

# ALÇAK BASINÇTA HAVANIN DELİNME DAYANIMI

Özcan KALENDERLİ<sup>1</sup>

Şeyda (AYDINAY) PARLAK

Elektrik Mühendisliği Bölümü  
Elektrik-Elektronik Fakültesi  
İstanbul Teknik Üniversitesi, 80626, Maslak, İstanbul

<sup>1</sup>e-posta: ozcan@elk.itu.edu.tr

*Anahtar sözcükler: Elektriksel delinme, yalıtkan gaz, alçak basınç, Paschen yasası*

## ABSTRACT

High voltages can be applied to gases at low pressure because of different reasons. It is therefore important to know the behaviours of gases under this conditions for the system assurance and quality. In this study, breakdown voltages of the dry air under low pressure are experimentally determined with the plane-plane and the rod-plane electrode gaps, respectively. In the experiments, ac high voltage, positive and negative dc high voltages are applied to these gaps for different pressures at different electrode spacings. Then, the breakdown voltage variation according to the different pressures at different electrode spacings is obtained. Electrode spacing is varied from 5 mm to 25 mm and pressure is varied from atmospheric pressure (1013 mbar) to 100 mbar. For the used electrode systems, the ac or dc breakdown voltages linearly decreases with decreases pressure. The breakdown voltages at lower pressures have almost the same values. But If the pressure increases, they have different values. At negative dc voltages, the breakdown voltages are higher than those at positive dc voltages.

## 1. GİRİŞ

Yükselti değişimi, sıcaklık ve basınç değişimi, gaz kaçağı ve çalışma koşulları gibi farklı nedenlerle yalıtkan gazlar alçak basınçta elektriksel zorlanma altında kalabilirler. Gazların delinme geriliminin gaz basıncı ile orantılı değiştiği bilinir [1-6]. Alçak basınçta atlama veya delinme gerilimi küçük, yüksek basınçta ise büyüktür. Bu koşullar altında gazların davranışının tam olarak bilinmesi kullandıkları sistemlerin güvenliği ve kalitesi bakımından önemlidir. Bu yüzden bu konuda, farklı gerilim türü, elektrot sistemi, elektrot açıklığı, ortam koşulları ve yalıtım için tasarımda kullanmak, yeni çözümler üretmek, işletmeyi ve arızaları değerlendirmek amacıyla çokça araştırma yapılmaktadır [7-12].

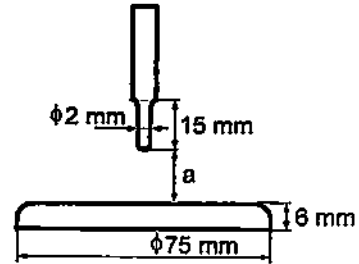
Gazların basınca bağlı davranışları bakımından, bir yanda vakuma (çok düşük basınca), diğer yanda çok yüksek basınca kadar uzanan aralıkta durum belirlemeleri gerekmektedir [8, 9, 13].

Bu çalışmada, alçak (atmosfer altı) basınçta, yüksek alternatif ve yüksek doğru gerilimde düzlem-düzlem ve çubuk-düzlem elektrot sistemlerinde havanın delinme geriliminin basınç ve elektrot açıklığı ile değişimi deneysel olarak incelenmiştir. Aşağıda deneylerde kullanılan aygıtlar ve deneyin yapılışı açıklanmış, deney sonuçları ve yorumları verilmiştir.

## 2. DENEY DÜZENİ VE DENEYİN YAPILIŞI

### 2.1. Elektrot Sistemi

Deneylerde düzlem-düzlem ve çubuk-düzlem elektrot sistemleri kullanılmıştır (Şekil 1). Düzlem-düzlem elektrot sisteminde, 75 mm çapında, 6 mm kalınlığında, kenarları yuvarlatılmış disk şeklinde ve piriç malzemenen yapılmış düzlem elektrotlar kullanılmıştır. Çubuk-düzlem elektrot sisteminde ise, düzlem-düzlem elektrot sistemindeki düzlem elektrotlardan biri yerine, 2 mm çapında, yarım küre şeklinde uca sahip, krom kaplı piriç malzemenen yapılmış bir çubuk elektrot kullanılmıştır.



Şekil 1. Çubuk-düzlem elektrot sistemi.

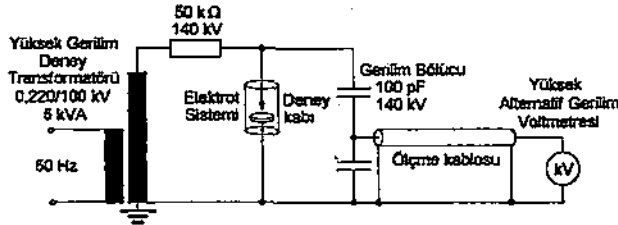
### 2.2. Deney (Basınç) Kabı

Deneylerde, 10<sup>-3</sup> bar'dan 6 bar'a kadar olan gaz basınçları için kullanıma uygun, saydam pleksiglastan yapılmış, 664 mm yüksekliğinde, 120 mm çapında silindürel bir deney kabı kullanılmıştır. Kabin alt tarafında, gaz doldurma ve boşaltma vanaları ile gaz ve vakum basıncını ölçmek için iki adet manometre bulunmaktadır.

### 2.3. Deney Devresi

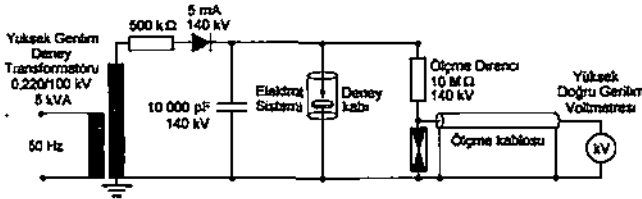
Deneylerde, düzlem-düzlem elektrot sisteminde elektrotlardan biri, çubuk-düzlem elektrot sisteminde

ise çubuk elektrot gerilim kaynağına bağlanmış, diğer elektrot ise topraklanmıştır. Yüksek alternatif gerilimle yapılan deneylerde elektrotlara uygulanan endüstriyel (50 Hz) frekanslı yüksek gerilim, 0,22/100 kV, 5 kVA'lık bir yüksek gerilim deney transformatoründen elde edilmiştir (Şekil 2). Alternatif gerilim deney devresinde delinme gerilimleri, deney devresine bir kapasitif gerilim bölücü üzerinden bağlı bir yüksek gerilim voltmetresi yardımıyla ölçülmüştür.



Şekil 2. Alternatif gerilim deney devresi.

Yüksek doğru gerilim deneylerinde yüksek doğru gerilim, alternatif gerilimin basit yarı-dalgı doğrultucu ile doğrultulması yoluyla elde edilmiştir (Şekil 3). Elektrot sistemine uygulanan doğru gerilimi ölçmek için 10 Mohm'luk bir ölçme direnci ile seri bağlı bir ampermetreden oluşan bir ölçme düzeni (yüksek doğru gerilim voltmetresi) kullanılmıştır.



Şekil 3. Doğru gerilim deney devresi.

#### 2.4. Deneyin Yapılışı

Deneylere başlamadan önce, elektrotlar temizlenmiş ve deney sonuçlarının kararlılığı bakımından, elektrot yüzeyini alıştırmak amacıyla elektrotlar arasında birkaç ön delinme yaptırılmıştır. Elektrotlara uygulanan gerilim, sıfırdan başlayarak saniyede 2 kV'luk yükselme hızıyla delinme olana kadar yükseltilmiştir. Delinme anındaki gerilim yüksek gerilim voltmetresinden okunarak kaydedilmiştir.

Deneylerde elektrot açıklığı 5-25 mm arasında değiştirilmiştir. Ölçmeler 5, 10, 15, 20, 25 mm sabit elektrot açıklıklarında yapılmıştır. Deneyler, atmosfer basıncından (1013 mbar'dan) 100 mbar'a kadar basınç aralığında yapılmıştır. Basınç 100 mbar aralıklarla değiştirilmiştir. Bu basınçları elde etmek için bir vakum pompası kullanılmıştır. Her basınç basamağında 5 farklı elektrot açıklığı için delinme gerilimleri saptandıktan sonra bir sonraki basınç basamağına geçilmiştir. Gaz basıncının değiştirildiği durumlarda 5 dakika, gerilim ölçmeleri arasında yaklaşık 1 dakika beklenmiştir. Her durumda delinme

gerilimi değerleri, 5 ölçme sonucunun aritmetik ortalamasından elde edilmiştir. Deneyler laboratuvar ortamı sıcaklığında (18°C-22°C) yapılmıştır.

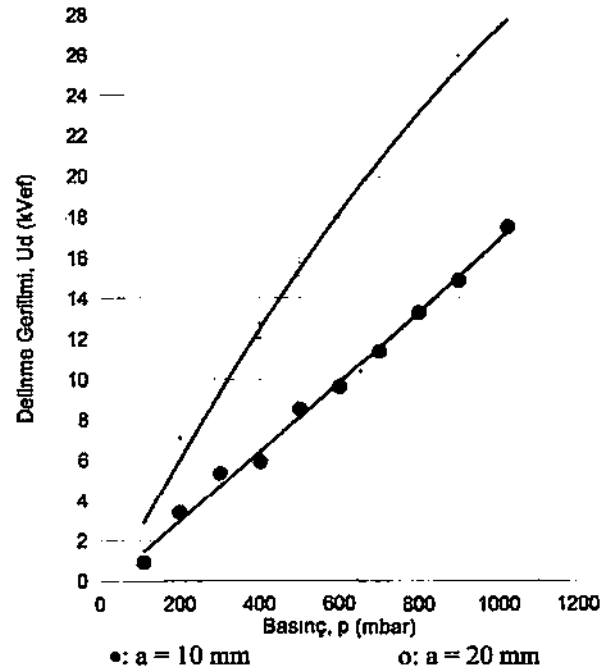
### 3. DENEY SONUÇLARI

Bu kısımda, deney sonuçları ayrı ayrı verilmiştir.

#### 3.1. Düzlem-Düzlem Elektrot Sistemi ile Delinme Deneyleri

##### 3.1.1. Alternatif Gerilim deneyi

Şekil 4'te, alternatif gerilimde düzlem-düzlem elektrot sistemi ile 100-1013 mbar basınç aralığında, iki sabit elektrot açıklığı için (10 mm ve 20 mm elektrot açıklıkları için) elde edilen delinme gerilimlerinin basınçla değişimleri gösterilmiştir. Bu şekilden delinme geriliminin artan basınçla yaklaşık lineer olarak ve hızla arttığı veya tersine azalan basınçla hızla azaldığı görülmektedir. Değişimin eğimi (dikliği), 20 mm elektrot açıklığı için 0,028 kV/mbar, 10 mm elektrot açıklığı için ise 0,018 kV/mbar elde edilmiştir. Bu durum büyük elektrot açıklığında delinme geriliminin basınçla daha hızla değişeceğini göstermektedir. Bunun yanında, delinme gerilimi değerlerinin düşük basınçlarda birbirine yaklaşırken basınç yükseldikçe birbirlerinden uzaklaştıkları görülmektedir.

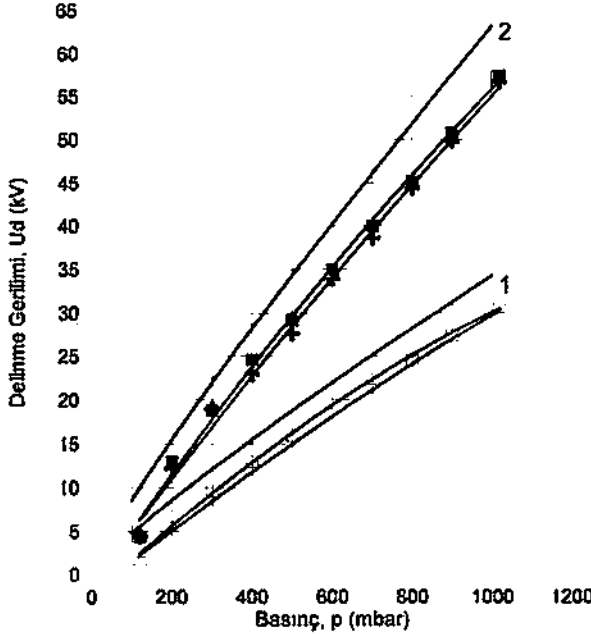


Şekil 4. Alternatif gerilimde düzlem-düzlem elektrot sisteminde sabit elektrot açıklıklarında delinme geriliminin basınçla değişimi.

##### 3.1.2. Doğru Gerilim deneyi

Şekil 5'te, pozitif ve negatif doğru gerilimde, düzlem-düzlem elektrot sistemi ile 100-1013 mbar basınç aralığında, iki sabit elektrot açıklığı için (10 mm ve 20 mm elektrot açıklıkları için) delinme gerilimlerinin basınçla değişimleri gösterilmiştir. Bu şekilden, alternatif gerilimde olduğu gibi, delinme geriliminin

artan basınçla yaklaşık lineer olarak ve hızla arttığı veya tersine azalan basınçla hızla azaldığı görülmektedir. Genelde negatif doğru gerilimdeki delinme gerilimi değerleri pozitif doğru gerilimdeki değerlerden büyük çıkmıştır. Ancak düzlem-düzlem elektrot sistemi ile (düzgün alanlı sistemle) çalışıldığı için, Şekil 5'ten de görüleceği gibi, delinme gerilimleri arasındaki farklar ihmal edilecek kadar küçüktür.



Pozitif doğru gerilim	Negatif doğru gerilim
x: a = 10 mm	: a = 10 mm
+ : a = 20 mm	: a = 20 mm
1: a = 10 mm (hesapla)	
2: a = 20 mm (hesapla)	

Şekil 5. Doğru gerilimde düzlem-düzlem elektrot sisteminde sabit elektrot açıklıklarında delinme geriliminin basınçla değişimi.

Doğru gerilim durumunda delinme geriliminin basınçla değişiminin eğimi, 20 mm elektrot açıklığı için 0,057 kV/mbar, 10 mm elektrot açıklığı için ise 0,031 kV/mbar elde edilmiştir. Bu, doğru gerilimde alternatif gerilime göre büyük elektrot açıklığında delinme geriliminin basınçla çok daha hızla değiştiğini göstermektedir.

Şekil 5'te, Paschen yasasından yararlanarak söz konusu koşullar için hesaplanan delinme gerilimleri de gösterilmiştir. Paschen yasasına göre delinme gerilimi

$$U_d = B \cdot p \cdot a / (\ln(A \cdot p \cdot a / \ln(1 + 1/\gamma))) = f(p, a) \quad (1)$$

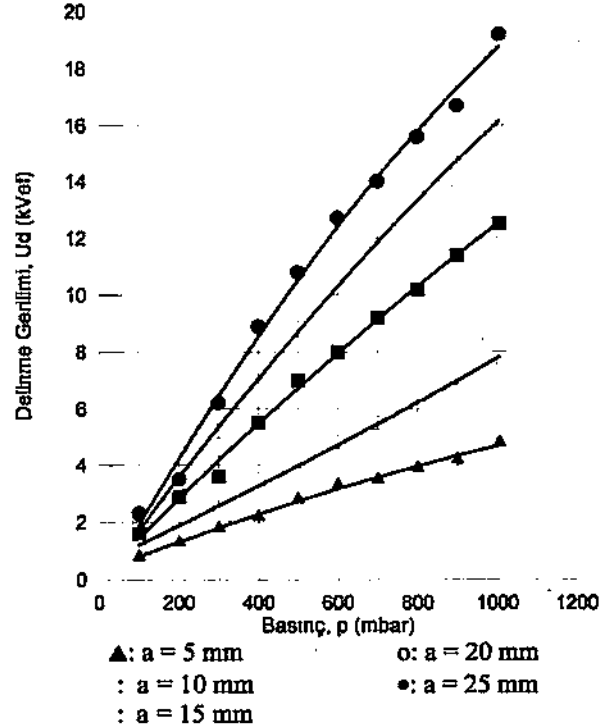
bağıntısı ile hesaplanır [3, 5, 6]. Bu bağıntıda, A ve B gaz türüne ve sıcaklığına bağlı katsayılar,  $\gamma$  pozitif iyonların çarpma ile katottan elektron koparma sayısını belirten ve elektrot malzemesine bağlı olan bir katsayıdır. Hesaplarda, hava için 20°C'da A = 10,95

$\text{cm}^{-1} \cdot \text{mbar}^{-1}$  ( $14,6 \text{ cm}^{-1} \cdot \text{mmHg}^{-1}$ ), B = 273,82  $\text{V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{mbar}^{-1}$  ( $365 \text{ V} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{mmHg}^{-1}$ ) ve pirinç elektrot kullanıldığı için  $\gamma = 0,025$  alınmıştır. Bu katsayılarla, p=100-1000 mbar basınç aralığında 100 mbar adımlarla her basınç değerinde, a=1 cm ve a=2 cm elektrot açıklıkları için ayrı ayrı delinme gerilimleri hesaplanmıştır.

### 3.2. Çubuk-Düzlem Elektrot Sistemi ile Delinme Deneyleri

#### 3.2.1. Alternatif Gerilim deneyi

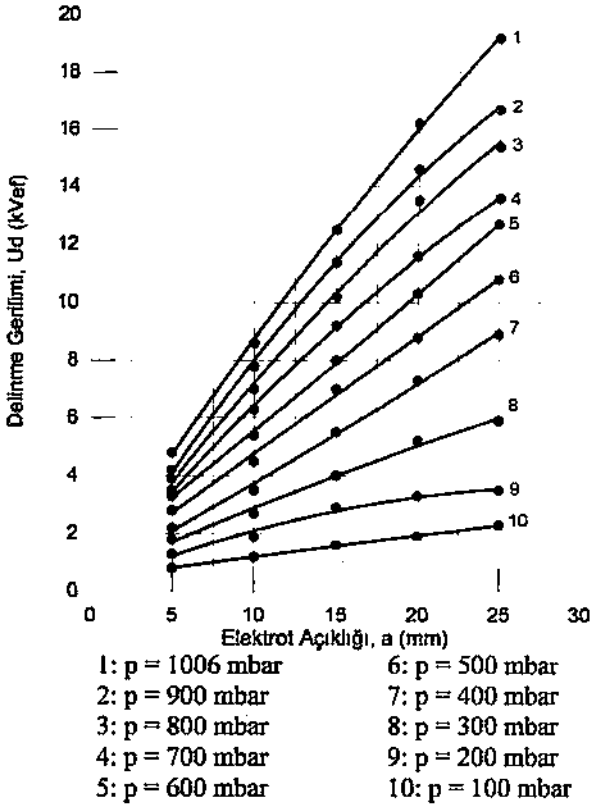
Şekil 6'da, alternatif gerilimde, çubuk-düzlem elektrot sisteminin 5-10-15-20-25 mm elektrot açıklıklarında delinme geriliminin basınçla değişimi gösterilmiştir. Bu şekilde, sistemin delinme geriliminin alçak basınçlara doğru, yaklaşık lineer olarak hızla azaldığı görülmektedir. Örneğin 25 mm elektrot açıklığı için 1000 mbar'da delinme gerilimi 20 kV'a yakınken basınç azaldıkça delinme gerilimi de hızla azalmakta ve 100 mbar'da 2 kV'a kadar düşmektedir. Benzer durum küçük elektrot açıklıklarında da biraz daha yavaş azalma hızı ile gözlenmektedir.



Şekil 6. Alternatif gerilimde çubuk-düzlem elektrot sisteminde sabit elektrot açıklıklarında delinme geriliminin basınçla değişimi.

Şekil 7'de ise alternatif gerilimde, çubuk-düzlem elektrot sisteminin delinme geriliminin sabit basınçlarda elektrot açıklığı ile değişimi gösterilmiştir. Bu şekilde de, sistemin delinme geriliminin elektrot açıklığı arttıkça yaklaşık lineer olarak arttığı görülmektedir. Özellikle yüksek basınçlarda delinme geriliminin, elektrot açıklığının artışı ile, hızla arttığı görülürken bu artış hızının alçak basınçlarda çok

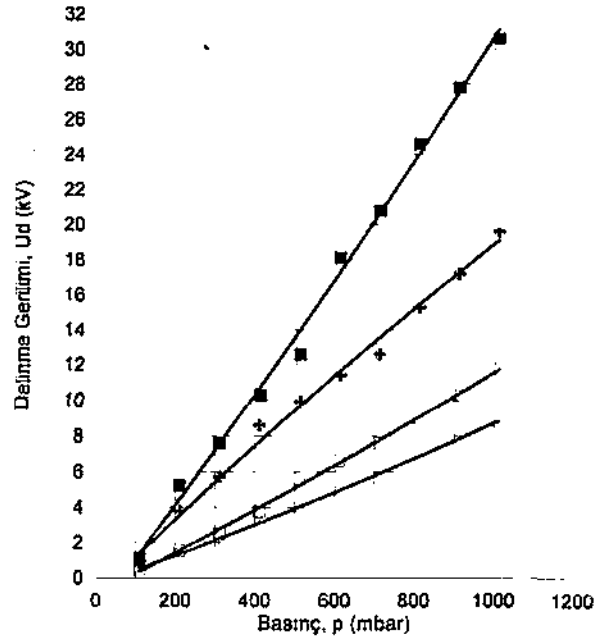
yavaşladığı görülmektedir. Bunun yanında küçük elektrot açıklıklarında her basınçta delinme gerilimleri birbirine yakinken, büyük elektrot açıklıklarında basınçla beraber delinme gerilimleri de birbirinden çok farklı değerler almaktadır.



Şekil 7. Alternatif gerilimde çubuk-düzlem elektrot sisteminde sabit basınçlarda delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimi.

### 3.2.2. Doğru Gerilim deneyi

Şekil 8'de, çubuk-düzlem elektrot sisteminin pozitif ve negatif doğru gerilimde, 10 ve 20 mm sabit elektrot açıklıklarında delinme gerilimlerinin alçak basınç bölgesindeki değişimleri gösterilmiştir. Şekilden her elektrot açıklığında negatif delinme gerilimlerinin pozitif delinme gerilimlerinden yüksek olduğu ve delinme geriliminin azalan basınçla yaklaşık lineer olarak hızla azaldığı görülmektedir. Bunun yanında, pozitif doğru gerilimdeki delinme gerilimi değerleri, aynı elektrot sisteminin söz konusu açıklıklardaki alternatif delinme gerilimi değerleri ile karşılaştırıldığında birbirlerine yakın oldukları görülmüştür. Benzer karşılaştırma negatif doğru gerilimdeki delinme gerilimi değerleri için yapıldığında, bu tür gerilimdeki delinme gerilimi değerlerinin hem pozitif doğru gerilimdekinden hem de alternatif gerilimdekenden çok daha yüksek oldukları görülmektedir. İlginç bir durum da çok alçak basınçlarda, örneğin 100 mbar'da, delinme gerilimlerinin kutbiyet ve elektrot açıklığına fazla bağlı olmaksızın birbirine çok yakın ve çok küçük değerler almasıdır.



Pozitif doğru gerilim	Negatif doğru gerilim
x: a = 10 mm	: a = 10 mm
+: a = 20 mm	: a = 20 mm

Şekil 8. Doğru gerilimde çubuk-düzlem elektrot sisteminde sabit elektrot açıklıklarında delinme geriliminin basınçla değişimi.

Çubuk-düzlem ve düzlem-düzlem elektrot sistemleri ile alternatif ve doğru gerilimlerde yapılan deneylerde sistemin delinme geriliminin artan basınçla yaklaşık lineer olarak hızla arttığı veya tersine azalan basınçla hızla azaldığı görülmektedir. Paschen eğrisi bir minimumdan geçen bir eğri şeklindedir. Burada elde edilen yaklaşık lineer eğri, Paschen eğrisinin minimumunun sağ tarafını kapsamaktadır. Paschen eğrisinin minimum noktasının sol tarafında, gaz basıncının düşük olması dolayısı ile atom sayısının azalması sonucu, elektrik alanı etkisiyle hızlanmış olan elektronların gaz atomları ile çarpışma olasılıkları daha azdır. Bunun sonucu bu basınçlarda daha az sayıda çarpışma ile iyonizasyon oluşur. Burada elde edilen durumda olduğu gibi Paschen eğrisinin minimum noktasının sağ kolunda ise çarpışma sayısı artar. Fakat bu durumda da elektronlar yeterli hızı kazanamadıklarından dolayı beklenenden daha az iyonizasyon olur. Bu yüzden, basınç arttıkça elektronların serbest yolu azalacağından elektronlar yeterli hızı kazanamayacaklar ve daha az iyonizasyon gerçekleşeceğinden delinme gerilimi gittikçe artacaktır.

### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, havanın alçak basınçta delinme davranışı incelenmiştir.

- Düzlem-düzlem elektrot sistemi ile 100-1013 mbar basınç aralığında yapılan delinme deneyleri sonunda;

- 1) Alternatif gerilimde, delinme geriliminin artan basınçla yaklaşık lineer olarak ve hızla arttığı veya tersine azalan basınçla hızla azaldığı görülmektedir. Bu durumda büyük elektrot açıklığında delinme geriliminin basınçla daha hızla değişeceği gözlenmiştir. Bunun yanında, delinme gerilimi değerlerinin düşük basınçlarda birbirine yaklaşıırken basınç yükseldikçe birbirlerinden uzaklaştıkları görülmektedir.
- 2) Pozitif ve negatif doğru gerilimde, delinme gerilimlerinin basınçla değişimleri incelendiğinde, alternatif gerilimde olduğu gibi, delinme geriliminin artan basınçla yaklaşık lineer olarak ve hızla arttığı veya tersine azalan basınçla hızla azaldığı görülmektedir. Genelde negatif doğru gerilimdeki delinme gerilimi değerleri pozitif doğru gerilimdeki değerlerden büyük çıkmıştır. Ancak düzgün alanlı elektrot sistemi ile çalışıldığı için, delinme gerilimleri arasındaki farklar ihmal edilecek kadar küçüktür.
- Çubuk-düzlem elektrot sistemi ile alçak basınçta yapılan delinme deneyleri sonunda;
- 3) Alternatif gerilimde, delinme geriliminin alçak basınçla, yaklaşık lineer olarak ve hızla değiştiği görülmüştür. Bu değişim, büyük elektrot açıklıklarında küçük elektrot açıklıklarına göre daha büyük olmaktadır.
- 4) Delinme geriliminin sabit alçak basınçlarda elektrot açıklığı ile değişimi incelemelerinden delinme geriliminin elektrot açıklığı arttıkça yaklaşık lineer olarak arttığı görülmüştür. Özellikle yüksek basınçlarda delinme gerilimi, elektrot açıklığının artışı ile, hızla artarken bu artış hızı alçak basınçlarda çok yavaşlamıştır. Bunun yanında küçük elektrot açıklıklarında her basınçta delinme gerilimleri birbirine yakinken, büyük elektrot açıklıklarında basınçla beraber delinme gerilimleri de birbirinden çok farklı değerler almıştır.
- 5) Çubuk-düzlem elektrot sisteminin pozitif ve negatif doğru gerilimde delinme gerilimlerinin alçak basınç bölgesindeki değişimleri incelendiğinde, her iki elektrot açıklığında negatif delinme gerilimlerinin pozitif delinme gerilimlerinden yüksek olduğu ve delinme geriliminin azalan basınçla yaklaşık lineer olarak hızla azaldığı görülmüştür. Bunun yanında, pozitif doğru gerilimdeki delinme gerilimi değerleri, aynı elektrot sisteminin söz konusu açıklıklardaki alternatif delinme gerilimi değerleri ile karşılaştırılmış ve delinme gerilimlerinin birbirlerine yakın olduğu görülmüştür. Benzer karşılaştırma negatif doğru gerilimdeki delinme gerilimi değerleri için yapıldığında, bu tür gerilimdeki delinme gerilimi değerlerinin hem pozitif doğru gerilimdekinden hem de alternatif gerilimdekenden çok daha yüksek oldukları görülmektedir.

- 6) Doğru gerilim deneylerinde çok alçak basınçlarda, örneğin 100 mbar'da, delinme gerilimlerinin kutbiyet ve elektrot açıklığına fazla bağlı olmaksızın birbirine çok yakın ve çok küçük değerler aldığı görülmüştür.

#### KAYNAKLAR

- [1] Meek J. M., Craggs J. D., Electrical Breakdown of Gases, Clarendon Press, Oxford, 1953.
- [2] Raether H., Electron Avalanches and Breakdown in Gases, Butterworths, London, 1964.
- [3] Özkaya M., Yüksek Gerilim Tekniğinde Deşarj Olayları, İ.T.Ü. Kütüphanesi Sayı: 1152, İstanbul, 1979.
- [4] Wotton R. E., Some Aspects of Breakdown in Gases, IEEE Transactions on Electrical Insulation, Vol. EI-17, No. 6, pp. 499-504, Dec. 1982.
- [5] Kuffel E., Zaengl W. S., High Voltage Engineering Fundamentals, Pergamon Press, New York, 1984.
- [6] Kreuger F. H., Industrial High Voltage, Vol. I, Delft University Press, The Netherlands, 1991.
- [7] Kalenderli Ö., Farsadi M., Havada Düzgün Alanda Elektrot Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme Gerilimine Etkisi, Elektrik Mühendisliği 3. Ulusal Kongresi, İstanbul, s. 224-227, 1989.
- [8] Yenidoğan C., Kalenderli Ö., Düzgün Alanda Yüksek Basınçta Elektrot Yüzey Pürüzlülüğünün Havanın Delinme Dayanımına Etkisi, BILKON'91, Bilkent Üniversitesi Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Konferansı, Ankara, s. 76-79, 1991.
- [9] Yenidoğan C., Kalenderli Ö., Özkaya M., Düzgün Olmayan Alanda Elektrot Yüzey Pürüzlülüğünün Havanın Delinme Gerilimine Etkisi, Elektrik Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi, İzmir, s. 291-294, 1991.
- [10] İsmailoğlu H., Kalenderli Ö., Özkaya M., Gönenc İ., Darbe Geriliminde Havanın Delinme Dayanımı, Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, Bursa, s. 257-260, 1995.
- [11] Kalenderli Ö., Mardikyan K., 50 Hz Alternatif Gerilimde Düzgün Olmayan Alanda %1 SF<sub>6</sub> İçeren Kuru Havanın Delinme Dayanımı, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 7. Ulusal Kongresi, Ankara, s. 657-659, 1997.
- [12] Önal E., Kalenderli Ö., Gönenc İ., Özkaya M., Az Oranda SF<sub>6</sub> Katılmış Havanın Delinme Karakteristikleri, Elmeksem'97, 4. Elektromekanik Sempozyumu, Bursa, s. 131-134, 1997.
- [13] Osmokrovic P., Krivokapic I., Kristic S., Mechanism of Electrical Breakdown Left of Paschen Minimum, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 1, No. 1, pp. 77-81, Feb. 1994.