarpan elektron sayısı ($x = d$),

$$n_d = n_0 e^{\alpha d} \quad (2.24)$$

yani katottan ayrılan her bir elektron elektrot açıklığını geçtiğinde yeni elektronlar (ve pozitif iyonlar) üretir. Bu daha önce ifade edilen elektron çığını oluşturur.

Bu akım, elektrot açıklığında elektron ve pozitif iyonların hareketinden kaynaklanır. Kararlı durumda, birim zamanda katoda ulaşan pozitif iyon sayısı anoda ulaşan yeni üretilmiş elektronların sayısına eşittir. Bu durumda, devre akım büyüme ifadesi,

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (2.25)$$

yazılır. Bu eşitlikte I_0 , katotta başlangıç durumundaki foto elektrik akımdır. Eş. 2.25, bir çığın ortalama etkisini temsil eden kararlı durum ilişkisidir. I_0 'a bağlı olduğu için kendi kendini besleyen bir deşarjı temsil etmemektedir (Alston, 1968: 24, 25).

Townsend'in ikincil iyonlaşma katsayısı (γ)

γ , elektrot açıklığında her iyonlaşma çarpışması başına katotta üretilen ikincil elektronların ortalama sayısıdır (Özkaya, 2008: 234). n_0 birim zamanda katottan yayılan foto elektron sayısı, n'_0 birim zamanda katotta üretilen ikincil elektron sayısı ve n''_0 katottan birim zamanda ayrılan toplam elektron sayısı bulunur,

$$n''_0 = n_0 + n'_0 \quad (2.26)$$

Katottan ayrılan her elektron elektrot açıklığında çarpışma yaratmaktadır. Bu nedenle, elektrot açıklığında birim zamanda iyonlaşma çarpışma sayısı, $n''_0(e^{\alpha d} - 1)$ 'dir.

γ 'nın tanımı kullanılarak, $n'_0 = \gamma n''_0(e^{\alpha d} - 1)$, Eş. 2.26 yeniden yazılabilir,

$$n''_0 = n_0 + \gamma n''_0(e^{\alpha d} - 1) \quad (2.27)$$

yani,

$$n_0'' = \frac{n_0}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.28)$$

olur. Anoda ulaşan elektron sayısı, Eş. 2.24'e göre,

$$n_d = n_0'' e^{\alpha d} \quad (2.29)$$

elde edilir. Böylece katottan birim zamanda ayrılan toplam elektron sayısı,

$$n_0'' = \frac{n_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.30)$$

olarak bulunur. Kararlı durumda, elektrotlar arasındaki akım,

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \quad (2.31)$$

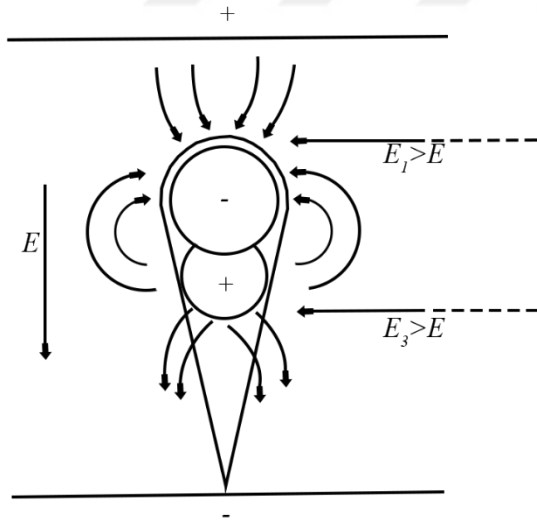
biçiminde elde edilir.

2.2.2. Kanal mekanizması

Delinme mekanizmaları ile ilgili ilk çalışmalarda, statik eşiğin üzerindeki yüksek gerilimlerin düzgün geometriye sahip elektrot açıklıklarına uygulandığında delinmenin hızlı bir şekilde çok kısa sürdüğü düşünülüyordu. Bu yaklaşım, delinme esnasında bir dizi çığ oluşumunu öngören Townsend mekanizması ile uyumlu değildir. Ayrıca bu çalışmalar geri besleme sonucu katotta üretilen elektronlarla ilgili bazı metotlar önermiş, ama geniş elektrot açıklıklarına sahip nokta-düzlem elektrot sistemleri ve katotta bir elektron bulutuna sahip yıldırım deşarjlarını açıklamakta yetersiz kalmıştır. Geniş elektrot açıklıklarında birden fazla kola sahip ve düzensiz büyüyen deşarjın, Townsend teorisi ile uzlaştırılması da zordur. Bunun sonucunda deşarjın gelişimini izleyen birçok çalışma ile kanal delinme mekanizması teorisi 1940'lı yıllarda önerilmiştir (Alston, 1968: 28).

Kanal mekanizması, plazma kanalı olarak isimlendirilen ve çığ içinde gelişen uzay yükünün tek bir kanal üzerinden deşarjının gelişmesi olarak tanımlanır. Bu kanalın gelişmesi ile birlikte, iletkenlik hızla büyür ve bu çığ kanalında delinme meydana gelir.

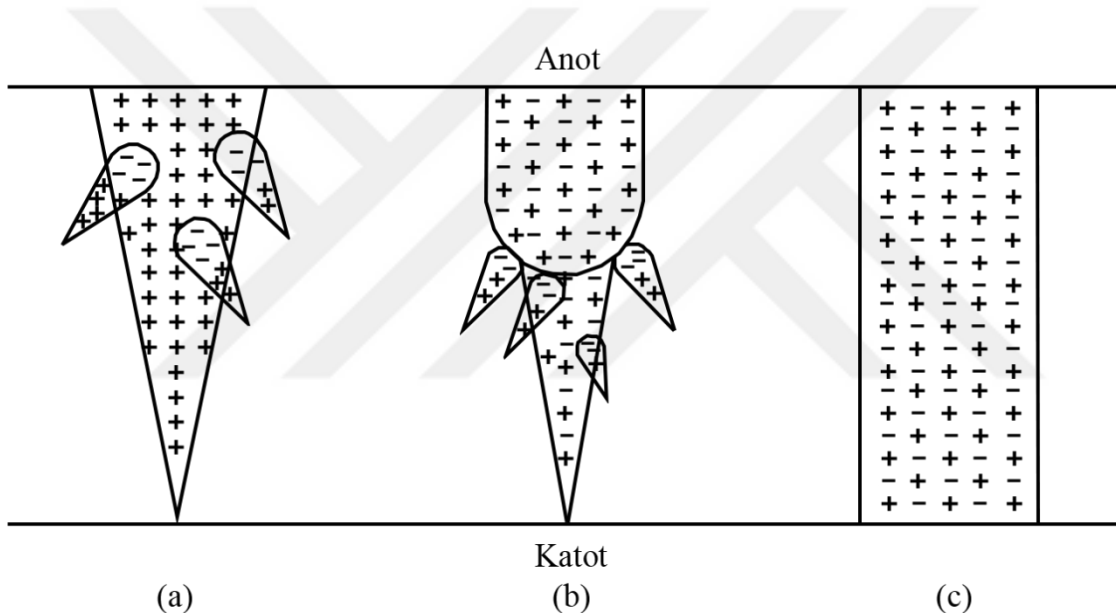
Kanal delinme teorilerinin temel kabulleri, Townsend'in aşamalı iyonlaşma prosesine ek olarak, kanalın önündeki uzayda gaz moleküllerinin büyük miktarda foto-iyonizasyona sahip olduğu ve kanalın ucundaki iyon uzay yüküyle elektrik alanın bölgesel olarak genişlediğidir. Bu uzay yükü Şekil 2.7'de görüldüğü gibi elektrot açıklığında alanın bozulmasına neden olur. Pozitif iyonlar hızlı hareket eden elektronlarla kıyaslandığında durağan olarak kabul edilebilir ve çığ, arkasında bir pozitif iyon uzayı bırakan bir elektron bulutu olarak elektrot açıklığında gelişir. Açıklığa uygulanan elektrik alanla kıyaslandığında, çığın önündeki ve arkasındaki elektrik alan uzay yükleriyle artar ve elektron ve iyon yükünün yoğunlaştığı bölgeler arasında ise azalır. Kanal mekanizması ile ilgili Meek ve Loed tarafından öne sürülen pozitif kanal ve Reather tarafından öne sürülen negatif kanal teorilerinin her ikisi de, yeterli elektrik alanın gelişmesi için gerekli uzay yükünün büyüklüğünün bir tahminine dayanır (Kuffel vd., 2000: 326, 327).



Şekil 2.7. Uygulanan elektrik alanda çığın uzay yükünün etkisi

Doğrusal bir elektrot geometrisinde pozitif kanal mekanizması, çığ elektrot açıklığını geçerken elektronlar anotta doğru çekilir ve pozitif iyonlar ise Şekil 2.8(a)'da gösterildiği gibi açıklık boyunca uzanan bir koni şeklini alır. Anotun yakınında yerel bir uzay yük alanı üretilir, ancak elektrot açıklığının diğer bölgelerinde iyon yoğunluğu düşüktür. Bu nedenle, pozitif iyonların varlığı tek başına açıklık genelinde bir delinmeye yol açarlar. Bununla

birlikte, çığı çevreleyen gaz yığının­da foto-elektronlar çığın gövdesini oluşturan yoğun iyonize gazdan yayılan fotonlar tarafından üretilirler. Bu elektronlar, temel çığın geliştirdiği uzay yükü alanının sabit elektrik alana göre konumlanması halinde, ana çığın gövdesine yönlenen yardımcı ığları başlatır. Bu yardımcı ığlardaki gözle görünür çoğalma, sabit alanı bütünleyen uzay yük alanında ana çığın eksen­i boyunca gerçekleşir. Bu ığlar tarafından geride bırakılan pozitif iyonlar, ana çığın uzay yükünü katot yönünde etkin bir şekilde yoğunlaştırarak uzatırlar ve süreç kendiliğinden yayılan bir kanal olarak gelişir. Bu ığ hareketi, anottan katoda doğru uzanan iletken bir plazma oluşturur (şekil 2.8(b)). Bu kanal, elektrotlar arasında yüksek derecede iyonize olmuş bir iletken filaman oluşturur (şekil 2.8(c)).



şekil 2.8. Katot-yönlü kanal

Bir elektron ığından kanala geçiş radyal bir elektrik alanla, E_r , birlikte gerçekleşir. Bu alan, çığın önündeki pozitif iyonlar tarafından üretilir ve sisteme sürekli uygulanan sabit elektrik alanla, E , aynı doğrultudadır. Bu böyle olmadıkça, çığ bölgesinde iyonlaşmanın büyümesi veya ana çığa bağlı ığların yayılması söz konusu olmaz.

Uzay yükü alanının yaklaşık büyüklüğünü hesaplamak için, toplam yükü Q olan pozitif iyonların çığın önünde r yarıçaplı dairesel hacimli bir forma sahip olduğu kabul edilir. r yarıçaplı bu uzay yükü tarafından üretilen alan, E_r ,

$$E_r = \frac{Q10^2}{4\pi\mu_0 r^2} = \frac{(4/3\pi r^3 Ne)10^2}{4\pi\mu_0 r^2} = \frac{10^2}{3\mu_0} rNe \text{ V/cm} \quad (2.32)$$

elde edilir. Bu eşitlikte, $N \text{ cm}^3$ başına iyon yoğunluğu, e elektron yükü (columb) ve μ_0 boşluğun geçirgenliğidir.

x uzunluğundaki bir çığın ucunda bir dx mesafesinde üretilen toplam iyon çifti $\alpha e^{\alpha x} dx$ olduğunda,

$$N = \frac{\alpha e^{\alpha x} dx}{\pi r^2 dx} = \frac{\alpha e^{\alpha x}}{\pi r^2} \quad (2.33)$$

elde edilir. Bu eşitlik, Eş. 2.32'de yerine konulursa uzay yükü tarafından üretilen alan,

$$E_r = \frac{10^2}{3\mu_0} \frac{\alpha e^{\alpha x}}{\pi r} e \quad (2.34)$$

bulunur. Çığın r yarıçapı elektrotlar arasında x mesafesini geçtikten sonra, yayılma ifadesi,

$$r = \sqrt{2Dt} \text{ burada } t = \frac{x}{v_-} \quad (2.35)$$

biçiminde hesaplanabilir. Sonuç olarak uzay yükü tarafından üretilen alan,

$$E_r = \frac{10^2 \alpha e^{\alpha x} e}{3\mu_0 \pi \sqrt{2D \frac{x}{v_-}}} \quad (2.36)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlikte v_- çığın hızı ve dolayısıyla elektrotlar arasındaki elektronlardır. Hava ortamında bir çığın yayılma katsayısı (D) ve elektron sürüklenme hızı bilindiğinden, Eş. 2.36 sayısal olarak yeniden düzenlenebilir.

$$E_r = 5.27 \times 10^{-7} \frac{\alpha e^{\alpha x}}{(x/p)^{1/2}} \text{ V/cm} \quad (2.37)$$

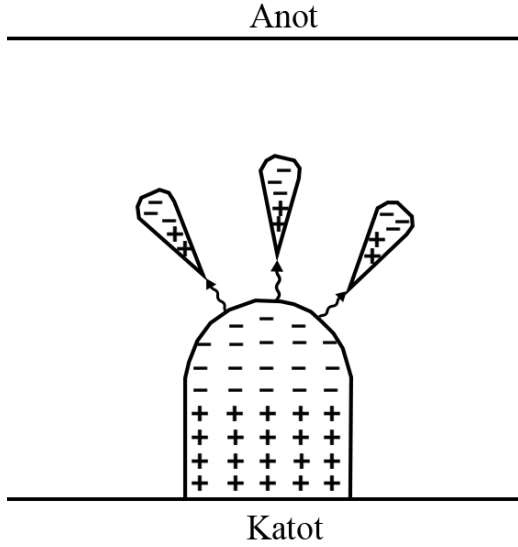
Bir kanalın başlaması için kriter $E_r = KE$, burada $K \cong 1$, koşuluyla sağlanır. p basıncında elektrotlar arası açıklığın büyüklüğüne bağlı olarak minimum delinme gerilimi hesaplanabilir. Bir E değeri seçilmekte ve E_r 'nin hesaplanabilmesi için α 'nın ilgili değeri Eş. 2.37'de yerine konulur. E_r 'nin sonuç değeri E değerinden küçükse, daha yüksek değerli bir E seçilmekte ve E_r ve E değerlerinin birbirine yaklaşık eşit olduğu bir E değeri elde edilene kadar bu işlem tekrarlanır. Bu E değeri, ilgili elektrot açıklığında delinme gerilimidir.

Bu yaklaşım, Meek ve Loeb tarafından önerilen delinme kriteridir. Benzer bir kriter, izleyen satırlarda ifade edilen anot-yönelimli kanal mekanizmaları için Raether tarafından bağımsız olarak önerilmiştir. Raether, kanal mekanizmasının sisteme uygulanan sabit elektrik alan ile karşılaştırılabilir bir alan üretebilecek uzay yükü ve yeterli elektron sayısına ($e^{\alpha x}$) sahip bir çığ mekanizmasının varlığı ile gelişebileceğini önerilmiştir. Kanalın gelişebilmesi için temel kriter, uzay yüküne bağlı gerilim gradyanı ile sisteme uygulanan gradyanın yaklaşık eşit olmasıdır. Yani,

$$\text{uygulanan gradyan} \cong \frac{\alpha e^{\alpha x}}{4\pi r^2 \mu_0} \quad (2.38)$$

burada r çığın yarıçapıdır ve yukarıda ifade edilen yaklaşımla hesaplanabilir.

Sabit ve uzay yükünden kaynaklanan elektrik alanların toplamından oluşan gelişmiş elektrik alan, anoda yönelmiş negatif kanalın önünde ikincil elektron çığlarını teşvik eder. Bu çığ, kanalın önündeki açıklıkta foto-iyonizasyon ile oluşturulan elektronlar tarafından başlatılır, bkz. Şekil 2.9.



Şekil 2.9. Anot yönlü kanal

Raether'in kanal gelişimine yol açacak çığ çarpım faktörü, yaklaşık 20'ye eşit bir αd değerine karşılık gelmektedir, yani çığı oluşumu esnasında yaklaşık 5×10^8 elektron vardır. Raether'ın çalışmaları, çığ gerçekleştiğinde ortamda yaklaşık 10^8 elektronun bulunduğunu doğrulamıştır. Fakat bu mekanizmanın matematiksel modeli, Townsend mekanizmasında olduğu gibi gelişmiş değildir (Kuffel vd., 2000: 326-333; Özkaya, 2008: 244-248).

2.2.3. Elektronegatif gazlarda delinme

Gazların elektrik ekipmanlarında yalıtkan olarak kullanımı, daha geleneksel olarak kullanılan sıvı ve katılara göre belirli avantajlar içerir. Son yıllarda yüksek ve orta gerilim sistemleri teçhizat üretiminde (transformatör, makine, anahtarlama cihazları vb.) yalıtkan olarak gazların kullanımına ilişkin girişimler, yüksek elektrik dayanımı olan gazların daha fazla araştırılması ve geliştirilmesine yol açmaktadır.

Bu yüksek elektrik dayanımı etkileyen en önemli parametrelerden biri, nötr moleküle elektron bağlanabilme kapasitesidir. Elektronun ortamdaki moleküle bağlanması sonucu ortaya çıkan negatif iyon, iyonizasyon için gerekli olan çarpışma sayının artmasına neden olur. Elektronun nötr moleküle bağlanması, çığ gelişmesine katkıda bulunan elektronların ortamdan uzaklaştırılmasını sağlar. Bu mekanizma özellikle katodun yakınında yapışma gerçekleştiğinde daha etkilidir, çünkü bu durumda sadece elektron sistemden

uzaklaştırılmamakta, katottan koparılması muhtemel ikincil elektronların da önünde geçilir (Alston, 1968: 34).

Yapışma prosesi aşağıdaki reaksiyonlarla işlemektedir.



Bu bileşikte A genellikle bir karbon atomu veya sülfür, Y ise bir halojendir. Günümüzde elektron bağlama kapasitesi nedeniyle yaygın olarak kullanılan gazların ikisi SF_6 ve CF_4 'dür. Doğrudan veya ayrışmalı yapışma reaksiyonlarıyla elektron yakalanmakta ve elektron çıkışı oluşumu önlenmekte veya söndürülmektedir.

Townsend denklemi, hem iyonlaşma hem de yapışma süreçlerinin etkilerini içerecek şekilde geliştirilmelidir. Yapışma katsayısı, α ile benzer şekilde tanımlanarak, bir elektronun alan doğrultusunda birim mesafede yaptığı toplam yapışmalı çarpışma sayısıdır. Bu durumda, doğrusal bir elektrot açıklığında ortalama akım büyüme ifadesi,

$$I = \frac{I_0 \left(\frac{\alpha}{\alpha - \eta} e^{(\alpha - \eta)d} - \frac{\eta}{\alpha - \eta} \right)}{1 - \gamma \frac{\alpha}{\alpha - \eta} (e^{(\alpha - \eta)d} - 1)} \quad (2.39)$$

eşitliği ile yazılabilir. Bu eşitlikte η/p , E/p 'nin bir fonksiyonudur.

Townsend'in orijinal delinme kriterine benzer bir şekilde, akımın kendi kendini besleyebilmesi için Eş. 2.39'da paydanın sıfır olması gerekir.

$$\gamma \frac{\alpha}{\alpha - \eta} (e^{(\alpha - \eta)d} - 1) = 1 \quad (2.40)$$

Eğer bu delinme kriteri sağlanıyorsa, $\alpha \geq \eta$ olduğu sürece, α , η ve γ değerlerinden bakılmaksızın, yalnızca elektrot açıklığının, d , yeteri kadar büyük olması koşuluyla delinme

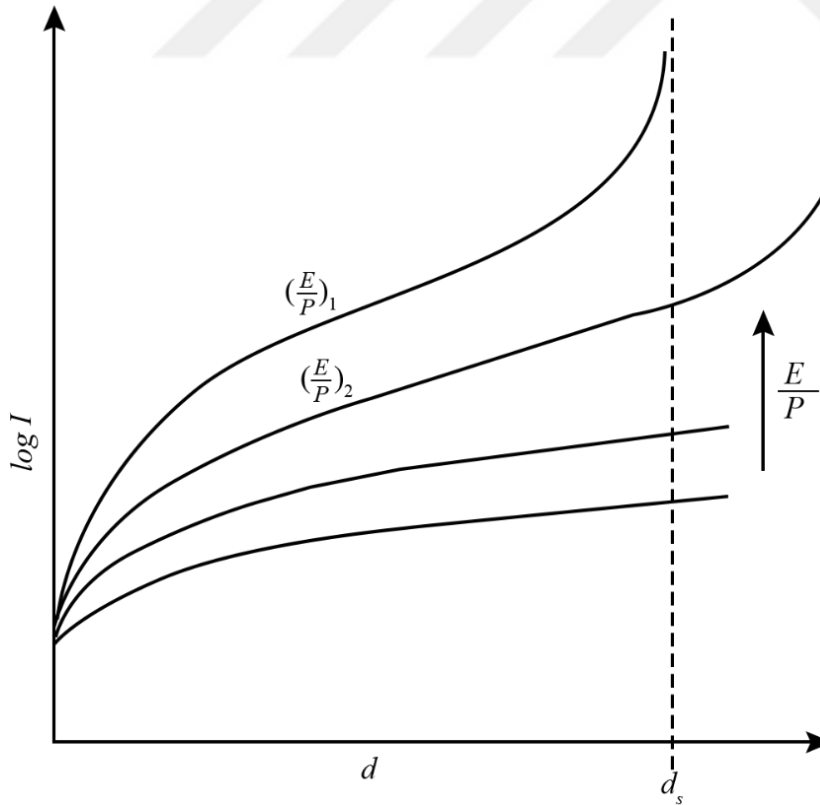
her zaman mümkündür. Bu nedenle, elektronegatif olmayan gazlarla ortak bir şekilde, belirli bir elektriksel alanda delinme elektrot açıklığına bağlıdır.

$\eta > \alpha$ için, Eş. 2.40 artan d değerlerine yakınsadığında, izleyen asimptotik form ortaya çıkar.

$$-\gamma \frac{\alpha}{\alpha - \eta} = 1 \quad (2.41)$$

$$\alpha = \frac{\eta}{1 + \gamma} \quad (2.42)$$

Bu eşitlikler delinme için sadece E/p 'ye bağlı bir koşul getirmekte ve d değeri ne olursa olsun E/p için belirlenen kritik bir değerin altında deşarj mümkün olmaz. Bu değer, çalışma kapsamında kritik elektrik alan olarak tanımlanmıştır. Eğer γ değeri düşükse, elektronegatif gazlar için kritik elektrik alan değeri, $\alpha = \eta$ ilişkisinden türetilebilir.



Şekil 2.10. Elektronegatif gazlar için akım-elektrot açıklığı grafiği

Elektronegatif gazlardaki yapışma etkisi, Şekil 2.10'da gösterildiği gibi, sabit E/p için hazırlanan Townsend tipi deneylerle kanıtlanabilir (Alston, 1968: 35).

Bu ifadeler, kritik elektrik alan değeri yaklaşımını tanımlanır. Yapışma katsayısı hesaba katılarak düzenlenmiş bir delinmenin kanal mekanizması elektronegatif gazlara da aynı şekilde uygulanabilir olduğu aşikârdır.

2.2.4. Doğrusal alanlarda delinme karakteristikleri

Paschen Yasası

Townsend mekanizmasının açıklandığı Bölüm 2.2.1'de doğrusal bir elektrik alanda elektronegatif olmayan gazların delinmesi için Townsend kriteri tanımlanmıştır. Eş. 2.31'den,

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (2.43)$$

yazılabilir. Bu eşitlikteki α ve γ katsayıları basınçla indirgenmiş elektrik alanın, E/p , birer fonksiyonudur ve

$$\alpha = p f_1\left(\frac{E}{p}\right) \quad (2.44)$$

$$\gamma = p f_2\left(\frac{E}{p}\right) \quad (2.45)$$

olarak verilirler. Düzgün elektrik alanda,

$$E = \frac{V}{d} \quad (2.46)$$

olduğundan, Eş. 2.43'te Eş. 2.44 ve Eş. 2.45 yerlerine konur ve elektrik alan terimi yerine elektrot açıklığına indirgenmiş gerilim ifadesi yazılırsa,

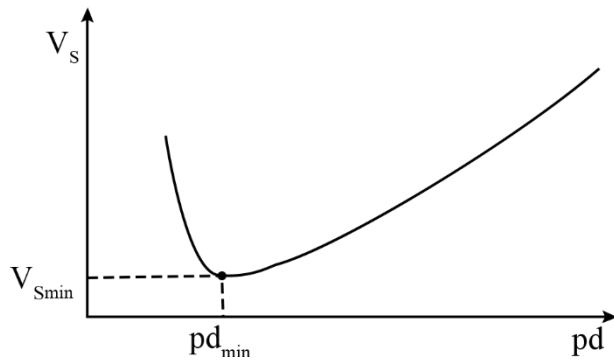
$$f_2\left(\frac{V}{pd}\right)(e^{pdf_1(V/pd)} - 1) = 1 \quad (2.47)$$

ifadesi elde edilir. Bu eşitlik, delinme gerilimin ortamdaki gaz basıncı ve elektrotlar arasındaki açıklığın bir fonksiyonu olduğunu ve bu iki parametrenin çarpımına bağlı olarak değiştiğini göstermektedir.

$$V = f(pd) \quad (2.48)$$

Bu sonuç, yüksek gerilim teknolojisinde kullanılan en önemli yasalardan biridir ve Paschen yasası olarak tanımlanır. Bu yasaya ismini veren Paschen, 19. yüzyıl sonlarında hava, karbon dioksit ve hidrojenin delinme gerilimini ölçmüş ve bu sonuçlardan faydalananarak söz konusu yasayı tanımlamıştır. Bu yasa, elektronegatif olmayan gazların yanı sıra elektronegatif gazlar için de uygulanabilmekte ve temel bir yaklaşım olarak güncelliğini korumaktadır (Malik ve Qureshi, 1978; Torres, Reyes, Castillo ve Hernandez; 2012).

Paschen yasasını tanımlayan, delinme gerilimiyle basınç ve elektrot açıklığı çarpımı arasındaki ilişki Şekil 2.11’de görülmektedir. Genellikle minimum gerilim değeri 300 V ve basınç ile elektrot açıklığı çarpımının minimum değeri 0,0013 bar.cm seviyesindedir. Şekil 2.11’deki eğrinin açıklanması için, sabit bir elektrot açıklığında minimum noktanın sağında basıncın düştüğü kabul edilirse, kapalı hacim içindeki yoğunluk azalmakta ve bunun sonucu olarak elektron anoda doğru sürüklenirken gaz molekülleriyle daha az çarpışma yapmaktadır. Bu durumda, çarpışma sonrası iyonlaşma için gerekli kinetik enerjiye sahip elektronlara daha düşük bir elektriksel gerilim yeterlidir (Kuffel vd., 2000: 333-335).



Şekil 2.11. Paschen delinme karakteristiği

Bu eğrinin minimum noktasına ulaşıldığında, molekül yoğunluğu düşüktür ve nispeten az çarpışma olur. Molekül yoğunluğu nedeniyle, elektronun sahip olduğu enerji iyonlaşma enerjisini aşıya bile elektronun çarpışma sonrası uyarılan molekül yoğunluğu çığı oluşturabilecek seviyede değildir. Elektronun enerjisine bağlı olarak, sınırlı bir iyonlaşma ihtimali bulunur. Molekül yoğunluğu ve dolayısıyla çarpışma sayısının azalması nedeniyle delinme ancak iyonlaşma olasılığının arttığı yüksek gerilimlerde, yani eğrinin minimum noktasının solunda ortaya çıkar (Klüss, 2011: 12-14).

Bu tez kapsamında kullanılan saf SF₆, CF₄ ve argon ve bu gazların ikili ve üçlü gaz karışımlarına ait ölçümler Paschen eğrisinin minimum noktasının sağında alınır. Bu bölgede delinme gerilimi, basınç ve elektrot aralığının çarpımı ile doğrusal bir şekilde değişir. Bu gazların Paschen eğrisindeki minimum değerleri, Çizelge 2.1’de görülmektedir (Malik ve Qureshi, 1978; Li, Hou, Yuan, Cheng ve Tu, 2018a; Skoro, Malovic, Maric ve Petrivic, 2007; Chen, 2016: 9). Deneysel ölçümler 1 bar basınçta ve minimum 1 mm elektrot açıklığında alındığından, delinme karakteristiğinin incelendiği bölge Paschen eğrisinin sağında kalmaktadır.

Çizelge 2.1. SF₆, CF₄ ve argon gazına ait Paschen minimum değerleri

Gaz	Minimum delinme gerilimi (V_{smin})	Minimum basınç ve elektrot açıklığı çarpımı (pd_{min})
SF ₆	≈ 500 V	0,00035 bar.cm
CF ₄	≈ 500 V	0,00047 bar.cm
Argon	137 V	0,00120 bar.cm

Yüksek Basınç Koşullarında

Elektrotlarda kullanılan malzeme atmosferik basınçlarda delinme karakteristiğini etkilemez, ama basınç yeterince arttırıldığında önemli hale gelir (Khalaf, Agool ve Muslim, 2014). Bir diğer yüksek basınç karakteristiği ise, sistemin düşük enerjili bir kaynaktan beslenmesi durumunda delinme değerinin sabit bir değere ulaşana kadar başarılı yüzeysel boşalmalarla artacağıdır. Bu şekilde, elektrotlar delinme koşulu için şartlandırılır. Bu yüzeysel boşalmalar, elektrot üzerindeki mevcut mikroskobik üretim hatalarının veya yüzeydeki kirliliğin bir sonucu olarak artabilir (Alston, 1968: 46-47). Yeterince yüksek basınçlarda

(10 atm'nin üstünde) delinme gerilimi değeri daha düşük basınçta aynı pd değerine karşılık gelen delinme geriliminden daha düşük olmakta, düşük basınçlarda olduğu gibi yüksek basınçlarda da Paschen yasası başarısız olmaktadır (Cookson, 1981).

Bu karakteristikler, elektrot yüzeyinin düzgünlüğüne ve bileşimine bağlı olduğu bilinen elektrik alan yayılımı ile açıklarlar. Yük bölgelerinin oluşumu elektrik alanı bozan bir akıma neden olduğundan, sadece düzgün elektrik alanlarda geçerli olan Paschen yasası bu koşullarda başarısız olur (Cookson, 1981).

Sıcaklığın Etkisi

Delinme mekanizmaları ve doğrusal alanlarda delinme karakteristiğini açıklayan Paschen yasasının açıklanması aşamasında, sıcaklığın etkisi ihmal edilmiştir. Sıcaklığın etkisini de göz önünde tutabilmek için, Paschen yasasında daha genel bir açıklamayla basınç terimi yerine yoğunluk terimi konulur, $V = f(\rho d)$. Bu terimin eklenmesiyle birlikte, Paschen yasasının geçerliliği deneysel olarak 1100 °C sıcaklığa kadar doğrulanmış olur (Alston, 1958). Daha yüksek sıcaklıklarda termal iyonizasyon başta olmak üzere elektrotların fiziksel olarak zarar görmesi gibi nedenlerle Paschen yasası geçerliliğini yitirmektedir (Zhong, Yang, Liu, Wu ve Rong, 2014).

Devre kesici gibi yüksek gerilim cihazlarında meydana gelen bir ark sonrası elektrotlar üzerinde sıcak noktalar oluşur. Bunun sonucunda sıcak noktanın yakınında elektriksel dayanım azalır, bir kez iyonlaşma gerçekleştiğinde doğrusal elektrik alan bozulur (Alston, 1958).

Delinme Karakteristikleri

Normal koşullar altında elektrot açıklığının 0,01 cm'den büyük olduğu durumlarda, pd çarpımı Paschen minimumun sağında kalır. Paschen yasasının geçerliliğini koruduğu bu sınırlar içinde, delinme gerilim pd'nin bir fonksiyonu olarak değişir. Havanın bulunduğu ortamda gerilim ifadesi,

$$V = 24,22 \frac{293 p}{760 T} d + 6,08 \sqrt{\left(\frac{293 p}{760 T} d\right)} \quad (2.49)$$

olur. Bu eşitlikte p , T , d ve V terimleri sırasıyla mmHg, °K, cm ve kV biriminden basınç, sıcaklık, elektrot açıklığı ve gerilimi ifade etmektedir. Doğrusal bir elektrik alanda, sabit basınç ve sıcaklık olsa bile elektriksel dayanımın sabit olmadığına dikkat edilmelidir, $p = 760$ mmHg ve $T = 293$ °K ise,

$$E = 24,22 + \frac{6,08}{\sqrt{d}} \quad (2.50)$$

olarak elde edilir. Bu eşitlik geniş elektrot açıklıklarında delinme karakteristiği için kritik elektrik alanın 24 kV/cm olduğunu, 1 cm elektrot açıklığında gerekli elektrik alan seviyesinin 30 kV/cm değerinde olması gerektiğini matematiksel olarak açıklar (Naidu ve Kamaraj, 1995: 26-30).

Yaygın olarak kullanılan bazı yalıtkan gazlara ait karşılaştırmalı elektriksel dayanım sabiti, Paschen eğrinin sağ yanındaki, Çizelge 2.2’de görülmektedir (Beroual ve Haddad, 2017; Yu, Hou ve Wang, 2017).

Çizelge 2.2. Yalıtkan gazların karşılaştırmalı elektriksel dayanım katsayıları

Gaz	Elektriksel dayanım
SF ₆	1,00
CF ₄	0,42
Ar	0,04-0,10
Air	0,37-0,40
CO ₂	0,32-0,37
N ₂	0,34-0,43
H ₂	0,20-0,22
CH ₄	0,43
C ₂ F ₆	0,80

SF₆ gazı yaygın olarak kullanılan diğer gazlarla kıyaslandığında yüksek dielektrik dayanımı nedeniyle elektrik tesislerinde ve yüksek gerilim cihazlarında kullanılır. Fakat hem maliyeti hem de sera gazı olmasının neden olduğu çevresel sorunlar alternatif gazlarla ilgili çalışmaları ortaya çıkarmış, Çizelge 2.2’de ifade edilen gazlarla SF₆’nın ikili ve üçlü gaz karışımlarına başvurulduğu gibi, son dönemde alternatif hidrokarbon ve perflorokarbon bileşiklerine de yoğunlaşılmaktadır (Li, Zhao ve Murphy, 2018b; Zhang vd., 2017).

2.2.5. Doğrusal olmayan alanlarda delinme karakteristikleri

Korona Deşarjları

Eğer elektrik alan doğrusal dağılıyorsa, elektrot aralığındaki kademeli bir gerilim artışı herhangi bir ön boşalma olmaksızın bir kanal oluşturarak delinmeye neden olur. Bununla birlikte, eğer elektrik alan elektrotlar arasında doğrusal dağılmıyorsa gerilimdeki bir artış elektrik alan şiddetinin en yüksek olduğu noktalarda, yani sivri uç veya elektrotların kavislendiği noktalarda deşarjlara neden olur (Haddad ve Warne, 2007: 13-14). Bu formdaki deşarjlar, korona deşarjı olarak adlandırılır ve mavimsi bir parlaklık şeklinde gözlenebilir. Bu deşarjı her zaman ısıklık sesine benzer bir ses izler ve koronanın gerçekleştiği bölgenin çevresindeki hava ozona dönüşür. Korona olayı yüksek gerilim iletim sistemlerinde önemli miktarda güç kaybına neden olur. Bunun yanı sıra, bölgesel olarak gazların iyonlaşma ve deşarjı sonrası ortaya çıkan yan ürünlerden dolayı yüksek gerilim teçhizatlarında yalıtkanlık seviyesinin düşmesine de neden olur (Naidu ve Kamaraj, 1995: 29).

Hava ile çevrili bir iletken yüzeyinde koronanın ortaya çıkması için gerekli elektrik alanının büyüklüğü, korona başlangıç alanı olarak tanımlanan, yarıçapı r olan paralel kablolar için yaklaşık olarak,

$$E_c = 30\rho d \left[1 + \frac{0,301}{\sqrt{dr}} \right] \quad (2.51)$$

eşitliğiyle tanımlanabilir. Geometrinin koaksiyel, ortak eksenli, silindirler olması durumunda, iç silindirin yarıçapı r kabul edilerek eşitlik izleyen forma dönüşür,

$$E_c = 31\rho d \left[1 + \frac{0,308}{\sqrt{dr}} \right] \quad (2.51)$$

burada ρ oldukça parlatılmış düzgün kablolar için birim değerinde olduğu kabul edilen yüzey düzensizlik katsayısı, d bağıl hava yoğunluğu düzeltme katsayısıdır ve

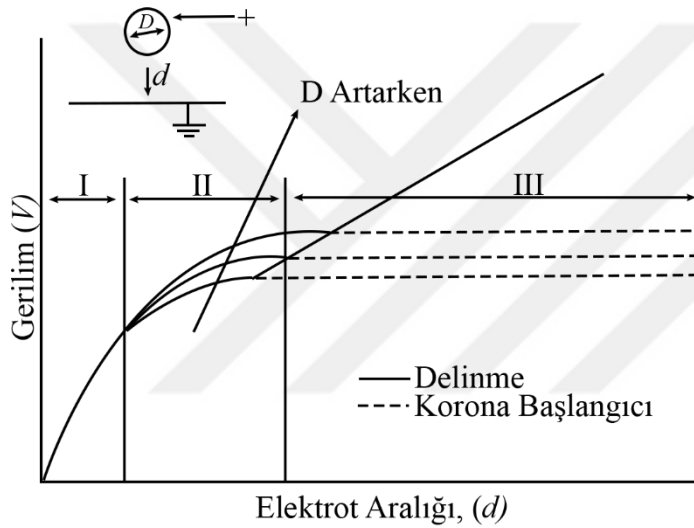
$$d = \frac{0,392b}{(273 + t)} \quad (2.52)$$

olarak verilir. Bu eşitlikte b torr biriminden atmosfer basıncı ve t °C biriminden sıcaklığı ifade etmektedir. 760 torr, 1 bar, ve 25 °C koşulunda söz konusu düzeltme katsayısı 1 değerine eşit olmaktadır. Bu eşitlikler atmosfer basıncından birkaç torr basınca kadar, korona başlangıç değerlerini başarıyla yorumlayabilirler (Naidu ve Kamaraj, 1995: 30).

Yüksek basınçta yüksek gerilim iletkenlerine uygulanan doğrusal gerilimin pozitif veya negatif polaritede olması, koronanın görüntüsünü belirgin bir şekilde değiştirmektedir. Gerilimin pozitif polaritede olması durumunda, korona deşarjı iletken yüzeyi üzerine düzgün bir şekilde dağılmış maviye yakın beyaz bir kılıf formundadır. Gerilim negatif polaritede olması durumunda ise, korona deşarjı iletken boyunca dağılan kırmızı parlak noktalar halinde görülür (Boyers ve Tiller, 1973). Havadaki sivri uç-düzlem elektrot sistemlerinde uygulanan gerilim negatif polaritede ise korona, Trichel darbeleri olarak adlandırılan akım darbeleri formunda ortaya çıkar. Bu darbelerin tekrar sıklığı, frekansı, uygulanan gerilim ve ortamdaki basınçla doğru orantılıdır. Eğer aynı koşullarda sivri uçtaki polarite pozitif ise, korona akımı sisteme uygulanan gerilimle birlikte artar veya azalır. Yeterince yüksek gerilimlerde akımdaki büyüme 10^{-7} A değerine kadar gerilimle birlikte artar ve bu değerden sonra akım yaklaşık 1 kHz frekansında kısmi deşarjlara dönüşür. Bu aşamayı izleyen süreçte gerilim artmaya devam ederse, delinmenin ortaya çıkacağı noktaya kadar akım darbeleri deşarjlarla artar (Naidu ve Kamaraj, 1995: 30).

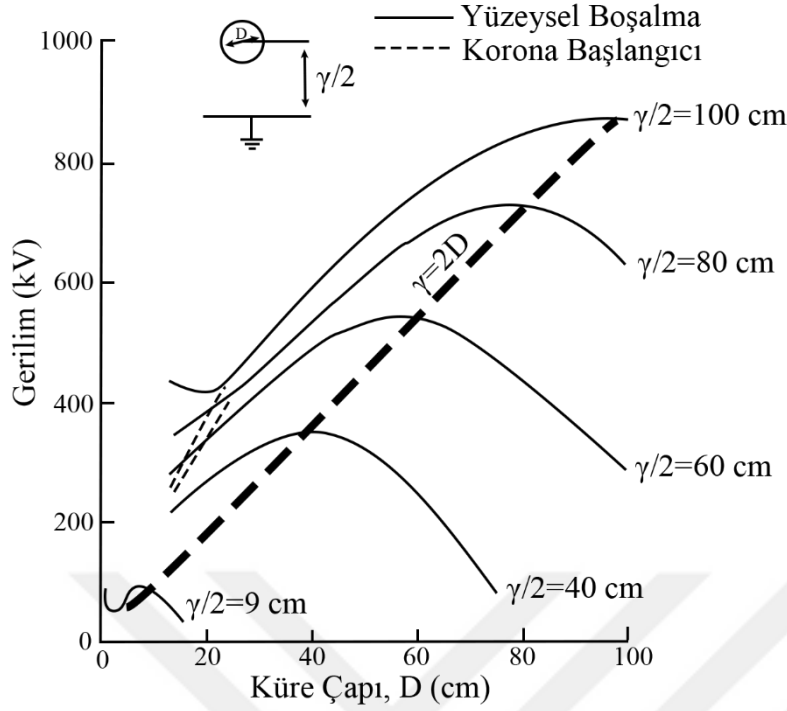
Küre-düzlem elektrot sistemlerinde korona başlangıç ve delinme gerilimleri ile elektrot açıklığı arasındaki ilişki Şekil 2.12’de görülmektedir. Bu şekle göre,

- i. Küçük elektrot açıklıklarında (I. Bölge), elektriksel alan doğrusaldır ve delinme gerilimi elektrot açıklığına bağlı olarak değişmektedir,
- ii. Kısmen daha büyük elektrot açıklıklarında (II. Bölge), küre çapının iki katına kadar, elektriksel alan doğrusal dağılmamaktadır ve delinme gerilimi hem kürenin çapına hem de elektrot açıklığına bağlı olarak değişmektedir,
- iii. Büyük elektrot açıklıklarında (III. Bölge), küre çapının iki katından büyük açıklıklarda, alan doğrusal değildir ve delinme korona formunda başlar ve sadece elektrot aralığına bağlı olarak değişmektedir. Korona başlangıç gerilimi esas olarak küre çapına bağlıdır (Alston, 1968: 51).



Şekil 2.12. Küre-düzlem elektrot sisteminde küre çapı ve elektrot aralığına bağlı olarak delinme ve korona başlama karakteristikleri

Hava ortamında küre-düzlem elektrot sistemi için delinme karakteristiği Şekil 2.13'de görülmektedir (Alston, 1968: 51). Korona ve doğrusal olmayan alanlarda delinme karakteristiği oldukça karmaşık süreçlerdir ve günümüzde bu konuda çalışmalar devam etmektedir (Abdel-Salam vd., 2005; Smulders, Heesch ve Paasen, 1998).



Şekil 2.13. Havada küre-düzlem elektrot sisteminin delinme ve korona başlangıç karakteristikleri

Doğrusal Olmayan Alanlarda Delinme

Doğrusal olmayan elektrik alanların bulunduğu geometrilere, örneğin nokta-düzlem, küre düzlem veya koaksiyel silindir elektrot sistemlerinde, elektrik alanın şiddeti ve dolayısıyla efektif iyonlaşma katsayısı, $\bar{\alpha}$, elektrot açıklığına bağlı olarak değişir. Elektrotlar arasında elektron çığı, elektronun aldığı yol boyunca efektif iyonlaşma katsayısının integralinin alınmasıyla tanımlanır, $\int \bar{\alpha} dx$. Düşük basınçlarda delinme için Townsend kriteri, Eş. 2.31 ve Eş. 2.43'te tanımlanan, efektif iyonlaşmanın elektrot açıklığına göre integrali göz önünde bulundurularak yeniden yorumlanabilir.

$$\gamma \left[\exp \left(\int_0^d \bar{\alpha} dx \right) - 1 \right] = 1 \quad (2.53)$$

Burada d, elektrot açıklığıdır. Bu integral en yüksek elektrik alan şiddetinin bulunduğu izafi hat boyunca alınmalıdır. Bu ifade, doğrusal olmayan elektrik alanın elektrot açıklığında göreceli olarak daha az değiştiği durumlar için yüksek basınçlarda da geçerlidir (Pedersen, 1967). Elektriksel alan şiddetinin elektrotlar arasında çok fazla farklılaştığı durumlarda,

öncelikle E/p 'nin büyük değerler aldığı bölgelerde çalışılmalıdır. Alan şiddeti belirli bir değerin, E_{cr} , altına düştüğünde, bu integral geçerli olmaktan çıkar. Townsend mekanizması bu durumun dışında, katottaki elektrik alan şiddeti düşük olduğunda kriter sadece ikincil iyonlaşma katsayısının etkisiyle tanımlandığından geçerliliğini kaybeder.

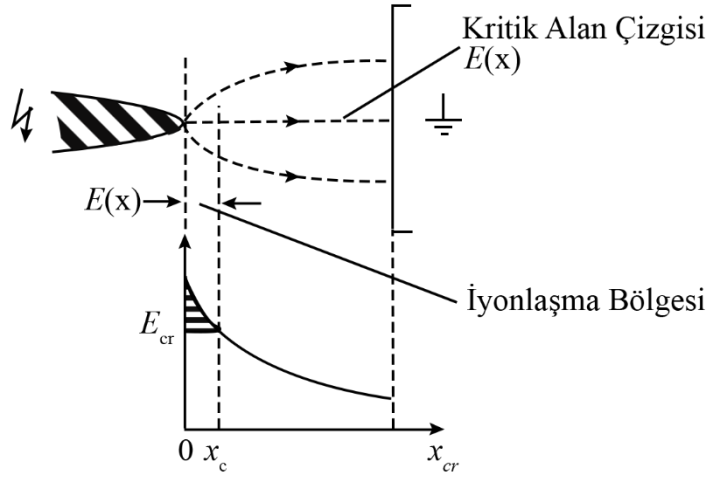
Gerçekte, delinme veya deşarjın başlaması foto-iyonizasyon süreci hesaba katıldığında hala mümkündür. Genel durumda delinme veya deşarjın başlaması için kriter koşulu $\bar{\alpha}$ 'nın doğrusal olmayan dağılımı göz önüne alınarak izleyen eşitlikteki gibi tanımlanabilir.

$$\exp \int_0^{x_{cr} < d} \bar{\alpha} dx = N_{cr} \quad (2.54)$$

Bu eşitlikte, N_{cr} kanal mekanizmasının başlangıcına neden olan bir çığın kritik elektron konsantrasyonu (yaklaşık 10^8 elektron seviyesindedir), x_{cr} çığın eriştiği mesafenin yol uzunluğu ve d elektrot açıklığıdır (Kuffel vd., 2000: 342). Bu elektron yoğunluğuna bağlı olarak Eş. 2.54 yeniden yazılabilir.

$$\int_0^{x_{cr} < d} \bar{\alpha} dx = \ln N_{cr} \approx 18 - 20 \quad (2.55)$$

Şekil 2.14, pozitif bir nokta-düzlem elektrot sisteminde elektriksel alanın elektrot açıklığında önemli düzeyde farklılaştığı bir geometriyi ifade etmektedir. Eş. 2.55, bu doğrusal olmayan elektrot sisteminde delinmenin veya sadece koronanın oluşması durumuna bağlı olarak delinme ve deşarj başlangıç geriliminin hesaplanmasında kullanılır (Kuffel vd., 2000: 343).



Şekil 2.14. Doğrusal olmayan bir elektrot açıklığında elektrik alanının dağılımı

2.3. SF₆, CF₄ ve Argon Gazlarının Genel Özellikleri

Çalışma kapsamında kullanılan SF₆, CF₄ ve argonun molekül ağırlığı, yoğunluk, kaynama noktası, küresel ısınma potansiyeli, atmosferik yarı ömrü, yanıcılığı, zehirliliği ve delinme gerilimi karşılaştırmalı olarak Çizelge 2.3’de verilmiştir (Beroual ve Haddad, 2017; Ehhalt vd., 2001).

Çizelge 2.3. SF₆, CF₄ ve argonun fiziksel ve çevresel özellikleri

Özellik	SF ₆	CF ₄	Argon
Molekül ağırlığı (g/mol)	146	88	40
Yoğunluk (g/L)	6,12	3,72	1,78
Kaynama noktası (°C)	-64	-128	-186
Yüz yıllık zaman diliminde küresel ısınma potansiyeli	23 900	6 500	---
Atmosferik ömrü (yıl)	3 200	50 000	1,25 10 ⁹
Yanıcılık	Yanıcı değil	Yanıcı değil	Yanıcı değil
Zehirlilik	Zehirsiz	Az zehirli	Zehirsiz
SF ₆ ’ya göre bağlı delinme katsayısı	1,0	0,39-0,62	0,04-0,10

Bu gazların kullanım yeri başta olmak üzere, diğer özellikleri ile ilgili ayrıntılar izleyen alt bölümlerde SF₆, CF₄ ve argon sırasıyla sunulmaktadır. Küresel ısınma potansiyeli CO₂’in

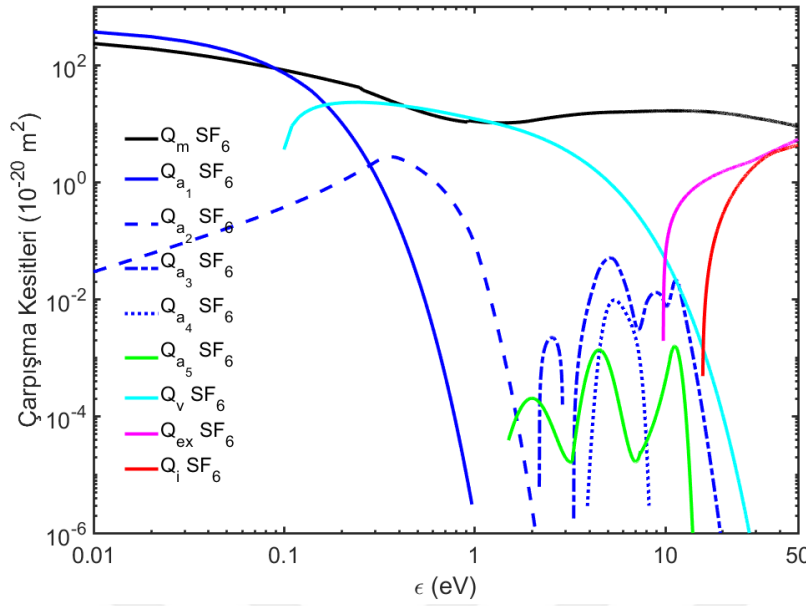
yüz yıllık bir zaman diliminde küresel ısınma etkisine bağlı olarak hesaplanan göreceli bir değerdir.

2.3.1. SF₆ (Kükürt hekzaflorür)

Kükürt hekzaflorür, SF₆, merkezinde bir kükürt atomunun bulunduğu ve bu atomu simetrik bir geometri ile saran altı flor atomundan oluşan bir bileşiktir. SF₆ gazı zehirli olmayan ve alev almayan renksiz, kokusuz ve kimyasal bakımdan kararlı bir gazdır. Kendisini oluşturan atom ağırlıkları dikkate alındığında havadan yaklaşık beş kat daha ağır olduğu görülür. Molekül ağırlığı 146 gr/mol, yoğunluğu sıvı halde 1,56 kg/l, gaz halde 6,12 g/L ve havaya göre özgül ağırlığı 5,1'dir. Kimyasal kararlılığının yanı sıra ısı süreçlere ve fotolize bozulmalara karşı da oldukça dayanıklıdır (Dincer, Ozerdem ve Bektas, 2007; Tezcan, Akcayol, Ozerdem ve Dincer, 2010).

SF₆ gazı kimyasal ve ısı kararlılığı, zehirli ve yanıcı olmaması, elektronegatif bir gaz olarak yüksek yalıtkanlık seviyesi ve ayrışmalı uyarıtma sahip olması gibi nedenlerle yüksek gerilim ve güç sistem mühendisliğinde sıklıkla kullanılır. Yüksek elektrik alan yoğunluğunda çalışan teçhizatlarında, deşarj sonrası ortamda artan elektron sayısını yapışmalar sonucu azaltma kapasitesi nedeniyle önemli bir dielektrik gazdır. Standart koşullar altında hava ile kıyaslandığında, birim mesafede delinme gerilimi yaklaşık üç kat büyüktür (Nam vd., 2009).

SF₆ gazının çarpışma kesitleri incelendiğinde elastik çarpışma kesiti olan momentum çarpışma kesiti 0,01-50 eV aralığının tamamında gözlemlenir. Elastik olmayan çarpışma kesitleri arasında yapışma çarpışma kesitine toplamda beş farklı enerji seviyesinde karşılaşılır, bu kesitlerin varlığı söz konusu gazın yüksek dielektrik dayanımını açıklar. Elastik olmayan ve gazın kinetik yapısı gereği gözlemlenen diğer çarpışma kesitleri ise titreşim, uyarıtım ve iyonlaşma çarpışma kesitleridir, bkz. Şekil 2.15.



Şekil 2.15. SF₆ gazının çarpışma kesitleri

Bu çarpışma kesitleri arasında elastik momentum ve toplam elektron uyartım çarpışma kesiti Itoh, Matsumura, Satoh, Date, Nakao ve Tagashira (1993) kaynağından alınmıştır. Uyartım çarpışma kesitinin eşik enerjisi 9,8 eV'dur. Titreşim ve iyonlaşma çarpışma kesiti ise tek bir veri seti olarak sırasıyla Rohr (1979) ve Rapp ve Englander-Golden (1965) referanslarından elde edilmiştir. Titreşim çarpışma kesitinin eşik enerji 0,95 eV, iyonlaşma çarpışma kesiti eşik enerjisi ise 15,8 eV seviyesindedir (Yoshizawa, Sakai, Tagashira ve Sakamoto, 1979). Beş farklı seviyedeki yapışma çarpışma kesiti sırasıyla SF₆⁻, SF₅⁻, F⁻, SF₄⁻ ve F₂⁻ iyonlarının etkisiyle ortaya çıkar. SF₆⁻ iyonu için çarpışma kesiti verileri 0,14 eV'a eşit ve daha düşük enerjilerde Chutjian ve Alajajian (1985), daha yüksek elektron enerjisinde ise Chutjian (1981) tarafından tanımlanmıştır. SF₅⁻ iyonu için çarpışma kesiti Christophorou, McCorkle ve Carter (1971) kaynağından alınmış, bu kesitin tepe değeri Kline, Davies, Chen ve Chantry (1979) ve Novak ve Frechette (1982) tarafından yeniden düzenlenmiştir.

Yüksek dielektrik dayanımının yanı sıra, kesici ve ayırıcı gibi yüksek gerilim teçhizatlarında gelişen arklar sonucu ortaya çıkan aşırı sıcaklıklarda ayrışmalı uyartım gerçekleştirebilme yeteneğine sahiptir (Forand, Becker ve McConkey, 1986; Li vd., 2018b). Bu süreç gerçekleştiğinde SF₆ gazı kükürt ve flor atomlarına ayrılır. Ortam sıcaklığının azalması sonrası bu atomlar yeniden birleşerek SF₆ gazını oluştururlar (Beroual ve Haddad, 2017). Yüksek sıcaklıklarda bozulmamasını sağlayan bu özellik, söz konusu cihazların uzun süre kullanılmasına yardımcı olur.

Bu özellikleri nedeniyle yoğunlukla elektrik endüstrisinde kullanılan SF₆ gazı, plazma, lazer ve yarı iletken teknolojisi, magnezyum ve alüminyum dökümü ve değerlendirilmesi gibi endüstriyel alanlarda da kullanılır (Kuczek, Stosur, Szewczyk, Piasecki ve Steiger, 2013; Okabe, Yuasa, Kaneko ve Ueta, 2009). Elektrik endüstrisinde kesici ve ayırıcı gibi anahtarlama cihazlarında kullanımı, bu cihazların boyutlarının küçülmesine, şalt sahasında daha az yer kaplamalarına ve taşıma ve montaj gibi tedarik süreçlerinin kolaylaşmasına yardımcı olur (Zhao, Li, Jia ve Murphy, 2013). Endüstrideki kullanım alanları arasında gaz izoleli yüksek gerilim hatları, güç sistemleri, şalterler ve yüksek gerilim trafoları, yüksek frekans taşıyıcı kablolar ve metalürji bulunmaktadır (Li vd., 2018b; Dahl ve Franck, 2013). Bu temel kullanım alanlarının yanı sıra ısı ve ses yalıtımı, retina ayırma ameliyatı, uçak lastikleri, AWACS radar kubbeleri ve röntgen cihazları gibi özel uygulamalarda da kullanılmaktadır (Christophorou ve Olthoff, 2000).

SF₆ gazı, Türkiye’deki elektrik endüstrisinde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Türkiye’nin başkenti Ankara’da gaz izoleli toplamda beş adet yüksek/orta gerilim trafosu bulunmaktadır. Bu trafolardan Maltepe, Eryaman ve Çiğdem GİS mevcutta sisteme entegre çalışmakta, Akköprü ve Bilkent GİS ise sırasıyla yapım ve ihale aşamasındadır. Gaz izoleli bu trafoların primer ve sekonder sargılarındaki gerilim 154 ve 33,6 kV seviyesindedir, güçleri ise 50 ile 100 MVA aralığında değişmektedir. Bu trafolarla ilgili ayrıntılı bilgiye Türkiye Elektrik İletim A.Ş.’nin (TEİAŞ) hazırladığı “GİS Güç Transformatörü (154 kV / OG) Teknik Şartnamesi” incelenerek ulaşılabilir (TEİAŞ, 2017).

SF₆ gazının bu avantajlarının yanı sıra belirli dezavantajları da mevcuttur. Bu dezavantajları arasında homojen olmayan ortamlarda yüksek basınç ve elektrot aralıklarındadeşarj karakteristiğinin ideal olmaması, sera gazı etkisi ve pahalı olması ön plana çıkar (Benhenni, Yousfi, Urquijo ve Hennad, 2009). Ozon tabakasının seyrelmesine neden olan klor atomunu bünyesinde bulundurmamasına rağmen, güneşten yayılan ışınları emerek dünyanın ısınmasına neden olur. Atmosfer başta olmak üzere küresel ölçekte sıcaklıklarının artmasına neden olan sera gazlarından biri olan SF₆ gazı, 1997 yılındaki Kyoto Protokolü sonrası kullanımı küresel ölçekte sınırlandırılan gazlar arasına alınmıştır (Omori, Shimizu, Matsumoto, Izawa ve Nishijima, 2014).

Kyoto Protokolü, 1992’de New York’ta Birleşmiş Milletler çatısı altında toplamda 194 taraf ülkenin imzaladığı İklim Değişikliği Sözleşmesi’nin nihai amacı ve rehberliğinde, 1997

yılında Japonya'nın Kyoto kentinde imzalanmıştır (United Nations, 1992: 4, 5; United Nations, 1997: 1-3). Bu protokol ile sera gazı niteliğine sahip karbondioksit (CO₂), metan (CH₄), nitroz oksit (N₂O), hidrofluorokarbonlar (HFCs), perfluorokarbonlar (PHCs) ve kükürt hekzaflorür'ün (SF₆) endüstriyel kullanımına sınırlama getirilmesi amaçlanmıştır (United Nations, 1997: 19). Bu amaç doğrultusunda söz konusu protokolün Ek-B listesindeki gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler sera gazı salınımlarını 1990 yılı seviyesinin en az %5 altına indirmeyi taahhüt etmiştir (United Nations, 1997: 20). 2008-2012 dönemini kapsayan bu taahhüt, Kanada ve Amerika Birleşik Devletleri gibi gelişmiş ülkelerin protokolü onaylamaması veya taraf olmaktan vaz geçmesi gibi nedenlerle hedeflenen seviyede tutturulamamıştır. 1990 yılı ile kıyaslandığında diğer sera gazları gibi SF₆'nın da atmosferdeki konsantrasyonu artmış, 2015 yılı itibariyle 1990'a göre bu konsantrasyon neredeyse dört katına çıkmıştır (Bullister, 2015: 7-13). Kyoto Protokolü'nün ilk taahhüt döneminin son bulması ile birlikte Kyoto Protokolü'ne Doha Değişikliği, 2012 yılında Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Sözleşmesi taraflarına sunulmuştur. 2013-2020 dönemini kapsayan bu ikinci taahhüt döneminde, sera gazı salınımını azaltma taahhüdü altına giren ülkeler arasında Avrupa Birliği ülkeleri ön plana çıkmıştır. Küresel sera gazı yayılımının önemli kaynak ülkeleri arasında bulunan Çin, Amerika ve Rusya gibi ülkeler her iki dönemde de herhangi bir taahhütte bulunmamıştır (United Nations, 2012: 1-6).

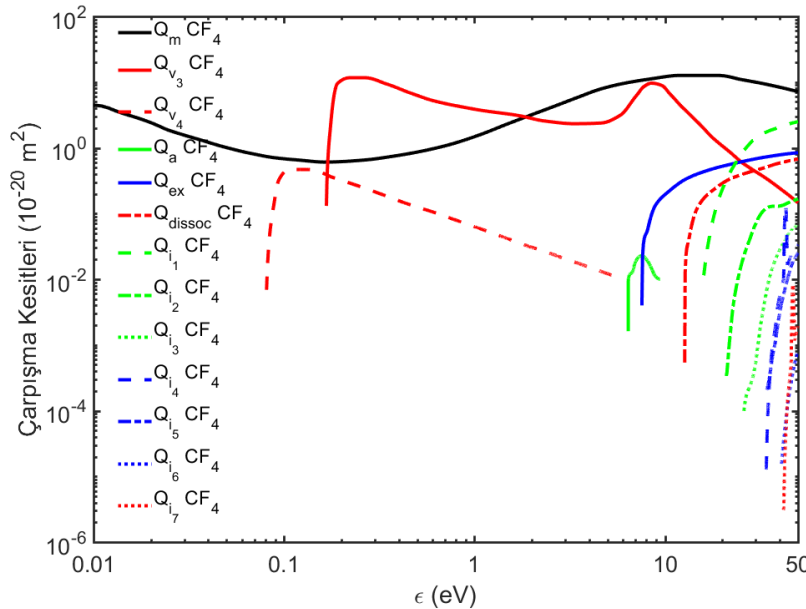
Türkiye, 2009 yılında 27227 sayılı Resmi Gazete'de yayınlanan 5836 Sayılı Kanun ile Kyoto Protokolü'nü resmen onaylamıştır (Resmi Gazete, 2009). Fakat 2008-2012 ve 2013-2020 dönemlerini kapsayan sera gazı salınımını azaltmayı sayısal olarak taahhüt eden ülkeler arasında bulunmamaktadır. Bu nedenle, söz konusu gazların kullanımına mevcut durumda yasal bir sınırlandırılma getirilmemiştir. Kyoto Protokolü ve Doha Değişikliği'ne taraf olmanın bir gereği olarak alternatif politikaların geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır (T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 2012: 16-21).

Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Komisyonu'nun bu sınırlama kararı sonrası, endüstrideki yaygın kullanım alanlarında farklı alternatifler aranmaya başlanmıştır (Su, Lin, Li ve Chen, 2016). Bu sistemlerde saf SF₆ kullanımı yerine, soy gaz veya floro-karbon ve hidro-karbon içerikli bileşiklerden oluşan gazlarla hazırlanan yalıtkan gaz karışımları bilimsel literatürde tartışılmakta ve farklı endüstriyel uygulamalarda kullanılmaktadır (Dahl ve Franck, 2013; Urquijo, Mitrani, Ruiz-Vargas ve Basurto, 2011).

2.3.2. CF₄ (Tetraflorometan)

CF₄ gazı, merkezde bir karbon atomunun bulunduğu ve bu atoma dört flor atomunun bağlandığı floro-karbon sınıfına giren bir bileşiktir. Bu sınıf içinde CH₂F₂ ve CH₃F gibi gazların da olmasına rağmen, en yaygın kullanılan floro-karbon bileşikler CF₄ ve CHF₃'tür (Torres, Martinez ve Castano, 2002). CF₄ gazına, düşük zehirliliği ve kendi sınıfındaki diğer gazlarla kıyaslandığında kısmen düşük maliyeti nedeniyle oldukça geniş bir endüstriyel uygulama alanında rastlanmaktadır (Nikitovic, Stojanovic ve Petrovic, 2009).

CF₄ gazına ait elektron çarpışma kesitleri incelendiğinde, elastik olmayan kesitler arasında titreşim ve uyartım ön plana çıkar. Bu grup içinde yapışma ve yedi farklı enerji seviyesinde iyonlaşma kesitine de rastlanır, bkz. Şekil 2.16. Bu çarpışma kesitleri momentum çarpışma kesiti dışında Kurihara, Petrovic ve Makabe (2000), momentum çarpışma kesiti için ise Yamabe, Buckman ve Phelps (1983) referanslarından alınmıştır. İki farklı titreşim çarpışma kesitinin eşik enerjileri sırasıyla 0,108 eV ve 0,168 eV'dir (Nakamura, 1991). Yapışma ve uyartım çarpışma kesitlerinin eşik enerjisi ise 6,40 eV ve 7,54 eV seviyesindedir. İyonlaşma çarpışma kesitinin eşik enerjisi 16,0 eV'dur (Stephan, Deutsch ve Maerk, 1985).



Şekil 2.16. CF₄ gazının çarpışma kesitleri

İnsan üretimi bir gaz olan karbon tetraflorür (CF₄), yarı iletken endüstrisinde plazma aşındırma, darbe güç anahtarlama, parçacık detektörleri, plazma ve uzay bilimleri ve gaz

deşarjları gibi birçok teknolojik uygulama alanına sahiptir (Tezcan, Dincer, Bektas ve Hiziroglu, 2013; Wang, Murphy, Rong, Looe ve Spencer, 2013; Duzkaya ve Dincer, 2017). Plazma destekli malzeme işleme uygulamalarında dengeli olmayan plazmalarda kullanılan CF_4 , bu alanda yararlanılan en önemli besleme gazlarından birisidir (Bankovic, Dujko, Marjanovic, White ve Petrovic, 2014). Çeşitli aşındırma uygulamalarındaki yüzey reaksiyonlarından büyük ölçüde sorumlu olan iyon ve nötrlerin kaynağı olarak üretim sistemine katılmaktadır. CF_4 molekülü, uyarılmış durumda kararlı olmadığı için bir besleme gazı bileşeni olarak oldukça caziptir. Bu özelliklerinin bir sonucu olarak plazma endüstrisi uygulamalarında, gerek uyarılmadığı gerekse uyarıldığı durumlarda özellikle arzu edilen nötr flor atomlarından oluşan çeşitli nötr ve iyonik atomları ile aşındırma işlemleri için ideal bir kaynaktır (Christophorou, Olthoff ve Rao, 1996; Nikitovic vd., 2009).

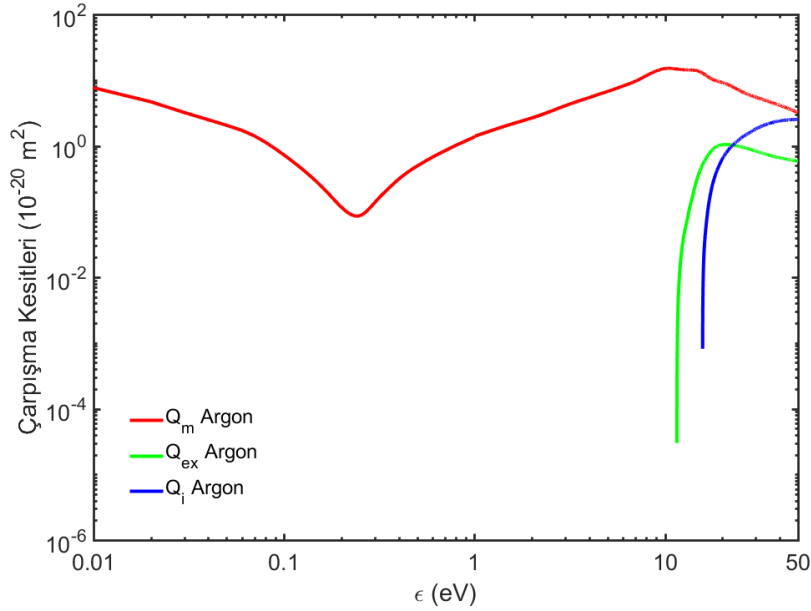
Bu özelliklerinin yanı sıra, CF_4 gazı küresel ısınma potansiyeline sahip bir sera gazıdır. Atmosferdeki yarı ömrü 50.000 yıldan fazladır ve yüz yıllık bir süreçte küresel ısınma potansiyeli CO_2 'in mutlak küresel ısınma potansiyelinden 6.300 kat fazladır. CF_4 molekülünün stratosferde ozon tabakasının incelmeyeine herhangi bir etkisi olmadığı kabul edilmektedir. Çünkü CF_4 molekülünün foto-ayrışmasında ortaya çıkan serbest flor atomların stratosfer tabakasına verdiği zarar ihmal edilebilecek düzeydedir (Tezcan, Dincer ve Bektas, 2016a).

2.3.3. Ar (Argon)

Soy gazlar arasında bulunan argon, neon, xenon, helyum, kripton ve radon gibi diğer soy gazlarla kıyaslandığında atmosferde daha fazla bulunmasına rağmen, atmosferdeki oranı %1'in altındadır. Moldeküler ağırlığı 39.95 gr/mol, yoğunluğu sıvı halde 1.49 kg/l, gaz halde 1,78 g/L ve özgül ağırlığı hava ile kıyaslandığında 1,38 kat daha fazladır (Tezcan, 2011: 44).

Argon gazı modern endüstriyel uygulamalarda silikon ve germanyum kristellerinin oluşturulması, titanyum ve zirkonyum gibi reaktif metallerin üretimi, çelik üretimi ve kesme ve kaynak operasyonlarında kullanılmaktadır. Son yıllarda çevresel ve ekonomik nedenlerle küresel ölçekte SF_6 ve CF_4 gibi sera gazlarının kullanımına getirilen sınırlamadan sonra, argon gazı yüksek gerilim sistemlerinde anahtarlama teçhizatlarında da kullanılmaktadır. Bu sektörde kullanılması sahip olduğu düşük ark endüktansı, yüksek akımları iletebilme

kabiliyeti ve yüksek sıcaklıktaki ısı kararlılığı özelliklerinin bir sonucudur (Tezcan, Duzkaya, Dincer ve Hiziroglu, 2016b).



Şekil 2.17. Argon gazının çarpışma kesitleri

Argon gazına ait çarpışma kesitleri, Şekil 2.17'te görülmektedir. Bu çarpışma kesitleri arasında elastik momentum çarpışma kesiti için Phelps (1991) ve Yamabe vd. (1983), elastik olmayan çarpışma kesiti için ise Yanguas-Gil, Cotrino ve Alves (2005) referansındaki çarpışma kesiti kullanılmıştır.

Argon için elastik olmayan otuz dokuz farklı uyartım seviyesindeki çarpışma kesiti çalışma kapsamında bir araya getirilmiştir. Bu düzenleme sonucu uyartım çarpışma kesitinin eşik enerjisi 11,54 eV, iyonlaşma çarpışma kesitini eşik enerjisi de 15,76 eV seviyesindedir (Yanguas-Gil vd., 2005).



3. HESAPLAMA METODU

Çalışmanın ilk aşamasında ilgili gaz ve karışımların Boltzmann eşitlikleri iki terimli sonlu farklar metodu kullanılarak elde edilmiştir. Bu hesaplama yapılırken momentum transfer kesiti, iyonlaşma kesiti, yapışma kesiti, elektronik uyartım kesiti ve vibrasyon kesiti olarak adlandırılan baskın çarpışma kesitleri literatür yardımıyla bulunmuş, bu kesitler kullanılarak her gaza ait Boltzmann eşitlikleri türetilmiştir. Üretilen bu eşitlikler, her bir gaz veya gaz karışımı için farklı molekül yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alan değerinde geçerli olan Elektron Enerji Dağılım Fonksiyonu (EEDF) grafiklerinin çizilmesine yardımcı olmuştur. Bu fonksiyonun elde edilmesiyle, elektron ortalama enerjisi, sürüklenme hızı, iyonlaşma ve yapışma katsayıları bulunabilmektedir. İyonlaşma ve yapışma katsayısının birbirine eşit olduğu E/N değeri, limit elektrik alan olarak tanımlanmıştır.

EEDF, 1950'li yıllardan bu yana elektronegatif ve elektronegatif-olmayan gazların ıçığ parametresini hesaplama süreçlerinde kullanılmaktadır. Elastik olmayan çarpışmalardan kaynaklanan kayıpların ihmal edildiğı ilk çalışmalardan sonra, bu çarpışma katsayılarını da dikkate alarak hesaplama metodu üzerinde ilk düzenlemeler yapılmıştır (Lewis, 1958; Heylen ve Lewis, 1962). Fakat bu ikinci yaklaşım, E/N 'nin artışı ile birlikte artması gereken elektron ortalama enerjisinin belirli bir aşamadan sonra doyuma gittiğı tespit edildiğinde genel bir çözüm olarak kabul edilmemiştir. Bu çalışmaları takiben EEDF'nin hesaplanması için Garamoon ve Ismail (1977) tarafından yeni bir hesaplama metodu önerilmiş, ama bu metot da izleyen yıllarda aynı yazarların yeni bir çalışmasıyla (Ismail ve Garamoon, 1979) terk edilmiştir. Her iki yaklaşım metoduyla elde edilen eşitliklerin tutarlı olmaması ve yanlış olabileceğinin düşünülmesi, metodun farklı gaz ve karışımlara uygulanmasının önüne geçmiştir. 1980'li yılların sonuna gelindiğinde EEDF'nin hesaplanması için daha tutarlı yaklaşımların geliştirildiğı görülmektedir (Itoh, Miura, Ikuta, Nakao ve Tagashira, 1988). Yüksek gerilim ekipmanlarda yayın olarak kullanılan SF_6 'nın ıçığ parametrelerinin bulunması ile birlikte (Itoh vd., 1993), Boltzmann eşitliklerinin EEDF hesaplanmasında kullanımı yaygınlaşmış ve birçok gaz ve gaz karışımının elektron ıçığ parametreleri bu metot kullanılarak elde edilmiştir (Pinherio ve Loureiro, 2002).

3.1. Matematiksel Yöntem: Boltzmann Denklemleri Analizi

Kararlı Townsend durumunda, hız dağılım fonksiyonunun iki terimli açılımı yapılmakta ve hem izotropik (f_0) hemde anizotropik (f_1) bileşenler için aşağıdaki eşitlikler kullanılarak çözüm yapılmaktadır (Pinheiro ve Loureiro, 2002).

$$\begin{aligned}
 & \frac{eE}{3m} \frac{1}{v^2} \frac{d}{dv} (v^2 f_1) + (\alpha - \eta) \frac{v}{3} f_1 \\
 &= \frac{m}{M} \frac{N}{v^2} \frac{d}{dv} (v^4 Q_m f_0) + N \frac{v_v^2}{v} Q_v(v_v) f_0(v_v) \\
 &+ N \frac{v_{ex}^2}{v} Q_{ex}(v_{ex}) f_0(v_{elec}) + \frac{N}{\Delta} \frac{v_1^2}{v} Q_i(v_1) f_0(v_1) \\
 &+ \frac{N}{1-\Delta} \frac{v_2^2}{v} Q_i(v_2) f_0(v_2) - Nv(Q_v + Q_{ex} + Q_i + Q_a) f_0
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\frac{eE}{m} \frac{df_0}{dv} + (\alpha - \eta) v f_0 = -Nv(Q_v + Q_{ex} + Q_i + Q_a) f_1 \tag{3.2}$$

Burada, E uygulanan elektrik alanı, e elektronun yükünü, m elektronun kütlesini, M moleküler kütleyi, N gaz molekül yoğunluğunu, Q_m , Q_i , Q_a sırasıyla momentum transfer, iyonizasyon ve yapışma elektron çarpışma kesitleridir. v_1 , v_2 büyüklükleri skaler büyüklüklerdir;

$$v_1 = \left(\frac{v^2}{\Delta} + \frac{2}{m} u_i \right)^{1/2} \tag{3.3}$$

$$v_2 = \left(\frac{v^2}{1-\Delta} + \frac{2}{m} u_i \right)^{1/2} \tag{3.4}$$

u_i iyonizasyon eşik enerjisini göstermektedir. $0 \leq \Delta \leq 1$ aralığında değişen Δ , iyonizasyon çarpışmasından sonra birinci elektron ile ikinci elektron arasındaki enerji paylaşımını göstermektedir. Q_v ve Q_{elec} sırasıyla inelastik çarpışma kesiti olan vibrasyonel uyartım ve elektronik uyartım çarpışma kesitleridir. u_v ve u_{elec} sırasıyla vibrasyonel uyartım eşik enerjisi ve elektronik uyartım eşik enerjisidir.

$$v_v = \left(v^2 + \frac{2}{m} \varepsilon_v \right)^{1/2} \quad (3.5)$$

$$v_{ex} = \left(v^2 + \frac{2}{m} \varepsilon_{ex} \right)^{1/2} \quad (3.6)$$

Eş. 3.1, Eş. 3.2’de yerine konularak Eş. 3.7 elde edilir. Q_i ve ε_j sırasıyla inelastik çarpışma kesiti ve eşik enerjisidir ($j = 1$ vibrasyonel uyartım ve $j = 2$ elektronik uyartım çarpışma kesiti ve eşik enerjileridir). Böylece;

$$\begin{aligned} & \left(\frac{E}{N} \right)^2 \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{3Q_m^e} \frac{df}{d\varepsilon} \right) + \left(\frac{eE}{N} \right) \left(\frac{\alpha - \eta}{N} \right) \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{3Q_m^e} f \right) + \left(\frac{eE}{N} \right) \left(\frac{\alpha - \eta}{N} \right) \frac{\varepsilon}{3Q_m^e} \frac{df}{d\varepsilon} \\ & + \left(\frac{\alpha - \eta}{N} \right)^2 \frac{\varepsilon}{3Q_m^e} f + \frac{2m}{M} \frac{d}{d\varepsilon} (\varepsilon^2 Q_m f) \\ & + (\varepsilon + \varepsilon_v) Q_v (\varepsilon + \varepsilon_v) f(\varepsilon + \varepsilon_v) - \varepsilon Q_v(\varepsilon) f(\varepsilon) \\ & + (\varepsilon + \varepsilon_{ex}) Q_{ex} (\varepsilon + \varepsilon_{ex}) f(\varepsilon + \varepsilon_{ex}) - \varepsilon Q_{ex}(\varepsilon) f(\varepsilon) \\ & + \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) Q_i \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) f \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) \\ & + \frac{1}{1 - \Delta} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \Delta} + \varepsilon_i \right) Q_i \left(\frac{\varepsilon}{1 - \Delta} + \varepsilon_i \right) f \left(\frac{\varepsilon}{1 - \Delta} + \varepsilon_i \right) \\ & - \varepsilon Q_i(\varepsilon) f(\varepsilon) - \varepsilon Q_a(\varepsilon) f(\varepsilon) = 0 \end{aligned} \quad (3.7)$$

ε_i iyonizasyon eşik enerjisidir. $\varepsilon = \frac{1}{2} mV^2$ elektron kinetik enerjisidir ve V elektronun hızıdır. N gaz molekül yoğunluğudur. $\alpha, \eta, (\alpha - \eta)$ sırasıyla townsend iyonlaşma yapışma ve efektif iyonlaşma katsayısıdır.

Q_m^e , inelastik ve elastik çarpışma kesitlerinin toplamıdır.

$$Q_m^e = Q_m + Q_v + Q_a + Q_{ex} + Q_i \quad (3.8)$$

Eş. 3.7 ikinci dereceden bir denklem haline getirilmekte ve $F(\varepsilon)$ enerji dağılım fonksiyonu bu ikinci dereceden denklem çözülerek bulunur.

$$A \frac{d^2 F}{d\varepsilon^2} + B \frac{dF}{d\varepsilon} + CF + D = 0 \quad (3.9)$$

Elde edilen bu ikinci dereceden denklemin katsayıları A, B, C ve D'dir.

$$A = e \left(\frac{E}{N} \right)^2 \frac{\varepsilon}{3Q_m^e} \quad (3.10)$$

$$B = e \left(\frac{E}{N} \right)^2 \left(\frac{Q_m^e - \varepsilon \frac{dQ_m^e}{d\varepsilon}}{3(Q_m^e)^2} \right) + 2 \left(\frac{eE}{N} \right) \left(\frac{\alpha - \eta}{N} \right) \left(\frac{\varepsilon}{3Q_m^e} \right) + 2 \left(\frac{m}{M} \right) e \varepsilon Q_m \quad (3.11)$$

$$C = \left(\frac{eE}{N} \right) \left(\frac{\alpha - \eta}{N} \right) \left(\frac{Q_m^e - \varepsilon \frac{dQ_m^e}{d\varepsilon}}{3(Q_m^e)^2} \right) + \left(\frac{\alpha - \eta}{N} \right)^2 e \left(\frac{\varepsilon}{3Q_m^e} \right) + 2 \left(\frac{m}{M} \right) e \left(2\varepsilon Q_m + \varepsilon^2 \frac{dQ_m}{d\varepsilon} \right) - e \varepsilon (Q_m^e - Q_m) \quad (3.12)$$

$$D = e(\varepsilon + \varepsilon_v)Q_v(\varepsilon + \varepsilon_v)F(\varepsilon + \varepsilon_v) + e(\varepsilon + \varepsilon_{ex})Q_{ex}(\varepsilon + \varepsilon_{ex})F(\varepsilon + \varepsilon_{ex}) + 2(1/0.5)e(2\varepsilon + \varepsilon_i)Q_i(2\varepsilon + \varepsilon_i)F(2\varepsilon + \varepsilon_i) \quad (3.13)$$

Eş. 3.9 sonlu farklar metodu ile kararlı hal Townsend durumunda çözülür. İlk başta efektif iyonlaşma katsayısına (Argon için iyonlaşma katsayısına) tahmini bir değer verilir ve Eş. 3.9'a uygulanır. Bunun sonucunda, elektron enerji dağılım fonksiyonu elde edilir ve yeni yeni efektif iyonlaşma katsayısı bulunur. Bu yeni değer, tekrar Eş 3.9'da yerine konulur ve EEDF tekrar bulunur. Bu iteratif süreç efektif iyonlaşma katsayısında kararlı duruma ulaşılan kadar devam eder. Bu kararlı durum, iterasyon öncesi ve sonrası bulunan değerler arasındaki hata oranının belirli bir sınırın altına düşmesi sonrası ortaya çıkar ve elde edilen fonksiyonlar elektron çıkış parametrelerinin elde edilmesinde kullanılır. EEDF aşağıdaki formüle göre normalize edilir.

$$\int_0^{\infty} \varepsilon^{0.5} f(\varepsilon) d\varepsilon = 1 \quad (3.14)$$

Elektron ığ parametreleri elektron enerji dağılım fonksiyonundan bulunurlar (Tezcan vd., 2010; Tezcan vd., 2016a). Elektron enerji dağılım fonksiyonu kullanılarak elektron ortalama eneręisi, elektron sürüklenme hızı, Townsend iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayısı izleyen eşitlikler kullanılarak sırasıyla hesaplanabilir,

$$\varepsilon = \int_0^{\infty} \varepsilon^{0,5} f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3.15)$$

$$W = -\frac{e E}{3 N} \left(\frac{2e}{m}\right)^{0,5} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon}{Q_m^e(\varepsilon)} \frac{df(\varepsilon)}{d\varepsilon} d\varepsilon \quad (3.16)$$

$$\frac{\alpha}{N} = \left(\frac{2e}{m}\right)^{0,5} \frac{1}{W} \int_{\varepsilon_i}^{\infty} \varepsilon Q_i(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3.17)$$

$$\frac{\eta}{N} = \left(\frac{2e}{m}\right)^{0,5} \frac{1}{W} \int_{\varepsilon_i}^{\infty} \varepsilon Q_a(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (3.18)$$

$$\frac{\bar{\alpha}}{N} = \frac{\alpha}{N} - \frac{\eta}{N} \quad (3.19)$$

Yukarıda ifade edilen aşamaları kısaca tanımlamak gerekirse,

A. Çarpışma kesitlerinin elde edilmesi,

- a. Momentum transfer kesiti,
- b. İyonlaşma kesiti,
- c. Yapışma kesiti (eğer varsa),
- d. Elektron uyardım kesiti,
- e. Vibrasyon kesiti (eğer varsa).

B. Hesaplama sonucunda $F(\varepsilon) - \varepsilon$ grafiklerinin, EEDF, farklı E/N'ler için izilmesi,

C. Elektron ortalama eneręisi ve sürüklenme hızının hesaplanması,

D. İyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayılarının bulunması.

3.2. Boltzmann Analizi ile Kritik Elektrik Alan Değerinin Bulunması

Birinci iyonlaşma katsayısı α ile yapışma katsayısı η 'nın birbirine eşit olduğu, yani efektif iyonlaşma katsayısının sıfır olduğu yerdeki ($\alpha = \eta$), E/N değeri $(E/N)_{limit}$ değeridir.

$(E/N)_{limit}$ değerinden daha küçük E/N değerlerinde delinme olmazken, bu değer ve bundan büyük E/N değerlerinde delinme meydana gelmektedir. Bu yüzden limit E/N değeri ne kadar büyükse, gazın dielektrik dayanımı o kadar yüksektir.

Hesaplama metodunu özetlemek gerekirse, efektif iyonlaşma katsayısına bir değer vererek iteratif süreç başlatılır. Bunu izleyen adımda, iteratif bir süreç kullanılarak elektron enerji dağılım fonksiyonu (EEDF) hesaplanır. Bu hesaplanan EEDF'nin nümerik integralleri alınarak, elektron çığ parametreleri olan elektron ortalama enerjisi, elektron sürüklenme hızı, birinci iyonlaşma ve yapışma katsayısı elde edilir. Efektif iyonlaşma katsayısı, hesaplanan birinci iyonlaşma katsayısı ile yapışma katsayısının farkı alınarak bulunur. Eğer ilk atanan efektif iyonlaşma katsayısı ile yeni hesaplanan efektif iyonlaşma katsayısının arasındaki fark, durdurma kriterinden büyükse yeni değer atanan değer olarak alınır ve tekrar iteratif süreç başlatılır, durdurma kriterinden küçükse program durdurulur ve yeni değer efektif iyonlaşma katsayısı olarak alınır. Bu süreç, her E/N değeri için yapılır ve E/N 'nin efektif iyonlaşma katsayısına göre grafiği çizilir. Çizilen bu grafikten, efektif iyonlaşma katsayısının sıfır olduğu yer bulunarak, o noktadaki E/N değeri kritik elektrik alan değeri olarak belirlenir. Efektif iyonlaşma katsayısı – E/N grafiğinden, efektif iyonlaşma katsayısının sıfır olduğu yerden çekilen E/N değerine $(E/N)_{limit}$ değeri denir.

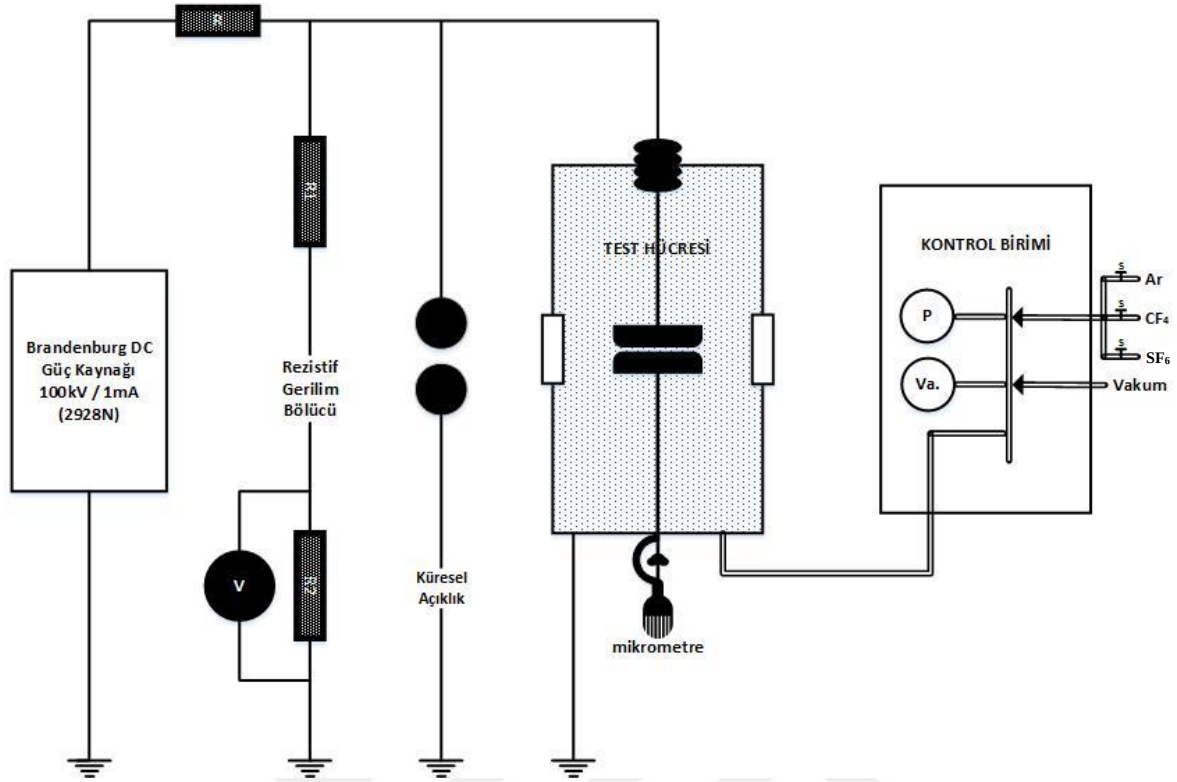
4. DENEYSEL PROSEDÜR

Çalışma kapsamında SF₆, CF₄ ve argon gazları ve bu gazların birbiri ile gerçekleştirdikleri ikili ve üçlü gaz karışımlarının delinme gerilimi ölçülmüştür. Bu ölçülen delinme gerilimlerinden elde edilen kritik elektrik alan değerleri, bir önceki bölümde aktarılan hesaplama metodu kullanılarak elde edilen kritik elektrik alan değeri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma işleminin yapılabilmesi için, ilgili gaz karışımlarında delinme gerilimin ölçülebileceği bir test düzeneği deneysel prosedüre bağlı kalınarak kullanılmıştır.

4.1. Deney Düzeneği

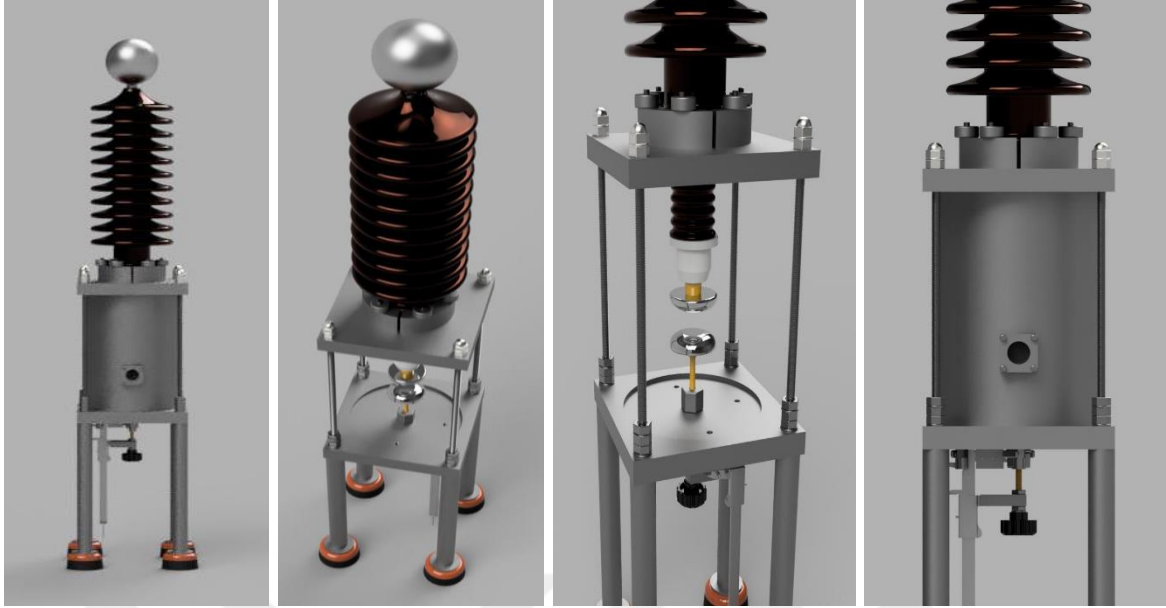
Bu test düzeneği temelde güç kaynağı, rezistif gerilim bölücü, elektrotların yer aldığı test hücresi, kontrol birimi ve vakum ünitesi birimlerinden oluşmaktadır, bkz. Şekil 4.1 (Duzkaya ve Tezcan, 2017). Test düzeneğinde kullanılan güç kaynağı, Brandenburg markasının 298N modelidir. Bu DC güç kaynağı 100 kV gerilim seviyesine kadar çıkabilmekte ve devreye maksimum 1 mA verebilmektedir. Bu güç kaynağında giriş gerilimindeki dalgalanma ve gerilim regülasyonundan kaynaklanan gerilim düşümü, maksimum yük durumunda $\pm\%0.1$ aralığındadır. Test hücresine uygulanan gerilim, bir rezistif gerilim bölücünün düşük gerilim ucuna bağlı dijital bir voltmetre kullanılarak ölçülmüştür. Bu ölçme işleminde rezistif gerilim bölücünün kalibrasyonu, küresel açıklıkların kullanıldığı standart bir yöntemle yapılmıştır (IEC Standard 60060-1).

Delinme gerilimin ölçüldüğü test düzeneğinde kullanılan test hücresi, 20 cm çapında ve 30 cm yüksekliğindedir. Güç kaynağı ile test hücresi arasındaki bağlantı, akım sınırlama amaçlı bir yüksek gerilim direnci ve bu direncin çıkışına bağlı bir yüksek gerilim barasıyla kurulmuştur. Test hücresi içinde elektrotların yerleşimini ve deşarjı gözlemleyebilmek amacıyla, test hücresinin silindirik yan cephelerinde karşılıklı pencereler bulunmaktadır. Bu pencereler, 3 cm çapındadır.



Şekil 4.1. Deney düzeneğinin şematik gösterimi

Birbirine dik konumlandırılan elektrotlar, paslanmaya ve korozyona dayanıklı çelikten üretilmiştir. Bu elektrotlar, 3,5 cm çapa ve 90° Rogowski profil formuna sahiptir. Güç sistemi bu elektrotlar üzerinden kendini tamamladığı için, test hücresinin sürekli toprak potansiyeline sahip gövdesinden elektriksel olarak yalıtılmaktadır. İlgili gazların saf ve karışım halindeki ölçümlerinden önce bu elektrotlar, elektrostatik bir potansiyel yaratmayacak özel bezlerle temizlenmekte ve parlatılmaktadır. Bu elektrotlardan güç devresine bağlı olanı hareket etmemekte, diğer elektrot ise elektrot açıklığını 1-20 mm aralığında destekleyebilecek manuel kontrol edilen hareketli bir platforma montelidir, bkz. Şekil 4.2. Test hücresinde gaz basıncı, elektrotların birbirine yaklaştırılarak elektriksel olarak temas etmeleri sonrası ayarlanmaktadır (Duzkaya ve Tezcan, 2017). Test hücresinin farklı kesitlerden ayrıntılı teknik resmi, Ek-2’de yer almaktadır.



Şekil 4.2. Deney düzeneğinde kullanılan test hücresi

EK-2’de yer alan ölçüm esnasında kullanılan test hücresinin geometrik yapısı incelendiğinde, herhangi bir test hücresinin iç basıncından kaynaklı herhangi bir zorlanma esnasında çevresel doğrultuda bir yarılmının meydana geleceği beklenmektedir. Bu doğrultuda meydana gelebilecek bir zorlanma esnasında akma katsayısı, basınç, yarıçap ve çeper kalınlığı arasındaki ilişki aşağıdaki gibi tanımlanabilmektedir (Hibbeler, 2000; 409-411).

$$\sigma = \frac{pr}{t} \quad (4.1)$$

Burada yarıлма için sınır akma katsayısı bakır için 60 MPa, demir için 130 MPa, çelik için 250-2500 MPa ve alüminyum için 100-400 MPa aralığındadır.

Deneysel düzende kullandığımız test hücresinin yarıçapı 75 mm, deney hücresindeki maksimum basınç 3 bar (0,3 MPa) ve et kalınlığı 5 mm olduğundan bu test hücresi için sınır akma katsayısı,

$$\sigma_s = \frac{0,3.75}{5} = 4,5 \text{ MPa} \quad (4.2)$$

olmaktadır. Bu değer, deney düzeneğinde kullanılan çelik başta olmak üzere, elektriksel yalıtım sistemlerinde sıklıkla kullanılan bakır, demir ve alüminyum gibi malzemelerin akma katsayısı değerinden oldukça düşüktür.

Test hücresi içindeki gaz veya gaz karışımının elektriksel deşarj davranışını anlamak için, öncelikle bu gaz veya gazlar hücreye bir kontrol birimi yardımıyla aktarılmıştır. Bu kontrol birimi, test hücresine sızdırmaz bir valf ile bağlanmıştır. Kontrol biriminin diğer bağlantıları, ilgili gazlara ait tüpler ve vakum pompasıdır. Gaz karışımı test hücresine aktarılmadan önce, hücre içinde yer alan bir önceki gaz karışımı vakum pompası ile temizlenmiştir. Bu vakum pompası ile hücre içi basıncı 9.33 Pa değerine kadar düşürülebilmektedir. Gerekli vakum işlemi sonrası gaz karışımı, her bir gazın kısmi basınç oranına bağlı kalınarak test hücresine eklenmiştir. Bu işlem esnasında, öncelikle gaz karışımında en düşük oranlı gaz test hücresine kısmi basıncına göre doldurulmuştur. İkinci aşamada, karışım içinde daha yüksek orana sahip gaz veya gazlar sırasıyla ilave edilmiştir. Ölçüm yapılacak gaz karışımı basıncının düşük olması durumunda, ikili veya üçlü karışımları daha yüksek kısmi basınçlarda hazırlanmış ve karışım hazırlandıktan sonra test hücresindeki basınç vakum pompası kullanılarak istenilen basınç değerine düşürülmüştür.

Deneyisel çalışma esnasında kullanılan gazların farklı yoğunlukta olmaları nedeniyle, bu gazların test hücresi içinde homojen karışımı için literatürdeki uygulama örnekleri incelenmiştir (Niemeyer, 2000; Suzuki, 1982). Bu uygulama örnekleri, farklı yoğunluktaki gazların kapalı bir hücre içinde karışabilmesi için test aşaması öncesinde belirli bir süre beklenmesi gerektiğini göstermiştir. Bu bekleme süresi daha küçük hacimli test hücreleri, 20 lt ve altında, için gazların fiziksel özelliklerine göre 4-5 saat olarak ölçülmüş (Suzuki, 1982), büyük ölçekli gaz izoleli sistemler ve gaz izoleli hatlarda tam bir homojenlik karışım için günler hatta aylara çıkmaktadır (Castonguay, 1987). Bu nedenle, söz konusu büyük ölçekli elektrik ekipmanları tasarımı dinamik bir karıştırıcının da tasarıma eklenmesi gerekmektedir (Niemeyer, 2000). Bu bekleme süresi izleyen eşitlikler kullanılarak temel düzeyde hesaplanabilmektedir (CIGRE, 2000: 31-32),

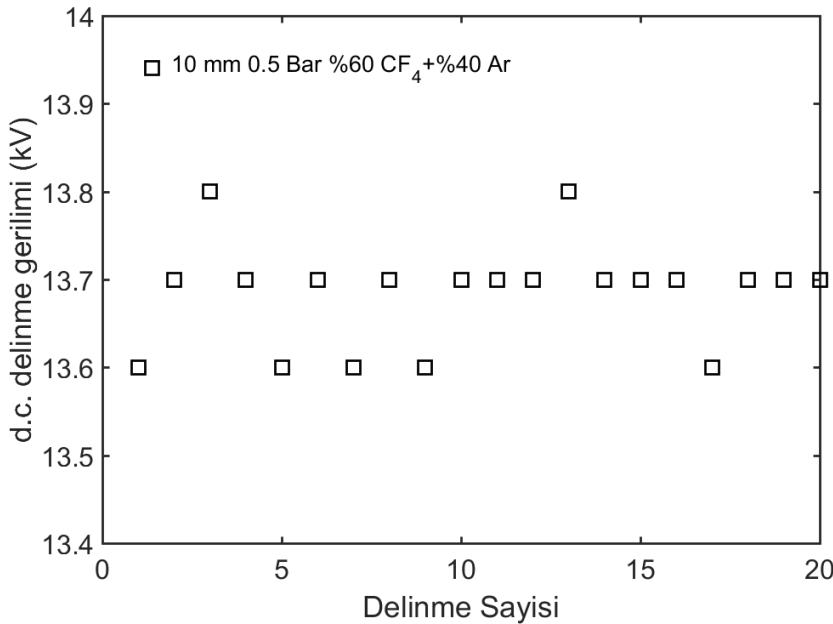
$$t_{\text{mix}} = L^2/D_r \quad (4.3)$$

$$D_r = k/p \quad (4.4)$$

Eş. 4.3’de L , kapalı hücrenin metre biriminden en uzun kenar boyutunu, D_r ise gazların birbirine bağlı difüzyon sabitini vermektedir. Bu difüzyon sabiti hesaplamak için gazlar arasında bir k sabiti tanımlanmıştır. Bu k sabiti, SF_6 - CF_4 arasında yaklaşık $0,50 \text{ Pa.m}^2/\text{s}$, SF_6 -Ar arasında ise yaklaşık $0,53 \text{ Pa.m}^2/\text{s}$ değerindedir (Castonguay, 1987). Tez çalışmasında deneysel ölçüm için kullanılan test hücresinin en uzun kenar boyutu $0,3 \text{ m}$ ve test hücresi basıncı 1 bar , 10^5 Pa , değerindedir. Bu değerler, Eş. 4.1’de yerine konulduğunda gazların homojen olarak karışması için yaklaşık 5 saat beklenmesi gerektiği belirlenmiştir. Ölçüm aşamasında, bu bekleme süresine riayet edilerek ölçümler alınmıştır.

Bu prosedürler dahilinde, deneye bağlı olarak istenilen oranlarda hazırlanan gaz karışımlarının deşarj karakteristikleri ölçülmüştür. Bu ölçüm esnasında güç kaynağı kullanılarak test hücresine uygulanan gerilimin artış hızı, deneylerin tamamında standartlara uyarak 500 V/s ivmesine sahiptir (ASTM International, 2004).

Deneysel prosedürün izlenerek hazırlanan deney düzeneğinde, 10 mm elektrot açıklığı ve 0.5 bar test hücresi basıncında $\%60 \text{ CF}_4 + \%40 \text{ Ar}$ gaz karışımında ölçüm sonuçlarına ait iyileştirme (conditioning) sonuçları Şekil 4.3’te bulunmuştur.



Şekil 4.3. 10 mm elektrot açıklığı 0.5 bar basınçta $\%60 \text{ CF}_4 + \%40 \text{ Ar}$ gaz karışımında ölçüm sonuçlarının iyileştirilmesi

4.2. Deşarj Geriliminden Kritik Elektrik Alan Değerinin Bulunması

Kritik elektrik alan değerinde, $(E/N)_{limit}$, birinci iyonlaşma katsayısı ile yapışma katsayısı eşittir ve elektronegatif olmayan gazlarda yapışma katsayısı olmayacağından, bu gazlar için $(E/N)_{limit}$ 'den bahsedilmez. Fakat gazın dielektrik dayanımının ne kadar olduğunu söyleyebilmek için deşarj gerilimi ölçüldükten sonra hesaplama ile sanal bir $(E/N)_{limit}$ değeri bulunabilir. Elektronegatif olmayan gazlarda $(E/N)_{limit}$ olmasa da bu şekilde dielektrik dayanımı ifade edilebilir.

Deşarj gerilimi, V_s , $(E/p)_{limit}$ ile basınç ve elektrot aralığının çarpımıdır.

$$V_s = (E/p)_{limit} p d \quad (4.5)$$

E/N 'nin sabit bir katsayıya bölünmesi ile E/p bulunur.

$$(E/p)_{limit} = \frac{(E/N)_{limit}}{3.03} \quad (4.6)$$

Eş. 4.5'de $(E/p)_{limit}$ yerine Eş. 4.6'deki ilişki konursa,

$$V_s = \frac{(E/N)_{limit}}{3.03} p d \quad (4.7)$$

$$V_s 3.03 = (E/N)_{limit} p d \quad (4.8)$$

$$(E/N)_{limit} = \frac{V_s 3.03}{p d} \quad (4.9)$$

elde edilir. Eş. 4.9 kullanılarak, deşarj gerilimi bilinen bir gaz veya gaz karışımının kritik elektrik alan değeri bulunabilir.

5. BULGULAR ve DEĞERLENDİRME

5.1. Saf SF₆, CF₄ ve Argon Bulguları

İkili ve üçlü gaz karışımlarında ortalama elektron enerjisi, sürüklenme hızı, iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayılarını içeren elektron çıkış parametrelerinin hesaplanması öncesi, bu gaz karışımlarını oluşturan SF₆, CF₄ ve argon gazlarına ait söz konusu parametreler iki terimli Boltzmann eşitlikleri çözülerek hesaplanmış ve literatür ile karşılaştırılmıştır.

5.1.1. Saf SF₆ bulguları

SF₆ gazı elektronegatif özellik taşıdığından, yani iyonlaşma çarpışma kesitinin yanı sıra yapışma çarpışma kesitine de sahip olduğundan, Eş. 3.1 ve Eş. 3.2 aşağıdaki gibi yeniden yazılabilmektedir.

$$\begin{aligned}
 & \frac{eE}{3m} \frac{1}{v^2} \frac{d}{dv} (v^2 f_1) + (\alpha - \eta) \frac{v}{3} f_1 \\
 &= \frac{m}{M} \frac{N}{v^2} \frac{d}{dv} (v^4 Q_{m_SF6} f_0) + N \frac{v_v^2}{v} Q_{v_SF6}(v_v) f_0(v_v) \\
 &+ N \frac{v_{ex}^2}{v} Q_{ex_SF6}(v_{ex}) f_0(v_{ex}) + \frac{N}{\Delta} \frac{v_1^2}{v} Q_{i_SF6}(v_1) f_0(v_1) \\
 &+ \frac{N}{1-\Delta} \frac{v_2^2}{v} Q_{i_SF6}(v_2) f_0(v_2) \\
 &- Nv(Q_{v_SF6} + Q_{ex_SF6} + Q_{i_SF6} + Q_{a_SF6}) f_0
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

$$\frac{eE}{m} \frac{df_0}{dv} + (\alpha - \eta) v f_0 = -Nv(Q_{v_SF6} + Q_{ex_SF6} + Q_{i_SF6} + Q_{a_SF6}) f_1 \tag{5.2}$$

Eş. 5.1, Eş. 5.2'de yerine konularak Eş. 5.3 elde edilir. Bu eşitlik ikinci dereceden bir denklemdir ve çözülerek elektron enerji dağılım fonksiyonu, EEDF, elde edilir.

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{E}{N}\right)^2 \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{3Q_{m_{SF6}}^e} \frac{df}{d\varepsilon} \right) + \left(\frac{eE}{N}\right) \left(\frac{\alpha - \eta}{N}\right) \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{3Q_{m_{SF6}}^e} f \right) \\
& + \left(\frac{eE}{N}\right) \left(\frac{\alpha - \eta}{N}\right) \frac{\varepsilon}{3Q_{m_{SF6}}^e} \frac{df}{d\varepsilon} + \left(\frac{\alpha - \eta}{N}\right)^2 \frac{\varepsilon}{3Q_{m_{SF6}}^e} f \\
& + \frac{2m}{M} \frac{d}{d\varepsilon} (\varepsilon^2 Q_{m_{SF6}} f) + (\varepsilon + \varepsilon_v) Q_{v_{SF6}} (\varepsilon + \varepsilon_v) f(\varepsilon + \varepsilon_v) \\
& - \varepsilon Q_{v_{SF6}}(\varepsilon) f(\varepsilon) + (\varepsilon + \varepsilon_{ex}) Q_{ex_{SF6}} (\varepsilon + \varepsilon_{ex}) f(\varepsilon + \varepsilon_{ex}) \\
& - \varepsilon Q_{ex_{SF6}}(\varepsilon) f(\varepsilon) + \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) Q_{i_{SF6}} \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) f \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) \\
& + \frac{1}{1 - \Delta} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \Delta} + \varepsilon_i \right) Q_{i_{SF6}} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \Delta} + \varepsilon_i \right) f \left(\frac{\varepsilon}{1 - \Delta} + \varepsilon_i \right) \\
& - \varepsilon Q_{i_{SF6}}(\varepsilon) f(\varepsilon) - \varepsilon Q_{a_{SF6}}(\varepsilon) f(\varepsilon) = 0
\end{aligned} \tag{5.3}$$

Molekül yoğunluğuna indirgenmiş farklı elektrik alan değerlerine göre EEDF'nin bulunması ile birlikte, bu fonksiyonlar kullanılarak elektron çığ parametreleri hesaplanabilmektedir. Elektron ortalama enerjisi Eş. 5.4, sürüklenme hızı Eş. 5.5 ve iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayıları sırasıyla Eş. 5.6, Eş. 5.7 ve Eş. 5.8 ile elde edilmektedir.

$$\varepsilon = \int_0^{\infty} \varepsilon^{0.5} f(\varepsilon) d\varepsilon \tag{5.4}$$

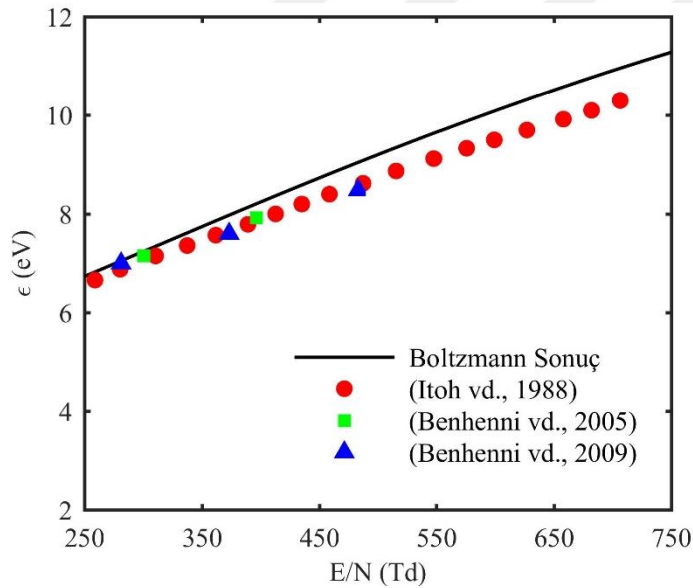
$$W = -\frac{eE}{3N} \left(\frac{2e}{m} \right)^{0.5} \int_0^{\infty} \frac{\varepsilon}{Q_{m_{SF6}}^e(\varepsilon)} \frac{df(\varepsilon)}{d\varepsilon} d\varepsilon \tag{5.5}$$

$$\frac{\alpha}{N} = \left(\frac{2e}{m} \right)^{0.5} \frac{1}{W} \int_{\varepsilon_i}^{\infty} \varepsilon Q_{i_{SF6}}(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon \tag{5.6}$$

$$\frac{\eta}{N} = \left(\frac{2e}{m} \right)^{0.5} \frac{1}{W} \int_{\varepsilon_i}^{\infty} \varepsilon Q_{a_{SF6}}(\varepsilon) f(\varepsilon) d\varepsilon \tag{5.7}$$

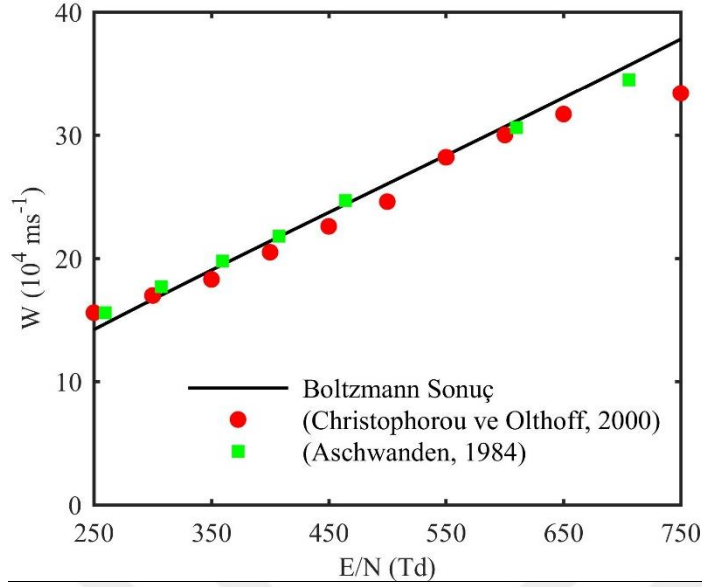
$$\frac{\bar{\alpha}}{N} = \frac{\alpha}{N} - \frac{\eta}{N} \tag{5.8}$$

Eş. 5.4 kullanılarak, SF_6 için elektron ortalama enerjisi hesaplanmıştır, bkz. Şekil 5.1. Saf CF_4 ve argon başta olmak üzere diğer gaz karışımlarında elektriksel boşalma parametrelerinin incelendiği 50-350 Td arasındaki molekül yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alan bölgesi yerine, SF_6 ve SF_6 -Ar gaz karışımı için bu aralık 250-750 Td olarak belirlenmiştir. Bu elektrik alan aralığı, boşalma parametreleri arasında önemli bir yeri olan kritik elektrik alan değerini kapsayabildiği için seçilmiştir. Şekil 5.1’de Boltzmann hesaplamaları ile elde edilen elektron ortalama enerji verileri, literatürdeki Itoh vd. (1988) ve Benhenni vd.’nin (2005) ve (2009) tarihli iki farklı çalışmasında elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hesaplama değerlerinin literatürdeki verilerle uyumlu olduğu görülmüştür. Bu çalışmalar esnasında Itoh vd. (1988) altı terimli Boltzmann eşitliği ve Monte Carlo, Benhenni vd. (2005) deneysel Townsend tekniği ve Benhenni vd. (2009) Monte Carlo metodunu kullanmıştır. Monte Carlo yöntemi, elektron çıkış parametrelerinin hesaplanmasında yaklaşık otuz yıldır etkin olarak kullanılmaktadır (Raju ve Dincer, 1990; Janda, Martisovits, Morrova, Machala ve Hensel, 2007; Liu ve Xiao, 2007).



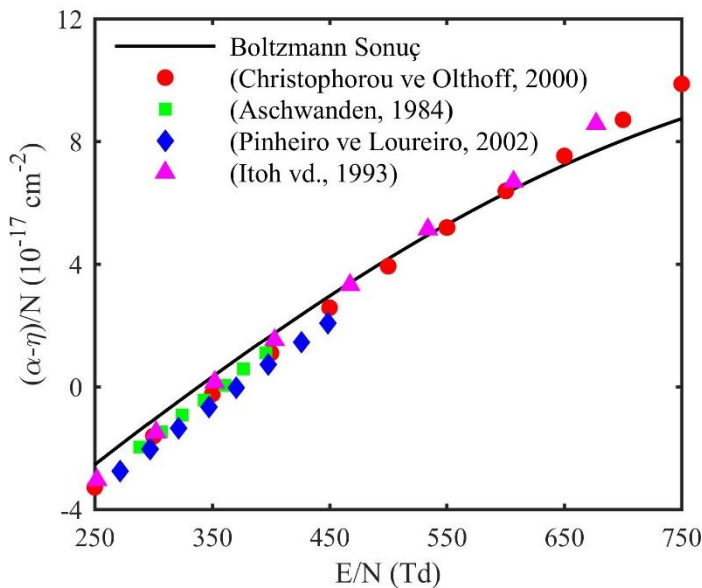
Şekil 5.1. SF_6 elektron ortalama enerjisi

SF_6 için molekül yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alanının 250-750 Td aralığındaki bölgesinde elektron sürüklenme hızına ait hesaplama sonucu ve bazı literatür verileri Şekil 5.2’de görülmektedir. Çalışma kapsamında elde edilen veriler, Christophorou ve Olthoff (2000) ve Aschwanden’ın (1984) verileriyle uyumludur. Christophorou ve Olthoff’un (2000) verileri, Aschwanden’ın (1984) verilerini de kapsayan önemli bir derleme niteliğindedir ve literatürde önemli bir kaynak olarak değerlendirilmektedir.



Şekil 5.2. SF₆ elektron sürüklenme hızı

SF₆ için molekül yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alana göre molekül yoğunluğuna indirgenmiş efektif iyonlaşma katsayısı sonuçları Şekil 5.3'te görülmektedir. Boltzmann eşitliklerinin çözülmesi sonucu elde edilen veriler, Christophorou ve Olthoff (2000), Aschwanden (1984), Pinheiro ve Loureiro (2002) ve Itoh vd. (1993) referanslarındaki verilerle uyumludur. SF₆ için efektif iyonlaşma katsayısının tanımlandığı bu çalışmalar esnasında Aschwanden (1984) deneysel ölçüm, Pinheiro ve Loureiro (2002) iki terimli Boltzmann eşitliği, Itoh vd. (1993) altı terimli Boltzmann eşitliği ve Monte Carlo metodunu kullanmıştır.



Şekil 5.3. SF₆ efektif iyonlaşma katsayısı

SF₆ için molekül yoğunluğa indirgenmiş efektif iyonlaşma katsayısı, diğer gazlardan farklı olarak 250-750 Td aralığında incelenmektedir. Bu aralık, SF₆ için iyonlaşma ve yapışma katsayısının birbirine eşit olduğu kritik elektrik alan değeri dikkate alınarak seçilmiştir. Efektif iyonlaşma katsayısının 0'a eşit olduğu molekül yoğunluğuna indirgenmiş kritik elektrik alan değeri 365,0 Td olarak hesaplanmıştır. Bu sonuç, Urquijo, Basurto ve Hernandez-Avila'nın (2001) 364,8 Td, Dincer, Ozerdem ve Bektas'ın (2010) 357,0 Td ve Tezcan vd.'nin (2016b) 360,1 Td bulgularıyla uyumludur.

Bir önceki bölümde ayrıntıları ile açıklanan test hücresi kullanılarak, SF₆ gazına ait elde edilen delinme gerilimleri aşağıdaki çizelgede yer almaktadır. Bu ölçümler, test hücresinin iç basıncının 1 bar olduğu durumda 5 mm'ye kadar 1 mm'ten başlayarak 1 mm'lik adımlarla elde edilmiştir, bkz. Çizelge 5.1.

Çizelge 5.1. SF₆ gazının 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları

p = 1 bar	Elektrot Açıklığı (d, mm)				
	1	2	3	4	5
Ölçülen (kV)	8,9	17,9	26,0	35,6	43,6
Hesaplanan (kV)	9,0	17,9	26,9	35,8	44,8
Bağıl Hata (%)	-0,2	-0,1	-2,9	-0,8	-2,6

Farklı elektrot açıklıkları için elde edilen delinme gerilimi değerleri, SF₆ gazının elektron çığ parametreleri kullanılarak elde edilen $(E/N)_{limit}$ değerinden faydalanılarak hesaplanan delinme gerilimi değerleri ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırılan bu değerler sonucunda ortaya çıkan bağıl hataların, her bir set için %5'i geçmediği görülmektedir. Ölçüm belirsizliklerinden ve anlık ölçüm hatalarından kaçınmak amacıyla her bir ölçüm seti toplamda oniki (12) değer olarak alınmakta ve bunlardan ortalamaya en uzak olanı işleme katılmamak koşuluyla geriye kalan on (10) değerın ortalaması alınarak söz konusu ölçüm kümesine ait delinme gerilimi hesaplanmaktadır.

Bu delinme gerilimlerini, daha önce farklı ölçüm metotları ile elde edilen delinme gerilimleri ile kıyaslayarak Çizelge 5.2 elde edilmiştir. Bu çizelgede, ölçümle elde ettiğimiz delinme gerilimi literatürdeki Husain ve Nema (1982); Nema, Kulkarni ve Husain (1982) ve Malik ve Qureshi (1978) kaynaklarıyla karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür. Bu

kaynaklar dışında Lee'nin (1983) ölçüm makalesinde saf SF₆, 1 mm.bar koşulunda 7,89 kV gerilimde delinmiştir.

Çizelge 5.2. SF₆ gazının 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme geriliminin karşılaştırılması

Basınç	Elektrot Açıklığı	Delinme Gerilimi (kV)			
(bar)	(mm)	Ölçüm	Husain ve Nema (1982)	Nema vd. (1982)	Malik ve Quereshi (1978)
1	1	8,9	9,3	8,38	9,7
1	2	17,9	17,4	17,3	18,9
1	3	26,1	---	25,9	28,3
1	4	35,6	33,6	34,4	---
1	5	43,6	---	42,9	---

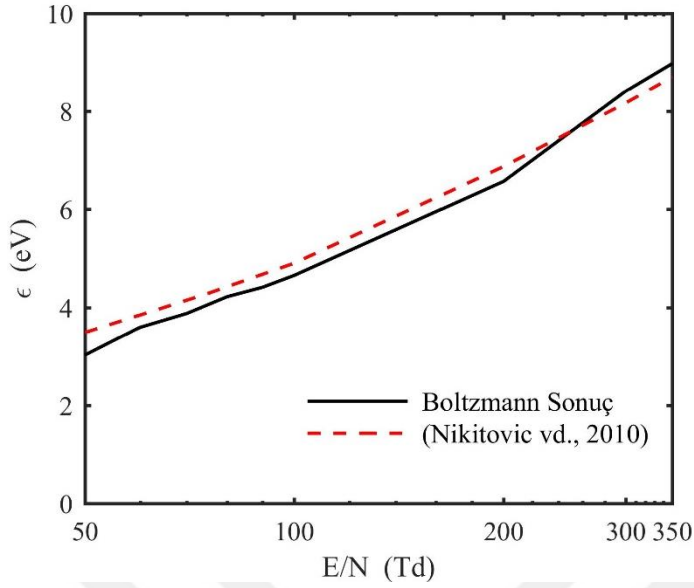
5.1.2. Saf CF₄ bulguları

CF₄ gazı SF₆ gibi elektronegatif bir gazdır. Bu nedenle, Boltzmann eşitlikleri tanımlanırken momentum, titreşim, uyartım, ayrışmalı uyartım ve iyonlaşma çarpışma kesitlerinin yanı sıra yapışma çarpışma kesitinin de etkisi göz önüne alınır. CF₄ gazının çarpışma kesitleri arasında yer alan ayrışmalı uyartımın etkisi, uyartım kesitine eklenerek hesaplamaya katılmıştır. Mevcut durumda CF₄ için Boltzmann eşitliği Eş. 5.1 ve Eş. 5.2'den uyarlanarak, Eş 5.9'daki gibidir.

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{E}{N}\right)^2 \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{3Q_{m_CF4}^e} \frac{df}{d\varepsilon} \right) + \left(\frac{eE}{N}\right) \left(\frac{\alpha - \eta}{N} \right) \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{3Q_{m_CF4}^e} f \right) \\
& + \left(\frac{eE}{N}\right) \left(\frac{\alpha - \eta}{N} \right) \frac{\varepsilon}{3Q_{m_CF4}^e} \frac{df}{d\varepsilon} + \left(\frac{\alpha - \eta}{N}\right)^2 \frac{\varepsilon}{3Q_{m_CF4}^e} f \\
& + \frac{2m}{M} \frac{d}{d\varepsilon} (\varepsilon^2 Q_{m_CF4} f) + (\varepsilon + \varepsilon_v) Q_{v_CF4} (\varepsilon + \varepsilon_v) f(\varepsilon + \varepsilon_v) \\
& - \varepsilon Q_{v_CF4}(\varepsilon) f(\varepsilon) + (\varepsilon + \varepsilon_{ex}) Q_{ex_CF4} (\varepsilon + \varepsilon_{ex}) f(\varepsilon + \varepsilon_{ex}) \\
& - \varepsilon Q_{ex_CF4}(\varepsilon) f(\varepsilon) + \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) Q_{i_CF4} \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) f \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) \\
& + \frac{1}{1 - \Delta} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \Delta} + \varepsilon_i \right) Q_{i_CF4} \left(\frac{\varepsilon}{1 - \Delta} + \varepsilon_i \right) f \left(\frac{\varepsilon}{1 - \Delta} + \varepsilon_i \right) \\
& - \varepsilon Q_{i_CF4}(\varepsilon) f(\varepsilon) - \varepsilon Q_{a_CF4}(\varepsilon) f(\varepsilon) = 0
\end{aligned} \tag{5.9}$$

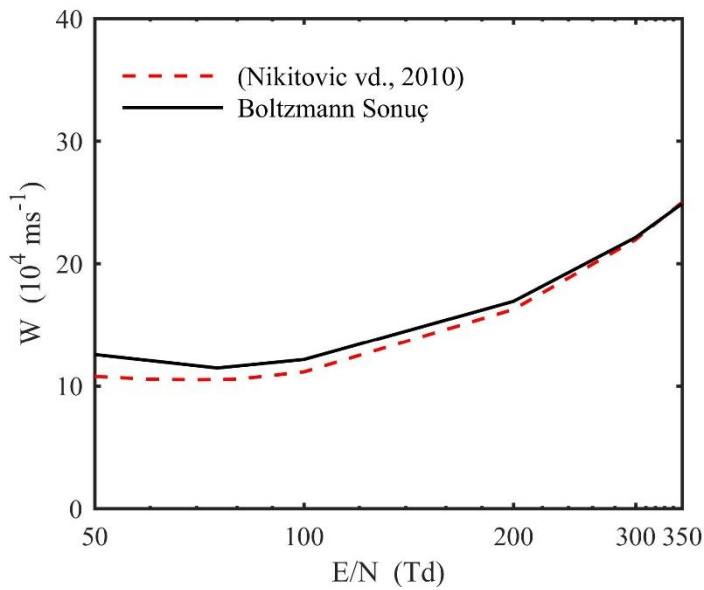
Bu eşitliğin çözülmesi sonucu elde edilen elektron enerji dağılım fonksiyonları, elektron ortalama enerjisi için Eş. 5.4, sürüklenme hızı için Eş. 5.5 ve iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayıları için sırasıyla Eş. 5.6, Eş. 5.7 ve Eş. 5.8'in CF₄ için uyarlanmış eşitliklerinde yerlerine konulur ve söz konusu elektron çıkış parametreleri hesaplanır.

CF₄ için 50-350 Td elektron yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alan aralığında elektron ortalama enerjisi Şekil 5.4'te görülmektedir. Boltzmann eşitliğini kullanarak hesaplanan bu enerji, Nikitovic, Stojanovic, Petrovic, Cvelbar ve Mozetic'in (2010) bulgularıyla karşılaştırılmıştır. Bu kaynakta elde edilen bulgular, Monte Carlo yöntemiyle hesaplanmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen elektron ortalama enerjileriyle, Nikitovic vd. (2010) tarafından elde edilen enerjiler oldukça uyumludur.



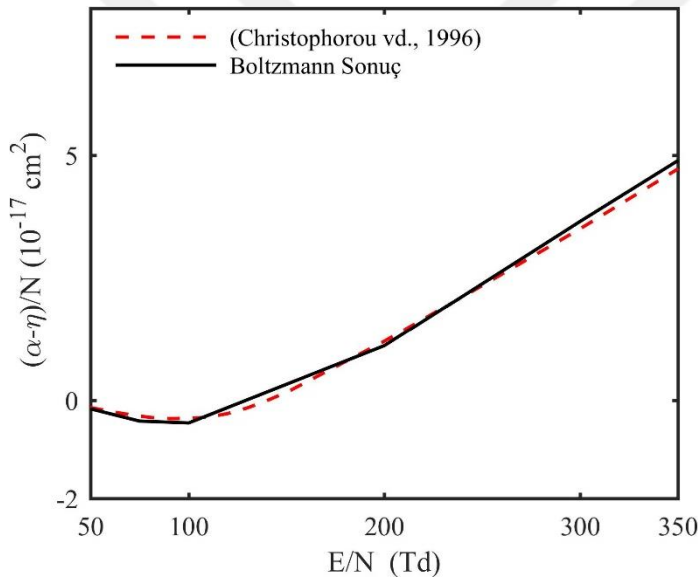
Şekil 5.4. CF₄ elektron ortalama enerjisi

Saf CF₄ gazı için, 50-350 Td aralığında Boltzmann eşitliği ile hesaplanan elektron sürüklenme hızı Şekil 5.5'te görülmektedir. Bu aralıkta hesaplanan değerler, elektron ortalama enerjisini karşılaştırırken kullanılan Nikitovic vd. (2010) literatürdeki elektron sürüklenme hızı bulgularıyla karşılaştırılmıştır. Çalışma kapsamında elde edilen sürüklenme hızı değerleriyle literatürdeki bu değerler uyumludur. 50 Td'da Boltzmann sonucu 10,77 m/s ve Nikitovic vd.'nin (2010) hesaplaması 12,55 m/s değerindeyken, artan elektrik alan değerlerinde bu fark azalmakta ve 350 Td'da sırasıyla 24,88 m/s ve 24,99 m/s olmaktadır.



Şekil 5.5. CF₄ sürüklenme hızı

CF₄ için moleköl yoğuna indirgenmiş efektif iyonlaşma katsayısının indirgenmiş elektrik alana göre değişimi Şekil 5.6'da görölmektedir. Boltzmann eşitliklerinin çözümlenmesi sonucu elde edilen veri kümesi, 50 Td-350 Td aralığında Christophorou vd.'nin (1996) bulguları ile uyumludur. Christophorou vd.'nin (1996) bu değeriendirme makalesinde önerdiği CF₄ için indirgenmiş efektif iyonlaşma katsayısı, Hunter, Carter ve Christophorou (1986), Shimosuma, Tagashira ve Hasegawa (1983) ve Lakshminarasimha, Lucas ve Snelson'un (1975) gibi referanslarından faydalanılarak geliştirilmiştir. Boltzmann eşitliklerinin çözümü ile elde edilen indirgenmiş kritik elektrik alan değeri 144,0 Td'dir. Bu değeri Christophorou vd.'nin (1996) 140,2 Td, Tezcan vd.'nin (2016b) 143,5 Td ve Larin, Meurice, Trubnikov ve Vercauteren'in (2004) 143,5 Td bulgularıyla uyumludur.



Şekil 5.6. CF₄ efektif iyonlaşma katsayısı

CF₄ gazının 1 bar basınçta delinme gerilimi karakteristiğine ait deneysel ölçüm sonuçları ve kritik elektrik alan değerinden hesaplanan teorik delinme gerilimi Çizelge 5.3'te görölmektedir. Bu sonuçlar arasında üst düzey bir uyum görölmektedir. Elektrot açıklığının daha küçük olduğu ve bu nedenle ölçüm belirsizliklerinin ortaya çıktığı 1 mm ve 2 mm elektrot aralığında bağıl hata %10 sınırının altında olmakta, elektrot açıklığının 3 mm ve üzerinde olduğu koşullarda ise bu hata değeri %3'lük sınırlar dâhilinde kalmaktadır.

Çizelge 5.3. CF₄ gazının 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları

p = 1 bar	Elektrot Açıklığı (d, mm)				
	1	2	3	4	5
Ölçülen (kV)	4,2	8,1	10,9	14,9	18,8
Hesaplanan (kV)	3,8	7,4	10,9	14,5	18,4
Bağıl Hata (%)	8,9	9,1	-0,3	2,61	2,0

Basınç değerinin 1 bar olduğu bu koşulda elde edilen deneysel ölçüm sonuçları, literatürdeki ölçüm sonuçlarıyla Çizelge 5.4’de karşılaştırılmıştır. CF₄’e ait delinme geriliminin Nema vd. (1982) tarafından bulunan değerleriyle, mevcut ölçüm sonuçları uyumludur ve bu uyum elektrot açıklığı büyüdükçe artmaktadır.

Çizelge 5.4. CF₄ gazının 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme geriliminin karşılaştırılması

Basınç (bar)	Elektrot Açıklığı (d, mm)	Delinme Gerilimi (kV)	
		Ölçüm	Nema vd. (1982)
1	1	4,2	3,9
1	2	8,1	7,7
1	3	10,9	10,6
1	4	14,9	---
1	5	18,8	18,3

5.1.3. Saf argon bulguları

Argon, SF₆ ve CF₄’ün aksine elektronegatif olmayan bir gazdır. Bu durumda, argon gazına ait iyonlaşma çarpışma kesitinin bulunmasına rağmen yapışma çarpışma kesiti bulunmamaktadır. Argon gazı, Şekil 2.17’de görülebileceği gibi, sadece momentum, uyarım ve iyonlaşma çarpışma kesitine sahiptir. Bu fark göz önüne alındığında, Eş. 5.1 ve Eş. 5.2’nin yeniden yazılması gerekmektedir.

$$\begin{aligned}
& \frac{eE}{3m} \frac{1}{v^2} \frac{d}{dv} (v^2 f_1) + \alpha \frac{v}{3} f_1 \\
&= \frac{m}{M} \frac{N}{v^2} \frac{d}{dv} (v^4 Q_{m_Ar} f_0) + N \frac{v_{ex}^2}{v} Q_{ex_Ar}(v_{ex}) f_0(v_{ex}) \\
&+ \frac{N}{\Delta} \frac{v_1^2}{v} Q_{i_Ar}(v_1) f_0(v_1) + \frac{N}{1-\Delta} \frac{v_2^2}{v} Q_{i_Ar}(v_2) f_0(v_2) \\
&- Nv(Q_{ex_Ar} + Q_{i_Ar}) f_0
\end{aligned} \tag{5.10}$$

$$\frac{eE}{m} \frac{df_0}{dv} + \alpha v f_0 = -Nv(Q_{ex_Ar} + Q_{i_Ar}) f_1 \tag{5.11}$$

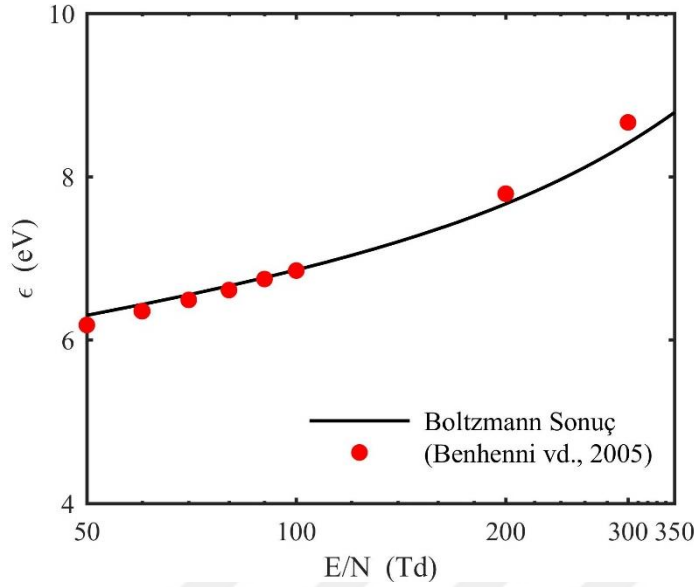
Eş. 5.10, Eş. 5.11’de yerine konularak Eş. 5.12 elde edilir. Bu eşitlik, argon için elektron enerji dağılım fonksiyonlarını elde edebilmek için kullanılan temel Boltzmann eşitliğidir.

$$\begin{aligned}
& \left(\frac{E}{N}\right)^2 \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{3Q_{m_Ar}^e} \frac{df}{d\varepsilon} \right) + \left(\frac{eE}{N}\right) \left(\frac{\alpha}{N}\right) \frac{d}{d\varepsilon} \left(\frac{\varepsilon}{3Q_{m_Ar}^e} f \right) + \left(\frac{eE}{N}\right) \left(\frac{\alpha}{N}\right) \frac{\varepsilon}{3Q_{m_Ar}^e} \frac{df}{d\varepsilon} \\
&+ \left(\frac{\alpha}{N}\right)^2 \frac{\varepsilon}{3Q_{m_Ar}^e} f + \frac{2m}{M} \frac{d}{d\varepsilon} (\varepsilon^2 Q_{m_Ar} f) \\
&+ (\varepsilon + \varepsilon_{ex}) Q_{ex_Ar}(\varepsilon + \varepsilon_{ex}) f(\varepsilon + \varepsilon_{ex}) - \varepsilon Q_{ex_Ar}(\varepsilon) f(\varepsilon) \\
&+ \frac{1}{\Delta} \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) Q_{i_Ar} \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) f \left(\frac{\varepsilon}{\Delta} + \varepsilon_i \right) \\
&+ \frac{1}{1-\Delta} \left(\frac{\varepsilon}{1-\Delta} + \varepsilon_i \right) Q_{i_Ar} \left(\frac{\varepsilon}{1-\Delta} + \varepsilon_i \right) f \left(\frac{\varepsilon}{1-\Delta} + \varepsilon_i \right) \\
&- \varepsilon Q_{i_Ar}(\varepsilon) f(\varepsilon) = 0
\end{aligned} \tag{5.12}$$

Eş. 5.12’nin çözülmesi ile elde edilen EEDF’ler, elektron ortalama enerjisi için Eş. 5.4, sürüklenme hızı için Eş. 5.5 ve iyonlaşma katsayısı için Eş. 5.6’nın argon için uyarlanmış eşitliklerinde yerlerine konulur ve söz konusu elektron çıkış parametreleri hesaplanır.

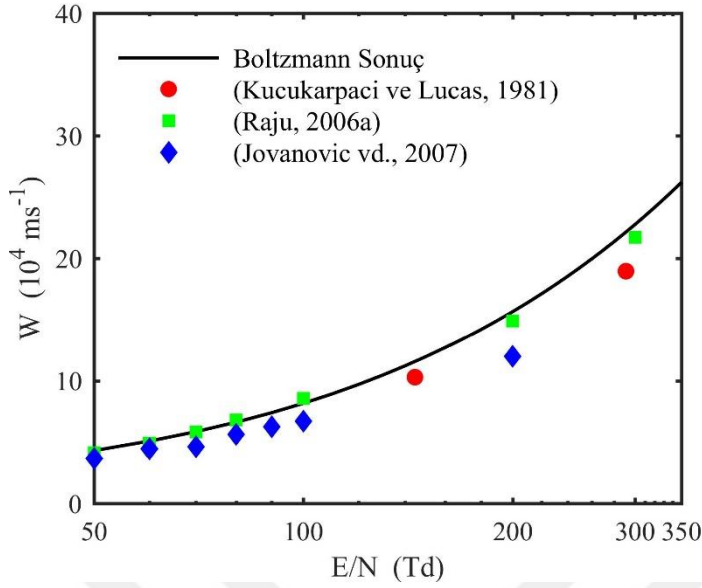
Argon gazı için elde edilen elektron enerji dağılım fonksiyonlarının, Eş. 5.4’te yerine konulması sonucu molekül yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alan değerinin 50-350 Td aralığına karşılık gelen elektron ortalama enerjisi Boltzmann eşitlikleriyle hesaplanmıştır. Şekil 5.7’de siyah çizgi ile gösterilen bu hesaplama sonucu, literatürdeki Benhenni vd.’nin (2005) sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Her iki veri kümesi arasında oldukça yakın bir ilişki

görülmektedir. Benhenni vd.'nin (2005) çalışmasında elektron çığ parametresi deneysel çalışmalarda yaygın olarak kullanılan Townsend metodu (Urquijo, Hernandez-Avila, Basurto ve Ramirez, 2003; Urquijo, Castrejon-Pita, Hernandez-Avila ve Basurto, 2004) ve Monte Carlo hesaplama metodu kullanılarak elde edilmiş ve bu iki metotla elde edilen bulgular birbirini doğrulamıştır.

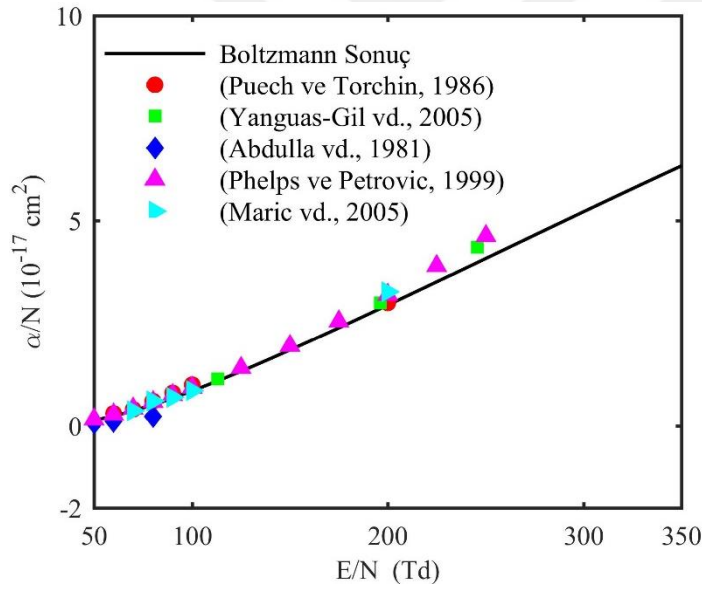


şekil 5.7. Argon elektron ortalama eneręisi

Argon gazı için sürüklenme hızının indirgenmiş elektrik alanın 50-350 Td aralığında Boltzmann eşitlikleriyle elde edilen sonuçları şekil 5.8'de görülmektedir. Bu sonuçlar, literatürdeki Kucukarpaci ve Lucas (1981), Raju (2006a: 348) ve Jovanovic vd.'nin (2007) sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır. Bu sonuçları elde ederken Kucukarpaci ve Lucas (1981) hem deneysel bir düzeneği hem de Monte Carlo metodunu, Raju (2006a: 348) mevcut literatürdeki verileri derleme yöntemini, Jovanovic vd. (2007) Townsend ve Monte Carlo metodunun yanı sıra iki terimli Boltzmann eşitliklerini çözerek elektron çığ parametrelerini hesaplayan ELENDIF kodunu kullanmıştır (Morgan ve Penetrante, 1990; Verboncoeur, Parker, Penetrante ve Morgan, 1996).



Şekil 5.8. Argon sürüklenme hızı



Şekil 5.9. Argon iyonlaşma katsayısı

Argon için indirgenmiş iyonlaşma katsayısının molekül yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alana göre sonuçları Şekil 5.9'da görülmektedir. Boltzmann eşitlikleri kullanılarak 50-350 Td değerleri arasında hesaplanan indirgenmiş iyonlaşma katsayısı verileri, literatürdeki Puech ve Torchin (1986), Yanguas-Gil vd. (2005), Abdulla, Dutton ve Williams (1981), Phelps ve Petrovic (1999) ve Maric, Radmilovic-Radenovic ve Petrovic (2005) referanslarındaki bulgulara oldukça yakındır. İndirgenmiş iyonlaşma katsayısının elde edildiği bu çalışmalar esnasında Puech ve Torchin (1986), Yanguas-Gil vd. (2005) iki terimli

Boltzmann eşitliği, Abdulla vd. (1981) deneysel ölçüm ve Maric vd. (2005) Townsend kriteri metodunu kullanmıştır.

Dördüncü bölümde ayrıntıları ile açıklanan test hücresi kullanılarak, argon gazına ait elde edilen delinme gerilimleri Çizelge 5.5'te yer almaktadır. Bu ölçümlerin ilk aşamasında, test hücresinin iç basıncı 1 bar seviyesine ayarlanarak 2,5 mm'den 10,0 mm'ye kadar 2,5 mm'lik adımlarla ölçümler alınmıştır. Söz konusu ölçümler literatürde yer alan verilerle karşılaştırıldığında, bu verilere oldukça yakın oldukları gözlemlenmektedir (Nguyen, Hiziroglu ve Dincer, 1996; Khechen ve Laghari, 1989). Argon gazının yapışma çarpışma kesiti olmadığından, Boltzmann eşitlikleriyle kritik elektrik alan değeri hesaplanamamaktadır. Bu nedenle SF₆ ve CF₄ gazlarında olduğu gibi delinme gerilimi ölçüm değerleri, Boltzmann sonuçlarıyla karşılaştırılamamış ve sadece literatürdeki sonuçlarla karşılaştırılabilmektedir. Nguyen vd. (1996) ve Khechen ve Laghari (1989) tarafından bulunan delinme gerilimi sonuçları, bu çalışmada kullanılan test hücresine benzer test hücresi modelleri kullanılarak deneysel ölçümlerle elde edilmiştir.

Çizelge 5.5. Argon gazının 1 bar/2,5-10,0 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları

Basınç	Elektrot Açıklığı	Delinme Gerilimi (kV)		
(bar)	(d, mm)	Ölçüm	Nguyen vd. (1996)	Khechen ve Laghari (1989)
1	2,5	2,6	3,2	2,7
1	5,0	3,9	5,9	4,7
1	7,5	5,1	7,1	7,4
1	10,0	6,7	8,5	7,6

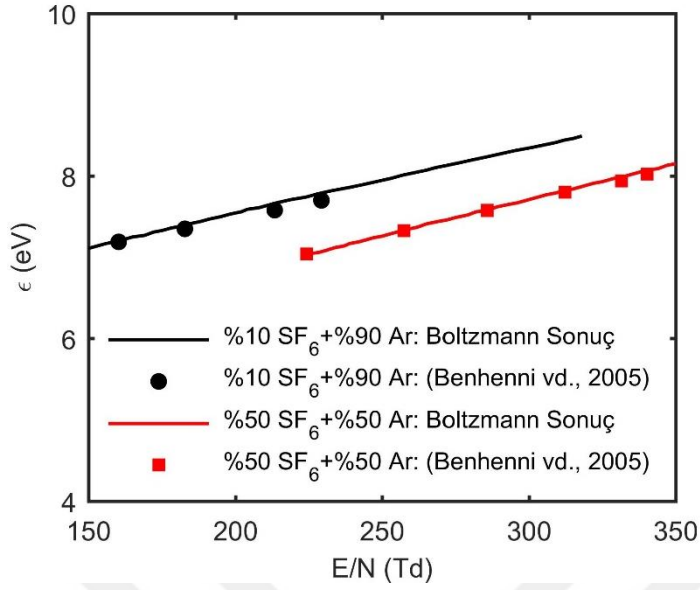
5.2. SF₆+Argon Bulguları

SF₆ gazı yüksek dielektrik dayanımına rağmen, diğer elektronegatif gazlara göre kısmen yüksek maliyeti ve güçlü bir sera gazı olması nedeniyle endüstriyel kullanımının Kyoto Protokolü başta olmak üzere uluslararası anlaşmalarla sınırlandırılmış bir gaz olduğundan kullanımına alternatifler aranmaktadır. Bu sınırlılıkları aşabilmek için, 1980'li yıllardan günümüze dielektrik dayanımı yüksek ve maliyeti düşük alternatif gazlarla ilgili çalışmalar yürütülmektedir. Bu çalışmalar arasında ön plana çıkan alternatiflerden birisi de, SF₆ gazı ile diğer gazların ikili veya üçlü karışımlarıdır (Khechen ve Laghari, 1989; Dincer ve

Hiziroglu, 1994). Bu karışımlarda, sıklıkla kullanılan alternatiflerden birisi de argon gazıdır (Dincer ve Hiziroglu, 2001). Argon gazının atmosferik ortamda dielektrik dayanımı yaklaşık 4,8-5,2 kV/cm olmasına rağmen (Khechen ve Laghari, 1989), oldukça ucuz, kolay bulunabilir, zehirsiz ve yanmaz olması gibi avantajları sayesinde alternatif gazlardan birine dönüşmektedir (Hiziroglu, Dincer ve Nguyen, 1997).

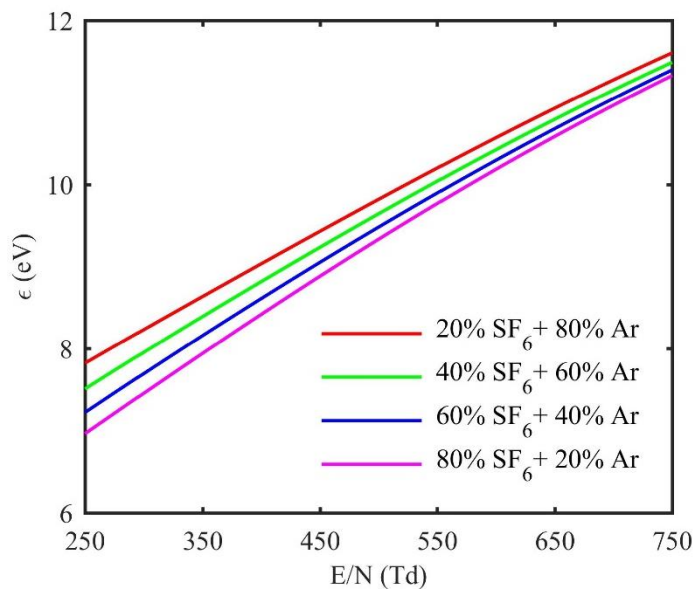
SF₆ ve argon ikili gaz karışımları ile ilgili oldukça geniş bir literatür bulunmaktadır. Hem doğrusal hem de doğrusal olmayan alanlarda delinme karakteristiği (Hiziroglu ve Dincer, 2008), elektron çıkış parametreleri (Urquijo vd., 2003; Benhenni vd., 2005; Cekmen ve Dincer, 2009; Tezcan vd., 2010) ve plazma cihazlarında elektriksel delinme için önemli bir yer tutan elektronların geri difüzyonu (Dincer vd., 2007) gibi birçok konuda çalışmalar bulunmaktadır. Bu aşamada, öncelikle literatürdeki veriler kullanılarak elektron ortalama enerjisi, sürüklenme hızı ve efektif iyonlaşma katsayısı hesaplamalarımız doğrulanmış ve bu parametreler karışımdaki argon oranı %20-%80 aralığında değişirken 250-750 Td bölgesinde incelenmiştir.

SF₆-Ar ikili gaz karışımında elektron ortalama enerjisi, indirgenmiş elektrik alan bölgesinin 150-350 Td olduğu bölgede %10 ve %50 SF₆ için Benhenni vd. (2005) referansı ile karşılaştırılmıştır, bkz. Şekil 5.10. Benhenni vd.'nin (2005) bu çalışmasında elektron çıkış parametreleri, deneysel ölçümler için Townsend ve teorik hesaplama için Monte Carlo metotları kullanılarak elde edilmiştir. Tez çalışmasında kullanılan Boltzmann metodu ile elde edilen elektron ortalama enerjilerinin, bu kaynaktaki verilerle uyumlu olduğu görülmektedir.



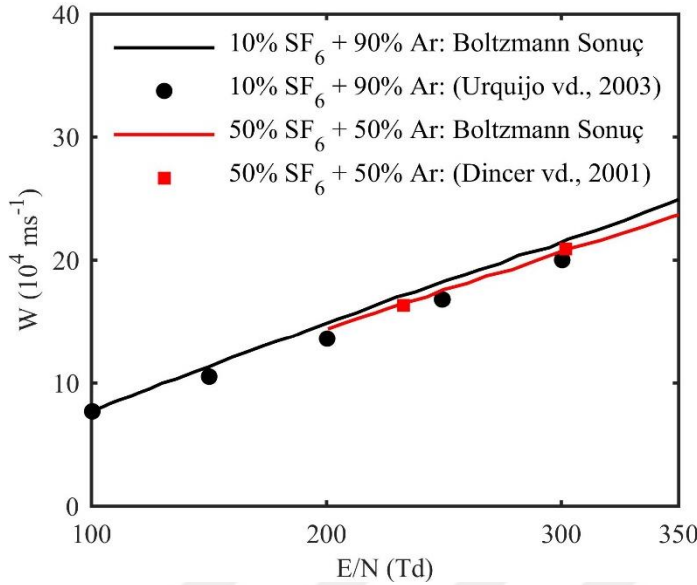
Şekil 5.10. SF₆+Argon gaz karışımında elektron ortalama enerjisinin literatür ile karşılaştırılması

SF₆-Ar karışımında %20'den %80'e kadar değişen oranlarda argon bulunması durumunda, hesaplanan elektron ortalama enerjileri Şekil 5.11'de verilmiştir. Karışım içindeki SF₆ oranı arttırıldıkça elektronların ortalama enerjileri azalmaktadır. Delinme karakteristiği için daha kritik bir bölge niteliğindeki indirgenmiş elektrik alanın 250 Td değerinde olduğu bölge ve çevresinde elektron ortalama enerjisi, SF₆ oranı artarken sırasıyla 7,82 eV, 7,51 eV, 7,22 eV ve 6,96 eV değerlerini almaktadır.



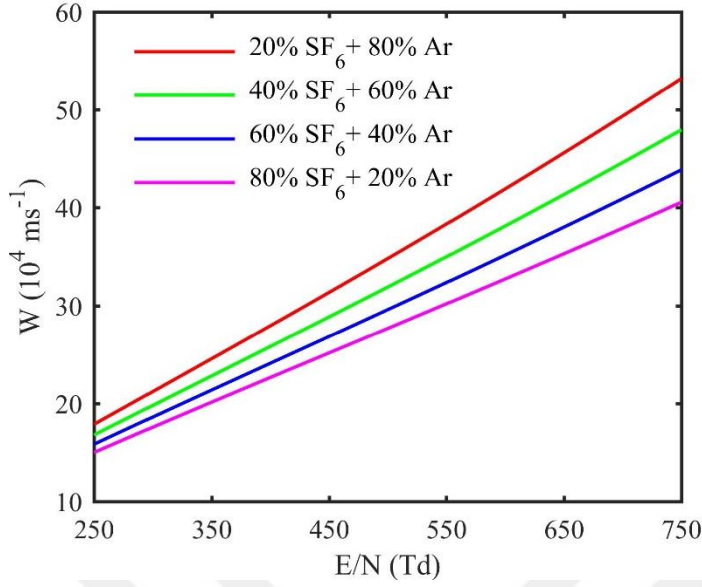
Şekil 5.11. SF₆+Argon gaz karışımında elektron ortalama enerjisi

Bu ikili gaz karışımında elektron çıkış parametrelerinden olan sürüklenme hızı verileri %10 ve %50 SF₆ için Şekil 5.12’de görüldüğü gibi literatürdeki verilerle karşılaştırılmıştır. Her iki karışım için sürüklenme hızı verilerinin literatüre yakın olduğu görülmektedir. Bu çalışmalarda, Urquijo vd. (2003) Townsend metodunu, Dincer ve Hiziroglu (2001) ise Monte Carlo simülasyonunu kullanmıştır.



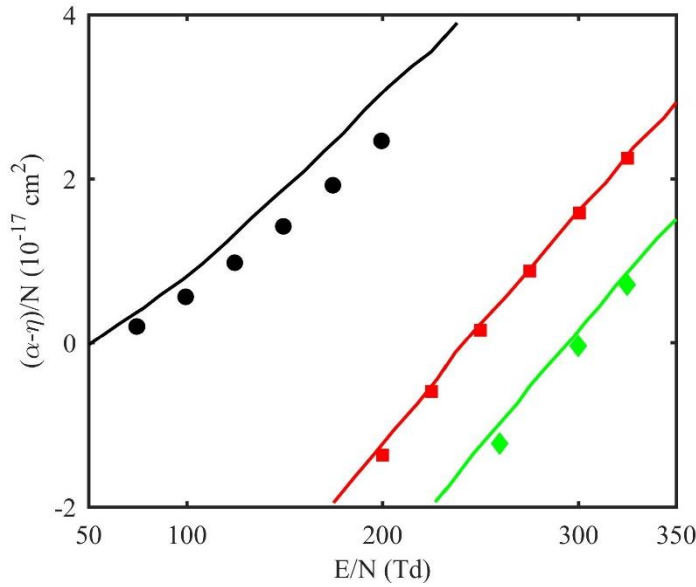
Şekil 5.12. SF₆+Argon gaz karışımında elektron sürüklenme hızının literatür ile karşılaştırılması

Bu gaz karışımında indirgenmiş elektrik alanın 250-750 Td aralığında elektron sürüklenme hızı verileri Şekil 5.13’deki gibidir. İndirgenmiş elektrik alan değerinin daha küçük olduğu değerlerde, $E/N < 250$ Td, elektron sürüklenme hızı verileri birbirine yaklaşmaktadır. İndirgenmiş elektrik alan değeri büyüdükçe, $E/N > 500$ Td, sürüklenme hızı açısından karışımlar arasında önemli farklılıklar gözlemlenmektedir. SF₆ oranı ile sürüklenme hızı arasında ters bir ilişki vardır. İndirgenmiş elektrik alan değerinin 750 Td olduğu noktada artan SF₆ oranına bağlı olarak elektron sürüklenme hızı sırasıyla $53,21 \cdot 10^4$ m/s, $47,95 \cdot 10^4$ m/s, $43,87 \cdot 10^4$ m/s ve $40,56 \cdot 10^4$ m/s değerlerini almaktadır.



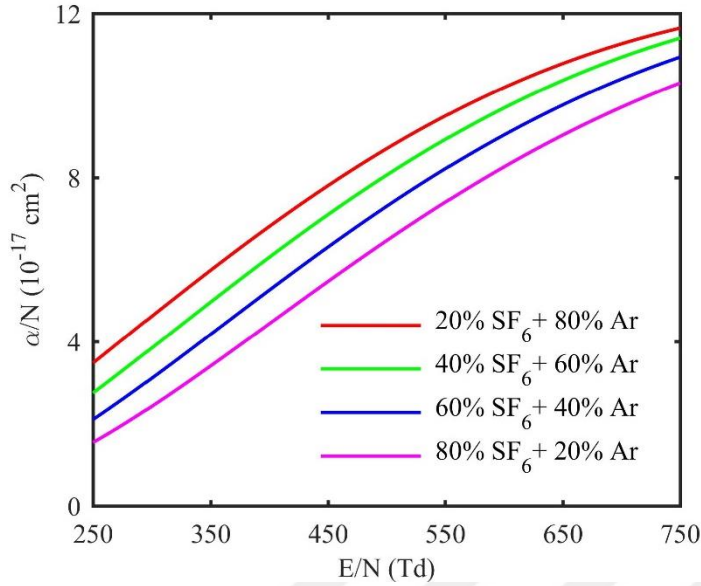
Şekil 5.13. SF₆+Argon gaz karışımında elektron sürüklenme hızı

SF₆-Ar gaz karışımında indirgenmiş elektrik alana göre efektif iyonlaşma katsayısı %1, %50 ve %70 oranında SF₆ içerirken Urquijo vd.'nin (2003) bulgularıyla karşılaştırılmıştır. %1 SF₆ karışımında hesaplama sonucu ile Urquijo vd.'nin (2003) bulguları arasında %20'lik sınırlar dâhilinde bir fark olsa da, karışım içindeki SF₆ oranı arttıkça hesaplanan değerlerle bulgular arasında ciddi düzeyde bir uyum görülmektedir.



Şekil 5.14. SF₆+Argon gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısının literatür ile karşılaştırılması

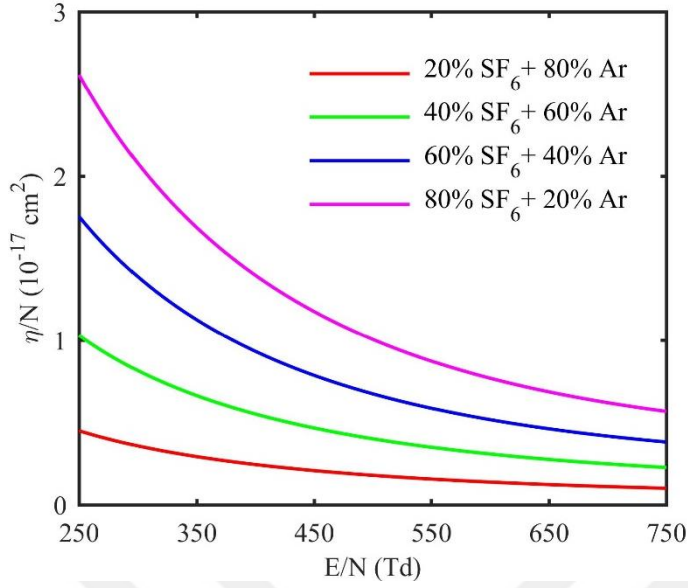
SF₆-Ar ikili gaz karışımında indirgenmiş elektrik alanının 250-750 Td aralığında iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayısı sonuçları sırasıyla Şekil 5.15, Şekil 5.15 ve Şekil 5.17’de bulunmaktadır.



Şekil 5.15. SF₆+Argon gaz karışımında iyonlaşma katsayısı

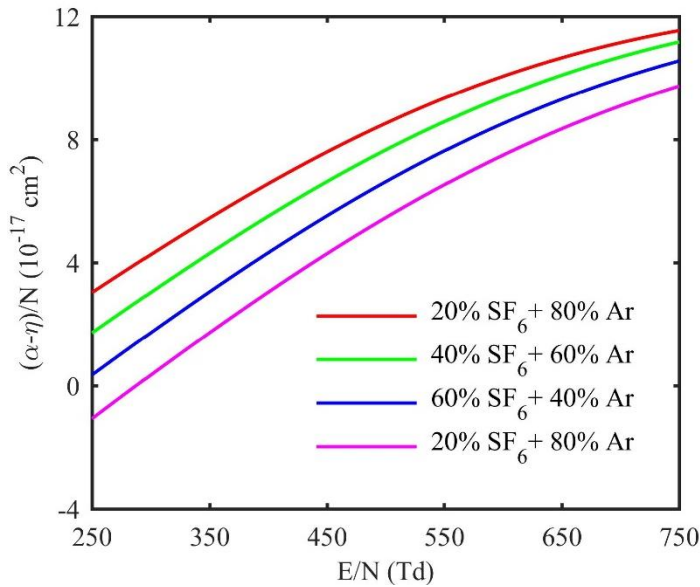
Delinme mekanizmasında önemli yer tutan parametrelerden biri olan iyonlaşma katsayısı söz konusu ikili gaz karışımı için incelendiğinde, artan SF₆ oranına bağlı olarak bu parametrenin değeri azalmaktadır. İndirgenmiş elektrik alanının 250 Td noktasında molekül yoğunluğuna indirgenmiş iyonlaşma katsayısı artan SF₆ oranına bağlı olarak sırasıyla 3,48 10⁻¹⁷ cm², 2,75 10⁻¹⁷ cm², 2,10 10⁻¹⁷ cm² ve 1,54 10⁻¹⁷ cm² değerini almaktadır.3

Argon gazının yapışma çarpışma kesiti olmaması nedeniyle karışım içindeki SF₆ oranına bağlı olarak yapışma katsayısı değeri değişmektedir. İndirgenmiş elektrik alanının 500 Td’den yüksek olduğu bölgede yapışma çarpışma kesitinin etkisi azaldığından yapışma katsayısı değerleri azalarak birbirine yaklaşmaktadır. İndirgenmiş elektrik alanının 250 Td olduğu noktada, yapışma katsayısının değeri artan SF₆ oranına bağlı olarak sırasıyla 0,45 10⁻¹⁷ cm², 1,03 10⁻¹⁷ cm², 1,75 10⁻¹⁷ cm² ve 2,62 10⁻¹⁷ cm²’dir.



Şekil 5.16. SF₆+Argon gaz karışımında yapışma katsayısı

İyonlaşma ve yapışma katsayısının farkı olan indirgenmiş efektif iyonlaşma katsayısı SF₆+Ar gaz karışımında, artan SF₆ oranına bağlı olarak azalmaktadır. Karışımda artan SF₆ oranına bağlı olarak iyonlaşma katsayısı azaldığı ve yapışma katsayısı arttığı için bu karakteristik ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.17. SF₆+Argon gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısı

SF₆+Ar gaz karışımında 1 bar basınçta elektrot aralığı 1-5 mm arasında değişirken ölçülen ve hesaplanan delinme gerilimi verileri Çizelge 5.6'da görülmektedir. Artan SF₆'ya bağlı olarak karışımın dielektrik dayanımı artmaktadır. Bunun nedeni SF₆ gazının yüksek

dielektrik dayanımıdır. SF₆ oranı %20 seviyesindeyken 5 mm elektrot açıklığı için ölçülen delinme gerilimi değeri 18,7 kV iken, bu oran %80'e çıkarıldığında delinme için 39,3 kV gerekmektedir. Bir endüstriyel uygulamada, ihtiyaç duyulan dielektrik dayanım, maliyet ve çevresel etki bir arada değerlendirilerek karışımdaki oranlar belirlenmektedir.

Çizelge 5.6. SF₆+Ar gaz karışımının 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları

SF ₆	Ar	p = 1 bar	Elektrot Açıklığı (d, mm)				
			1	2	3	4	5
80	20	Ölçülen (kV)	8,1	15,6	23,4	31,3	39,3
		Hesaplanan (kV)	7,9	15,7	23,6	31,5	39,4
		Bağıl Hata (%)	2,6	-0,7	-0,8	-0,6	-0,1
60	40	Ölçülen (kV)	6,6	13,2	19,6	26,0	33,2
		Hesaplanan (kV)	6,7	13,3	20,0	26,7	33,3
		Bağıl Hata (%)	-0,5	-0,8	-1,6	-2,4	-0,3
40	60	Ölçülen (kV)	5,5	10,7	15,8	21,2	26,6
		Hesaplanan (kV)	5,3	10,7	16,0	21,4	26,7
		Bağıl Hata (%)	2,4	0,3	-1,1	-1,0	-0,3
20	80	Ölçülen (kV)	4,2	7,9	11,3	14,9	18,7
		Hesaplanan (kV)	3,8	7,6	11,4	15,2	19,0
		Bağıl Hata (%)	9,7	4,6	-0,5	-1,7	-1,7

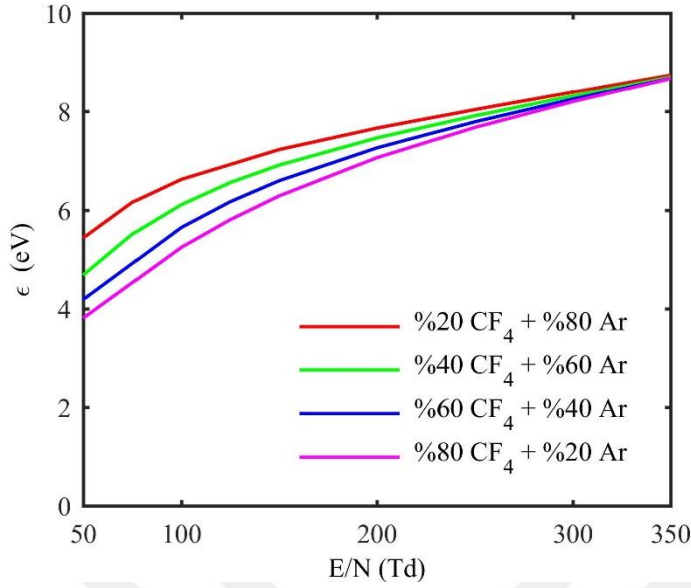
5.3. CF₄+Argon Bulguları

CF₄ ve argon gazlarının molekül ve atom düzeyindeki fiziksel ve çevresel özellikleri daha önce Bölüm 2.3 içinde tanımlanmıştı. Bu gazlar; plazma, güç anahtarlama devreleri, ark kaynakları ve gaz izoleli kesiciler gibi endüstriyel alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Nikitovic vd., 2009; Khechen ve Laghari, 1989). CF₄ gazının sera gazı olması ve atmosferdeki nispeten uzun yaşam ömrü nedeniyle, bu endüstriyel kullanım alanlarında alternatif gazlarla ikili gaz karışımlarına da sıklıkla rastlanmaktadır (Christophorou, 2006; Xiao ve Yunkun, 2013; Bankovic vd., 2014).

CF₄ gazına alternatif ikili gaz karışımlarında kullanılan önemli gazlardan birisi de argondur. Argon gazı düşük ark endüktansı, yüksek akımları iletebilme kabiliyeti ve deşarj sıcaklıklarda ısı kararlılığı nedeniyle plazma ve güç anahtarlama uygulamalarında CF₄ gazı ile birlikte kullanılmaktadır (Duzkaya ve Tezcan, 2017; Reinking, Christophorou ve Hunter, 1986; Datskos, Christophorou ve Carter, 1991). Bu yaygın endüstriyel kullanım alanının bir sonucu olarak, CF₄+Ar gaz karışımlarına ait elektron çıkış parametreleri ile ilgili çalışmalar otuz yıldan uzun bir süredir devam etmektedir. Bu çalışmalarda ikili gaz karışımlarının oranı, çalışmanın amacına bağlı olarak farklılaşmaktadır (Kurihara vd., 2000; Tezcan vd., 2013).

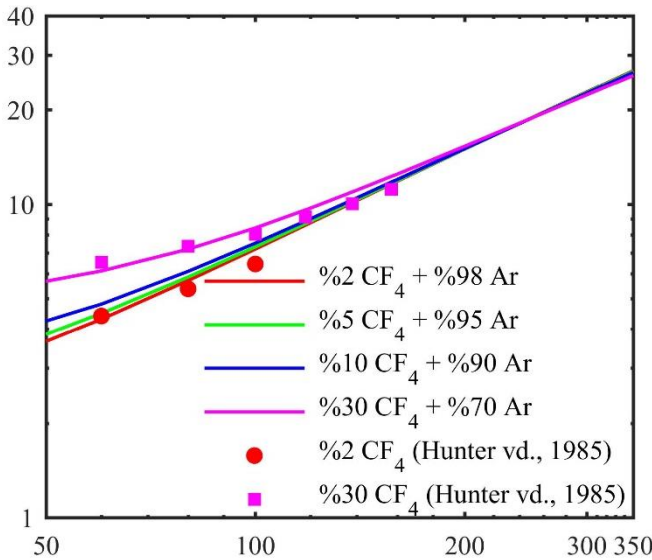
Bu tez kapsamında, CF₄+Ar gaz karışımına ait elektron ortalama enerjisi, sürüklenme hızı, iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayısı %20, %40, %60 ve %80 oranları için bulunmuştur. Literatürden elde edilen sürüklenme hızı ve efektif iyonlaşma katsayısına ait veriler, Boltzmann eşitliği ile hesaplanan parametrelerle karşılaştırılmış ve ilgili parametreler özelinde doğrulanmıştır.

CF₄+Ar gaz karışımına ait sırasıyla %20, %40, %60 ve %80 oranlarındaki elektron ortalama enerjisinin molekül yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alan değerleri Şekil 5.18’te görülmektedir. 50 Td değerinde karışımdaki argon oranı arttıkça elektron ortalama enerjisi de artmaktadır. Bu noktadaki enerji değerleri sırasıyla 5,44 eV, 4,69 eV, 4,19 eV ve 3,81 eV’dur. Bu değerler, 50 Td’da saf argonun 6,31 eV ile saf CF₄’ün 3,03 eV verilerinin arasında beklenen bir dağılım göstermiştir. 350 Td noktasında ise, saf argon ve CF₄ gazlarının ortalama elektron enerjileri birbirine çok yaklaştığından, karışımların da nihai değerleri neredeyse aynıdır.



Şekil 5.18. CF₄+Argon gaz karışımında elektron ortalama enerjisi

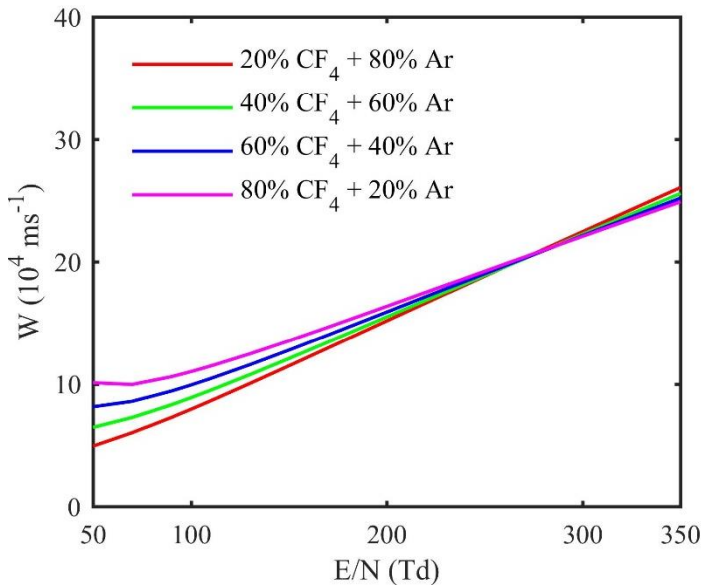
Bu gaz karışımına ait elektron sürüklenme hızı verileri, çalışma kapsamındaki %20-%80 aralığında tanımlanmadan önce, literatürde yer alan sürüklenme hızı verileri ile karşılaştırılmıştır, bkz. Şekil 5.19. Hunter, Carter ve Christophorou (1985) tarafından elde edilen %2 CF₄+%98 Ar ve %30 CF₄+%70 Ar gaz karışımlarındaki sürüklenme hızı verileri Boltzmann sonuçlarıyla karşılaştırılmış ve uyumlu olduğu görülmüştür.



Şekil 5.19. CF₄+Argon gaz karışımında sürüklenme hızının literatür ile karşılaştırılması

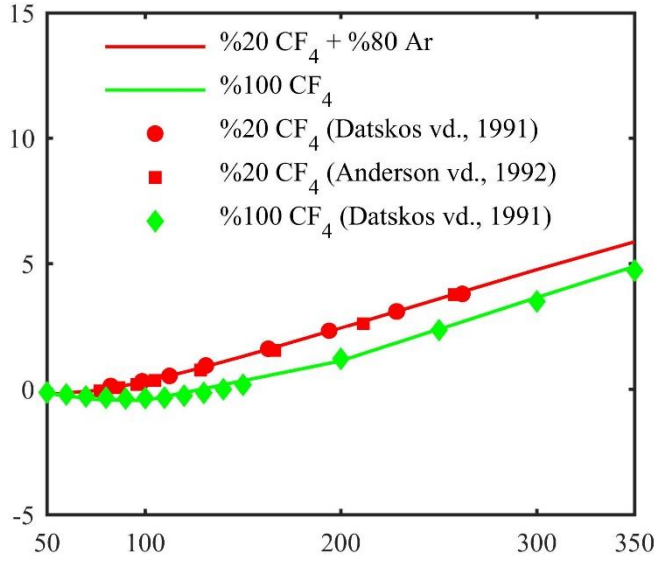
CF₄+Ar gaz karışımının %20-%80 aralığındaki farklı konsantrasyonlardaki karışımlarının Boltzmann eşitlikleri kullanılarak elde edilen elektron sürüklenme hızı verileri Şekil

5.20'dedir. Molekül yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alanın 50 Td değerinde, CF_4 oranı artarken sürüklenme hızı değerleri sırasıyla 4,94 m/s, 6,46 m/s, 8,14 m/s ve 10,11 m/s olmaktadır. Aynı elektrik alan büyüklüğünde bu değerler saf CF_4 ve argon için sırasıyla 12,55 m/s ve 4,31 m/s olduğundan, karışımın bu iki sınır arasında dağılması doğal bir sonuçtur. Elektrik alan değeri büyüdükçe argonun sürüklenme hızı CF_4 'e göre daha büyük bir ivmeyle büyümekte ve 275 Td değerinde birbirlerini kesmektedir. Karışımların sürüklenme hızı verileri de bu noktada birbirini kesmekte ve elektrik alan şiddetinin daha büyük olduğu bölgede, $E/N > 275$ Td, karışımdaki gaz oranına bağlı olarak sürüklenme hızı karakteristiği terse dönmektedir.



Şekil 5.20. CF_4 +Argon gaz karışımında sürüklenme hızı

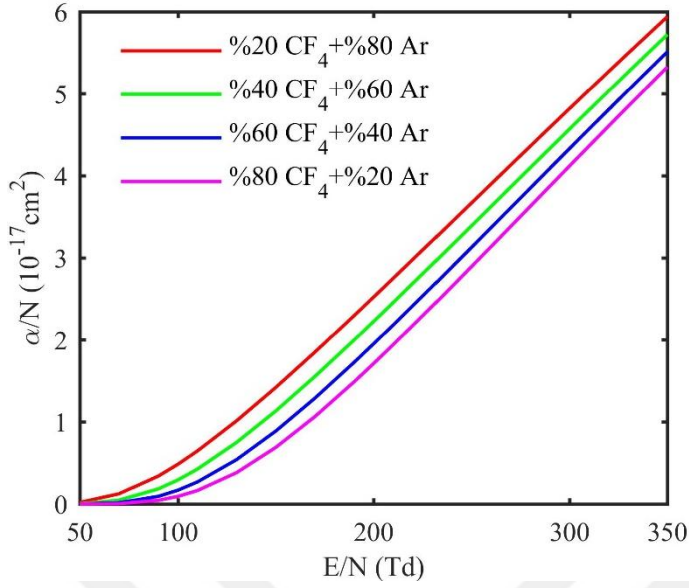
Bu gaz karışımının delinme gerilimini elde edebilmek için oldukça önemli bir parametre olan efektif iyonlaşma katsayısı, çalışma kapsamındaki oranlarda birbiriyle karşılaştırmadan önce, literatürdeki verilerle karşılaştırılmıştır, bkz. Şekil 5.21. Literatürdeki saf CF_4 ve %20 CF_4 +%80 Ar gaz karışımına ait efektif iyonlaşma katsayısı verileri Boltzmann sonuçlarıyla oldukça uyumludur. Datskos vd. (1991) ve Anderson vd. (1992) tarafından elde edilen veriler, deneysel ölçüm sonuçlarıdır. %20 CF_4 +%80 Ar gaz karışımında kritik elektrik alan değeri Datskos vd. (1991) ve Anderson vd. (1992) tarafından sırasıyla 72 Td ve 82 Td olarak bulunmuş, bu çalışma kapsamında söz konusu değer 79,7 Td olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.21. CF₄+Argon gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısının literatür ile karşılaştırılması

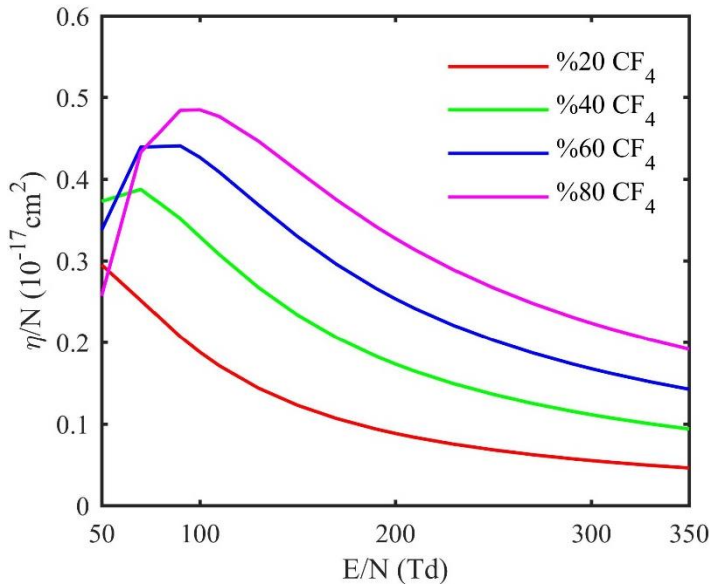
CF₄+Ar gaz karışımının %20-%80 oranları arasındaki iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayısı verileri sırasıyla Şekil 5.22, Şekil 5.23 ve Şekil 5.24'de verilmiştir.

Molekül yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alan değerinin 50 Td olduğu durumda, ortamdaki enerjinin düşük ve her iki gazın iyonlaşma çarpışma kesitinin birbirine yakın olması nedeniyle karışımlardaki iyonlaşma katsayıları birbiriyle neredeyse aynı ve sifıra yakındır. Elektrik alan şiddetinin artması ile birlikte argon gazının karışımındaki oranı ile doğru orantılı olarak iyonlaşma katsayısı da büyümektedir. Bu durum, daha kötü bir yalıtkan olan argon gazının iyonlaşma çarpışma kesitinin CF₄'e göre büyük olmasının doğal bir sonucudur.



Şekil 5.22. CF₄+Argon gaz karışımında iyonlaşma katsayısı

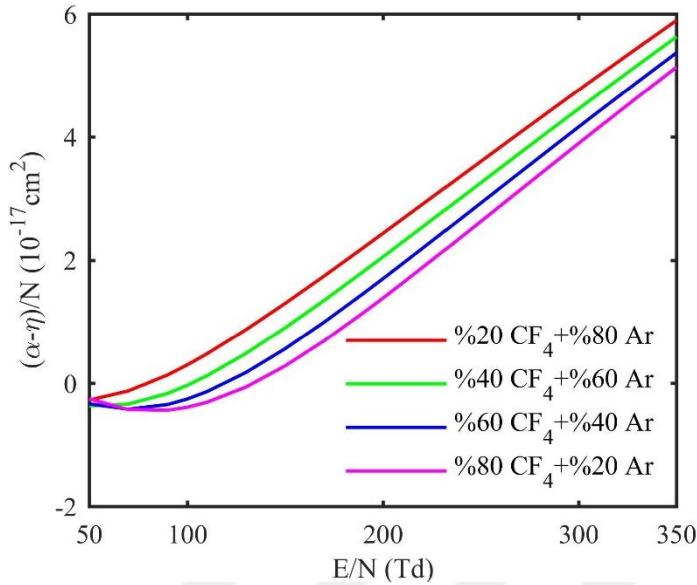
Aynı koşullarda bu gaz karışımlarının yapışma katsayısı kıyaslandığında, argon gazının yapışma çarpışma kesiti olmadığından karışımdaki CF₄ oranı ile doğru orantılı olarak yapışma katsayısının değiştiği görülmektedir. Bu yapışma katsayısının tepe değeri $0,5 \cdot 10^{-17} \text{ cm}^2$ 'dir ve bu değer iyonlaşma katsayısı ile kıyaslandığında sadece düşük elektrik alan şiddetlerinde, 50-150 Td, etkili olmaktadır.



Şekil 5.23. CF₄+Argon gaz karışımında yapışma katsayısı

CF₄+Ar gaz karışımının efektif iyonlaşma katsayısı incelendiğinde, bu iki gaz arasında daha iyi yalıtkan olan CF₄'ün oranına bağlı olarak bu katsayının azaldığı rahatlıkla

görülebilmektedir. Delinme gerilimi değerin hesaplanması için kullanılan moleköl yoğunluğuna indirgenmiş kritik elektrik alan değeri %20 CF₄+%80 Ar için 79,7 Td, %40 CF₄+%60 Ar için 102,3 Td, %60 CF₄+%40 Ar için 118,9 Td ve %80 CF₄+%20 Ar için 133,8 Td olarak hesaplanmaktadır. Bu değler, karışımdaki CF₄ oranına bağlı olarak dielektrik dayanımın arttığını açıkça göstermektedir.



şekil 5.24. CF₄+Argon gaz karışımda efektif iyonlaşma katsayısı

Bu gaz karışımı için elde edilen moleköl yoğunluğuna indirgenmiş kritik elektrik alan değeri Eş. 4.7'te yerine konularak farklı basınç ve elektrot açıklıklarında teorik delinme gerilimi değleri hesaplanmıştır. Bu değlerin deneysel prosedür izlenerek elde edilen delinme geriliminin ölçüm değleriyle karışılaştırılması sonucu Çizelge 5.7 oluşturulmuştur. Bu karışılaştırma sonucunda, nispeten düşük elektrot açıklıklarında, 1 mm ve 2 mm gibi, bağlı hataların büyüdüğü görölmektedir. Bunun en önemli nedeni ölçüm sonuçlarını etkileyen deney belirsizlikleridir. Elektrot açıklığı büyüdükçe, 3 mm ve daha yukarısında, ölçüm belirsizlikleri azalmakta ve bunun doğal bir sonucu olarak bağlı hata düzeyi %5'in altına düşmektedir.

Çizelge 5.7. CF₄+Ar gaz karışımının 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları

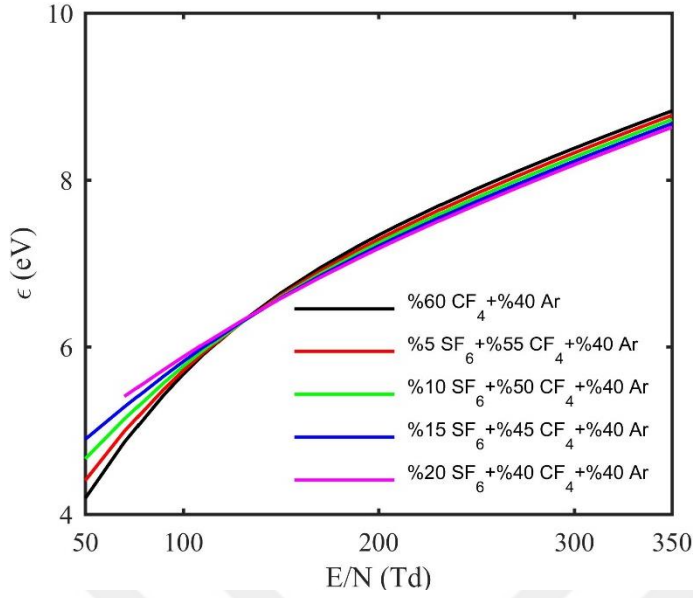
CF ₄	Ar	p = 1 bar	Elektrot Açıklığı (d, mm)				
			1	2	3	4	5
80	20	Ölçülen (kV)	3,7	7,2	10,3	13,3	16,6
		Hesaplanan (kV)	3,2	6,5	9,7	13,0	16,2
		Bağıl Hata (%)	15,8	10,7	6,2	2,6	2,5
60	40	Ölçülen (kV)	2,9	6,2	8,7	11,4	14,5
		Hesaplanan (kV)	2,8	5,7	8,5	11,4	14,2
		Bağıl Hata (%)	3,4	9,4	1,4	0,2	2,1
40	60	Ölçülen (kV)	2,8	5,6	7,6	10,3	12,4
		Hesaplanan (kV)	2,5	4,9	7,4	9,9	12,4
		Bağıl Hata (%)	13,4	13,6	2,5	3,7	0,14
20	80	Ölçülen (kV)	1,9	3,7	5,7	7,5	9,4
		Hesaplanan (kV)	1,9	3,8	5,6	7,5	9,4
		Bağıl Hata (%)	-0,7	-0,7	1,9	-0,1	0,2

5.4. SF₆+CF₄+Argon Bulguları

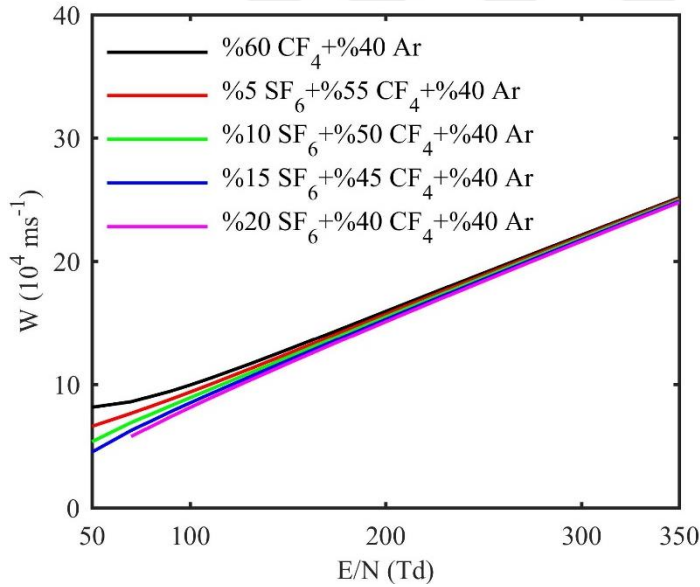
Üçlü gaz karışımlarında elektron çıkış parametreleri ve delinme karakteristikleri üzerine yapılan araştırmalar yaklaşık yarım asırdır devam etmektedir. Bu çalışmalar, yüksek gerilim teçhizatlarında yalıtkanlık karakteristiklerinin belirlenmesinden plazma fiziği alanına kadar geniş bir perspektifte yayılmaktadır (Lakshminarasimha, Lucas, Moruzzi ve Spalding, 1976; Nakanishi, Christophprpu, Carter ve Hunter, 1985; Frechette ve Novak, 1987). Söz konusu çalışmalarda Ar, C₂F₆, C₄F₈, C₂F₂, CCl₂F₂, CO₂, He, N₂ ve SF₆ gibi yüksek gerilim ekipmanlarında yalıtkan olarak sıklıkla kullanılan gazlar bulunmaktadır. Üçlü gaz karışımları ile ilgili bu çalışmalar günümüzde de artarak devam etmektedir. Endüstriyel uygulamalarda karşılaşılan özel sorunlara çözüm üretebilmek ve sera gazı etkisi olan gazların kullanımını sınırlandırmak gibi amaçlarla bu çalışmalar yapılmaktadır (Tezcan vd., 2016a; Lin, Zhao, Xiao ve Zhou, 2019; Haeffliger ve Franck, 2019).

Bu tez çalışması, yüksek gerilim sistemlerinde sıklıkla kullanılan SF_6 , CF_4 ve argon gazlarının saf ve ikili gaz karışımlarının yanı sıra literatürde daha önce çalışılmamış üçlü gaz karışımlarının elektron çığ parametrelerini ve delinme karakteristiklerini incelemektedir. Bu kapsamda $\text{SF}_6+\text{CF}_4+\text{Argon}$ gaz karışımının farklı karışım oranlarında, molekül yoğunluğuna indirgenmiş elektrik alan değerinin 50-350 Td aralığında, elektron ortalama enerjisi, sürüklenme hızı, iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayısı Boltzmann eşitlikleri kullanılarak hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonucu kritik elektrik alan değerleri kullanılarak teorik bir yaklaşımla delinme gerilimi bulunmuş ve bu değer ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Karışımlarda argon oranı sırasıyla %40, %50 ve %60 değerlerinde tutulmuş, her bir değerde %5-%20 aralığında %5'lik oranlarda farklılaşan SF_6 eklenerek elektron çığ parametreleri ve delinme gerilimleri hesaplanmıştır.

Üçlü gaz karışımında argon oranının %40 olduğu ilk durumda, sırasıyla %60 CF_4 +%40 Ar ikili ve %5 SF_6 +%55 CF_4 +%40 Ar, %10 SF_6 +%50 CF_4 +%40 Ar, %15 SF_6 +%45 CF_4 +%40 Ar ve %20 SF_6 +%40 CF_4 +%40 Ar üçlü gaz karışımları incelenmiştir. Bu gaz karışımlarında argon oranı sabit tutulduğundan bulgular arasında farklılık SF_6 ve CF_4 oranlarının değişimiyle açıklanmalıdır. Ortalama elektron enerjileri 132,8 Td elektrik alan değerinde birbirini kesmektedir, bkz. Şekil 5.25. Bunun nedeni, SF_6 ve CF_4 gazlarının elektron ortalama enerjileriyle ilişkilidir. Bu iki gazın ortalama enerjileri incelendiğinde düşük indirgenmiş elektrik alan değerlerinde SF_6 'nın, büyüyen indirgenmiş elektrik alan değerlerinde de CF_4 'ün bir diğerine göre yüksek olduğu görülmektedir. İndirgenmiş elektrik alanın 350 Td değerlerinde, elektron ortalama enerjisi artan SF_6 oranına göre azalmaktadır ve sırasıyla 8,82 eV, 8,77 eV, 8,72 eV, 8,64 eV ve 8,63 eV değerini almaktadır.



Şekil 5.25. %40 Argon oranında SF₆+CF₄+Argon gaz karışımında elektron ortalama enerjisi



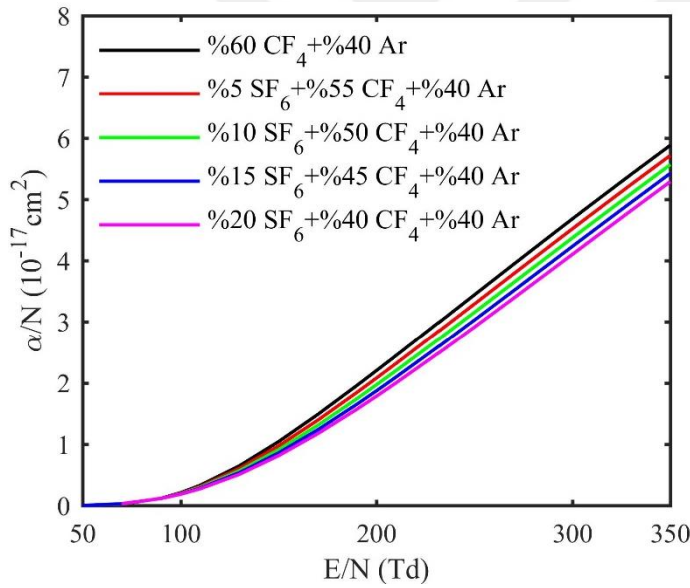
Şekil 5.26. %40 Argon oranında SF₆+CF₄+Argon gaz karışımında sürüklenme hızı

Bu karışım oranlarında sürüklenme hızı sonuçları Şekil 5.26'te görülmektedir. Gazların saf durumdaki sürüklenme hızları incelendiğinde, düşük indirgenmiş elektrik alan değerlerinde CF₄'ün, diğer iki gaza göre daha büyük bir değer aldığı, indirgenmiş elektrik alan değeri 350 Td'a yaklaştığında ise bu değerle argon, CF₄ ve SF₆ olarak sıralandığı görülmektedir. Bu durumun doğal sonucu olarak, SF₆ oranı arttıkça sürüklenme hızı azalmaktadır. CF₄+Ar gaz karışımında %40 Ar oranında indirgenmiş elektrik alan değeri

350 Td iken elektron sürüklenme hızı $25,2 \cdot 10^4$ m/s iken, aynı argon oranında karışıma %20 düzeyinde SF_6 eklendiğinde bu değer $24,8 \cdot 10^4$ m/s'ye düşmektedir.

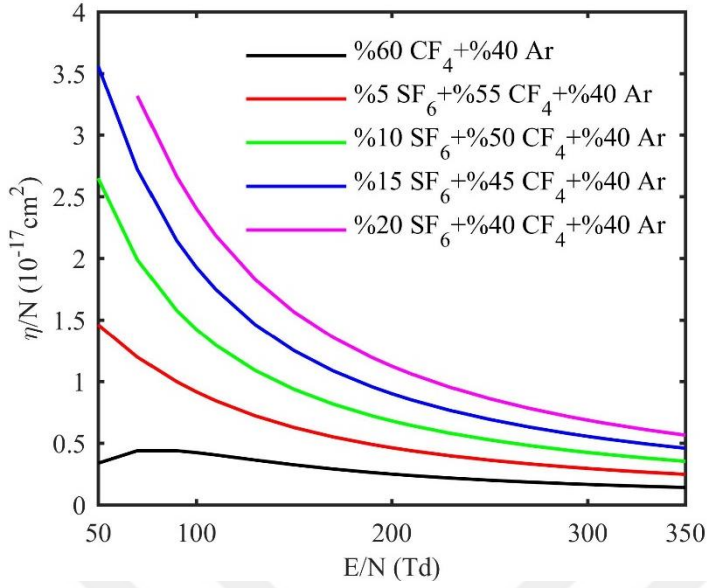
Bu gaz karışımında, Boltzmann eşitlikleri kullanılarak hesaplanan iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayısı verileri sırasıyla Şekil 5.27, Şekil 5.28 ve Şekil 5.29'de verilmektedir.

İyonlaşma katsayısı sonuçları artan SF_6 oranına bağlı olarak azalmaktadır. Bu durum, SF_6 gazının yalıtkanlık seviyesinin karışımdaki diğer gazlarla kıyaslandığında çok daha büyük olmasının sonucudur. İndirgenmiş elektrik alan değerinin 350 Td değerinde, karışımda SF_6 bulunmaması durumunda iyonlaşma katsayısı $5,88 \cdot 10^{17} \text{ cm}^2$ olurken, %20 SF_6 katılması durumunda bu değer $5,29 \cdot 10^{17} \text{ cm}^2$ 'ye düşmektedir.



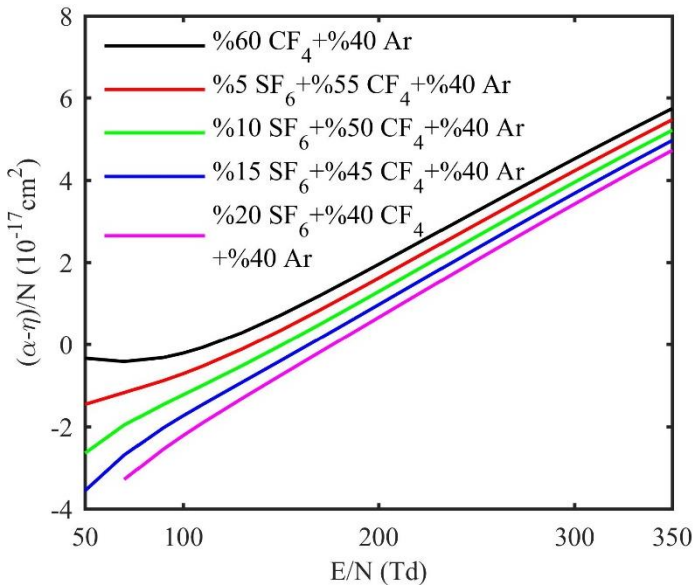
Şekil 5.27. %40 Argon oranında $\text{SF}_6+\text{CF}_4+\text{Argon}$ gaz karışımında iyonlaşma katsayısı

Elektronegatif gazlarda iyonlaşma katsayısı ile birlikte önemli parametrelerden biri olarak ön plana çıkan yapışma katsayısı açısından karışım incelendiğinde, düşük indirgenmiş elektrik alan değerinde artan SF_6 oranına bağlı olarak bu değer önemli ölçüde arttığı görülmektedir. Bunun sonucu olarak, elektron ortalama enerjisi ve sürüklenme hızı parametreleriyle kıyaslanırsa oldukça farklılaşan bir efektif iyonlaşma enerjisi elde edilmektedir.



Şekil 5.28. %40 Argon oranında $\text{SF}_6+\text{CF}_4+\text{Argon}$ gaz karışımında yapışma katsayısı

Argon gazının %40 olduğu durumda, iyonlaşma katsayısının yapışma katsayısının çıkarılması ile elde edilen efektif iyonlaşma katsayısı incelenerek kritik elektrik alan elde edilebilmektedir, bkz. Şekil 5.29. Bu değer artan SF_6 oranına bağlı olarak sırasıyla 114,0 Td, 135,0 Td, 151,0 Td, 164,5 Td ve 176,6 Td'dir.



Şekil 5.29. %40 Argon oranında $\text{SF}_6+\text{CF}_4+\text{Argon}$ gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısı

Kritik elektrik alan değerleri kullanılarak farklı basınç ve elektrot aralıkları için delinme gerilimleri Eş. 4.7 kullanılarak hesaplanmıştır. Bu değerlerin, deney sonuçları ile

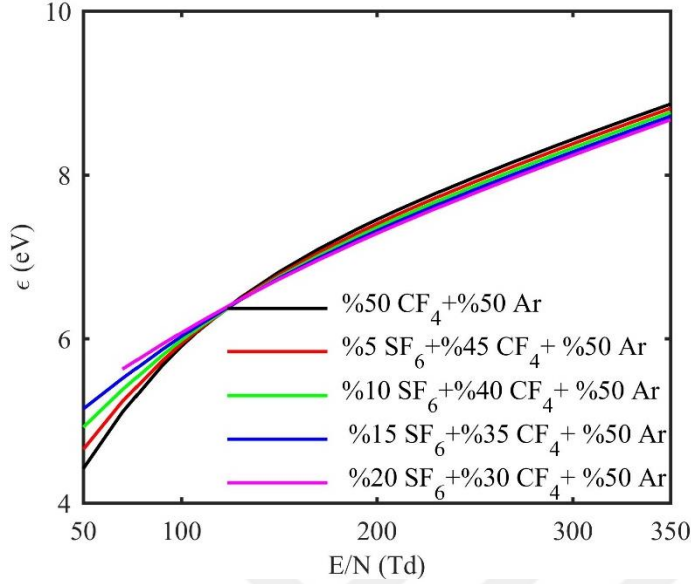
karşılaştırılması sonucu Çizelge 5.8 elde edilmiştir. Bu çizelgedeki sonuçlar incelendiğinde her iki sonuç arasında oldukça üst düzey bir uyum görülmektedir. Sonuçlar arasındaki bağıl hata %5'in altındadır. Karışımdaki SF₆ oranı arttırıldıkça, delinme gerilimi değeri büyümektedir.

Çizelge 5.8. %40 Argon oranında SF₆+CF₄+Ar gaz karışımında 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları

SF ₆	CF ₄	Ar	p = 1 bar	Elektrot Açıklığı (d, mm)				
				1	2	3	4	5
5	55	40	Ölçülen (kV)	3,3	6,6	10,0	13,5	17,0
			Hesaplanan (kV)	3,4	6,7	10,1	13,5	16,8
			Bağıl Hata (%)	-1,4	-1,7	-1,4	0,6	1,2
10	50	40	Ölçülen (kV)	3,8	7,3	11,0	14,4	18,1
			Hesaplanan (kV)	3,7	7,5	11,2	14,9	18,7
			Bağıl Hata (%)	2,3	-2,1	-2,1	-3,9	-3,4
15	45	40	Ölçülen (kV)	4,1	8,2	11,9	16,1	20,4
			Hesaplanan (kV)	4,0	8,1	12,2	16,2	20,3
			Bağıl Hata (%)	1,5	0,7	-1,9	-1,1	0,5
20	40	40	Ölçülen (kV)	4,2	8,5	13,0	17,0	21,4
			Hesaplanan (kV)	4,4	8,8	13,1	17,5	21,9
			Bağıl Hata (%)	-3,7	-2,8	-0,8	-3,1	-2,2

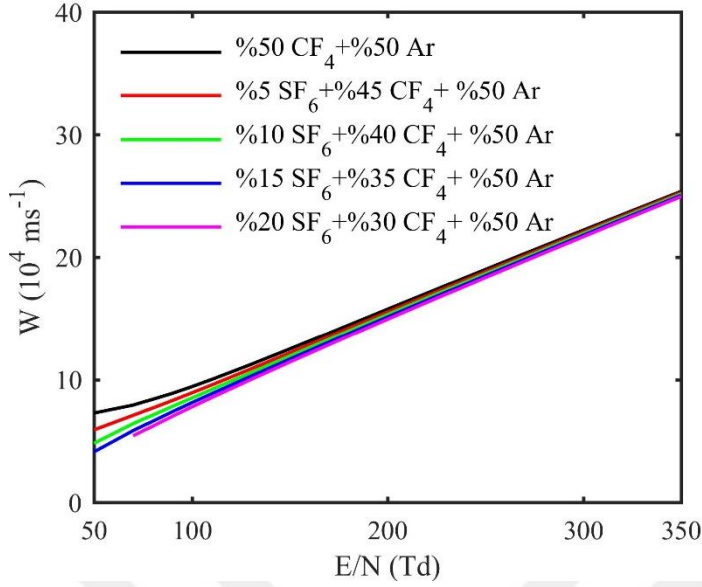
Üçlü gaz karışımında argon oranının %50 olduğu durumda, sırasıyla %50 CF₄+%50 Ar ikili ve %5 SF₆+%45 CF₄+%50 Ar, %10 SF₆+%40 CF₄+%50 Ar, %15 SF₆+%35 CF₄+%50 Ar ve %20 SF₆+%30 CF₄+%50 Ar üçlü gaz karışımları incelenmiştir. Bu gaz karışımlarında elektron ortalama enerjisi verileri, Şekil 5.30'de görülmektedir. Karışımdaki argon oranı artmasına bağlı olarak düşük indirgenmiş elektrik alan değerlerinde elektron ortalama enerjisi %40 Ar karışımlarına göre artmıştır. 50 Td değerinde karışımdaki SF₆ oranı %10 iken elektron ortalama enerjisi %40 ve %50 argon için sırasıyla 4,66 eV ve 4,93 eV olmaktadır. Düşük indirgenmiş elektrik alan değerlerinde argonun ortalama elektron enerjisinin yüksek olmasının bir diğer sonucu, karışımda SF₆ ve CF₄'ün ortalama enerjileri

nedeniyle davranışın değiştiği kritik noktanın sola kaymasıdır. %40 argon oranında bu kesişim noktası 132,8 Td, %50 argon oranında ise 125,6 Td'dir.



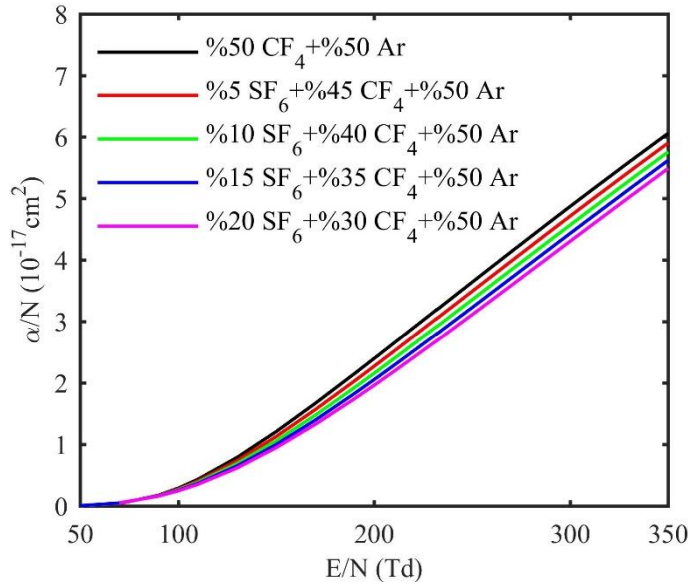
Şekil 5.30. %50 Argon oranında SF₆+CF₄+Argon gaz karışımında elektron ortalama enerjisi

Bu gaz karışımında sürüklenme hızı verileri Şekil 5.31'de verilmiştir. Karışımında argon oranı arttıkça, CF₄ oranı azaldığından ve indirgenmiş elektrik alan değerinin 350 Td olduğu durumda her iki gazın sürüklenme hızı birbirine yakınlığından nihai sürüklenme hızı değerleri $25,0 \cdot 10^4$ m/s seviyesindedir. İndirgenmiş elektrik alan değerinin 50 Td olması durumunda, %10 SF₆ için %40 ve %50 argon oranlarında sürüklenme hızı verileri sırasıyla $5,36 \cdot 10^4$ m/s ve $4,82 \cdot 10^4$ m/s'dir. Bu azalmanın nedeni, söz konusu elektrik alan bölgesinde CF₄'e ait sürüklenme hızının argona göre daha büyük olmasıdır. Bu durum, Şekil 5.19 ve Şekil 5.20'de rahatlıkla görülebilmektedir.



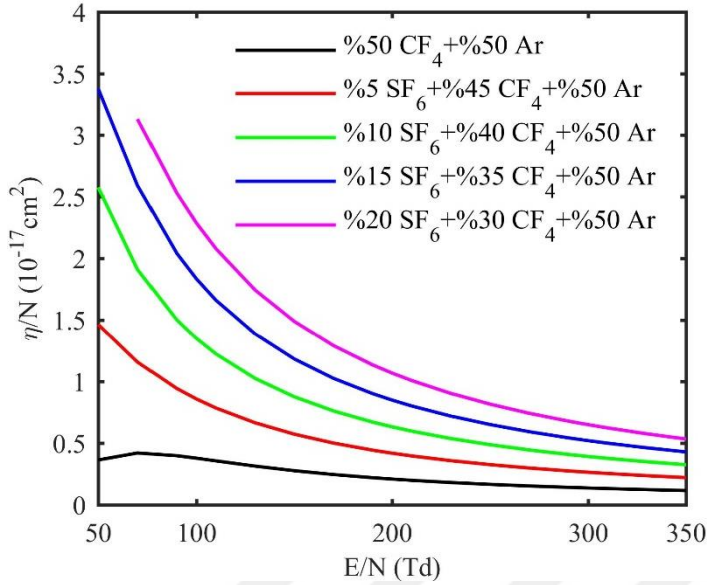
Şekil 5.31. %50 Argon oranında SF₆+CF₄+Argon gaz karışımında sürüklenme hızı

Karışımında argon oranının %50’de sabit tutulduğu üçlü gaz karışımlarında iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayısı sonuçları sırasıyla Şekil 5.32, Şekil 5.33 ve Şekil 5.34’de görülmektedir. Karışımında argon oranının artmasıyla birlikte CF₄ oranının azalması nedeniyle iyonlaşma katsayısı atmakta, yapışma katsayısı azalmaktadır. Bu değişimin temel karakteristiği Şekil 5.20 ve Şekil 5.21’de görülmektedir. İyonlaşma katsayısının nihai değeri, %10 SF₆ için %40 ve %50 argon karışımlarında sırasıyla $5,56 \cdot 10^{17} \text{ cm}^2$ ve $5,75 \cdot 10^{17} \text{ cm}^2$ ’dir.

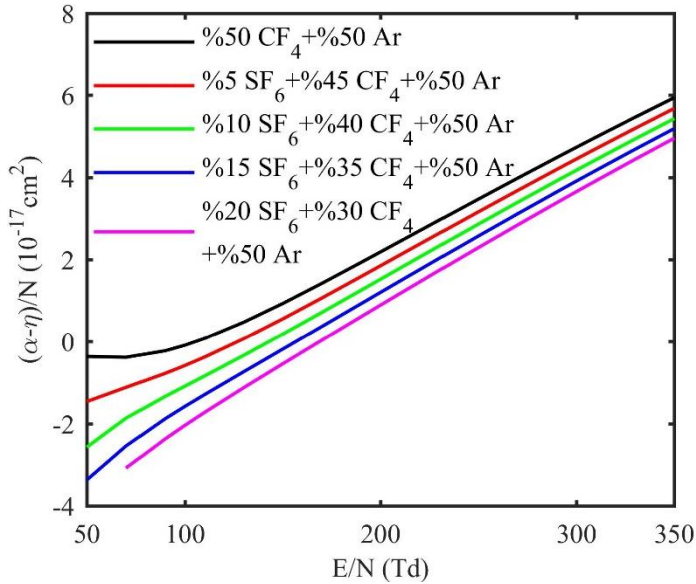


Şekil 5.32. %50 Argon oranında SF₆+CF₄+Argon gaz karışımında iyonlaşma katsayısı

Karışımındaki argon oranı arttıkça yapışma katsayısı azalmaktadır. Bu durum, argon gazının yapışma çarpışma katsayısı ve dolayısıyla yapışma katsayısının olmamasının doğal bir sonucudur. Karışımında %10 SF₆ olması durumunda, argon oranının %40'tan %50'ye çıkarılması ile birlikte yapışma katsayısı $2,65 \cdot 10^{17} \text{ cm}^2$ 'den $2,57 \cdot 10^{17} \text{ cm}^2$ 'ye düşmektedir.



Şekil 5.33. %50 Argon oranında SF₆+CF₄+Argon gaz karışımında yapışma katsayısı



Şekil 5.34. %50 Argon oranında SF₆+CF₄+Argon gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısı

Bu üçlü gaz karışımı setinde argon gazının oranı arttırıldığından efektif iyonlaşma katsayısı büyümektedir. Bu durumun doğal sonucu olarak kritik elektrik alan değeri bir önceki üçlü gaz karışımı setine göre, argonun oranının %40 olduğu, azalmakta ve dielektrik dayanım

düşmektedir. Şekil 5.34’de yer alan sıraya göre kritik elektrik alan değeri %50 CF₄’ten %30 CF₄’e doğru 105,4 Td, 126,9 Td, 143,0 Td, 156,7 Td, 168,8 Td’dir. Bu değerler, %40 argon karışımındaki verilerle kıyaslandığında efektif iyonlaşma katsayısının her bir karışımda yaklaşık 10 Td azaldığı görülmektedir, bkz. Şekil 5.29.

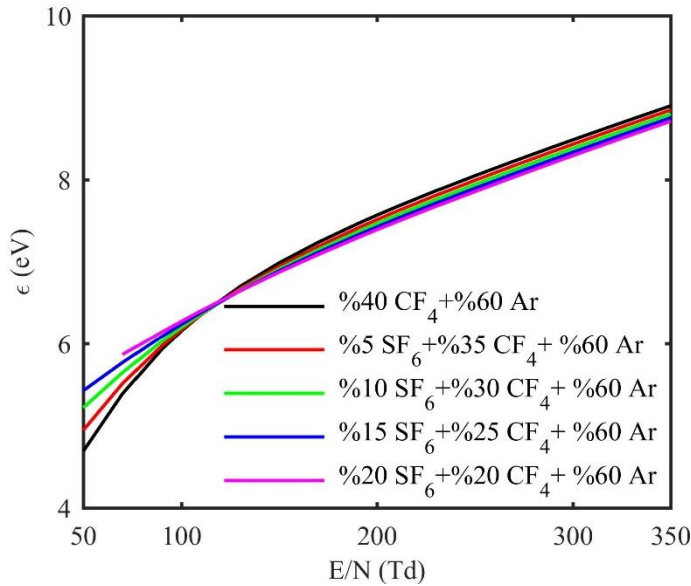
Üçlü karışımdaki argon oranının %50’ye çıkarılması sonrası kritik elektrik alan değerleri kullanılarak elde edilen teorik delinme gerilimi ve deneyle elde edilen delinme gerilimi ölçüm sonuçları Çizelge 5.9’da görülmektedir. Her iki veri seti arasında bağıl hata, %3’ü aşmayan bir uyuma sahiptir. Argon oranının artması sonucu, delinme gerilimi değerleri azalmaktadır. Çizelge 5.8 ile kıyaslandığında 1,0 bar 5,0 mm koşulunda, %10 SF₆ için %40 ve %50 argon oranında ölçülen delinme gerilimi 18,1 kV’tan 17,5 kV’a düşmüştür.

Çizelge 5.9. %50 Argon oranında SF₆+CF₄+Ar gaz karışımında 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları

SF ₆	CF ₄	Ar	p=1 bar	Elektrot Açıklığı (d, mm)				
				1	2	3	4	5
5	45	50	Ölçülen (kV)	3,1	6,2	9,3	12,5	15,6
			Hesaplanan (kV)	3,1	6,3	9,4	12,6	15,7
			Bağıl Hata (%)	-0,8	-2,0	-1,0	-0,4	-0,7
10	40	50	Ölçülen (kV)	3,6	7,1	10,5	14,0	17,5
			Hesaplanan (kV)	3,5	7,1	10,6	14,2	17,7
			Bağıl Hata (%)	1,7	0,6	-1,1	-1,0	-1,0
15	35	50	Ölçülen (kV)	3,9	7,7	11,7	15,4	19,3
			Hesaplanan (kV)	3,9	7,7	11,6	15,5	19,4
			Bağıl Hata (%)	0,9	-1,2	0,1	-0,8	-0,7
20	30	50	Ölçülen (kV)	4,1	8,3	12,4	16,4	20,6
			Hesaplanan (kV)	4,2	8,4	12,5	16,7	20,9
			Bağıl Hata (%)	-1,0	-1,3	-1,5	-1,9	-1,4

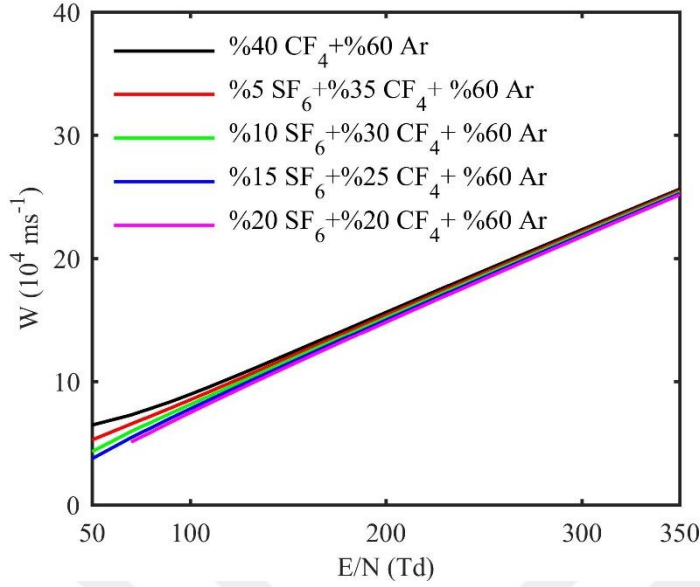
Üçlü gaz karışımında argon oranının %60 olduğu durumda, sırasıyla %40 CF₄+%60 Ar ikili ve %5 SF₆+%35 CF₄+%60 Ar, %10 SF₆+%30 CF₄+%60 Ar, %15 SF₆+%25 CF₄+%60 Ar

ve %20 SF₆+%20 CF₄+%60 Ar üçlü gaz karışımları incelenmiştir. Bu gaz karışımlarına ait elektron ortalama enerjisi verileri Şekil 5.35'te görülmektedir. Argon oranının %10 oranında ekstradan arttırılması ile birlikte, Şekil 5.30'de gözlemlenen etkiler daha baskın bir şekilde ortaya çıkmıştır. Argon gazı diğer iki gaza göre düşük indirgenmiş elektrik alan değerlerinde daha büyük elektron ortalama enerjisine sahip olduğu için, 50 Td seviyesinde %40 ile kıyaslandığında %60 argon olması durumunda ortalama enerjiler yükselmekte ve SF₆ ile CF₄ gazlarının ortalama enerji karakteristiğinin doğal sonucu olarak enerjilerin birbirini kestiği nokta daha sola kaymaktadır. Bu noktanın %60 argon karışımındaki değeri, 117,3 Td'ye düşmektedir.



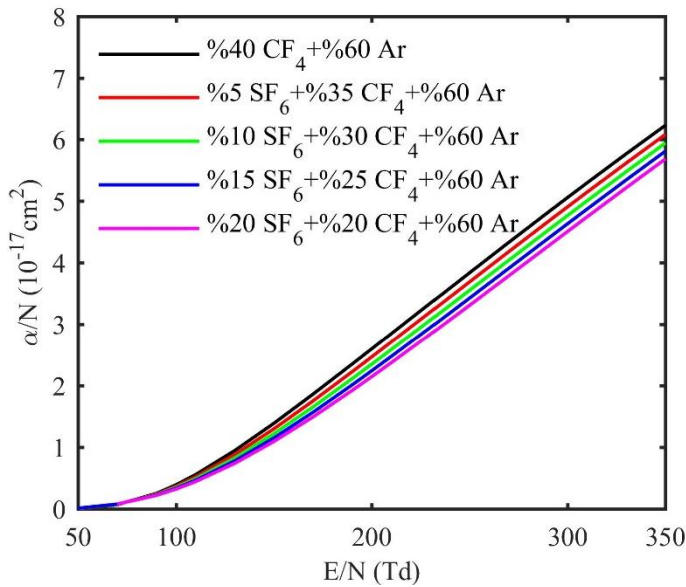
Şekil 5.35. %60 Argon oranında SF₆+CF₄+Argon gaz karışımında elektron ortalama enerjisi

Bu gaz karışımında sürüklenme hızı verileri Şekil 5.36'da görülmektedir. Şekil 5.31'in açıklanmasında yer aldığı gibi, argon ve CF₄'ün sürüklenme hızının indirgenmiş elektrik alanın 350 Td olduğu bölgede birbirine yaklaşması nedeniyle, bu bölgede SF₆ oranı ile ters orantılı olarak küçük bir değişim gözlemlenmektedir. İndirgenmiş elektrik alanın daha küçük olduğu 50 Td bölgesinde ise, daha önemli bir değişimle karşılaşmaktadır. CF₄ oranı ile doğru orantılı bir şekilde sürüklenme hızı artmaktadır. Bu elektrik alan bölgesinde, %10 SF₆ için %40 ve %60 argon oranlarında sürüklenme hızı verileri sırasıyla $5,36 \cdot 10^4$ m/s ve $4,31 \cdot 10^4$ m/s'dir.



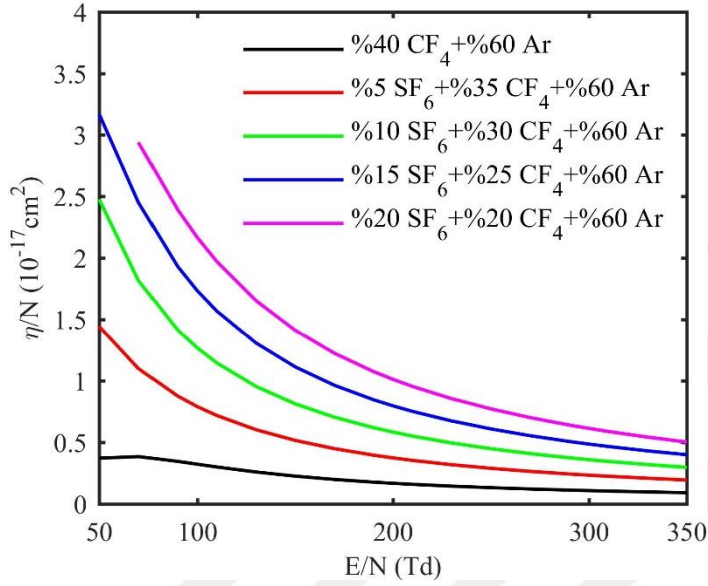
Şekil 5.36. %60 Argon oranında $\text{SF}_6 + \text{CF}_4 + \text{Argon}$ gaz karışımında sürüklenme hızı

Üçlü gaz karışımında argon oranının %60'a çıkarıldığı bu gaz karışımı grubunda iyonlaşma katsayısı, yapışma katsayısı ve efektif iyonlaşma katsayısı sırasıyla Şekil 5.37, Şekil 5.38 ve Şekil 5.39'de görülmektedir. Argon oranının artması ile birlikte, Şekil 5.32'un açıklamasında belirtildiği gibi iyonlaşma katsayısı artmakta ve yapışma katsayısı azalmaktadır. Moleküle indirgenmiş elektrik alan yoğunluğunun 350 Td olduğu bölgede, %40 ve %60 argon oranlarında %10 SF_6 bulunması koşuluyla iyonlaşma katsayısı $5,56 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 'den ve $5,94 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ 'ye çıkmaktadır.

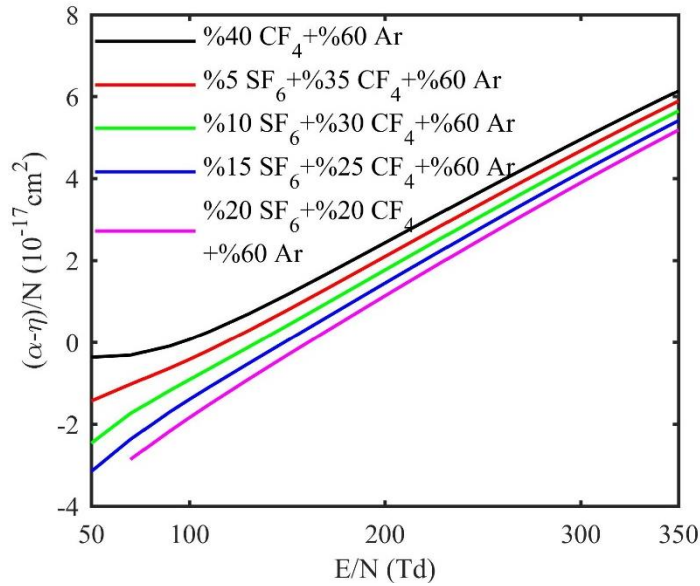


Şekil 5.37. %60 Argon oranında $\text{SF}_6 + \text{CF}_4 + \text{Argon}$ gaz karışımında iyonlaşma katsayısı

Aynı koşullar altında, argon oranının artması ile birlikte yapışma katsayısı azalmaktadır. Karışımda artan argon oranına karşılık CF_4 oranının azalması nedeniyle, yalıtkanlık seviyesi düşmektedir. İndirgenmiş elektrik alan büyüklüğünün 50 Td olduğu bölgede, %10 SF_6 karışımı için argon oranının %40'tan %60'a çıkarılması durumunda yapışma katsayısı $2,65 \cdot 10^{17} \text{ cm}^2$ 'den $2,47 \cdot 10^{17} \text{ cm}^2$ 'ye düşmektedir.



Şekil 5.38. %60 Argon oranında $\text{SF}_6+\text{CF}_4+\text{Argon}$ gaz karışımında yapışma katsayısı



Şekil 5.39. %60 Argon oranında $\text{SF}_6+\text{CF}_4+\text{Argon}$ gaz karışımında efektif iyonlaşma katsayısı

Efektif iyonlaşma katsayısı, iyonlaşma ve yapışma katsayısının farkı olarak tanımlandığından, argon oranı %60'a çıkarıldığında %40 ve %50'ye göre daha bu parametrenin değeri daha da büyümetedir. Argon gazının %60 olduğu bu durumda, benzer şekilde kritik elektrik alan değeri de azalmaya devam etmektedir. Şekil 5.39'de siyah düz çizgiden pembe düz çizgiye doğru artan SF₆ oranına bağlı olarak yeni kritik elektrik alan değerleri sırasıyla 95,7 Td, 118,3 Td, 134,8 Td, 148,6 Td ve 160,8'dir. Kritik elektrik alanın azalmasına neden olan efektif iyonlaşma katsayısı, indirgenmiş elektrik alanın 350 Td olduğu bölgede %10 SF₆ için %40 ve %60 argon bulunması durumunda $5,21 \cdot 10^{17} \text{ cm}^2$ 'den $5,64 \cdot 10^{17} \text{ cm}^2$ 'ye artmıştır. Yaklaşık %10 düzeyinde bir değişim söz konusudur.

Çizelge 5.10. %60 Argon oranında SF₆+CF₄+Ar gaz karışımında 1 bar/1-5 mm koşulunda delinme gerilimi sonuçları

SF ₆	CF ₄	Ar	p=1 bar	Elektrot Açıklığı (d, mm)				
				1	2	3	4	5
5	35	60	Ölçülen (kV)	2,9	5,7	8,9	11,8	14,2
			Hesaplanan (kV)	2,9	5,8	8,8	11,7	14,6
			Bağıl Hata (%)	-1,1	-2,1	1,6	1,0	-2,8
10	30	60	Ölçülen (kV)	3,3	6,6	9,8	13,5	16,4
			Hesaplanan (kV)	3,3	6,7	10,0	13,4	16,7
			Bağıl Hata (%)	-2,4	-1,8	-1,9	1,3	-1,6
15	25	60	Ölçülen (kV)	3,8	7,1	10,8	14,3	17,8
			Hesaplanan (kV)	3,7	7,4	11,1	14,7	18,4
			Bağıl Hata (%)	2,5	-3,6	-2,0	-3,1	-3,7
20	20	60	Ölçülen (kV)	3,9	8,0	11,6	15,6	19,6
			Hesaplanan (kV)	4,0	8,0	11,9	15,9	19,9
			Bağıl Hata (%)	-2,1	0,6	-2,6	-2,3	-1,8

Boltzmann eşitlikleri kullanılarak elde edilen efektif iyonlaşma katsayısı ve kritik elektrik alan verilerinden yararlanılarak, farklı basınç ve elektrot açıklıkları için delinme gerilimi değeri Eş. 4.7 yardımıyla hesaplanmıştır. Bu değerlerin, deneysel prosedür izlenerek yapılan deneyler sonucu elde edilen ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması Çizelge 5.10'da

görülmektedir. Bu sonuçlar arasındaki bağıl hatanın %5'in altında olduğu ve sonuçlar arasındaki uyum rahatlıkla görülebilmektedir. Çalışma kapsamında veri setlerini karşılaştırmak için sıklıkla kullandığımız %10'luk SF₆ için 1,0 bar 5,0 mm koşulunda ölçülen delinme gerilimi %40 argon ortamında 18,1 kV iken, argon oranı %60'a çıktığında 16,4 kV'a düşmektedir.

Tez kapsamında çalışmanın öncelikleri arasında bulunan SF₆+CF₄+Argon üçlü gaz karışımlarının delinme karakteristiği hem hesaplama hem de ölçüm metodu ile elde edilmiş ve birbiriyle karşılaştırılarak doğrulanmıştır. Bu doğrulama sonucu, kullanılan Boltzmann eşitliklerinin deneysel ölçümün olmadığı farklı gaz karışımı oranlarında da kullanılabileceği kabul edilmektedir. %40'tan başlamak üzere %60'a kadar farklı argon barındıran karışımlarda artan SF₆ oranının kritik elektrik alan değerini arttırdığı, argon gaz oranının artması ile bu parametre arasında ters ilişki olduğu Çizelge 5.11 vasıtasıyla görülmektedir.

Çizelge 5.11. SF₆+CF₄+Argon gaz karışımında hesaplanan kritik elektrik alan değerleri

SF ₆ (%)	CF ₄ (%)	Argon (%)	Hesaplanan Kritik Elektrik Alan Değerleri (Td)
5	55	40	135,0
10	50	40	151,0
15	45	40	164,5
20	40	40	176,6
5	45	50	126,9
10	40	50	143,0
15	35	50	156,7
20	30	50	168,8
5	35	60	118,3
10	30	60	134,8
15	25	60	148,6
20	20	60	160,8

6. SONUÇ

Yüksek gerilim sistemlerinde yaygın olarak kullanılan SF_6 ve CF_4 gibi gazların, kimyasal ve fiziksel yapıları gereği sahip olduğu ekonomik ve çevresel dezavantajları farklı gaz karışımları kullanarak azaltmayı amaçlayan bu çalışma, bu gazlarla argonun ikili gaz karışımlarına ek olarak, SF_6 , CF_4 ve argonun birlikte kullanıldığı üçlü gaz karışımlarını da önermektedir.

Düşük maliyetinin yanı sıra sera gazı etkisi bulunmayan argon gazının endüstriyel uygulamalarda ve özellikle de yüksek gerilim teçhizatlarında sıklıkla kullanıldığı hem teorik hem de pratik çalışmalar özelinde görülebilmektedir. Bu teze konu olan çalışmanın amacı, SF_6 ve CF_4 gazının argon ile yaptığı ikili ve üçlü gaz karışımlarında elektron çıkış parametreleri ve kritik elektrik alan değerlerinin elde edilmesidir.

Bu amaç doğrultusunda, ilgili gazlara ait elektron çarpışma kesit alanlarından faydalanarak Boltzmann eşitlikleri çözümlenmiş ve bu gazların elektron enerji dağılım fonksiyonları bulunmuştur. Her bir elektrik alan yoğunluğu için farklı eğriler halinde tanımlanan bu fonksiyonlardan yararlanılarak, SF_6 , CF_4 ve Ar gazının saf, ikili ve üçlü gaz karışımlarında elektron ortalama enerjisi, sürüklenme hızı, iyonlaşma, yapışma ve efektif iyonlaşma katsayıları elde edilmiştir. İyonlaşma ve yapışma katsayılarının birbirine eşit olduğu noktada, kritik elektrik alan değerleri bulunmuştur. Söz konusu veriler, gazların saf hali için literatür ile karşılaştırılmış ve literatürle uyumlu sonuçlar elde edilmiştir. SF_6+Ar ve CF_4+Ar gaz karışımlarında literatürde yer alan elektron çıkış parametreleri mevcut hesaplamalarla elde edilen çıkış parametreleriyle karşılaştırılmış ve birbirine yakın veriler bulunmuştur. SF_6+Ar ve CF_4+Ar ikili gaz karışımlarında argon oranı %20'den %80'e kadar %20'lik adımlarla arttırılmış ve bu koşullarda çıkış parametrelerine ait karakteristikler hesaplanmıştır. Boltzmann eşitlikleri kullanılarak hesaplanan bu karakteristikler, Bölüm 5.2 ve Bölüm 5.3'te ayrıntılarıyla açıklanmıştır.

$\text{SF}_6+\text{CF}_4+\text{Ar}$ üçlü gaz karışımında da Boltzmann eşitlikleri kullanılarak elektron çıkış parametreleri hesaplanmıştır. Üçlü gaz karışımındaki argon oranı sırasıyla %40, %50 ve %60 olarak alınmış, karışımda geriye kalan iki gazdan SF_6 'nın oranı %5'ten başlayarak %20'ye kadar %5'lik artımlarla değiştirilmiştir. Karışım içindeki SF_6 oranına bağlı olarak

elektriksel dayanımın arttığı, argon oranının artması ile efektif iyonlaşma katsayısının büyümesiyle bu parametrenin azaldığı görülmüştür.

Tez çalışmasında Boltzmann eşitlikleriyle elde edilen efektif iyonlaşma katsayısının sıfıra eşit olduğu noktada, saf ve karışım halindeki gazlar için kritik elektrik alan değeri ve dolayısıyla teorik bir delinme gerilimi hesaplanmıştır. Bu değerler, Bölüm 4'te ayrıntılarıyla açıklanan deneysel prosedür izlenerek ölçülen delinme gerilimleriyle karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu, hesaplanan ve ölçülen delinme gerilimi değerlerinin hem birbiriyle hem de saf ve ikili gaz karışımları için literatürdeki değerlerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Bu tez çalışması, uzun yıllardır devam eden SF₆'ya alternatif yalıtkan gaz ve gaz karışımlarıyla ilgili literatüre bir katkı niteliğindedir. SF₆ ile ikili gaz karışımları daha önce çalışılmış olan CF₄ ve argon gazının üçlü karışımları bir yenilik olarak ön plana çıkmaktadır. Bu karışımların hem Boltzmann eşitlikleri kullanılarak elektron çığ parametrelerinin hesaplanması hem de deneysel gözlem yolu kullanılarak delinme geriliminin ölçülmesi, çalışmayı teorik bir düzlemden çıkarmış ve bu iki yöntem birbirini sınamak için kullanılmıştır.

Küresel ısınma başta olmak üzere çevresel sorunların her geçen gün artması ve özelleşmiş endüstriyel uygulamalarda ikili ve üçlü gaz karışımlarına sıklıkla başvurulması gibi nedenlerle SF₆'ya alternatif gaz veya gaz karışımı çalışmaları sürekli artan bir ilgiyle karşı karşıyadır. Bu ilginin sonucu olarak hazırlanan bu tez çalışması, elektrik tesislerinde kullanılan yalıtkan gazlar için alternatif karışımları ön plana çıkarmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abdel-Salam, M.A., Heshem, A., Yehia, A., Mizuno, A., Turkey, A. ve Gabr, A. (2003). Characteristics of corona and silent discharges as influenced by geometry of the discharge reactor. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36, 252-260.
- Abdulla, R.R., Dutton, J. ve Williams, A.W. (1981). *Collision cross sections and electron swarm parameters in argon*. 15th International Conference on Phenomena in Ionized Gases, Minsk, Belarus, 367-368.
- Alston, L.L. (1958) High-temperature effects on flashover in air. *The Proceedings of the institution of Electrical Engineers*, 105 (24), 549-553.
- Alston, L.L. (1968). *High-Voltage Technology*. (Birinci Baskı). London: Oxford University Press, 22-36, 46-51.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) International, Designation D 149-97a (reapproved 2004).
- Anderson, W.S., Armitage, J.C., Dunn, E., Heinrich, J.G., Lu, C., McDonald, K.T., Weckel, J. ve Zhu, Y. (1992). Electron attachment, effective ionization coefficient, and electron drift velocity for CF₄ gas mixtures. *Nuclear Instruments and Methods in Physics*, A323, 73-279.
- Aschwanden, T.H. (1984). Swarm parameters in SF₆ and SF₆/N₂ mixtures determined from a time resolved discharge study. In L. G. Christophorou and M. O. Pace, (Ed.) *Gaseous Dielectrics IV*, New York: Pergamon, 24–32.
- Bankovic, A., Dujko, S., Marjanovic, S., White, R.D. ve Petrovic, Z.Lj. (2014). Positron transport in CF₄ and N₂/CF₄ mixtures. *The European Physical Journal D*, 68, 127.
- Beroual, A. ve Haddad, A. (2017). Recent advances in the quest for a new insulation gas with a low impact on the environment to replace sulfur hexafluoride (SF₆) gas in high-voltage power network applications. *Energies*, 10, 1216.
- Benhenni, M., Urquijo, J.de, Yousfi, M., Hernandez-Avila, J.L., Merbahi, N., Hinojosa, G. ve Eichwald, O. (2005). Measured and calculated SF₆⁻ collision and swarm ion transport data in SF₆-Ar and SF₆-Xe mixtures. *Physical Review E*, 71, 036405.
- Benhenni, M. Yousfi, M., de Urquijo, J. ve Hennad, A. (2009). Transport properties of SF₆ in SF₆-Ne, SF₆-N₂ and SF₆-O₂ mixtures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42, 125203.
- Boyers, D.G. ve Tiller, W.A. (1973). Corona discharge photography. *Journal of Applied Physics*, 44, 3102-3112.
- Bullister, J.L. (2015). *Atmospheric Histories (1765–2015) for CFC-11, CFC-12, CFC-113, CCl₄, SF₆ and N₂O*. Seattle, Washington, USA: National Oceanic and Atmospheric Administration, 7-13.

- Cekmen, Z.C. ve Dincer, M.S. (2009). Effective ionization coefficients and transport parameters in binary and ultradilute SF₆-Ar mixtures using Boltzmann equation analysis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 42, 145208.
- Chen, Y. (2016). *Electrical Breakdown of Gases in Subatmospheric Pressure*, Yüksek Lisans Tezi, Auburn University, Auburn, 9.
- Castonguay, J. (1987). Mixing rates and diffusion of various gases and moisture into SF₆. 5th Internat. Sympos. on Gaseous Dielectrics, Knoxville USA, Pergamon, 526-535.
- Christophorou, L.G., McCorkle, D.L. ve Carter, J.G. (1971). Cross sections for electron attachment resonances peaking at subthermal energies. *The Journal of Chemical Physics*, 54 (1), 253-260.
- Christophorou, L.G., Datskos, P.G. ve Carter, J.G. (1991). Gases of possible interest to SSC muon detectors. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 309 (1-2), 160-168.
- Christophorou, L.G., Olthoff, J.K. ve Rao, M.V.V.S. (1996). Electron interactions with CF₄. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 25, 1341-1388.
- Christophorou, L.G. (2006). Gaseous functional materials for advanced technologies based on knowledge on electron-atom/molecule interactions. *Reviews on Advanced Materials Science*, 12, 1-12.
- Christophorou, L.G. ve Olthoff, J.K. (2000). Electron interactions with SF₆. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 29, 267-330.
- Chutjian, A. (1981). Experimental SF₆⁻/SF₆ and Cl/CFC1₃ electron-attachment cross sections in the energy range 0-200 meV. *Physical Review Letters*, 46 (23), 1511-1514.
- Chutjian, A. ve Alajajian, S.H. (1985). s-wave threshold in electron attachment: Observations and cross sections in CCl₄ and SF₆ at ultralow electron energies. *Physical Review A*, 31 (5), 2885-2892.
- CIGRE. (2000). *Guide for SF₆ gas mixtures*. Paris, Fransa: CIGRE, 31-32.
- Cookson, A.H. (1981). Review of high-voltage gas breakdown and insulators in compressed gas. *IEE Proceedings A - Physical Science, Measurement and Instrumentation, Management and Education - Reviews*, 128 (4), 303-312.
- Çekmen, Z. (2010). *Elektronegatif Gaz Karışımlarında Elektriksel Yalıtkanlık Analizi*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara, 9-30.
- Dahl, D.A. ve Franck, C.M. (2013). Response analysis of electron attachment rates to C₃F₈ and SF₆ in buffer gases. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 46, 445202.

- Datskos, P.G., Christophorou, L.G. ve Carter, J.G. (1991). Effective ionization coefficients, electron drift velocities and limiting breakdown fields for gas mixtures of possible interest to particle detectors. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 474–481.
- Dincer, M.S. ve Hiziroglu, H.R. (1994). Limiting fields in SF₆+Ar predicted from basic data. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 816-821.
- Dincer, M.S. ve Hiziroglu, H.R. (2001). Effective ionization coefficients in binary gas mixtures of argon and SF₆. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 385-387.
- Dincer, M.S., Ozerdem, O.C. ve Bektas, S. (2007). Effective ionization coefficients and transport parameters in ultradilute SF₆+N₂ mixtures. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 35 (5), 1210-1214.
- Dincer, M.S., Ozerdem, O.C. ve Bektas, S. (2010). Back diffusion of electrons in Ar, SF₆, and Ar + SF₆ binary mixtures. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38 (3), 469-473.
- Duzkaya H ve Tezcan SS (2017). CF₄ Gaz Karışımlarında Delinme Geriliminin Ölçülmesi ve Hesaplanması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5 (3): 185-195.
- Ehhalt, F., Prather, M., Dentener, F., Derwent, R., Dlugokencky, E., Holland, E., Isaksen, I., Katima, J., Kirchhoff, V., Matson, P., Midgley, P. ve Wang, M. (2001). Atmospheric Chemistry and Greenhouse Gases. In J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell ve C.A.E. Johnson (Eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge: United Kingdom and New York: USA, 241–287.
- Frechette, M.F. ve Novak, J.P. (1987). Boltzmann-equation analysis of electron transport properties in CCl₂F₂/SF₆/N₂ gas mixtures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 20, 483-443.
- Forand, J.L., Becker, K. ve McConkey, J.W. (1986). Dissociative excitation of SF₆ by controlled electron impact. *Canadian Journal of Physics*, 64 (3), 269-276.
- Garamoon, A.A. ve Ismail, I.A. (1977). Numerical study of a neon discharge, *Journal of Physics D: Applied Physics*, 10 (7), 991-1002.
- Gerhard, F. (2009). *Low Pressure Plasmas and Microstructuring Technology*. (Birinci Baskı). Heidelberg: Springer-Verlag Berlin, 5-34.
- Haddad, A. ve Warne D. (2007). *Advances in high voltage engineering*. (İkinci Baskı). United Kingdom: IEC, 13-14.
- Haefliger, P. ve Franck, C.M. (2019). Comparison of swarm and breakdown data in mixtures of nitrogen, carbon dioxide, argon and oxygen. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 52, 025204.

- Heylen, A.E.D. ve Lewis, T.J. (1963). Electron energy distribution functions and transport coefficients for the rare gases. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 271 (1347), 531-550.
- Hibbeler, R.C. (2000). *Mechanics of materials*. (Dördüncü Baskı). New Jersey: Prentice Hall, 409-411.
- High-voltage test techniques - Part 1: General definitions and test requirements, IEC Standard 60060-1 ed3.0, 2010.
- Hiziroglu, H.R., Dincer, M.S. ve Nguyen, T.D. (1997). Breakdown voltages in SF₆+Argon mixtures under nonuniform electrostatic fields. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, USA, 579-582.
- Hiziroglu, H.R. ve Dincer, M.S. (2008). Non-uniform field breakdown of Ar + SF₆ under negative polarity impulse Voltages. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 548-551.
- Hiziroglu, H.R. ve Dincer, M.S. (2010). Breakdown of Ar+SF₆ under AC electric fields. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, USA, 11851456.
- Hunter, S.R., Carter, J.G. ve Christophorou, L.G. (1985). Electron transport studies of gas mixtures for use in e-beam controlled diffuse discharge switches. *Journal of Applied Physics*, 58, 3001-3015.
- Hunter, S.R., Carter, J.G. ve Christophorou, L.G. (1986). *Electron attachment and ionization processes in CF₄, C₂F₆, C₃F₈, and n-C₄F₁₀*. The Journal of Chemical Physics, 86, 693-703.
- Husain, E. ve Nema, R.S. (1982). Analysis of Paschen curves for air, N₂ and SF₆ using the Townsend breakdown equation. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-17 (4), 350-353.
- Ismail, I.A. ve Garamoon, A.A. (1979). Electron swarm characteristics in an argon discharge. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 12 (7), 1117-1123.
- Itoh, H., Miura, Y., Ikuta, N., Nakao, Y. ve Tagashira, H. (1988). Electron swarm development in SF₆: I. Boltzmann equation analysis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 21 (6), 922-930.
- Itoh, H., Matsumura, T., Satoh, K., Date, H., Nakao, Y. ve Tagashira, H. (1993). Electron transport coefficients in SF₆. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 26 (11), 1975-1979.
- Janda, M., Martisovits, V., Morrova, M., Machala, Z. ve Hensel, K. (2007). Monte Carlo simulations of electron dynamics in N₂/CO₂ mixtures. *The European Physical Journal D*, 45, 309-315.

- Jovanovic, J.V., Basurto, E., Sasic, O., Hernandez-Avila, J.L., Petrovic, Z.Lj ve Urquijo, J.de (2007). Electron impact ionization and transport in nitrogen–argon mixtures. *28th ICPIG International Conference Phenomena in Ionized Gases, Prague, Czech Republic*, 200-203.
- Khalaf, M.K., Agool, I.R. ve Muslim, S.H.A. (2014). Influence of inter-electrode distance, gas mixing, magnetic field and cathode material on breakdown voltage of lab-made DC magnetron sputtering device. *Iraqi Journal of Applied Physics*, 10 (4), 21-25.
- Khechen, W. ve Laghari, J.R. (1989). Breakdown studies of SF₆/argon gas mixtures. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, 24 (8), 1141-1146.
- Kline, L.E., Davies, D.K., Chen, C.L. ve Chantry, P.J. (1979). Dielectric properties for SF₆ and SF₆ mixtures predicted from basic data. *Journal of Applied Physics*, 50 (11), 6789-6796.
- Klüss, J.V. (2011). Measuring Picosecond Flashover in Pressurized Sulfur Hexafluoride (SF₆). Helsinki, Finland: Aalto University Publication Series, 12-14.
- Kucukarpaci, H.N. ve Lucas, J. (1981). Electron swarm parameters in argon and krypton. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 14, 2001-2014.
- Kuczek, T., Stosur, M., Szewczyk, M., Piasecki, W. ve Steiger, M. (2013). Investigation on new mitigation method for lightning overvoltages in high-voltage power substations. *IET Generation, Transmission Distribution*, 7 (10), 1055-1062.
- Kuffel, E., Zaengl, W.S. ve Kuffel, J. (2000). *High Voltage Engineering Fundamentals*. (İkinci Baskı). Oxford: Butterworth-Heinemann, 295-296, 326-335, 342-343.
- Kurihara, M., Petrovic, Z.Lj ve Makabe, T. (2000). Transport coefficients and scattering cross-sections for plasma modelling in CF₄-Ar mixtures: a swarm analysis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 33, 2146-2153.
- Lakshminarasimha, C.S., Lucas, J., Moruzzi, J.L. ve Spalding, I.J. (1976). Electron swarm parameters in CO₂ laser gas mixtures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 9, 1727-1734.
- Lakshminarasimha, C.S., Lucas, J. ve Snelson, R.A. (1975). Time-of-flight electronswarm studies of ionisation and attachment in gases. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 122, 1162-1165.
- Larin, V., Meurice, N., Trubnikov, D.N. ve Vercauteren, D.P. (2004). Theoretical analysis of the synergism in the dielectric strength for SF₆/CF₄ mixtures. *J. Appl. Phys.*, 96, 109-117.
- Lewis, T. J. (1958). Electron energy distributions in uniform electric fields and the Townsend ionization coefficient. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 244 (1237), 166-185.

- Li, W., Hou, M., Yuan, C., Cheng, Y. ve Tu, Y. (2018a). Breakdown mechanism of CF_4 and N_2 binary gas in refrigeration temperature range. *Journal of Central South University*, 25, 1701-1707.
- Li, X., Zhao, H. ve Murphy, A.B. (2018b). SF_6 -Alternative gases for application in gas-insulated switchgear. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 51, 153001.
- Lin, Q., Zhao, S. Xiao, D. ve Zhou, B. (2019). Breakdown characteristics of $\text{CF}_3\text{I}/\text{N}_2/\text{CO}_2$ mixture in power frequency and lightning impulse voltages. *Plasma Science and Technology*, 21, 015401.
- Liu, X. ve Xiao, D. (2007). Monte Carlo simulation of electron swarm parameters in the SF_6/CF_4 gas mixtures. *Japanese Journal of Applied Physics*, 46 (4A), 1663-1167.
- Malik, N.H. ve Qureshi, A.H. (1978) Breakdown mechanisms in sulphur-hexafluoride. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-13 (3), 135-145.
- Maric, D., Radmilovic-Radenovic, M. ve Petrovic, Z.Lj. (2005). On parametrization and mixture laws for electron ionization coefficients. *The European Physical Journal D*, 35, 313–321.
- Morgan, W.L. ve Penetrante, B.M. (1990). ELENDIF: A time-dependent Boltzmann solver for partially ionized plasmas. *Computer Physics Communications*, 58 (1-2), 127-152.
- Naidu, M.S. ve Kamaraj, V. (1995). High Voltage Engineering (İkinci Baskı). New York: McGraw-Hill, 26-30.
- Nakamura, Y. (1991). Gaseous electronics and their applications. R.W. Crompton, M. Hayashi ve M. Boyd (Eds.). Tokyo, KTK Scientific, 178–200.
- Nam, S.H., Rahaman, H., Heo, H., Park, S.S., Shin, J.W., So, J.H. ve Jang, W. (2009). Empirical analysis of high pressure SF_6 gas breakdown strength in a spark gap switch. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16 (4), 1106-1110.
- Nakanishi, K., Christophorou, L.G., Carter, J.G. ve Hunter, S.R. (1985). Penning ionization ternary gas mixtures for diffuse discharge switching applications. *Journal of Applied Physics*, 58, 633-641.
- Nema, R.S., Kulkarni, S.V. ve Husain, E. (1982). On calculation of breakdown voltages of mixtures of electron attaching gases. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-17 (5), 434-440.
- Nguyen, T.D., Hiziroglu, H.R. ve Dincer, M.S. (1996). Breakdown voltages in SF_6 +argon mixtures. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 598-601.
- Niemeyer, L. (2000) Cigre guide for SF_6 gas mixtures: application and handling in electric power equipment. *Proc. 1st Conf. on SF_6 and Environment: Emission and Reduction Strategies*, San Diego, CA, USA.

- Nikitovic, Z., Stojanovic, V. ve Petrovic, Z.Lj. (2009). On the role of radicals in kinetics of plasma etchers in Ar/CF₄ mixtures. *Acta Physica Polonica A*, 115 (4), 765-767.
- Nikitovic, Z., Stojanovic, V., Petrovic, Z.Lj., Cvelbar, U. ve Mozetic, M. (2010). Transport coefficients for electron scattering in CF₄/Ar/O₂ mixtures with a significant presence of F_x or CF_x radicals. *A Letter Journal Exploring the Frontiers of Physics*, 91, 55001.
- Novak, J.P. ve Frechette, M. (1982). Calculation of SF₆ transport coefficients from revised data. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 15 (9), L105-L110.
- Okabe, S., Yuasa, S., Kaneko, S. ve Ueta, G. (2009). Evaluation of breakdown characteristics of gas insulated switchgears for non-standard lightning impulse waveforms - method for converting non-standard lightning impulse waveforms into standard lightning impulse waveforms-. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 16 (1), 42-51.
- Omori, T., Shimizu, D., Matsumoto, T., Izawa, Y. ve Nishijima, K. (2014). Electron swarm parameters in gas mixtures of CF₃I, SF₆, CO₂ with N₂ at atmospheric pressure. *IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 130-133.
- Özkaya, M. (2008). *Yüksek Gerilim Tekniği: Statik Elektrik Alanı ve Boşalma Olayları*. (İkinci Baskı). İstanbul: Birsen Yayınları, 234-248, 206-207.
- Pedersen, A. (1967). Calculation of spark breakdown or corona starting voltages in nonuniform fields. *IEEE Transactions on Power Systems*, PAS-86 (2), 200-206.
- Phelps, A.V. ve Petrovic, Z.Lj (1999). Cold-cathode discharges and breakdown in argon: surface and gas phase production of secondary electrons. *Plasma Sources Science and Technology*, 8 (3), R21–R44.
- Phelps, A.V. (1991). Cross sections and swarm coefficients for nitrogen ions and neutrals in N₂ and argon ions and neutrals in Ar for energies from 0.1 eV to 10 keV. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 20 (3), 557-573.
- Pinheiro, M.J. ve Loureiro, J. (2002). Effective ionization coefficients and electron drift velocities in gas mixtures of SF₆ with He, Xe, CO₂ and N₂ from Boltzmann analysis. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35, 3077–3084.
- Puech, V. ve Torchin, L. (1986). Collision cross sections and electron swarm parameters in argon. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 19, 2309–2323.
- Raju, G.R.G. ve Dincer, M.S. (1990). Monte Carlo Simulation of electron swarms in nitrogen in uniform E x B fields. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 18 (5), 819-825.
- Raju, G.G. (2006a). *Gaseous Electronics: Theory and practice*. (Birinci Baskı). New York: Taylor & Francis Group CRC Press, 12-24, 348.
- Raju, G.G. (2006b). Collision cross sections in gaseous electronics Part I: What do they mean? *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 22 (4), 5-23.

- Raju, G.G. (2007). Collision cross sections in gaseous electronics Part II: Inelastic collisions. *IEEE Electrical Insulation Magazine*, 23 (2), 17-30.
- Rapp, D. ve Englander-Golden, P. (1965). Total Cross Sections for ionization and attachment in gases by electron impact. I. positive ionization. *The Journal of Chemical Physics*, 43 (5), 1464-1479.
- Reinking, G.F., Christophorou, L.G. ve Hunter, S.R. (1986). Studies of total ionization in gases/mixtures of interest to pulsed power applications. *Journal of Applied Physics*, 60, 499-506.
- Resmi Gazete. (2009). *Birleşmiş Milletler iklim değişikliği çerçeve sözleşmesine yönelik Kyoto protokolü*. Ankara: Resmi Gazete, 27227.
- Rohr, K. (1979) Absolute differential cross sections for e-SF₆ scattering in the a_{1g} and t_{1u} resonance region. *Journal of Physics B: Atomic and Molecular Physics*, 12 (5), L185-L188.
- Shimozuma, M. Tagashira, H. ve Hasegawa, H. (1983). The ionisation and attachment coefficients in carbon tetrafluoride. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 16, 971-976.
- Skoro, N., Malovic, G., Maric, D. ve Petrovic, Z.Lj (2007). Low-pressure breakdown and voltage-current characteristics of dc discharge in CF₄. *28th ICPIG International Conference Phenomena in Ionized Gases, Prague, Czech Republic, 1997-2000*.
- Smulders, E.H.W.M., Heesch, B.R.J.M.van ve Paasen, S.S.V.B.van (1998). Pulsed power corona discharges for air pollution control. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 26 (5), 1476-1484.
- Stephan, K., Deutsch, H. ve Maerk, T. (1985). Absolute partial and total electron impact ionization cross sections for CF₄ from threshold up to 180 eV. *The Journal of Chemical Physics*, 83 (11), 5712-5720.
- Su, A., Lin, X., Li, X. ve Chen, H. (2016). Experiment on breakdown characteristics of SF₆/CF₄ gas mixtures in short gap. *China International Conference on Electricity Distribution*. Xi'an, China, CP1217.
- Suzuki, T. (1982). The determination of the diffusion rate on SF₆ into nitrogen. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, EI-17 (1), 34-38.
- Tezcan, S.S., Akcayol, M.A., Ozerdem, O.C. ve Dincer, M.S. (2010). Calculation of electron energy distribution functions from electron swarm parameters using artificial neural network in SF₆ and argon. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 38 (9), 2332-2339.
- Tezcan, S.S. (2011). *Argon-SF₆ Gaz Karışımlarının Elektriksel Boşalmalarında Yapay Sinir Ağı Uygulamaları*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ankara, 19, 23-50.

- Tezcan, S.S., Dincer, M.S., Bektas, S. ve Hiziroglu, H.R. (2013). Boltzmann analysis of electron swarm parameters in binary CF_4+Ar mixtures. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 20 (1), 98-103.
- Tezcan, S.S., Dincer, M.S. ve Bektas, S. (2016a). Effective ionization coefficients, limiting electric fields, and electron energy distributions in $\text{CF}_3\text{I}+\text{CF}_4+\text{Ar}$ ternary gas mixtures. *Physics of Plasmas*, 23, 073507.
- Tezcan, S.S., Duzkaya, H., Dincer, M.S. ve Hiziroglu, H.R (2016b). Assessment of electron swarm parameters and limiting electric fields in $\text{SF}_6+\text{CF}_4+\text{Ar}$ gas mixtures. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23, 1996-2005.
- Torres, I., Martinez, R. ve Castano, F. (2002). Electron-impact dissociative ionization of fluoromethanes CHF_3 and CF_4 . *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 35, s. 2423–2436.
- Torres, C., Reyes, P.G., Castillo, F. ve Martinez, H. (2012). Paschen law for argon glow discharge. *Journal of Physics: Conference Series*, 370, 012067.
- Türkiye Cumhuriyeti Çevre ve Orman Bakanlığı (2012). *İklim Değişikliği Stratejisi (2010-2020)*. Ankara: T.C. Çevre ve Orman Bakanlığı, 16-21.
- Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi. (2017). *GİS Güç Transformatorü (154 kV / OG) Teknik Şartnamesi*. Ankara: TEİAŞ.
- United Nations. (1992). *United Nations framework convention on climate change*. New York, USA: United Nations, 4-5.
- United Nations. (1997). *Kyoto protocol to the United Nations framework convention on climate change*. Kyoto, Japon: United Nations, 1-3, 19-20.
- United Nations. (2012). *Doha amendment to the Kyoto Protocol*. Doha, Qatar: United Nations, 1-6.
- Urquijo, J.de, Basurto, E. ve Hernandez- Avila, J.L. (2001). Effective ionization, electron and ion transport in $\text{SF}_6\text{-He}$ mixtures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 34, 2151–2159.
- Urquijo, J.de, Hernandez-Avila, J.L., Basurto, E. ve Ramirez, F. (2003). Electron swarm and transport coefficients for the binary mixtures of SF_6 with Ar and Xe. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36, 1489–1494.
- Urquijo, J.de, Castrejon-Pita, A.A., Hernandez-Avila, J.L. ve Basurto, E. (2004). Electron transport and effective ionization coefficients in C_2F_6 , $\text{C}_2\text{F}_6\text{-Ar}$ and $\text{C}_2\text{F}_6\text{-N}_2$ mixtures. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 37, 1774-1779.
- Urquijo, J.de, Mitrani, A., Ruiz-Vargas, G. ve Basurto, E. (2011). Limiting field strength and electron swarm coefficients of the $\text{CF}_3\text{I-SF}_6$ gas mixture. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44, 342001.

- Verboncoeur, J.P., Parker, G.J., Penetrante, B.M. ve Morgan, W.L. (1996). Comparison of collision rates in particle-in-cell, Monte Carlo, and Boltzmann codes. *Journal of Applied Physics*, 80, 1299-1303.
- Xiao, D. ve Yunkun, D. (2013). Determination of electron swarm parameters in pure CHF_3 and CF_4 by a time-resolved method. *Plasma Science and Technology*, 15 (1), 25-29.
- Wang, W., Murphy, A.B., Rong, M., Looe, H.M. ve Spencer, J.W. (2013). Investigation on critical breakdown electric field of hot sulfur hexafluoride/carbon tetrafluoride mixtures for high voltage circuit breaker applications. *Journal of Applied Physics*, 114, 103301.
- Yamabe, C., Buckman, S.J. ve Phelps, A.V. (1983). Measurement of free-free emission from low-energy-electron collisions with Ar. *Physical Review A*, 27 (3), 1345-1352.
- Yanguas-Gil, A., Cotrino, J. ve Alves, L.L. (2005). An update of argon inelastic cross sections for plasma discharges. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38, 1588–1598.
- Yoshizawa, T., Sakai, Y., Tagashira, H. ve Sakamoto, S. (1979). Boltzmann equation analysis of the electron swarm development in SF_6 . *Journal of Physics D: Applied Physics*, 12 (11), 1839–1852.
- Yu, X., Hou, H. ve Wang, B. (2017). Prediction on dielectric strength and boiling point of gaseous molecules for replacement of SF_6 . *Journal of Computational Chemistry*, 38, 721–729.
- Zhang, X., Tian, S., Xiao, S., Deng, Z., Li, Y. ve Tang, J. (2017). Insulation strength and decomposition characteristics of a $\text{C}_6\text{F}_{12}\text{O}$ and N_2 gas mixture. *Energies*, 10, 1170.
- Zhao, H., Li, X., Jia, S. ve Murphy, A.B. (2013). Dielectric breakdown properties of SF_6 – N_2 mixtures at 0.01–1.6 MPa and 300–3000 K. *Journal of Applied Physics*, 113, 143301.
- Zhong, L., Yang, A., Liu, D., Wu, Y. ve Rong, M. (2014). Dielectric breakdown properties of hot SF_6 – CO_2 mixtures at temperatures of 300–3500 K and pressures of 0.01–1.0 MPa. *Physics of Plasmas*, 21, 053506.



EK-1. Avagadro prensibi

Aynı koşullarda bulunan farklı gazların eşit hacimlerinde eşit sayıda molekül bulunmaktadır.

$$N_A = 6,023 \cdot 10^{23} \text{ (Molekül/Mol – Hacim)}$$

N_A , Avagadro sayısı veya Loschmid sayısı olarak tanımlanmaktadır. Burada bir mol-hacim, $T_0 = 273 \text{ } ^\circ\text{K}$ ve $p_0 = 760 \text{ mmHg}$ koşulları altında $22,414 \cdot 10^3 \text{ cm}^3$ değerindedir. Bu parametrelere bağlı olarak birim hacimdeki toplam molekül sayısı,

$$N_0 = \frac{6,023 \cdot 10^{23}}{22,414 \cdot 10^3} = 2,17 \cdot 10^{19} \text{ (Molekül/cm}^3\text{)}$$

Belirli bir sıcaklık ve basınçta birim hacimdeki molekül sayısı,

$$N = \frac{N_A}{V}$$

Boyle yasası eşitliğinde birim hacim yerine aşağıdaki eşitlik kullanılırsa,

$$p = \frac{R}{V} T = N \left(\frac{R}{N_A} \right) T$$

formunu alır. Burada,

$$k = \frac{R}{N_A} T$$

Boltzmann sabitidir. Bu sabit, $1,3804 \cdot 10^{-23} \text{ (J/}^\circ\text{K)}$ değerindedir. Bu sabit kullanılarak birim basınçta genelleştirilmiş gaz eşitliği tanımlanabilir,

$$p = k \cdot N \cdot T$$

EK-1. (devam) Avagadro prensibi

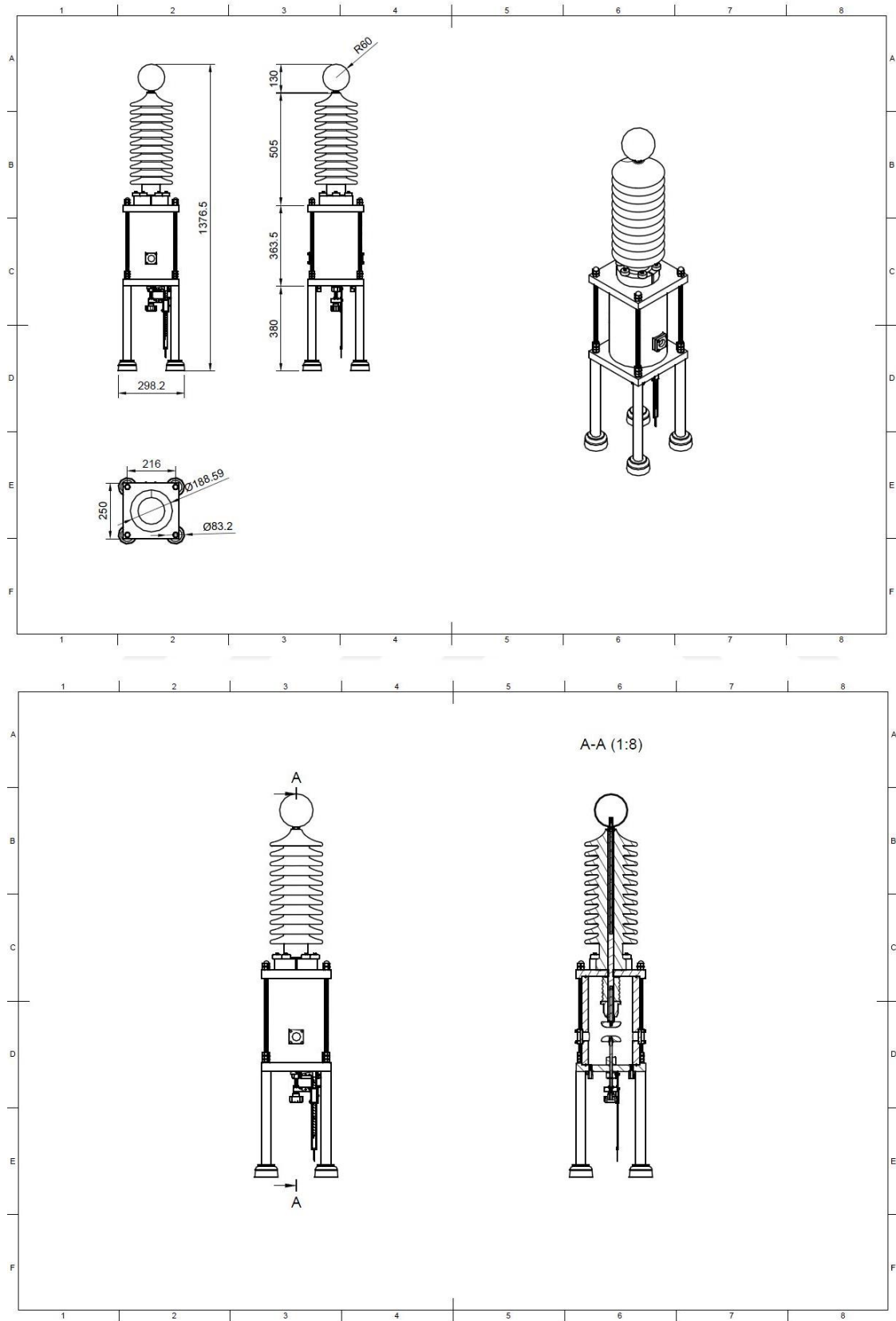
$p = p_0 = 760$ mmHg basınçta ve $T = T_0 = 273$ °K sıcaklıkta $N_0 = 2,17 \cdot 10^{19}$ Mol/cm³ molekül sayısı ile birim hacimdeki gazda toplam molekül sayısı,

$$N = \frac{p}{760} \cdot \frac{273}{T} \cdot N_0$$

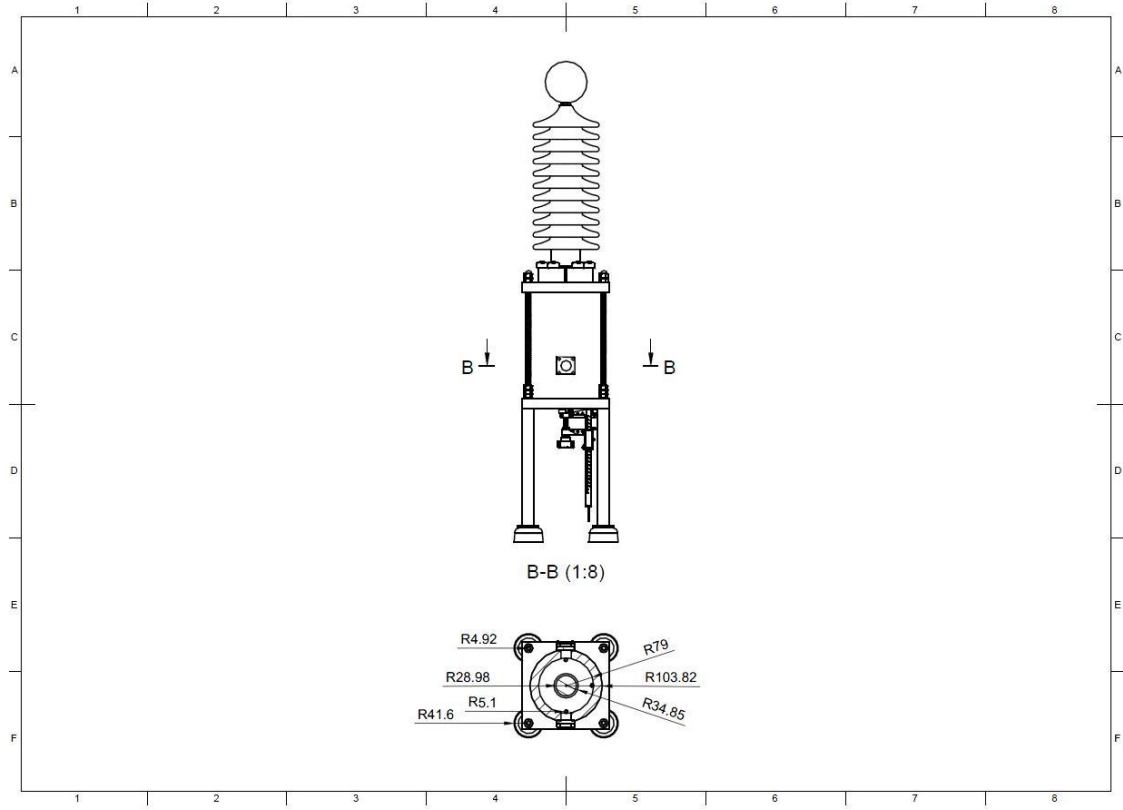
olmaktadır (Özkaya, 2008: 206-207).



EK-2. Gaz karışımı deşarj karakteristiği ölçümünde kullanılan test hücresi teknik çizimi



EK-2. (devam) Gaz karışımı deşarj karakteristiği ölçümünde kullanılan test hücresi teknik çizimi



EK-3. SF₆, CF₄ ve argon için piyasa araştırması ve maliyet hesabı

Bu gazlar için fiyat teklifi küresel ölçekte önemli bir tedarikçi olan Linde gruptan alınmıştır.



Ref.No: 2139

Sn. Süleyman Sungur Tezcan

Gazi Üniversitesi

Ankara

KONU : Özel Gaz Teklifi

Öncelikle, Linde Gaz A.Ş. olarak firmamıza göstermiş olduğunuz ilgi için teşekkür ederiz.

Firmamızdan istemiş olduğunuz özel gaz tedariği ile ilgili teklifimizi bilgilerinize sunar çalışmalarınızda başarılar dileriz.

Saygılarımızla,

Murat Demir
Özel Gazlar ve Kimyasallar
Satış Uzmanı

İsmail Erilhan
Özel Gazlar ve Kimyasallar
Satış Yöneticisi

Linde Gaz A.Ş.

Gebze Organize Sanayi Bölgesi 300. Sokak Gebze / Kocaeli

Tel: + 90 262 678 74 00 Faks: +90 262 678 75 00 pazarlama@lindegaz.com www.lindegaz.com.tr

EK-3. (devam) SF₆, CF₄ ve argon için piyasa araştırması ve maliyet hesabı



1. TEKNİK VE TİCARİ ŞARTLAR :

1.1.- Tüp Bedeli:

Ar (6.0) 50 lt satılık çelik tüpte, 200 bar, 10,7 m ³ içerik Valf DIN 477 No. 6	: 900 €/tüp + KDV
SF₆ (3.0) 10 lt satılık çelik tüpte, 21 bar, 10,4 kg içerik Valf DIN 477 No. 6	: 350 €/tüp + KDV
CF₄ (5.0) 50 lt satılık çelik tüpte, 110 bar, 36 kg içerik Valf DIN 477 No. 6	: 2500 €/tüp + KDV
B5661 HiQ Baseline C106X/2 Pirinç krom kaplı gövde, 0 – 10,5 bar kullanım basıncı	: 365 €/adet + KDV

Tüm fiyatlar KDV hariçtir.

2. TESLİMAT:

İthal gazların sevkiyatı yazılı siparişi müteakip 14 – 16 hafta içerisinde sevkiyat yapılır.

3. ÖDEME:

İrsaliye tarihinden itibaren 30 gün içerisinde banka havalesi veya nakden ödeme alınır.

4. GEÇERLİLİK:

Teklifimiz 16.09.2013 tarihine kadar geçerlidir.

Linde Gaz A.Ş.

Gebze Organize Sanayi Bölgesi 300. Sokak Gebze / Kocaeli

Tel: +90 262 678 74 00 Faks: +90 262 678 75 00 pazarlama@lindegaz.com www.lindegaz.com.tr

EK-3. (devam) SF₆, CF₄ ve argon için piyasa araştırması ve maliyet hesabı

Yüksek gerilim teçhizatlarında gaz yalıtkan olarak kullanılan bu gazlara ait maliyet hesabı yapılırken, öncelikle gazların birim maliyeti belirlenmiştir, bkz. Çizelge EK-3.1.

Çizelge EK-3.1. SF₆, CF₄ ve Argon için birim maliyet

Gaz	Tüp Bedeli (€)	Tüp Hacmi (lt)	Birim Maliyet (€/lt)
SF ₆	413	10	41,3
CF ₄	2 950	50	59,0
Argon	1 062	50	21,2

Birim maliyet belirlendikten sonra, çalışma kapsamında incelenen saf, ikili ve üçlü gaz karışımlarının yalıtkanlık seviyesine bağlı olarak birim maliyetleri çıkarılmıştır, bkz. Çizelge EK-3.2. Bu yalıtkanlık seviyesinin tespitinde deneysel ölçüm ve Boltzmann eşlikleri kullanılarak elde edilen kritik elektrik alan değerleri ve bu değerlerle ilişkili delinme gerilimlerinin ortalaması alınmıştır. Saf argon gazında yapışma çarpışma kesiti olmadığından, kritik elektrik alan değeri tanımlanamamaktadır. Bu nedenle saf argon gazı için yalıtkanlık seviyesi sadece deneysel ölçümlerle elde edilen delinme geriliminin ortalaması alınarak belirlenmiştir.

Çizelge EK-3.2’de yalıtkanlık maliyeti olarak tanımlanan özellik, her bir gaz ve gaz karışımı için birim yalıtkanlık başına birim hacimde ihtiyaç duyulan maliyeti sayısal bir birime dönüştürerek tanımlamaktadır.

Gazların saf halleri birbiri ile karşılaştırıldığında, SF₆ gazı ön plana çıkmaktadır. Delinme gerilim değerinin yüksek olması ve maliyetinin kısmen düşüklüğü nedeniyle yatırım maliyeti açısından en etkin gaz SF₆’dır. Bu gazı, argon ve CF₄ izlemektedir.

SF₆+Ar ve CF₄+Ar ikili gaz karışımları açısından yalıtkanlık maliyeti incelendiğinde, SF₆+Ar gaz karışımı CF₄+Ar gaz karışımına göre neredeyse üç kattan daha fazladır. Her iki gaz karışımında da argon oranı arttıkça, yalıtkanlık maliyeti azalmaktadır.

EK-3. (devam) SF₆, CF₄ ve argon için piyasa araştırması ve maliyet hesabı

SF₆+CF₄+Ar üçlü gaz karışımı kendi içinde incelendiğinde, argon oranının artmasıyla yalıtkanlık maliyetinin azaldığı ve daha iyi bir yalıtkan gaz karışımı elde edildiği görülmektedir. Bu durum, CF₄ gazının diğer iki gaza nazaran birim maliyetinin yüksek olmasının sonucudur. SF₆+Ar gaz karışımının yalıtkanlık maliyeti üçlü gaz karışımının yalıtkanlık maliyetinden düşük olsa da, SF₆ gazının CF₄'e göre çok daha etkili bir sera gazı olması ve Kyoto Protokol'ü ile kullanımının sınırlandırılmış olması gibi nedenlerle üçlü gaz karışımı önemli bir alternatif olarak ön plana çıkmaktadır.

Çizelge EK-3.2. SF₆, CF₄ ve Argon için saf, ikili ve üçlü gaz karışımlarının yalıtkanlık maliyeti

	SF ₆	CF ₄	Ar	Delinme Gerilimi (kV)	Birim Maliyet (€/lt)	Yalıtkanlık Maliyeti (€/kV.lt)
Saf SF ₆	100	0	0	89,01	41,3	0,39
Saf CF ₄	0	100	0	37,84	59,0	2,26
Saf Ar	0	0	100	7,93	21,2	0,74
SF ₆ +Ar Gaz Karışımı	80	0	20	78,80	37,3	0,37
	60	0	40	66,24	33,3	0,35
	40	0	60	53,44	29,3	0,33
	20	0	80	38,39	25,3	0,30
CF ₄ +Ar Gaz Karışımı	0	80	20	33,64	51,4	2,07
	0	60	40	28,95	43,9	1,85
	0	40	60	25,57	36,3	1,47
	0	20	80	18,81	28,8	1,16
SF ₆ +CF ₄ +Ar Gaz Karışımı	5	55	40	33,63	43,0	1,52
	10	50	40	37,41	42,1	1,30
	15	45	40	40,58	41,2	1,13
	20	40	40	43,82	40,4	0,99
	5	45	50	31,33	39,2	1,38
	10	40	50	35,42	38,4	1,15
	15	35	50	38,86	37,5	0,98
	20	30	50	41,85	36,6	0,85
	5	35	60	29,23	35,5	1,20
	10	30	60	33,44	34,6	0,98
	15	25	60	36,88	33,7	0,82
	20	20	60	39,82	32,8	0,69

ÖZGEÇMİŞ**Kişisel Bilgiler**

Soyadı, adı : Düzkaya, Hıdır
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 29/10/1983, Elazığ
Medeni hali : Bekâr
Telefon (iş) : 0(312) 582 33 13
e-posta : hduzkaya@gmail.com

**Eğitim**

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği	Devam ediyor
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Çalışma Ekonomisi ve Endüstri İlişkileri	2016
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği	2008
Lisans	Gazi Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği	2005
Lise	Elazığ Balakgazi Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006-Halen	Gazi Üniversitesi	Araştırma Görevlisi
2005-2006	Özansan A.Ş.	Kalite Kontrol Mühendisi

Yabancı Dili

İngilizce

Projeler

1. “SF₆+CF₄ ve SF₆+CF₄+Ar Gaz Karışımında Kritik Elektrik Alan Değerlerinin Ölçülmesi ve Boltzmann Denklemlerinin Çözülmesi ile Elektron Çıg Parametrelerinin Hesaplanması” TÜBİTAK 3001. Code: TÜBİTAK-EEEAG-#113E493, 01/2014-01/2015.
2. “Erzincan Kenti Ulaşım Ana Planı Ortak Hizmet Projesi”. Erzincan Belediyesi ve Gazi Üniversitesi. Danışman, 13/05/2016 – 03/11/2016.
3. “Raylı Sistem Fizibilite Etüdü ve Avan Projelerinin Hazırlanması İşi Projesi”. Erzincan Belediyesi ve Gazi Üniversitesi. Danışman, 17/05/2016 – 03/11/2016.
4. “Ankara Metropoliten Alanı ve Yakın Çevresi Ulaşım Ana Planı Ortak Hizmet Projesi”. Ankara Büyükşehir Belediyesi ve Gazi Üniversitesi. Araştırmacı, 31/01/2013 – 28/07/2017.
5. “Rize Kenti Ulaşım Ana Planı Ortak Hizmet Projesi”. Rize Belediyesi ve Gazi Üniversitesi. Araştırmacı, 31/03/2016 – 07/09/2018.
6. “Kayseri İli Kocasinan Belediyesi Erkilet Mevkiinde, Şehircilik Hizmetleri – Bizim Şehir Projesi”. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı ve Gazi Üniversitesi. Araştırmacı, 31/01/2018 – 31/12/2018.

Uluslararası Hakemli Dergilerde Yayımlanan Makaleler

1. Tezcan, S.S., Duzkaya, H., Dincer, M.S. ve Hiziroglu, H.R. (2016). Assessment of electron swarm parameters and limiting electric fields in SF₆+CF₄+Ar gas mixtures. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 23 (4), 1996-2005.
2. Duzkaya, H. ve Tezcan, S.S. (2017). CF₄ gaz karışımlarında delinme geriliminin ölçülmesi ve hesaplanması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 5(3), 185-195.
3. Orman, A., Düzakaya, H. Ulvi, H. ve Akdemir, F. (2018). Multi-Criteria Evaluation by Means of Using the Analytic Hierarchy Process in Transportation Master Plans: Scenario Selection in the Transportation Master Plan of Ankara. *GU J Sci*, 31(2), 381-397.
4. Düzakaya, H., Akdemir, F., Ulvi, H., Orman, A. ve Sivat, S. (2018). Orta Büyüklükteki Kentler için Raylı Sistem Alternatifi: Erzincan Cadde Tramvayı Örneği. *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 5(2), 403-415.

5. Dincer, M.S., Tezcan, S.S. ve Duzkaya, H. (2018). Magnetic insulation in nitrogen subjected to crossed fields. *AIP Advances*, 8, 095026.
6. Dincer, M.S., Tezcan, S.S. ve Duzkaya, H. (2018). Suppression of Electron Avalanches in Ultra-Dilute SF₆-N₂ Mixtures Subjected to Time-Invariant Crossed Fields. *Energies*, 11, 3247.
7. Duzkaya, H. ve Tezcan, S.S. (2018). Boltzmann analysis of electron swarm parameters in CHF₃+CF₄ mixtures. *Turk. J. Elec. Eng. & Comp. Sci.*, 27, 615-622.

Uluslararası Bilimsel Toplantılarda Sunulan ve Bildiri Kitabında Basılan Bildiriler

1. Duzkaya, H., Dincer, M.S. ve Hiziroglu, H.R. (2009). Calculation of Partial Discharge Inception Voltages in Ultradilute SF₆+N₂ Gas Mixtures. *IEEE 2009 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 531-534.
2. Duzkaya H., Tezcan S. S., Cekmen, Z. ve Dincer M. S. (2009). Prediction of Positive Corona Onset Voltages Using Finite Element Method and Artificial Neural Networks. *TPE-09 5rd International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering*.
3. Tezcan, S.S., Duzkaya H., Cekmen, Z. ve Dincer, M.S. (2008). Electron Swarm Parameters Prediction Using Artificial Neural Network. *TPE-08 4th International Conference on Technical and Physical Problems in Power Engineering*, III-82-84.
4. Düz kaya, H., Ulvi, H., Orman, A. ve Sıvat, S. (2017). New Pursuits on Public Transport Policies for Middle-sized Cities in Turkey: Erzincan as an Example Specific to Rail Systems. *ERUSIS 4th Symposium on Electrical Railway Transportation Systems*, 7-12.
5. Dincer, M.S., Tezcan, S.S. ve Duzkaya, H. (2018). Avalanche Inhibition in Ultradilute SF₆-N₂ Mixtures Subjected to Crossed Fields. *2018 IEEE 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering*, Palermo, Italy.
6. Dincer, S.E., Akdemir, F. Ulvi, H. ve Duzkaya, H. (2018). Assessing Urban Sprawl Effect of Transportation Investments using Remote Sensing Data and GIS Methods: The case of Ankara Protocol Road. *World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium WMCAUS 2018*, Prague, Czech Republic.
7. Dincer, S., Tezcan, S.S., Duzkaya, H. ve Dincer, M.S. (2018). Insulation and molecular properties of alternative gases to SF₆. *2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, ISMSIT 2018*, Ankara, Turkey.

Ödüller

1. Gazi Üniversite Rektörlüğü Science Critation Index, Social Science Critation Index ve Arts and Humanities Critation Index Makale Ödülü, 12 Haziran 2017.
2. Selected Papers from EEEIC 2018—18th International Conference on Environment and Electrical Engineering, 12-15 June, 2018, Palermo, Italy.

Sertifikalar

1. TS EN ISO 9001:2000 Temel Eğitimi. ICS Sert Danışmanlık Eğitim Limited Şirketi. 24-25 Mart 2007, 2 gün.
2. Ansys Maxwell Introduction. Anova. 19 December 2014, Ankara, 3 days.
3. Introduction to Microscopic Network Modelling with PTV Vissim. ISSD (Integrated Systems & Systems Design) & PTV Group. 27 September 2017, Ankara, 3 days.
4. Academic Writing Course. Gazi University Academic Writing Center, February 23 to April 13, 2018, 9 weeks.

Hobiler

Fotoğrafçılık, Sinema, Tiyatro.



GAZİ GELECEKTİR..