

14416

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

REFERANS KISMİ BOŞALMA KAYNAĞININ
YÜKSEK DOĞRU GERİLİM KOŞULLARINDA İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Özcan KALENDERLİ

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 2 Ekim 1990

Tezin Savunulduğu Tarih : 7 Ocak 1991

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Muzaffer ÖZKAYA

Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. İnci AKKAYA

Prof. Dr. Ahmet RUMELİ

OCAK 1991

Y. C.

Yükseköğretim Kurulu
Doküman Yayıncılık Merkezi

ÖNSÖZ

Yüksek doğru gerilimin uygulama alanının giderek genişlemesi ve güncellik kazanması, bu gerilimin uygulandığı yalıtım sistemlerinde kısmi boşalma olaylarını incelemeyi de beraberinde getirmektedir. Bu çalışma ile, bu gelişmelere katkıda bulunulması amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasını yapmama ve yüksek gerilim tekniği konusunu sevdirep yetişmeme olanak sağlayan, ilgi ve desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen değerli hocalarım Prof.Dr. Muzaffer ÖZKAYA'ya ve Prof. İzzet GÖNENÇ'e çok teşekkür ederim.

Çalışmalarım sırasında destek ve yardımlarını gördüğüm tüm İ.T.Ü. Yüksek Gerilim Laboratuvarı elemanlarına ayrı ayrı teşekkürü bir borç bilirim.

Sürekli ilgi, destek ve anlayışı, çalışmalarım sırasında da gösteren ve ayrıca tezimi özenle daktilo eden değerli eşim Aknur KALENDERLİ'ye ve tüm yakınlarıma çok teşekkür ediyorum.

Ekim, 1990

Y.Müh. Özcan KALENDERLİ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
SEMBOLLER	xii
KISALTMALAR	xiv
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. BOŞALMA OLAYLARININ İNCELENMESİ	8
2.1. Boşalma Olayları	8
2.1.1. Negatif Sivri Uçta Boşalma Olayı	9
2.1.2. Pozitif Sivri Uçta Boşalma Olayı	12
2.1.3. Alternatif Gerilimde Sivri Uçta Boşalma Olayı ...	14
2.2. Boşalma (Korona) Başlangıç Geriliminin Hesabı	15
2.3. Kısmi Boşalma Genliği	18
2.4. Boşalma Başlangıç Gerilimine ve Boşalma Yüküne Etkiyen Etkenler	20
2.4.1. Sivri Uç Eğrilik Yarıçapı	20
2.4.2. Yarıküre Yarıçapı	21
2.4.3. Elektrot Açıklığı	21
2.4.4. Gerilim	22
2.4.5. Frekans	22
2.4.6. Nem	22
2.4.7. Kirlenme	23
2.4.8. Koşullandırma	23
2.4.9. Uzun Süreli Kullanım (Eskime)	23
BÖLÜM 3. ELEKTROSTATİK ALAN DAĞILIMININ ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ	25
3.1. Eşmerkezli Yarıküresel Elektrot Düzeni Varsayımı ..	27
3.2. Küre-Düzlem Elektrot Düzeni Varsayımı	30
3.3. Koordinat Sistemlerinde İncelemeler	38
3.3.1. Sferoidal Koordinatlarda Hesap	40
3.3.2. Paraboloidal Koordinatlarda Hesap	49
BÖLÜM 4. ELEKTROSTATİK ALAN DAĞILIMININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE BULUNMASI	58
4.1. Probleme İlişkin Bağantıların Yazılması	60
4.2. İteratif Çözüm	66
4.3. Elektrik Alan Şiddetinin Hesabı	66
4.4. Kapasite Hesabı	67
4.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Bulunan Sonuçlar	67

BÖLÜM 5. ELEKTROSTATİK ALAN DAĞILIMININ

DENEYSEL OLARAK BULUNMASI	70
---------------------------------	----

5.1. Modeller ve Deneylerin Yapılışı	71
--	----

5.2. Deneysel Elektrostatik Alan Dağılımı İncelemelerinin Sonuçları	75
--	----

5.2.1. Eşmerkezli Küresel Elektrot Düzeni	75
---	----

5.2.2. Sivri Uç-Yarıküre Elektrot Düzeni	76
--	----

BÖLÜM 6. BOŞALMA DENEYLERİ: KULLANILAN DÜZENLER,

YÜKSEK GERİLİMLERİN ELDE EDİLMESİ VE ÖLÇÜLMESİ

DENEYLERİN YAPILIŞI	79
---------------------------	----

6.1. Deneylerde Kullanılan Düzenler	79
---	----

6.1.1. Sivri Uç-Yarıküre Elektrot Düzeni	79
--	----

6.1.2. Isıtıcı Düzen	82
----------------------------	----

6.1.3. Basınç Düzenleri	83
-------------------------------	----

6.1.3.1. Deney Kabı	83
---------------------------	----

6.1.3.2. Kompresör	84
--------------------------	----

6.1.3.3. Vakum Pompası	84
------------------------------	----

6.1.4. Kısmi Boşalma Ölçme Devresi ve Elemanları	84
--	----

6.1.4.1. Bağlama Kondansatörü	85
-------------------------------------	----

6.1.4.2. Ölçü Empedansı	85
-------------------------------	----

6.1.4.3. Kısmi Boşalma Ölçü Aleti	85
---	----

6.1.4.4. Osiloskop	86
--------------------------	----

6.2. Yüksek Gerilimlerin Elde Edilmesi ve Ölçülmesi	87
--	----

6.2.1. Yüksek Alternatif Gerilimin Elde Edilmesi ve Ölçülmesi	87
--	----

6.2.2. Yüksek Doğru Gerilimin Elde Edilmesi ve Ölçülmesi	89
---	----

6.3. Deneylerin Yapılışı	90
--------------------------------	----

6.3.1. Kısmi Boşalma Büyüklüklerinin Ölçülmesi	90
--	----

6.3.2. Sıcaklıkla Değişim Deneyleri	93
---	----

6.3.3. Basınç Deneyleri	93
-------------------------------	----

6.3.3.1. Alçak Basıncıta Yapılan Deneyler	94
---	----

6.3.3.2. Yüksek Basıncıta Yapılan Deneyler	94
--	----

6.3.4. Delinme Gerilimlerinin Belirlenmesi	94
--	----

BÖLÜM 7. BOŞALMA DENEYLERİNİN SONUÇLARI VE

DEĞERLENDİRİLMESİ	95
-------------------------	----

7.1. Kısmi Boşalma Ölçme Frekansının Önemi	95
--	----

7.2. Boşalma Başlangıç Geriliminin ve Genliğinin Sivri Uç Eğrilik Yarıçapı İle Değişimi	96
--	----

7.3. Boşalma Başlangıç Geriliminin ve Genliğinin Elektrot Açıklığı İle Değişimi	101
--	-----

7.4. Boşalma Başlangıç Geriliminin Sıcaklıkla Değişimi ..	103
---	-----

7.5. Boşalma Başlangıç Geriliminin Basıncıla Değişimi ...	105
---	-----

7.5.1. Alçak Basıncıta Yapılan Deneylerin Sonuçları	105
---	-----

7.5.2. Yüksek Basıncıta Yapılan Deneylerin Sonuçları	107
---	-----

7.6. Referans Korona Kaynağının RIV Düzeyi	108
--	-----

7.7. Kısmi Boşalma Tekrarlama Sıklığının Gerilimle Değişimi	111
--	-----

7.8. Doğru ve Alternatif Gerilimde Delinme Gerilimleri ..	115
---	-----

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	117
KAYNAKLAR	121
ÖZGEÇMİŞ	126



ÖZET

Bir sivri uç-yarıküre elektrot düzeni olan referans kısmi boşalma (korona) kaynağı, yüksek gerilimde, sabit genlikli ve sıklıklı boşalma darbeleri üreten ve kısmi boşalma ölçme devrelerinin ölçeklenmesinde kullanılan bir düzendir. Alternatif gerilimde kullanım koşulları belirli olan bu düzenin, bu çalışmada, doğru gerilimde kullanım olanakları araştırılmış ve çalışma koşulları belirlenmeye çalışılmıştır.

Referans korona kaynağında boşalma büyüklükleri ile elektrot düzeninin biçim ve boyutları arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla kuramsal ve deneysel elektrostatik alan incelemeleri yapılmıştır. Analitik alan incelemelerinde, yaklaşık hesap yöntemi, görüntü yükleri yöntemi ve sferoidal ve paraboloidal koordinatlar; sayısal alan incelemelerinde sonlu elemanlar yöntemi; deneysel alan incelemelerinde de elektrolitik banyo ve yarıiletken kağıt yöntemleri kullanılmıştır.

Yüksek doğru ve alternatif gerilimde yapılan kısmi boşalma deneylerinde, referans korona kaynağında boşalma büyüklüklerine sivri uç eğrilik yarıçapının, elektrot açıklığının, sıcaklığın ve basıncın etkileri incelenmiş; kısmi boşalma ölçme frekansının önemi ve kaynağın çevreye yayınladığı radyo parazitlerinin uzaklık ve gerilimle değişimi araştırılmıştır. Deneysel incelemelerde, kuramsal incelemelerde de olduğu gibi, boşalma büyüklüklerine etkileyen en önemli etkenin sivri uç eğrilik yarıçapı olduğu görülmüştür.

Yapılan incelemeler, referans korona kaynağının yüksek doğru gerilim koşullarında da kullanılabileceğini göstermiştir.

SUMMARY

ANALYSIS OF PARTIAL DISCHARGE REFERENCE SOURCE UNDER HIGH DIRECT VOLTAGE CONDITIONS

The sensitivity and the calibration of partial discharge detection systems are important aspects of general subject of partial discharge measurements. Calibration of instruments measuring several discharge quantities in the complete test arrangement should be made by injecting short current pulses of known magnitude into the terminals the measuring circuit. The calibration can be made either in the low voltage mode or in the high voltage mode.

Calibration in the low voltage mode is to supply an artificial discharge of known magnitude at the terminals of the detection circuit. This type of calibration devices are known as primary discharge standard sources. Secondary discharge standards which are used in the high voltage mode are usually made from sources of natural discharges, i.e., surfaces discharges, internal discharges and corona discharges. Among these, corona discharges around a sharp point are the most suitable ones.

One convenient type of corona discharge reference source (CDRS), which is suitable for direct connection in the high voltage test circuit, is a point-hemisphere discharge gap (Fig.1). The device consists essentially of a needle pointing into a hemisphere.

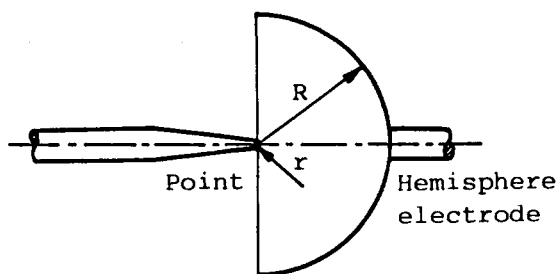


Fig.1. Corona discharge reference source.
 $R=25$ mm, $r=0.05 - 0.5$ mm.

Under certain conditions, this gap will give a discharge magnitude which is constant to within $\pm 10\%$. The discharge level is dependent on the radius of curvature of the point. At the inception voltage one or two discharge pulses occur during each negative half-cycle of the 50 Hz sine wave. If the voltage is increased, the number of discharges (repetition rate) increases, but the discharge magnitude remains constant.

Corona discharge reference source have been analyzed for alternating voltages. The discharge phenomena under direct voltage conditions takes approximately 10 nanosecond. This duration is extremely short, compared with the half period of a 50 Hz sine wave. Therefore, the discharge process at direct voltages can assumed to be the same with that at alternating voltages. The calibration of partial discharge measurements under high direct voltage conditions are almost done by primary discharge standard sources as in the high alternating voltage case. In this thesis, several characteristics and the operating aspects of the corona discharge reference source are investigated and demonstrated for high direct voltage conditions. It was aimed to show that the corona discharge reference source can be used as an alternative calibration source under high direct voltage conditions. Moreover, as an extension to alternating voltage studies, the variation of the corona inception and extinction voltage with the temperature and the pressure are determined experimentally.

The studies began with the theoretical analysis of discharge phenomena. Afterwards, potential and field analysis, which yield a close dependence with the discharge quantities (partial discharge inception voltage, apparent charge, repetition rate ...) of corona discharge reference source have been conducted by theoretical and experimental methods. Finally, several partial discharge tests at high alternating and direct voltages have been carried out and the results are compared both with eachother and with of those reported in the literature.

Both the analytical and numerical electrostatic field calculations require the solution of Laplace (or Poisson) equation. Analytical methods can easily be applied in case of simple electrode configurations. However, most electrode systems in nature do not posses such a simple configurations. In case, one of the following methods must be applied:

- (1) Approximated solutions,
- (2) Coordinate transformations or conformal mapping,
- (3) Numerical methods,
- (4) Experimental methods.

Since the corona discharge reference source yields a non-uniform field, it is impossible to perform an exact analytical calculation without coordinate transformation.

Theoretical field analysis of corona discharge reference source have been done by approximated solutions, coordinate transformations and numerical methods. In approximated solutions, point-hemisphere configuration of corona discharge reference source is transferred to concentric-hemisphere and sphere-plane electrode systems. The calculated maximum electric field strength and capacitance values of the electrode system are found to be nearly the same for both approximations.

Coordinate transformation can be done by choosing the most adequate coordinate system for the electrode configuration. Prolate spheroidal and parabolic coordinate systems are preferred for corona discharge reference source and the solutions of Laplace equation are

carried out in that coordinate systems. The point-hemisphere configuration is considered a hyperboloid point-plane in prolate spheroidal coordinate system and two confocal parabolics in parabolic coordinate system. In these coordinate transformations, utilization factor η is obtained as:

$$\eta = \frac{\sin^2(\alpha/2) \cdot \tanh^{-1}[\cos(\alpha/2)]}{\cos(\alpha/2)} \quad (1)$$

for a hyperboloid point-plane configuration and

$$\eta = \frac{\ln(2p-1)}{2(p-1)} \quad (2)$$

for two confocal parabolics. Where α is the top angle of point electrode, p is R/r as a geometrical characteristic. R and r are hemisphere radius and point radius, respectively. For the applied voltage U and electrode spacing a , the maximum field strength $E_{\max}$ may be calculated as:

$$E_{\max} = U/a \cdot \eta \quad (3)$$

Among these coordinate transformations, parabolic coordinate system is more adequate for corona discharge reference source, because of the close similarity between a parabolic and a point electrode. Fig. 2 shows the equipotential lines (surfaces) calculated in parabolic coordinate system.

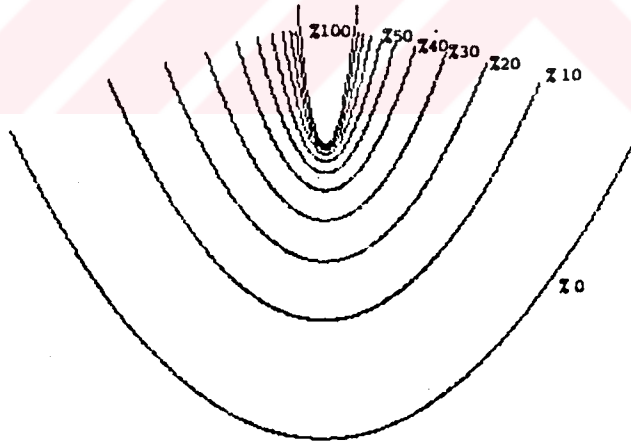


Fig.2. The equipotential lines calculated in parabolic coordinate system.

Numerical methods have become more and more attractive with the increasing availability of modern high-speed digital computers. Among them, finite element method (FEM) is the most preferred one. The basic principle of the finite element method is to divide the entire solution domain into arbitrarily chosen finite elements and then to find a piece-wise solution of potential function in each element in which approximate potential function is expressed by a

polynomial. Here, two dimensional and rotationally symmetric field produced by corona discharge reference source is examined by using triangular elements. The region of solution is divided into a nonuniform mesh by automatic grid generation. Cylindrical coordinates are used for the formulation. The resulting sparse, simultaneous, linear equation system is solved by successive over-relaxation method. Fig. 3 shows the equipotential lines and grid obtained from finite element method.

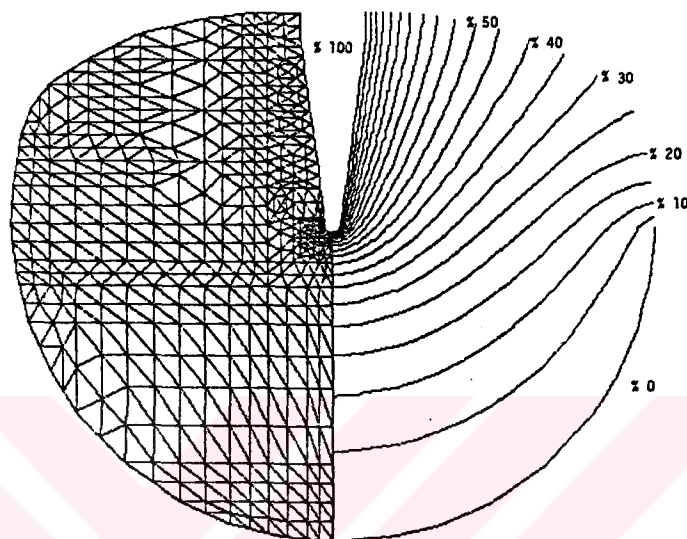


Fig.3. The equipotential lines and grid obtained from finite element method.

Experimental field analysis of corona discharge reference source have been conducted both by electrolytic tank method and semiconductive paper method for the aim of checking and extending the theory. Experiments are done with several kinds of 1/5 and 1/10 magnified models. The results obtained by these experimental methods are nearly the same of the theoretical ones and therefore will not be reproduced here.

Final studies are about partial discharge measurements. The equipment used in the experimental works and the measurement fundamentals are described. At 50 Hz AC and DC voltages, partial discharge tests are performed to investigate.

- (1) The importance of measuring frequency,
- (2) The versus of the partial discharge inception voltage and discharge intensity with the radius of curvature of point electrode,
- (3) The effect of electrode spacing on the partial discharge (corona) inception voltage,
- (4) The effect of temperature on the partial discharge inception voltage,
- (5) The effect of pressure on the partial discharge inception voltage,
- (6) The RIV (Radio Interference Voltage) of corona discharge reference source,
- (7) The partial discharge repetition rate versus applied voltage and

(8) The determination of breakdown voltage.

The overall results may be summarized as follow:

- (1) The magnitude of partial discharges is mainly determined by the radius of curvature of the point. The partial discharge inception voltage also varies with the radius. The partial discharge quantities vary with the top angle of the point. The radius of the hemisphere does not substantially affect the discharge magnitude.
- (2) The experiments performed on the change in magnitude with change in point-to-hemisphere distance show that over a 5 mm range, the discharge magnitude can be reduced by approximately 28 % at negative voltage and 20 % at 50 Hz AC without seriously affecting the stability of discharge pattern. Increase of the separation increases the discharge inception voltage but only by approximately 6 % at all cases over the range indicated, as this change is almost a linear function of separation. Here, the normal position of the point, i.e. where it coincides with the diametric plane of the hemisphere, has been taken as zero separation.
- (3) Under high direct voltage conditions, corona discharge reference source provides discharge pulses of constant magnitudes as in alternating voltage conditions, but the magnitudes vary with the polarity. The partial discharges appear sooner at negative than at positive voltage; with AC voltage they occur often during the negative half-cycle of sine wave only.
- (4) The discharge (corona) inception voltage with temperature reduce by approximately 10 % from the initial value for a 25-75°C temperature range.
- (5) The partial discharge inception voltage decrease considerably with pressure at low pressure range. Discharge inception voltage with pressure increase by approximately 75 % from the initial value for a 0-5 bar pressure range.
- (6) The partial discharge repetition rate is strongly dependent on the voltage. The repetition rate increases with applied voltage as in alternating voltage case.
- (7) The RIV (Radio Interference Voltage) level of corona discharge reference source is not of importance.
- (8) Corona discharge reference source can be used as an alternative calibration source under high direct voltage conditions. It is sufficiently reliable to be accepted as a secondary discharge standard. It is simple and of reasonable size, and a range of specific discharge magnitude can be obtained using only a small number of points.

SEMBOLLER

α	: Sivri uç elektrodun tepe açısı; iyonlaşma katsayısı
a	: Elektrot açıklığı; elips ve hiperbolde büyük eksen uzunluğu
b	: Elips ve hiperbolde küçük eksen uzunluğu
c	: Elips ve hiperbolde yarı odak uzaklığı
C	: Kapasite
C_a	: Deney cisminin kapasitesi
C_b	: Bağlama (kuplaj) kondansatörü
D	: Akı yoğunluğu
Δ	: Korona tabakasının kalınlığı
Δf	: Band genişliği
E	: Elektrik alan şiddeti
E_o	: Ortalama elektrik alan şiddeti
E_{max}	: Maksimum alan şiddeti
ϵ	: Dielektrik sabiti
ϵ_o	: Boşluğun dielektrik sabiti = $8,86 \cdot 10^{-12}$ F/m
ϵ_r	: Bağıl dielektrik sabiti
$f(n)$	: Kısmi boşalma ölçü aletinin boşalma tekrarlama sıklığına bağlı bir fonksiyonu
f_o	: Ölçme frekansı
h_u, h_v, h_w	: Genel metrik katsayılar
h_η, h_θ, h_ϕ	: Sferoidal koordinat sisteminde metrik katsayılar
h_η, h_u, h_ϕ	: Paraboloidal koordinat sisteminde metrik katsayılar
$\vec{i}_r, \vec{i}_\theta, \vec{i}_z$	: Silindirik koordinat sisteminde birim vektörler

$\vec{i}_\eta, \vec{i}_\theta, \vec{i}_\phi$	: Sferoidal koordinat sisteminde birim vektörler
$\vec{i}_\eta, \vec{i}_\mu, \vec{i}_\phi$	: Paraboloidal koordinat sisteminde birim vektörler
j	: Akım yoğunluğu
k	: Düzeltme faktörü
χ	: Öziletkenlik
ℓ	: Anten uzaklığı
n	: Kısmi boşalma tekrarlama sıklığı
η_f	: Faydalanma faktörü
η, θ, ϕ	: Sferoidal koordinatlar
η, μ, ϕ	: Paraboloidal koordinatlar
p	: Basınç; geometrik karakteristik
r	: Sivri uçlu elektrodun eğrilik yarıçapı
R	: Yarıküre elektrodun yarıçapı; direnç
r_x	: Yarıçap değişkeni
r, θ, z	: Silindirik koordinatlar
R_k	: Koruma direnci, ön direnç
q	: Boşalma genliği (pC); görünen yük
Q	: Elektrik yükü
t	: Sıcaklık
T	: Zaman sabiti
U	: Gerilim
U_d	: Delinme gerilimi
$U_{d\Delta}$	: Korona tabakasının delinme gerilimi
U_e	: Kısmi boşalma sönme gerilimi
U_i	: Kısmi boşalma (korona) başlangıç gerilimi
U_{ia}	: Alternatif kısmi boşalma (korona) başlangıç gerilimi
U_{in}	: Negatif kısmi boşalma (korona) başlangıç gerilimi
U_{ip}	: Pozitif kısmi boşalma (korona) başlangıç gerilimi

U_r	: Boşalma genliği (μV); radyo parazit gerilimi
u, v, w	: Genel koordinatlar
x	: Uzaklık değişkeni
x, y, z	: Kartezyen koordinatlar
V	: Potansiyel
W	: Enerji
Z_m	: Kısmi boşalma ölçü empedansı

KISALTMALAR

SYK	: Sivri uç-yarıküre elektrot düzeni
RKK	: Referans korona kaynağı
AG	: Alternatif gerilim
DG	: Doğru gerilim
TS	: Türk Standardları
IEC	: International Electrotechnical Commission
BS	: British Standards
CISPR	: Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques
NEMA	: National Electrical Manufacturers Association
RIV	: Radyo parazit gerilimi (Radio Interference Voltage)
MWB	: Messwandler - Bau GMBH
HFM	: MWB RIV-metresi
ÖA	: Ölçü aleti, RIV-metre, pC-metre
KIO	: Katot ışıklı osiloskop
PVC	: Polivinilklorür
IEE	: Institution of Electrical Engineers
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers

BÖLÜM 1

GİRİŞ

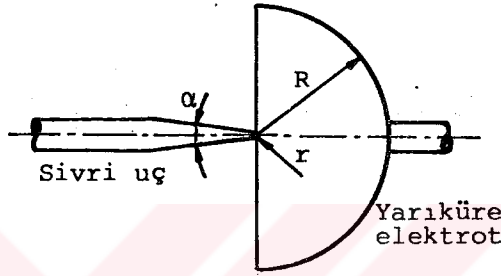
Elektriksel kısmi boşalmaların ölçülmesine ilişkin standartlarda [1-5] kısmi boşalma deneylerinde sağlıklı ve tekrarlanabilir deney sonuçları elde edebilmek için, kullanma koşullarını da içerecek biçimde; ölçme düzenlerinin tüm özelliklerinin belirlenmesi ve ölçme aygıtlarının ayarlanması gerektiği belirtilir. Sözü edilen ayar işleminin gerçekleştirilmesinde, belirli genlikte ve sıklıkta darbeler üreten ve "standart ayar kaynakları" adı verilen darbe üreteçlerinden yararlanılır. Ayarlama (kalibrasyon), darbe üreteçlerinin (ayar kaynaklarının) deney devresine yüksek gerilim altında bağlı olup olmamasına göre alçak gerilimde veya yüksek gerilimde yapılabilir.

Alçak gerilimde ayarın temel ilkesi, deney devresine yüksek gerilim uygulanmamış iken, ölçme devresine genliği bilinen yükler uygulanmasıdır. Bu amaçla çoğunlukla kare dalga gerilim üreteçleri kullanılır. Alçak gerilimde ayar için kullanılan bu tür standart ayar kaynaklarına birincil standart ayar kaynakları adı verilir.

Yüksek gerilimde ayar ise ikincil standart ayar kaynakları da denilen ve yüzeysel, iç kısmi boşalma ya da korona gibi doğal boşalmalardan yararlanılarak gerçekleştirilen ayar kaynakları ile yapılır. Sözü edilen bu ayar kaynakları, deney devresinde yüksek gerilim uygulanarak kullanılabilirler. Örneğin yüzeysel boşalmalı bir ayar kaynağı, keskin kenarlı elektrotlar arasına yerleştirilmiş bir cam tabakası ile elde edilebilir. Elektrotlara, cam yüzeyinde yüzeysel boşalmalar oluşturacak kadar bir gerilim uygulandığında, düzen uygulanan gerilime bağlı olarak sabit genlikli boşalma darbeleri verir. Benzer şekilde, düzlemsel elektrotlar arasına, tabakalarından birinin ortasına bir delik açılarak içinde silindirselsel bir boşluk oluşturulmuş, çok tabakalı bir yalıtkan yerleştirilmiş bir düzen ile

uygulanan gerilimden oldukça bağımsız, sabit genlikli kısmi boşalma darbeleri elde edilebilir [6].

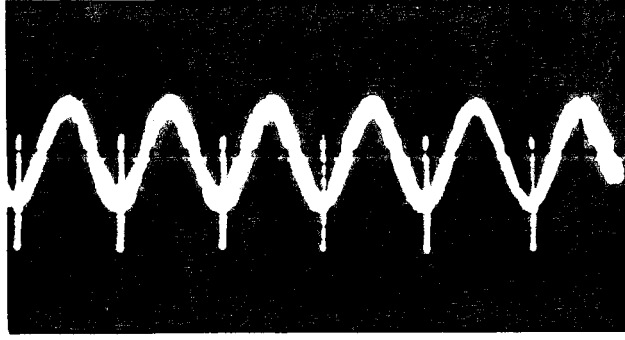
Kısmi boşalma ölçme devrelerinin yüksek gerilimde ayarında kullanılabilecek diğer bir ikincil standart ayar kaynağı da referans korona kaynağıdır. Referans korona kaynağı (RKK), içi boş bir yarım küre elektrot ile bu yarım küre karşısına ve merkezine yerleştirilmiş bir sivri uçlu elektrottan oluşmuş bir sivri uç-yarıküre elektrot düzenidir (Şekil 1.1).



Şekil 1.1. Referans korona kaynağı.
 $R=25$ mm; $r=0,05 - 0,5$ mm.

Referans korona kaynağında, sivri uç çevresinde simetrik bir alan dağılışı elde etmek için dış elektrot olarak yarıküre biçimli bir elektrot seçilmiştir. Sivri uç paslanmaz çelikten ve küçük bir tepe açısına ($\alpha=7,5 - 15 - 30^\circ$) sahip, koni biçiminde bir elektrottur. Bu elektrodun ucu koni biçimine getirildikten sonra istenen eğrilik yarıçapına (r) göre yuvarlatılmıştır.

Referans korona kaynağına (RKK), sivri uçlu elektrodunda korona boşalması başlatacak kadar, belli bir gerilim uygulandığında, RKK sivri ucun uç eğrilik yarıçapına bağlı olarak değişmez genlikli ve düzenli olarak tekrarlanan boşalma darbeleri üretir. Şekil 1.2'de, bir referans korona kaynağında boşalma (korona) başlangıç geriliminde endüstriyel frekanslı gerilimin negatif yarıdalga tepelerinde ortaya çıkan sabit genlikli ve düzenli olarak tekrarlanan boşalmaların osilogramı gösterilmiştir.



Şekil 1.2. Referans korona kaynağında bir boşalma osilogramı.

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeni, referans korona kaynağı olarak standartlara da girmiştir [1-3]. IEC 270 (1968), BS 4828 (1972) ve TS 2051 (1975) de, sabit 25 mm yarıçaplı yarıküre ve üç farklı sivri uç eğrilik yarıçapı (0,05 - 0,2 ve 0,5 mm) için boşalma başlangıç gerilimleri ve boşalma genlikleri verilmiştir. Referans korona kaynağı için standartlarda verilen değerler Çizelge 1-1'de gösterilmiştir.

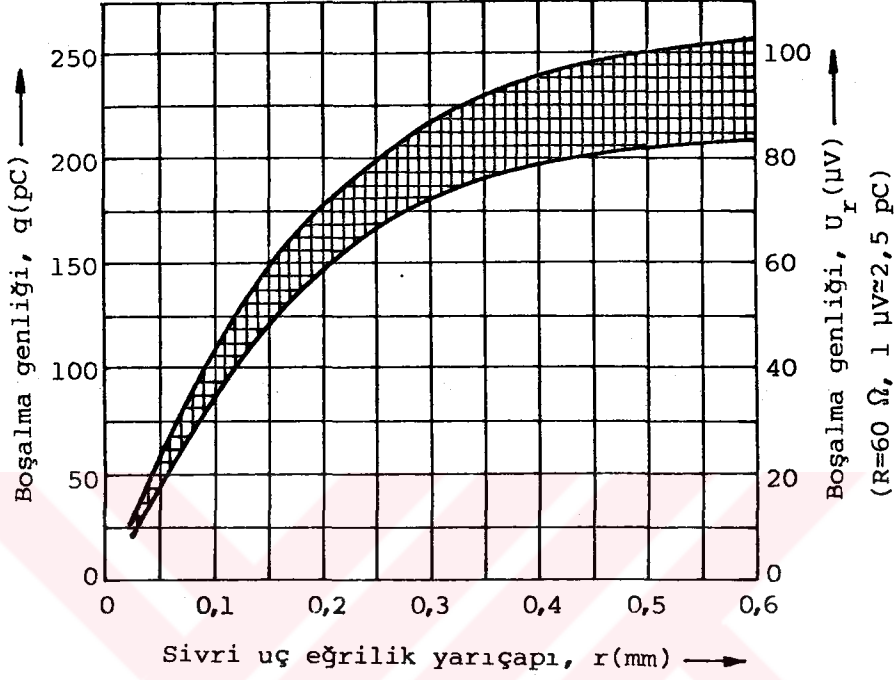
Çizelge 1-1. Referans korona kaynağı için standart çalışma koşulları

Sivri uç eğrilik yarıçapı $r(\text{mm})$	Boşalma başlangıç gerilimi $U_i \text{ (kV}_{\text{tepe}})$	Boşalma genliği $ q \text{ (pC)}$
0,05	3,8	40
0,2	6,5	140
0,5	8,5	240

Bu düzende boşalma darbelerinin tekrarlama sıklığı, boşalma başlangıç geriliminin biraz üstüne kadar olan gerilimlerde, uygulanan gerilimin her periyodunda birkaç boşalma darbesine karşı düşer. Boşalma tekrarlama sıklığı, boşalma başlangıç geriliminin 1,4 katına ($1,4 U_i$ ye) kadar boşalma genliğine etki etmeden düzgün olarak artar.

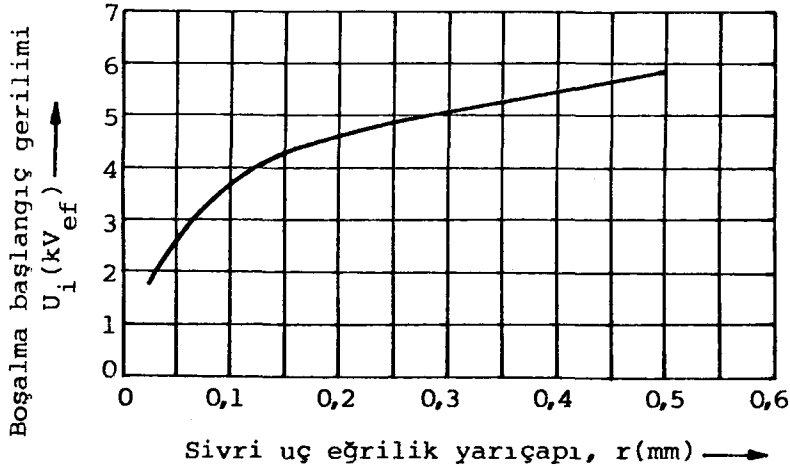
Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin referans korona kaynağı olarak kullanılabileceğini ilk öneren Kreuger [6], sivri uçta belirli

bir eğrilik yarıçapı için elde edilen boşalma genliklerinin sabit olmayabileceğini; ancak $\pm 10\%$ 'luk bir yaklaşıklıkla, belirli sınırlar arasında kalacağını belirtmiştir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Sivri uç eğrilik yarıçapı ile boşalma genliğinin değişimi [6].

Sivri ucun eğrilik yarıçapı büyüdükçe boşalma başlangıç gerilimi ve boşalma darbelerinin genliği yükselir (Şekil 1.4). Herbir



Şekil 1.4. Sivri uç eğrilik yarıçapı ile boşalma başlangıç geriliminin değişimi [6].

sivri uç eğrilik yarıçapı için belli bir boşalma başlangıç gerilimi ve boşalma yükü vardır. Boşalma başlangıç gerilimini ve boşalma yükünü değiştirmek için sivri uç eğrilik yarıçapını değiştirmek gerekir.

Referans korona kaynağı olarak kullanılan sivri uç-yarıküre elektrot düzeni, sabit genlikli boşalma darbeleri vermesi nedeniyle yüksek gerilim aygıtlarında özellikle de transformatör sargılarında kısmi boşalma darbelerinin yayılma, zayıflama ve bozulma gibi davranışlarının incelenmesinde de kullanılabilir.

Çalışmamıza konu olan bu düzen, alternatif gerilimde kısmi boşalma devrelerinin ayarında kullanılabilirliği ve çalışma koşulları belirlenmiş bir düzendir.

Doğru gerilimde kısmi boşalma ölçme çalışmalarında, alternatif gerilimde kullanılan devre ve ölçü aletlerinden yararlanılabilir. Bu düzenlerin doğru gerilimdeki ayarları da birincil standart ayar kaynakları ile alternatif gerilimdeki gibi yapılmaktadır. Doğru gerilim durumunda ikincil ayar kaynaklarının kullanılabilirliği tartışılabilir. Örneğin, iç kısmi boşalmayı esas alan, içinde boşluk bulunan tabakalı katı yalıtıkandan oluşan ikincil ayar kaynağının doğru gerilim koşullarında kullanımı anlamsız olur. Çünkü uçlarına doğru gerilim uygulanmış boşluklu bir katı yalıtıkanda boşalmaların tekrarlama sıklığı çok küçük ve kararsız olup, bir boşalma başlangıç geriliminden veya sönme geriliminden söz etmek zordur [7]. Bu da çalışma koşullarını belirlemek ve kararlı çalışma elde etmek bakımından güçlük yaratır. Referans korona kaynağında ise durum farklıdır. Doğru gerilimde de boşalma başlangıç ve sönme gerilimleri belirlenebilir. Yapılan bu çalışmada da görüldüğü gibi, boşalmalar, alternatif gerilimdeki gibi sabit genlikli ve sıklıklı darbeler şeklindedir. Bu durum, her ne kadar birincil ayar kaynaklarının, ikincil ayar kaynaklarına göre doğruluk ve güvenilirlik bakımından öncelikli olmalarına karşın, bir ikincil ayar kaynağı olan referans korona kaynağının doğru gerilim koşullarında kullanılabileceğini düşündürmüştür. Bu amaçla, bu çalışmada sivri uç-yarıküre elektrot düzeninden oluşan referans korona kaynağı, çeşitli yönleriyle ve değişik

yöntemlerle incelenmeye ve doğru gerilimde çalışma koşulları belirlenmeye çalışılacaktır.

Çalışmaya, incelemelerin ve değerlendirmelerin sağlıklı olması bakımından, boşalma (korona) olaylarının ve boşalmaya etki eden etkenlerin, bu konudaki literatürden yararlanarak, kuramsal olarak incelenmesiyle başlanacaktır. Burada, Paschen yasasına dayanarak RKK da boşalma başlangıç geriliminin hesabı da yapılmaya çalışılacaktır.

Çalışmaya, boşalma büyüklükleri (gerilim, yük, tekrarlama sıklığı, ...) ile ilgisi bakımından, sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde potansiyel ve alan dağılımı incelemeleri ile devam edilecektir. İncelemelerde sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin sivri uç eğrilik yarıçapı r ve yarıküre elektrodun yarıçapı R cinsinden alan ve potansiyel bağıntıları elde edilmeye çalışılacak ve bu biçimdeki elektrot düzenlerine uygulanabilmesi amacıyla bağıntıların genelleştirilmesi yoluna gidilecektir. Kuramsal elektrostatik alan hesapları, farklı analitik yöntemlerle ve sayısal yöntemlerden sonlu elemanlar yöntemi ile yapılacaktır.

Referans korona kaynağında alan dağılımının elektrolitik banyo ve yarıiletken kağıt yöntemi gibi deneysel yöntemlerle de incelenmesine çalışılacak ve bulunacak sonuçlar, kuramsal inceleme sonuçları ile karşılaştırılarak yapılan işlemlerin doğruluk derecesi sınınanacaktır. Çalışma, referans korona kaynağı (RKK) üzerinde yapılacak kısmi boşalma deneyleri ile sürdürülecektir. Bu deneylerden, referans korona kaynağında kısmi boşalma (korona) başlangıç gerilimi, boşalma genliği ve boşalma tekrarlama sıklığına, sivri uç eğrilik yarıçapının, elektrot açıklığının, sıcaklığın, basıncın ve kısmi boşalma ölçme frekansının etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Ayrıca RKK'nın kullanılması sırasında çevreye yayınlayabileceği radyo frekanslı parazitlerin gerilim (RIV) düzeyinin, uzaklıkla ve RKK ya uygulanacak gerilimle ne şekilde değişeceği belirlenecektir. Boşalma tekrarlama sıklığı ölçmeleri için osilografik gözlemler yanında, deneysel çalışma olanakları gözönünde bulundurularak ve farklı bir yaklaşım olarak kullanılacak kısmi boşalma ölçü aletlerinin (RIVmetrelerin) özelliklerinden yararlanılması düşünülmüştür. Deneysel çalışmaların endüstriyel frekanslı alternatif gerilim ve

pozitif ve negatif doğru gerilimler için ayrı ayrı yapılmasının hem karşılaştırma, hem de çalışma sırasında gerçekleşen referans korona kaynağının her iki gerilim türündeki çalışma koşullarının belirlenmesi bakımından yararlı olacağı göz önünde tutulmuştur.

Bu çalışma ile yüksek gerilim tekniğinden bilinen değişik pekçok yöntemin incelenmesi ve uygulanması olanağı bulunacaktır. Ayrıca örneğin, sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal bir yöntemin yüksek gerilimle ilgili bir örneğe daha uygulaması yapılarak uygulama alanı genişletilmeye çalışılacaktır. Referans korona kaynağı için değişik yöntemlerle yapılacak olan bu incelemelerin, benzer elektrot düzenlerinin incelenmesinde kullanılması ve farklı veya yeni yöntemlerin uygulanması veya ortaya çıkarılması için bir örnek ve esin kaynağı olması beklenebilir.



BÖLÜM 2

BOŞALMA OLAYLARININ İNCELENMESİ

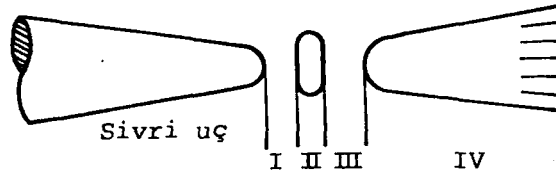
2.1. Boşalma Olayları

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeni, düzgün elektrik alan dağılımına sahip olmayan bir elektrot düzenidir. Bu tür düzenlere uygulanan gerilim yükseltildiğinde boşalma, daima, alan şiddetinin, elektrotlar arasındaki ortamın (havanın) boşalma başlangıç alan şiddetine eşit veya büyük olduğu bölgede (sivri uç ve civarındaki bölgede) başlar ve eğrilik yarıçapı küçük olan elektrodun kutbiyetine bağlı olarak gelişir. Bu şekilde, sivri uç gibi küçük eğrilik yarıçaplı elektrotlarda görülen, tam olmayan fakat kendi kendini besleyen boşalmalara korona boşalması adı verilir. Korona boşalması, sivri uç ve civarında, küçük bir bölgede olan bir kısmi boşalmadır. Ancak, elektrotlara uygulanan gerilim yükseltilmeye devam edilirse, elektrotlar arasında yine kendi kendini besleyen, delinme adını verdiğimiz tam boşalma olayı meydana gelir.

Düzgün olmayan alanda korona ve delinme olayı çok yönlü ve geniş olarak araştırılan bir olay olup, bu konuda zengin literatür bulunmaktadır [9-27]. Literatürde verilen bilgiler, genelde, düzgün olmayan alanda boşalma olayını (koronayı ve delinmeyi) incelemek ve açıklamak bakımından iyi bir örnek olan küçük eğrilik yarıçaplı çubuk veya sivri uç-düzlem elektrot düzeni üzerinedir. Bu bilgiler, incelemesini yaptığımız sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde boşalma olaylarını açıklamak bakımından da uygundur. Bu olayların açıklaması, boşalmanın sivri uçlu elektrodun kutbiyetine bağlı olarak farklı oluşum ve gelişim mekanizmaları göstermeleri nedeniyle sivri uca uygulanan gerilimin negatif veya pozitif doğru gerilim veya alternatif gerilim olması durumları için ayrı ayrı verilecektir.

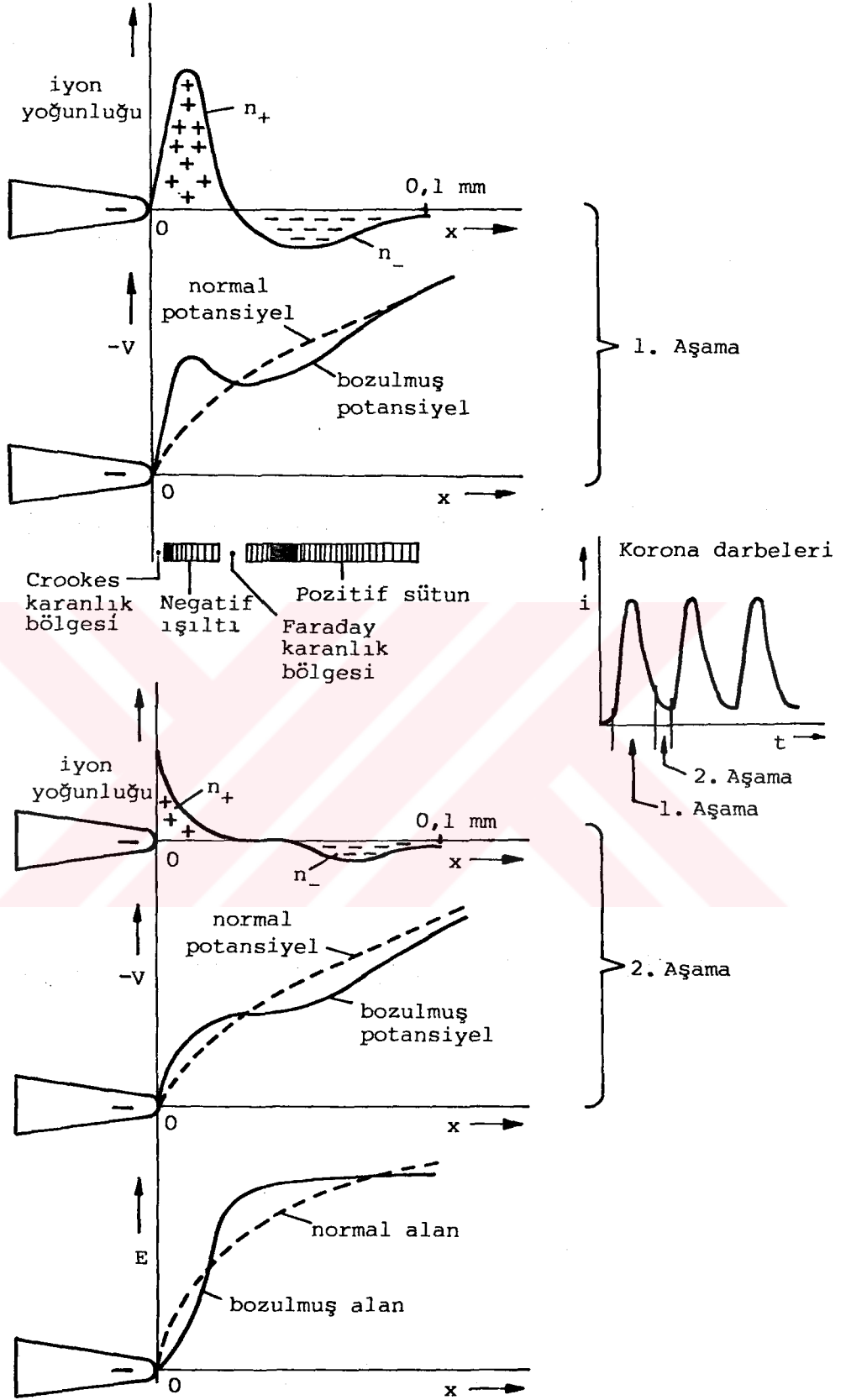
2.1.1. Negatif Sivri Uçta Boşalma Olayı

Negatif sivri uçta kısmi boşalma, sivri uç ve çevresindeki koşullara bağlıdır. Ancak katot üzerindeki elektronların enerjileri zayıf olduğundan doğrudan doğruya uyarma ve iyonlaşmada bulunamazlar. Boşalma (korona), sivri uç çevresindeki elektrik alan şiddetinin uygun bir değerde olduğu ve dıştan bir etkiyle alan içinde üretilmiş bir pozitif iyonun bir ikincil elektron üretmeye yeterli enerjiyi kazandığı anda başlar. Bu enerjinin değerini, sivri uç yüzeyinden, pozitif iyon bombardımanıyla ikincil elektronların çıkışı için gerekli yüzeysel iyonlaşma çıkış işi belirler. Katot yüzeyinden ayrılarak Crookes karanlık bölgesi denilen bölge içine giren ve giderek hızlanan bu elektronlar, çarpıştıkları molekülleri iyonlaştırmak için gerekli enerjiyi elektrik alanından alırlar. Elektronların aldıkları bu enerji, çarptıkları molekülleri iyonlaştırmak için yeterli değilse, çarptıkları molekülleri sadece uyarırlar. Ortaya çıkan yeni elektronlar da dış alanın etkisiyle hızlanıp, nötr moleküller ile elastik olmayan çarpışmalarda yeni elektronlar ve pozitif iyonlar ortaya çıkararak iyonlaşmaya katılırlar. Bu şekilde oluşan her bir elektron α Townsend iyonlaştırma sayısına uygun olarak iyonlaşmayı sürdürür. Sivri uçtan (katottan) uzaklaştıkça elektrik alan şiddeti zayıflar. Bu durum, elektronların anoda doğru yol alırken bir çarpışma sonucu kinetik enerjilerini harcadıklarında, molekülleri çarpışma suretiyle iyonlaştırmak için gerekli enerjiyi alan şiddetinin yeterli olmaması nedeniyle bulamamalarına yol açar ve iyonlaştırma sayısı $\alpha \ll 1$ olduğunda yeni elektrikli parçacık üretimi durur. Bu ilk iyonizasyon aşaması boşalma akımının değişimi üzerine hiçbir etkide bulunmaz ve bu durumda Faraday karanlık bölgesi ve pozitif sütun olarak adlandırılan bölgeler görülmez (Şekil 2.1). Bu



Şekil 2.1. Kararlı ışıltı ve boşalma (Trichel) darbelerinin görüldüğü temel durumda bölgeler.

- I : Crookes karanlık bölgesi
- II : Negatif ışıltı
- III: Faraday karanlık bölgesi
- IV : Pozitif sütun



Şekil 2.2. Negatif koronada elektron çığlarından önce ve sonra uzay yükü, potansiyel ve alan dağılımı.

aşamanın sonunda sivri ucun (katodun) önünde, Crookes bölgesi içinde yoğunluğu az, negatif ışıltı adı verilen bölgeye doğru yoğunluğu fazla bir pozitif uzay yükü oluşur. Negatif uzay yükünün yoğunluğu, negatif ışıltı bölgesinin anoda yakın tarafında fazladır. Pozitif uzay yükünün meydana getireceği alan, katot önündeki alan şiddetinden büyük olduğunda yeni bir çığ (iyonlaşma dalgasının) oluşumu için gerekli koşullar sağlanmış olur (Şekil 2.2).

Sivri uç (katot) yakınındaki fotonların foto iyonlaştırıcı etkisinin bir sonucu olarak elektron sayısı, dolayısıyla iyonlaştırma sayısı artar. Bunların sonucu olarak, çok sayıda çığ oluşur. Bunlardan geriye kalan pozitif iyonlar da, katot önündeki pozitif uzay yükü yoğunluğunun artmasına dolayısıyla pozitif uzay yükü yoğunluğunun katoda doğru kaymasına neden olur. Böylece şiddeti giderek artan bir iyonlaştırma dalgası katoda doğru ilerler. İyonlaştırma dalgası, elektronlar ile elektrik alanını arttıran pozitif uzay yükü arasında bir dengenin kurulduğu, katottan belli bir uzaklıkta durduğunda yeni pozitif iyonların oluşumu da durur. Bunun yanında, elektrik alanının iyonlaşma için yeterli olmadığı bölgede elektronlar, kinetik enerjilerinin de çok az oluşu nedeniyle havadaki elektronegatif gaz (oksijen) moleküllerine bağlanarak hareketsiz fakat kuvvetli bir negatif uzay yükü oluştururlar.

Fotonlar, sivri uçtan yeni elektronların çıkmasına yol açarlar. Bunlar da yeni çığlar oluştururlar. Böylece ardarda birçok çığın gelişmesi sonucu sivri ucun önünde başı katoda yönelik, arka kısmında pozitif uzay yükü yoğunluğunun fazla olduğu iyonlaşmış bir bölge oluşur. Bu olay yaklaşık 10^{-7} s içerisinde tamamlanır.

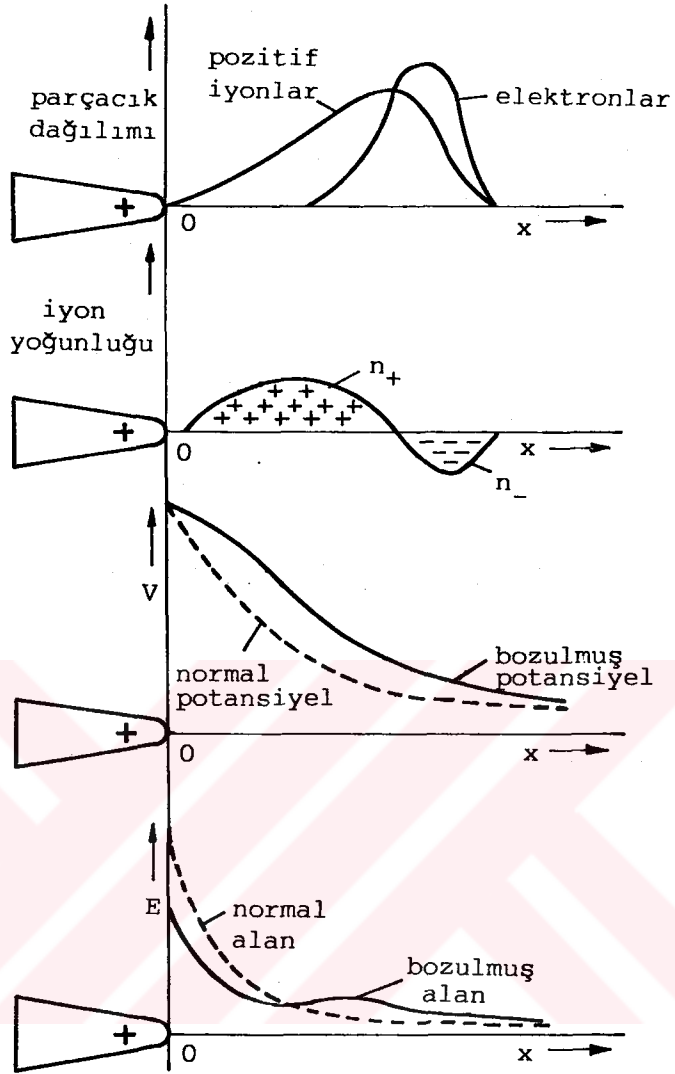
Pozitif iyon bulutu sivri ucun yaklaşık 0,15 mm önünde bulunur. Negatif uzay yükü bulutu ise sivri uçtan daha uzakta bulunur ve yavaşça karşı elektroda doğru hareket eder. Negatif uzay yükünün sivri uç yakınında kalma süresi, pozitif yükünkünden daha uzundur. Negatif uzay yükü bulutu giderek büyür ve sivri uç çevresindeki elektrik alanını zayıflatarak iyonlaşmanın devam etmesini önler.

Yeni bir boşalmanın olması ve korona darbelerinin tekrarlanması için negatif uzay yükü bulutunun dağılıp yok olması ve sivri ucun önünde kısmi boşalma (korona) darbesinin başlangıcındaki gibi uzay yüksüz bir ortamın sağlanması zorunludur. Uygulanan gerilim düzeyi yükseldikçe uzay yüklerinin çok uzaklaşmasına gerek kalmaksızın daha sık aralıklarla, darbe şeklinde boşalmalar olur. Havada, eğrilik yarıçapı küçük elektrotlar üzerinde ortaya çıkan bu kısmi boşalma (korona) darbeleri, bu darbelerin varlığını ilk belirleyen ve inceleyenlerden biri olan G.W. Trichel'in [8] adına "Trichel darbeleri" adıyla anılmaktadır. Trichel, bu darbelerin sıklığının, gerilimin yükseltilmesiyle arttığını, gaz basıncı ve sivri ucun eğrilik yarıçapı ile yakından ilgili olduğunu ancak elektrot açıklığı ile fazla değişmediğini belirlemiştir.

Uygulanan gerilim yükseltilmeye devam edilirse kısmi boşalma (korona) başlangıç geriliminden daha yüksek bir gerilimde Trichel darbeleri kaybolarak darbesiz Townsend boşalmaları veya darbesiz korona (kısmi boşalma) adı verilen durumla karşılaşılır.

2.1.2. Pozitif Sivri Uçta Boşalma Olayı

Bu durumda da, negatif sivri uç durumunda olduğu gibi, elektrotlar arasında bulunan bir başlangıç elektronu pozitif sivri uca (anoda) doğru hızlandırılır ve elektrikli parçacıkların oluşumu sağlanır. Başlangıçta uzay yükleri bulunmadığından alan dağılımı kutbiyetten bağımsızdır. Pozitif sivri uç durumunda, sivri uç önünde başı anoda (sivri uca) yönelik bir çığ oluşur. Bu çığdan çıkan fotonlar, yeni çığların oluşumuna yol açan yeni elektronlar üretirler. Ancak pozitif sivri uç, önünde bulunan pozitif uzay yükü tarafından ekranlandığı için bu ortamdaki iyonlaşma önlenir veya tamamen durur. Bu pozitif uzay yükü, elektrotlar arasından yok olduğunda ve sivri uçtaki elektrik alan şiddeti tekrar başlangıçtaki değerine ulaştığında korona (boşalma) yeniden başlar ve olay bu şekilde tekrarlanır. Şekil 2.3'te pozitif doğru gerilimdeki koronada ortaya çıkan parçacık, yük ve potansiyel dağılımları gösterilmiştir.



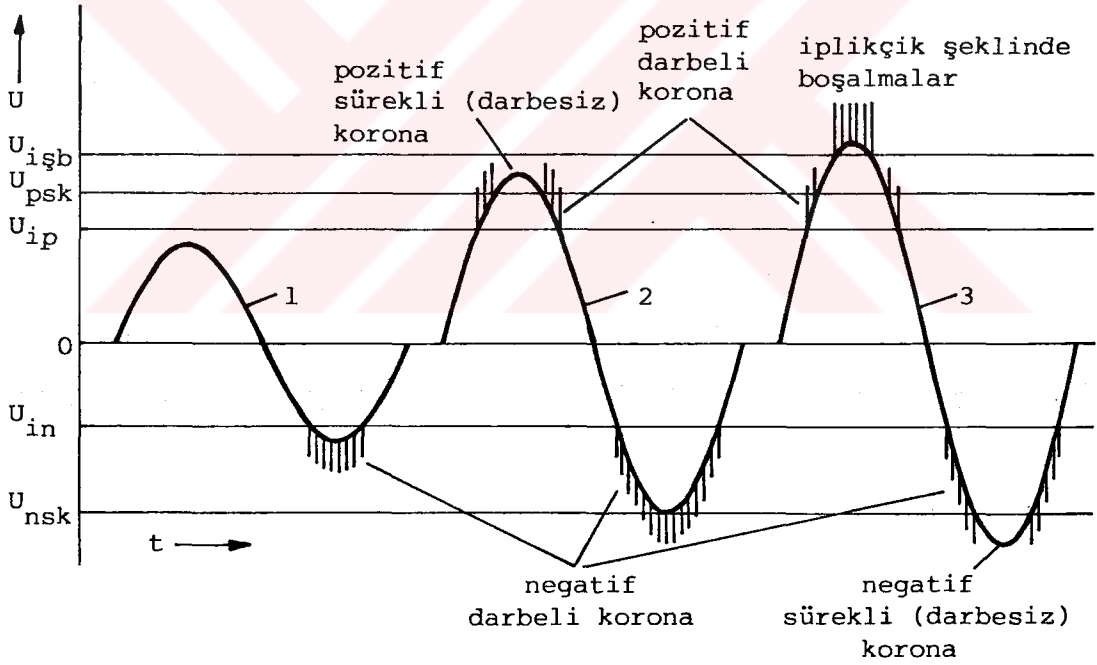
Şekil 2.3. Pozitif koronada parçacık, uzay yükü, potansiyel ve elektrik alan dağılımı.

Pozitif sivri uç koronasında da, boşalma başlangıç geriliminden sonra pozitif korona (kısmi boşalma) darbeleri görülür. Gerilim yükseltildikçe bu darbelerin sıklığı artar. Belli bir gerilimden sonra ise bu darbeler kaybolarak pozitif darbesiz (sürekli) korona başlar. Gerilim yükseltilmeye devam edilirse belli bir gerilimde yeniden öncekilerden daha büyük genlikli pozitif korona darbeleri görülür. Bu son durumda iplikçik şeklinde görülen darbeler, gerilim biraz daha yükseltilirse, boşalmanın delinme kanalına dönüşerek delinme ile sonuçlanmasına neden olurlar.

Pozitif boşalma darbelerinin cepheleri negatif darbelere göre daha diktir, sırtları ise eksponansiyel olarak düşmektedir. Ayrıca negatif darbelerin tersine pozitif Trichel darbeleri düzensiz tekrarlanan darbe grupları şeklinde ortaya çıkarlar.

2.1.3. Alternatif Gerilimde Sivri Uçta Boşalma Olayı

Negatif ve pozitif doğru gerilim uygulanmış, sivri uç durumları için anlatılan boşalma olaylarında herbir boşalma süreci, 10^{-8} saniye gibi çok kısa zaman aralığında ortaya çıkmaktadır. Bu süre, endüstriyel frekanslı (50 Hz) alternatif gerilimin herbir yarı dalgasının 10 ms'lik süresi yanında çok küçüktür. Buna göre negatif ve pozitif doğru gerilimler için anlatılan boşalma olaylarının, alternatif gerilimin negatif ve pozitif yarı dalgaları için de geçerli olduğu söylenebilir.



Şekil 2.4. Alternatif gerilimde kısmi boşalma oluşum bölgeleri ve şekilleri.

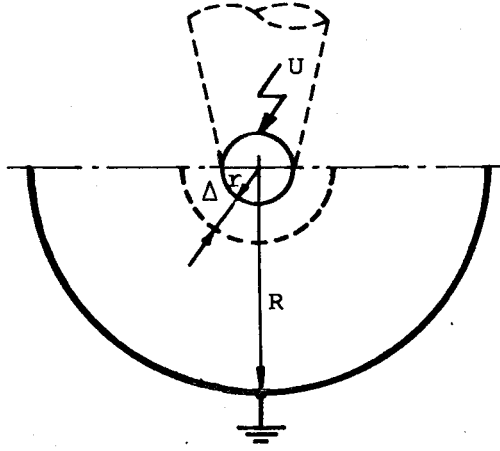
- U_{in} : Negatif kısmi boşalma başlangıç gerilimi
- U_{nsk} : Negatif sürekli korona başlangıç gerilimi
- U_{ip} : Pozitif kısmi boşalma başlangıç gerilimi
- U_{psk} : Pozitif sürekli korona başlangıç gerilimi
- $U_{işb}$: İplikçik şeklinde boşalmaların başlangıç gerilimi.

Şekil 2.4'te alternatif gerilimde kısmi boşalma (korona) oluşum bölgeleri ve şekilleri şematik olarak gösterilmiştir. Bu şekilde, 1 eğrisi, uygulanan gerilimin (U), negatif yarı dalgada kısmi boşalma (korona) başlangıç gerilimi (U_{in})'den büyük ($U \geq U_{in}$) olması durumunda, negatif yarı dalganın tepe bölgesinde genlikleri ve aralıkları yaklaşık eşit boşalma darbelerinin görüldüğü durumu göstermektedir. Bu darbeler negatif doğru gerilimde de olduğu gibi Trichel darbeleri olarak adlandırılır. Bu darbelerin sıklığı 10^5 Hz e kadar çıkabilir. Gerilim yükseltilmeye devam edilirse, Şekil 2.4'te 2 eğrisinde gösterildiği gibi, pozitif yarı dalgada da darbeleri korona boşalmaları görülecektir. Bu darbeler, negatif yarı dalgada görülen darbelerden daha düzensiz genlikli ve sıklıklı darbelerdir. Her iki yarı dalgada da gerilimin yükseltilmesiyle tepe bölgelerinde sürekli korona adı verilen darbesiz kısmi boşalmalar gözlenebilir (2 ve 3 eğrileri). Gerilim biraz daha yükseltilecek olursa elektrotlar arasında tam boşalma (delinme) olayı öncesinde, pozitif yarı dalganın tepe bölgesinde iplikçik şeklinde boşalma işaretleri görülecektir (3 eğrisi).

Alternatif gerilimde sivri uçlu elektrotta görülen korona olayı için verilen bu basit ve kısa açıklamalar, herbir yarı dalga-daki uzay yüklerinin bir sonraki yarı dalgaya da etkiyebileceği göz önüne alındığında, daha da karmaşılaşır. Genelde, alternatif gerilimde sivri uçlu elektrotlarda korona olayının karakteristik bir özelliği, boşalmaların öncelikle negatif yarı dalgada başlaması ve yaklaşık sabit genlikli ve sıklıklı darbeler şeklinde ortaya çıkmasıdır. Ortaya çıkan bu darbelerin gerilimle tekrarlama sıklıklarının artmasına karşılık genlikleri sabit kalır. Çalışmamıza konu olan referans korona kaynağında da boşalma olayının bu karakteristik özelliğinden yararlanılmaktadır.

2.2. Boşalma (Korona) Başlangıç Geriliminin Hesabı

Burada, Paschen eğrisinden yararlanarak sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde boşalma (korona) başlangıç gerilimi U_1 'nin yaklaşık olarak hesabı yapılmıştır. Bu hesap yapılırken, Şekil 2.5'ten görüldüğü gibi, r yarıçaplı sivri uç yerine r yarıçaplı bir küre gözönüne alınmıştır [28].



Şekil 2.5. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde U_i 'nin hesabı için gözönüne alınan varsayım.

Bu varsayım, $r \ll R$ olması nedeniyle hesaba önemli bir hata getirmeyecektir. Sivri uca uygulanan gerilim yükselttilip U_i boşalma başlangıç gerilimine ulaştığında, sivri uç çevresinde Δ kalınlığındaki bir bölge içinde boşalma görülecektir. Bu durumda, Δ kalınlıklı tabaka uçlarındaki gerilimin bu tabakanın $U_{d\Delta}$ delinme gerilimi değerine eşit olduğu ve Paschen eğrisine uygun olarak bu gerilimin Δ açıklığına karşı düşen delinme gerilimi olduğu söylenebilir. Elektrot düzenine uygulanan U gerilimi de

$$U = \frac{C_1}{C} \cdot U_{d\Delta} \quad (2.1)$$

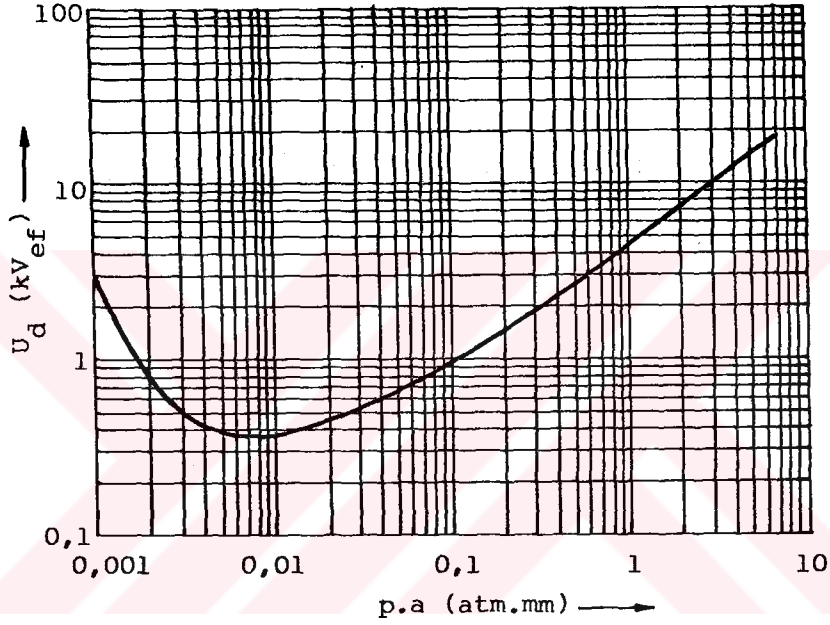
olur. Burada C_1 , r yarıçaplı sivri uç ile $r+\Delta$ yarıçaplı bölge arasındaki kapasite yani korona tabakasının kapasitesi, C elektrot düzeninin kapasitesi, $U_{d\Delta}$ da Δ tabakasının delinme gerilimidir. C_1 ve C kapasiteleri, eşmerkezli küresel elektrot düzeninde kapasite hesabından yararlanılarak, yaklaşık olarak hesaplanabilir. Buna göre

$$\begin{aligned} U &= \frac{\frac{r \cdot (r+\Delta)}{\Delta}}{\frac{R \cdot r}{R-r}} \cdot U_{d\Delta} = \frac{(r+\Delta)}{\Delta} \cdot \frac{(R-r)}{R} \cdot U_{d\Delta} \\ &= \left(1 + \frac{r}{\Delta}\right) \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right) \cdot U_{d\Delta} \end{aligned} \quad (2.2)$$

yazılabilir. Burada $r \ll R$ dolayısıyla $r/R \ll 1$ olduğundan bu bağıntı

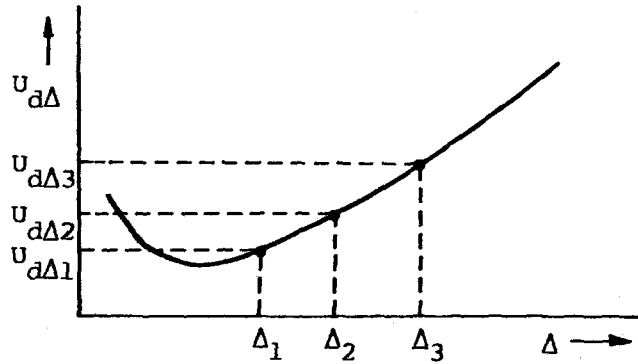
$$U \approx \left(1 + \frac{r}{\Delta}\right) \cdot U_{d\Delta} \quad (2.3)$$

olur. Δ değiştikçe, $U_{d\Delta}$ da Şekil 2.6'da gösterilen, hava için verilmiş olan Paschen eğrisine göre değişecektir. Elektrot düzenine uygulanan U geriliminin minimum bir değerinde boşalma başlayacak ve Δ tabakasında delinme olacaktır.



Şekil 2.6. Atmosfer basıncında hava için Paschen eğrisi [6].

Bu minimum gerilim, Şekil 2.7'den görüldüğü gibi $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots$ açıklıklarına karşı düşen $U_{d\Delta_1}, U_{d\Delta_2}, U_{d\Delta_3}, \dots$ gerilimleri saptanıp



Şekil 2.7. $U_{d\Delta}$ gerilimlerinin bulunması.

(2.3) bağıntısında yerine konularak hesaplanır. Boşalma, bu minimum gerilimde başlayacaktır. Dolayısıyla bu gerilim, boşalma (korona) başlangıç gerilimi U_i 'ye eşit olan gerilimdir.

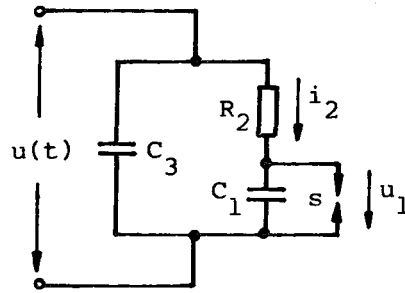
Çizelge 2-1'de, farklı sivri uç yarıçapları için hesaplanan boşalma başlangıç gerilimleri gösterilmiştir.

Çizelge 2-1.

Sivri uç eğrilik yarıçapı $r(\text{mm})$	Hesaplanan boşalma başlangıç gerilimi $U_i (\text{kV}_{\text{ef}})$	Ölçülen boşalma başlangıç gerilimi [27] $U_i (\text{kV}_{\text{ef}})$
0,05	1	1,1
0,1	1,4	1,7
0,5	3,5	3,4
1,0	5,5	4,2

2.3. Kısmi Boşalma Genliği

Alternatif gerilimde sivri uç-düzlem (yarıküre) elektrot düzeni üzerinde darbeli kısmi boşalma (korona) olayı incelenirken Şekil 2.8'deki gibi bir basit eşdeğer devreden yararlanılabilir [29].



Şekil 2.8. Alternatif gerilimde dış kısmi boşalmaları incelemek için basitleştirilmiş eşdeğer devre.

Bu devrede C_1 boşalmanın olduğu gaz (hava) ortamının (korona tabakasının) kapasitesidir. C_1 kondansatörüne paralel bağlı s elektrot aralığında bir atlama olduğunda C_1 boşalacaktır. Devredeki R_2

direnci, sivri uçtan kaynaklanan yüklerin sebep olduğu iletkenliği gösteren bir dirençtir. C_3 de elektrot düzeninin kapasitesidir. Verilen bu eşdeğer devre, yeni elemanlar eklenerek koronanın gerçek fiziksel davranışına daha uygun bir duruma getirilebilir. Örneğin çoğu durumda, boşalma başlangıç gerilimi, gerilimin kutbiyetine bağlıdır. C_1 'e paralel bağlanacak bir diyot elemanı yalnızca tek kutbiyetli periyodik boşalmaların incelenmesine olanak verir. Diyot, boşalmaların olmadığı yarı dalgada C_1 'in boşalmasını sağlar.

Şekil 2.8'de $R_2 \gg 1/\omega C_1$ olduğu varsayılırsa, R_2 den akan akım

$$i_2 = u(t)/R_2 \quad (2.4)$$

olur. Düzene uygulanan gerilim

$$u(t) = U_m \cdot \sin \omega t \quad (2.5)$$

şeklinde ise, C_1 'in uçlarındaki gerilim

$$u_1(t) = \frac{U_m}{\omega C_1 R_2} \cdot \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (2.6)$$

dir. s aralığında bir boşalma olduğunda tüm düzene uygulanan gerilimin tepe değeri, boşalma başlangıç gerilimi (U_i) değerine ulaşmış demektir. Bu durumda U_z , s elektrot aralığının delinme gerilimi olmak üzere boşalma başlangıç gerilimi

$$U_i = \omega C_1 R_2 U_z \quad (2.7)$$

olur. s aralığında bir delinme olduğunda C_1 boşalır. C_1 'in uçlarındaki u_1 gerilimi U_z değerine ulaştığında yeni bir boşalma olur ve olay bu şekilde tekrarlanarak devam eder.

Herbir boşalma sırasında C_1 den boşalan yük miktarı

$$\Delta Q = C_1 \cdot U_z = U_i / \omega R_2 \quad (2.8)$$

dir. Bu yük C_1 'e R_2 üzerinden dış kaynak tarafından verilir. Bir boşalma öncesinde sivri ucun potansiyeli U ve yükü Q ise bir boşalmanın hemen sonrasında potansiyeli $U-\Delta U$, yükü de $Q+\Delta Q$ olur. Green karşılıklık teoreminden,

$$(U - \Delta U)Q = U(Q + \Delta Q) - q.U \quad (2.9)$$

yazılabilir. Burada, C elektrot düzeninin kapasitesi olmak üzere $Q=CU$ olduğundan

$$q = C.\Delta U + \Delta Q \quad (2.10)$$

elde edilir. Kaynak empedansının çok büyük olması durumunda $C.\Delta U$, ΔQ dan çok büyük olur. Bu durumda görünen yük

$$q = C.\Delta U \quad (2.11)$$

ile verilebilir. C kapasitesinin kısmi boşalmalardan etkilenmediği düşünülürse, kısmi boşalma ölçmelerinde ölçü empedansı uçlarındaki gerilim darbesinin ölçülmesi ile kısmi boşalma genliği saptanabilir.

2.4. Boşalma Başlangıç Gerilimine ve Boşalma Yüküne Etkiyen Etkenler

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninden oluşan referans korona kaynağında, boşalma başlangıç gerilimine, boşalma yüküne, boşalma tekrarlama sıklığına ve boşalmaların kararlılığına etkiyen pekçok etken vardır. Bunlar sivri ucun eğrilik yarıçapı, yarıküre elektrodun yarıçapı ve elektrot açıklığı gibi düzenin boyutları ile ilgili etkenler; havanın sıcaklığı, basıncı ve nemi gibi atmosferik etkenler; gerilimin değeri ve frekansı gibi uygulanan gerilimle ilgili etkenler; toz ve yağ gibi kirlenme etkileri ile koşullandırma ve uzun süreli kullanım (eskime) gibi düzenin kullanımı ile ilgili etkenlerdir.

2.4.1. Sivri Uç Eğrilik Yarıçapı

Şekil 1.3 ve 1.4'den de görülebileceği gibi, sivri uç eğrilik yarıçapı büyüdükçe, boşalma başlangıç gerilimi ve boşalma genliği yükselir. Herbir sivri uç eğrilik yarıçapında belli bir boşalma

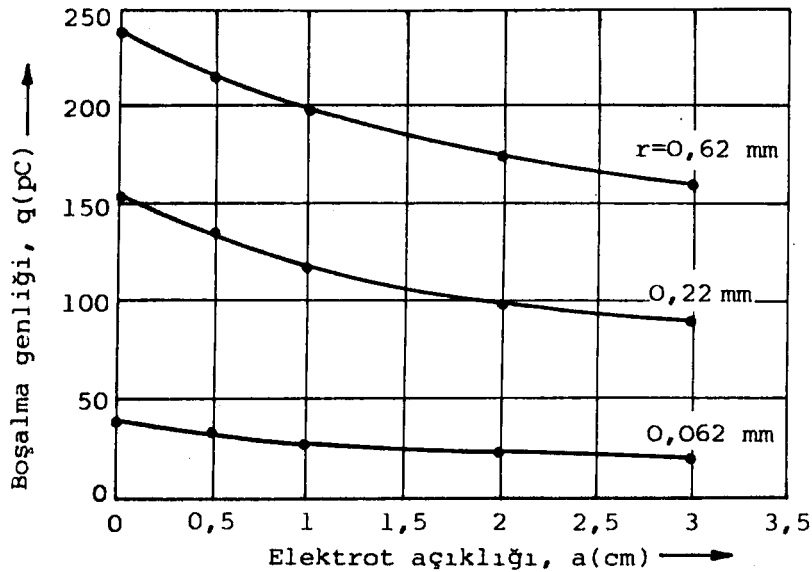
başlangıç gerilimi olmasına karşılık, boşalma genliğinin en küçük ve en büyük olduğu bir aralık söz konusudur. Bu aralıkta boşalma genliği ortalama değerine göre yaklaşık $\pm \% 10$ 'a kadar varan bir değişim gösterebilir.

2.4.2. Yarıküre Yarıçapı

Standartlarda da [1-3] belirtildiği gibi, yarıküre elektrodun yarıçapının boşalma genliğine etkisi yok denecek kadar azdır.

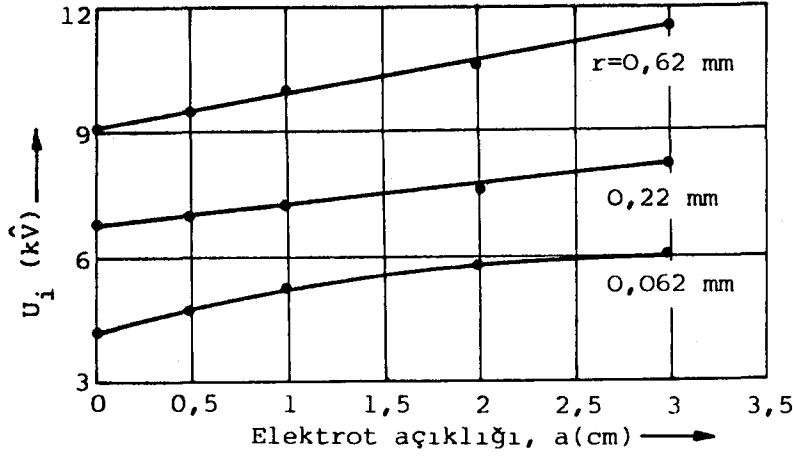
2.4.3. Elektrot Açıklığı

Normal durumda sivri ucun eğrilik yarıçapının merkezi, yarıküre elektrodun merkezindedir. Sivri uçtaki küçük yer değiştirmelerinin boşalma genliğine etkisi azdır. Bununla beraber sivri ucun yarıküreden olan uzaklığı arttıkça yani elektrot açıklığı büyüdükçe boşalma genliği az da olsa azalır. Şekil 2.9'da sabit yarıküre yarıçapı (25 mm) ve 0,062 - 0,22 ve 0,62 mm yarıçaplı sivri uçlar kullanılarak, sivri uç-yarıküre arasındaki açıklığın 3 cm'ye kadar değiştirildiği durumda ölçülen boşalma genliklerinin elektrot açıklığı ile değişimi gösterilmiştir. Şekil 2.9'dan da görüldüğü gibi boşalma genliği, $a=3$ cm de başlangıçtaki değerinden yaklaşık $\% 30$ kadar azalmıştır.



Şekil 2.9. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde elektrot açıklığı ile boşalma genliğinin değişimi [31].

Boşalma genliğinin azalmasına karşılık, elektrot açıklığı büyüdükçe boşalma başlangıç gerilimi yükselir (Şekil 2.10).



Şekil 2.10. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde elektrot açıklığı ile boşalma başlangıç geriliminin değişimi [31].

2.4.4. Gerilim

50 Hz'lik alternatif gerilimde, U_i boşalma (korona) başlangıç gerilimi ile $1,4 U_i$ aralığındaki gerilim değerlerinde boşalmalar sabit genlikli ve karardlıdır. Uygulanan gerilim $1,4 U_i$ yi aştığında ardışık boşalmalar arasındaki karardlılık azalıp, boşalma genliğinde değişimler gözlenebilir [31]. Öneri olarak elektrot düzeninin boşalma başlangıç değerine yakın ve sabit bir değerde kullanılmasının uygun olacağı söylenebilir.

2.4.5. Frekans

Hogg ve Walley [31], özel olarak düzenledikleri devre ve ölçü sistemi ile uygulanan gerilimin frekansını 50-1250 Hz aralığında değiştirmişlerdir. Boşalma genliğindeki değişimin, bu frekans aralığında $\pm \% 3$ 'den küçük kaldığını saptamışlardır.

2.4.6. Nem

Hem boşalma genliğini, hem de boşalma karardlılığını etkileyen önemli bir etken, elektrot düzenin içinde bulunduğu hava ortamının bağıl nemidir. Boşalmaların genlik ve şekli, nemle önemli ölçüde

değişir. Bağıl nemin en az % 35 ile % 80 arasında hatta mümkünse % 50 ile % 70 arasında tutulması gerektiği Kreuger [6,30] tarafından belirtilmektedir.

2.4.7. Kirlenme

Toz, yağ, yağ buharı, elle dokunma gibi düzeni kirleten etkenler kaynağın boşalma davranışına kötü yönde etkir.

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeni, uzun süreli çalışmalarda, nem ve kirlenme gibi etkenlerden etkilenmemesi için kapalı bir kap içine yerleştirilmelidir. Ancak bir gün gibi, bağıl nemdeki değişimin önemli olmayacağı, kısa süreli deneylerde elektrot düzeni kapalı bir kap içinde olmadan da kullanılabilir.

2.4.8. Koşullandırma

Düzenin kullanılmadan önce veya kullanımı sırasında çalıştırılacağı koşullara gelene kadar geçirileceği veya geçirdiği işlemlere koşullandırma adı verilir. Örneğin düzene ilk gerilim uygulanması veya çalışma geriliminin değiştirilmesi durumlarında kararlı boşalmaların oluşumuna kadar belirli bir koşullandırma süresinin geçmesi gerekir. Bu süre içinde özellikle boşalma tekrarlaması sıklığında değişimler görülebilir. Yapılan deneylerden 3 dakikalık bir koşullandırma süresi sonunda boşalmaların kararlı duruma geldiği görülmüştür.

2.4.9. Uzun Süreli Kullanım (Eskime)

Uzun süreli kullanım sonucu, boşalmalarla sivri ucun aşınması ve kararması boşalma başlangıç gerilimini ve boşalma genliğini azaltır. Örneğin elektrot düzenine $1,3 U_1$ değerinde 50 Hz'lik bir alternatif gerilim uygulandığında, boşalma genliğinde 30 dakika sonrasında farkedilir, 4 saat sonrasında ise % 30'a varan bir azalma gözlenmiştir. Elektrot düzeni birkaç saat gerilim uygulanmadan bırakılıp, sonra tekrar gerilim uygulandığında boşalma başlangıç geriliminde ilk durumdaki değerine göre yaklaşık % 20 düşme görülmüştür. Sivri ucun temizlenip parlatılması veya yenilenmesi ile tekrar yaklaşık başlangıçtaki boşalma değerlerine ulaşılabilir. Bu bakımdan

bu elektrot düzeni ile çalışılırken sivri ucun sık sık kontrolu ve parlatılması yararlı olur.

Burada sözü edilen etkenlerden bazıları ile sözü edilmeyen sıcaklık ve basınç gibi etkenleri incelemek ve irdellemek amacıyla doğru ve alternatif gerilimde deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar Bölüm 6 ve 7'de anlatılmıştır.



BÖLÜM 3

ELEKTROSTATİK ALAN DAĞILIMININ ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

Bir elektrot düzenine gerilim uygulandığında, elektrotlar arasında bir elektriksel potansiyel ve alan dağılımı oluşur. Bu alan dağılımı, elektrot düzeninde elektrotların belirli bir simetrisi olduğunda kuramsal olarak kolaylıkla incelenebilir. Ancak belirli bir simetrinin bulunmadığı, daha karmaşık durumlarda problemin kuramsal olarak incelenmesinde zorluklarla karşılaşılır. Bu gibi durumlarda, sonlu farklar, sonlu elemanlar ve yük benzeşimi gibi sayısal (nümerik) yöntemlerden, veya konform dönüşüm, çizimsel (grafik) veya deneysel yöntemler gibi analog yöntemlerden yararlanılabilir.

Sayısal yöntemlerle elektrostatik alanın incelenmesinde, Laplace ve Poisson denklemlerinin bilgisayar yardımıyla çözülmesinden yararlanılır. Sayısal yöntemlerde incelenen duruma ilişkin büyüklüklerin ve varsayımların yeterliliği ve doğru tanımlanması önemlidir.

Analog yöntemler ise genellikle uzun uğraşlar gerektiren, her elektrot düzenine uygulanması kolay olmayan yöntemlerdir. Örneğin konform dönüşüm yönteminde, analitik fonksiyonların özelliklerine dayanılarak, karışık alan şekilleri, bir dönüşüm fonksiyonu yardımıyla daha basit alan şekillerine dönüştürülerek incelenir [32,33]. Çizimsel yöntemlerde ise elektriksel alanın her noktasında birbirine dik olan eşpotansiyel ve alan çizgilerinin, belli bilgi ve deneyimden yararlanılarak çizilmesi gerekir [33]. Deneysel yöntemlerde, gerçek alana ilişkin fiziksel büyüklüklerden, biri veya birkaçı doğrudan ölçülmelidir. Ancak bazı durumlarda, alan büyüklüklerinin doğrudan ölçülmesi sorun olabilmektedir. Bu nedenle, özellikle çok büyük ve çok küçük boyutlardaki elektrot düzenlerinde gerçek düzen yerine, ölçekli bir modeli üzerinde çalışılır. Bu şekilde kolaylıkla, tehlikesizce ve alçak gerilimlerde, özel aygıtlar gerektirmeden

ölçmeler yapılabilir. Bu amaçla, iki ve üç boyutlu alan problemlerinin incelenmesinde kullanılan deneysel yöntemlerden ikisi, elektrolitik banyo yöntemi ve yarıiletken kağıt yöntemidir [33-35].

Burada, korona boşalmalı ayar kaynağı olarak kullanılan sivri uç-yarıküre (SYK) elektrot düzeninde potansiyel ve alan dağılımları incelenecektir. Düzen, şekli nedeniyle analitik yöntemlerle incelenmesi kolay olmayan bir düzendir. Bu bakımdan, SYK elektrot düzeninde alan dağılımı, Bölüm 4'de, sayısal yöntemlerden sonlu elemanlar yöntemi ile; Bölüm 5'de ise deneysel yöntemlerden elektrolitik banyo yöntemi ve yarıiletken kağıt yöntemi yardımıyla incelenecektir.

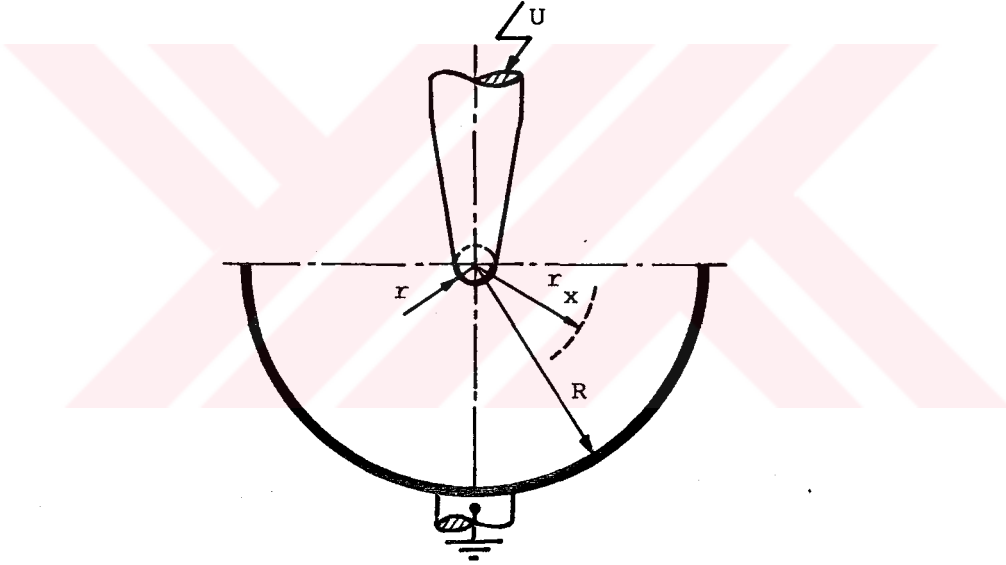
Bu bölümde, sivri uç eğrilik yarıçapı yanında yarıküre yarıçapı çok büyük ($R \gg r$) olduğundan, sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin, yaklaşık bir eşmerkezli yarıküresel elektrot düzeni veya bir küre-düzlem elektrot düzeni gibi gözönüne alınabileceği düşünülmüş ve bu varsayımlara göre alan incelemeleri yapılmıştır. Ayrıca SYK elektrot düzeninin potansiyel ve alan dağılımı, sferoidal ve paraboloidal koordinatlarda da incelenmiştir.

Alan ve potansiyel incelemelerinde, elektrot boyutları ve gerilim değeri olarak SYK elektrot düzeni için standartlarda [1-3] verilen yarıçaplar ve boşalma başlangıç gerilimleri esas alınmıştır. Buna göre incelemelerde, yarıküre yarıçapı, $R=25$ mm, sabit olmak üzere, sivri uç eğrilik yarıçapı olarak $r=0,05$; $0,2$ ve $0,5$ mm değerleri, gerilim değeri olarak U_1 , söz konusu eğrilik yarıçaplarına uygun olarak, sırasıyla $U_1=3,8$; $6,5$ ve $8,5$ kV boşalma başlangıç gerilimi değerleri kullanılmıştır.

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeni için yapılmış olan alan dağılımı incelemelerinden, alan ile boşalma büyüklükleri arasındaki ilişkilerin çıkarılması amaçlanmıştır.

3.1. Eşmerkezli Yarıküresel Elektrot Düzeni Varsayımı

Sivri uç-yarıküre (SYK) elektrot düzeninde sivri ucun eğrilik yarıçapının merkezi ile yarıküre elektrodun merkezi aynıdır (eştir). Ayrıca bu merkezden geçen ve sivri ucun simetri eksenine dik olan bir düzleme göre, düzen, eşmerkezli iki yarım küre şeklindedir. Özellikle sivri ucun simetri eksenini doğrultusunda sivri ucun ucu ile yarıküre arasındaki bölgede alanın, yaklaşık, eşmerkezli küresel elektrot düzenininkine benzeyeceği açıktır. Bu durum nedeniyle, r eğrilik yarıçaplı sivri uç ve R yarıçaplı yarıküreden oluşan bir SYK elektrot düzenindeki alanın, Şekil 3.1'den de görüleceği gibi iç küre yarıçapı r ve dış küre yarıçapı R olan eşmerkezli iki yarıküresel elektrot düzenindeki gibi incelenebileceği varsayılmıştır.



Şekil 3.1. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin eşmerkezli yarıküresel elektrot düzeni varsayımı.

Bu varsayım nedeniyle eşmerkezli küresel elektrot düzenine ilişkin potansiyel ve alan bağıntılarının, SYK elektrot düzeni için de yaklaşık geçerli olacağı söylenebilir. Buna göre, ortamın düzgün ve yüksüz bir ortam olduğu ve potansiyelin de yalnızca r_x koordinatına bağlı olarak değiştiği gözönüne alınarak, küresel koordinat sisteminde Laplace denklemi,

$$\frac{d^2V}{dr_x^2} + \frac{2}{r_x} \frac{dV}{dr_x} = 0 \quad (3.1)$$

şeklinde yazılabilir. Laplace denkleminin çözümünden, $r \leq r_x \leq R$ olmak üzere, $r_x=r$ için $V=U$ ve $r_x=R$ için $V=0$ sınır koşulları kullanılarak potansiyel için

$$V = \frac{r}{R-r} \left(\frac{R}{r_x} - 1 \right) U \quad (3.2)$$

bağıntısı; elektrik alanı için de $E = -dV/dr_x$ den

$$E = \frac{R \cdot r}{R-r} \frac{1}{r_x^2} U \quad (3.3)$$

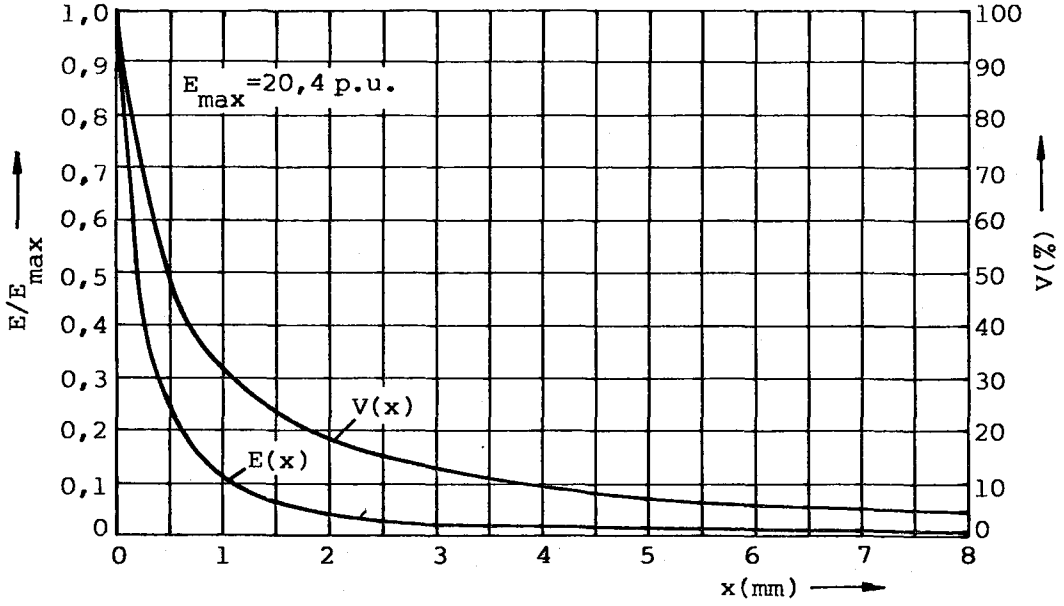
bağıntısı elde edilir. $r_x=r$ için iç küre üzerindeki (sivri ucun ucundaki) alan şiddeti, yani alan şiddetinin en büyük değeri ($E_{\max}$),

$$E_{\max} = \frac{U}{\frac{r}{R} (R-r)} \quad (3.4)$$

olarak bulunur.

Şekil 3.2'de, örnek olarak, sivri uç eğrilik yarıçapı $r=0,5$ mm ve yarıküre yarıçapı $R=25$ mm olan bir sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin, eşmerkezli küresel elektrot düzeni varsayımına dayanılarak, (3.2) ve (3.3) bağıntıları yardımıyla elde edilen, potansiyel ve elektriksel alan dağılımlarının iç elektrottan uzaklıkla değişimleri gösterilmiştir. Burada alan şiddeti değerleri birim değer (p.u.) cinsinden verilmiştir. Alan şiddetinin birim değerleri, kV cinsinden uygulanan gerilim değeri ile çarpılarak kV/cm cinsinden karşılıkları bulunabilir [$E(\text{kV/cm}) = E(\text{p.u.}) \times U(\text{kV})$]. Örneğin $r=0,5$ mm ve $R=25$ mm olan sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde maksimum alan şiddeti 20,4 p.u. olarak hesaplanmıştır. Bu düzen için boşalma başlangıç gerilimi Çizelge 1.1'den de görülebileceği gibi, standartlarda 8,5 kV olarak verilmektedir. O halde bu gerilimde sivri uça $20,4 \text{ p.u.} \times 8,5 \text{ kV} = 173,4 \text{ kV/cm}$ 'lik bir alan şiddeti oluşacağı söylenebilir.

İncelenen elektrot düzeninde olduğu gibi, düzgün olmayan alanda havanın delinme dayanımı, sivri ucun eğrilik yarıçapına bağlı olarak değişir. Burada inceleme kolaylığı bakımından havanın delinme



Şekil 3.2. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde eşmerkezli küresel elektrot düzeni varsayımına göre potansiyel ve alan dağılımlarının sivri uçtan uzaklıkla değişimi.

dayanımı için ortalama 30 kV/cm alınmıştır. Buna göre Şekil 3.2'den, boşalmanın sivri uçtan alan şiddetinin havada ortalama 30 kV/cm'ye düştüğü bölgeye kadar sürdüğü gözönüne alınarak, korona tabakası kalınlığının yaklaşık 0,7 mm olduğu ve korona tabakasında uygulanan gerilimin % 59,5 unun düştüğü bulunmuştur.

İncelenen durumda sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin kapasitesinin, eşmerkezli küresel elektrot düzeninin kapasitesinin yarısı olacağı varsayımı yapılabilir. Buna göre gözönüne alınan SYK elektrot düzeninin kapasitesi

$$C \approx 2 \pi \epsilon \frac{R \cdot r}{R-r} \quad (3.5)$$

bağıntısından, hava için $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 = 8,86 \text{ pF/m}$ alınarak yaklaşık 0,0284 pF olarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3-1'de eşmerkezli küresel elektrot düzeni varsayımına göre yapılan hesapların sonuçları topluca gösterilmiştir. Buradan R sabit iken eğrilik yarıçapı arttıkça maksimum alan şiddetinin azalacağı buna karşılık boşalma başlangıç geriliminin ve kapasitesinin

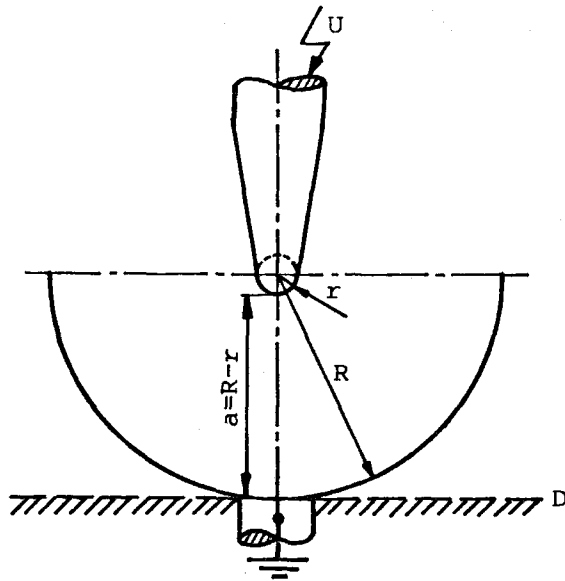
artacağı görülmektedir.

Çizelge 3-1. SYK elektrot düzeninde eşmerkezli yarı-küresel elektrot düzeni varsayımına göre hesaplanan maksimum alan şiddeti ve kapasite değerleri. $R=25 \text{ mm}$

Sivri uç eğrilik yarıçapı $r(\text{mm})$	Gerilim $(U=U_i)$ $U(\text{kV})$	Maksimum alan şiddeti E_{max}		Kapasite $C(\text{pF})$
		(p.u.)	(kV/cm)	
0,05	3,8	200,4	761,52	0,002789
0,2	6,5	50,4	327,60	0,011223
0,5	8,5	20,4	173,47	0,028402

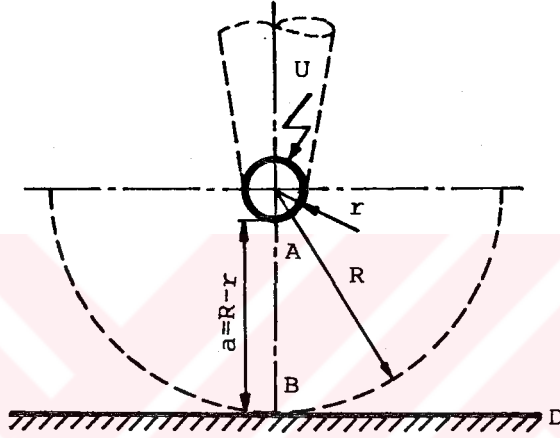
3.2. Küre-Düzlem Elektrot Düzeni Varsayımı

Bu varsayımın yapılmasında yüksek gerilim tekniğinde alan incelemelerinde kullanılan yaklaşık hesap yönteminden esinlenilmiştir [32,33]. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde $r \ll R$ olması nedeniyle, r eğrilik yarıçaplı sivri uç yerine r yarıçaplı bir küre, R yarıçaplı yarıküre yerine de sivri uçtan (küreden) $R-r=a$ uzaklığında bir düzlem elektrot alınarak alan incelemesi yapılabileceği varsayılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin küre-düzlem elektrot düzeni varsayımı.

Bilindiği gibi küre-düzlem elektrot düzeninde yaklaşık alan hesabı, düzeni, iç yarıçapı r , dış yarıçapı $r+a=R$ olan bir eşmerkezli küresel elektrot düzeni gibi veya başka bir yol olarak, yarıçapları r ye, aralarındaki açıklık $2(R-r)=a$ 'ya eşit olan karşılıklı iki küreden oluşan simetrik düzende, kürelerden biri ile simetri düzlemi gözönüne alınarak yapılmaktadır. Burada maksimum alan şiddetinin iki elektrot arasında en dar bölgede ve eğrilik yarıçapı küçük olan elektrot (küre) üzerinde bulunduğu ve değerinin karşı elektrodun eğrilik yarıçapına az bağlı olduğu gözönünde bulundurulmuştur.



Şekil 3.4. Küre-düzlem elektrot düzeni.

Şekil 3.4'den $E_{\max}$ 'ın her iki elektroda dik olan AB doğrusunun küreyi kestiği A noktasında olacağı kolayca anlaşılır. Diğer taraftan, $E_{\max}$ 'ın karşı elektrodun eğrilik yarıçapına az bağlı olması, R yarıçaplı yarıküre yerine düzlem veya düzlem yerine R yarıçaplı küre almanın özellikle maksimum alan şiddetini değiştirmeyeceğini göstermektedir. Fakat, alanın her noktasında meydana gelecek alan değişikliğinin aynı olmayacağı ve özellikle AB doğru parçası üzerinde meydana gelen değişikliğin diğer noktalara göre çok daha az olacağı açıktır.

Eşmerkezli küresel elektrot düzeninde maksimum alan şiddeti

$$E_{\max} = \frac{r+a}{r \cdot a} \cdot U = \frac{R}{r(R-r)} \cdot U = \frac{U}{a \cdot \eta_{\text{küre}}} \quad (3.6)$$

ve faydalanma faktörü

$$\eta_{\text{küre}} = \frac{r}{r+a} = \frac{r}{R} \quad (3.7)$$

olduğundan $k < 1$ bir düzeltme faktörü olmak üzere, küre-düzlem elektrot düzeninde maksimum alan şiddeti

$$E_{\text{max}} = k \cdot \frac{r+a}{r \cdot a} U = k \cdot \frac{R}{r(R-r)} U = k \cdot \frac{U}{a \cdot \eta} \quad (3.8)$$

ve faydalanma faktörü de

$$\eta \approx \frac{r}{a} = \frac{r}{R-r} \quad (3.9)$$

olur. Burada k düzeltme faktörü

$$k = \frac{\eta_{\text{küre}}}{\eta} \approx \frac{a}{r+a} = \frac{R-r}{R} < 1 \quad (3.10)$$

dir. Genelde k , 0,88-0,97 arasında değişmesine karşılık gözönüne alınan durumda $R \gg r$ olması nedeniyle bire çok yakın değerler alır. Bu düzen için yaklaşık kapasite değeri de

$$C = k \cdot 2 \pi \epsilon \cdot \frac{R \cdot r}{R-r} \quad (3.11)$$

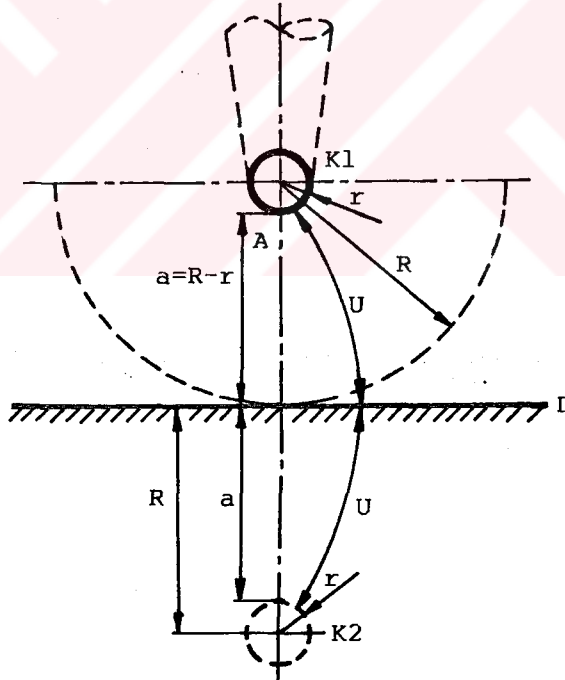
bağıntısından hesaplanabilir.

Çizelge 3-2. Küre-düzlem elektrot düzeni varsayımına göre hesaplanan k , E_{max} ve C değerleri. $R=25$ mm

Sivri uç eğrilik yarıçapı $r(\text{mm})$	Gerilim $(U=U_i)$ $U(\text{kV})$	Düzeltilme faktörü k	Maksimum alan şiddeti E_{max}		Kapasite $C(\text{pF})$
			(p.u.)	(kV/cm)	
0,05	3,8	0,998	200	760	0,002783
0,2	6,5	0,992	50	325	0,011133
0,5	8,5	0,980	20	170	0,027834

Çizelge 3-2'de sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin küre-düzlem elektrot düzeni gibi varsayılarak incelenmesinde (3.8), (3.10) ve (3.11) bağıntılarından yararlanarak hesaplanan düzeltme faktörleri, maksimum alan şiddetleri ve kapasite değerleri gösterilmiştir.

Küre-düzlem elektrot düzeni varsayımını incelemenin bir başka yolu da karşılıklı, eşit yarıçaplı iki küreden oluşan simetrik küresel elektrot düzeninde, iki küre arasındaki simetri düzleminin, potansiyeli sıfır olan eşpotansiyel bir yüzey olduğunu gözönüne alarak, söz konusu simetrik düzeni, Şekil 3.5'de görüldüğü gibi, birbirinin simetrisi olan iki ayrı küre-düzlem düzenine ayırarak incelemektir. Bu işlemde alan şekli ve dolayısıyla maksimum alan şiddetinin değeri değişmez. Bu da bize, küre-düzlem elektrot düzeninin maksimum alan şiddeti ve kapasitesinin, simetrik düzene ilişkin bağıntılardan gidilerek bulunabileceğini gösterir.

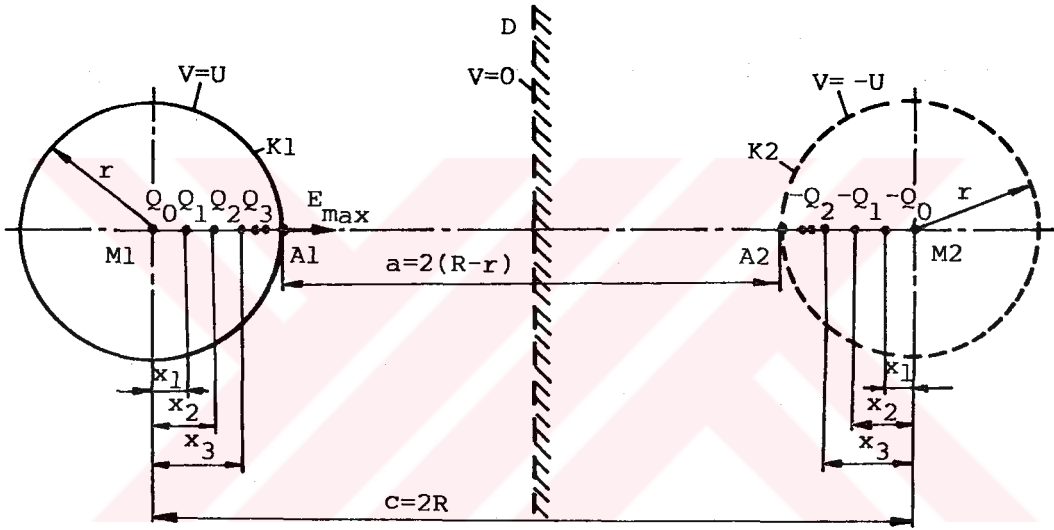


Şekil 3.5. Küre-düzlem elektrot düzeni.

Karşılıklı eşit yarıçaplı iki küreden oluşan simetrik düzende elektrik alan dağılımı analitik olarak hesaplanabilir. Bu çalışmada, bu düzene ilişkin alan hesapları görüntü yükleri yöntemine göre yapılmıştır. Literatürde, sayısal yöntemlerden birisi olan yük benzeşim

yöntemi ile ve bipolar koordinatlardan yararlanılarak yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır [36,37].

Görüntü yükleri yöntemine göre karşılıklı eşit yarıçaplı iki küre arasındaki alan dağılımı hesabı, bir noktasal yükün alanından yararlanılarak, kürelerin merkezlerinde ve merkezlerinden belirli uzaklıklarda bulunan ve değerleri giderek azalan karşılıklı noktasal yüklerin alanlarından gidilerek bulunur. Bu hesapta küreler arasındaki simetri düzlemi sıfır potansiyelindedir ve alan dağılımı bu düzleme göre simetriktir. Şekil 3.6'da, yarıçapları r , merkezleri



Şekil 3.6. Karşılıklı eşit yarıçaplı iki küre veya küre-düzlem elektrot düzeni.

arasındaki uzaklık c olan karşılıklı iki kürede, $Q_0, Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ noktasal yükleri K1 küresi içindeki, $-Q_0, -Q_1, -Q_2, \dots, -Q_n$ noktasal yükleri de K2 küresi içindeki görüntü yükleridir. Şekildeki $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ uzaklıkları, yüklerin K1 ve K2 küre merkezlerine (M1 ve M2 ye) olan uzaklıklarıdır. Noktasal yüklerin ve uzaklıklarının değerleri,

$$\begin{aligned} Q_0 &= 4\pi\epsilon r U \\ x_0 &= 0 \end{aligned} \quad (3.11)$$

olmak üzere

$$Q_1 = Q_0 \frac{r}{c}, Q_2 = Q_1 \cdot \frac{r}{c-x_1}, Q_3 = Q_2 \cdot \frac{r}{c-x_2}, \dots$$

$$\dots, Q_n = Q_{n-1} \cdot \frac{r}{(c-x_{n-1})} \text{ veya}$$

$$Q_n = 4\pi\epsilon_r U \prod_{k=1}^n \left(\frac{r}{c-x_{k-1}} \right) \quad (3.12)$$

ve

$$x_1 = \frac{r^2}{c}, x_2 = \frac{r^2}{c-x_1}, x_3 = \frac{r^2}{c-x_2}, \dots, x_n = \frac{r^2}{c-x_{n-1}} \quad (3.13)$$

dir. Burada $n=1,2,3,\dots$ olup ϵ_r ortamın bağıl dielektrik sabiti ve $\epsilon_0 = 8,86 \text{ pF/m}$ olmak üzere $\epsilon = \epsilon_r \cdot \epsilon_0$ dır.

İki küre arasında herhangi bir noktadaki potansiyel ve alan şiddeti değeri, bu noktanın küre merkezlerine olan uzaklığının ve yük değerlerinin bilinmesi ile hesaplanabilir. Küreler arasında, A1 ve A2 noktalarını birleştiren doğru parçası üzerindeki bir noktadaki elektrik alan şiddeti,

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{4\pi\epsilon} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_n}{(r_x - x_n)^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_n}{(c - r_x - x_n)^2} \right] \\ &= r \cdot U \sum_{n=0}^{\infty} \left[\prod_{k=1}^n \left(\frac{r}{c-x_{k-1}} \right) \right] \cdot \left[\frac{1}{(r_x - x_n)^2} + \frac{1}{(c - r_x - x_n)^2} \right] \end{aligned} \quad (3.14)$$

bağıntısından, potansiyel de $V = -\int E dr + K$ bağıntısından

$$\begin{aligned} V &= \frac{1}{4\pi\epsilon} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_n}{(r_x - x_n)} - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_n}{(c - r_x - x_n)} \right] \\ &= r \cdot U \sum_{n=0}^{\infty} \left[\prod_{k=1}^n \left(\frac{r}{c-x_{k-1}} \right) \right] \cdot \left[\frac{1}{(r_x - x_n)} - \frac{1}{(c - r_x - x_n)} \right] \end{aligned} \quad (3.15)$$

şeklinde bulunur. (3.15) potansiyel bağıntısında K integral sabiti, çözüm sırasında $r_x = R$ için $V=0$ (D düzlemi) koşulları kullanılarak $K=0$ bulunduğundan görünmemektedir.

İncelenen elektrot düzeninde maksimum alan şiddeti, kürelerin birbirine en yakın olduğu noktalarda, Şekil 3.6'daki A1 ve A2 noktalarında meydana gelir. Maksimum alan şiddeti, (3.14) bağıntısında $r_x=r$ (küre yarıçapı; eğrilik yarıçapı) yazılarak

$$E_{\max} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left[\sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_n}{(r-x_n)^2} + \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_n}{(c-r-x_n)^2} \right]$$
$$= r.U \sum_{n=0}^{\infty} \left[\prod_{k=1}^n \left(\frac{r}{c-x_{k-1}} \right) \right] \cdot \left[\frac{1}{(r-x_n)^2} + \frac{1}{(c-r-x_n)^2} \right] \quad (3.16)$$

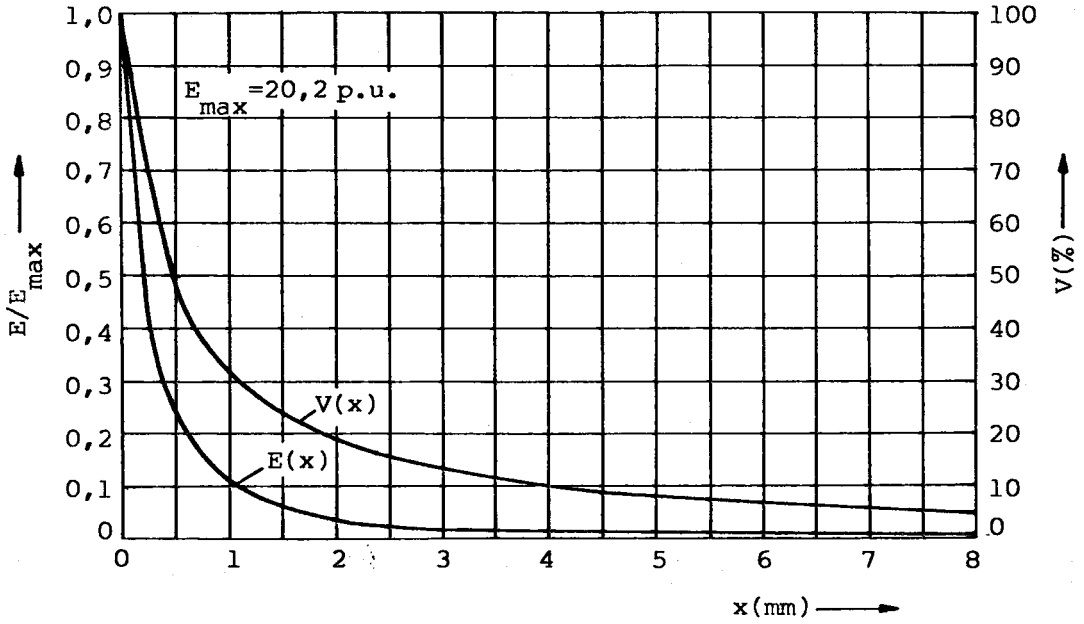
şeklinde bulunur. Maksimum alan şiddetinin değeri, potansiyeli sıfır olan D simetri düzlemi ile kürelerden birinin yani düzenin küre-düzlem elektrot düzeni gibi alınması durumunda da değişmez.

İki küre arasındaki kapasite dolayısıyla küre-düzlem düzeninin kapasitesi Gauss yasasına göre hesaplanabilir. Görüntü yükleri yönteminden yararlanarak küre-düzlem elektrot düzeninin kapasitesi

$$C = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{Q_n}{2U}$$
$$= 2\pi\epsilon r \sum_{n=0}^{\infty} \left[\prod_{k=1}^n \left(\frac{r}{c-x_{k-1}} \right) \right] \quad (3.17)$$

olarak bulunur. (3.14), (3.15), (3.16) ve (3.17) bağıntılarında $n=1,2,3,\dots$; $x_0=0$; $Q_0=4\pi\epsilon r U$ olup x_n değerleri (3.13) bağıntısından, Q_n değerleri de (3.12) bağıntısından bulunan değerlerdir. Ayrıca bu bağıntılarda r küre yarıçapını, ϵ ortamın dielektrik sabitini göstermektedir.

Şekil 3.7'de, örnek olarak, sivri uç eğrilik yarıçapı $r=0,5$ mm ve yarıküre yarıçapı $R=25$ mm olan bir sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin, küre-düzlem elektrot düzeni varsayımına dayanılarak, (3.14) ve (3.15) bağıntıları yardımıyla elde edilen, potansiyel ve elektriksel alan dağılımlarının küreden (sivri uçtan) uzaklıkla değişimleri gösterilmiştir. Bu örnekte maksimum alan şiddeti 20,2 p.u. veya $U=U_1=8,5$ kV için $20,2 \text{ p.u.} \times 8,5 \text{ kV} = 171,7 \text{ kV/cm}$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.7. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde küre-düzlem elektrot düzeni varsayımına göre potansiyel ve alan dağılımlarının sivri uçtan uzaklıkla değişimi.

Şekil 3.7'den alan şiddetinin sivri uçtan 0,7 mm uzaklıkta 30 kV/cm'ye düştüğü yani korona tabakası kalınlığının yaklaşık olarak 0,7 mm olduğu söylenebilir. Alan şiddetinin 30 kV/cm olduğu noktada potansiyel de % 41'e düşmüştür.

Çizelge 3-3. Küre-düzlem elektrot düzeninde simetrik küre düzeninin alanından yararlanılarak hesaplanan maksimum alan şiddeti ve kapasite değerleri. $R=25$ mm

Sivri uç eğrilik yarıçapı r (mm)	Gerilim $(U=U_i)$ U (kV)	Maksimum alan şiddeti $E_{\max}$		Kapasite C (pF)
		(p.u.)	(kV/cm)	
0,05	3,8	200,2	760,76	0,002786
0,2	6,5	50,2	326,3	0,011178
0,5	8,5	20,2	171,7	0,028115

Çizelge 3-3'de sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin küre-düzlem elektrot düzeni varsayımının, karşılıklı eşit yarıçaplı iki küreden

oluşan bir simetrik küresel elektrot düzeninin alanından yararlanarak incelenmesine ilişkin hesap sonuçları verilmiştir. Bu hesaplarda da r , R ve $U(=U_1)$ için Çizelge 1-1'de verilen değerler esas alınmıştır.

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeni için buraya kadar yapılan eşmerkezli yarıküresel elektrot düzeni veya küre-düzlem elektrot düzeni varsayımları ile bulunan maksimum alan şiddeti ve kapasite değerleri birbirleri ile uyumludur. Bu sonuç, yapılan varsayımların özellikle maksimum alan şiddetlerinin hesabı bakımından yeterli doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.

3.3. Koordinat Sistemlerinde İncelemeler

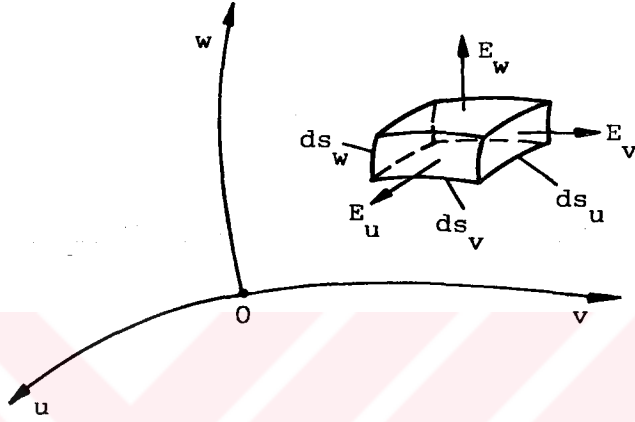
Buraya kadar oldukça basit fakat özellikle maksimum alan şiddetinin hesabı bakımından yeterli sayılabilecek varsayımlarla incelemeler yapılmıştır. Bu varsayımlarda incelenen elektrot düzeninin biçimi,örneğin sivri uç elektrodun yarıküre şeklindeki ucu dışındaki kısımları veya yarıküre elektrodun kenar etkileri gözönüne alınmamıştır.

Bilindiği gibi, potansiyel ve alan incelemelerinde, incelemeyi karmaşıklıktan kurtarmak amacıyla, incelenen düzene uygun bir koordinat sistemi ile çalışılır. Bunun için de koordinat yüzeylerinden biri,incelenecek düzenin sınır yüzeyine uyacak bir koordinat sistemi seçilmelidir. Bizim problemimizde sivri uç, biçimi bakımından bir hiperboloid veya bir paraboloid oldukça benzerlik göstermektedir. Bu benzerlikten yararlanarak, sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin alanı, sivri uç, örneğin hiperboloid gibi düşünülürse uzamış sferoidal koordinatlarda, paraboloid gibi düşünülürse de paraboloidal koordinatlarda incelenebilir. Bu incelemelerde Laplace denkleminin, söz konusu koordinat sistemlerinde yazılması ve çözülmesi gerekmektedir. Burada bu işlemin yapılmasında genel koordinatlardan yararlanılmıştır [38-42].

Bir noktanın genel koordinatları u , v , w ile gösterilirse, örneğin genel koordinatlar cinsinden kartezyen koordinatlar

$$x = x(u,v,w) \quad , \quad y = y(u,v,w) \quad , \quad z = z(u,v,w) \quad (3.18)$$

şeklinde yazılır. Burada, $u=\text{sabit}$, $v=\text{sabit}$ veya $w=\text{sabit}$ olarak koordinat yüzeyleri elde edilebilir. Bu koordinat yüzeylerinin arakesiti (u,v,w) noktasıdır ve genelde bu yüzeyler birbirine dik olan (ortogonal) yüzeylerdir. Genel koordinatlarda Şekil 3.8'de görülen hacimsel



Şekil 3.8. Genel koordinatlarda bir hacimsel eleman.

elemanın kenar uzunlukları

$$ds_u = h_u \cdot du \quad , \quad ds_v = h_v \cdot dv \quad , \quad ds_w = h_w \cdot dw \quad (3.19)$$

şeklinde yazılır. Burada, genel koordinatların fonksiyonu olan h katsayıları, metrik katsayılar olarak adlandırılır ve

$$h_u = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial u}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial u}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial u}\right)^2} \quad (3.20,a)$$

$$h_v = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial v}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial v}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial v}\right)^2} \quad (3.20,b)$$

$$h_w = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{\partial w}\right)^2 + \left(\frac{\partial y}{\partial w}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial w}\right)^2} \quad (3.20,c)$$

bağıntılarından bulunurlar.

(3.20,a-c) bağıntıları ile verilen metrik katsayılar kullanılarak $E = -\text{grad } V$ nin bileşenleri

$$E_u = -\text{grad}_u V = -\frac{1}{h_u} \frac{\partial V}{\partial u} \quad (3.21,a)$$

$$E_v = -\text{grad}_v V = -\frac{1}{h_v} \frac{\partial V}{\partial v} \quad (3.21,b)$$

$$E_w = -\text{grad}_w V = -\frac{1}{h_w} \frac{\partial V}{\partial w} \quad (3.21,c)$$

bağıntılarından, potansiyel fonksiyonunun Laplasyeni de

$$\Delta V = \frac{1}{h_u h_v h_w} \left[\frac{\partial}{\partial u} \left(\frac{h_v \cdot h_w}{h_u} \cdot \frac{\partial V}{\partial u} \right) + \frac{\partial}{\partial v} \left(\frac{h_w \cdot h_u}{h_v} \cdot \frac{\partial V}{\partial v} \right) + \frac{\partial}{\partial w} \left(\frac{h_u \cdot h_v}{h_w} \cdot \frac{\partial V}{\partial w} \right) \right] \quad (3.22)$$

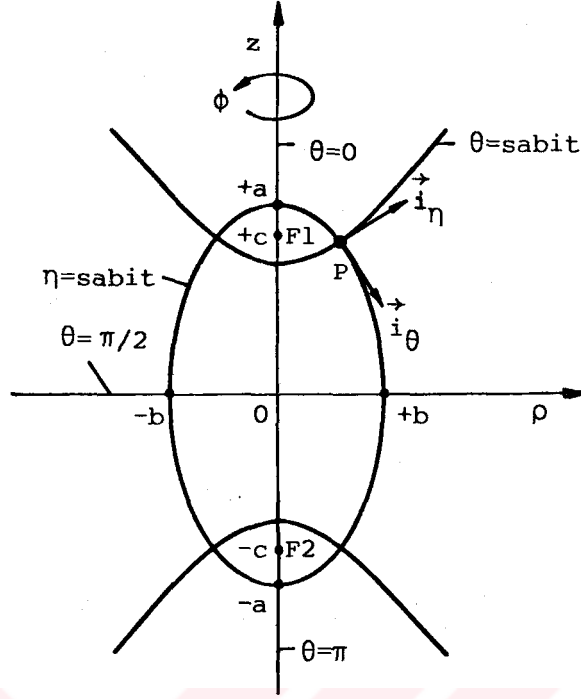
bağıntısından hesaplanabilir.

3.3.1. Sferoidal Koordinatlarda Hesap

Sferoidal koordinatlar, eş odaklı elipsleri eksenleri etrafında döndürerek elde edilir. Dönme, elipsin küçük eksen etrafında olursa yassılaştırmış (oblate) sferoidal koordinatlar, büyük eksen etrafında olursa uzamış (prolate) sferoidal koordinatlar söz konusu olur. Burada problemimize uygunluğu bakımından uzamış sferoidal koordinatlar ile çalışılmıştır. Şekil 3.9'da bu koordinat sistemi gösterilmiştir. Bu koordinat sisteminin değişkenleri ve değişim aralıkları

$$\begin{aligned} u &= \eta, & 0 \leq \eta < \infty \\ v &= \theta, & 0 \leq \theta \leq \pi \\ w &= \phi, & 0 \leq \phi < 2\pi \end{aligned} \quad (3.23)$$

dir. Uzamış sferoidal koordinat sisteminde bir noktanın koordinatları



Şekil 3.9. Uzamış sferoidal koordinat sistemi.

$$x = c.\sinh\eta.\sin\theta.\cos\phi \quad (3.24,a)$$

$$y = c.\sinh\eta.\sin\theta.\sin\phi \quad (3.24,b)$$

$$z = c.\cosh\eta.\cos\theta \quad (3.24,c)$$

ve birim vektörleri $\vec{i}_\eta, \vec{i}_\theta, \vec{i}_\phi$ dir. Burada

$$\rho = c.\sinh\eta.\sin\theta \quad (3.25)$$

alınırsa bağıntılar

$$x = \rho \cos\phi \quad (3.26,a)$$

$$y = \rho \sin\phi \quad (3.26,b)$$

$$z = c.\cosh\eta.\cos\theta \quad (3.26,c)$$

şeklinde basitleşir. ρ ve z için yazılan bağıntılardan

$$\frac{z^2}{(c.\cosh\eta)^2} + \frac{\rho^2}{(c.\sinh\eta)^2} = 1 \quad (3.27,a)$$

$$\frac{z^2}{(c.\cos \theta)^2} - \frac{\rho^2}{(c.\sin \theta)^2} = 1 \quad (3.27,b)$$

bulunur. Bu bağıntılardan η =sabit için eşodaklı elipsler ve θ =sabit için de eşodaklı hiperboller elde edilir. Elipsler, z-ekseni (büyük eksen) etrafında döndürüldüğünde uzamış (prolate) elipsoidler elde edilir. Elipsoidler $\eta=0$ için odakları birleştiren doğruya ve $\eta \rightarrow \infty$ için küreye dönüşürler. Hiperboller z-ekseni etrafında döndürerek hiperboloidler elde edilir. Hiperboloidler $\theta=0$ ve $\theta=\pi$ için z-ekseninin odakların üstünde ve altında kalan kısımlarına dejenere olurlar ve $\theta=\pi/2$ için $z=0$ düzlemi durumuna gelirler. Bu koordinat sisteminde (3.20) ve (3.24) bağıntıları kullanılarak metrik katsayılar

$$\begin{aligned} h_\eta &= h_\theta = c \sqrt{\cosh^2 \eta - \cos^2 \theta} = c \sqrt{\sinh^2 \eta + \sin^2 \theta} \\ h_\phi &= \rho = c.\sinh \eta.\sin \theta \end{aligned} \quad (3.28)$$

olarak hesaplanır.

(3.21) ve (3.22) bağıntılarında (3.28) bağıntıları gözönüne alınırsa

$$\begin{aligned} \vec{\text{grad}} V &= \frac{1}{c \sqrt{\sinh^2 \eta + \sin^2 \theta}} \left(\frac{\partial V}{\partial \eta} \vec{i}_\eta + \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{i}_\theta \right) + \\ &+ \frac{1}{c.\sinh \eta.\sin \theta} \frac{\partial V}{\partial \phi} \vec{i}_\phi \end{aligned} \quad (3.29)$$

ve Laplace denklemi

$$\begin{aligned} \Delta V &= \frac{1}{c^2(\sinh^2 \eta + \sin^2 \theta)} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial \eta^2} + \coth \eta. \frac{\partial V}{\partial \eta} + \frac{\partial^2 V}{\partial \theta^2} + \right. \\ &\left. + \cot \theta. \frac{\partial V}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{c^2.\sinh^2 \eta.\sin^2 \theta} \cdot \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \end{aligned} \quad (3.30)$$

olarak bulunur.

İncelediğimiz elektrot düzeni aksenal simetrik bir düzendir ve alan sadece θ değişkenine bağlı olarak değişmektedir. Bu durumda (3.30) bağıntısı ile verilen Laplace denklemi

$$\frac{d^2V}{d\theta^2} + \cot \theta \cdot \frac{dV}{d\theta} = 0 \quad (3.31)$$

elektrik alanı da

$$E = - \frac{1}{c \cdot \sqrt{\sinh^2 \eta + \sin^2 \theta}} \cdot \frac{dV}{d\theta} \quad (3.32)$$

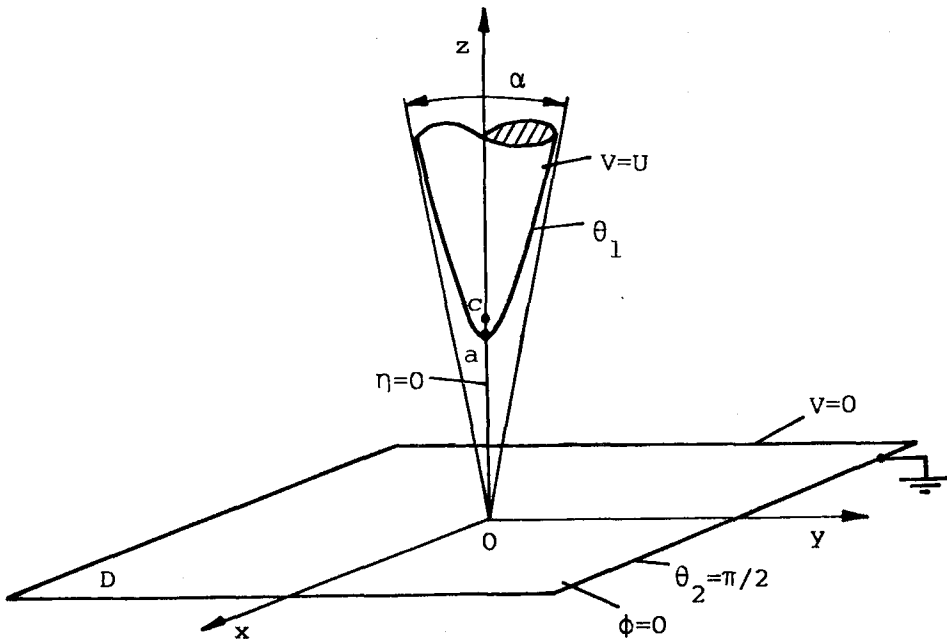
şeklini alır. Bu Laplace denkleminin genel çözümü

$$V = A + B \cdot \ln[\cot(\theta/2)] \quad (3.33,a)$$

veya

$$V = A + B \cdot \tanh^{-1}(\cos \theta) \quad (3.33,b)$$

dir. Burada A ve B integrasyon sabitleri sınır koşullarından yararlanılarak bulunur. İncelediğimiz elektrot düzenine ilişkin alan dağılımı, uzamış sferoidal koordinatlardan yararlanılarak, karşılıklı iki hiperboloidin (sivri ucun) veya Şekil 3.10'da görüldüğü gibi bir



Şekil 3.10. Bir hiperboloid sivri uç-düzlem elektrot düzeni.

hiperboloid sivri uç-düzlem elektrot düzeninin alan dağılımından gidilerek bulunabilir. Burada hiperboloid sivri uç-düzlem durumu gözönüne alınmıştır. Buna göre sınır koşullarının $\theta=\theta_1$ için $V=U$ ve $\theta=\theta_2=\pi/2$ için $V=0$ olduğu gözönünde tutulursa

$$A = 0 \quad (3.34,a)$$

$$B = U/\ln[\cot(\theta_1/2)] \quad (3.34,b)$$

veya

$$B = U/\tanh^{-1}(\cos \theta_1) \quad (3.34,c)$$

değerleri bulunur. Bunlar (3.33,a) veya (3.33,b) bağıntısında yerine yazılarak, potansiyel için

$$V = U \cdot \frac{\ln[\cot(\theta/2)]}{\ln[\cot(\theta_1/2)]} \quad (3.35,a)$$

veya

$$V = U \cdot \frac{\tanh^{-1}(\cos \theta)}{\tanh^{-1}(\cos \theta_1)} \quad (3.35,b)$$

bağıntısı; alan şiddeti için de (3.32) bağıntısı yardımıyla

$$E = \frac{U}{c \cdot \sqrt{\sinh^2 \eta + \sin^2 \theta} \cdot \sin \theta \cdot \tanh^{-1}(\cos \theta_1)} \quad (3.36)$$

bağıntısı elde edilir. $\eta=0$ için z-ekseni üzerinde hiperboloid sivri uç ile düzlem arasındaki alan dağılımı

$$E = \frac{U}{c \cdot \sin^2 \theta \cdot \tanh^{-1}(\cos \theta_1)} \quad (3.37)$$

bağıntısından bulunur. $\theta=\theta_1$ ve $\eta=0$ için hiperboloid sivri ucun ucundaki alan şiddeti yani maksimum alan şiddeti

$$E_{\max} = \frac{U}{c \cdot \sin^2 \theta_1 \cdot \tanh^{-1}(\cos \theta_1)} \quad (3.38)$$

elde edilir. Bu bağıntılardaki c yarıodak uzaklığı, a elektrot açıklığı cinsinden

$$c = a/\cos \theta_1 \quad (3.39)$$

bağıntısından bulunabilir. c 'nin bu değeri (3.38) bağıntısında yerine yazılırsa

$$E_{\max} = \frac{U \cdot \cos \theta_1}{a \cdot \sin^2 \theta_1 \cdot \tanh^{-1}(\cos \theta_1)} \quad (3.40,a)$$

veya

$$E_{\max} = \frac{U}{a \cdot \sin \theta_1 \cdot \tan \theta_1 \cdot \tanh^{-1}(\cos \theta_1)} \quad (3.40,b)$$

olur.

Hiperboloidin asimtotları arasındaki α açısı sivri ucun tepe açısı olarak alınırsa $\theta_1 = \alpha/2$ olur. Buna göre sivri ucun tepe açısı ile potansiyel ve alan dağılımlarının değişimleri, (3.35), (3.36) ve (3.40) bağıntılarından yararlanılarak, potansiyel

$$V = U \cdot \frac{\ln[\cot(\theta/2)]}{\ln[\cot(\alpha/4)]} \quad (3.41,a)$$

veya

$$V = U \cdot \frac{\tanh^{-1}(\cos \theta)}{\tanh^{-1}[\cos(\alpha/2)]} \quad (3.41,b)$$

bağıntısından, alan şiddeti

$$E = \frac{U}{[a/\cos(\alpha/2)] \cdot \sqrt{\sinh^2 \eta + \sin^2 \theta} \cdot \sin \theta \cdot \tanh^{-1}[\cos(\alpha/2)]} \quad (3.42)$$

bağıntısından ve maksimum alan şiddeti

$$E_{\max} = \frac{U}{a} \cdot \frac{\cos(\alpha/2)}{\sin^2(\alpha/2) \cdot \tanh^{-1}[\cos(\alpha/2)]} \quad (3.43)$$

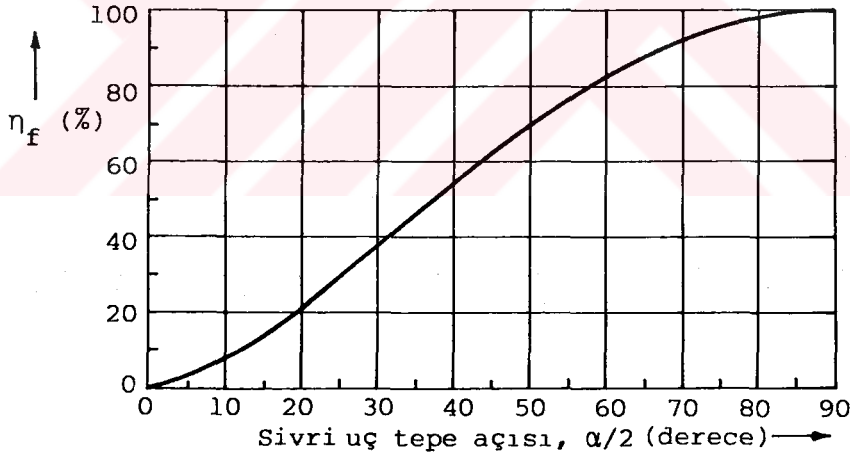
bağıntısından bulunabilir. (3.43) bağıntısı η_f elektrot düzeninin faydalanma faktörü cinsinden

$$E_{\max} = \frac{U}{a} \cdot \frac{1}{\eta_f} \quad (3.44)$$

şeklinde yazılabilir. Burada η_f faydalanma faktörü

$$\eta_f = \frac{\sin^2(\alpha/2) \cdot \tanh^{-1}[\cos(\alpha/2)]}{\cos(\alpha/2)} \quad (3.45)$$

olur. Şekil 3.11'de, hiperboloid sivri uç-düzlem elektrot düzeninde η_f 'nin sivri uç tepe açısıyla değişimi gösterilmiştir. Bu şekilden, sivri ucun tepe açısı büyüdükçe, faydalanma faktörünün büyüdüğü görülmektedir. (3.44) bağıntısına göre η_f 'deki bu değişimin tersine $E_{\max}$ küçülecektir. Bu da, sivri uçlu elektrotlarda tepe açısının önemini göstermektedir. Bu durum, incelediğimiz elektrot düzeni gibi sivri uçlu elektrodu bulunan düzenlerde düzene ilişkin boyutlar verilirken sivri uç tepe açısının da verilmesinin veya bilinmesinin yararlı olacağını gösterir.



Şekil 3.11. Hiperboloid sivri uç-düzlem elektrot düzeninde η_f 'nin sivri uç tepe açısıyla değişimi.

Buraya kadar sferoidal koordinat sisteminin değişkenleri cinsinden yazılmış olan bağıntılar incelemekte olduğumuz sivri uç-yarı-küre elektrot düzeninin, sivri uç eğrilik yarıçapı r ve yarıküre yarıçapı R cinsinden yeniden yazılacaktır. Uzamış sferoidal koordinatlarda $z=c \cdot \cosh \eta \cdot \cos \theta$ dır. z -ekseni üzerinde $\eta=0$ için $z=c \cdot \cos \theta$ olacağından $\theta=\theta_1$ için $z_1=c \cdot \cos \theta_1=a$ olacaktır. $a=R-r$ ve $c=\sqrt{a \cdot R}$

olduğundan

$$\cos \theta_1 = \sqrt{(R-r)/R} = \cos (\alpha/2) \quad (3.46,a)$$

$$\theta_1 = \cos^{-1} \sqrt{(R-r)/R} = \alpha/2 \quad (3.46,b)$$

olur. $\theta=\theta_2=\pi/2$ için $z_2=0$ bulunur. (3.46) değeri, (3.40) veya (3.43) bağıntısında yerine yazılırsa $E_{\max}$ için

$$E_{\max} = \frac{U}{a} \cdot \frac{\sqrt{(R-r)/R}}{\frac{r}{R} \cdot \tanh^{-1} \sqrt{(R-r)/R}} \quad (3.47)$$

veya düzenin geometrik karakteristiği $p=R/r$ cinsinden

$$E_{\max} = \frac{U}{a} \cdot \frac{\sqrt{p \cdot (p-1)}}{\tanh^{-1} \sqrt{(p-1)/p}} = \frac{U}{a \cdot \eta_f} \quad (3.48)$$

bağıntısı elde edilir. (3.48) bağıntısındaki η_f faydalanma faktörü

$$\eta_f = \frac{\tanh^{-1} \sqrt{(p-1)/p}}{\sqrt{p \cdot (p-1)}} = \frac{\ln (\sqrt{p} + \sqrt{p-1})}{\sqrt{p \cdot (p-1)}} \quad (3.49)$$

dir. (3.47) bağıntısında $a=R-r$ yerine yazılır ve düzenlenirse, $E_{\max}$

$$E_{\max} = \frac{U}{r \cdot \sqrt{(R-r)/R} \cdot \tanh^{-1} \sqrt{(R-r)/R}} \quad (3.50)$$

şeklinde de ifade edilebilir.

$z=c \cdot \cos \theta = \sqrt{R \cdot (R-r)} \cdot \cos \theta$ olduğu gözönüne alınarak, (3.46) bağıntısıyla verilen θ_1 değeri, (3.35,b) ve (3.37) bağıntılarında yerine yazılırsa z -ekseni (kritik alan çizgisi) boyunca potansiyel dağılımını incelemek için,

$$V = U \cdot \frac{\tanh^{-1} (z/\sqrt{R \cdot (R-r)})}{\tanh^{-1} \sqrt{(R-r)/R}} \quad (3.51,a)$$

veya

$$V = U \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot \ln \left[\frac{\sqrt{R \cdot (R-r)} + z}{\sqrt{R \cdot (R-r)} - z} \right]}{\ln (\sqrt{R/r} + \sqrt{(R-r)/r})} \quad (3.51, b)$$

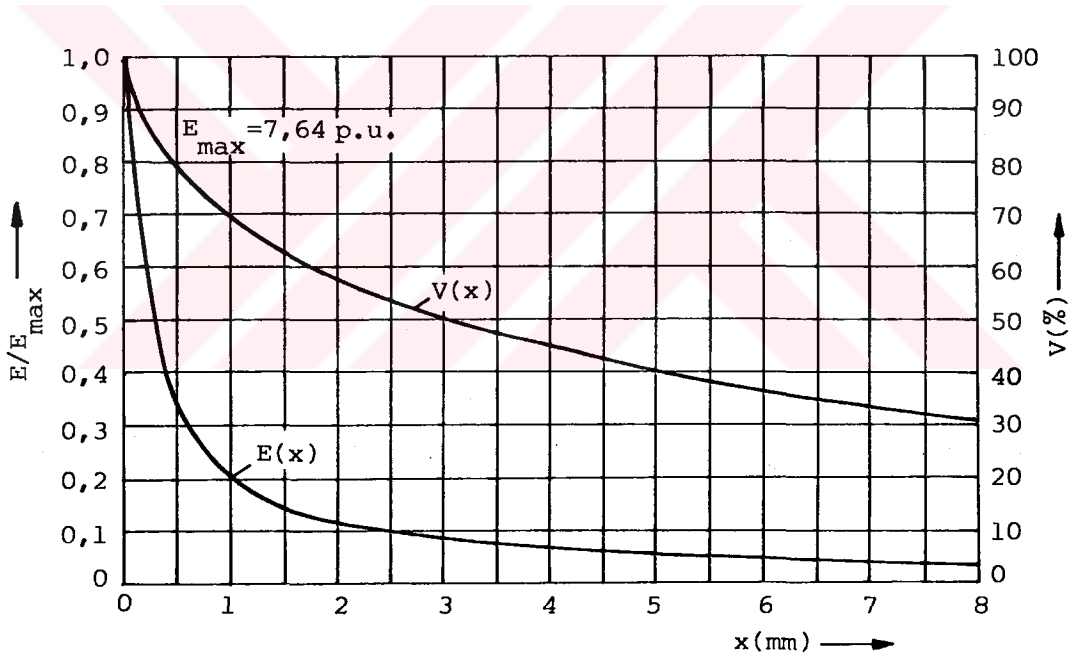
bağıntıları ve elektrik alanı için de

$$E = U / \left(\sqrt{R \cdot (R-r)} - \frac{z^2}{\sqrt{R \cdot (R-r)}} \right) \cdot \tanh^{-1} \sqrt{(R-r)/R} \quad (3.52, a)$$

veya

$$E = U / \left(\sqrt{R \cdot (R-r)} - \frac{z^2}{\sqrt{R \cdot (R-r)}} \right) \cdot \ln (\sqrt{R/r} + \sqrt{(R-r)/r}) \quad (3.52, b)$$

bağıntıları elde edilir.



Şekil 3.12. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde, uzamış sferoidal koordinatlarda çözümle bulunan potansiyel ve alan dağılımlarının sivri uçtan uzaklıkla değişimi.

Şekil 3.12'de örnek olarak, sivri uç eğrilik yarıçapı $r=0,5 \text{ mm}$ ve yarıküre yarıçapı $R=25 \text{ mm}$ olan bir sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin uzamış sferoidal koordinatlarda analitik çözümünden yararlanılarak, (3.51) ve (3.52) bağıntıları yardımıyla elde edilen potansiyel ve elektriksel alan dağılımlarının sivri uçtan uzaklıkla

değişimleri gösterilmiştir. Bu örnekte maksimum alan şiddeti 7,64 p.u. veya $U=U_i=8,5$ kV için $7,64 \text{ p.u.} \times 8,5 \text{ kV} = 64,94 \text{ kV/cm}$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.12'den alan şiddetinin sivri uçtan 0,29 mm uzaklıkta 30 kV/cm'ye düştüğü yani korona tabakası kalınlığının yaklaşık olarak 0,29 mm olduğu söylenebilir. Alan şiddetinin 30 kV/cm olduğu noktada potansiyelde % 85'e düşmüştür.

Çizelge 3-4'de sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin uzamış sferoidal koordinatlarda incelenmesine ilişkin hesap sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3-4. Uzamış sferoidal koordinatlarda hesaplanan $E_{\max}$ değerleri. $R=25$ mm

Sivri uç eğrilik yarıçapı $r(\text{mm})$	Gerilim $(U=U_i)$ $U(\text{kV})$	Maksimum alan şiddeti $E_{\max}$	
		(p.u.)	(kV/cm)
0,05	3,8	52,68	200,18
0,2	6,5	16,17	105,11
0,5	8,5	7,64	64,94

3.3.2. Paraboloidal Koordinatlarda Hesap

Paraboloidal koordinatlar, parabolleri eksenleri etrafında döndürerek elde edilir. Şekil 3.13'de bu koordinat sistemi gösterilmiştir. Bu koordinat sisteminin değişkenleri ve değişim aralıkları

$$u = \eta \quad , \quad 0 \leq \eta < \infty$$

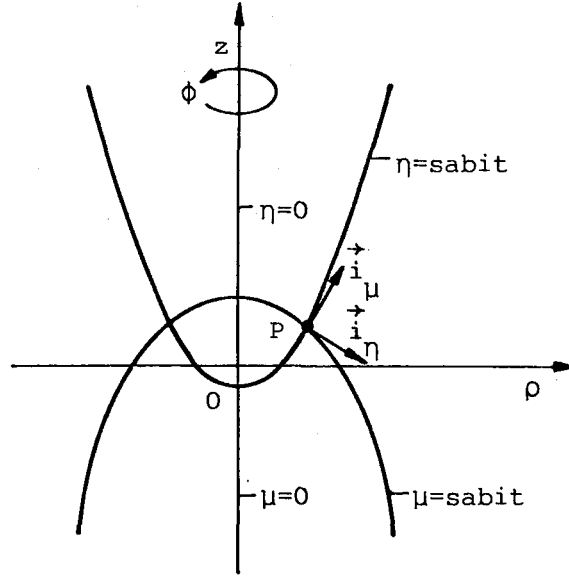
$$v = \mu \quad , \quad 0 \leq \mu < \infty$$

$$w = \phi \quad , \quad 0 \leq \phi < 2\pi \quad (3.53)$$

dir. Bu koordinat sisteminde bir noktanın koordinatları

$$x = \eta \cdot \mu \cdot \cos \phi \quad (3.54,a)$$

$$y = \eta \cdot \mu \cdot \sin \phi \quad (3.54,b)$$



Şekil 3.13. Paraboloidal koordinat sistemi.

$$z = \frac{1}{2} (\eta^2 - \mu^2) \quad (3.54,c)$$

ve birim vektörleri $\vec{i}_\eta$, $\vec{i}_\mu$, $\vec{i}_\phi$ dir. Burada

$$\rho = \eta \cdot \mu \quad (3.55)$$

alınırsa bağıntılar

$$x = \rho \cdot \cos \phi \quad (3.56,a)$$

$$y = \rho \cdot \sin \phi \quad (3.56,b)$$

$$z = \frac{1}{2} (\eta^2 - \mu^2) \quad (3.56,c)$$

şeklinde olur. $\eta=\text{sabit}$ ve $\mu=\text{sabit}$ için odakları koordinat sisteminin orijininde bulunan paraboller elde edilir. Bu koordinatlarda da metrik katsayılar, (3.20) bağıntısından

$$h_\eta = h_\mu = \sqrt{\eta^2 + \mu^2}, \quad h_\phi = \rho = \eta \cdot \mu \quad (3.57)$$

elde edilir. Paraboloidal koordinatlarda, (3.21) ve (3.22) bağıntılarında (3.57) bağıntısı gözönüne alınırsa

$$\vec{\text{grad}} V = \frac{1}{\sqrt{\eta^2 + \mu^2}} \left(\frac{\partial V}{\partial \eta} \vec{i}_\eta + \frac{\partial V}{\partial \mu} \vec{i}_\mu \right) + \frac{1}{\eta \cdot \mu} \frac{\partial V}{\partial \phi} \vec{i}_\phi \quad (3.58)$$

ve Laplace denklemi

$$\Delta V = \frac{1}{\eta^2 + \mu^2} \left(\frac{\partial^2 V}{\partial \eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{\partial V}{\partial \eta} + \frac{\partial^2 V}{\partial \mu^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial V}{\partial \mu} \right) + \frac{1}{\eta^2 \cdot \mu^2} \frac{\partial^2 V}{\partial \phi^2} = 0 \quad (3.59)$$

olarak bulunur.

İncelediğimiz elektrot düzeni, aksenal simetrik bir düzendir ve sivri ucun biçimine göre sadece η değişkenine bağlı olarak alan değişimi göstermektedir. Bu durumda (3.59) bağıntısı ile verilen Laplace denklemi

$$\frac{d^2 V}{d\eta^2} + \frac{1}{\eta} \frac{dV}{d\eta} = 0 \quad (3.60)$$

elektrik alanı da

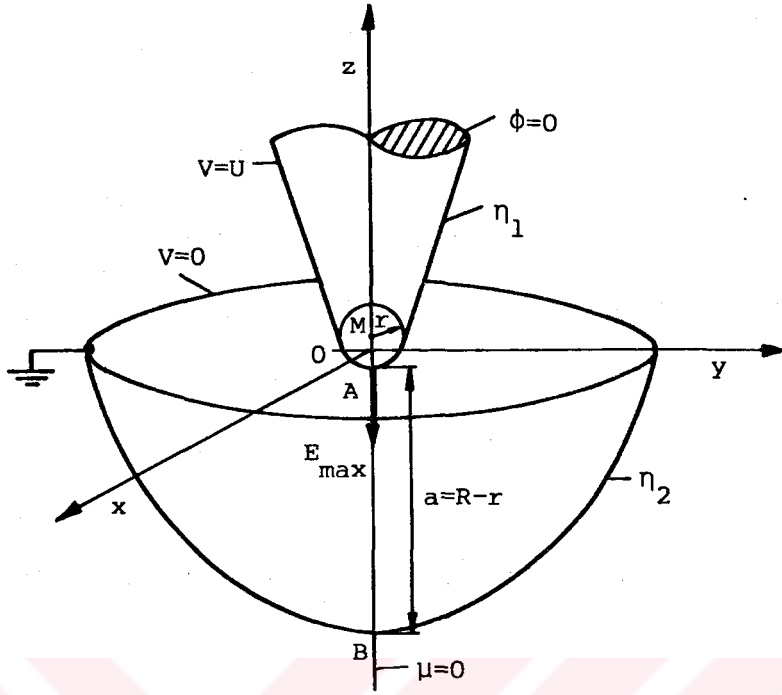
$$E = - \frac{1}{\sqrt{\eta^2 + \mu^2}} \cdot \frac{dV}{d\eta} \quad (3.61)$$

şeklini alır. Bu Laplace denkleminin genel çözümü

$$V = A + B \cdot \ln \eta \quad (3.62)$$

dir. Burada A ve B integrasyon sabitleri sınır koşullarından yararlanılarak bulunur. İncelediğimiz elektrot düzenine ilişkin alan dağılımı, geometrik biçim benzerliği bakımından, paraboloidal koordinatlardan yararlanılarak, Şekil 3.14'de görüldüğü gibi eşodaklı iki paraboloid elektrodun alan dağılımından gidilerek bulunabilir. Burada sınır koşullarının $\eta = \eta_1$ için $V = U$ ve $\eta = \eta_2$ için $V = 0$ olduğu gözönünde tutulursa

$$A = \frac{U}{\ln(\eta_2/\eta_1)} \cdot \ln \eta_2, \quad B = - \frac{U}{\ln(\eta_2/\eta_1)} \quad (3.63)$$



Şekil 3.14. Eşodaklı paraboloidal elektrot düzeni.

değerleri bulunur. Bunlar (3.62) bağıntısında yerine yazılarak, potansiyel için

$$V = \frac{U}{\ln(\eta_2/\eta_1)} \cdot \ln(\eta_2/\eta) \quad (3.64)$$

bağıntısı elde edilir. Alan şiddeti için de (3.61) bağıntısı yardımıyla

$$E = \frac{U}{\sqrt{\eta^2 + \mu^2} \cdot \eta \cdot \ln(\eta_2/\eta_1)} \quad (3.65)$$

bağıntısı bulunur. $\eta = \eta_1$ ve $\mu = 0$ için paraboloid iç elektrot ucundaki maksimum elektrik alan şiddeti

$$E_{\max} = \frac{U}{\eta_1^2 \cdot \ln(\eta_2/\eta_1)} \quad (3.66)$$

elde edilir. Bu düzende a elektrot açıklığı,

$$a = \frac{1}{2} (\eta_2^2 - \eta_1^2) \quad (3.67)$$

dir. $E_{\max}$ için (3.67) bağıntısı kullanılarak

$$E_{\max} = \frac{U}{a} \cdot \frac{[(\eta_2/\eta_1)^2 - 1]}{2 \ln (\eta_2/\eta_1)} \quad (3.68)$$

yazılabilir.

(3.68) bağıntısı, sivri ucun eğrilik yarıçapı r ve yarıküre yarıçapı R cinsinden, Şekil 3.13 gözönüne alınarak, yeniden yazılacaktır. Burada paraboloid elektrotlar eşodaklıdır ve odakları koordinat sisteminin orijinindedir. Buna göre, uç eğrilik yarıçapı, sivri uç eğrilik yarıçapı r ye eşit paraboloidte, eğrilik küresinin M merkezi orijinden $r/2$ uzaklıkta olur. Paraboloidal koordinatlarda $z = (\eta^2 - \mu^2)/2$ dir ve $\mu=0$ için $z = \eta^2/2$ olacağından iç paraboloid elektrodun A noktasında (ucunda)

$$|z_1| = \eta_1^2 / 2 = r/2 \quad (3.69)$$

ve a elektrot açıklığı gerçek durumda $a=R-r$ olduğuna göre, dış paraboloid elektrodun B noktasında

$$|z_2| = \frac{\eta_2^2}{2} = a + \frac{r}{2} = R - \frac{r}{2} \quad (3.70)$$

olur. (3.69) ve (3.70) bağıntılarından η_1 ve η_2 değerleri bulunur ve (3.68) bağıntısında yerine yazılırsa, $E_{\max}$ için

$$E_{\max} = \frac{U}{a} \cdot \frac{2(\frac{R}{r} - 1)}{\ln (2\frac{R}{r} - 1)} \quad (3.71)$$

veya düzenin geometrik karakteristiği $p=R/r$ cinsinden

$$E_{\max} = \frac{U}{a} \cdot \frac{2(p-1)}{\ln(2p-1)} = \frac{U}{a \cdot \eta_f} \quad (3.72)$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntıda η_f , düzenin faydalanma faktörüdür ve

$$\eta_f = \frac{\ln(2p-1)}{2(p-1)} \quad (3.73)$$

dir. (3.71) bağıntısı, $a=R-r$ yazılarak

$$E_{\max} = \frac{U}{\frac{r}{2} \cdot \ln\left(\frac{2R}{r} - 1\right)} \quad (3.74)$$

şeklinde de ifade edilebilir.

η_1 ve η_2 değerlerinin (3.64) ve (3.65) bağıntılarında yerine yazılmasıyla, z eksenı boyunca potansiyel dağılımını incelemek için

$$V = \frac{U}{\ln\left(\frac{2R}{r} - 1\right)} \cdot \ln\left(\frac{2R-r}{2z}\right) \quad (3.75)$$

bağıntısı ve elektrik alanı için de

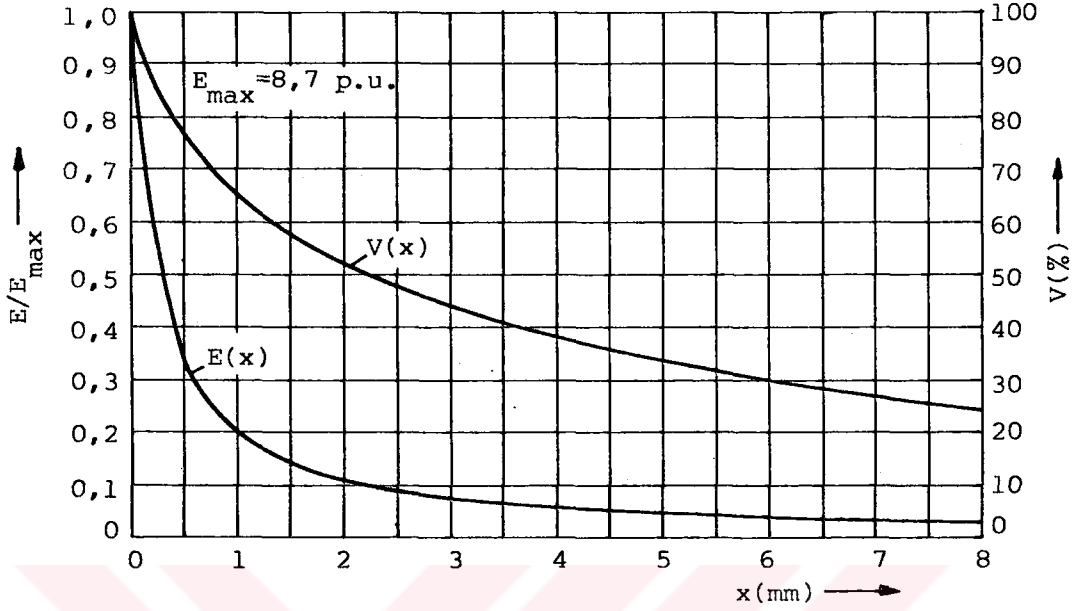
$$E = \frac{U}{z \cdot \ln\left(\frac{2R}{r} - 1\right)} \quad (3.76)$$

bağıntısı elde edilir.

Şekil 3.15'te, örnek olarak, sivri uç eğrilik yarıçapı $r=0,5$ mm ve yarıküre yarıçapı $R=25$ mm olan bir sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin, paraboloidal koordinatlarda analitik çözümünden yararlanılarak, (3.75) ve (3.76) bağıntıları yardımıyla elde edilen potansiyel ve elektriksel alan dağılımlarının sivri uçtan uzaklıkla değişimleri gösterilmiştir. Bu örnekte maksimum alan şiddeti 8,7 p.u. veya $U=U_i=8,5$ kV için $8,7 \text{ p.u.} \times 8,5 \text{ kV} = 73,95 \text{ kV/cm}$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.15'den alan şiddetinin sivri uçtan 0,37 mm uzaklıkta 30 kV/cm'ye düştüğü yani korona tabakası kalınlığının yaklaşık olarak 0,37 mm olduğu söylenebilir. Alan şiddetinin 30 kV/cm olduğu

noktada potansiyel de %80'e düşmüştür.



Şekil 3.15. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde, paraboloidal koordinatlarda çözümlenerek bulunan potansiyel ve alan dağılımlarının sivri uçtan uzaklıkla değişimi.

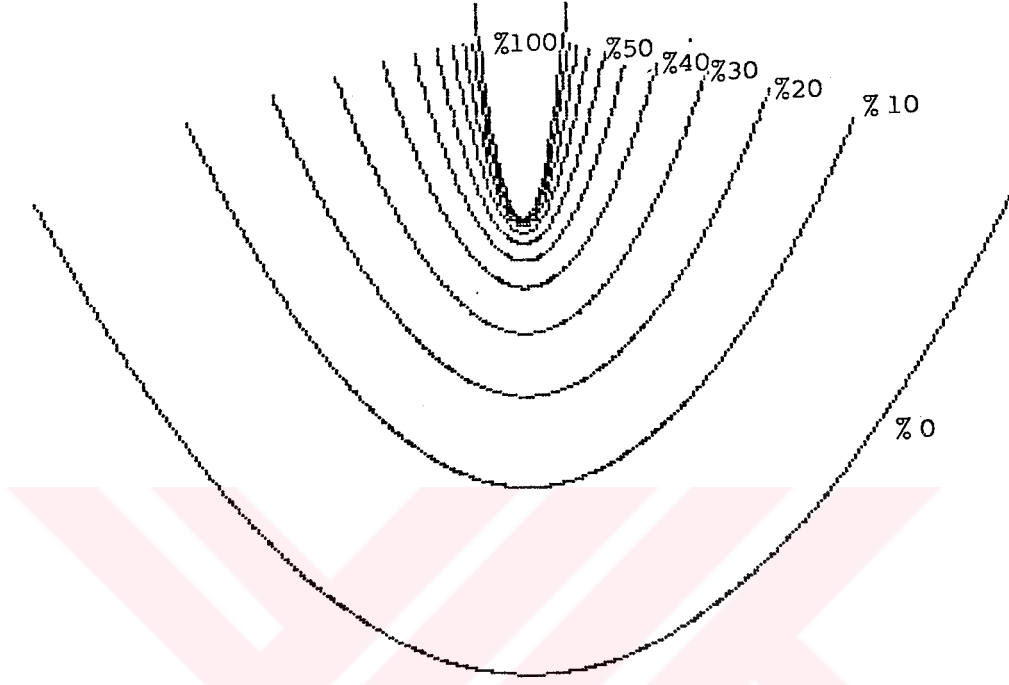
Çizelge 3-5'te sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin paraboloidal koordinatlarda incelenmesine ilişkin hesap sonuçları verilmiştir.

Çizelge 3-5. Paraboloidal koordinatlarda hesaplanan E_{max} değerleri. $R=25$ mm

Sivri uç eğrilik yarıçapı r (mm)	Gerilim ($U=U_i$) U (kV)	Maksimum alan şiddeti E_{max}	
		(p.u.)	(kV/cm)
0,05	3,8	57,9	220,02
0,2	6,5	18,1	117,65
0,5	8,5	8,7	73,95

Şekil 3.16'da ise, sivri uç-yarıküre (SYK) elektrot düzeni için, paraboloidal koordinatlarda % 10U aralıklarla elde edilen eş-potansiyel çizgi (yüzey) dağılımı gösterilmiştir. Bu dağılımın elde

edilmesinde sivri uca karşı düşen paraboloidal sivri ucun uç eğrilik yarıçapı 0,5 mm, yarıküre elektroda karşı düşen paraboloidal elektrodun eğrilik yarıçapı da 25 mm alınmıştır.



Şekil 3.16. Paraboloidal elektrot düzeninde eşpotansiyel çizgi (yüzey) dağılımı.

SYK elektrot düzeni için sferoidal ve paraboloidal koordinatlarda bulunan potansiyel ve alan dağılımları aralarında uyumlu bulunmuştur. Diğer analitik incelemeler de gözönüne alındığında, SYK elektrot düzeni için analitik potansiyel ve alan dağılımı incelemesi bakımından en uygun durumun paraboloidal koordinatlarda elde edilebileceği görülmektedir. Paraboloidal koordinatlarda gerek sivri ucun biçimine, gerekse yaklaşık olarak yarıküre elektrodun biçimine uygun olarak inceleme yapılmaktadır.

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeni için buraya kadar yapılan analitik elektrostatik alan dağılımı incelemelerinde, sivri uç eğrilik yarıçapının elektrot açıklığı yanında çok küçük olması nedeniyle, sonuçlar arasında özellikle de maksimum alan şiddeti bakımından önemli bir fark bulunmamıştır. Eşmerkezli yarıküresel elektrot düzeni ile küre-düzlem elektrot düzeni varsayımları aralarında,

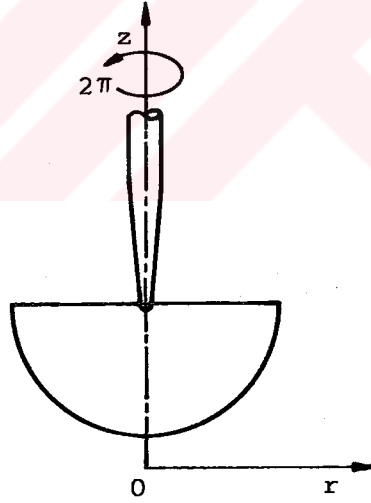
hiperboloidal sivri uç-düzlem ile paraboloidal elektrot düzeni incelemeleri de aralarında uyumlu sonuçlar vermiştir. Sonuçlar, SYK elektrot düzeninde yarıküre elektrot yarıçapının ve biçiminin çok kritik olmadığını, sivri ucun küçük yer değiştirmelerinin yani küçük elektrot açıklığı değişimlerinin önemli olmayacağını göstermektedir. Bunlara karşılık, sivri uç eğrilik yarıçapının ve tepe açısının önemli olduğu görülmüştür.



BÖLÜM 4

ELEKTROSTATİK ALAN DAĞILIMININ SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE BULUNMASI

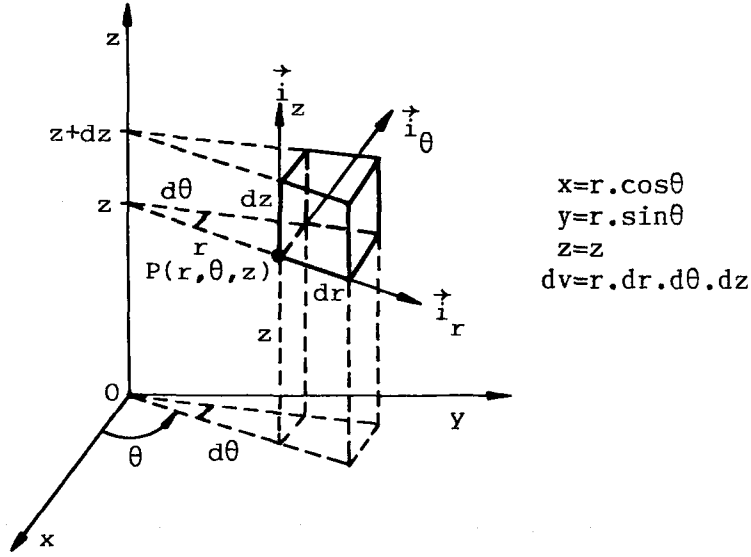
Burada sivri uç-yarımküre elektrot düzeninde elektrostatik alan dağılımı, sayısal yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Sonlu elemanlar yöntemi, sınır koşulları bilinen belirli bir bölge içinde tanımlanmış kısmi diferansiyel denklemlerin çözümü için geliştirilmiş ve bilgisayar alanındaki hızlı gelişmelere paralel olarak etkin şekilde kullanılan bir yöntemdir [43-49]. Ele alınan problemde, çözümün yapıldığı bölgede parça-parça bir yaklaşım için, içinde potansiyel fonksiyonunun lineer bir bağıntıyla değiştiği üçgen elemanlar kullanılmıştır.



Şekil 4.1. Sivri uç-yarımküre elektrot düzeni.

Sivri uç-yarımküre elektrot düzeni, dönel simetrik yani ekseni boyunca alınan bir kesitin, bu eksen etrafında döndürüldüğünde kesitin değişmeyeceği bir düzendir (Şekil 4.1). Bu nedenle koordinat sistemi, silindirik koordinat sistemi olarak ele alındığında, incelenen düzenin herhangi bir (r, θ, z) noktasındaki potansiyelinin değeri, r ve z koordinatları sabit kalmak koşuluyla θ açısı ile değişmez (Şekil 4.2). Bu durumda, gözönüne alınan bu üç boyutlu düzen, üç boyutlu

bir uzay yerine iki boyutlu bir düzlem üzerinde incelenebilir.



Şekil 4.2. Silindirik koordinat sistemi.

Silindirik koordinatlarda potansiyelin gradyanı

$$\vec{\text{grad}} V = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{i}_r + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial V}{\partial \theta} \vec{i}_\theta + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{i}_z \quad (4.1)$$

şeklindedir. V potansiyelinin θ dan bağımsız olması nedeniyle,
 $V = V(r, z)$,

$$\vec{\text{grad}} V = \frac{\partial V}{\partial r} \vec{i}_r + \frac{\partial V}{\partial z} \vec{i}_z \quad (4.2)$$

olarak ele alınabilir.

İncelenen elektrot düzeninin, simetri ekseninden geçen düzlem üzerindeki çözüm bölgesinin yarısının, simetri eksenini etrafında 2π kadar döndürülmesiyle oluşan hacim içerisinde depolanan potansiyel enerji

$$W = \frac{\epsilon}{2} \iiint |\vec{\text{grad}} V|^2 r \cdot dr \cdot d\theta \cdot dz \quad (4.3)$$

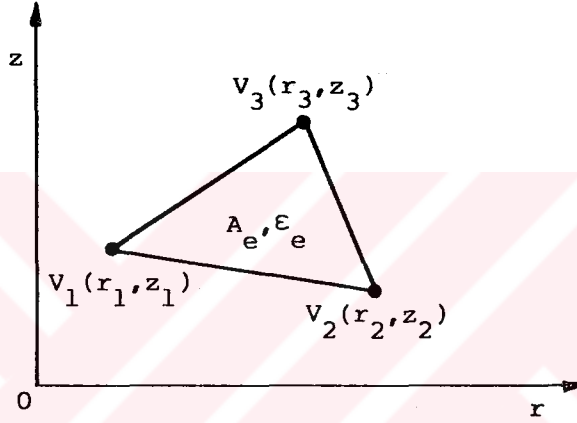
dir. (4.2) bağıntısı (4.3) de yerine konur ve $\theta = 0 - 2\pi$ arasında integre edilirse, enerji

$$W = \epsilon \cdot \pi \iint \left[\left(\frac{\partial V}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2 \right] r \cdot dr \cdot dz \quad (4.4)$$

olarak bulunur.

4.1. Probleme İlişkin Bağlantıların Yazılması

Potansiyelin θ dönme açısından bağımsız olması nedeniyle üçgen elemanlar, r - z koordinat sisteminde tanımlanabilir. Şekil 4.3'de bir üçgen elemanın r - z koordinat sisteminde tanımlanması gösterilmiştir. Burada r ve z koordinatları, radyal ve eksenel koordinatları göstermektedir.



Şekil 4.3. r - z koordinatlarında bir üçgen eleman.

Üçgen elemanlar içinde potansiyelin lineer olarak değiştiği varsayılırsa, potansiyel fonksiyonu

$$V = p_1 + p_2 r + p_3 z \quad (4.5)$$

şeklinde yazılabilir. (4.5) bağıntısı üçgenin her düğümü için yazılırsa,

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sisteminde p_1 , p_2 ve p_3 katsayıları Cramer kuralı ile bulunabilir. Buna göre katsayı matrisinin determinantı

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & r_1 & z_1 \\ 1 & r_2 & z_2 \\ 1 & r_3 & z_3 \end{vmatrix} \quad (4.7)$$

olmak üzere p_1 , p_2 ve p_3 katsayıları

$$p_1 = \frac{\begin{vmatrix} r_1 & z_1 & V_1 \\ r_2 & z_2 & V_2 \\ r_3 & z_3 & V_3 \end{vmatrix}}{\Delta}, \quad p_2 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & z_1 & V_1 \\ 1 & z_2 & V_2 \\ 1 & z_3 & V_3 \end{vmatrix}}{\Delta}, \quad p_3 = \frac{\begin{vmatrix} 1 & r_1 & V_1 \\ 1 & r_2 & V_2 \\ 1 & r_3 & V_3 \end{vmatrix}}{\Delta} \quad (4.8)$$

den

$$\begin{aligned} p_1 &= \frac{1}{2A_e} \left[(r_2 z_3 - r_3 z_2) V_1 + (r_3 z_1 - r_1 z_3) V_2 + (r_1 z_2 - r_2 z_1) V_3 \right] \\ p_2 &= \frac{1}{2A_e} \left[(z_3 - z_2) V_1 + (z_1 - z_3) V_2 + (z_2 - z_1) V_3 \right] \\ p_3 &= \frac{1}{2A_e} \left[(r_3 - r_2) V_1 + (r_1 - r_3) V_2 + (r_2 - r_1) V_3 \right] \end{aligned} \quad (4.9)$$

olarak bulunur. Bu bağıntılarda A_e , bir üçgen elemanın alanı olup,

$$A_e = \frac{\Delta}{2} \quad (4.10)$$

dir.

(4.5) bağıntısının $\partial V / \partial r$ ve $\partial V / \partial z$ şeklindeki türevleri, (4.4) bağıntısında yerine yazılırsa, bir üçgen elemanın z -ekseni etrafında 2π kadar döndürülmesiyle elde edilen ve Şekil 4.4'de gösterilen üçgen kesitli halka içerisindeki enerji

$$W_e = \epsilon_{re} \cdot \epsilon_o \cdot \pi (p_2^2 + p_3^2) \iint_{A_e} r \cdot dr \cdot dz \quad (4.11)$$

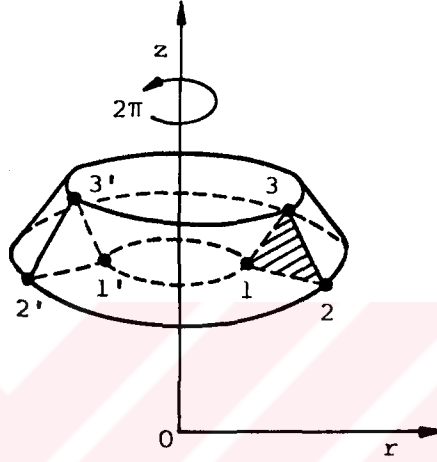
olarak bulunur. Burada ϵ_{re} , eleman içindeki ortamın bağıl dielektrik sabiti, ϵ_o da boşluğun dielektrik sabitidir. Şekil 4.4'deki üçgen elemanın A_e yüzeyi üzerinden yapılan integrasyon işlemi sonucu

$$\iint_{A_e} r \cdot dr \cdot dz = \frac{A_e}{3} (r_1 + r_2 + r_3) = A_e \cdot r_o \quad (4.12)$$

olup (4.11) bağıntısında yerine yazılırsa, enerji

$$W_e = \epsilon_{re} \cdot \epsilon_o \cdot \pi \cdot A_e (p_2^2 + p_3^2) r_o \quad (4.13)$$

olarak bulunur. Burada $r_o = (r_1 + r_2 + r_3)/3$ dür.



Şekil 4.4. Üçgen kesitli halka.

Sonlu elemanlar yöntemi, tüm bölge içindeki enerjinin minimumlaştırılması ilkesine dayanır. Bir eleman içindeki enerji, düğüm potansiyellerine göre minimumlaştırılırsa

$$\frac{\partial W_e}{\partial V_i} = \epsilon_{re} \cdot \epsilon_o \cdot \pi \cdot A_e (2p_2 \frac{\partial p_2}{\partial V_i} + 2p_3 \frac{\partial p_3}{\partial V_i}) \cdot r_o = 0 \quad (4.14)$$

ve $i=1,2,3$ için

$$\begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & s_{13} \\ s_{21} & s_{22} & s_{23} \\ s_{31} & s_{32} & s_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = [s]_{3 \times 3} \cdot [V]_{3 \times 1} = 0 \quad (4.15)$$

3x3 boyutunda "katılık matrisi" (Stiffness matrix) elde edilir. Katılık matrisi simetrik bir matris olup elemanları ($\epsilon_e = \epsilon_{re} \cdot \epsilon_o$)

$$\begin{aligned} s_{11} &= \frac{\epsilon_e \cdot \pi}{2A_e} \left[(r_3 - r_2)^2 + (z_3 - z_2)^2 \right] \cdot r_o \\ s_{12} &= \frac{\epsilon_e \cdot \pi}{2A_e} \left[(r_3 - r_2) \cdot (r_1 - r_3) + (z_3 - z_2) \cdot (z_1 - z_3) \right] \cdot r_o \\ s_{13} &= \frac{\epsilon_e \cdot \pi}{2A_e} \left[(r_3 - r_2) \cdot (r_2 - r_1) + (z_3 - z_2) \cdot (z_2 - z_1) \right] \cdot r_o \quad (4.16) \\ &\vdots \quad \quad \quad \vdots \end{aligned}$$

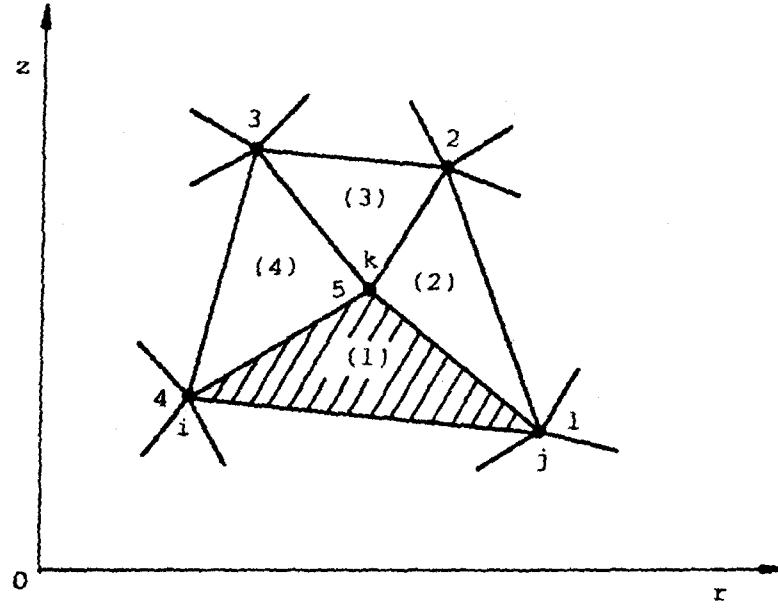
şeklinde (4.14) den cebirsel işlemler sonucunda bulunabilir. Minimumlaştırma ilkesi çözüm bölgesi içindeki tüm elemanlara aynı anda uygulanırsa, tanımlanan tüm elemanların düğüm potansiyelleri arasındaki bağıntı bir lineer denklem sistemine dönüşür ve

$$[s_{sist}] \cdot [V] = 0 \quad (4.17)$$

olur. Burada $[V]$, sistemin düğüm noktalarının potansiyellerinden oluşan bir sütun matristir. $[s_{sist}]$ matrisi simetrik ve tekil olmayan bir matris olup, oldukça seyrek (Sparse matrix).

(4.17) de, elde edilen lineer denklem sistemindeki katsayılar matrisinin seyrek olması nedeniyle, doğrudan matris tersi alma yöntemlerinden yararlanmak, bilgisayarda hem gereksiz bellek kullanımına, hem de büyük boyutlu matrislerde bilgisayarın yuvarlatma hatasının artmasına neden olur. Bu nedenle bilinmeyen sayısının birkaç yüzü geçtiği durumlarda, iteratif yöntemler önem kazanır. Bu çalışmada iteratif çözüm yöntemi olarak S.O.R. (Successive Over-Relaxation) yöntemi kullanılmıştır.

Şekil 4.5'deki gibi üçgen elemanlardan oluşmuş bir ızgarada 5 numaralı düğüme ilişkin V_5 potansiyelinin değeri, bu düğüme komşu dört düğümün potansiyeline bağlıdır. Benzer şekilde 1,2,3 ve 4 numaralı düğümler için de o düğüme komşu düğümlerin potansiyelleri birbirine bağlıdır.



Şekil 4.5. Üçgen elemanlardan oluşmuş ızgaradan bir bölüm.

5 numaralı düğüm için (1), (2), (3) ve (4) numaralı elemanların enerjilerini aynı anda minimum yapan V_5 değeri aranırsa

$$\frac{\partial \left[\sum_{i=1}^4 W_{ei} \right]}{\partial V_5} = 0 \quad (4.18)$$

yazılabilir [36]. Bu minimumlaştırma işleminin sonucunda

$$\begin{aligned} & \left[s_{ki}^{(1)} V_4 + s_{kj}^{(1)} V_1 + s_{kk}^{(1)} V_5 + \quad (\text{eleman (1) den}) \right. \\ & s_{ki}^{(2)} V_1 + s_{kj}^{(2)} V_2 + s_{kk}^{(2)} V_5 + \quad (\text{eleman (2) den}) \\ & s_{ki}^{(3)} V_2 + s_{kj}^{(3)} V_3 + s_{kk}^{(3)} V_5 + \quad (\text{eleman (3) den}) \\ & \left. s_{ki}^{(4)} V_3 + s_{kj}^{(4)} V_4 + s_{kk}^{(4)} V_5 \right] = 0 \quad (\text{eleman (4) den}) \end{aligned} \quad (4.19)$$

elde edilir. (4.19) bağıntısı düzenlenirse

$$K_{51}V_1 + K_{52}V_2 + K_{53}V_3 + K_{54}V_4 + K_{55}V_5 = 0 \quad (4.20)$$

ve

$$K_{51} = s_{ki}^{(2)} + s_{kj}^{(1)}$$

$$K_{52} = s_{ki}^{(3)} + s_{kj}^{(2)}$$

$$K_{53} = s_{ki}^{(4)} + s_{kj}^{(3)}$$

$$K_{54} = s_{ki}^{(1)} + s_{kj}^{(4)}$$

$$K_{55} = s_{kk}^{(1)} + s_{kk}^{(2)} + s_{kk}^{(3)} + s_{kk}^{(4)} = \sum_{m=1}^4 s_{kk}^{(m)} \quad (4.21)$$

olur.

Lineer denklem sistemlerinin çözümünde kullanılan iteratif yöntemlerde her düğüm için (4.20) bağıntısı gibi bir bağıntı kurulması ve sonra da iterasyona sokulması gerekir. Bağıntıyı oluşturan K_{ij} sabitlerinin hesaplanması ve iterasyona sokulacak düğüm potansiyelinin eşitliğinin diğer tarafında yalnız bırakılması işlemi, iterasyon için gereklidir.

Şekil 4.5'deki (1) numaralı eleman incelendiğinde, bu elemanın katılık matrisindeki k. satırının elemanları (4.21) bağıntısındaki K_{ij} katsayılarına toplam olarak katkıda bulunduğu görülür. Bu aynı zamanda 5 numaralı düğümün çevresindeki diğer elemanlar için de aynıdır ve diğer elemanlar da benzer şekilde katkıda bulunurlar. Bu durumda herhangi bir k ıncı düğümün potansiyeli

$$V_k = - \frac{1}{\sum s_{kk}} \sum (s_{ki} V_i + s_{kj} V_j) \quad (4.22)$$

şeklinde yazılabilir [46]. Burada Σ işareti, k ıncı düğümün çevresindeki elemanların toplamını belirtmektedir. Şekil 4.5'deki i,j,k indisleri her üçgen için saat yönüne ters yönde işaretlenmiştir.

Buraya kadar problemin sonlu elemanlar yöntemi ile çözülmesi için gerekli olan bağıntılar verilmiştir. Şimdi kısaca çalışmada kullanılan iteratif çözüm yolu açıklanacaktır.

4.2. İteratif Çözüm

Laplasyen alan problemlerinde belirli bir potansiyele sahip en az iki elektrot vardır. Tanımlanan elemanlara ilişkin düğümlerin potansiyelleri, bu iki elektrodun potansiyel değerleri arasında bir değer alır. İterasyondan önce elektrotların üzerindeki düğümler hariç diğer bütün düğümlerin potansiyellerine başlangıç olarak

$$V_{\text{ort}} = \frac{1}{2} (V_{\text{max}} - V_{\text{min}}) \quad (4.23)$$

ortalama değeri verildikten sonra bu düğümler sırasıyla iterasyona sokulurlar. V_k nın (4.22) den hesaplanmasıyla k . düğüm için yeni potansiyel değeri

$$V_k^{(n+1)} = V_k^{(n)} + \omega(V_k - V_k^{(n)}) \quad (4.24)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada ω hızlandırma faktörü olup $1 < \omega < 2$ aralığında bir ω_0 değeri iterasyonun en hızlı yakınsamasını sağlar. ω_0 'ın yaklaşık değeri deneme-yanılma ile bulunabilir.

Elektrotlar üzerindeki düğümler iterasyona sokulmayıp bu işlem süresince sabit bırakılırlar.

Her iterasyon tamamlandıktan sonra düğüm potansiyellerinin bir önceki iterasyona göre bağlı değişimlerinin maksimum değeri belirli bir H hata sınırının altında kaldığında yani

$$\max \left| \frac{V^{(n+1)} - V^{(n)}}{V^{(n)}} \right| < H \quad (4.25)$$

olduğunda çözümün gerçek değere yeterince yakınsadığı varsayılarak iterasyon durdurulur.

4.3. Elektrik Alan Şiddetinin Hesabı

İncelenen elektrot düzeninde bir noktadaki elektrik alan şiddeti, potansiyelin bir üçgen eleman içinde lineer olarak değiştiği gözönüne alınarak

$$E = \sqrt{E_r^2 + E_z^2} = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial r}\right)^2 + \left(\frac{\partial V}{\partial z}\right)^2} = \sqrt{p_2^2 + p_3^2} \quad (4.26)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Elektrik alan şiddeti, her eleman içinde sabit bir değer alır.

4.4. Kapasite Hesabı

İncelenen elektrot düzeninin kapasitesi ise, çözüm bölgesinde tüm elemanlar içindeki elektrostatik enerjinin hesabından yararlanılarak

$$C = \frac{2W}{U^2} = \frac{2\epsilon_o \cdot \pi \sum_{i=1}^n \epsilon_{ri} \cdot A_i \cdot E_i^2 \cdot r_{oi}}{U^2} \quad (4.27)$$

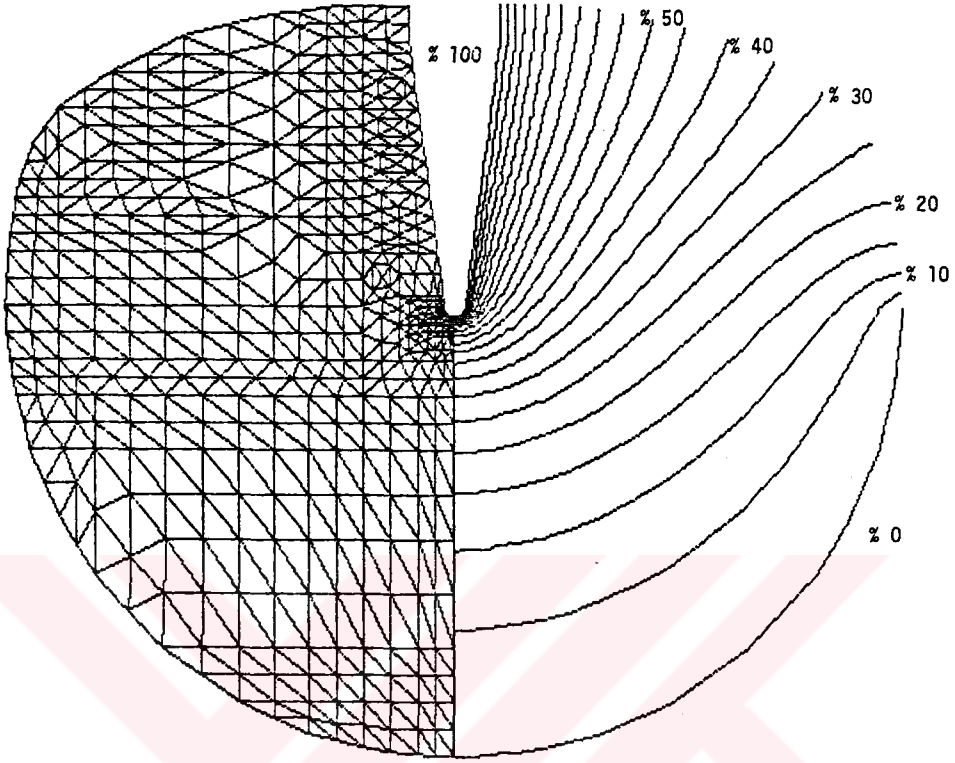
bağıntısından bulunabilir. Burada n, üçgen elemanların sayısı, $U = V_{\max} - V_{\min}$ olmak üzere uygulanan gerilimdir.

4.5. Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Bulunan Sonuçlar

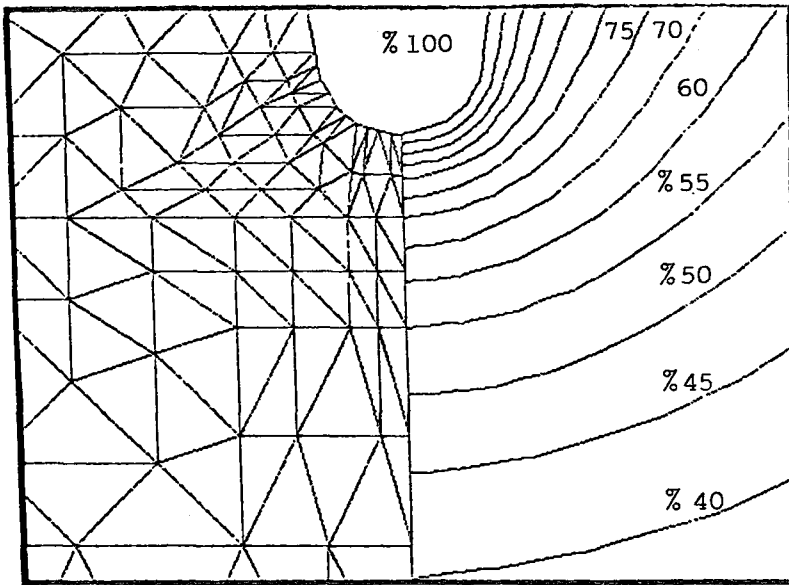
Bütün bu anlatılanlara uygun olarak sonlu elemanlar yöntemi ile sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin potansiyel dağılımı, maksimum alan şiddeti ve kapasitesi hesaplanmıştır. Bilgisayar programı standart FORTRAN (Version: 3.30) da, çizim Quick Basic (Version: 4.00) da yazılmış ve Goupil G40 (PC) de çalıştırılmıştır. Hesaplarda sivri ucun eğrilik yarıçapı 0,5 mm, yarıküre elektrodun yarıçapı 25 mm alınmıştır.

Birinci aşamada eleman sayısının 225 ve düğüm sayısının 136 olduğu üçgen elemanlardan oluşan bir ızgara ile hesaplar yapılmış ve maksimum alan şiddeti sivri ucun ucunda ve 6,130 p.u. olarak bulunmuştur. Daha önce de belirtildiği gibi, alanın p.u. cinsinden verilen değeri, uygulanan gerilimin kV cinsinden değeri ile çarpılarak kV/cm cinsinden alan şiddeti değeri bulunabilir.

İkinci aşamada ızgaradaki eleman sayısı 900'e, düğüm sayısı 496'ya çıkarılmış ve Şekil 4.6'da gösterilen ızgara ve % 5 aralıklarla potansiyel dağılımı elde edilmiştir.



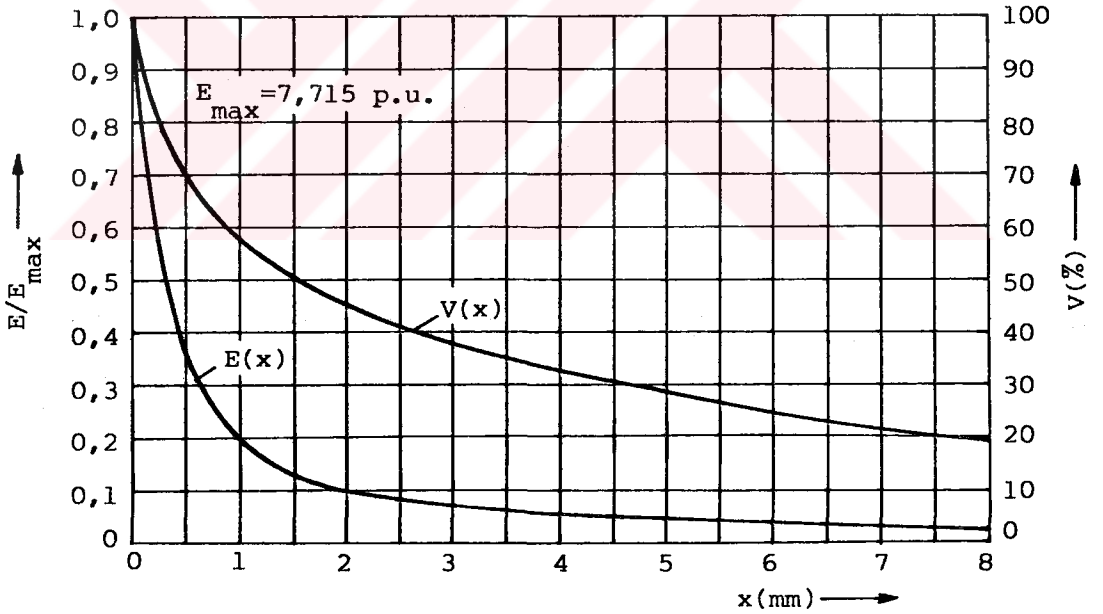
Şekil 4.6. Sivri uç-yarımküre elektrot düzeninde potansiyel dağılımı ve hesapta yararlanılan ızgara.



Şekil 4.7. Sivri uç civarındaki eşpotansiyel çizgi (yüzey) dağılımı.

Şekil 4.7'de ise sivri uç civarındaki eşpotansiyel çizgilerin (yüzeylerin) bilgisayarla daha büyük ölçekli olarak çizdirilmiş bir görüntüsü görülmektedir.

Bu yöntemle incelenen elektrot düzeninde maksimum alan şiddeti, 7,715 p.u. olarak hesaplanmıştır. Standartlarda [1-3], 0,5 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç-yarıküre elektrot düzeni için kısmi boşalma (korona) başlangıç gerilimi 8,5 kV olarak verilmektedir. Bu gerilimde, sivri uçta, $7,715 \text{ p.u.} \times 8,5 \text{ kV} = 65,58 \text{ kV/cm}$ 'lik bir alan şiddeti oluşacağı söylenebilir. Sonlu elemanlar yöntemi ile sivri uç-yarıküre arasında potansiyel ve elektrik alan şiddeti değerleri hesaplanmış ve sivri uçtan uzaklıkla değişimleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Burada, sivri uçtan yaklaşık 0,3 mm uzaklıkta alanın 30 kV/cm ye, potansiyelin de % 79 U'ya düştüğü görülmektedir. Bu, korona tabakasında uygulanan tüm gerilimin % 21 inin düştüğünü ve korona tabakası kalınlığının yaklaşık 0,3 mm olduğunu gösterir.



Şekil 4.8. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde potansiyel ve elektrik alan şiddetinin sivri uçtan uzaklıkla değişimi.

Bu yöntemle, söz konusu elektrot düzeninin kapasitesi, yaklaşık 0,374 pF olarak hesaplanmıştır.

BÖLÜM 5

ELEKTROSTATİK ALAN DAĞILIMININ DENEYSEL OLARAK BULUNMASI

Bu bölümde, sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde deneysel yöntemlerle potansiyel ve alan dağılımlarının bulunmasına ilişkin çalışmalar anlatılmıştır. Bilindiği gibi, sivri uç-yarıküre elektrod düzeni gibi küresel yapılı, üç boyutlu düzenlerin modellenmesi ve deneysel yöntemlerle incelenmesi daha fazla uğraş ve dikkat gerektirir.

Bu çalışmada, aynı ilkeye sahip iki deneysel yöntem kullanılmıştır. Bunlar, elektrolitik banyo yöntemi ve yarıiletken kağıt yöntemidir [33-35]. Yöntemlerin ilkesi, statik elektrik alanı ile stasyoner akım alanı arasındaki benzeşimdir. Bu benzeşime göre, statik alanın $\vec{D}$ akı yoğunluğu ile $\vec{E}$ elektrik alanı arasında ve stasyoner alanın $\vec{J}$ akım yoğunluğu ile $\vec{E}$ elektrik alanı arasında, sırasıyla ϵ ortamın dielektrik sabiti ve X ortamın öziletkenliği olmak üzere

$$\begin{aligned}\vec{D} &= \epsilon \vec{E} \\ \vec{J} &= X \vec{E}\end{aligned}\tag{5.1}$$

bağıntıları vardır. Benzer şekilde, statik elektrik alanında

$$\begin{aligned}\vec{D} \cdot d\vec{S} &= Q \\ C &= Q/U\end{aligned}\tag{5.2}$$

ve stasyoner alanda

$$\begin{aligned}\vec{J} \cdot d\vec{S} &= I \\ R &= U/I\end{aligned}\tag{5.3}$$

bağıntıları yazılabilir. Ortamın izotrop olması durumunda X skaler bir büyüklük olacağından, $\vec{J}$ ve $\vec{E}$ vektörleri aynı yön ve doğrultuda

olur ve akım çizgileri ile elektriksel alan çizgileri çakışır. Ancak stasyoner akım alanı ile statik elektrik alanı arasında benzerliklerin tam olarak gerçekleştirilebilmesi için bu iki alanın sınır koşullarının da aynı olması gerekir [50,51].

Elektrolitik banyo yöntemi ile yarıiletken kağıt yöntemi arasındaki en önemli fark, iletken ortam olarak kullanılan malzemenin türüdür. Elektrolitik banyo yönteminde iletken ortam olarak elektrolit (iletken bir sıvı) kullanılır. Model ve sonuçlarının bir resim gibi saklanabildiği, gerektiğinde üzerinde yeniden ölçme ve değişikliğin kolaylıkla yapılabilirdiği yarıiletken kağıt yönteminde ise, iletken ortam olarak, elektrolit (sıvı) yerine, küçük dirençli kağıt (yarıiletken kağıt, dirençli kağıt, karbon kağıdı) kullanılmaktadır [29,34,35].

5.1. Modeller ve Deneylerin Yapılışı

Deneyisel çalışmalarda sivri uç-yarıküre elektrot düzeni, öncelikle eşmerkezli küresel elektrot düzeni gibi düşünülerek, sonra da gerçek durumuna uygun olarak modellenmiştir. Eşmerkezli küresel elektrot düzeni modelleri için deneyisel olarak bulunan sonuçlar, bu düzen için kuramsal olarak, kolaylıkla, bulunan sonuçlar ile karşılaştırılarak ölçmenin ve modellemenin doğruluğu kontrol edilmiştir. Bilindiği gibi, eşmerkezli küresel elektrot düzeninde eşpotansiyel küre yüzeylerinin yarıçapları, küresel koordinat sisteminde Laplace denkleminin çözümünden bulunan ve i 'inci eşpotansiyel yüzeyin, r_i yarıçapı bilindiğine göre

$$r_{i+1} = \frac{r_i}{1-m \cdot r_i} \quad (5.4)$$

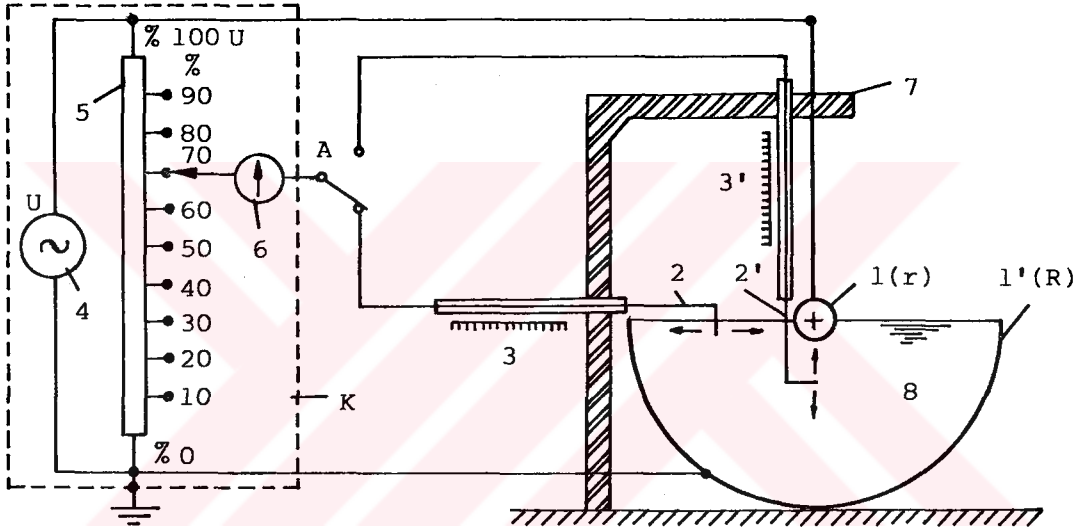
bağıntısı yardımı ile bulunabilir. Burada, ΔV potansiyel farkı, r ve R sırasıyla iç ve dış küre yarıçapları ve U uygulanan gerilim olmak üzere

$$m = \frac{\Delta V}{U} \cdot \frac{R-r}{r \cdot R} \quad (5.5)$$

dir.

Deneylerde $r=0,5$ mm eğrilik yarıçaplı sivri uç ile $R=25$ mm yarıçaplı yarıküreden oluşan sivri uç-yarıküre elektrot düzeni, 5/1 ve 10/1 ölçekli elektrot düzenleri ile modellenmiştir.

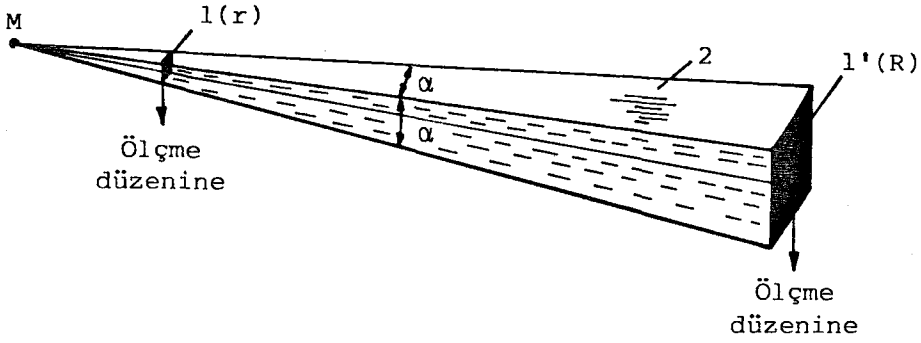
Elektrolitik banyo deneylerinde modelleme iki şekilde yapılmıştır. Birinci durumda, düzenin üç boyutlu modeli (eşmerkezli küresel model ve sivri uç-yarıküre modeli) elektrolit içine yerleştirilmiş ve ölçmeler üç boyutlu olarak yapılmıştır. Şekil 5.1'de örnek olarak, eşmerkezli küresel elektrot düzeni modeli ve deney düzeneği gösterilmiştir.



Şekil 5.1. Eşmerkezli küresel elektrot düzeni modeli ve deney düzeneği.

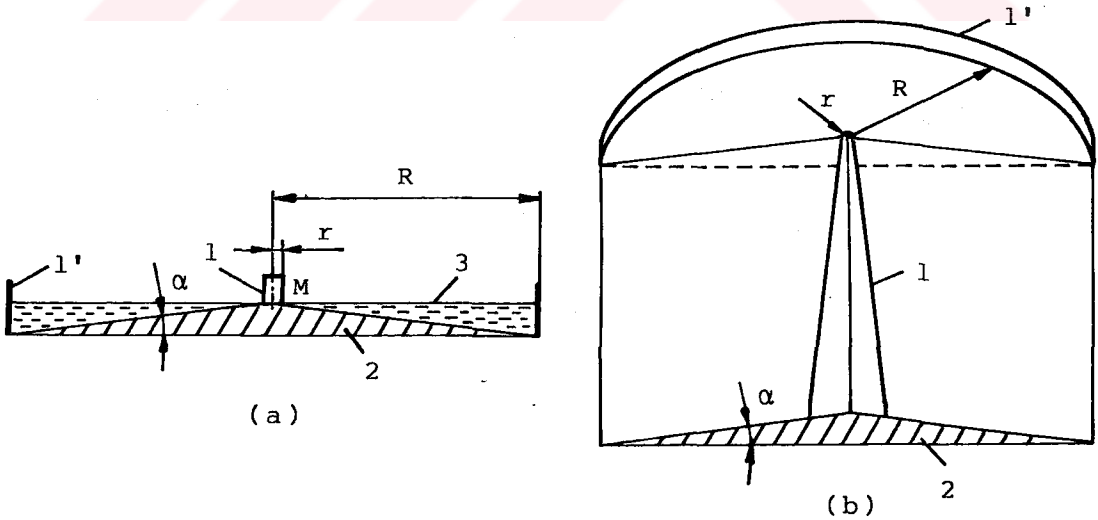
- 1,1': Küresel elektrotlar
- 2,2': Yatay ve düşey hareketli sondalar
- 3,3': Koordinat cetvelleri
- 4 : Alternatif gerilim kaynağı
- 5 : Gerilim bölücü
- 6 : Sıfır aleti
- 7 : Kaide
- 8 : Elektrolit
- A : Sonda seçici anahtar
- K : Hazır ölçü köprüsü

İkinci durumda ise gerçek düzen, eğik tabanlı olarak modellenmiştir. Şekil 5.2'de eşmerkezli küresel elektrot düzeninin dilim şeklinde hazırlanan bir modeli gösterilmiştir. Tabanı ve yan yüzleri pleksiglastan yapılan bu modelde $r=5$ mm, $R=250$ mm (ölçek 10/1) alınmış ve modele 3° lik küre dilimi şekli verilmiştir. Elektrolit,



Şekil 5.2. Eşmerkezli küresel elektrot düzeninin dilim modeli ($\alpha=3^\circ$).
1,1': Elektrotlar
2 : Elektrolit
M : Eşmerkez noktası

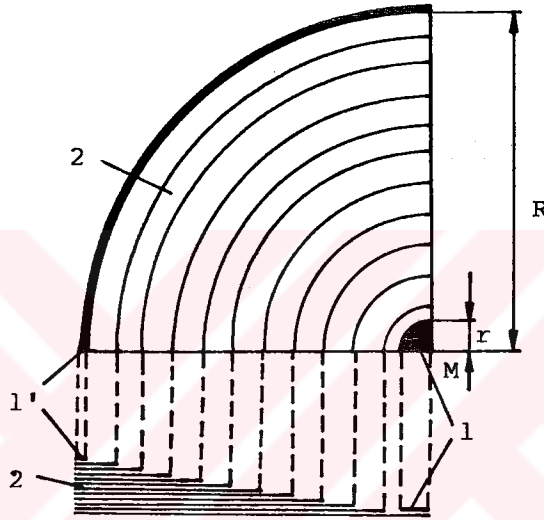
model içine ve sadece elektrotlar arasındaki ortama konmuştur. Çalışmada kullanılan diğer dilim şeklinde, eğik tabanlı modeller ise Şekil 5.3'de gösterilmiştir. Bu modellerde eğik tabanlar, poliüretandan 3° lik açıyla ve gerçek düzenin 10/1 ölçeğinde hazırlanmıştır. Modellerin elektrotları pirinç malzemeden yapılmıştır. Elektrolit olarak, iletkenliği 20°C de yaklaşık $325 \mu\text{S}$ olan musluk suyu kullanılmıştır. Şekil 5.3'de gösterilen modellerde elektrolit, modellerin eşmerkez düzeyine kadar doldurulmuştur.



Şekil 5.3. Eğik tabanlı modeller.

- a) Eşmerkezli küresel elektrot düzeni modeli,
b) Sivri uç-yarıküre elektrot düzeni modeli.
1,1': Elektrotlar
2 : Poliüretan eğik taban (taban eğimi $\alpha=3^\circ$)
3 : Elektrolit

Yarıiletken kağıt yöntemi yalnız eşmerkezli küresel elektrot düzeni için kullanılmıştır. Düzen bu yöntemle eğik tabanlı olarak modellenmiştir. Bu amaçla, düzenin dönel simetrisinden yararlanılarak, 5/1 ölçekli çeyrek eşmerkezli küre dilimi, basamak şeklinde, üst üste dizilmiş yarıiletken kağıt tabakaları ile oluşturulmuştur (Şekil 5.4). Elektrotlar, şekline uygun olarak, alüminyum folyeden hazırlanıp, toplu iğnelerle tabana tutturulmuştur. Ölçmeler sırasında, bulunan herbir eşpotansiyel noktaya bir toplu iğne batırılarak o noktanın tesbiti yapılmıştır.



Şekil 5.4. Yarıiletken kağıt yöntemi ile eşmerkezli küresel elektrot düzeninin modellenmesi.

1,1': Elektrotlar

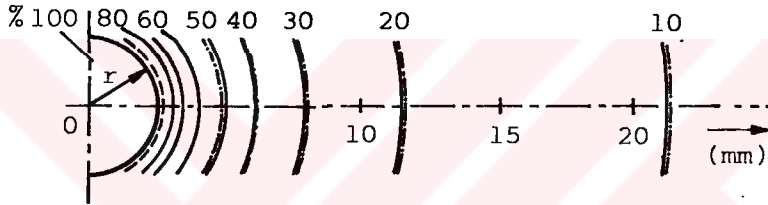
2 : Yarıiletken kağıt tabakaları

Gerek elektrolitik banyo, gerekse yarıiletken kağıt yönteminde ölçmeler 10 V, 50 Hz lik gerilimle, hazır bir eşpotansiyel nokta ölçme köprüsü kullanılarak $\Delta V = \%10 U$ basamaklarla yapılmış ve sıfır aleti olarak, köprü üzerindeki mikroampermetreden yararlanılmıştır. Eşpotansiyel noktalar, yaklaşık 0,1 mm yarıçapında, emaye yalıtkanlı, elektrolitle ve yarıiletken kağıtla noktasal teması olan, iletken sondalar yardımıyla bulunmuştur.

5.2. Deneysel Elektrostatik Alan Dağılımı İncelemelerinin Sonuçları

5.2.1. Eşmerkezli Küresel Elektrot Düzeni

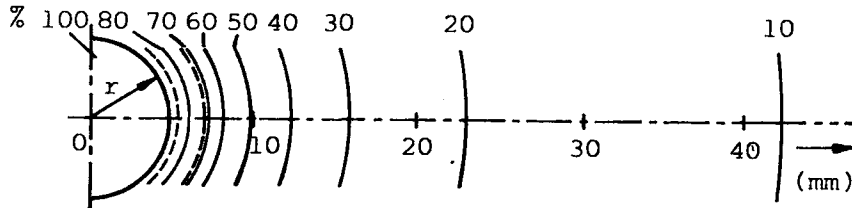
Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin, eşmerkezli küresel elektrot düzeni gibi incelenmesinde elektrot yarıçapları, sivri uç-yarıküre elektrot düzenindeki sivri ucun eğrilik yarıçapına ve yarıkürenin yarıçapına uygun olarak seçilmiştir. Şekil 5.5'te $r=2,5$ mm ve $R=125$ mm (5/1 ölçekli) olan elektrot düzeni için üç boyutlu elektrolitik banyo yöntemi ile ve yarıiletken kağıt yöntemiyle deneysel olarak bulunan eşpotansiyel çizgi (yüzey) dağılımları ile (5.4) bağıntısından yararlanılarak kuramsal olarak bulunan eşpotansiyel çizgi (yüzey) dağılımları, % 10U potansiyel aralıklarıyla, bir arada çizilmiştir.



Şekil 5.5. $r=2,5$ mm ve $R=125$ mm olan eşmerkezli küresel elektrot düzenine ilişkin eşpotansiyel çizgi dağılımı.

— Elektrolitik banyo yöntemi ile
- - - Yarıiletken kağıt yöntemi ile
--- Kuramsal

Benzer şekilde, Şekil 5.6'da $r=5$ mm ve $R=250$ mm (10/1 ölçekli) olan eşmerkezli küresel elektrot düzeni için hem üç boyutlu, hem de eğik tabanlı modellerle yapılan elektrolitik banyo deneyi sonuçları ile kuramsal olarak bulunan sonuçlar bir arada gösterilmiştir.



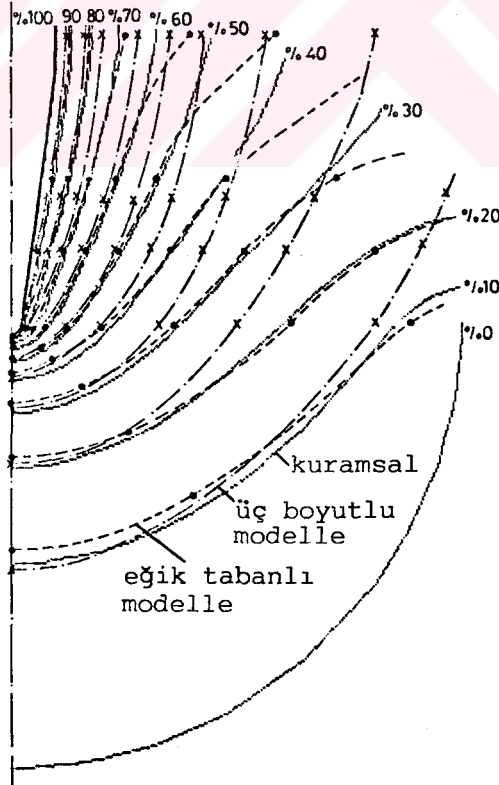
Şekil 5.6. $r=5$ mm ve $R=250$ mm olan eşmerkezli küresel elektrot düzenine ilişkin eşpotansiyel çizgi dağılımı.

— Deneysel
- - - Kuramsal

Şekil 5.5 ve 5.6'dan, deneysel olarak bulunan eşpotansiyel çizgi dağılımlarının, (5.4) bağıntısı yardımıyla kuramsal olarak bulunanlara ± 1 hata ile uyduğu saptanmıştır. Bu sonuç, deneysel yöntemlerin hata sınırı içinde kabul edilebilir bir sonuçtur. Şekillerden, eşpotansiyel çizgilerin r yarıçaplı elektrot yakınında dar bir bölgeye sıkıştığı, bunun da ölçme zorluğu getirdiği anlaşılar. Bu zorluğu yenmek amacıyla modeller mümkün olduğu kadar büyütülmüş, kullanılan sondalar da ince seçilmiştir. Eşmerkezli küresel elektrot düzeni için yapılan deneylerden ölçmelerin ve modellemenin doğru olduğuna ve sivri uç-yarıküre elektrot düzeni için de benzer uygulamaların yapılabileceğine karar verilmiştir.

5.2.2. Sivri Uç-Yarıküre Elektrot Düzeni

Şekil 5.7'de sivri uç-yarıküre elektrot düzeni için elektrolitik banyo yöntemiyle üç boyutlu ve eğik tabanlı modeller üzerinde deneysel olarak bulunan eşpotansiyel çizgiler, Bölüm 4, Şekil 4.6'da sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak bilgisayar yardımıyla bulunan



Şekil 5.7. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde eşpotansiyel çizgi dağılımı.

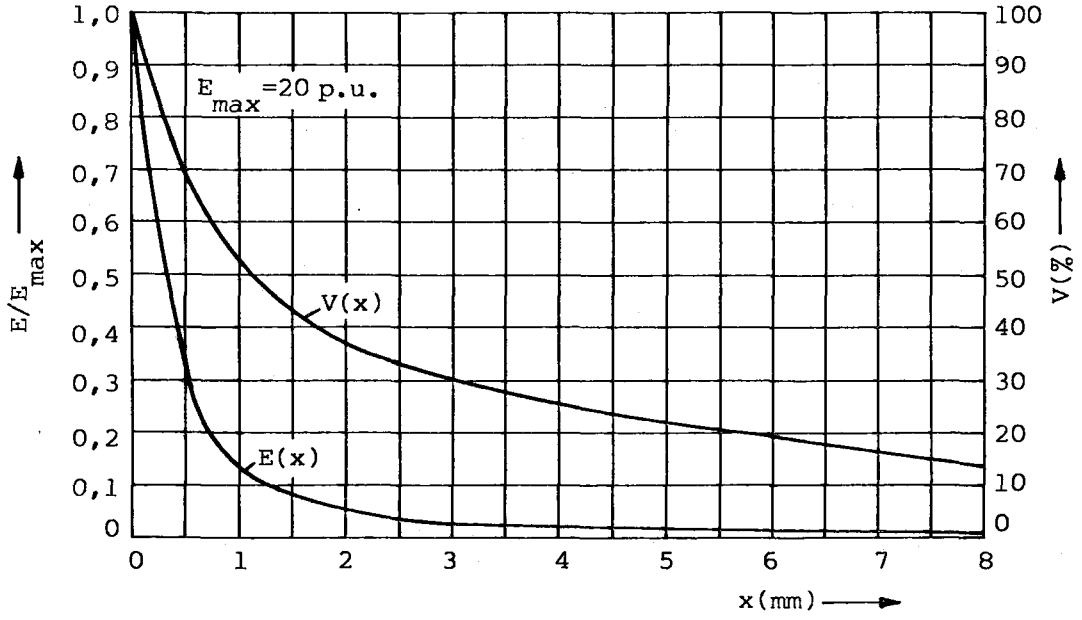
eşpotansiyel çizgiler ile bir arada gösterilmiştir.

Şekil 5.7'den eğik tabanlı model üzerinde bulunan deneysel sonuçların, bilgisayarla bulunan sonuçlara yakınlığı görülmektedir. Aradaki farklar, sonlu elemanlar yönteminin kapalı bölgeler için uygulanması nedeniyle sivri uç ile yarıküre arasındaki bölgenin kapatılması sırasındaki varsayım ile problemin çözümü için kullanılan ızgaranın seçiminden kaynaklandığı, deneysel yöntem bakımından ise modellemenin yarıküre yarıçapı ile sınırlı bulunmasından kaynaklandığı söylenebilir. Ayrıca deneysel yöntemin uygulanması sırasında gelen hatalar da sonuçlara etkimıştır.

Deneysel yöntemlerde ölçme düzeninin duyarlılığının, sonda inceliğinin, doğru modellemenin, model ve elektrotların düzgünlüğünün ayrıca elektrolitik banyo yönteminde menisküs etkisinin, elektrolitin ve elektrolit düzeyinin, koordinat okumanın; yarıiletken kağıt yönteminde kullanılan kağıdın nemsiz, temiz, karışiksiz olmasının, kağıt tabakalarının ve elektrotların biribiri ile sıkı temas etmesinin önemi vardır.

Üç boyutlu modelle deneysel olarak bulunan eşpotansiyel çizgilerin diğer yollarla bulunan çizgilerden farklılığı ise bu deney sırasında sivri uç-yarıküre elektrot modelinin topraklı bir silindir içine yerleştirilmiş olmasından kaynaklandığı, çizgilerin değişiminden anlaşılmaktadır.

Yapılan ölçmelerin amacı, potansiyel dağılımını bulmak yanında elektrik alan dağılımını bulmak ve sistemin en çok zorlanan noktalarını belirlemektir. Alan çizgileri, potansiyel çizgilerine her noktada dik olması koşulu ile alan çizgileri çizilebilir. Herhangi iki eşpotansiyel çizgi arasındaki potansiyel farkının, söz konusu iki eşpotansiyel çizgi arasındaki uzaklığa bölümü de o aralıktaki elektrik alan şiddetini verir. Bu ilkeye dayanarak, sivri uç-yarıküre arasında sivri uçtan uzaklıkla kritik alan çizgisi üzerinde deneysel olarak bulunan potansiyel ve elektrik alan dağılımları Şekil 5.8'de gösterilmiştir. Bu durumda maksimum alan şiddeti, 20 p.u. olarak hesaplanmıştır. Bu, 0,5 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç-yarıküre



Şekil 5.8. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde potansiyel ve alan dağılımlarının sivri uçtan uzaklıkla değişimi.

elektrot düzeni için kısmi boşalma (korona) başlangıç gerilimi olan 8,5 kV'ta, sivri uçta, 20 p.u. x 8,5 kV = 170 kV/cm'lik bir maksimum alan şiddeti oluşacağını göstermektedir. Aynı şekilden, sivri uçtan yaklaşık 0,7 mm uzaklıkta alanın 30 kV/cm'ye, potansiyelin de yaklaşık % 60 U'ya düştüğü görülmektedir. Bu sonuçlar, özellikle, sivri uç-yarıküre elektrot düzeni için eşmerkezli küresel elektrot düzeni ve küre-düzlem elektrot düzeni varsayımları ile bulunan kuramsal sonuçlara uymaktadır.

BÖLÜM 6

BOŞALMA DENEYLERİ:

KULLANILAN DÜZENLER

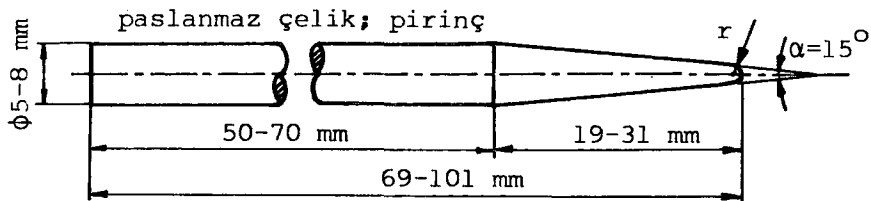
YÜKSEK GERİLİMLERİN ELDE EDİLMESİ VE ÖLÇÜLMESİ DENEYLERİN YAPILIŞI

Bu bölümde, korona boşalmalı ayar kaynağı olarak bir sivri uç-yarıküre elektrot düzeni üzerinde endüstriyel frekanslı yüksek alternatif gerilimde ve yüksek doğru gerilimde yapılan kısmi boşalma deneyleri anlatılmıştır. Yapılan deneylerin amacı sözkonusu elektrot düzeninin boşalma olayları bakımından davranışını incelemek ve gerçekleştirilen sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin korona boşalmalı ayar kaynağı olarak kullanım koşullarını belirlemektir.

6.1. Deneylerde Kullanılan Düzenler

6.1.1. Sivri Uç-Yarıküre Elektrot Düzeni

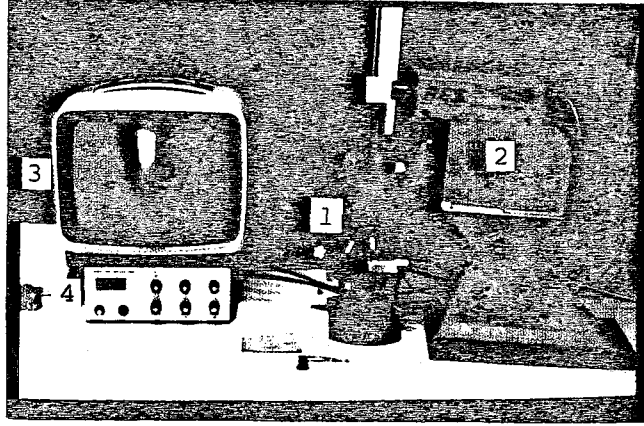
Deneylerde 0,027; 0,028; 0,096 ve 0,1 mm eğrilik yarıçaplı sivri uçlu elektrotlar kullanılmıştır. 0,1 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç pirinçten, 0,027 mm olanı krom-nikelden, diğerleri paslanmaz çelikten yapılmıştır. Sivri uçlar, tepe açısı $15^{\circ} \pm 5$ olacak şekilde, koni biçiminde, tornada sivriltilmiş ve daha sonra uçları sıfır numara zımpara kağıdı ile özenle yuvarlatılmıştır (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Sivri uç elektrot.

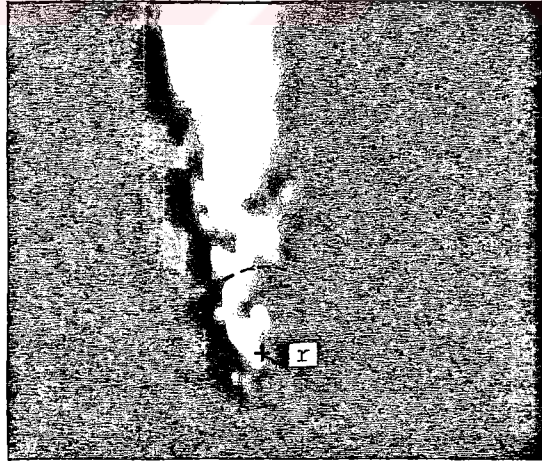
Sivri uçlu elektrotların eğrilik yarıçapları ve düzgünlükleri, Şekil 6.2'de görülen mikroskop, video kamera, monitör ve video mikrometre-den oluşan bir düzen yardımıyla ± 1 hata ile belirlenmiştir.

Uçların monitördeki görüntülerinin fotoğrafları çekilmiş, daha sonra bu fotoğraflar üzerinden de sivri uçların eğrilik yarıçaplarının tahkiki yapılmıştır. Şekil 6.3'de 0,028 mm eğrilik yarıçaplı sivri ucun, monitörden çekilen, 400 kez büyütülmüş fotoğrafı görülmektedir.



Şekil 6.2. Sivri uçların incelenmesinde kullanılan düzen.

- 1 : Mikroskop
- 2 : Video kamera
- 3 : Monitör
- 4 : Video mikrometre

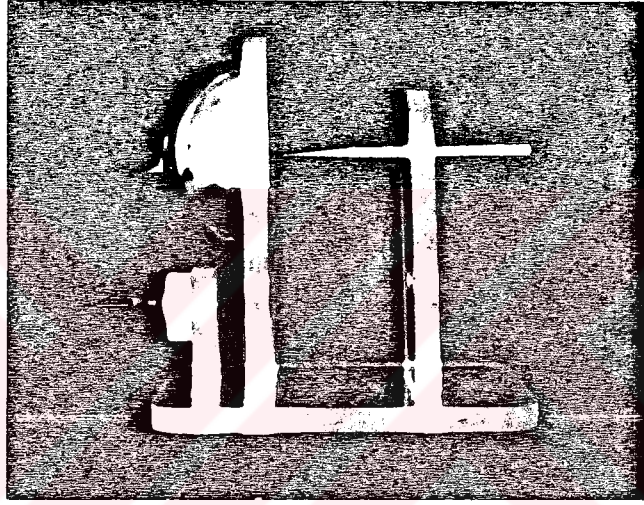


Şekil 6.3. 0,028 mm eğrilik yarıçaplı paslanmaz çelik sivri uç (Ölçek: 400/1).

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde, yarıküre elektrodun yarıçapının boşalma büyüklüklerine etkisi azdır. Bu nedenle deneylerde,

standartlardakine [1-3] uygun, 25 mm yarıçaplı yarıküre elektrotlar kullanılmıştır. Yarıküre elektrotlar, 0,5 mm kalınlığında bakırdan, sıvama tekniği ile içi boş ve $25 \pm 0,1$ mm yarıçapa uygun olarak yapılmıştır. Yarıküre elektrodun kenarları, elektrot düzeninin alanını etkilememesi ve yüksek alan şiddetleri oluşturmaması için yuvarlatılmıştır.

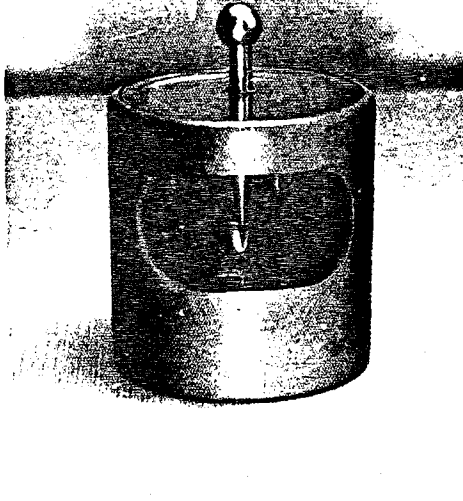
Çalışmada iki farklı kaideli sivri uç-yarıküre elektrot düzeni gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.4'de görülen açık düzende kaidenin



Şekil 6.4. Pleksiglas kaideli (açık) sivri uç-yarıküre elektrot düzeni.

tabanı ve elektrotları tutan destekler 6 mm kalınlığında pleksiglastan yapılmıştır. Bu düzende elektrotların hava koşulları ve kirlenme gibi dış etkilere açık olması düzenin olumsuz yanıdır. Ancak bu düzen, delinme ve kısmi boşalma deneyleri sırasında boşalmaların rahatlıkla izlenebilmesi bakımından yararlı olmuştur.

Gerçeklenen ikinci elektrot düzeninde, kaide, 37,5 mm iç yarıçapında, 75 mm yüksekliğinde bir PVC (polivinilklorür) borudan yapılmıştır. Bu silindirsel kaidenin alt ve üstü pleksiglas kapaklar ile kapatılmış ve elektrotlar bu kapaklara eşeksenli olarak tesbit edilmiştir. Böylelikle dış etkilerden daha az etkilenebilecek kapalı bir düzen elde edilmiştir (Şekil 6.5).



Şekil 6.5. PVC kaideli (kapalı)
sivri uç-yarıkküre elektrot düzeni.

Gerçeklenen sözkonusu her iki düzende de elektrotların eşeksenli ve eşmerkezli olmasına ve kaidelerin istenmeyen boşalmalara yolaçmayacak biçim ve boyutlarda olmasına dikkat edilmiştir.

6.1.2. Isıtıcı Düzen

Sıcaklık deneyleri için, iç boyutları $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}^3$ olan, maksimum 250°C ye kadar ısıtma kapasiteli, sürekli sıcaklık ayarı yapılabilir, termostatlı, dışarıya karşı ısı yalıtımlı gövdeli bir ısıtıcı düzeni (fırın) kullanılmıştır. Fırının üzerinde, fırın içindeki sıcaklığı gösteren, civa hazne kısmı fırın içinde, skalası fırın dışında bulunan bir civalı termometre bulunmaktadır.

Fırın içine yüksek gerilim bağlantısı, bir fazlı 24 kV'luk, polietilen yalıtkanlı, ekransız bir kablo ile; ölçme devresi bağlantısı ise 75 ohm'luk, polietilen yalıtkanlı, ekranlı bir ölçü kablosu ile, fırının ısı yalıtımı bozulmayacak şekilde, düzen ve can güvenliği gözönüne alınarak yapılmıştır. Çalışmalar sırasında fırının gövdesi ve ölçü kablosunun ekranı topraklanmıştır.

Söz konusu basınç kabı, alçak basınç deneylerinde kullanılırken, kabın altındaki doldurma (V1) vanasının ucuna atmosfer altı basınçları mmHg cinsinden gösteren $0 \div 760$ mmHg'lik analog bir manometre (M2) bağlanmıştır.

6.1.3.2. Kompresör

Deneylerde basınçlı hava, 20 bar basınca kadar hava verebilen, 100 lt'lik elektrikli bir kompresörden sağlanmıştır. Kompresörün verdiği havanın basıncı, üzerindeki 0-20 bar'lık analog bir manometreden okunabilmekte ve ayar vanası (V3) ile basınç ayarı yapılabilmektedir.

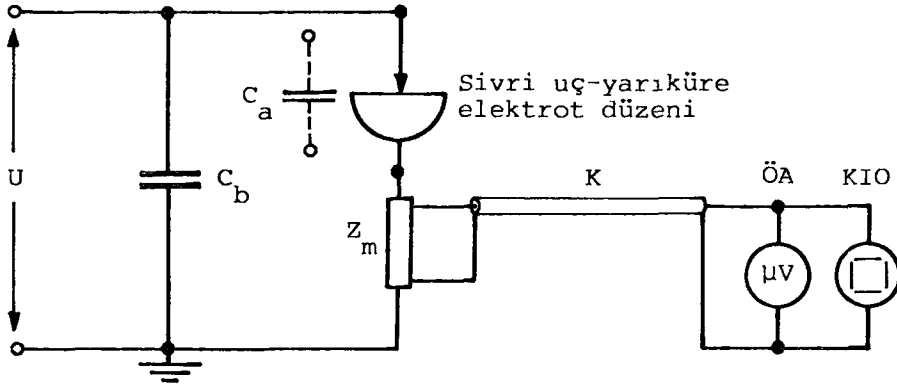
6.1.3.3. Vakum Pompası

Alçak basınçtaki deneylerde 10^{-3} mmHg vakum kapasiteli, mekanik, iki kademeli, yağlı bir yüksek vakum pompası kullanılmıştır. Vakum pompası üzerinde vakum düzeyi ayar vanası (V4) bulunmaktadır. Deneylerde bu musluğa ek olarak, düzene bir ince ayar vanası (V5) bağlanmıştır. Alçak basıncın değeri, basınç kabı üzerine takılan mmHg cinsinden gösteren bir analog manometreden (M2) okunmuştur.

6.1.4. Kısmi Boşalma Ölçme Devresi ve Elemanları

Kısmi boşalmaların ölçülmesinde başlıca direkt, köprü veya kayıp ölçme devrelerinden birisi kullanılabilir [52,53]. Direkt kısmi boşalma ölçme devreleri, deney cismi, bağlama kondansatörü (C_b) ve ölçü empedansının (Z_m) bağlantı durumlarına göre iki şekilde gerçekleştirilebilir. Bu devrelerden birinde ölçü empedansı, bağlama kondansatörüne, diğerinde deney cismine seri bağlanır.

Çalışmada Şekil 6.7'de görülen ölçü empedansının deney cismine (sivri uç-yarıküre elektrot düzenine) seri bağlandığı direkt kısmi boşalma ölçme devresi kullanılmıştır. Deney cisminin topraktan kolaylıkla yalıtılabilir ve kapasitesinin bağlama kondansatörünün kapasitesi yanında çok küçük olması ($C_a \ll C_b$) nedeniyle bu devre tercih edilmiştir. Bu devrede yüksek gerilim kaynağı tarafından gelebilecek elektriksel gürültüler, yaklaşık olarak C_a/C_b oranında yani $C_a \ll C_b$ olması nedeniyle çok büyük oranda azaltılır [7].



Şekil 6.7. Kısmi boşalma Ölçme devresi.

C_a : Deney cismi

C_b : Bağlama kondansatörü

Z_m : Ölçü empedansı

K : Ölçü kablosu

ÖA : Kısmi boşalma ölçü aleti

KIO: Katot ışınlı osiloskop

Şekil 6.7'den de görüldüğü gibi elektriksel kısmi boşalma ölçme devresindeki başlıca elemanlar, bağlama kondansatörü, ölçü empedansı, kısmi boşalma ölçü aleti ve osiloskoptur.

6.1.4.1. Bağlama Kondansatörü (C_b)

Deneylerde 1,007 nF, 120 kV'luk, yağlı, kısmi boşalmaz bir yüksek gerilim kondansatörü, bağlama (kuplaj) kondansatörü olarak kullanılmıştır. Bu kondansatörün alt ucu topraklanmıştır.

6.1.4.2. Ölçü Empedansı (Z_m)

İki tip ölçü empedansı (dört uçlusu) ile çalışılmıştır. Bunlardan biri 60 ohm (1 A) lık RC tipi bir dört uçludur. Diğeri 60 - 150 - 300 ve 600 ohm kademeleri olan RLC tipi bir dört uçludur.

6.1.4.3. Kısmi Boşalma Ölçü Aleti

Kısmi boşalma genliğinin ölçülmesinde dar bandlı, μV cinsinden ölçen veya geniş bandlı, pC cinsinden ölçen kısmi boşalma ölçü aletleri kullanılır. Çalışmada iki dar bandlı ölçü aleti (RIVmetre) kullanılmıştır. Söz konusu ölçü aletlerinin mekanik zaman sabitleri, yüklenme ve boşalma zaman sabitleri, band genişlikleri ve yapısal

pekçok özellikleri hemen hemen aynıdır. Kullanılan RIVmetrelerin (radyo parazit gerilimi ölçü aletlerinin) benzer özellikleri:

Band genişliği: $9 \text{ kHz} \pm \% 10$

Yüklenme zaman sabiti, T_1 : 1 ms

Boşalma zaman sabiti, T_2 : 160 ms

Mekanik zaman sabiti, T_3 : 160 ms

Giriş direnci: $60 \pm 15 \text{ ohm}$

dir [54-56].

Messwandler-Bau HFM-1,9 MHz marka kısmi boşalma ölçü aleti ile sabit 1,9 MHz de ölçü yapılmaktadır. 60 ohm'luk RC tipi ölçü empedansı ile 1 μV 'tan 10 mV'a kadar ölçme olanağı vardır.

Siemens B83600-B80 marka RIVmetrede ise 0,135 - 30 MHz aralığında istenen frekansta ölçü yapma olanağı vardır. RLC tipi ölçü empedansı ile çeşitli direnç (60 - 150 - 300 - 600 ohm) kademelerinde 0,4 μV 'tan 250 mV'a kadar ölçü yapılabilir. Bu aletin göstergesi dB cinsinden ölçeklenmiş ve $\pm 2 \text{ dB}$ 'lik mutlak doğruluğa sahiptir. Bu aletle, çubuk ve halka anten bağlantısı yapılarak yayınlanan elektromagnetik dalgaların, istenen frekanstaki, genlikleri ölçülebilir.

6.1.4.4. Osiloskop

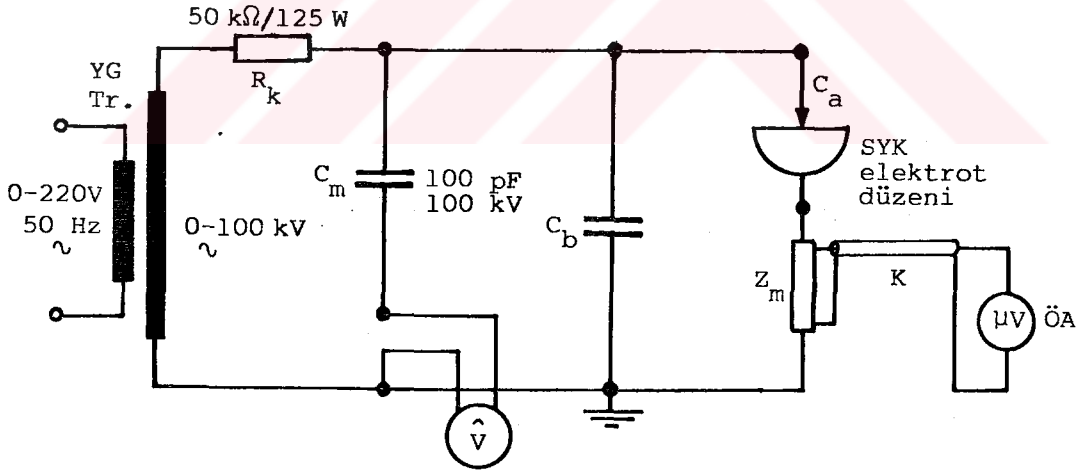
Kısmi boşalma devrelerinde zorunlu olmamakla birlikte, kullanılması yarar olan bir diğer alet osiloskoptur. Çalışmada boşalmaların değerlendirilmesi, oluşumunun izlenmesi, boşalma başlangıç ve sönme anlarının ve tekrarlama sıklıklarının saptanması amacıyla Tektronix 434 marka iki kanallı, hafızalı 20 MHz'lik bir osiloskop kullanılmıştır. Osiloskop, kullanılan her iki kısmi boşalma ölçme aletinden alınan çıkışlara bağlanabilir. HFM-1,9 MHz tipi kısmi boşalma ölçü aletinde osiloskopta kısmi boşalma işaretini deney devresine uygulanan gerilim dalga şekli üzerinde (örneğin 50 Hz lik alternatif gerilimin sinüsoidal dalga biçimi üzerinde) izleme olanağını veren bir karıştırıcı devre (mixer) bulunmaktadır. Bu durumdan yararlanarak karıştırıcı devreye, yüksek gerilim bölücüsünün alçak gerilim ucundan ve kısmi boşalma ölçü aletinden girişler yapılmış, devrenin çıkışı osiloskoba bağlanmıştır.

Kısmi boşalma deney devresinin kurulmasında ve deney koşullarının sağlanmasında kısmi boşalma çalışmalarındaki temel ilkelere ve standartlarda öngörülen kurallara uyulmuştur [1,57-62].

6.2. Yüksek Gerilimlerin Elde Edilmesi ve Ölçülmesi

6.2.1. Yüksek Alternatif Gerilimin Elde Edilmesi ve Ölçülmesi

Endüstriyel frekanslı yüksek alternatif gerilim, bir fazlı, 0,22/100 kV, 5 kVA, 50 Hz, bağlı kısadevre gerilimi % 4 olan, yağlı, pertinaks gövdeli bir yüksek gerilim deney transformatöründen elde edilmiştir. Deney transformatörünün kısmi boşalma düzeyi 100 kV'ta 1 μ V'tan küçüktür. Deney transformatörünün beslemesi, ayar, kontrol ve kumandası bir kumanda masasından yapılmıştır. Kumanda masası, dolayısıyla deney transformatörü, şebekeden gelebilecek bozucu etkenlere karşı alçak geçiren filtre ve bir gerilim regülatörü üzerinden beslenmiştir. Kumanda masasında bir delinme (tam boşalma) durumunda devreyi kısa sürede açacak bir termik-manyetik anahtar bulunmaktadır. Deney transformatörünün çıkışına 50 kohm, 125 W'lık bir öndirenç (koruma direnci) bağlanmıştır [63].



Şekil 6.8. Alternatif gerilim deney devresi.

Tr : Yüksek gerilim deney transformatörü

R_k : Öndirenç (koruma direnci)

C_m : Yüksek gerilim ölçü kondansatörü

$\hat{V}$: Tepe değer/ $\sqrt{2}$ voltmetresi

C_a : Deney cismi (Sivri uç-yarıküre elektrot düzeni)

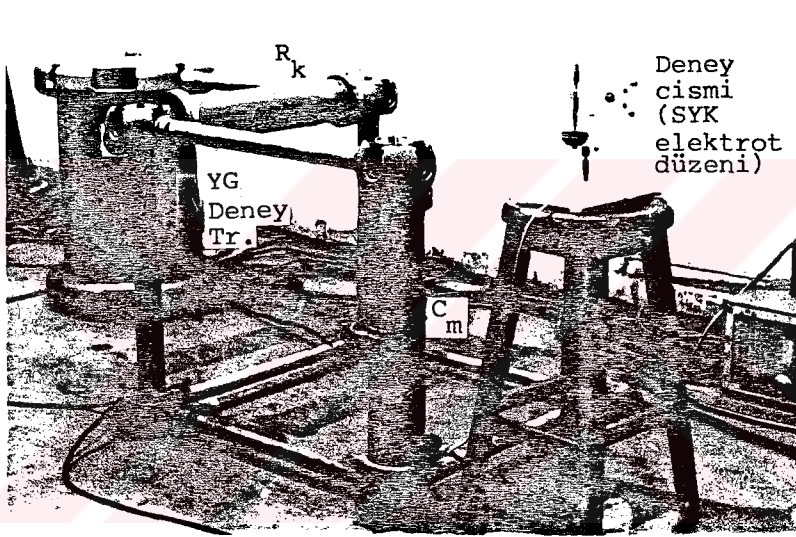
C_b : Bağlama kondansatörü

Z_m : Ölçü empedansı

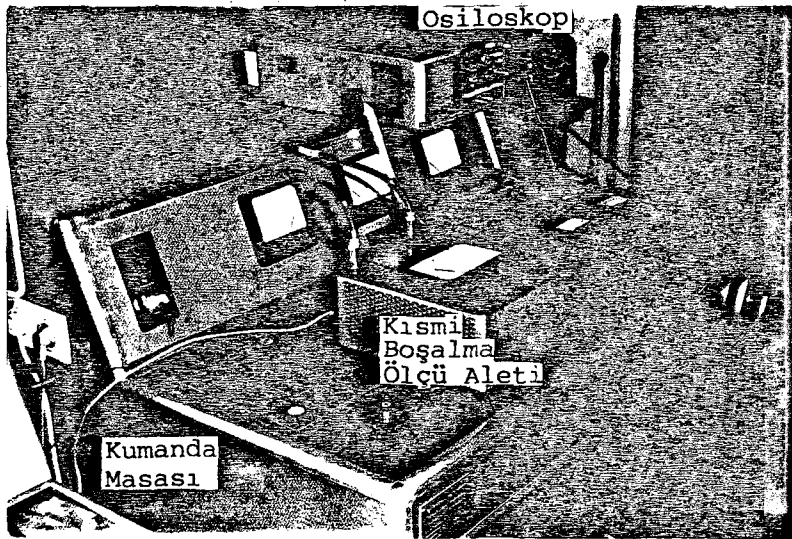
Ö.A: Kısmi boşalma ölçü aleti

Çalışmada yüksek alternatif gerilim, 100 pF, 100 kV'luk bir ölçü kondansatörü ile bağlantılı olarak kullanılan, skalası $kV_{tepe}/\sqrt{2}$ cinsinden ölçeklenmiş, 1,5 sınıfı, bir analog tepe değer voltmetresi ile ölçülmüştür. Gerilim bölücünün alçak gerilim kondansatörünü içinde bulunduran bu voltmetre, gerilimin pozitif veya negatif tepe değerini ölçmektedir.

Şekil 6.8'de alternatif gerilim deney devresi, Şekil 6.9'da da deney devresinin ve kumanda masasının fotoğrafı görülmektedir.



(a)

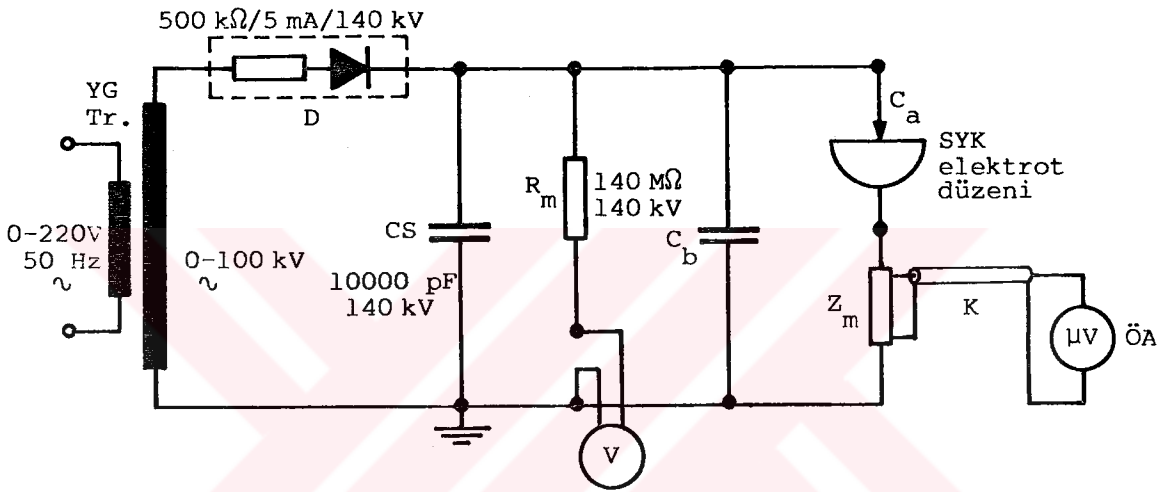


(b)

Şekil 6.9. (a) Alternatif gerilim deney devresi,
(b) Kumanda masası.

6.2.2. Yüksek Doğru Gerilimin Elde Edilmesi ve Ölçülmesi

Yüksek doğru gerilimin elde edilmesinde, yüksek alternatif gerilimin elde edilmesinde kullanılan bir fazlı, 50 Hz, 0,22/100 kV, 5 kVA'lık deney transformatöründen yararlanılmıştır. Söz konusu deney transformatörünün çıkışına anma akımı 5 mA, tıkama gerilimi 140 kV, iç koruma direnci 500 kohm olan selenyumlu bir yüksek gerilim diyodu ve 10000 pF/140 kV'luk bir yüksek gerilim kondansatörü bağlanarak Şekil 6.10'da görülen 140 kV, 5 mA'lık bir fazlı yarıdalga



Şekil 6.10. Doğru gerilim deney devresi.

- D : Yüksek Gerilim diyodu
CS: Düzleme kondansatörü
 R_m : Yüksek Gerilim Ölçü direnci
V : Doğru gerilim voltmetrosi.

doğrultucu devresi elde edilmiştir. Devre, yaklaşık %4 dalgalırlıklı sabit bir doğru gerilim vermektedir. Gerilimin kutbiyeti, devredeki diyodun yönü değiştirilerek değiştirilmiştir. Devrenin besleme, koruma, ayar, kontrol ve kumandası, alternatif gerilim deney devresinde de kullanılan kumanda masasından yapılmıştır.

Yüksek doğru gerilim, 140 Mohm, 140 kV, 1 mA'lık bir yüksek gerilim ölçü direncine seri bağlı, skalası kV cinsinden ölçeklenmiş analog bir döner bobinli miliampermetreden oluşan 1,5 sınıfı bir voltmetre ile ölçülmüştür.

6.3. Deneylerin Yapılışı

Deneyler, İ.T.Ü. Fuat Külünk Yüksek Gerilim Laboratuvarı, 100 kV'luk Ekranlı Deney Odası'nda yapılmıştır. Alanı $6 \times 6 \text{ m}^2$, yüksekliği 3 m olan bu Laboratuvar odasının duvarları, tavanı ve zemini, 0,5 mm kalınlığında bakır levhalarla kaplıdır. Bu odanın iki penceresinden biri bakır levha ile kaplanmış, diğeri ise gün ışığında çalışma olanağı sağlamak amacıyla ekranlamayı bozmayacak şekilde kenekli olarak yapılmıştır. Aynı şekilde Laboratuvar kapısı da ekranlama kontakları ile donatılmıştır. Uzun süreli çalışmalarda oda havasını temizlemek amacıyla, bir aspiratör tesis edilmiştir. Aspiratör çıkış kanalı ince alüminyum şeritlerle doldurularak odanın dış parazitlere karşı ekranlaması bozulmamıştır.

Odanın topraklaması Laboratuvarın genel topraklamasına birleştirilmiş durumdadır. Topraklamada, bir tek noktada topraklama ilkesine uyulmuştur. Odanın beslemesi, oda dışından bir alçak geçiren filtre üzerinden oda içindeki bir tabloya yapılmıştır. Oda içindeki düzenler ve aydınlatma tesisatı bu tablodan beslenmektedir. Aydınlatmada, parazit kaynağı olmaması için akkor telli lambalar kullanılmıştır [64].

Deney odasının dış parazitlere karşı yeterince ekranlandığı, 0,135 - 30 MHz ölçme frekans aralığına sahip radyo parazit gerilimi ölçü aleti (RIVmetre) ile kontrol edilmiştir. Bunun için, Laboratuvar kapı ve penceresi kapalı, Laboratuvar içindeki deney devreleri elemanları topraklanmış durumda iken, çalışılan frekanslarda ölçmeler yapılmış ve ortamın kısmi boşalma ölçmeleri bakımından çok uygun olduğu saptanmıştır.

Deney devrelerinde bağlantılar olabildiğince kısa, pürüzsüz ve kısmi boşalmasız iletkenlerle yapılmıştır.

6.3.1. Kısmi Boşalma Büyüklüklerinin Ölçülmesi

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeni için çeşitli koşullarda 50 Hz'lik alternatif ve pozitif ve negatif doğru gerilimlerde, kısmi boşalma başlangıç ve sönme gerilimleri ile mikrovolt (μV) cinsinden kısmi boşalma genlikleri ölçülmüştür. Ölçmeler, 1,9 MHz ölçü

frekansında yapılmıştır. Sıcaklık ve basınç deneyleri hariç deneyler Laboratuvar ortamının sıcaklık, basınç ve neminde gerçekleştirilmiştir.

Kısmi boşalma başlangıç ve sönme gerilimleri, kısmi boşalma ölçü aleti ve bir osiloskop yardımıyla belirlenmiştir. Elektrot düzenine uygulanan gerilim sabit bir hızla (ortalama 5 kV/s hızla) yükseltilmiş ve ölçü aletinde ve özellikle osiloskopta düzenli ve kararlı bir boşalmanın izlendiği anda uygulanan gerilimin değeri voltmetreden (AG de $k\hat{V}/\sqrt{2}$, DG de kV cinsinden) okunarak boşalma başlangıç gerilimi saptanmıştır. Boşalma başlangıç geriliminden sonra gerilim kesilmeyip yaklaşık % 30 ile 40 daha yükseltilmiş, bu gerilimde 10 saniye beklenip tekrar sabit bir hızla gerilim alçaltılmaya başlanmıştır. Osiloskopta boşalmaların izlenmediği ve kısmi boşalma ölçü aletinde hiçbir sapma görülmediği anda uygulanan gerilim değeri voltmetreden okunarak kısmi boşalma sönme gerilimi saptanmıştır. Bu işlem her deney koşulunda beş kez tekrarlanarak sonuçların dağılması dikkate alınmıştır. Kısmi boşalma başlangıç ve sönme gerilimi olarak saptanan beş değer aritmetik ortalaması alınmıştır.

Kısmi boşalma başlangıç gerilimini belirleme deneyleri sırasında, başlangıç gerilimi ve üstündeki gerilimlerde kısmi boşalma ölçü aletinden mikrovolt (μV) cinsinden kısmi boşalma genlikleri kaydedilmiştir. Genlik okumalarında ölçü aletinde o andaki en büyük sapma değeri esas alınmıştır. Sonuçlar, benzer şekilde, her koşulda, yapılan beş deneyin aritmetik ortalamasıdır.

Kısmi boşalma deneylerinden önce kısmi boşalma ölçü aletleri kendi iç ayar kaynakları ile ayarlanmıştır. Deney düzeni ve deney cisminden dolayı okuma farklarını yani düzeltme faktörünü belirleme çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalardan düzeltme faktörünün yaklaşık 1 alınabileceği saptanarak deney devresi ve elemanları değişmedikçe bu işlemin tekrarlanmasına gerek görülmemiştir. Düzeltme faktörü belirlemesi, devre tüm elemanları ile hazır durumda ancak gerilim uygulanmamış durumda iken yapılmıştır. Bu iş için devreye genliği ve sıklığı bilinen darbeler uygulayan bir alçak gerilim ayar kaynağından yararlanılmıştır.

Kısmi boşalma ölçmelerinde boşalmaların tekrarlama sıklığı ve kararlılığı hakkında osiloskop ekranındaki görüntülerden yararlanılmıştır [65].

Deneyler, 50 Hz'lik alternatif ve doğru gerilimde benzer şekilde yapılmıştır.

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde, kısmi boşalma ölçmelerinde, ölçü frekansının öneminin olup olmadığının incelendiği deneyde, elektrot düzenine boşalma başlangıç gerilimi uygulanmış durumda iken, 0,135 - 30 MHz ölçü frekans aralığı olan kısmi boşalma ölçü aleti ile, ölçü frekansı 0,135 MHz'den 30 MHz'e kadar değiştirilerek dB cinsinden kısmi boşalma genlikleri saptanmıştır. 0,135 MHz'den başlayarak okuma değerinin değiştiği her frekans değerinde, ölçü frekansı ve boşalma genliği kaydedilmiş, bu işlem 30 MHz'e kadar sürdürülmüştür.

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde, kısmi boşalmaların oluşumu sırasında çevreye yayınlanan parazitlerin düzeyini belirlemek için deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde 0,135 - 30 MHz ölçü frekans aralıklı RIVmetre ile, ucu boşalma kaynağı düzeyine kadar (yaklaşık 1 m) açılmış bir çubuk anten ve 0,135 - 3 MHz ölçü frekans aralıklı bir halka anten kullanılmıştır. Deneyler 1,9 MHz ölçü frekansında yapılmıştır. Çubuk anten ile ve halka anten ile ayrı ayrı kısmi boşalma kaynağından 50 - 100 - 150 ve 200 cm uzaklıklarda yayınlanan elektromagnetik dalgaların çubuk anten ile elektrik alan, halka anten ile magnetik alan bileşenlerinin μV cinsinden genlikleri ölçülmüştür.

Sivri uç-yarıküre düzeninde, elektrot açıklığı ile boşalma büyüklüklerinin ilişkisinin incelendiği deneyde üzeri bir mikrometre yardımıyla birer milimetre aralıklarla 0'dan 5 mm'ye kadar işaretlenen 0,1 mm eğrilik yarıçaplı bir sivri uç, başlangıçtaki eşmerkezli durumuna göre 1'er mm aralıklarla 5 mm'ye kadar yarıküre elektrottan uzaklaştırılmış ve her uzaklık adımıyla kısmi boşalma büyüklükleri saptanmıştır. Ölçmelerde, HFM-1,9 MHz tipi kısmi boşalma ölçü aleti ve RC tipi 60 ohm'luk ölçü empedansı kullanılmıştır.

Bütün ölçmelerde, deney cismi kapasitesinin çok küçük olması nedeniyle, 150 ohm'da $1 \mu V \approx 1 \text{ pC}$ veya 60 ohm'da $1 \mu V \approx 2,5 \text{ pC}$ alınarak sonuçların pC cinsinden değerlendirilmesi mümkündür [66].

6.3.2. Sıcaklıkla Değişim Deneyleri

Bu deneyde ilk ölçme, incelenen elektrot düzeni ısıtıcı düzene (fırına) yerleştirilip, devreye gerilim ve ölçü bağlantıları yapıldıktan sonra, Laboratuvar ortamının hava sıcaklığında, fırın çalıştırılmadan yapılmıştır. Deneyde, 50 Hz'lik alternatif ve pozitif ve negatif doğru gerilimde, sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde kısmi boşalma (korona) başlangıç ve sönme gerilimleri ölçülmüştür. Ölçmeler, boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerini belirleme işlemine uygun olarak yapılmıştır. Deneye, fırın çalıştırılıp başlangıç hava sıcaklığından itibaren 10°C lık sıcaklık artışlarıyla 75°C ye kadar devam edilmiştir. Her sıcaklık basamağında fırın içinde kararlı sıcaklığın oluşmasına kadar beklenmiştir. Bu bekleme süresi, fırının yeni sıcaklık ayarı yapılarak, fırın sıcaklığının ayarlanan sıcaklığa ulaşmasından sonra yaklaşık 15-20 dakika bu sıcaklığın değişmediği görüldüğü süre sonuna kadar geçen zamandır ve deneyde bu süre, 40 ile 45 dakika arasında değişmiştir. Deney, sivri uç-yarıküre elektrot düzeninin plastik malzemeden yapılmış kaidesinde sıcaklık nedeniyle bir yumuşama veya bozulma olmayacak sıcaklığa (75°C ye) kadar sürdürülmüştür. Yine, her sıcaklık basamağında, her gerilim türü için beşer deney yapılmış, sonuç olarak bunların aritmetik ortalaması alınmıştır.

6.3.3. Basınç Deneyleri

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde, hava basıncı ile boşalma büyüklükleri ve boşalmaların oluşumu arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla deneyler yapılmıştır. Basınç deneyleri, alçak basınçta (atmosfer basıncının altında) ve yüksek basınçta (atmosfer basıncının üstünde) yapılan deneyler olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Her iki aşamada da, 50 Hz'lik alternatif ve pozitif ve negatif doğru gerilimde, kısmi boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin basınçla değişimleri saptanmış, osiloskoptan boşalmaların davranışı izlenmiştir.

6.3.3.1. Alçak Basıncıta Yapılan Deneyler

Bu deney için sivri uç-yarıküre elektrot düzeni deney kabına yerleştirilip kısmi boşalma ölçme devresine bağlandıktan sonra, bir yüksek vakum pompası ve hava geribesleme düzeni yardımıyla deney kabı içerisindeki hava basıncı, normal hava basıncından itibaren 100 mmHg basınç azaltımlarıyla 45 mmHg'ye kadar düşürülmüştür. Bu alt sınır, kullanılan deney kabında inilebilen en düşük basınçtan dolayı ortaya çıkmıştır. Her basınç düzeyinde, deney kabı içerisindeki basınç kararlılığının sağlanması bakımından 25 ile 30 dakika arasında beklenmiş ve daha sonra boşalma deneylerine geçilmiştir. Deneyler, basınç, normal hava basıncından alçak basınç alt sınırına ve alt sınırdan normal hava basıncına değiştirilerek iki kez tekrarlanmıştır.

6.3.3.2. Yüksek Basıncıta Yapılan Deneyler

Sivri uç-yarıküre elektrot düzeni basınç kabı içine yerleştirilip kısmi boşalma devresine bağlandıktan sonra, basınç kabı içindeki hava basıncı, bir kompresör yardımıyla normal hava basıncından itibaren 1 bar aralıklarla 5 bar'a kadar yükseltilmiştir. Her basınç düzeyinde, basınç kabı içerisindeki basınç kararlılığının sağlanması bakımından 15 dakika beklenmiş ve daha sonra deneylere geçilmiştir.

6.3.4. Delinme Gerilimlerinin Belirlenmesi

Sivri uç-yarıküre elektrot düzenine uygulanabilecek en yüksek gerilim değerinin belirlenebilmesi ve delinme olayının izlenmesi amacıyla 50 Hz'lik alternatif ve pozitif ve negatif doğru gerilimde delinme gerilimlerini belirleme deneyleri yapılmıştır. Alternatif ve doğru gerilim deney devrelerinde söz konusu elektrot düzeninin sivri uç elektrodu gerilime, yarıküre elektrodu devrenin topraklamasına bağlanmıştır. Elektrot düzenine, delinme olana kadar sabit yükselme hızıyla (yaklaşık 5 kV/s hızla) gerilim uygulanarak delinme gerilimleri devredeki voltmetreler üzerinden belirlenmiştir. Her durumda beş deney yapılmış ve delinme gerilimi değeri olarak bu beş deney sonucunun aritmetik ortalaması alınmıştır. Deneyler sırasında delinme olayları gözle izlenmiş ve fotoğrafları çekilmiştir.

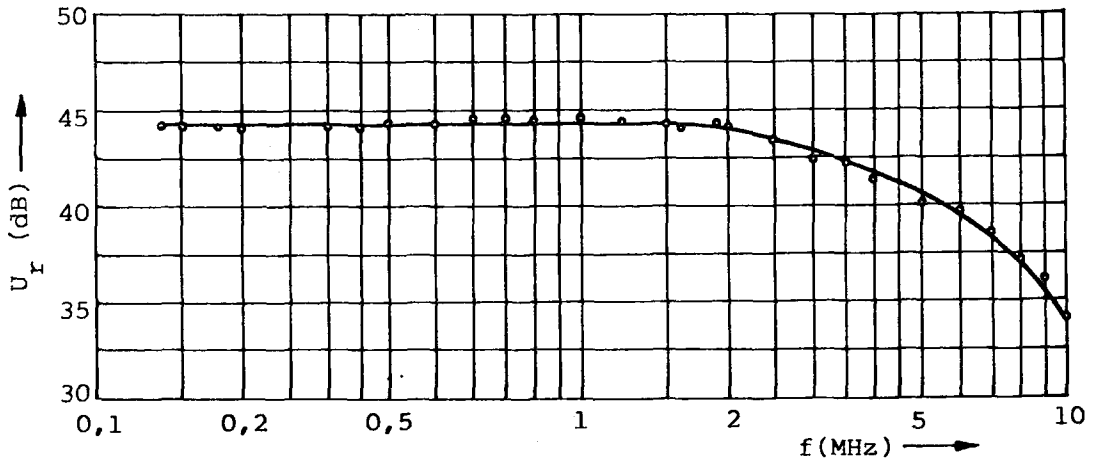
BÖLÜM 7

BOŞALMA DENEYLERİNİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Referans korona kaynağı olarak bir sivri uç-yarıküre elektrot düzeni üzerinde, doğru ve endüstriyel frekanslı alternatif gerilimde, delinme ve kısmi boşalma deneyleri yapılmıştır. Kısmi boşalma deneylerinde, kısmi boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin, boşalma genliğinin ve boşalmaların oluşumunun, sıcaklık, basınç, elektrot açıklığı, sivri uç eğrilik yarıçapı ve gerilim değeri gibi etkenler ile ilişkisi incelenmiştir. Aşağıdayapılan deney ve incelemelerin sonuçları ve değerlendirmeleri verilmiştir.

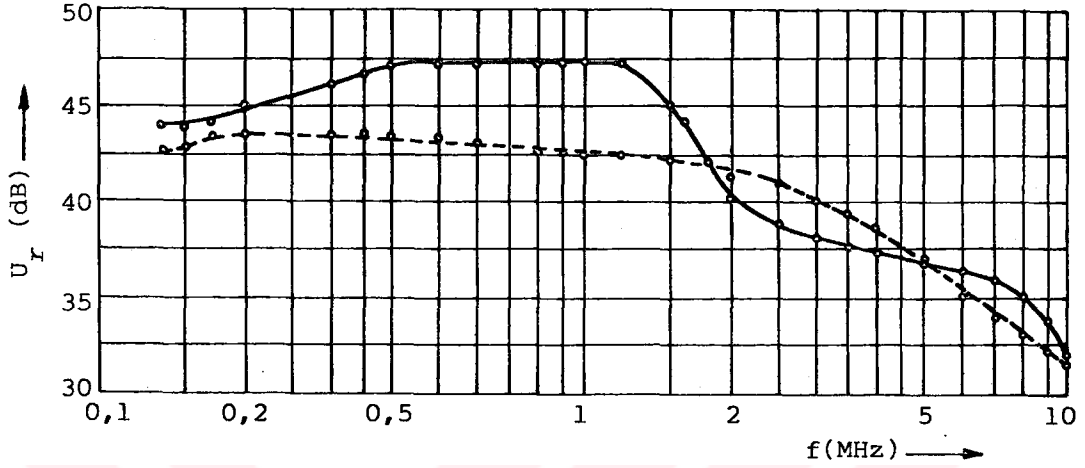
7.1. Kısmi Boşalma Ölçme Frekansının Önemi

0,1 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç, 25 mm yarıçaplı yarıküreden oluşan elektrot düzeninde kısmi boşalma genliği, 0,135-10 MHz aralığında farklı ölçme frekanslarında ölçülmüştür. Ölçmeler, elektrot düzeninin kısmi boşalma başlangıç geriliminde, 60 ohm'luk ölçü empedansının uçlarına bağlı 0,135-30 MHz ölçme frekansı aralıklı kısmi boşalma ölçü aleti (RIVmetre) ile yapılmıştır. Şekil 7.1'de 50 Hz'lik



Şekil 7.1. Alternatif gerilimde boşalma genliği okumalarının ölçme frekansı ile değişimi. $U=U_i$, $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $t=27^{\circ}\text{C}$, $p=761$ mmHg.

alternatif gerilimdeki, Şekil 7.2'de de doğru gerilimdeki deney sonuçları görülmektedir. Kısmi boşalma genliği değerleri, kullanılan RIVmetrenin 0,4 μ V'luk temel gerilim düzeyine göre desibel (dB) cinsinden alınmıştır.



Şekil 7.2. Doğru gerilimde boşalma genliği okumalarının ölçme frekansı ile değişimi.

$U=U_i$, $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $t=27^{\circ}\text{C}$, $p=761$ mmHg

— : Pozitif doğru gerilimde,

--- : Negatif doğru gerilimde.

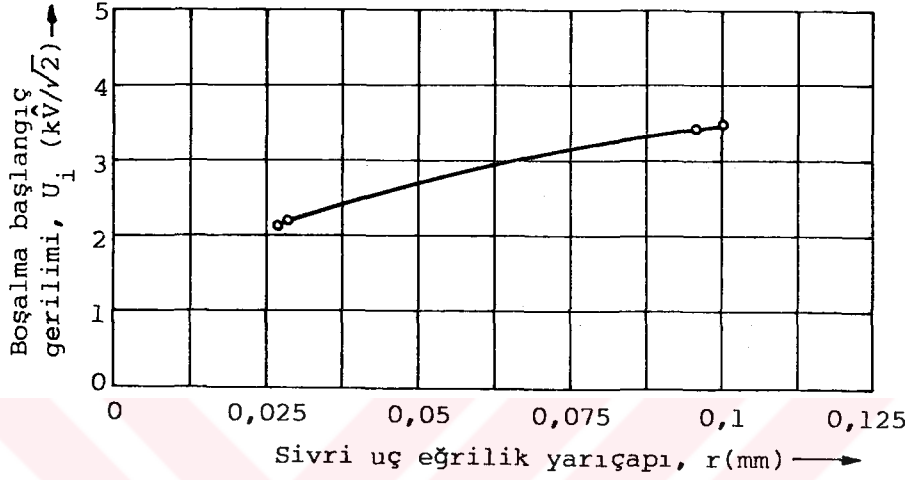
Şekil 7.1 ve 7.2'den alternatif gerilimdeki değişimin doğru gerilimdekilere göre daha geniş frekans aralığında sabit ve kararlı olduğu görülmektedir. Değişimlerin her gerilim türü için yaklaşık 0,4 MHz ile 2 MHz arasındaki ölçme frekanslarında, yaklaşık sabit olduğu söylenebilir. RIVmetrelerle ölçmeler, standartlarda da [59] öngörüldüğü gibi, genellikle 0,5-1 veya 1,9 MHz ölçü frekanslarında yapılır. Bu durum, referans korona kaynağı ile çalışılırken kullanılacak ölçme frekansının ölçme sonuçları bakımından kritik olmadığını göstermektedir.

Çalışmada, bu deney dışındaki kısmi boşalma deneylerindeki ölçmeler 1,9 MHz ölçme frekansında yapılmıştır.

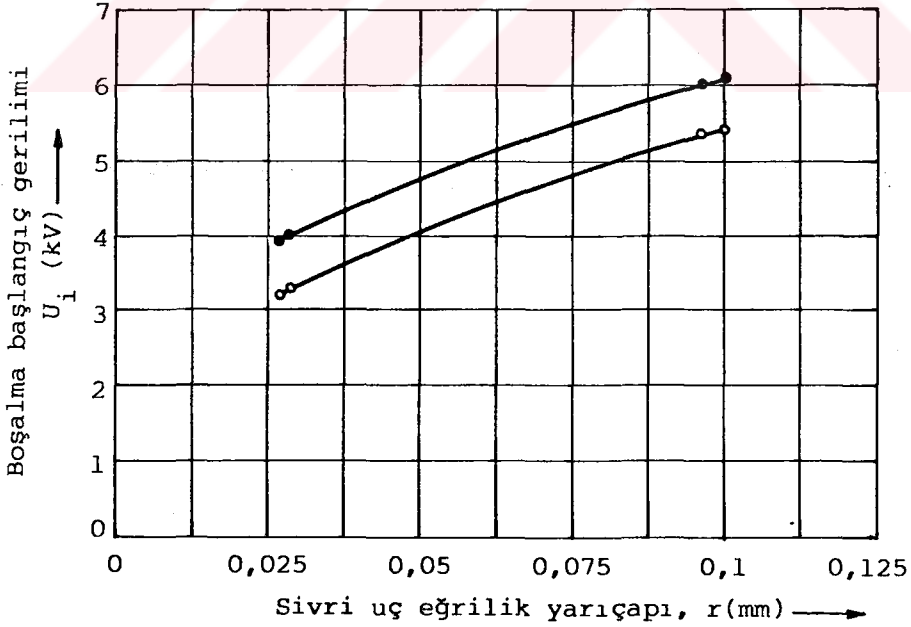
7.2. Boşalma Başlangıç Geriliminin ve Genliğinin Sivri Uç Eğrilik Yarıçapı İle Değişimi

Yarıküre yarıçapı, $R=25$ mm = sabit olmak üzere, eğrilik yarıçapları, $r=0,027$; 0,028; 0,096 ve 0,1 mm olan sivri uçlar için, 50 Hz

alternatif ve doğru gerilimde, boşalma başlangıç ve sönme gerilimleri ile boşalma başlangıç gerilimindeki boşalma genlikleri deneysel olarak saptanmıştır. Sonuçlar, Şekil 7.3, 7.4, 7.5 ve 7.6'da sivri uç eğrilik yarıçapı ile boşalma büyüklüklerinin değişimleri şeklinde verilmiştir.

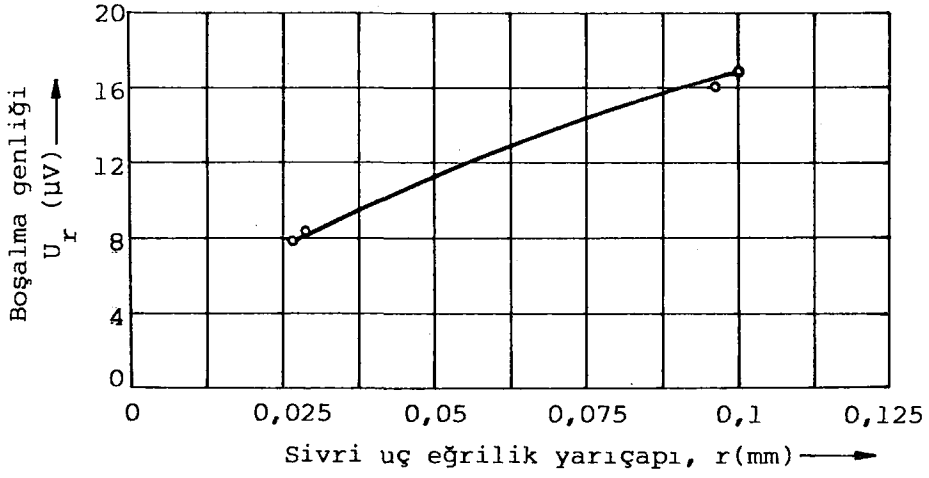


Şekil 7.3. Alternatif gerilimde boşalma başlangıç geriliminin sivri uç eğrilik yarıçapı ile değişimi. R=25 mm.

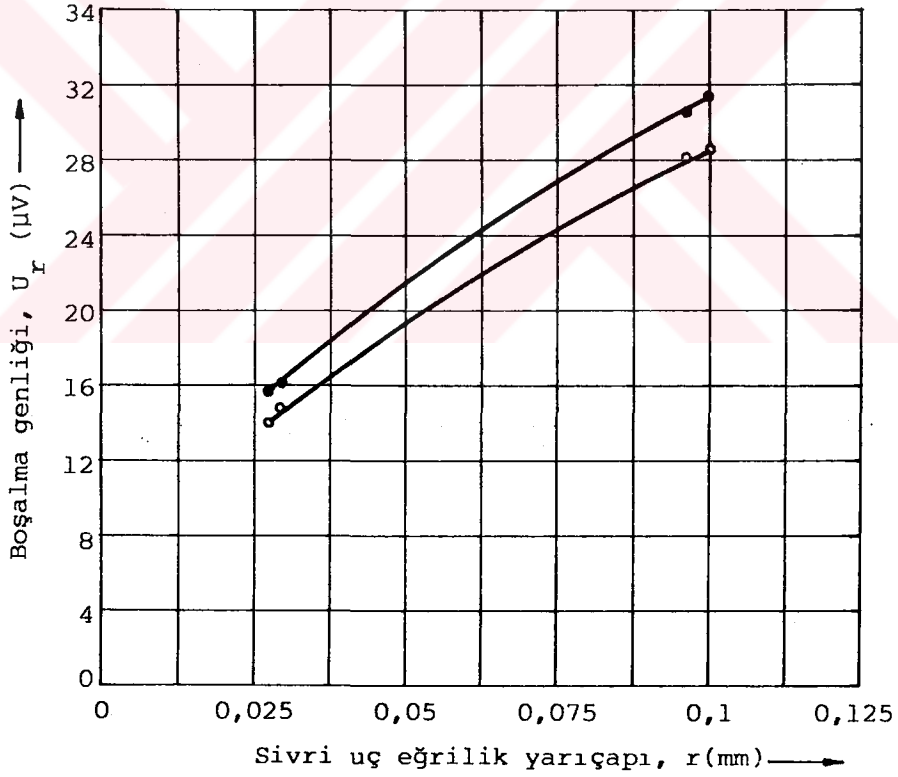


Şekil 7.4. Doğru gerilimde boşalma başlangıç geriliminin sivri uç eğrilik yarıçapı ile değişimi. R=25 mm.

- Pozitif doğru gerilimde
- Negatif doğru gerilimde



Şekil 7.5. Alternatif gerilimde boşalma genliğinin sivri uç eğrilik yarıçapı ile değişimi. $R=25$ mm, $U=U_i$.



Şekil 7.6. Doğru gerilimde boşalma genliğinin sivri uç eğrilik yarıçapı ile değişimi. $R=25$ mm, $U=U_i$.
• Pozitif doğru gerilimde
◦ Negatif doğru gerilimde

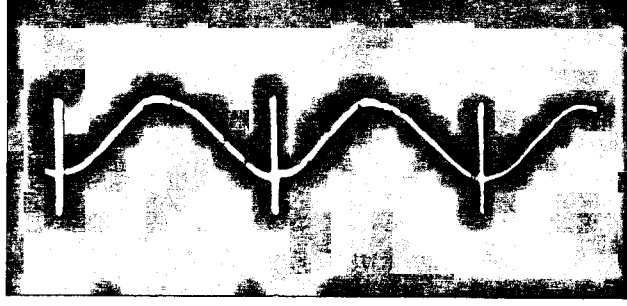
Şekil 7.5 ve 7.6'daki eğrilerin çizilmesinde, her bir sivri uç eğrilik yarıçapı için ölçülen en küçük ve en büyük boşalma genliği

toplamının yarısına eşit değerler gözönüne alınmıştır. Kullanılan sivri uçlar için boşalma genliği okumaları arasındaki fark yaklaşık olarak $\pm$ % 10 civarında değişmiştir.

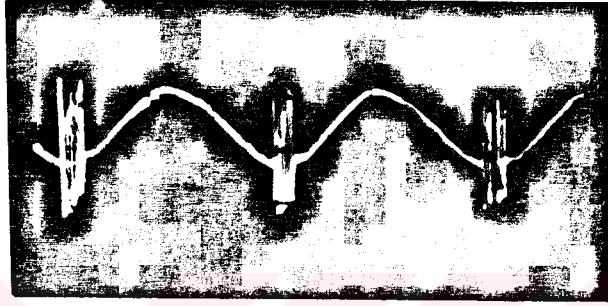
Şekillerin incelenmesinden sivri uç eğrilik yarıçapı arttıkça boşalma başlangıç geriliminin ve boşalma genliğinin de arttığı görülmektedir. Bu artış, çalışılan sivri uç eğrilik yarıçapı aralığında boşalma başlangıç gerilimi için ilk ölçülen değere göre yaklaşık 50 Hz alternatif gerilimde % 160, pozitif doğru gerilimde % 150 ve negatif doğru gerilimde % 168; boşalma genliği için 50 Hz alternatif gerilimde % 215, pozitif doğru gerilimde % 200 ve negatif doğru gerilimde % 205 olmuştur. Bu yarıçap aralığında eğrilik yarıçapı da % 370 (3,7 kat) artmıştır.

Bu çalışmada alternatif gerilimde elde edilen kısmi boşalma başlangıç geriliminin sivri uç eğrilik yarıçapı ile değişimi eğrisi (Şekil 7.3), Kreuger tarafından elde edilen ve Şekil 1.4'de gösterilen eğriye $\pm$ % 5'lik bir farkla uymaktadır. Benzer şekilde, alternatif gerilimde elde edilen boşalma genliği - eğrilik yarıçapı eğrisi de (Şekil 7.5), yine Kreuger tarafından elde edilen ve Şekil 1.3'de alt ve üst sınırları çizilen bölge içinde kalmaktadır. Son durumda, sonuçların karşılaştırılmasında, ölçmelerin 60 ohm'luk ölçü empedansı ile yapılması ve deney cismi kapasitesinin çok küçük olması nedeniyle 1 μ V'un yaklaşık 2,5 pC'a eşit olduğu varsayılmıştır [1,66]. Şekil 1.3'de, değerlendirme kolaylığı sağlamak amacıyla, sağdaki eksen bu varsayıma göre ölçeklenmiştir.

Bu deney sırasında boşalmaların oluşumu bir osiloskop ekranından izlenmiştir. Alternatif gerilimde kısmi boşalma görüntüsünün, uygulanan gerilimin dalga şeklinin negatif yarıdalga tepelerinde sabit genlikli ve düzenli tekrarlanan boşalma darbeleri şeklinde olduğu; gerilim yükseltildiğinde ise boşalma darbelerinin genliklerinin sabit kalmasına karşılık sayısının arttığı gözlenmiştir (Şekil 7.7).



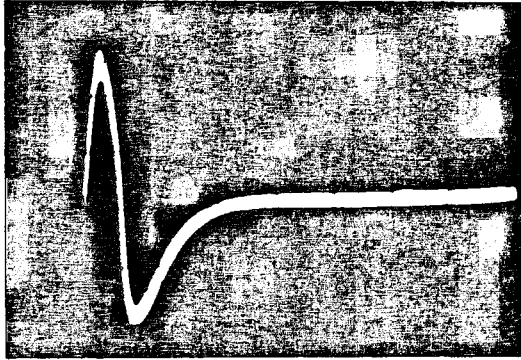
(a)



(b)

Şekil 7.7. Alternatif gerilimde boşalma osilogramları.
a) $U=U_i$
b) $U=1,3 U_i$

Şekil 7.8'de, deneyler sırasında alınan tek bir boşalma darbesinin osilogramı gösterilmiştir. Bu şekil, RC tipi ölçü empedansı uçlarında oluşan üstel sönen boşalma darbesi karakterine uygundur.



Şekil 7.8. Kısmi boşalma darbesi.

Doğru gerilimde de boşalmaların sabit genlikli ve tekrarlama sıklıklı darbeler şeklinde olduğu ve gerilim yükselttilince darbelerin

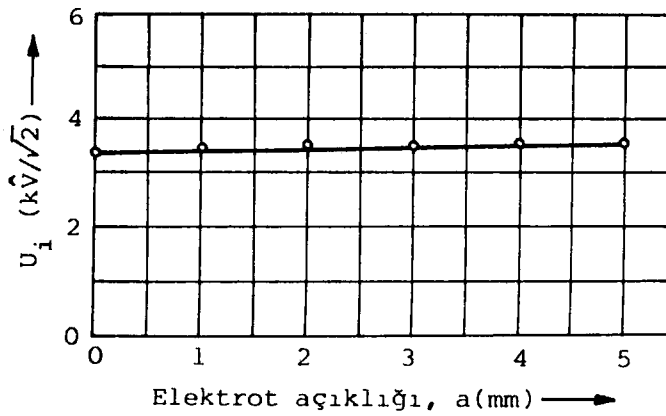
genliklerinin sabit kalmasına karşılık sayısının arttığı gözlenmiştir.

Alternatif gerilimdeki ile doğru gerilimdeki osiloskopta izlenen boşalma şekilleri arasındaki en önemli fark, boşalma darbelerinin sabit fakat her durumda farklı genlikte olmasıdır.

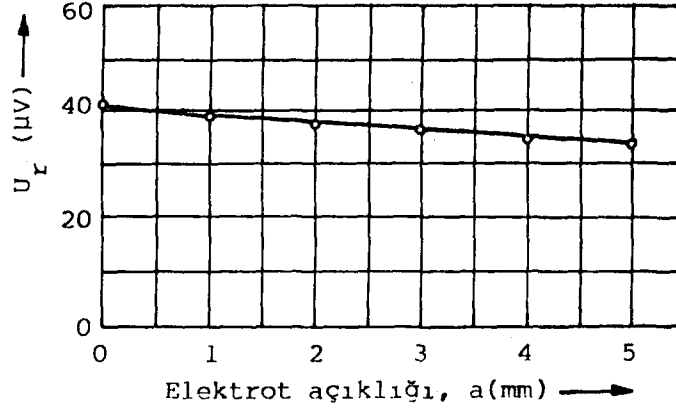
Çalışma sırasında sivri uç-yarıküre elektrot düzenindeki kısmi boşalmalar görsel ve işitsel olarak ta izlenmiştir. Boşalmaların pozitif doğru gerilimde daha sesli ve ışıklı olduğu görülmüştür.

7.3. Boşalma Başlangıç Geriliminin ve Genliğinin Elektrot Açıklığı İle Değişimi

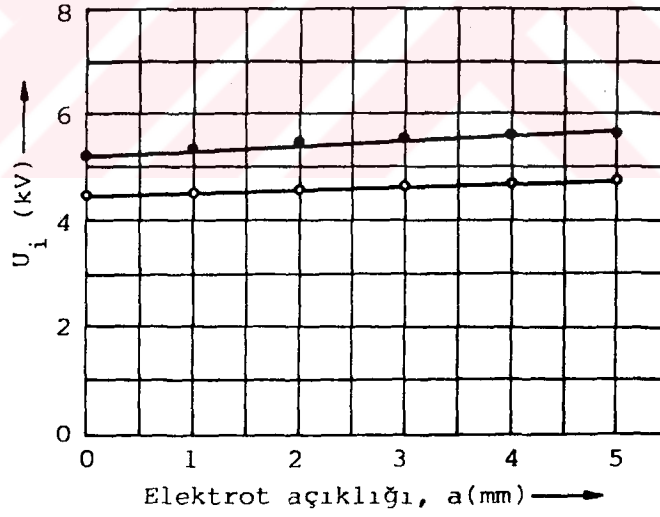
0,1 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç-25 mm yarıçaplı yarıküreden oluşan elektrot düzeninde, 50 Hz'lik alternatif ve doğru gerilimde, elektrot açıklığı ile kısmi boşalma başlangıç geriliminin ve genliğinin değişimi incelenmiştir. İncelemeye sivri uç eğrilik yarıçapı merkezi ile yarıküre merkezinin aynı olduğu açıklıktan yani elektrot düzeninin normal durumundaki açıklıktan başlanmış ve bu açıklık 1 mm aralıklarla 5 mm'ye kadar arttırılmıştır. Şekil 7.9 ve 7.10'da alternatif gerilimdeki, Şekil 7.11 ve 7.12'de de pozitif ve negatif doğru gerilimdeki deney sonuçları görülmektedir.



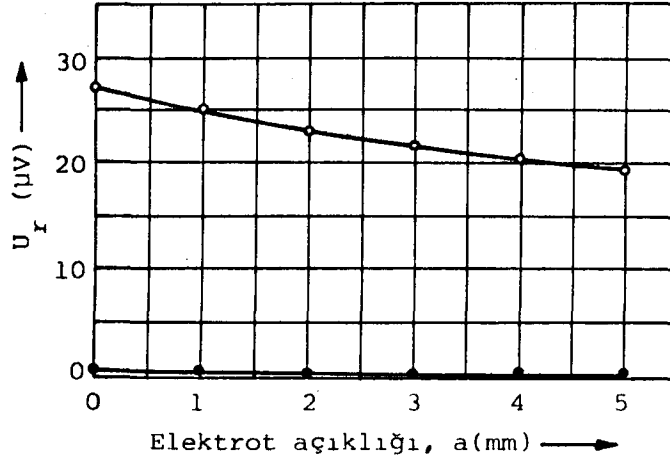
Şekil 7.9. Alternatif gerilimde boşalma başlangıç geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi. R=25 mm, r=0,1 mm, t=21°C, p=765 mmHg.



Şekil 7.10. Alternatif gerilimde boşalma genliğinin elektrot açıklığı ile değişimi.
 $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $t=21^{\circ}C$, $p=765$ mmHg.



Şekil 7.11. Doğru gerilimde boşalma başlangıç geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi. $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $t=18,5^{\circ}C$, $p=763,4$ mmHg.
• Pozitif doğru gerilimde
◦ Negatif doğru gerilimde



Şekil 7.12. Doğru gerilimde boşalma genliğinin elektrot açıklığı ile değişimi.
 $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $t=18,5^{\circ}\text{C}$, $p=763,4$ mmHg.
• Pozitif doğru gerilimde
◦ Negatif doğru gerilimde

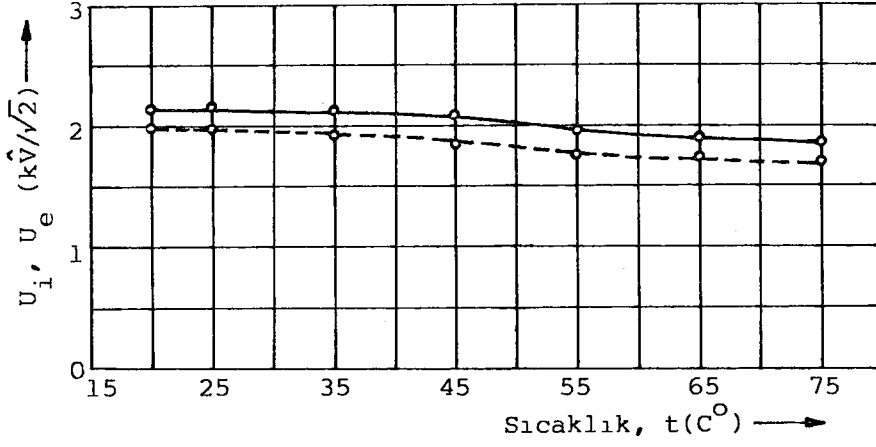
Şekil 7.9, 7.10, 7.11, 7.12'den de görüldüğü gibi incelenen elektrot açıklığı aralığında, boşalma başlangıç gerilimi ilk değerine göre yaklaşık, alternatif gerilimde %6, pozitif doğru gerilimde %7, negatif doğru gerilimde %5,5 artmıştır. Boşalma genliği ise başlangıçtaki değerine göre alternatif gerilimde %20, negatif doğru gerilimde %28,6 azalmıştır. Pozitif doğru gerilimde boşalma genliği, değişimi saptanamayacak kadar küçük ölçülmüştür. Bu sonuçlara bakarak, sivri ucun küçük yer değiştirmelerinde boşalma büyüklüklerindeki değişimin önemsiz olacağı söylenebilir.

Alternatif gerilimde elektrot açıklığı ile boşalma büyüklüklerinin değişimi ile ilgili bu çalışmada elde edilen sonuçlar, Hogg ve Walley [31] in elde ettikleri ve Şekil 2.9 ve 2.10'da gösterilen sonuçlarla benzer değişimler göstermiştir.

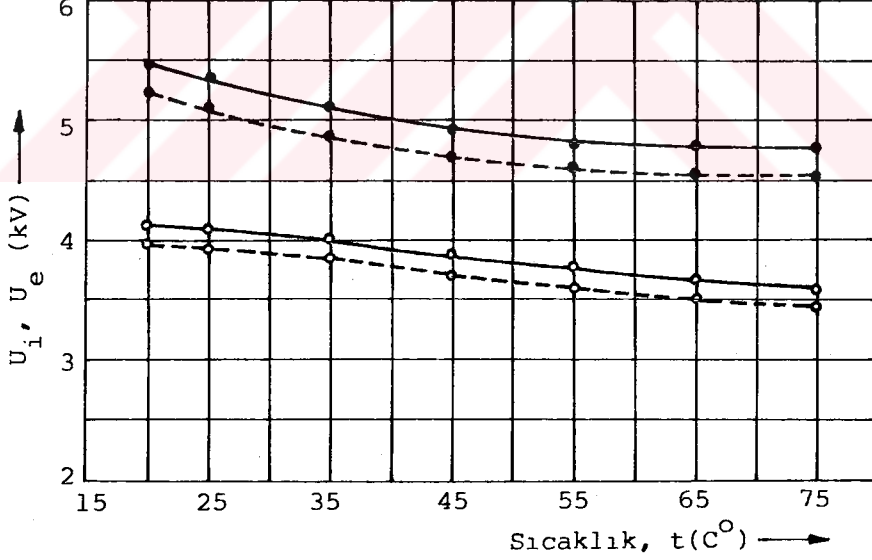
7.4. Boşalma Başlangıç Geriliminin Sıcaklıkla Değişimi

0,1 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç-25 mm yarıçaplı yarıküreden oluşan elektrot düzeninde, 50 Hz alternatif ve doğru gerilimde, 25-75°C sıcaklık aralığında boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin sıcaklıkla değişimi belirlenmiştir. Alternatif gerilimdeki deney sonuçları Şekil 7.13'te, doğru gerilimdeki deney sonuçları da

Şekil 7.14'te gösterilmiştir.



Şekil 7.13. Alternatif gerilimde boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin sıcaklıkla değişimi.
 $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $p=754$ mmHg.
— Başlangıç gerilimi, $U_i = U_i(t)$
--- Sönme gerilimi, $U_e = U_e(t)$



Şekil 7.14. Doğru gerilimde boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin sıcaklıkla değişimi.
 $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $p=754$ mmHg.
• Pozitif doğru gerilimde
○ Negatif doğru gerilimde
— Boşalma başlangıç gerilimi, $U_i = U_i(t)$
--- Boşalma sönme gerilimi, $U_e = U_e(t)$

Şekil 7.13 ve 7.14'de, 25-75°C sıcaklık aralığında, sıcaklıkla boşalma başlangıç gerilimi, başlangıçtaki değerine göre alternatif gerilimde % 12, pozitif doğru gerilimde % 11, negatif doğru gerilimde % 12; sönme gerilimi de alternatif geriliminde % 9, pozitif doğru gerilimde % 12 ve negatif doğru gerilimde % 14 azalmaktadır. Sönme gerilimleri, boşalma başlangıç gerilimlerine göre, ortalama, alternatif gerilimde % 8, pozitif doğru gerilimde % 5 ve negatif doğru gerilimde % 4 daha düşüktür.

Elde edilen bu sonuçlardan boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin, sıcaklıkla derece başına yaklaşık ortalama % 0,2 oranında değişeceği söylenebilir.

7.5. Boşalma Başlangıç Geriliminin Basınçla Değişimi

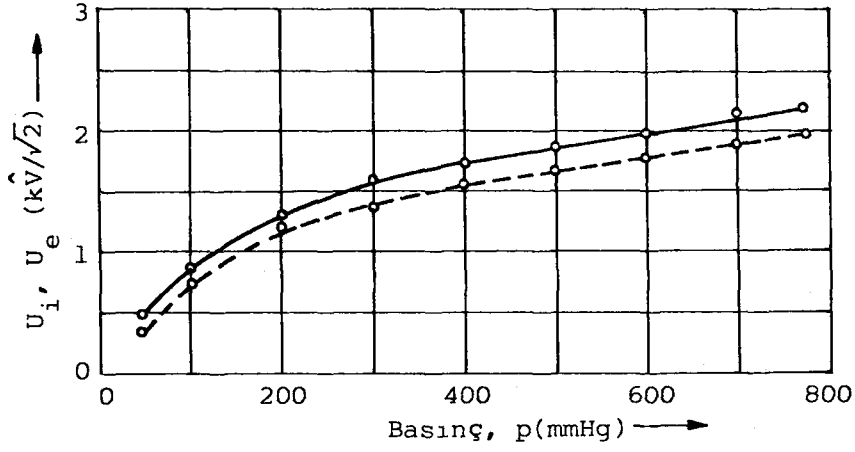
0,1 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç-25 mm yarıçaplı yarıküreden oluşan elektrot düzeninde, 50 Hz alternatif ve doğru gerilimde, boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin basınçla değişimi belirlenmiştir. Deneyler alçak (atmosfer altı) basınçta ve yüksek (atmosfer üstü) basınçta ayrı ayrı yapılmıştır.

7.5.1. Alçak Basınçta Yapılan Deneylerin Sonuçları

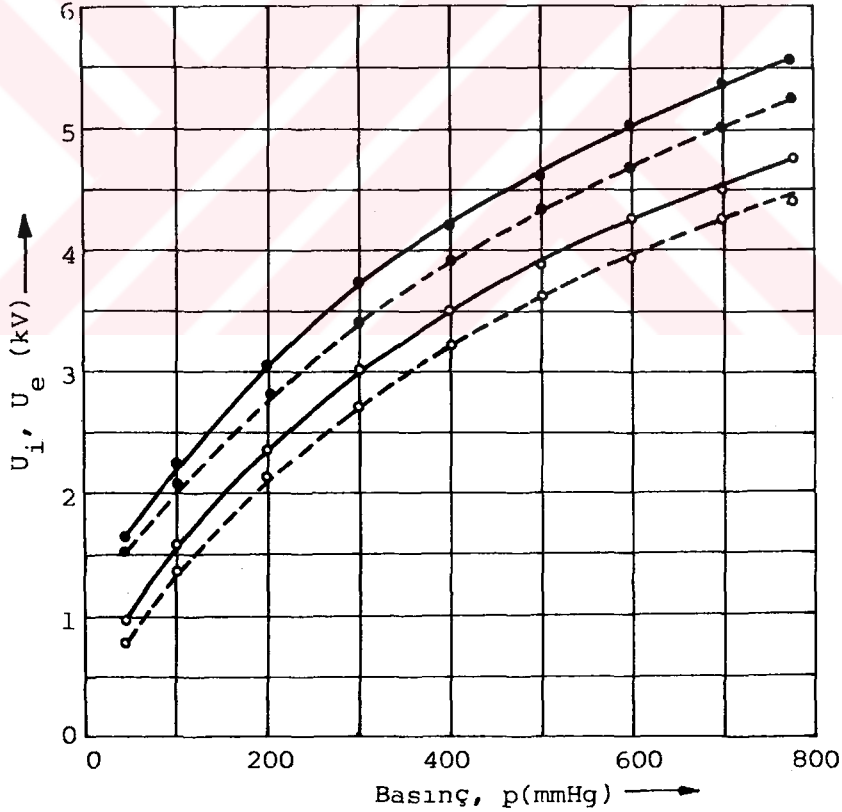
Deneyler, 45-760 mmHg basınç aralığında ve sabit sıcaklıkta yapılmış, Şekil 7.15 ve 7.16'da görülen sonuçlar elde edilmiştir.

Şekil 7.15 ve 7.16'dan boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin, normal hava basıncından alçak basınçlara doğru azaldığı, bu azalmanın başlangıçtaki değerlere göre 45 mmHg de ortalama % 300 ile % 500 arasında olduğu görülmektedir. Bu da, boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin, başlangıçtaki değerlerine göre, alçak basınçta basınçla mmHg başına yaklaşık ortalama % 0,4-0,6 oranında değişeceğini göstermektedir.

Alçak basınçta yapılan ölçmelerde sonuçlar büyük dağılma göstermiş, bu da, sonuçların değerlendirilmesinde zorluklar yaratmıştır.



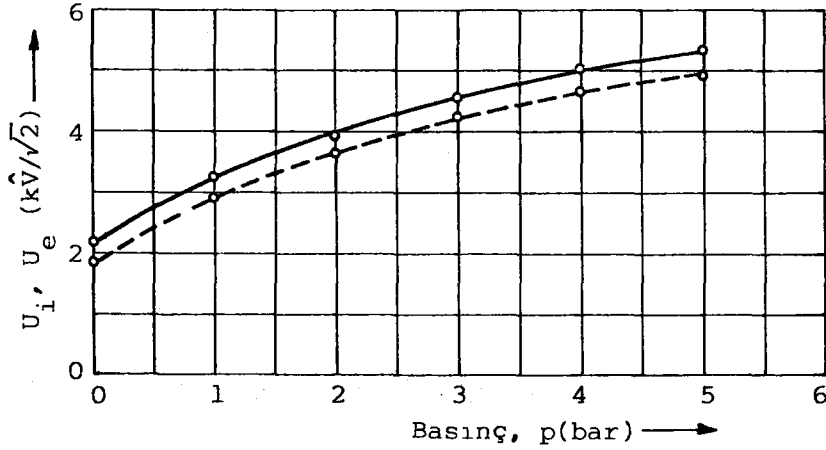
Şekil 7.15. Alternatif gerilimde boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin basınçla değişimi.
 $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $t=19^\circ\text{C}$.
— Boşalma başlangıç gerilimi, $U_i=U_i(p)$
--- Sönme gerilimi, $U_e=U_e(p)$



Şekil 7.16. Doğru gerilimde boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin basınçla değişimi.
 $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $t=19^\circ\text{C}$.
• Pozitif doğru gerilimde
○ Negatif doğru gerilimde
— Boşalma başlangıç gerilimi, $U_i=U_i(p)$
--- Sönme gerilimi, $U_e=U_e(p)$

7.5.2. Yüksek Basınçta Yapılan Deneylerin Sonuçları

Deneyler, 0-5 bar basınç aralığında ve sabit sıcaklıkta yapılmış, Şekil 7.17 ve 7.18'de görülen sonuçlar elde edilmiştir.



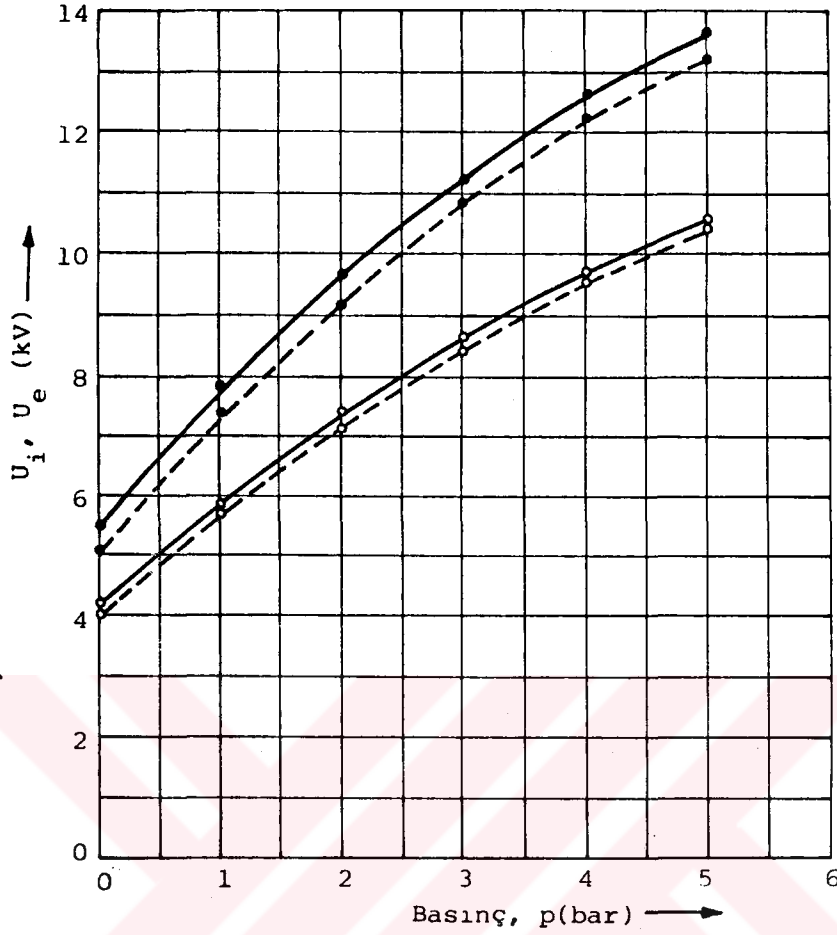
Şekil 7.17. Alternatif gerilimde boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin basınçla değişimi.
 $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $t=23^{\circ}\text{C}$.

— Boşalma başlangıç gerilimi, $U_i = U_i(p)$
--- Sönme gerilimi, $U_e = U_e(p)$

Şekil 7.17 ve 7.18'den, 0-5 bar basınç aralığında, basınçla boşalma başlangıç geriliminin, başlangıçtaki değerine göre, alternatif gerilimde % 65, pozitif doğru gerilimde % 75 ve negatif doğru gerilimde % 82 arttığı; sönme geriliminin de alternatif gerilimde % 69; pozitif doğru gerilimde % 78 ve negatif doğru gerilimde % 83 arttığı görülmektedir. Sönme gerilimleri, boşalma başlangıç gerilimlerine göre ortalama, alternatif gerilimde % 7, pozitif doğru gerilimde % 4 ve negatif doğru gerilimde de % 2 daha düşüktür.

Elde edilen sonuçlardan, basınçla başlangıç ve sönme gerilimlerdeki artışın doğru gerilimde alternatif gerilimden daha büyük olacağı ve en büyük değişiminde negatif doğru gerilimde olacağı anlaşılmaktadır.

Yüksek basınçta yapılan deneylerdeki ölçü sonuçları, alçak basınçta yapılan deneylerdeki ölçü sonuçlarına göre çok daha az dağılma göstermiştir.



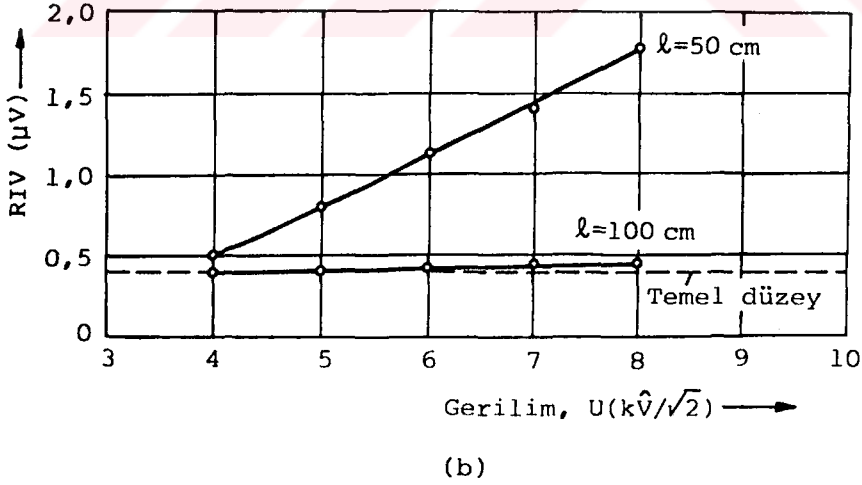
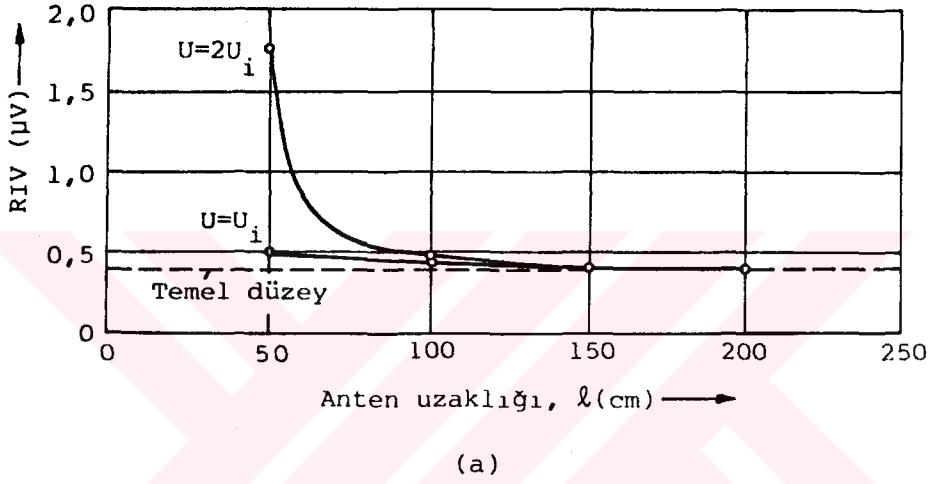
Şekil 7.18. Doğru gerilimde boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerinin basınçla değişimi.
• Pozitif doğru gerilimde
◦ Negatif doğru gerilimde
— Boşalma başlangıç gerilimi, $U_i = U_i(p)$
--- Sönme gerilimi, $U_e = U_e(p)$
 $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $t=23^\circ\text{C}$

Yüksek basınçta, boşalma başlangıç geriliminin basınçla, bar başına alternatif gerilimde ortalama % 15, pozitif ve negatif doğru gerilimde ise % 20 oranında bir değişim göstereceği söylenebilir.

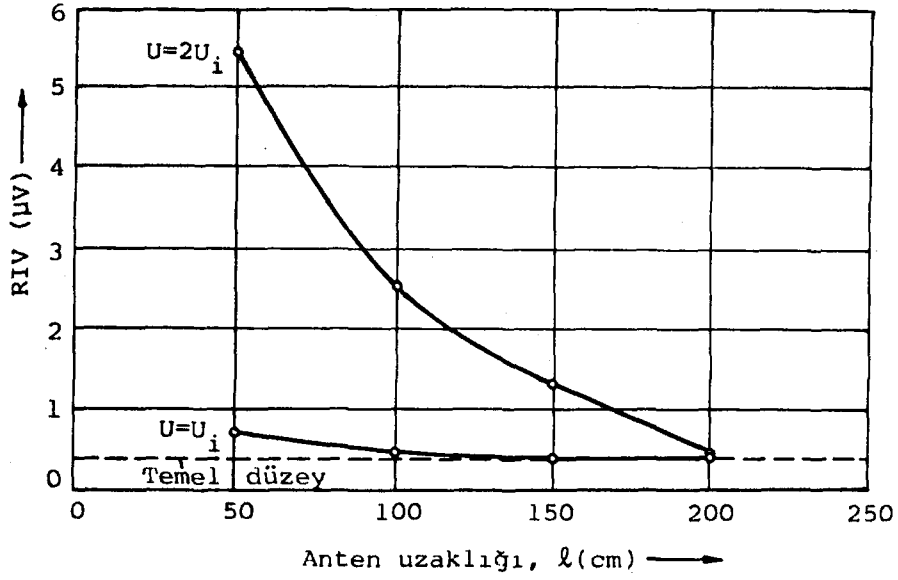
7.6. Referans Korona Kaynağının RIV Düzeyi

Referans korona kaynağı olarak 0,1 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç ve 25 mm yarıçaplı yarıküreden oluşan bir elektrot düzeninde korona boşalmaları sırasında yayınlanan elektromagnetik dalgaların -radyo parazit gerilimi (RIV)- düzeyinin boşalma kaynağından uzaklıkla ve elektrot düzenine uygulanan gerilimle değişimi incelenmiştir.

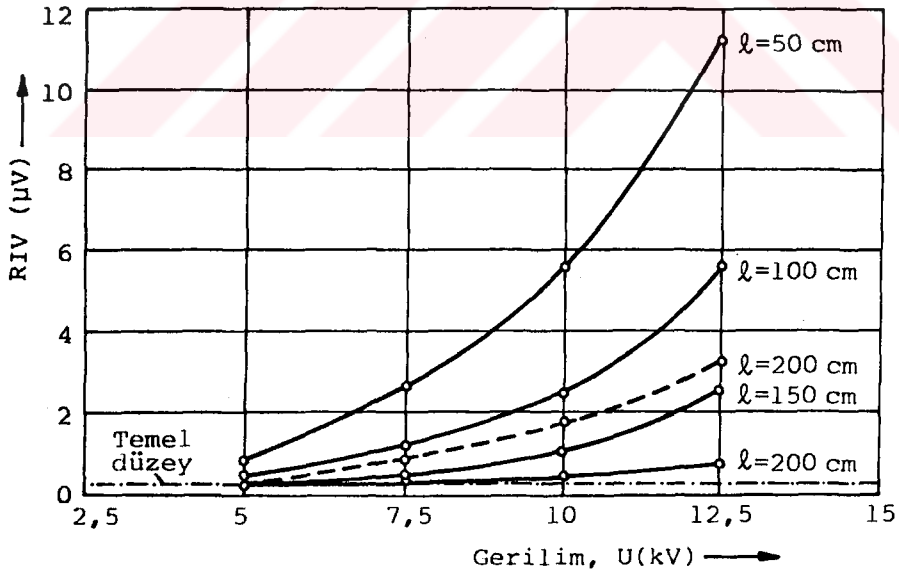
Ölçmeler, 0,135 - 30 MHz ölçü frekans aralıklı RIVmetre ile 0,135 - 3 MHz'lik halka anten ve 1 m boyunda çubuk anten kullanılarak ayrı ayrı yapılmıştır. Ölçmelerde kullanılan antenler, boşalma kaynağı olan elektrot düzeninden, 0,5 ile 2 m arasında, farklı uzaklıklara yerleştirilerek ve ayrıca boşalma kaynağına uygulanan gerilim, boşalma başlangıç gerilimi U_i ile $2,5 U_i$ gerilimleri arasında değiştirilerek, 50 Hz alternatif ve doğru gerilimde, 1,9 MHz ölçme frekansında RIV ölçmeleri yapılmıştır. Sonuçlar, Şekil 7.19, 7.20 ve 7.21'de gösterilmiştir.



Şekil 7.19. Alternatif gerilimde referans korona kaynağının RIV düzeyinin değişimi.
 $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $t=21^{\circ}\text{C}$, $p=765$ mmHg.
a) Kaynaktan uzaklıkla, $RIV(l)$,
b) Uygulanan gerilimle, $RIV(U)$.



Şekil 7.20. Negatif doğru gerilimde referans korona kaynağının RIV düzeyinin kaynaktan uzaklıkla değişimi.
 $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $t=19^{\circ}C$, $p=763$ mmHg.



Şekil 7.21. Negatif doğru gerilimde referans korona kaynağının RIV düzeyinin uygulanan gerilimle değişimi.
 $r=0,1$ mm, $R=25$ mm, $t=19^{\circ}C$, $p=763$ mmHg.
— çubuk anten ile --- halka anten ile

Şekil 7.19, 7.20 ve 7.21'in incelenmesinden, RIV düzeyinin uzaklıkla, alternatif gerilimde hızla azaldığı ve $\ell \geq 1$ m'den sonra ise RIV düzeyinin temel düzeyde kaldığı; negatif doğru gerilimde RIV düzeyinin alternatif gerilimdekine göre daha büyük ve azalmasının daha yavaş olduğu görülmektedir. Referans korona kaynağının RIV düzeyinin uygulanan gerilimle değişimi ise, alternatif gerilimde $\ell=0,5$ m için küçük, $\ell > 0,5$ m için de temel düzeydedir; negatif doğru gerilimde ise RIV düzeyinin kaynağa yakın bölgelerde gerilimle hızla arttığı, uzak bölgelerde de ancak yüksek gerilimlerde ölçülebilir düzeyde olduğu saptanmıştır. Pozitif doğru gerilim durumunda, gerek uzaklıkla, gerekse gerilimle bir RIV düzeyi değişimi saptanmamıştır.

7.7. Kısmi Boşalma Tekrarlama Sıklığının Gerilimle Değişimi

Referans korona kaynağı ile boşalma deneyleri sırasında osiloskop ekranında boşalmaların, alternatif gerilimde negatif yarıdalga tepelerinde sabit genlikli ve düzenli tekrarlanan darbeler şeklinde olduğu, bu darbelerin dolayısıyla boşalma tekrarlama sıklığının uygulanan gerilim yükseltildiğinde arttığı, fakat boşalma darbeleri genliğinin sabit kaldığı görülmüştür. Uygulanan gerilim yaklaşık, boşalma başlangıç gerilimi U_i 'nin 1,4 katını ($1,4 U_i$ yi) geçtiğinde ise boşalmaların tekrarlama sıklığında ve genliğinde düzensizlikler gözlenmiştir. Benzer gözlemler, pozitif ve negatif doğru gerilimler sırasında da yapılmıştır.

Farklı koşullarda yapılan deneyler sırasında osiloskopta sabit genlikli boşalmalar gözlenirken, örneğin uygulanan gerilimin değiştirilmesi durumunda, osiloskopta boşalma darbeleri genliğinin değişmeyip, sadece sıklığının değişmesine karşılık, kısmi boşalma ölçü aletinde (RIVmetrede) ölçülen boşalma genliklerinin değiştiği görülmüştür. Bu durum, dar bantlı bir ölçü aleti olan RIVmetrede alet göstergesinde görülen değerin ölçülen işaretin sıklığına (frekansına) bağlı olmasından kaynaklanmaktadır. Kısa aralıklarla, düzgün bir şekilde tekrarlanan boşalma darbeleri için, alette okunan değer yaklaşık olarak aşağıdaki bağıntı ile verilebilir [1-3].

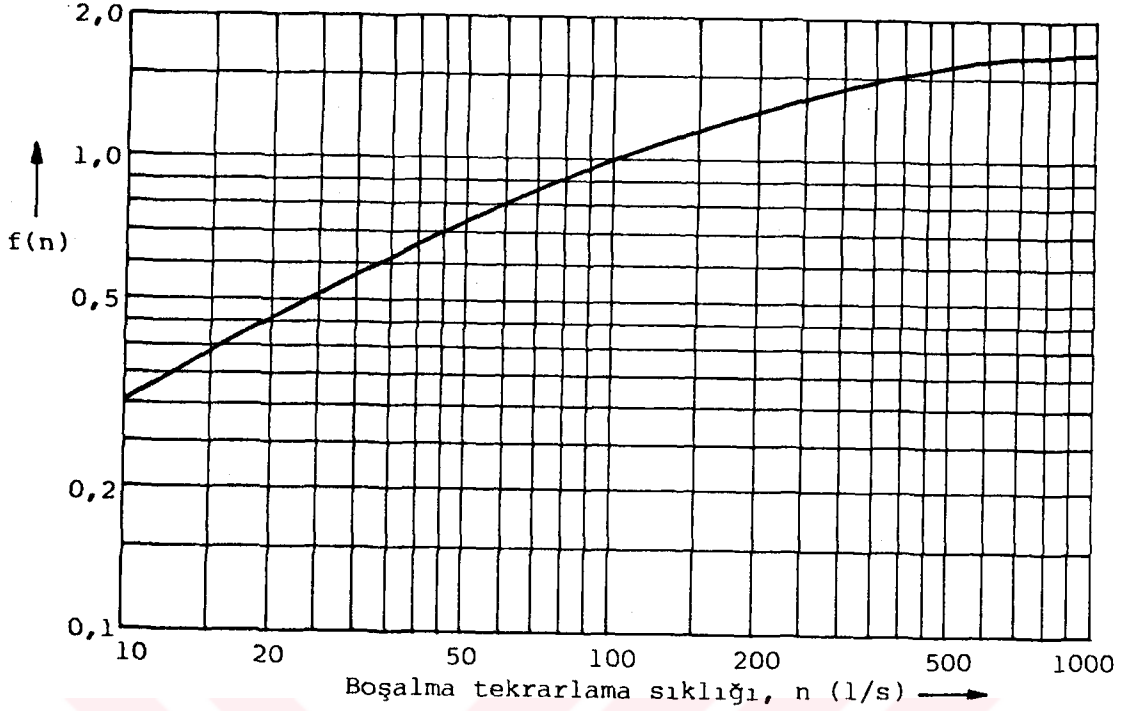
$$U_r \approx |q| \cdot f(n) \cdot \Delta f \cdot Z_m \cdot k \quad (7.1)$$

Burada:

- $|q|$: Görünen yük cinsinden boşalma genliği,
- $f(n)$: Kısmi boşalma ölçü aletinin (RIVmetrenin) boşalma tekrarlama sıklığı n ye bağlı bir fonksiyonu,
- Δf : RIVmetrenin band genişliği,
- Z_m : Ölçü empedansının omik değeri,
- k : Deney devresine ve deney cismine bağlı bir düzeltme katsayısıdır.

Çalışmamızda incelenen elektrot düzeni sabit genlikli ve sıklıklı boşalma darbeleri üreten bir boşalma kaynağıdır ve boşalma genliği, uygulanan gerilimle değişmeyip yaklaşık sabit olarak alınabilir. Bu nedenle söz konusu elektrot düzeni üzerinde yapılan deneylerde, RIVmetre okumalarının, (7.1) bağıntısı gözönüne alınarak $|q| \approx \text{sabit}$, $\Delta f = 9 \text{ kHz} \approx \text{sabit}$, $Z_m = 60 \Omega = \text{sabit}$ ve $k \approx 1 = \text{sabit}$ olması nedeniyle yalnızca $f(n)$ 'ye dolayısıyla boşalma tekrarlama sıklığı n 'ye bağlı olarak değişeceği söylenebilir. Standartlarda [55,56], sabit genlikli ve sıklıklı boşalma darbeleri için $f(n)$ 'nin dolayısıyla RIVmetrede okunan değerlerin tekrarlama sıklığı n ile değişiminin Şekil 7.22'deki gibi olacağı verilmektedir. Çalışmamızda bu özellikten yararlanma yoluna gidilmiştir. Boşalma darbelerinin düzgün sıklıkla tekrarlanmaması durumunda Şekil 7.22 tam olarak kullanılamaz.

Uygulamada boşalma tekrarlama sıklığının ölçülmesi için, belli genlikten büyük veya belli genlikten küçük veya belli genlik aralığındaki boşalma darbelerini sayan darbe sayıcılardan, osiloskop üzerinden fotoğrafik yöntemlerle sayma veya tekrarlama sıklığının çok düşük olduğu durumlarda banda kayıt yapıp daha sonra band üzerinden saydırma gibi pekçok yöntemden yararlanılmaktadır. Deneylerimizde olduğu gibi, bir osiloskop ekranından görsel olarak tekrarlama sıklığını kesin olarak belirlemek kolay değildir. Bu ancak darbe sayısının küçük olduğu durumlarda yapılabilir. Bununla beraber osiloskoptan yapılan izlemeler boşalmaların tekrarlama sıklığı ve değişimi hakkında genel bir bilgi verir. Çalışmada bu uygulama, bütün deneylerde yapılmıştır.



Şekil 7.22. Sabit genlikli darbeler için $f(n)$ 'nin tekrarlama sıklığı n ile değişimi.

RIVmetre okumalarının tekrarlama sıklığına bağlılığı gözönüne alınarak (7.1) bağıntısından

$$f(n) \approx \frac{U_r}{|q| \cdot \Delta f \cdot Z_m \cdot k} \quad (7.2)$$

yazılabilir. Burada $\Delta f = 9 \text{ kHz}$, $Z_m = 60 \Omega$, $k \approx 1$ alınarak kabaca bir yaklaşıklıkla $f(n)$ için, U_r , μV cinsinden ve $|q|$, pC cinsinden alınmak koşuluyla

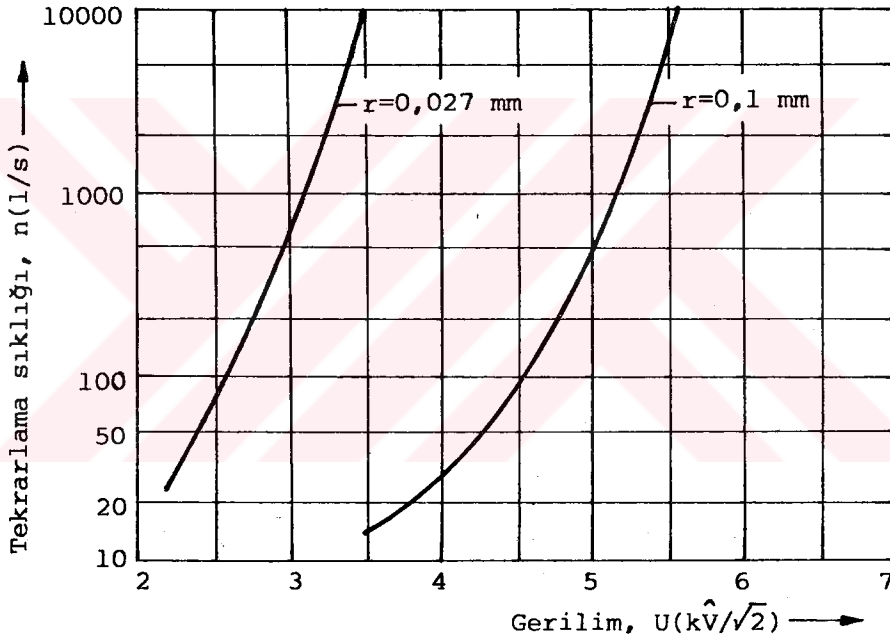
$$f(n) = 1,85 \cdot \frac{U_r (\mu\text{V})}{|q| (\text{pC})} \quad (7.3)$$

bağıntısı yazılabilir.

(7.3) bağıntısında U_r , RIVmetreden okunan μV cinsinden boşalma genliğini, $|q|$ da pC cinsinden boşalma genliğini göstermektedir. Burada incelenen sivri uç-yarıküre elektrot düzenine ilişkin $|q|$ değeri için, Kreuger [6] tarafından elde edilen ve Şekil 1.3'de

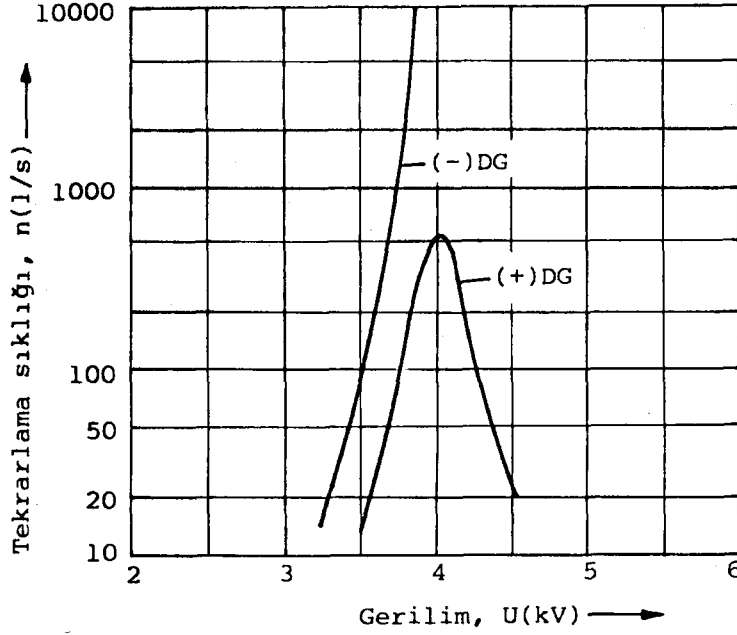
gösterilen eğriden yararlanılmıştır. Şekil 1.3'de, sivri uç eğrilik yarıçapı ile pC cinsinden $|q|$ boşalma genliğinin değişimi, alt ve üst sınırları belli bir bölge şeklinde verilmiştir. (7.3) bağıntısı ile hesaplarda $|q|$ değeri olarak, r sivri uç eğrilik yarıçapı belli olmak üzere, Şekil 1.3'de bu eğrilik yarıçapına karşı gelen $|q|$ boşalma genliğinin alt ve üst sınır değerleri toplamının yarısı alınmıştır.

Şekil 7.23 ve 7.24'te, 50 Hz alternatif ve doğru gerilimde, (7.3) bağıntısından ve Şekil 7.22'den yararlanarak elde edilen, boşalma tekrarlama sıklığının gerilimle değişimleri gösterilmiştir.



Şekil 7.23. Alternatif gerilimde, tekrarlama sıklığının gerilimle değişimi. $R=25$ mm.

Şekil 7.23 ve 7.24'ten, boşalma tekrarlama sıklığının gerilimle hızla arttığı ve bu artış hızının, negatif doğru gerilimde en büyük olduğu görülmektedir. Pozitif doğru gerilimde, belli bir gerilimden sonra, gerilimle tekrarlama sıklığının azalma eğiliminde olduğu gözlenmiştir. Bu durumun, pozitif doğru gerilimde darbesiz koronanın başlaması ile ilgili olduğu ve kullanılan ölçü aleti ile bu tür boşalmaların ölçülememesinden kaynaklandığı söylenebilir.



Şekil 7.24. Doğru gerilimde, tekrarlama sıklığının gerilimle değişimi. $r=0,1$ mm, $R=25$ mm.

7.8. Doğru ve Alternatif Gerilimde Delinme Gerilimleri

0,027 mm eğrilik yarıçaplı sivri uç ve 25 mm yarıçaplı yarı-küreden oluşan sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde uygulanabilecek en yüksek gerilimi belirlemek amacıyla, 50 Hz alternatif ve doğru gerilimde delinme gerilimleri belirlenmiştir. Sonuçlar, Çizelge 7-1'de verilmiştir.

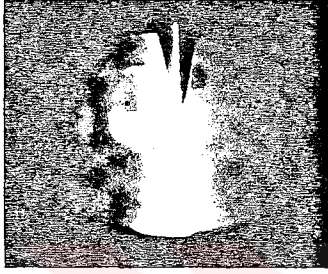
Çizelge 7-1. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde delinme gerilimleri. $R=25$ mm, $t=22^{\circ}\text{C}$, $p=759,2$ mmHg.

Uygulanan Gerilim Türü	Delinme Gerilimi U_d (kV)
50 Hz Alternatif Gerilim	13,2 ($\hat{U}/\sqrt{2}$)
Pozitif Doğru Gerilim	18,8
Negatif Doğru Gerilim	35,3

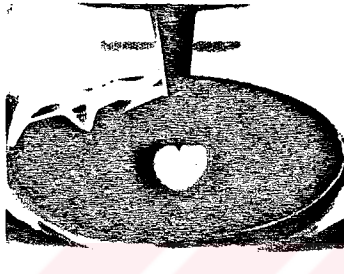
Çizelge 7-1'de verilen sonuçlar, Bölüm 2'de anlatılan boşalma olaylarının gelişmelerine uygun bir sıra izlemektedir. Söz konusu

elektrot düzeninde delinme gerilimi, alternatif gerilimde en küçük, negatif doğru gerilimde ise en büyüktür.

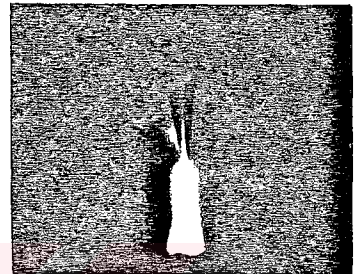
Alternatif ve doğru gerilimde delinme gerilimlerinin belirlenmesi sırasında çekilen fotoğraflar Şekil 7.25'ten görülebilir. Bu fotoğraflardan görülebileceği gibi, delinme görüntüleri, gerilim türüne göre farklı karakter göstermektedir. Bu durum, delinme deneyleri sırasında, elektrot düzeninde delinme olana kadar geçen



(a)



(b)



(c)

Şekil 7.25. Sivri uç-yarıküre elektrot düzeninde boşalma.
 $r=0,027$ mm, $R=25$ mm, $t=22^{\circ}\text{C}$, $p=759,2$ mm.
a) 50 Hz Alternatif gerilimde,
b) Negatif doğru gerilimde,
c) Pozitif doğru gerilimde.

sürede çıkan boşalma sesleri bakımından da karakteristiktir. Örneğin, pozitif doğru gerilimde delinme öncesi çıkan boşalma sesleri diğer tür gerilimlerdekiye göre daha yüksek ve gerilim arttıkça artan karakterdedir. Negatif doğru gerilimde delinme, daha yüksek gerilimde olmasına rağmen, daha sessiz ve ani gelişen boşalma şeklinde olmuştur.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bir sivri uç-yarıküre elektrot düzeni olan referans korona kaynağı (RKK), yüksek gerilimde, sabit genlikli ve sıklıklı boşalma darbeleri üreten, kısmi boşalma ölçme devrelerinin ölçeklenmesinde (kalibrasyonunda) kullanılan, alternatif gerilimde çalışma koşulları belirlenmiş bir ikincil standart ayar kaynağıdır. Bu çalışmada, referans korona kaynağı, çeşitli yönleriyle ve değişik yöntemlerle incelenmiş ve kaynağın yüksek doğru gerilimde kullanım olanakları ve çalışma koşulları belirlenmeye çalışılmıştır. RKK'nın, ayrıca, alternatif gerilimde sıcaklık ve basınç altındaki davranışı ile radyo parazit gerilimi düzeyi incelenerek, düzenin tanımlanması genişletilmiştir.

Yapılan bu çalışma ile elde edilen sonuçlar, aşağıda verilmiştir:

- 1) Boşalma olaylarının incelenmesi sırasında görülmüştür ki, kısmi boşalma başlangıç gerilimine etki eden pekçok etkenin varlığı nedeniyle, kuramsal olarak, bir kısmi boşalma (korona) başlangıç gerilimi hesabı yapmak zordur. Yine de bu çalışmada, Paschen eğrisinden yararlanılarak yaklaşık bir boşalma başlangıç gerilimi hesabı verilmiştir.
- 2) Yüksek doğru gerilimde, referans korona kaynağında kısmi boşalmalar, alternatif gerilimde de olduğu gibi, sabit genlikli ve sıklıklı boşalma darbeleri şeklinde ortaya çıkar. Boşalma genliği, sabit olmakla beraber, negatif ve pozitif doğru gerilimde farklı değerlerdedir.
- 3) Referans korona kaynağında boşalma büyüklükleri ile elektrot düzeninin boyut ve biçimi arasındaki ilişkiyi incelemek amacıyla, kuramsal ve deneysel elektrostatik alan incelemeleri yapılmıştır.

Analitik alan incelemelerinde, RKK, öncelikle, eşmerkezli yarı-küresel elektrot düzeni ve küre-düzlem elektrot düzeni gibi göz-önüne alınarak incelenmiştir. Bu durumda elde edilen sonuçların birbirine yakınlığı, her ne kadar sivri ucun bir küre gibi düşünlmesi nedeniyle bir hata yapılmış olmasına rağmen, maksimum alan şiddetine ve kapasiteye, dolayısıyla boşalma büyüklüklerine yarıküre elektrodun yarıçapının ve elektrot açıklığındaki küçük değişimlerin önemli bir etkisinin olmayacağını göstermiştir.

- 4) Referans korona kaynağında, sivri ucun bir hiperboloid veya bir paraboloid benzerliğinden yararlanılarak, uzamış sferoidal ve paraboloidal koordinatlarda analitik alan incelemeleri yapılmıştır. RKK, uzamış sferoidal koordinatlarda bir hiperboloid sivri uç-düzlem elektrot düzeni olarak incelenmiştir. Hiperboloidin asimptotları arasındaki açı, sivri ucun tepe açısı alınarak yapılan alan hesaplarında, tepe açısının önemini görme olanağı bulunmuştur. Bu inceleme, bir sivri uç-düzlem elektrot düzeninde alan incelemesi için kullanılabilir.

Referans korona kaynağı, paraboloidal koordinatlarda eşodaklı iki paraboloid elektrot düzeni gibi incelenebilir. Bu inceleme, bir sivri uç-yarıküre elektrot düzeni olan referans korona kaynağında analitik alan incelemesi bakımından, en uygun durum olmuştur.

- 5) Referans korona kaynağında, sayısal yöntemlerden sonlu elemanlar yöntemi ile elektrostatik alan dağılımı incelemesi yapılmıştır. Bu inceleme, hem sonlu elemanlar yönteminin, yüksek gerilim tekniği ile ilgili bir örneğe daha uygulanması olanağını vermiş, hem de RKK'nın gerçek durumuna en yakın bir alan dağılımının, maksimum alan şiddetinin ve kapasitesinin bulunmasını sağlamıştır.
- 6) Referans korona kaynağında, elektrolitik banyo ve yarıiletken kağıt yöntemleri ile deneysel elektrostatik alan incelemeleri yapılmıştır. Yapılan incelemeler, kuramsal alan incelemeleri ile uygun sonuçlar vermiştir. Bu, hem deneysel hem de kuramsal çalışmaların değerlendirilmesi olanağını vermiştir. Deneysel alan incelemeleri, RKK'nın yatay ve düşey konumda olup olmamasının

sonuçlara etkilediğini, çevre (toprak) etkisinin önemli olmadığını göstermiştir.

- 7) Referans korona kaynağı üzerinde, doğru ve alternatif gerilimde yapılan kısmi boşalma deneylerinde, boşalma büyüklüklerine sivri uç eğrilik yarıçapının, elektrot açıklığının, sıcaklığın, alçak ve yüksek basıncın etkileri incelenmiştir. Ayrıca kısmi boşalma ölçme frekansının önemi, RKK'nın çevreye yayınladığı RIV (radyo parazit gerilimi) düzeyinin RKK'dan uzaklıkla ve uygulanan gerilimle değişimi deneysel olarak araştırılmıştır.

Yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar:

- 7.1. Herbir sivri uç eğrilik yarıçapı için elde edilen boşalma genliği, $\pm$ % 10'luk bir yaklaşıklıkla sabittir.
- 7.2. Sivri ucun eğrilik yarıçapı büyüdükçe, boşalma başlangıç gerilimi ve boşalma darbelerinin genliği yükselir.
- 7.3. Herbir eğrilik yarıçapı için belli bir boşalma başlangıç gerilimi ve boşalma genliği vardır. Bu boşalma büyüklüklerini değiştirmek için, sivri uç eğrilik yarıçapını değiştirmek gerekir.
- 7.4. Sivri uç ile yarıküre elektrot arasındaki açıklık, sivri ucun normal konumuna göre 5 mm'ye kadar değiştirildiğinde, başlangıçtaki değerlerine göre boşalma başlangıç gerilimi, doğru ve alternatif gerilimde % 6 arttığı; boşalma genliğinin de negatif doğru gerilimde % 28, alternatif gerilimde % 20 azaldığı saptanmıştır. Bu sonuçlar, genel olarak, sivri ucun küçük yer değiştirmelerinin boşalma büyüklüklerine etkisinin az olacağını göstermiştir.
- 7.5. Boşalma başlangıç gerilimi, sıcaklıkla azalır. Boşalma başlangıç geriliminin, 25-75°C sıcaklık aralığında başlangıçtaki değerine göre yaklaşık % 12 azaldığı veya azalmanın derece başına yaklaşık % 0,2 oranında olacağı saptanmıştır. Buna göre, sıcaklığın boşalma başlangıç gerilimine etkisi azdır, denilebilir.

- 7.6. Boşalma başlangıç gerilimi, alçak basınçlara doğru hızla azalır. Bu azalmanın, mmHg başına yaklaşık % 0,5 civarında değişeceği saptanmıştır. Bu değer, 0-760 mmHg basınç aralığında, boşalma başlangıç geriliminde önemli bir azalmaya karşı düşer. Alçak basınçta, referans korona kaynağında boşalmaların genlik ve sıklık bakımından kararsızlık gösterdiği gözlenmiştir.
- 7.7. Yüksek basınçta, basınç arttıkça boşalma başlangıç gerilimi artar. Bu artışın, 0-5 bar basınç aralığında, bar başına yaklaşık % 15-20 arasında olduğu saptanmıştır.
- 7.8. 0,135 - 10 MHz arasında farklı ölçme frekanslarında yapılan kısmi boşalma ölçmelerinden, boşalma genliğinin, doğru ve alternatif gerilimde, 0,4-2 MHz aralığında yaklaşık sabit olduğu görülmüştür.
- 7.9. Referans korona kaynağının RIV (radyo parazit gerilimi) düzeyi önemsizdir. RKK'da, RIV'ın uzaklık arttıkça hızla azaldığı; uygulanan gerilimin yükseltilmesi ile ise çok az arttığı saptanmıştır.
- 7.10. Referans korona kaynağında, boşalma tekrarlama sıklığı gerilimle hızla artar. Bu artışın, negatif doğru gerilimde en büyük olduğu gözlenmiştir.
- 8) Referans korona kaynağı, yüksek doğru gerilim koşullarında, kısmi boşalma ölçme devrelerinin ölçeklenmesinde bir ikincil ayar kaynağı olarak kullanılabilir.

Referans korona kaynağı, başka bir ölçü aletiyle çalışma koşulları belirlendikten sonra, yeterince güvenilirdir. Yapısı basit ve kullanışlıdır. RKK'nın, kısmi boşalma (korona) başlangıç gerilimine yakın ve sabit bir gerilimde kullanılması uygun olur. Düzen, nem ve kirlenme gibi etkenlere karşı korunmalıdır. Uzun süreli kullanmalarda, boşalmalarla sivri ucun aşınması ve kararmasına karşı sivri ucun sık sık kontrol edilmesi, temizlenip parlatılması, gerekirse yeni bir sivri uç kullanılması yararlı olur.

KAYNAKLAR

- [1] TS 2051, Elektriksel Kısmi Boşalmaların Ölçülmesi, TSE, Ankara, Temmuz 1975.
- [2] IEC Publ. 270, Partial Discharge Measurements, IEC, Switzerland 1968.
- [3] BS 4827, British Standard Guided to Partial Discharge Measurements, 1972.
- [4] ASTM Standard D-1868, Detection and Measurement of Partial (Corona) Discharge Pulses in Evaluation of Insulation Systems, ASTM Book of Standards, Vol.10.02, Philadelphia, 1987.
- [5] DIN VDE 0434/05.83 (DIN 57434), Partial Discharge Measurements (Hochspannungs Prüftechnik, Teilentladungsmessungen), March 1983.
- [6] KREUGER, F.H., Discharge Detection in High Voltage Equipment, Temple Press Books Ltd., London, 1964.
- [7] BARTNIKAS, R., MC MAHON, E.J., Engineering Dielectrics, Volume 1: Corona Measurement and Interpretation, ASTM-STP-669, Philadelphia, Feb. 1979.
- [8] TRICHEL, G.W., The Mechanism of Negative Point to Plane Corona Near Onset, Physical Review, Vol.54, pp. 1078-1084, 1938.
- [9] TRICHEL, G.W., The Mechanism of the Positive Point to Plane Corona in Air at Atmospheric Pressure, Physical Review, Vol.55, pp. 382-390, Feb. 1939.
- [10] BANDEL, H.W., Point to Plane Corona in Dry Air, Physical Review 84, 1951.
- [11] LOEB, L.B., Recent Developments in Analysis of the Mechanisms of Positive and Negative Coronas in Air, J. Appl. Phys., 19, 882, 1948.
- [12] LOEB, L.B., The Mechanism of the Trichel Pulses of Short Time Duration in Air, Phys. Rev., 86, 256, 1952.
- [13] LOEB, L.B., Electrical Coronas, Their Basic Physical Mechanisms, University of California Press, Berkeley, 1965.

- [14] SIROTINSKI, L.I., Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, Kısım 1, Gazlarda Deşarj Olayları, Çev: Özkaya, M., İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı: 594, İstanbul, 1964.
- [15] GIAO, T.R., JORDAN, J.B., Modes of Corona Discharges in Air, IEEE Trans. PAS-87, p. 1207, 1968.
- [16] NASSER, E., Fundamentals of Gaseous Ionization And Plasma Electronics, John Wiley and Sons, Inc., Newyork, 1971.
- [17] MEEK, J.M., CRAGGS, J.D., Electrical Breakdown of Gases, Oxford University Press, 1953, Clarendon Press, Oxford, 1978.
- [18] MASON, J.H., Discharges, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI 13, No.4, pp. 211-238, 1978.
- [19] LAMA, W.L., GALLO, C.F., Systematic Study of the Electrical Characteristics of the "Trichel" Current Pulses From Negative Needle-to-Plane Coronas, Journal of Applied Physics, Vol.45, pp. 103-113, Jan. 1974.
- [20] AMIN, M.R., Fast Time Analysis of Intermittent Point to Plane Corona in Air, I: Positive Point Burst Pulse Corona, Journal of Applied Physics, Vol.25, p. 627, 1954.
- [21] AMIN, M.R., Fast Time Analysis of Intermittent Point to Plane Corona in Air, II: Positive Pre-onset Streamer Corona, Journal of Applied Physics, Vol.25, p. 358, 1954.
- [22] GOLDMAN, M., HARTMAN, G., HIRSH, M., Positive Point to Plane Corona; Continuous and Pulse Components, Proc. IEEE Industrial Appl. Annual Meeting, pp. 177-181, Oct. 1978.
- [23] KHALIFA, M., On the Controversial Subject of Glow Corona, 3 rd Int. Symp. on HV Eng., Paper 53.05, Milan, Aug. 1979.
- [24] EL-DEBEIKY, S., KHALIFA, M., Calculating the Corona Pulse Characteristics and Its Radio Interference, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-90, pp. 165-176, Feb. 1971.
- [25] GRAF, D., Calculation of Corona Discharges in Point to Plane Gaps, 3 rd Int. Symp. on HV Eng., Paper 53.04, Milan, Aug. 1979.
- [26] KHALED, M., Breakdown Simulation in Atmospheric Air, Int. HV Symp., Paper 4.5-03, pp. 545-549, Zurich 1975.
- [27] KUFFEL, E., ABDULLAH, M., High Voltage Engineering, Pergamon Press Ltd., 1970.

- [28] KREUGER, F.H., Letters to the Editor, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.4, No.1, pp. 33-34, Jan./Feb. 1988.
- [29] KIND, D., An Introduction to High-Voltage Experimental Technique, Vieweg, Braunschweig, 1978.
- [30] KHALIFA, M., EL-DEBEIKYS, S., Analysis of the Effect of Humidity on Corona Radio Interference and Pulse Characteristics, Paper No. 5964 , Proc. IEE (London), 116, 1969.
- [31] HOGG, W.K., WALLEY, C.A., An Assessment of the Point-Hemisphere Discharge Gap As a Partial Discharge Reference, J. Sci. Instrum., Vol.43, pp. 11-15, 1966.
- [32] ÖZKAYA, M., Yüksek Gerilim Tekniği I, Statik Elektrik Alanı ve Boşalma Olayları, İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı: 1359, İstanbul, 1988.
- [33] GÖNENÇ, İ., Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, Statik Elektrik Alanı ve Basit Elektrod Sistemleri, İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı: 1085, İstanbul, 1977.
- [34] VITKOVITCH, D., Field Analysis, Experimental and Computational Method, D. Van Nostrand Company Ltd., London, pp. 205-259, 1966.
- [35] KRAUSS, H., Determination of the Electric Field of Solids of Revolution by the Resistance Paper Method, Bulletin de Association Suisse des Electriciens, Vol.64, No.11, pp. 721-725, 1973.
- [36] KUFFEL, E., ZAENGL, W.S., High Voltage Engineering Fundamentals, Pergamon Press Ltd., Oxford, 1984.
- [37] CARTER, G.W., LOH, S.C., The Calculation of the Electric Field in a Sphere-gap by means of Bipolar Coordinates, Proc. IEE, 106C, pp. 108-111, 1959.
- [38] PRINZ, H., Hochspannungsfelder, R. Oldenburg Verlag, München, 1969.
- [39] AKHUNLAR, A., Elektromagnetik Alan Teorisi I, Statik Elektrik Alanı, İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı: 615, İstanbul, 1965.
- [40] SYMTHE, W.R., Static and Dynamic Electricity, McGraw-Hill Book Co., New York, 1968.
- [41] KIND, D., KARNER, H., High-Voltage Insulation Technology, Friedr. Vieweg and Sohn, Braunschweig, 1985
(Translated from the German by Y. Narayana Rao).
- [42] PRINZ, H., SINGER, H., Der Schwaigersche Ausnutzungsfaktor Grundlegender Translatorischer und Rotatischer Elektrodensysteme, Bull. SEV 58, pp. 161-167, 1967.

- [43] ZIENKIEWICZ, O.C., The Finite Element Method in Engineering Science, McGraw-Hill Book Co., London, 1971.
- [44] SILVESTER, P.P., FERRARI, R.L., Finite Elements for Electrical Engineers, Cambridge University Press, 1983.
- [45] REDDY, J.N., An Introduction to the Finite Element Method, McGraw-Hill Book Co., 1986.
- [46] ANDERSON, O.W., Laplacian Electrostatic Field Calculations by Finite Elements with Automatic Grid Generation, IEEE Trans. Vol. PAS-92, pp. 1485-1492, Sep./Oct. 1973.
- [47] ABOU-SEADA, M.S., NASSER, E., Digital Computer Calculation of the Electric Potential and Field of a Rod Gap, Proc. IEEE, 56, pp. 813-820, 1968.
- [48] FLATABO, N., REIGE, H., Automatic Calculation of Electric Fields, Int. Symp. on High Voltage Technology, Munich, pp. 17-22, 1972.
- [49] OVACIK, L., KALENDERLİ, Ö., Sivri Uç-Yarıküre Elektrot Sisteminde Elektrostatik Alan Dağılımının Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Bulunması, ODTÜ EEMB 30. Yıl Sempozyumu, Ankara, s. 166-169, 8-10 Şubat 1989.
- [50] KALENDERLİ, Ö., ÖZDEMİR, A., Yüksek Gerilim Laboratuvarı Deneyleri, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Ofset Baskı Atölyesi, 1984.
- [51] İSMAİLOĞLU, H., KALENDERLİ, Ö., Eşmerkezli Küresel ve Sivri Uç-Yarıküre Elektrot Sistemlerinde Elektrostatik Alan Dağılımının Deneysel Olarak Bulunması, Elektrik Mühendisliği 3. Ulusal Kongresi, İ.T.Ü. İstanbul, 25-30 Eylül 1989.
- [52] BARTNIKAS, R., A Commentary On Partial Discharge Measurement And Detection, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-22, No.5, pp. 629-653, Oct. 1987.
- [53] ERGAN, N., Elektriksel Kısmi Boşalmaların Değişik Yöntemlerle Ölçülmesi ve Ölçü Sonuçlarının Karşılaştırılması, İ.T.Ü. Müh.-Mim. Fakültesi, Doktora Tezi, 1982.
- [54] DIN VDE 0876, Teil 1/09.78, Radio Interference Measuring Apparatus, 1978.
- [55] C.I.S.P.R. Publ. 1, Specification for C.I.S.P.R. Radio Interference Measuring Apparatus For the Frequency Range 0,15 MHz to 30 MHz, 1972.
- [56] C.I.S.P.R. Publ. 16, C.I.S.P.R. Specification for Radio Interference Measuring Apparatus and Measurement Methods, 1977.

- [57] DIN VDE 0877, Teil 1/11.81, Measurement of Radio Interferences, Measurement of Radio Interference Voltages, 1981.
- [58] DIN VDE 0877, Teil 2/02.85, Measurement of Radio Interferences Field Strength, 1985.
- [59] NEMA Standard No.107, Methods on Measuring Radio Noise, 1940.
- [60] NATTRASS, D.A., Partial Discharge Measurement and Interpretation, IEEE Electr. Insul. Magazine, Vol.4, No.3, pp. 10-23, May/June 1988.
- [61] Guide for Calibration of Test Equipment and Circuits for Measurement of Corona Pulses, IEEE Tran. PAS-Vol. 86, pp. 1185-1191, 1967.
- [62] HUANG, S.J., LOWDER, S.M., SARKINEN, S.H., CHARTIER, V.L., Evaluation of Partial Discharge Measurement Circuits and Associated Calibration Techniques, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No.2, pp. 407-415, Feb. 1985.
- [63] SCHWAB, A.J., Hochspannungs Messtechnik, Messgeräte und Messverfahren, Springer-Verlag, Berlin 1981.
- [64] GÖNENÇ, İ., İ.T.Ü. Yüksek Gerilim Laboratuvarı ve Sanayimize Katkısı, MAG-E-82/2-7, İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, 50. Yıl Sempozyumu, s. 93-133, 1984.
- [65] HOLLINGER, F., SCHULTZ, H., ZIMMER, H., Problems in the Identification of Partial Discharge Inception In Laboratory Testing, Proc. of Third Int. Symp. on HV Eng., Paper 43.01, Milan, Aug. 1979.
- [66] HARROLD, R.T., DAKIN, T.W., The Relationship Between The Picocoulomb and Microvolt For Corona Measurements on HV Transformers and Other Apparatus, IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-91, pp. 187-198, 1972.

ÖZGEÇMİŞ

Özcan KALENDERLİ, 1956 yılında İstanbul'da doğdu. İlk öğrenimini 1967 yılında Bakırköy - Şirinevler İlkokul'unda, orta ve lise öğrenimini 1973 yılında Bahçelievler Lisesi'nde tamamladı. İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi'nde 1973-1978 yılları arasında Lisans, 1978-1980 yılları arasında Yüksek Lisans öğrenimi gördü. 1981 yılında aynı Fakülte'de Prof. İzzet GÖNENÇ yönetiminde doktora çalışmasına başladı. 1982-1983 yılları arasında K.K.K. İnşaat Emlak Daire Başkanlığı Ankara'da yedeksubay olarak askerlik görevinde bulundu. Doktora derslerini tamamladığı 1984 yılından beri Prof.Dr. Muzaffer ÖZKAYA yönetiminde tez çalışmasını sürdürmektedir.

İyi derecede ingilizce bilmekte olan KALENDERLİ, 1979 yılından beri İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Yüksek Gerilim Laboratuvarı'nda çalışmaktadır. Evli ve bir kız çocuk babasıdır.