

14104

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ * FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DÜZGÜN OLMAYAN ALANDA SF_6 , N_2 VE SF_6+N_2 GAZLARINDA
BOŞALMA GERİLİMLERİNE ELEKTROD YÜZEY PORÖZLÜLÜĞÜNÜN ETKİLERİ

DOKTORA TEZİ

Y. Müh. Murtaza FARSADI

T. C.
Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 3 Ekim 1989

Tezin Savunulduğu Tarih : 20 Kasım 1989

Tez Danışmanı

: Prof.Dr. Muzaffer ÖZKAYA

Diğer Jüri Üyeleri

: Prof. İzzet GÖNENÇ

Doç. Dr. M. Sezai DİNÇER

KASIM 1989

ÖNSÖZ

Böyle bir konuda araştırma yapmam için beni ilk harekete geçiren, çalışma sırasında daima her türlü bilgi ve desteğini eksik etmeyen, değerli hocam Prof.Dr.Muzaffer ÖZKAYA'ya sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmamın deneysel kısmında değerli görüş ve önerilerinden yararlandığım sayın Doç.Dr. M.Sezai DİNÇER'e, ayrıca konuyla ilgili önceki çalışmalarından yararlandığım hocam Doç.Dr. Kevork MARDİKYAN'a teşekkür etmeyi bir borç bilirim.

Tezin hazırlanmasında, yazılmasında ve şekillendirilmesinde çok değerli yardımlarını gördüğüm değerli arkadaşlarım Y.Müh. Özcan KALENDERLİ'ye ve Y.Müh. Fatih TAŞÇI'ya, ayrıca tezin daktilo edilmesinde çokça emeği geçen sayın Aknur KALENDERLİ'ye ve şekilleri özen ve sabırla çizen sayın Ayla ZORLU'ya şükranlarımı sunarım.

Çalışmalarım boyunca huzurla çalışabilmem için her konuda çok anlayışlı olmak yanında bana büyük destek olan eşim Mehtap FARSADİ'ye ve tüm yakınlarıma ne kadar teşekkür etsem azdır.

Ekim, 1989

Y.Müh. Murtaza FARSADİ

İÇİNDEKİLER

ÖZET	vi
SUMMARY	vii
SEMBOLLER	xiv
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. GAZLARDA DELİNME TEORİLERİ	4
2.1. Townsend Delinme Teorisi	4
2.2. Kanal Delinme Teorisi	7
2.3. SF ₆ da Delinme Mekanizmaları	12
2.4. SF ₆ +N ₂ Gaz Karışımında Delinme Mekanizmaları	16
2.5. SF ₆ ve SF ₆ +N ₂ Gaz Karışımında Minimum Delinme Gerilimi	19
BÖLÜM 3. DENEYLERDE KULLANILAN AYGITLAR VE ÖZELLİKLERİ	21
3.1. Basınç Kabı	21
3.2. Elektrod Sistemleri	22
3.2.1. Küre-Düzlem Elektrod Sistemi	22
3.2.2. Çubuk-Düzlem Elektrod Sistemi	23
3.3. Elektrod Yüzey Pürüzleri	23
3.4. Deneylerin Yapılışı	23
3.4.1. Alternatif Gerilimin Elde Edilmesi ve Ölçülmesi	23
3.4.2. Doğru Gerilimin Elde Edilmesi ve Ölçülmesi	25
3.4.3. Gaz ve Gaz Karışımlarının Doldurul- ması ve Basıncın Ölçülmesi	26
3.4.4. Deney Yöntemi	27
BÖLÜM 4. DENEY SONUÇLARI	29
4.1. Doğru Gerilim	29
4.1.1. Sıkıştırılmış SF ₆ Gazında, Küre-Düzlem ve Çubuk-Düzlem Elektrod Sistemlerin- de, Gerilimin Kutbiyetinin Korona Baş- langıç ve Delinme Gerilimlerine Etkisi	30
4.1.2. Sıkıştırılmış N ₂ Gazında, Küre-Düzlem ve Çubuk-Düzlem Elektrod Sistemlerinde, Gerilimin Kutbiyetinin Korona Başlan- gıç ve Delinme Gerilimlerine Etkisi ..	34
4.1.3. Sıkıştırılmış SF ₆ +N ₂ Gaz Karışımında, Küre-Düzlem ve Çubuk-Düzlem Elektrod Sistemlerinde, Gerilimin Kutbiyetinin Korona Başlangıç ve Delinme Gerilimle- rine Etkisi	37

4.2. Alternatif Gerilim	44
4.2.1. Alternatif Gerilimde SF ₆ Gazının Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerinin İncelenmesi	45
4.2.2. Alternatif Gerilimde N ₂ Gazının Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerinin İncelenmesi	46
4.2.3. Alternatif Gerilimde SF ₆ +N ₂ Gaz Karışımının Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerinin İncelenmesi	47
4.3. Doğru Gerilimde Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerine Etkisi	49
4.3.1. Sıkıştırılmış SF ₆ Gazında, Pozitif ve Negatif Doğru Gerilimde, Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerine Etkisi	50
4.3.2. Sıkıştırılmış N ₂ Gazında, Pozitif ve Negatif Doğru Gerilimde, Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerine Etkileri	56
4.3.3. SF ₆ +N ₂ Gaz Karışımında, Pozitif ve Negatif Doğru Gerilimde, Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimine Etkileri	58
4.4. Alternatif Gerilimde Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerine Etkileri	65
4.4.1. Sıkıştırılmış SF ₆ Gazında, Alternatif Gerilimde Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimine Etkileri	66
4.4.2. Sıkıştırılmış N ₂ Gazında, Alternatif Gerilimde Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerine Etkileri	68
4.4.3. Sıkıştırılmış SF ₆ +N ₂ Gaz Karışımında, Alternatif Gerilimde, Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerine Etkileri	69
BÖLÜM 5. DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI	73
5.1. Pürüzsüz Elektrod Sistemlerinde (Küre-Düzlem, Çubuk-Düzlem) N ₂ , SF ₆ ve SF ₆ +N ₂ Gazlarında, a=20 mm Elektrod Açıklığında Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerinin Karşılaştırılması	73
5.1.1. Pozitif ve Negatif Doğru Gerilim	73
5.1.1.a) Pozitif Doğru Gerilim	73
5.1.1.b) Negatif Doğru Gerilim	77
5.1.2. Alternatif Gerilim (50 Hz)	82
5.2. Pürüzlü Elektrod Sistemlerinde N ₂ , SF ₆ ve SF ₆ +N ₂ Gazlarının, Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerinin Karşılaştırılması ..	85
5.2.1. Pozitif ve Negatif Doğru Gerilim	85
5.2.2. Alternatif Gerilim (50 Hz)	90

5.3. Pürüzsüz ve Pürüzlü Elektrod Sistemle-	
rinde, SF_6 , SF_6+N_2 Gaz Karışımlarının	
Delinme ve Korona ² Başlangıç Gerilimle-	
rinin Karşılaştırılması	90
5.3.1. Pozitif ve Negatif Doğru Gerilim	90
5.3.2. Alternatif Gerilim (50 Hz)	95
BÖLÜM 6. DENEY SONUÇLARININ TEORİ İLE	
KARŞILAŞTIRILMASI	98
6.1. Küre-Düzlem Elektrod Sistemlerinde	
Korona Başlangıç ve Delinme Gerilimleri ..	98
6.2. Çubuk-Düzlem Elektrod Sisteminde	
Korona Başlangıç ve Delinme Gerilimleri ..	101
6.3. Sıkıştırılmış SF_6 Gazında, Küre-Düzlem	
ve Çubuk-Düzlem ⁶ Elektrod Sistemlerinde	
Minimum Delinme Gerilimi	103
6.4. Sıkıştırılmış SF_6+N_2 Gazında, Küre-Düzlem	
ve Çubuk-Düzlem ⁶ Elektrod Sistemlerinde	
Minimum Delinme Gerilimi	103
BÖLÜM 7. SONUÇLARIN ÖZETİ	105
KAYNAKLAR	107
ÖZGEÇMİŞ	113

ÖZET

Bu çalışmada, küre-düzlem ve çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde, SF_6 , N_2 ve SF_6+N_2 gazlarında, elektrod yüzey pürüzlülüğünün olması ve olmaması durumlarında, (0,5-4) bar basınç aralığında delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin değişimi incelenmiştir. Deneyler, doğru ve 50 Hz alternatif gerilimde yapılmıştır. Elektrod yüzey pürüzlülüğü makroskopik yönden ele alınmıştır.

$U_d=f(p)$ eğrileri, SF_6 ve SF_6+N_2 gaz karışımında bir maksimum-minimum davranışı gösterdiği, N_2 gazında ise O_2 etkisinden dolayı sözkonusu davranışın çok az ortaya çıktığı saptanmıştır. SF_6+N_2 gaz karışımlarında kritik basıncın N_2 oranı ile arttığı ve dolayısı ile korona bölgesinin genişlediği gözlenmiştir.

Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, (0,5-4) bar basınç aralığında, $U_d(-)>U_d(+)$ olduğundan sözkonusu elektrod sistemi bir sivri uç-düzlem elektrod sistemi gibi davranmıştır. Deneylerde çalışılan basınç aralığında, korona başlangıç gerilimleri hemen hemen basınçla lineer olarak artmıştır. Ayrıca, alanın düzgünsüzlük derecesi azaldıkça, SF_6 gazının, SF_6+N_2 gaz karışımına oranla, yüzey pürüzlülüğüne çok hassas olduğu ortaya çıkmıştır. Elektronegatif etkisi gösteren gazlarda, $U_d=f(p)$ eğrisinin negatif olduğu bölgede, yüzey pürüzlülüğünün delinme gerilimine hemen hemen etki etmediği, bu bölgenin dışında ise etkisinin var olduğu saptanmıştır. Ayrıca SF_6+N_2 gaz karışımlarında sözkonusu etkinin N_2 gazının oranı ile değiştiği gözlenmiştir. SF_6+N_2 gaz karışımlarında, 50 Hz alternatif ve pozitif doğru gerilimde, minimum delinme gerilimi elektrod sistemlerine bağlı olmaksızın hemen hemen sabit kaldığından, bu gerilimin hesaplanması için bir ampirik formül elde edilmiştir. Bu formülün, 50 Hz alternatif gerilimde SF_6 oranının %50 den büyük olduğu SF_6+N_2 gaz karışımlarında % 1-2 hata ile geçerli olduğu gözlenmiştir. Diğer yandan az düzgün alanlarda $U_d=f(p)$ eğrisinde maksimum-minimum davranışı bulunmadığından, sözkonusu formülün, sadece düzgün olmayan alanlar için geçerli olduğu ortaya çıkmıştır.

Kullanılan elektrod sistemlerinde %40 SF_6 +%60 N_2 gaz karışımı durumunda, delinme gerilimi değerlerinin negatif doğru gerilimde %60 SF_6 +%40 N_2 gaz karışımınıninki ile yaklaşık aynı olduğu, 50 Hz alternatif ve pozitif doğru geriliminde ise, %60 SF_6 +%40 N_2 gaz karışımınıninkinden daha yüksek olduğu görülmüştür.

SUMMARY

EFFECTS OF ELECTRODE SURFACE ROUGHNESS ON CORONA INCEPTION AND BREAKDOWN VOLTAGES IN SF_6 , N_2 AND SF_6+N_2 IN NON-UNIFORM FIELDS

Sulphur-hexafluoride has good dielectric and heat transfer properties and it is extensively being used in power apparatus as a dielectric medium. Besides being expensive, it has a relatively high boiling temperature. It is very sensitive to strong localized fields often encountered in practical systems due to electrode surface imperfections and the presence of free particles. Therefore in practical systems, the ideal Paschen's law breakdown strength is not achieved. Furthermore, long non-uniform field gaps insulated with compressed SF_6 show surprisingly low breakdown strength under the applications of impulse voltages [1].

Measurements of uniform quasi-uniform and non-uniform field breakdown voltages have shown that the addition of small amounts, a few percent of SF_6 to common gases like air and nitrogen, etc., results in an appreciable increase in the breakdown strength of these gases. From the existing information, it appears that SF_6 +air mixtures show relatively less degree of saturation as compared to SF_6+N_2 mixtures. This is probably due to the presence of electronegative O_2 in the air. Because of the presence of chemically active oxygen in air, SF_6 +air mixtures are technically less important as compared to SF_6+N_2 mixtures.

Although the excellent insulation and arc interruption properties of SF_6 have led to its widespread use in circuit breakers, recent studies have shown the possibility of further enhancing these properties by using SF_6 mixed with lighter gases such as N_2 . Garzon [2] have studied the comparative interruption properties of SF_6+N_2 mixture. By measuring the rate of rise of recovery of voltage (RRRV) for a synchronous interrupter, Garzon has shown that the performance of SF_6+N_2 mixtures having 50% SF_6 by volume at pressures of 1300 to 1900 kpa is approximately 1.39 times better than that of pure SF_6 . He also found that the recovery capability of a non-synchronous breaker using this gas mixture was at least as good as when pure SF_6 was used. Other advantages such as shorter times for pneumatic operations and the use of higher total pressures without liquification make mixtures of SF_6 more attractive and useful for further applications in circuit breakers. Synchronous breakers using SF_6+N_2

mixtures are already in operation.

Recent studies of $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ mixtures have revealed that such mixtures are less sensitive to the presence of contamination and electrode surface roughness as compared to pure SF_6 [3]. Furthermore, $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ mixtures have the advantages of lower boiling points and are less expensive. The lower boiling point of the mixtures is rather important in colder climates.

Previous investigations show that in a highly non-uniform field, breakdown voltage versus pressure curve for compressed SF_6 and $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gas mixture, exhibits a maximum-minimum characteristic. Such a field distribution can be obtained by making use of the point-plane or rod-plane electrode configurations. Experimental data show that in a highly divergent field, within a given pressure range, breakdown is always preceded by corona discharge. However corona may be avoided if the gas pressure is increased above a critical value. In literature the above phenomena is mentioned as "corona breakdown" and "direct breakdown" respectively. In fact, for a given electrode configuration, there is a transition between "direct breakdown" and "corona breakdown". In transition region, the pressure beyond which the breakdown is direct breakdown and where corona inception and breakdown voltages coincide is called "critical pressure".

Effect of electrode surface roughness on breakdown in SF_6 and $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ mixtures in uniform-field and coaxial electrode systems have been investigated by Pederson and Farish respectively [3], [4].

All of them used protrusions with microscopic sizes, but there is not available data about macroscopic sizes of protrusion, that can be obtained by production imperfections and presence of metallic particles.

According to above facts, the main purpose of this work is therefore to investigate the effect of polarity, field non-uniformity, gap spacing and pressure on corona inception and breakdown voltages of compressed N_2 , SF_6 and $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gas mixtures, with and without presence of macroscopic sizes of electrode surface roughnesses.

Experiments are carried out with 50 Hz AC and DC voltages up to the peak value of 280 kV in both polarities, using rod-plane, sphere-plane electrode systems. To obtain various degrees of non-uniformity, the sphere radius is changed and also to reach higher degree of non-uniformity, radius of 1 mm rod electrode is selected. To obtain desired degree of roughness hemisphere with heights equal to 3 mm and 6 mm are mounted on the plane electrodes for each configurations. The electrodes are mounted in a pressure vessel made of polymethyl metacrylate (plexiglass). All electrodes are made of

brass covered with chromium (Although the rod electrode used during the experiments is hemispherically capped with a radius of 1 mm). The lower electrode in both arrangements is a plate electrode with an overall diameter of 75 mm and its edges are rounded with a radius of curvature of 3 mm.

For the 50 Hz AC test, with voltages up to 100 kV r.m.s. a MWB 0,22/100 kV, 5 kVA high voltage transformer is employed. To limit the discharge current at breakdown and reduce the erosion at electrode surfaces, a 10 M Ω protecting resistor is connected between the high voltage supply and the test object. Furthermore, the high voltage transformer is disconnected from the mains immediately after breakdown. The peak value of AC voltage is measured by using the method of Chubb and Fortescue. The waveform of the 50 Hz voltage applied to the test object is observed by means of a capacitive potential divider and a Textronix 7623A, dual beam oscilloscope. The corona inception voltage is determined by observing the voltage drop due to the corona impulse current across a 75 Ω resistor inserted in the earth lead.

A two stage voltage doubler circuit is used to obtain up to 280 kV DC voltages via a 0,22/100 kV, 5 kVA MWB transformer. Similar to the AC test, an automatic switch and a 50 k Ω current limiting resistor are connected to the DC supply and test object. The DC voltages are measured with two 140 M Ω resistors connected in series and a mA-meter. DC corona inception voltage is determined in the same way as for AC measurements, but the voltage across the test object is not observed. In all experiments, the applied voltage has been raised at a rate of 5 kV/s until breakdown occurred. Before starting any experiments, electrodes are treated with a metal polish and clean washed carefully with ethyl alcohol. After mounting the electrodes in the vessel, it is evacuated to a pressure less than 10^{-2} Torr for at least 20 minutes, and then the lower constituent is admitted to a partial pressure corresponding to the desired mixture ratio. The second constituent is then added to the predetermined total pressure. Unless otherwise mentioned, the percentage of mixture refers to the percentage of SF₆ in N₂ by pressure. Although the SF₆ gas used in the experiments is supplied by the Turkish Electricity Authority with a commercial grade and also N₂ gas is obtained from HABAS A.Ş., both gases are stored in a high pressure tanks. To make sure of the stability of gas and gas mixture, the measurements are started 6 hours after filling. During the test, room temperature varies between 11 and 17°C. At least ten different voltage values are taken to estimate the mean value of each measuring point.

The standard deviations and %95 confidence intervals are also calculated. Especially in the decreasing part of $U_d=f(p)$ curves a relatively higher scattering and a coefficient of dispersion up to %5 are observed.

It can be stated without any doubt that the presence of sustained corona discharges, in both positive as well as negative rod-plane and sphere-plane gaps, considerably enhances the breakdown strength of systems insulated with SF_6 and SF_6+N_2 gas mixtures. The pressure over which this enhancement occurs is often referred to as the "corona stabilized breakdown region". The high pressure limit of this region at which the breakdown and the corona onset voltages coincide is known as the critical pressure p_{kr} .

The present results clearly indicate that the breakdown of both the negative and positive rod-plane, sphere-plane gaps is corona stabilized in the low pressure region. At high pressures, however, the breakdown occurs in the absence of any corona discharges. The width of the corona stabilized breakdown region is much smaller for the positive rod-plane and sphere-plane gaps as compared to the negative ones. Consequently, the critical pressure for the negative gaps is higher than that observed for the positive ones as shown in Figures 4.8 and 4.9. Furthermore, the breakdown voltages for negative gaps are higher than those of positive gaps at the low pressure range of the corona stabilized region. However, the reverse behavior is observed at higher pressures where the breakdown occurs without corona. In the corona stabilized region at low pressure, the breakdown voltages increase linearly with pressure for both polarities of applied voltage. The absolute width of the pressure region, where the breakdown voltage-pressure curve is linear is much wider for the negative gaps, photographic records and visual observations revealed that in this region, the sparks follow straight paths for both polarities of the applied voltages. As the pressure is increased, the breakdown voltages attain maximum values followed by reduction in magnitudes with increasing gas pressures. It is quite likely that extremely non-uniform field gaps of negative polarity with smaller diameter cathodes have maximum-minimum in the breakdown voltage-pressure curves especially at high values of the gas pressures not investigated in our studies. The corona inception voltages is higher for the positive gaps as shown in figures of Chapter 4. Furthermore, the magnitudes of the average prebreakdown currents for a given applied voltage and gas pressure are larger in the negative gaps than those observed for the positive gaps. This is probably due to the fact that the secondary ionization process such as photo ionization of the gas, photoemission from the cathode, and electron emission from the cathode due to positive ion bombardment are more effective when the rod or sphere cathode is in the high

field region such as in the negative rod-plane and sphere-plane gaps. Furthermore, when the highly stressed electrode is the cathode, the chances of field emitted electrons, initiating corona discharges are present especially at high gas pressure. These reasons and the fact that it is easier for the positive than the negative streamers to propagate and bridge the gap make the corona stabilization processes more effective especially at low pressures, for the negative gaps. Consequently, the corona stabilized breakdown region is wider in the case of the negative rod-plane and sphere-plane gaps than that of the positive gaps.

At low pressures, the breakdown voltage of SF_6 and $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gas mixtures is higher for the negative sphere-plane gaps. This is due to the fact that it is more difficult for the negative streamers to advance in a divergent field as compared to the positive streamers. In the case of negative sphere-plane gaps, an avalanche starts from the highly stressed electrode and the electrons diverge outward from a high field to a lower field region. Thus any electrons created by photoionization will move ahead of the streamer to create new avalanches and thus move into a rapidly declining field region. Furthermore, when the streamer propagates in the presence of corona discharges, the low field region is filled with slowly drifting negative ions. This makes the streamer propagation farther into the gap extremely difficult unless the external fields are high enough to ensure the effective fields at the streamer tip $\geq 0,8775 \text{ kV (cm.kpa)}^{-1}$ in the case of pure SF_6 . On the other hand, for a positive sphere-plane gap the electrons created ahead of the avalanche by photoionization travel towards the high field regions there by creating more positive ion space charge at the avalanche head. In this fashion, the positive ion space charge is advanced towards the cathode maintaining the field at its tip and creating more electrons a head of itself to continue more advance. This not only results in a lower value of the breakdown voltage for a positive gap, but, also, results in a much lower value of the critical pressure in such gaps.

Since rod-plane configuration with rod radius equal to 1 mm is an extremely non-uniform gap, therefore, the corona stabilized breakdown voltages for such gaps are higher than sphere-plane electrode configuration with larger sphere radius. Ultimately, negative breakdown voltages of rod-plane electrode system are higher than positive breakdown voltages in the pressure range between 0,5 and 4 bar.

Under 50 Hz AC voltages, corona pulses appeared at first on the negative half-cycle, perhaps conforming an earlier observation under dc voltage. Under higher voltage amplitudes corona pulses appeared over the

positive half-cycle, and at a yet higher voltage, they are split into two populations on both sides of the peak of the AC wave.

In Chapter 5, we compare breakdown and corona inception voltages of SF_6 and SF_6+N_2 gas mixtures for different electrode geometries, with and without surface roughnesses. In general, breakdown voltages of SF_6 and SF_6+N_2 gas mixtures with and without surface roughnesses have different values due to specified pressure region. For example, in hemisphere-plane type electrode system without surface roughness under DC (+) voltage, 80% SF_6 has higher value than 100% SF_6 for the pressure region between 1 and 1.57 bar, which is shown in Figure 5.2.

This behaviour of the SF_6+N_2 mixture may be attributed to the possible changes in its transport parameters. It is very probable that the electron energy distributions in the mixture will be different than those of pure SF_6 case for certain mixture ratios. Hence, the mean energy of the electron-swarm, drift velocities and as well as diffusion coefficients will be different compared to pure SF_6 . Also, it is possible that the photon absorption coefficient of SF_6 will change with addition of N_2 [5]. Furthermore, the variation of effective ionization coefficient of the mixture with respect to the pressure reduced field is less compared to that of pure SF_6 [5],[6].

It is observed that SF_6+N_2 gas mixtures are not so sensitive to electrode surface roughness in the case of macroscopic size protrusions used during the tests. All of these are explained briefly in Chapter 5.

Shifting of critical pressure in gas mixtures to higher values than pure SF_6 particularly, in extremely non-uniform fields, is an interesting result observed in breakdown versus pressure characteristics of SF_6+N_2 gas mixtures.

The comparison of measured values with the theoretical ones for the three electrode configurations are shown in figures of Chapter 6. Theoretical threshold voltages for all electrode arrangements are computed by using the equation (2.34). Given equation is proposed to corona inception voltages in non-uniform fields configuration, and also it is valid to breakdown voltage in quasi-uniform field arrangement, that is obtained when the radius of sphere electrode is equal to 4 mm. Since in non-uniform fields, negative corona have lower values with respect to positive ones, therefore, theoretical equations are only useful to predict DC (-) corona voltages for sphere-plane and rod-plane electrode configurations with radius of 2 mm and 1 mm respectively. Experimental results are slightly higher or lower than predicted values. This may be due to the fact that

theoretical values were based on the assumption that the plane electrode radius was infinite. In this investigation, the plane electrode had a diameter of 75 mm only. Therefore, the calculated field utilization factors may be smaller than the actual values. Thus, measured inception voltages can be higher or lower than predicted values. Dispersion between calculated and measured values are observed specially for higher non-uniform field geometries. This is due to the fact that corona inception voltages are not so stable in non-uniform fields particularly at lower pressure.

The minimum breakdown voltages and the pressure at which this minimum occurs are important factors in the design of SF_6 and SF_6+N_2 gas mixtures. That is used in high-voltage apparatus.

Test results show that, for a given gap spacing (U_d) and $\eta \cdot p_{\min}$ values are approximately constant irrespective of $p_{\min}$ the electrode configuration and gas pressure. Sangkasaad in 1975, from optical observation has found out that in the pressure range $p < p_m$ there is a uniform corona discharge at rod tip with a few millimeters length. The spark followed the shortest distance between electrodes. By increasing the pressure to p_m the streamer discharges are developed into different directions from the rod tip. This means that space charge increases the radial field strength and introduces a spark in that direction. In the region around p_m , the spark discharge doesn't follow the shortest path between electrodes, but, advances along a curved path to the cathode. Around p_c the spark discharge will again follow the shortest way.

According to the above fact, we observed that in non-uniform field configurations, around p_m , the effect of surface roughness is not so significant on the breakdown voltages in SF_6 and SF_6+N_2 gas mixtures.

A semi-empirical criterion is obtained for minimum breakdown voltages in SF_6 and SF_6+N_2 gas mixtures which is shown by Equation (2.38) in Chapter 2.

SEMBOLLER

a	: Elektrod açıklığı
α	: Elektronun iyonlaştırma sayısı
$\bar{\alpha}_m$	: Gaz karışımında elektronun bileşke iyonlaştırma sayısı
D	: Difüzyon katsayısı
E	: Elektrik alan şiddeti
E_{ort}	: Ortalama elektrik alan şiddeti
E_r	: Radyal elektrik alan şiddeti
(E/p_{kr})	: Kritik çıkış uzunluğuna ilişkin alan şiddetinin basınca oranı
ϵ_0	: Boşluğun dielektrik katsayısı ($8,86 \cdot 10^{-12}$ F/m)
ϵ	: Gazın dielektrik katsayısı
γ	: Pozitif iyonun katoddan kopardığı elektron sayısı
η	: Elektronun yakalanma katsayısı; elektrod sisteminin verimi
I_o	: Başlangıç foto elektrik akımı
I	: Elektrik akımı
ξ	: Alanın düzgünsüzlük derecesi ($1/\eta$)
$\bar{\lambda}$	: Ortalama serbest yol
n_x	: Katoddan x uzaklığındaki elektron sayısı
n_o	: Başlangıç elektron sayısı
N_i	: İyon yoğunluğu
N_{kr}	: Kritik yük sayısı
N,z	: Gaz karışımında SF_6 gazının yüzdesi
p	: Gaz basıncı
p_{min}	: U_{dmin} a karşı düşen gaz basıncı
p_{max}	: U_{dmax} a karşı düşen gaz basıncı
p_{kr}	: Kritik basınç
Q	: Elektrik yükü
r	: Elektron çıkışının yarıçapı; elektrodun eğrilik yarıçapı

r_p : Elektrod yüzey pürüzünün yarıçapı
 t : Zaman
 U_o : Korona başlangıç gerilimi
 U_d : Delinme gerilimi
 U_{dmin} : Minimum delinme gerilimi
 U_{dmax} : Maksimum delinme gerilimi
 U_{dm} : Gaz karışımının delinme gerilimi
 x_{kr} : Kritik çıkış uzunluğu

KISALTMALAR

AG : Alternatif gerilim
DG : Doğru gerilim

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Yüksek basınçlarda bir gazın delinme geriliminin yüksek olmasından bir çok izolasyon düzenlerinde yararlanılır. Gazların izolasyon kabiliyetlerini tanıtmak bakımından en önemli büyüklük, "bağıl elektriksel delinme dayanımıdır".

Bilindiği gibi deşarjın kendi kendini beslemesi için belli bir basınç ve elektrotlar arası açıklıkta (α/p) in de belli bir değerde olması gereklidir. (α/p) in bu değerine tekabül eden söz konusu gaza ait (E/p) değerinin havaya ait (E/p) değerine oranı, adı geçen gazın bağıl delinme dayanımını verir. Bağıl delinme dayanımı büyük olan bir çok gaz vardır. Ancak bir gazın izolasyon malzemesi olarak kullanılması için, yalnız elektriksel dayanımın yüksek olması yetmez; ayrıca şu özelliklerde aranır: a) İşletmede meydana gelebilecek sıcaklıklarda yüksek basınçlara erişmek amacıyla sıvılaştırma sıcaklığının düşük olması; b) Diğer gazlarla temasta kimyasal ilgisizlik; c) Elektriksel deşarjlarda mümkün olduğu kadar özelliklerini kaybetmemek. Bu koşullar, bağıl delinme dayanımı yüksek olan gazların kullanılma sahalarını büyük ölçüde sınırlarlar. Sonuçta freon adı verilen $CCl_2 + F_2$ (Diflüordiklormetan) gazı ile elegaz adı verilen SF_6 (Kükürt hekza florid) gazının izolasyon sistemlerinde, kullanılması mümkün olmaktadır. Ancak Freonun sıvılaştırma sıcaklığının nisbeten yüksek olması, normal sıcaklıkta basıncın 6 kg/cm^2 in üstüne çıkmasına engel olur. Onun için açıkta veya az ısıtılmış yerlerde kurulan freon tesisleri özel ısıtma aygıtına ihtiyaç gösterirler. Bu bakımdan SF_6 daha avantajlıdır. SF_6 nın sıvılaştırma sıcaklığı freon'unkinden çok daha küçüktür. Dolayısıyla normal

sıcaklıklarda 20 kg/cm^2 in üstündeki basınçlara kadar sıkıştırılabilirler. Ayrıca freon bakırla uzun müddet temas halinde bakır yüzeyinde belirli bir etki yaptığı halde, SF_6 yapmaz. Yukarıdaki durumlar gözönüne alındığında, SF_6 gazının yalıtkan olarak kullanılması ortaya çıkmaktadır (röntgen tesislerinde, yüksek gerilim kondansatörlerinde, ölçü transformatörlerinde v.s.).

Yapılan araştırmalar ve deneyler düzgün alanlarda SF_6 gazının delinme geriliminin söz konusu gazın yüzey pürüzlülüğüne duyarlı olması nedeniyle Paschen Yasasına uymadığını göstermektedir.

Öte yandan SF_6 gazının pahalılığı ve yüzey pürüzlülüğüne olan duyarlılığı gözönünde bulundurularak yakın geçmişte daha ucuz ve kolay elde edilebilen hava, N_2 ve CO_2 gibi gazlarla olan karışımları incelenmeye başlanmıştır.

SF_6 ile birlikte kullanılacak olan gazların N_2 dışındakilerin getirdiği bir takım dezavantajlardan dolayı (örneğin havanın içerisinde O_2 ihtiva etmesinden dolayı korona kararlı bölgesinin geniş olması ve bu yüzden elektrot yüzeyini aşındırması gibi) $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımları üzerinde araştırmalar yoğunlaşmıştır.

Bu konuya yönelik olarak yapılan araştırmalar değişik oranlardaki gaz karışımlarına ilişkin delinme gerilimlerinin % 100 SF_6 durumunda elde edilen delinme gerilimi değerlerinin % 75-85'i olduğunu göstermektedir. Ayrıca $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımının delinme dayanımının, düzgün ve düzgün olmayan alanlarda yüzey pürüzlülüğüne duyarlı olmaması ve SF_6 'ya oranla daha düşük sıvılaştırma sıcaklığına sahip olması, kararlılığının iyi olması, zehirli ve yanıcı olmaması, bu gaz karışımının getirdiği üstünlüklerdendir. Öte yandan Garzen %50 $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımının ark döndürme kabiliyetinin %100 SF_6 ninkine eşit olduğunu göstermiştir.

Bütün bu özellikler $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımlarının %100 SF_6 ya oranla daha avantajlı olduğunu ortaya koymaktadır.

Pratikte yüksek gerilim aygıtlarının çoğunda alanın düzgün olmadığı, hatta güç kesicilerinde düzgünsüzlük derecesi yüksek olan alan dağılımlarının var olduğu bir gerçektir. Öte yandan düzgün olmayan alanda $U_d = f(p)$ eğrisinin bir maksimum-minimum davranışı gösterdiği, korona boşalması ile delinme arasında bir geçiş bölgesinin bulunduğu bilinmektedir. Bu çalışmada, delinme karakteristiğine, yukarıda belirtilen özelliklere ve olayın fiziksel mekanizmasına açıklık getirmek amacı ile alanın düzgünsüzlük derecesini ve basıncı değişken olarak sabit elektrot açıklığında SF_6 , N_2 ve $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz ve gaz karışımlarında elektrod yüzey pürüzlülüğünün korona başlangıç ve delinme gerilimlerine etkisi araştırılmıştır.

SF_6 ve $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gazları üzerine şimdiye kadar yapılan çalışmalarda düzgün alanlarda mikroskobik ölçülerdeki yüzey pürüzlülükleri incelenmiş olmasına karşın bu çalışmada yukarıda sözü edilen olaylara bir açıklık getirmek amacı ile az düzgün ve düzgün olmayan alanlarda SF_6 , N_2 ve $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımlarında makroskobik yüzey pürüzlülüklerinin delinme ve korona başlangıç gerilimlerine etkileri incelenmiştir.

BÖLÜM 2

GAZLARDA DELİNME TEORİLERİ

2.1. Townsend Delinme Teorisi [7],[8],[9]

Bir elektronun elektrik alanı doğrultusunda 1 cm'lik yol gitmesi halinde çarpma suretiyle meydana getirdiği iyon çifti sayısına elektronun iyonlaştırma sayısı denir ve α ile gösterilir. Elektronun kinetik enerjisi, gaz moleküllerinin iyonizasyon enerjisinden büyük ise iyonizasyon meydana gelir. Diğer taraftan, ortalama serbest yolu $\bar{\lambda}$ olan bir elektronun çarpışmadan λ_i yolunu katetme olasılığı $\exp(-\lambda_i/\bar{\lambda})$, birim uzunluktaki çarpışma sayısı $1/\bar{\lambda}$ alınır,sa,

$$\alpha = \frac{1}{\bar{\lambda}} e^{-\lambda_i/\bar{\lambda}} \quad (2.1)$$

şeklinde yazılabilir.

Yukarıdaki denklemde $1/\bar{\lambda}=A.p$, $\lambda_i=U_i/E$, $B=A.U_i$ değerleri konursa,

$$\alpha = A.p.e^{-Bp/E} \quad (2.2)$$

ifadesi elde edilir.

Bu denklem,

$$\frac{\alpha}{p} = A.e^{-B/(E/p)} \quad (2.3)$$

şeklinde yazılabilir.

Yukarıdaki ifade α iyonlaştırma sayısının alan

şiddetine göre değişimini göstermektedir. Burada, p gaz basıncı, A ve B ise gazın cinsine ve sıcaklığına bağlı sabitlerdir.

Birim zamanda katodun 1 cm^2 lik yüzeyinden n_0 adet elektron çıktığını kabul edelim. Bir elektrik alanının etkisi altında, elektronlar çarpma suretiyle iyonizasyona neden olurlar ve zamanla elektron sayısında meydana gelen bu artışa "elektron çığı" adı verilir. Katoddan itibaren x uzunluğundaki bir elektron çığında elektron sayısı,

$$n_x = n_0 \cdot e^{\alpha x} \quad (2.4)$$

$x=a$ uzaklığında yani anoddaki elektron sayısı da,

$$n_a = n_0 \cdot e^{\alpha a} \quad (2.5)$$

olur. Buradan anlaşılabilceği gibi, katodu terk eden her elektron, anoda vardığında $e^{\alpha a}$ adet elektron ve $(e^{\alpha a}-1)$ adet pozitif iyon meydana getirir. Kararlı halde, birim zamanda anoda varan pozitif iyon sayısı, anoda erişen elektron sayısına eşittir ve elektrodlar arasından akan akım,

$$I = I_0 \cdot e^{\alpha a} \quad (2.6)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Burada, başlangıç anında katoddaki fotoelektrik akımı I_0 ile gösterilmiştir. Şimdi, bir pozitif iyon tarafından katoddan koparılan elektron sayısını γ ile gösterelim. Şayet $(e^{\alpha a}-1)$ adet pozitif iyon katoda vardığında 1 adet elektron koparıyorsa, boşalmanın kendi kendini beslediği söylenir. Diğer bir deyimle,

$$\gamma(e^{\alpha a}-1) = 1 \quad (2.7)$$

koşulunun sağlanması halinde boşalma kendi kendini besler ve bu takdirde elektrodlar arasındaki gerilime "delinme gerilimi" denir.

Pozitif iyonların katod yüzeyinden kopardığı elektron sayısı hesaba katıldığında, başlangıçtaki elektron sayısı Δn kadar artarak, $n_k = n_o + \Delta n$ olur.

Bu durumda, kararlı halde elektrodlar arasından akan akım,

$$I = \frac{I_o e^{\alpha a}}{1 - \gamma(e^{\alpha a} - 1)} \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Yukarıdaki denklem, delinme olayından önce, elektrodlar arasından geçen akımın çoğalmasını göstermektedir ve $1 - \gamma(e^{\alpha a} - 1) = 0$ koşulu sağlandığında, boşalma kendi kendini besler. Bu takdirde elektrodlar arasındaki I akımı aniden yükselerek, sadece güç kaynağının iç direnci ve iletim halindeki gazın direnciyle sınırlanan değere ulaşır, bu elektrodlar arasındaki gazın delindiği andır.

Sonuç olarak, boşalmanın kendi kendini beslemesi veya Townsend delinme koşulu aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\alpha a = \ln(1 + 1/\gamma) \quad (2.9)$$

Townsend delinme kriterinin fiziksel anlamı şudur: Katoddan hareket ederek anoda varan her elektron çıkışının meydana getirdiği pozitif iyonlar katod yüzeyinden elektron kopartarak ikinci bir çıkış oluştururlar ve böylece ard arda oluşan elektron çıkışlarının anoda varması sonucu delinme meydana gelmiş olur. Paschen, alanın düzgün veya az düzgün olması halinde, delinme geriliminin sabit sıcaklıkta gaz basıncı ile elektrod açıklığı çarpımının bir fonksiyonu olduğunu göstermiştir. Az düzgün alanda

boşalmanın kendi kendini besleme koşulu,

$$\int_{x=0}^{x=a} \alpha dx = \ln (1+1/\gamma) \quad (2.10)$$

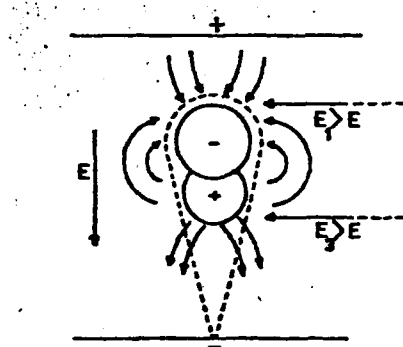
$x=0$ katod
 $x=a$ anod

şeklini alır.

Yakın geçmişte yapılan deneyler, düzgün alanda 8000 mmHg.cm ye kadar Townsend Teorisinin geçerliliğini koruduğunu göstermektedir.

2.2. Kanal Delinme Teorisi

Townsend Teorisi, büyük elektrod açıklarında deneyle bulunan kısa boşalma süresini tam olarak açıklayamadığından 1940 yılında, Meek, Loeb ve Raether özellikle büyük elektrod açıklıklarında boşalmanın gelişmesine yönelik yoğun deneyler yapmışlar ve Kanal Teorisini ortaya atmışlardır [7],[8],[9],[10],[11],[12]. Kanal Teorisine göre, katoddan itibaren başlayan bir tek elektron çığı yol boyunca gelişerek uzay yükünün etkisiyle önce ısıltılı ince bir plazma şeklini alır, daha sonra da iletkenliğin artmasıyla çığın anoda varması neticesinde gazın delinmesine neden olur. Boşalmanın kendi kendini beslemesinde çarpma suretiyle iyonizasyondan başka foto ve termik iyonizasyon olayları da önemli rol oynarlar. Çığın uç kısmında biriken uzay yükleri dış elektrik alanına etki ederek bozulmasına neden olurlar (Şekil 2.1). Pozitif



Şekil 2.1. Uzay yükünün dış elektrik alanına etkisi.

iyonların, kendilerine göre çok hızlı hareket eden elektronların yanında durdukları kabul edilirse, elektron çığının, arkasında pozitif iyonlardan oluşan bir uzay yükü bırakarak anoda doğru geliştiği söylenebilir. Böylece çığın arkasındaki ve önündeki elektrik alanı uzay yükleri tarafından kuvvetlendirilmiş olur.

Pozitif iyonlar tarafından çığın başında yaratılan E_r radyal elektrik alan şiddeti dış alan şiddetine yaklaştığında boşalmanın çığ safhasından kanal safhasına geçtiği söylenebilir. Uzay yüklerinin oluşturduğu E_r alan şiddetini hesaplamak için, toplam yükleri Q olan uzay yüklerinin çığın başında r yarıçaplı kürenin merkezinde bulundukları kabul edilirse, küre yüzeyindeki E_r alan şiddeti,

$$E_r = \frac{Q}{4\pi\epsilon_r r^2} \quad (2.11)$$

pozitif iyonların toplam yükü,

$$Q = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot N_i \cdot q \quad (2.12)$$

iyon yoğunluğu,

$$N_i = \frac{\alpha e^{\alpha x} dx}{\pi r^2 dx} = \frac{\alpha e^{\alpha x}}{\pi r^2} \quad (2.13)$$

ifadelerini (2.11) denkleminde yerine koyarak,

$$E_r = \frac{q \alpha e^{\alpha x}}{3\pi\epsilon_r} \quad (2.14)$$

bağıntısı elde edilir.

Difüzyon teorisine göre, $r = \sqrt{2D \cdot t}$, $t = x/v$ (çığın yayılma süresi) alınır, hava için

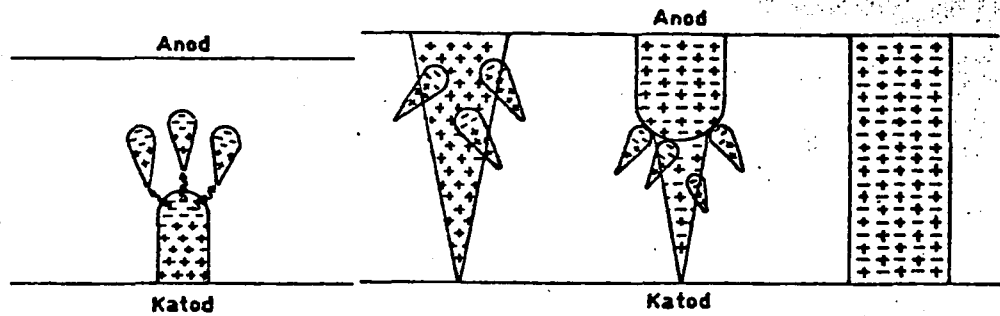
$$E_r \approx 5,27 \cdot 10^{-7} \frac{\alpha e^{\alpha x}}{\sqrt{x/p}} \quad (2.15)$$

bulunur.

Düzgün alanda, katod kanalının oluşumu için gerekli koşulu Meek ve Loeb, $E_r \approx E$ şeklinde ifade etmişlerdir (Şekil 2.2b) [10],[12]. Anod Kanalı için ise benzer bir kriteri Raether aşağıdaki gibi özetlemiştir.

$$E_r \approx 1,9 \cdot 10^{-19} \frac{e^{\alpha x}}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (2.16)$$

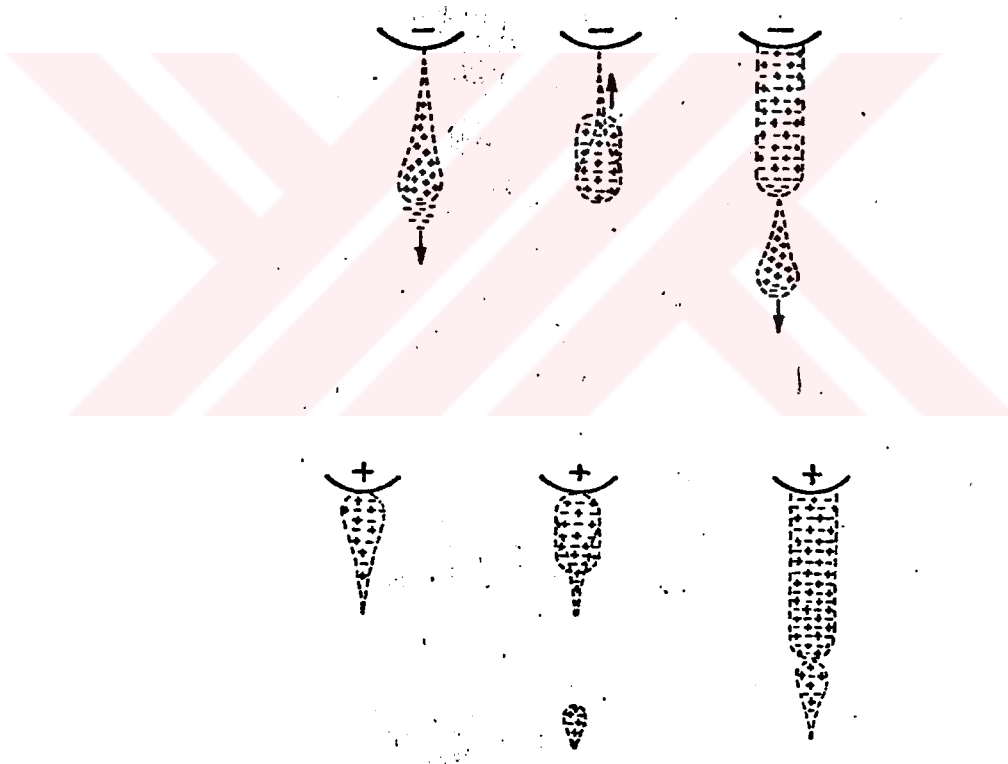
Burada, r çığın yarıçapı olup yukarıdaki gibi hesaplanabilir. Raether'a göre, başlangıç aşamasında elektron çığındaki $e^{\alpha x}$ adet elektronun meydana getirdiği alan şiddeti, dış elektrik alan şiddetiyle kıyaslanabildiği taktirde, boşalma gelişir. Diğer bir deyimle, Raether kanal boşalmasının gelişebilmesi için, uzay yüklerinin neden olduğu elektrik alanının yaklaşık olarak elektrod-lara uygulanan alan şiddetine eşit olması kriterini ortaya atmıştır. Raether'a göre elektron çığındaki $e^{\alpha a}$ adet elektron yaklaşık olarak 10^8 kritik değerine eriştiğinde uzay yükünün neden olduğu kanal boşalması anoda doğru yayılır (Şekil 2.2a) [11].



Şekil 2.2. a) Anod kanalı,
b) Katod kanalı.

Yukarıdaki bölümde düzgün alanda kanal boşalması-
nın gelişmesi kısaca özetlenmiştir. Elektrodlar arasın-
daki ortalama alan şiddetinin maksimum alan şiddetinden
farklı olduğu ve elektrodların kutbiyetinin delinme geri-
limini etkilediği alanlara düzgün olmayan alan denir.
Pratikte sivri uç-düzlem veya çubuk-düzlem elektrod sis-
temleri kullanılarak düzgün olmayan bir alan elde edile-
bilir.

Sivri uçlu elektrodun negatif olması halinde ilk
elektron ışıması katoddan başlar ve buradan itibaren alan
doğrultusunda büyür (Şekil 2.3). Bu sırada ışıma başının



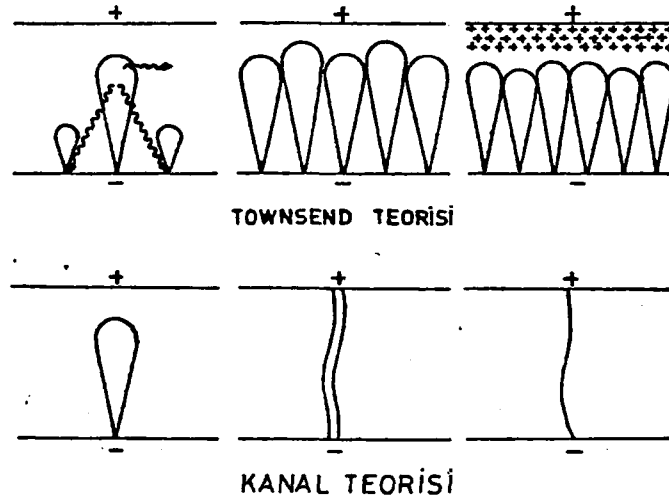
Şekil 2.3. Çubuğun negatif ve pozitif olması halinde
boşalmanın gelişmesi.

arka tarafında kalan pozitif yükler alanı katod doğrultu-
sunda kuvvetlendirir ve anod doğrultusunda zayıflatırlar.
Sonuç olarak iyonizasyon bölgesi katoda kayar ve kanalın
gelişmesi zorlaşır. Boşalmanın başlayabilmesi için elek-
trodlara uygulanan gerilimin yükseltilmesi gerekir. Ge-
rilim yükselttiğinde, pozitif yükler alanı anod doğrultu-
sunda pek o kadar zayıflatmazlar. Böylece oluşan kanal,

katodun anoda doğru yaklaşmasına neden olur. Kanalin anod tarafındaki ucunda alan şiddeti tekrar büyür ve buradan itibaren katoda doğru yayılan yeni bir elektron çığı oluşur. Meydana gelen çığ belirli bir yolu katettikten sonra ikinci bir kanalın oluşması için gerekli koşullar sağlanmış olur. İkinci kanal, ikinci çığın başından birinci kanalın anod ucuna kadar uzanır. Bu durumda her iki elektron çığının kapladığı uzay plazma ile dolar ve katod anoda doğru daha çok yaklaşmış olur. Bu olay çığın başındaki elektronlar anoda varıncaya kadar kendi kendine devam eder.

Sivri uçlu elektrodun pozitif olması halinde, boşalmanın gelişmesi değişik bir karakter gösterir (Şekil 2.3). Bu durumda, ilk elektron çığı anoddan belirli bir uzaklıkta meydana gelir ve elektronlar anoda doğru giderken pozitif iyonlar katoda doğru hareket eden bir kanalın meydana gelmesini kolaylaştırırlar. Birinci çığın pozitif yükleri, alan şiddetinin büyük olduğu bölgeyi içe doğru genişleterek yeni elektron çığlarının oluşmasına neden olurlar. Böylece kanalın sivri uç (anod)'tan itibaren gelişmesi aniden değil de sürekli ve hızlı bir şekilde olduğundan, negatif sivri uç durumuna oranla daha küçük bir gerilim yeterli olur. İletken kanalın sivri ucun kutbiyetine bağlı olarak farklı şekilde oluşmasına rağmen, sonuç değişmez. Plazma ile dolu olan iletken kanal karşı elektroda doğru yaklaşır. İletken kanal elektrodlar arasındaki boşalma yolunu kaplar kaplamaz, elektrodlara uygulanan gerilim de düşer.

Özet olarak bir gaz boşalmasında üç ana safha olduğu söylenebilir: Elektron çığı, kanal boşalması ve ana boşalma. Townsend ve Kanal Delinme Teorileri Şekil 2.4' de kısaca karşılaştırılmıştır. İlk şekil Townsend'e göre katoddan itibaren başlayarak çoğalan elektron çığlarının anoda erişmelerini, ikinci şekil ise Kanal Teorisi'ne göre katoddan başlayan bir tek elektron çığının gelişerek elektrodlar arasında iletken bir kanala dönüşmesini göstermektedir.



Şekil 2.4. Townsend ve Kanal Teorilerinin Karşılaştırılması (Raether'e göre).

2.3. SF_6 da Delinme Mekanizmaları [13]

1970 yılında Pederson elektrodlar arasındaki gazın iletken hale gelebilmesi yani bir kanal oluşabilmesi için

$$\int_0^{x_{kr}} (\alpha - \eta).dx = \ln N_{kr} = k \quad (2.17)$$

koşulunun sağlanması gerektiğini ileri sürmüştür. Burada α elektronun iyonlaştırma katsayısını, η elektronun yakalanma katsayısını, $\bar{\alpha} = \alpha - \eta$ da elektronun bileşke iyonlaşma sayısını göstermektedir. Reather (1964) çığın kanala dönüşebilmesi için kritik yük sayısı N_{kr} nin yaklaşık olarak 10^8 olduğunu savunmuştur. Buna göre denklem (2.17)

$$\int_0^{x_{kr}} (\alpha - \eta).dx = 18,4 \quad (2.18)$$

biçimini almaktadır.

Qureshi (1978) de, denklem (2.17) yi SF_6 için en düşük delinme veya korona başlangıç geriliminin hesaplanmasında kullanmıştır. Ayrıca birçok araştırmacı aynı denklemden yararlanarak $SF_6 + N_2$ gaz karışımında düzgün ve

az düzgün alanlarda en düşük delinme ve korona başlangıç gerilimlerini hesaplama yoluna gitmişlerdir. Denklem (2.17) de x_{kr} kritik çığ uzunluğunu göstermektedir. x_{kr} elektrodlar arasında $\alpha=\eta$ olduğu nokta ile elektrik alanın maksimum olduğu elektrod arasındaki açıklık olarakta alınabilir.

En düşük delinme veya korona başlangıç gerilimini hesaplamada kullanılan denklem (2.17) nin sol tarafındaki integralin hesaplanabilmesi için α ve η nin E nin bir fonksiyonu olmasından dolayı elektrik alan dağılımının bilinmesi gerekmektedir. Nitta, denklem (2.17) ye dayanarak SF_6 gazında büyük elektrod açıklıkları için delinme gerilimini çok kolay bir yolla hesaplamıştır [14]. Bu yöntemde elektrik alan dağılımı gözönüne alınmaksızın sadece α 'nın ve elektrik alanın maksimum ve minimum değerleri arasındaki oranın bilinmesi yeterlidir.

SF_6 nın delinme mekanizmasında da bizi E/p_{kr} değerindeki $\bar{\alpha}=\alpha-\eta$ değeri ilgilendirdiğinden ve bu aralık çok küçük olduğundan $\bar{\alpha}/p$ nin E/p ye göre değişimi lineer olarak kabul edilebilir.

Böylelikle bileşke iyonlaştırma sayısı $\bar{\alpha}=\alpha-\eta$ yı aşağıdaki gibi hesaplamak mümkün olur.

$$\frac{\bar{\alpha}}{p} = \frac{\alpha-\eta}{p} = \beta \left[(E/p) - (E/p_{kr}) \right] \quad (2.19)$$

Denklem (2.19) daki $\bar{\alpha}$ değeri (2.17) de yerine konursa SF_6 da kanal delinme mekanizması

$$\beta \int_0^{x_{kr}} E(x).dx - \beta.p.x_{kr}.(E/p_{kr}) = k \quad (2.20)$$

şeklini alır. Öte yandan düzgün alanda $E(x)$ değeri sabit kaldığından ve ayrıca x_{kr} değeride elektrod açıklığı (a) ya eşit olduğundan düzgün alanda delinme gerilimi denklem

(2.20) den de yararlanarak

$$U_d = E \cdot a = \frac{k}{\beta} + (E/p_{kr}) \cdot p \cdot a \quad (2.21)$$

olarak hesaplanabilir.

Bilindiği gibi düzgün ve az düzgün alanlarda, elektron çıkışının iletken kanala dönüşmesiyle birlikte delinme meydana gelir. Ancak düzgün olmayan alanlarda delinme mekanizması bu şekilde gelişmez. Düzgünsüzlük derecesi büyük olan alanlarda düşük basınçlardan itibaren iletken kanal kararlı korona boşalması oluşturmakta, koronanın kararlı olmasından dolayı da bu bölgedeki delinme gerilimi korona başlangıç gerilimine oranla daha yüksek olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu durumda iletken kanalın ortaya çıkmasıyla birlikte koronanın başladığı söylenebilir.

Düzgün olmayan alan durumunda ise alan şiddeti değişken olduğundan x_{kr} elektrod açıklığının çok küçük bir kesridir. Nitta elektrik alan şiddetini

$$E(x) = \frac{E_{\max}}{(1 + \frac{x}{r})^2} \quad (2.22)$$

olarak hesaplamaktadır. Burada $E_{\max}$ elektrodun ucundaki alan şiddetini, r ise

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2.23)$$

olup r_1 ve r_2 birbirine dik olan iki elektrodun yarıçapını göstermektedir. $E(x_{kr})/p = E/p_{kr}$ olduğundan, denklem (2.23) den yararlanarak

$$x_{kr} = r \left[\sqrt{\frac{E_{max}}{(E/p_{kr}) \cdot p}} - 1 \right] \quad (2.24)$$

elde edilir.

Sonuçda düzgün olmayan alanlarda boşalma başlangıç gerilimi denklem (2.19), (2.21) ve (2.23) den hareketle

$$U_d = (E/p_{kr}) \cdot \eta \cdot p \cdot a \cdot \left[1 + \frac{c}{\sqrt{p \cdot r}} \right] \quad (2.25)$$

olarak hesaplanabilir.

Burada $\eta = E_{ort}/E_{max}$ faydalanma faktörü ve

$$c = \sqrt{\frac{4 \cdot k}{\beta \cdot (E/p_{kr})}}$$

olarak alınmıştır.

SF₆ için düzgün alan durumunda $k=10,5$; $\beta=27 \text{ kV}^{-1}$ ve $E/p_{kr}=877,5 \text{ V(cm.kpa)}^{-1}$ alındığında, $c=1,33 \text{ (kpa.cm)}^{0,5}$ olmaktadır.

Böylelikle düzgün ve düzgün olmayan alanlar için sırayla (2.21) ve (2.25) denklemleri kullanılarak SF₆ gazının yüzey pürüzü bulunmadığı haller için minimum delinme gerilimi hesaplanabilir. Nema, 1982'de kurduğu (2.26) amprik formülü ile SF₆ gazının düzgün alanda delinme gerilimini hesaplamıştır [15].

$$U_{d,SF_6} = 1321 (p \cdot a)^{0,918} \quad (2.26)$$

2.4. SF₆+N₂ Gaz Karışımında Delinme Mekanizmaları

SF₆+N₂ gaz karışımında elektronun bileşke iyonlaştırma katsayısı ($\bar{\alpha}_m$) bilindiği takdirde denklem (2.17) yi kullanarak söz konusu gaz karışımı için delinme mekanizmasını formüle etmek mümkün olur. Malik 1979'da SF₆+N₂ için $\bar{\alpha}_m$ değerinin SF₆ ve N₂ için ayrı ayrı hesap edilebileceğini söylemiştir [13].

N₂ için iyonizasyon katsayısı, A=66 kpa⁻¹.cm⁻¹ ve B=2,15 kV. kpa⁻¹.cm⁻¹ olmak üzere

$$\frac{\alpha}{p} = A \cdot \exp[-B/(E/p)] \quad (2.27)$$

şeklinde hesaplanabilir.

Denklem (2.27) ve (2.19) u birlikte gözönüne alarak SF₆+N₂ gaz karışımı için $\bar{\alpha}_m/p$

$$\frac{\bar{\alpha}_m}{p} = z \cdot \beta \left[(E/p) - (E/p_{kr})' \right] + (1-z) \cdot A \cdot \exp \left[-B/(z/p) \right] \quad (2.28)$$

ifadesini oluşturmak mümkündür. Burada p karışımın toplam basıncını gösterir. $z = p_{SF_6}/p$ dir. Malik $z \geq \%5$ olduğunda $E/p \geq (E/p_{kr})'$ iken $\bar{\alpha}_m/p$ nin (E/p) ye göre lineer olduğunu göstermiştir. Bu nedenle SF₆+N₂ gaz karışımında

$$\frac{\alpha_m}{p} = \beta_m \left[(E/p) - (E/p_{kr})' \right] \quad (2.29)$$

ifadesi yazılabilir. Burada m gaz karışımını simgeler. (E/p_{kr})' ise gaz karışımında kritik çığ uzunluğuna ilişkin alan şiddetinin basınca oranıdır. Malik p_m ve (E/p_{kr})' değerlerini z nin fonksiyonu olarak ele almıştır [13].

Bu aşamada SF₆ da olduğu gibi denklem (2.17) ve (2.29) birlikte gözönüne alınarak delinme gerilimi ifadesi düzgün alan için

$$U_d = \frac{k_m}{\beta_m} + (E/p_{kr})' \cdot p \cdot a \quad (2.30)$$

düzgün olmayan alan için

$$U_d = (E/p_{kr})' \cdot \eta \cdot p \cdot a \left[1 + \frac{c_m}{\sqrt{p \cdot r}} \right] \quad (2.31)$$

olarak hesaplanabilir. Burada

$$c_m = \sqrt{\frac{4k_m}{\beta_m \cdot (E/p_{kr})'}}$$

dir.

Malik'e göre N_2 gazına az miktarda SF_6 eklendiğinde $(E/p_{kr})'$ değeri aniden yükselmektedir. Ancak bu yükselme SF_6 miktarı ile lineer olarak artmamaktadır. Elektronegatif gazlarda ve gaz karışımlarında $(E/p) < (E/p_{kr})'$ olduğunda $\alpha < \eta$ olur ve elektron çıgı büyümmez. $\alpha = \eta$ olduğu an elektron çığının büyümeye başladığı an olarak tesbit edilmiştir. Pratikte elektron çığının büyüyebilmesi için α nın az miktarda da olsa η dan büyük olması gerekir. Bu nedenle $(E/p) = (E/p_{kr})'$ düzgün alanın delinmesi için en düşük alan şiddeti olarak tanımlanır.

Sonuçta delinme geriliminin karışım oranına bağlı olarak değişimini veren karakteristiklerde $\bar{\alpha}_m$ ye bağlı olarak bir doyma olayının söz konusu olduğu söylenebilir.

Malik 1980'de $p \cdot a$ nın 100 kpa.cm den büyük olması hali için $(E/p_{kr})' \cdot p \cdot a$ nın k_m/β_m den çok büyük olduğunu söylemiştir. Bu durumda denklem (2.30) da k_m/β_m ihmal edildiğinde

$$\frac{U_d}{p \cdot a} = (E/p_{kr})'$$

biçimini alacaktır [16].

R.S. Nema (1982) de Malik ve Qurashi'nin SF₆+gaz karışımları için verilen delinme gerilimi ifadelerinden hareket ederek, SF₆ gazının başka gazlarla birlikte oluşturduğu karışımlarına ilişkin delinme gerilimlerinin saf SF₆ kullanılması durumundaki delinme geriliminin belli bir yüzdesi olduğunu iddia etmiş ve hava veya N₂ gazının SF₆ ile oluşturduğu karışımının delinme geriliminin SF₆ nın delinme gerilimine olan oranının

$$\frac{U_{dm}}{U_{SF_6}} = 38,03.N^{0,21} \quad (2.32)$$

olduğunu ispatlamıştır [15]. Burada N gaz karışımındaki SF₆ nın yüzdesini gösterir (Örnek: %20 SF₆+%80 N₂ için N=20).

Denklem (2.26) ve (2.31) den düzgün alanda gaz karışımları için

$$U_{dm} = 502,40(p.a)^{0,915}.N^{0,21} \quad (2.33)$$

denklemini elde edilir.

Burada p.a, kpa.cm cinsinden verildiğinde U_{dm} volt cinsinden bulunur.

Düzgün olmayan alanlar söz konusu olduğunda faydalanma faktörünün bilinmesi gerekir. R.S. Nema

$$\frac{U_{dm \text{ düzgün olmayan alan}}}{U_{dm \text{ düzgün alan}}} = \eta^{0,85} \quad (2.34)$$

ifadesiyle η faydalanma faktörünü tanımlamıştır. Denklem (2.32) ve (2.33) ü göz önüne alarak en genel halde düzgün

ve düzgün olmayan alanlarda SF_6 ya da SF_6+N_2 gaz karışımlarına ilişkin delinme gerilimi ifadesi

$$U_{dm} = 502,40.(p.a)^{0,915}.N^{0,21}.\eta^{0,85} \quad (2.35)$$

olarak verilebilir. Bu denklemde $N=100$ için $U_{dm}=U_{SF_6}$ olur. Öte yandan $\eta=1$ ise U_{dm} düzgün alandaki delinme gerilimini ifade eder.

2.5. SF_6 ve SF_6+N_2 Gaz Karışımında Minimum Delinme Gerilimi

Düzgün olmayan alanda, belirli bir elektrod açıklığı için SF_6 ve SF_6+N_2 gaz karışımlarında $U_d=f(p)$ karakteristiği incelendiğinde, delinme geriliminin belirli bir gaz basıncı için minimum değeri aldığı görülür. Delinme geriliminin minimum değeri ve buna tekabül eden basınç değeri, yalıtkan olarak SF_6 veya SF_6+N_2 kullanan yüksek gerilim aygıtlarının tasarımında oldukça önemlidir.

Sangkasaad (1975), SF_6 nın minimum delinme geriliminin elektrodlar arasındaki alanın düzgünlük derecesi yani elektrod sisteminin η verimi ve p gaz basıncına bağlı olmadığını göstermiş, belirli bir elektrod düzeni için minimum delinme gerilimini elektrod açıklığına bağlı olarak veren aşağıdaki amprik formülü vermiştir [17].

$$U_{dmin} = 30 + 15,6.a^{0,68} \quad (2.36)$$

Burada a cm olarak elektrod açıklığını göstermektedir. Yapılan deneyler, Sangkasaad tarafından ortaya atılan yukarıdaki formülün hemen hemen bütün elektrod sistemleri için 50 Hz alternatif, pozitif kutbiyetli doğru ve darbe gerilimi uygulaması halinde geçerli olduğunu göstermiştir. Negatif kutbiyetli doğru gerilim halinde deney sonuçları hesaplanan değerlerden oldukça farklı olup elektrod açıklığının büyümesiyle de bu fark gittikçe artmaktadır.

Delinme geriliminin minimum değerine tekabül eden $p_{\min}$ gaz basıncında, elektrodlar arasındaki alanın düzgünlük derecesine bağlı olup belirli bir elektrod açıklığı için sabittir. Sangkasaad, SF_6 gazında, çubuk-düzlem elektrod sistemi için, Steinbigler tarafından verilen verim eğrisinden yararlanarak $p_{\min}$ un hesaplanmasında kullanılmak üzere

$$\eta \cdot p_{\min} = 0,35/a + 0,05 \quad (2.37)$$

formülünü vermiştir. Burada η elektrod sisteminin verimini, a elektrod açıklığını göstermektedir.

Bu çalışmada da pozitif doğru ve 50 Hz alternatif gerilimde SF_6 ve SF_6+N_2 gaz karışımlarında delinme geriliminin minimum değerinin (U_{dmin}) elektrod geometrisine ve p gaz basıncına bağlı olmaksızın yaklaşık sabit kaldığı ortaya çıkmıştır.

R.S. Nema (1982) SF_6 gazının başka gazlarla birlikte oluşturduğu karışımlarına ilişkin delinme geriliminin, sadece SF_6 gazı kullanılması durumundaki delinme geriliminin belirli bir yüzdesi olduğunu iddia etmiş ve (2.31) denklemini vermiştir. Bu çalışmada ise (2.31) ve (2.35) denklemleri bir arada gözönüne alınmış ve %100 SF_6 nın yanında değişik oranlardaki SF_6+N_2 gaz karışımları için de minimum delinme gerilimini veren

$$(U_{dmin})_{SF_6+N_2} = (30+15,6 \cdot a^{0,68}) \cdot \frac{38,03(N)^{0,21}}{100} \quad (2.38)$$

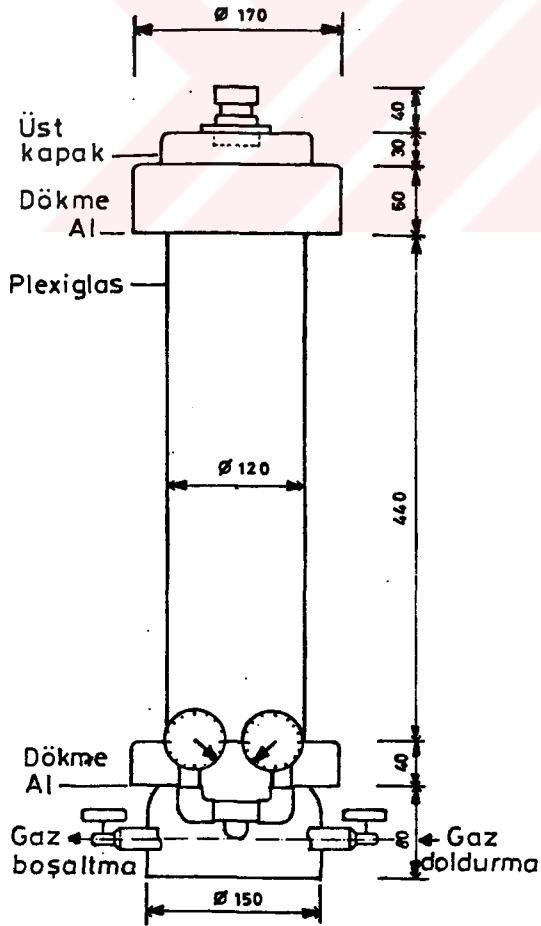
amprik formülü elde edilmiştir. Burada a , cm olarak elektrod açıklığını, N ise gaz karışımındaki SF_6 nın yüzdesini göstermektedir.

BÖLÜM 3

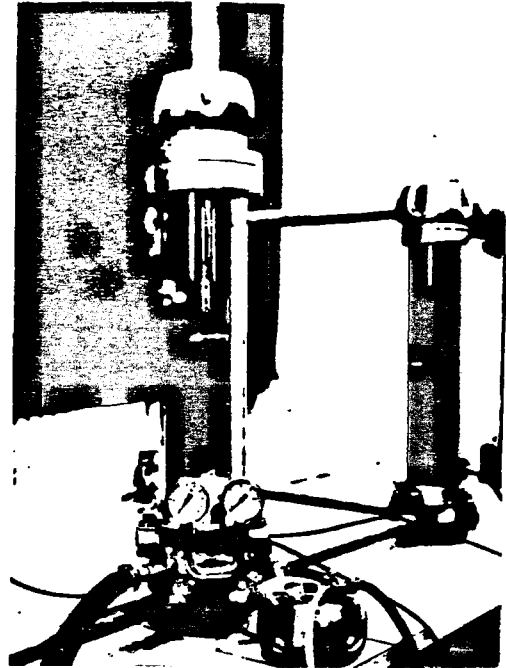
DENEYLERDE KULLANILAN AYGITLAR VE ÖZELLİKLERİ

3.1. Basınç Kabı

Deneylerde, en çok 6 bar basınca dayanabilen plexiglastan yapılmış silindirik bir basınç kabı kullanılmıştır (Şekil 3.1). Kabin iç çapı yaklaşık 120 mm, yüksekliği 650 mm olup üst ve alt kısımları dökme alüminyumdan yapılmıştır. Kabin alt tarafında, gaz doldurma ve boşaltma muslukları ile, gaz ve vakum basıncını ölçmek için iki adet manometre bulunmaktadır. Kabin üst kapağı açılarak, elektrodlar yerleştirilmekte, belirli bir



Şekil 3.1. Basınç kabı.

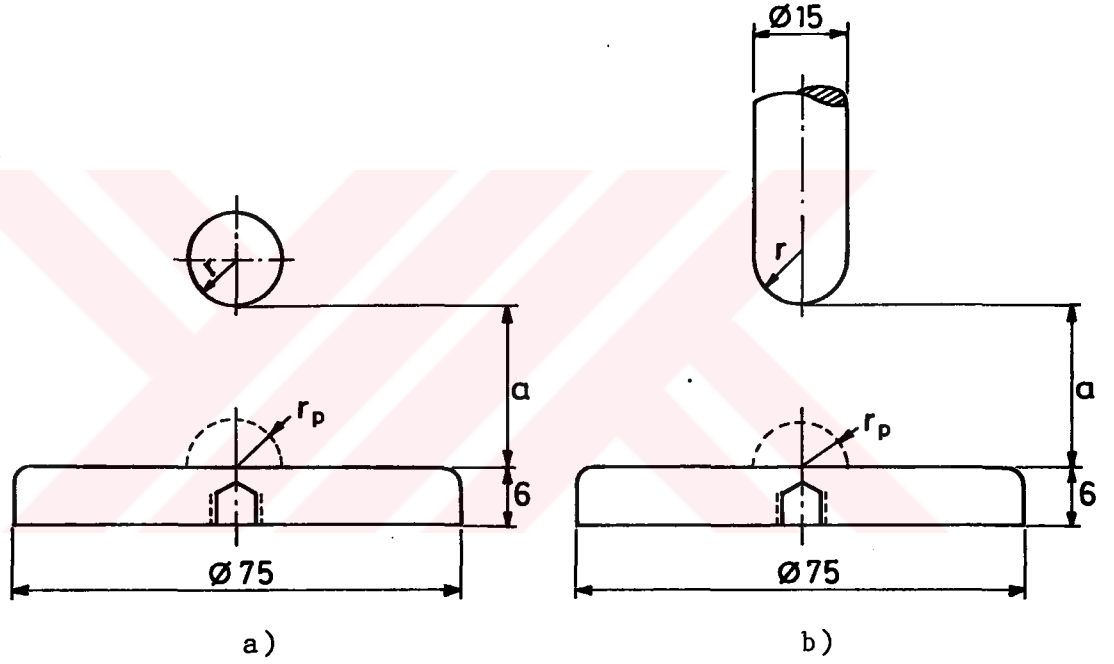


Şekil 3.2. Basınç kabının fotoğrafı.

açıklığa ayarlandıktan sonra kapak tekrar kapatılmaktadır. Deney transformatöründen elde edilen yüksek gerilim, kabın üst kapağına bağlantılı olarak elektroda uygulanmakta, alt taraf ise topraklanmaktadır (Şekil 3.2). Bilhassa yüksek basınçlarda sızdırmazlığı sağlayabilmek için üst kapak bir lâstik conta ile donatılmıştır.

3.2. Elektrod Sistemleri

Deneylerde başlıca iki tip elektrod sistemi kullanılmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3. Elektrod sistemleri.

- a) Küre-düzlem elektrod sistemi
- b) Çubuk-düzlem elektrod sistemi
- r_p : pürüz yarıçapı.

3.2.1. Küre-düzlem Elektrod Sistemi

Bu elektrod düzeni, sabit elektrod açıklığında küre elektrodun yarıçapını değiştirerek, çeşitli düzgünsüzlük derecelerinde alan dağılımları elde etmek için kullanılmıştır.

Deneylerde yarıçapı 2 ve 4 mm olan küre elektrodlarla, 75 mm çapında kenarları yuvarlatılmış düzlem elektrod kullanılmıştır. Elektrodlar pirinçten yapılmış,

üzerleri ise krom kaplanmıştır. Deney süresince elektrod açıklığı 20 mm alınmıştır.

3.2.2. Çubuk-düzlem Elektrod Sistemi

Küre-düzlem elektrod sisteminde, kürenin yarıçapı 2 mm ve 4 mm seçilerek, az düzgün ve düzgün olmayan alanlar elde edilmiştir. Alanın düzgünsüzlük derecesini yeteri kadar büyütmek amacıyla eğrilik yarıçapı 1 mm olan çubuk elektrodla, 75 mm çapında kenarları yuvarlatılmış düzlem elektrod kullanılmıştır. Elektrodlar pirinçten yapılmış, üzerleri ise krom kaplanmıştır. Deney süresince elektrod açıklığı 20 mm alınmıştır.

3.3. Elektrod Yüzey Pürüzleri

Elektrod yüzey pürüzlülüğünün, delinme ve korona başlangıç gerilimlerine, etkisini inceleyebilmek için, yüksekliği 6 mm ve 3 mm olan iki adet iletken yarım küre seçilmiştir. Bu yarım küreler Şekil 3.3'deki elektrod sistemlerinde düzlem elektrod üzerine konarak, deneyler SF_6 ve SF_6+N_2 gaz karışımlarında yapılmıştır. Deneylerde kullanılan yarım küreler çelikten olup, çapları, 6 mm ($r_p=3$ mm) ve 12 mm ($r_p=6$ mm) olan bilyeleri ortadan kesmek suretiyle elde edilmiştir.

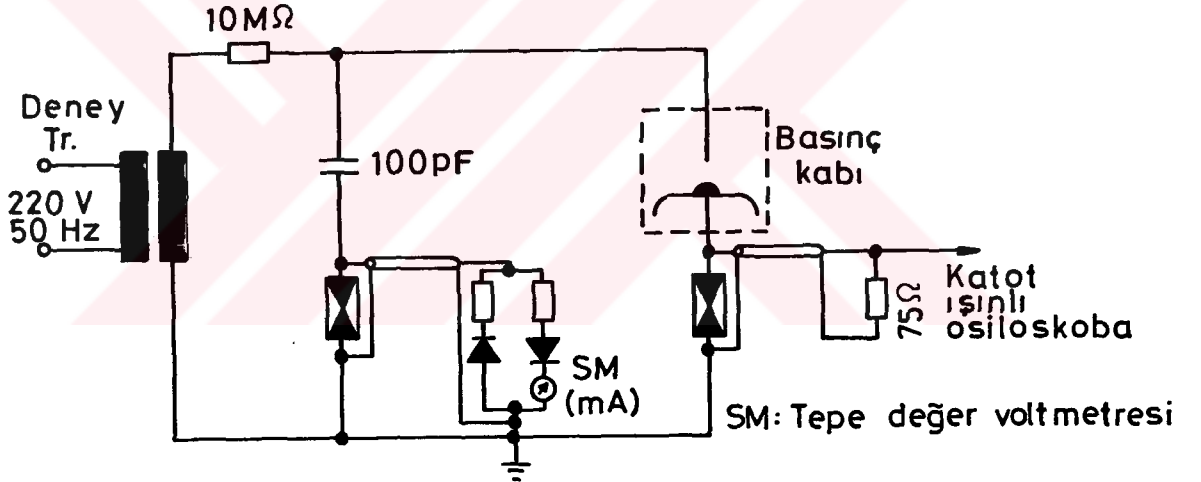
3.4. Deneylerin Yapılışı

3.4.1. Alternatif Gerilimin Elde Edilmesi ve Ölçülmesi

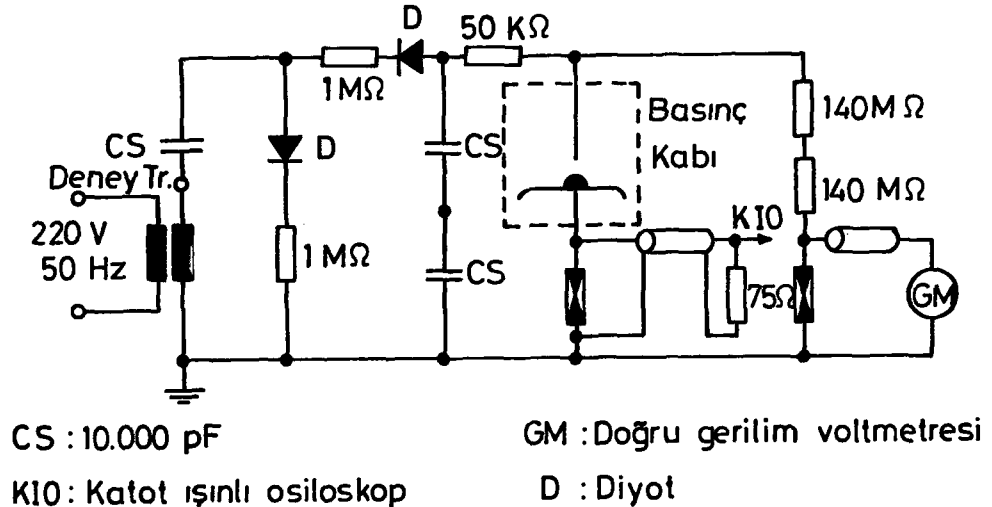
Primer tarafı ayarlanabilen 0,22/100 kV, 10 kVA'lık MWB deney transformatörünün sekonder tarafından elde edilen 50 Hz frekanslı sinüsoidal gerilim sabit yükselme hızıyla elektrodalara uygulanmıştır. Delinme anındaki arkı sınırlamak ve elektrod yüzeylerinin aşınmasına engel olmak amacıyla elektrod sistemi ile transformatör arasına 10 M Ω 'luk bir ön direnç bağlanmıştır. Delinmeden sonra termik-manyetik bir anahtar yardımıyla transformatör primer devresi süratle açılmıştır. Elektrodalara uygulanan alternatif gerilimin tepe değeri Chubb ve Fortescue yöntemi

ile maksimum %2 hata ile ölçülmüştür [18],[19],[20]. Deneylerde, korona başlangıç gerilimi yeterli duyarlılıkta bir osiloskop yardımıyla tayin edilmiştir. Bunun için, düzlem elektrod ile toprak arasına 75Ω 'luk bir direnç bağlanmıştır. Korona başlangıç geriliminde korona darbe akımının dirençte meydana getirdiği gerilim düşümü Tektronix 7623A hafızalı osiloskop yardımıyla ölçülmüştür (Şekil 3.4). Korona başlangıç ve delinme gerilimleri MWB firmasının SM615 tepe değer voltmetresinden okunmuştur [18],[19],[20].

Diğer taraftan şebeke gerilimi günboyu değiştiğinden, kumanda masası ve deney transformatörünün primeri 220 V, 3,5 kVA anma değerinde servomotorlu bir gerilim



Şekil 3.4. Alternatif gerilim deney devresi.



Şekil 3.5. Doğru gerilim deney devresi.

regülatörü üzerinden beslenmiştir. Yapılan ölçmelerde, deney süresince frekansın $50 \text{ Hz} \pm \%1$ gerilimin ise $220 \text{ V} \pm \%5$ aralığında değıştikleri saptanmıştır.

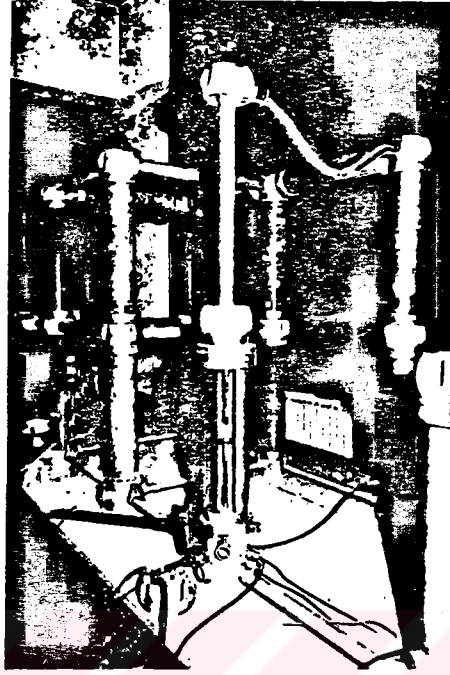
3.4.2. Doğru Gerilimin Elde Edilmesi ve Ölçülmesi

0,22/100 kV, 5 kVA'lık deney transformatöründen elde edilen yüksek gerilim doğrultulduktan sonra bir gerilim yükseltici devre ile iki katına çıkartılır. Bu şekilde elde edilen doğru gerilim $50 \text{ k}\Omega$ 'luk bir akım sınırlayıcı direnç üzerinden, sıfırdan başlayarak yaklaşık 5 kV/s sabit yükselme hızıyla delinme meydana gelinceye kadar elektrod sistemine uygulanır (Şekil 3.5). Sabit yükselme hızı, servomotor tahrikli ve çıkış gerilimi 0-250V arasında ayarlanabilen 2 kVA gücünde Ünal Kardeş firması yapımı bir varyak kullanılarak elde edilmiştir. Alternatif gerilimde olduğu gibi burada da, delinmeden hemen sonra primer devresi süratle hemen açılmış, böylece elektrodların zedelenme ve tahrip olmalarına fırsat verilmiştir.

Deney kabına uygulanan gerilim $280 \text{ M}\Omega$ 'luk hassas bir dirence seri bağlı bir miliampermetre yardımıyla ölçülmüştür [18],[19],[20].

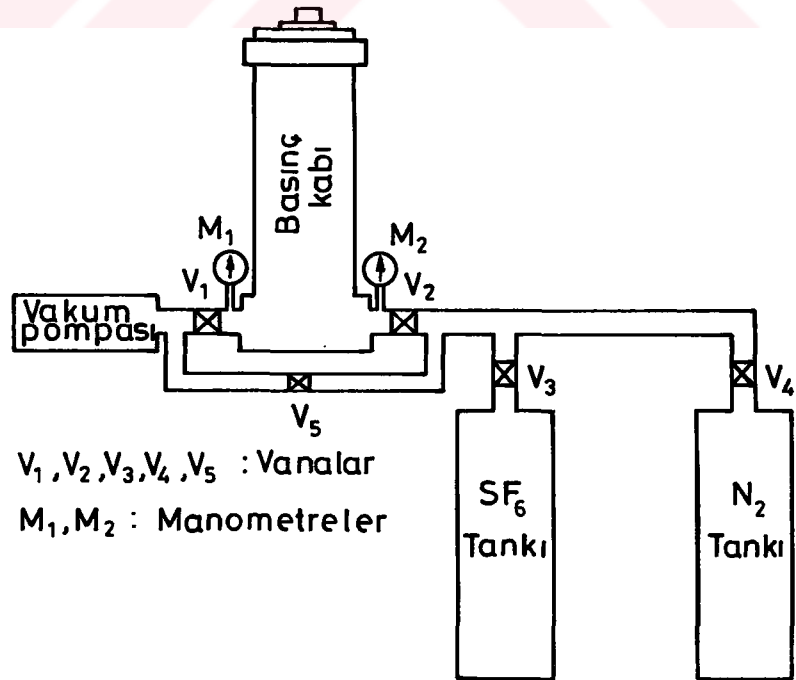
MWB firmasının GM 700 tipi ölçü aleti kullanılarak, her iki kutbiyette 280 kV 'a kadar doğru gerilimlerin $\pm \%1,5$ hatayla ölçülmesi mümkün olmuştur. Voltmetre şebekeden bağımsız olup, deney sırasında meydana gelebilecek aşırı gerilimlere karşı 600 V 'luk parafudr ile korunmuştur.

Korona başlangıç gerilimi, alternatif gerilimde olduğu gibi ölçülmüştür. Şekil 3.6, 280 kV 'luk doğru gerilim deney devresinin fotoğrafını göstermektedir.



Şekil 3.6. Doğru gerilim deney devresinin fotoğrafı.

3.4.3. Gaz ve Gaz Karışımlarının Doldurulması ve Basıncın Ölçülmesi



Şekil 3.7. Gaz doldurma-boşaltma ve basınç ölçme sistemi şeması.

Deneylere başlamadan önce, elektrotlar temizlenerek kaol ile parlatılmış, daha sonra etil alkol ile yıkanmıştır. Elektrodlar deney kabına yerleştirildikten sonra, basınç kabının kapağı sıkıca kapatılmış ve Leybold-Heraus marka S 4A tipi bir vakum pompasıyla içerideki hava boşaltılmıştır. Yaklaşık 10^{-2} Torr basınçta 20 dakika kadar vakum yapılmıştır. Daha sonra, deney kabı 4 bar basınçta SF_6 veya N_2 ile doldurulmuş, gazın kararlı hale gelmesi için dolum yapıldıktan yaklaşık altı saat sonra deneylere başlanmıştır. Gaz karışımlarında ise, basınç kabı yaklaşık 10^{-2} Torr basınçta 20 dakika kadar vakum yapıldıktan sonra, ilk önce kısmi basıncı düşük olan gaz kabın içine konulmuş, daha sonra ikinci gaz, istenilen toplam basınca ulaşana kadar kaba eklenmiştir [6]. Örnek olarak %20 SF_6 +%80 N_2 gaz karışımında, toplam basıncın 4 bar olması şartıyla, ilk önce 0,8 bar SF_6 gazı kaba konulmuş, daha sonra 3,2 bar N_2 gazı kabın içine ilave edilmiştir. Deneylerde Türkiye Elektrik Kurumu tarafından temin edilen ticarî saflıkta SF_6 gazı ve ayrıca HABAŞ A.Ş. tarafından temin edilen N_2 gazı kullanılmıştır. Çalışmanın yürütüldüğü laboratuarda ortam sıcaklığının 11 ile 17 °C arasında değiştiği gözlenmiştir. Gaz basıncı, deney kabının alt kısmında bulunan 6 barlık analog bir manometre ile $\pm 0,05$ bar hatayla ve atmosfer üzeri basınç olarak ölçülmüştür.

3.4.4. Deney Yöntemi

Elektrodlar yerleştirildikten sonra, deneylere başlamadan önce elektrod yüzeyini alıştırmak amacıyla minimum altı adet delinme uygulanmıştır. Yapılan araştırmalar, basınçlı SF_6 veya SF_6+N_2 gaz karışımlarında yüksek bir delinme dayanımı elde edebilmek için elektrod yüzeylerinin belirli sayıda ön deşarj yapılarak alıştırılmasının zorunlu olduğunu ortaya koymuştur.

Belirli bir (pa) değeri için kararlı bir delinme gerilimine erişildikten sonra esas deneylere başlanmıştır. Elektrodlara uygulanan gerilim, sıfırdan başlayarak

saniyede yaklaşık 5 kV'luk bir yükselme hızıyla delinme olana kadar arttırılmıştır. Osiloskobun yatay süpürme devresinin ilk korona akımı darbesi ile tetiklendiği anda voltmetreden korona başlangıç gerilimi okunmuş, gerilim yükseltilmeye devam edilerek benzer şekilde delinme gerilimide ölçülmüş ve her iki değer kaydedilmiştir. Belirli bir elektrod açıklığı için kritik basınçtan daha büyük basınçlarda korona olmaksızın delinme meydana geldiğinden bu bölgede yalnız delinme gerilimi okunmuştur. Deneyler yüksek basınçtan alçak basınca doğru, korona başlangıç geriliminin delinme gerilimiyle çakıştığı bölgede basınç 0,5 bar aralıklarla düşürülerek tekrarlanmıştır. Kritik basıncın altında, özellikle kararlı korona boşalması bölgesinde basınç 0,2 bar aralıklarla düşürülmüştür. Her iki deney arasında 1 dakika beklenmiş, sabit basınçta her noktada için deney on kere tekrarlanarak, aritmetik ortalaması alınmıştır.

Belirli bir elektrod açıklığı ve gaz basıncında ölçmeler yapıldıktan sonra kabın basıncı düşürülerek diğer basınç noktası için deney tekrarlanmıştır. Gaz karışımlarını basınç kabına doldurmak amacıyla bir kapalı-devre sistemi geliştirilmiştir. Bu sistem ile, her iki gaz ayrı ayrı deney kabına konulabilmektedir.

BÖLÜM 4

DENEY SONUÇLARI

4.1. Doğru Gerilim

Gerilimin kutbiyetinin, korona başlangıç ve delinme gerilimlerini ne şekilde etkilediğini bulabilmek için tüm deneyler negatif ve pozitif doğru gerilimlerde yapılmıştır. Yapılan deneyler sonunda, düzgün olmayan alanda $U_d=f(p)$ eğrisinin eğiminin belirli basınç aralıklarında işaret değiştirdiği, "kritik basınç" adı verilen belirli bir basınca kadar delinmeden önce daima korona deşarjının söz konusu olduğu, kritik basınçtan daha yüksek basınçlarda korona olmaksızın delinme meydana geldiği gözlenmiştir. Ayrıca kritik basıncın altındaki basınçlarda $U_d=f(p)$ eğrisinin bir maksimum-minimum davranışında bulunduğu, kritik basıncın üstündeki basınç değerlerinde ise delinme geriliminin basınçla orantılı olarak arttığı gözlenmiştir. Korona başlangıç gerilimi ise hemen hemen tüm basınç aralığında, basınçla orantılı olarak yükselmektedir. Delinme eğrileri incelendiğinde, alçak basınçlardan itibaren delinme geriliminin belirli bir değere kadar basınçla birlikte yükseldiği bir maksimumdan geçtikten sonra azalarak p_{min} basıncında U_{dmin} değerini aldığı, p_{min} 'un üzerindeki basınçlarda ise delinme geriliminin tekrar basınçla birlikte arttığı görülmektedir.

Doğru gerilimde her iki kutbiyette değişik elektrod sistemleri için çıkarılan $U_o=f(p)$ ve $U_d=f(p)$ eğrileri karşılaştırıldığında, alanın düzgünsüzlük derecesinin yeteri kadar büyük olması halinde p_{kr} , p_{max} ve p_{min} basınçlarının kutbiyete büyük ölçüde bağlı olduğunu görmek mümkündür. Bu eğrilerden hareketle genel olarak kritik basıncın negatif kutbiyetde pozitif kutbiyete göre

daha yüksek olduğu söylenebilir. Ayrıca negatif kutbiyette pozitif kutbiyettekine benzer olarak bir maksimum-minimum davranışının var olduğu ancak delinme geriliminin maksimumdan geçtiği p_{max} basıncının pozitif kutbiyettekine oranla daha yüksek olduğu tesbit edilmiştir.

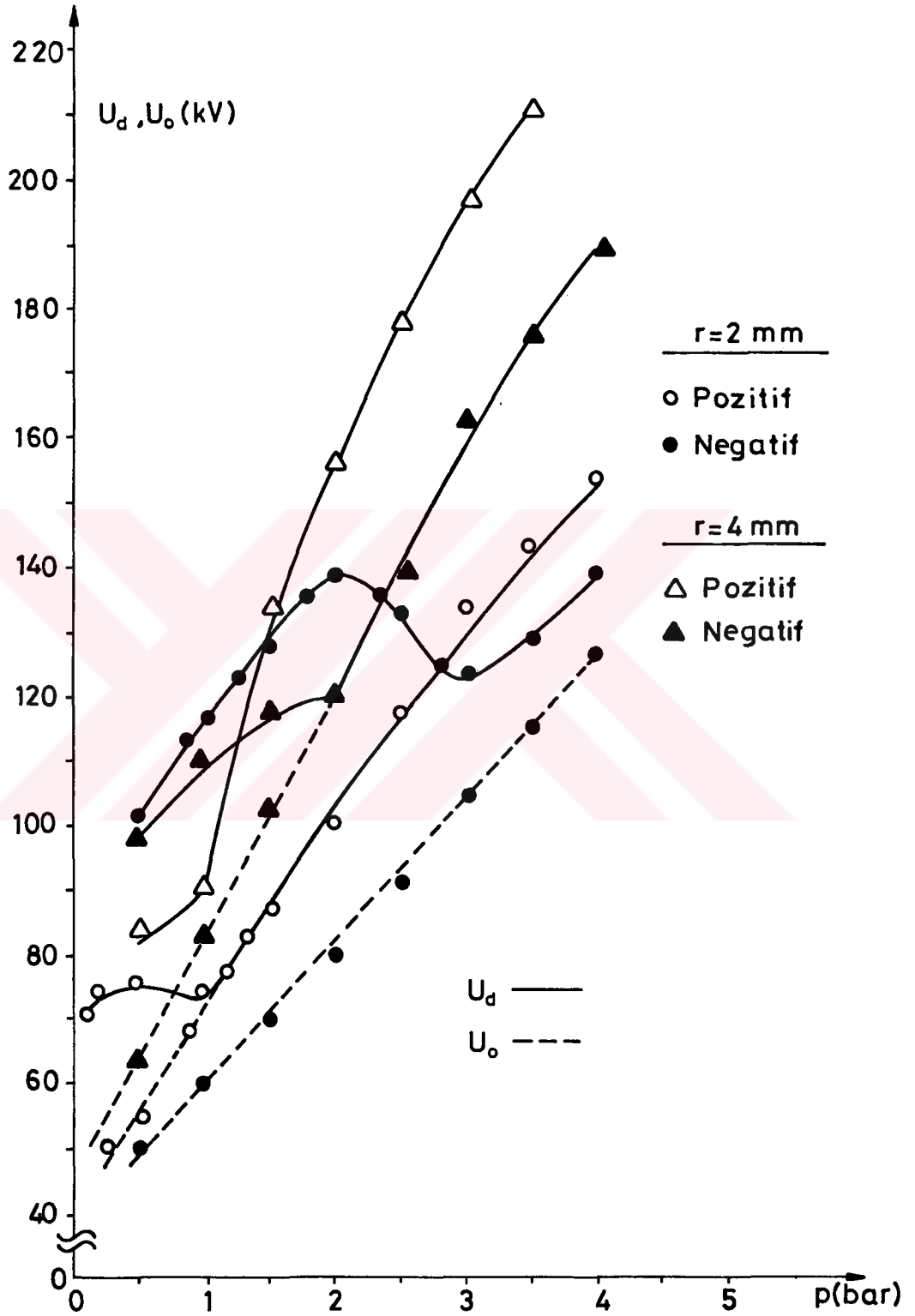
4.1.1. Sıkıştırılmış SF_6 Gazında, Küre-Düzlem ve Çubuk-Düzlem Elektrod Sistemlerinde, Gerilimin Kutbiyetinin Korona Başlangıç ve Delinme Gerilimlerine Etkisi

Şekil 4.1'den de görülebileceği gibi negatif kutbiyette delinme geriliminin maksimumdan geçtiği p_{max} basıncı pozitif kutbiyettekine oranla daha yüksektir. Örneğin 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sistemi için 20 mm elektrod açıklığında pozitif kutbiyet durumunda $p_{max}(+)=0,5$ bar, negatif kutbiyet durumu içinse $p_{max}(-)=2$ bar'dır. Negatif kutbiyetde düzgünsüzlük derecesi büyük olan alanlarda (0+4) bar basınç aralığında $U_d > U_o$ olduğundan, kritik basıncın 4 bardan büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Aynı elektrod düzeninde kürenin yarıçapı 4 mm alındığında yaklaşık olarak $p_{kr}(-)=2$ bar değeri elde edilmektedir.

Şekil 4.1'deki eğriler incelendiğinde, korona başlangıç geriliminin negatif kutbiyetde, pozitif kutbiyete göre daha düşük olduğu görülebilir. Küre elektrodunun yarıçapı büyütüldüğünde başka bir deyişle alanın düzgünsüzlük derecesi azaltıldığında, korona başlangıç geriliminin delinme gerilimine doğru yaklaştığı gözlenir.

Kutbiyetin delinme gerilimine etkisi ise korona başlangıç gerilimine olan etkisinden daha farklıdır. Genel olarak az düzgün alanlarda pozitif doğru delinme geriliminin negatif doğru delinme geriliminden daha büyük olduğu söylenebilir.

Yapılan deneyler iki kutbiyet arasında ortaya çıkan bu farkın alan düzgünsüzlüğüne ve ayrıca basınca bağlı



Şekil 4.1. Küre-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 gazında, pürüzsüz elektrod durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

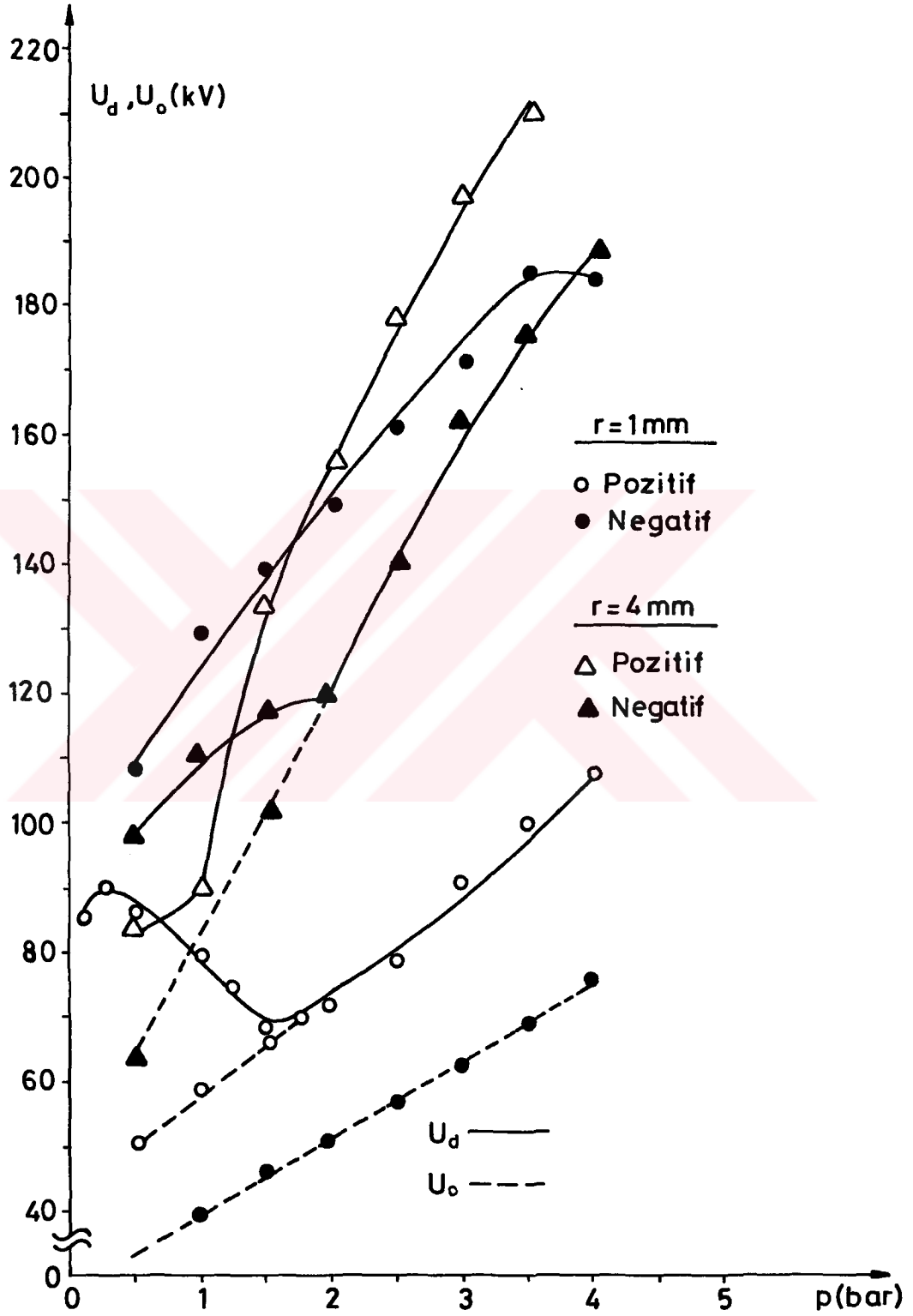
olduğunu göstermiştir. Kürenin yarıçapı küçüldükçe pozitif doğru gerilimler ile negatif doğru gerilimleri arasındaki farkın basınca bağlı olarak değiştiği saptanmıştır (Şekil 4.1). Bunun sonucunda yüksek basınçlarda pozitif doğru gerilimin, negatif doğru gerilimden büyük olduğu, düşük basınçlarda ise bunun tersinin ortaya çıktığı gözlenmiştir. Örneğin, küre elektrodunun yarıçapı $r=4$ mm olan sistemde $p=1,2$ bar'ın altındaki basınçlarda $U_d(+)<U_d(-)$, ve bu basıncın üstünde $U_d(+)>U_d(-)$ olduğu, küre yarıçapı $r=2$ mm olan sistemde ise yaklaşık $p=2,8$ bar'ın altındaki basınçlarda $U_d(+)<U_d(-)$ ve bu basıncın üstünde ise $U_d(+)>U_d(-)$ olduğu görülmektedir.

Düzensizlik derecesi büyük olan elektrod sistemlerinde, kararlı korona bölgesinde, delinme geriliminin korona başlangıç geriliminden büyük olması, yarıçapı küçük olan elektrodun etrafında uzay yüklerinin ortaya çıkmasıyla açıklanabilir.

Works, Dakin ve diğer araştırmacılar, delinme gerilimindeki artışı eğrilik yarıçapı küçük olan elektrodun kutbiyetinin negatif olması halinde elektron çıkışının arkasında kalan pozitif yüklerin dış elektrik alanını anod doğrultusunda zayıflattıkları, dolayısı ile de elektrod- lar arasındaki yalıtkanın delinebilmesi için gerilimin yükseltilmesi gerektiği şeklinde açıklamışlardır [21], [22],[23].

Berg ve Works (1955) düzgün olmayan alanda, uzay yüklerinin SF_6 nın doğru ve alternatif delinme geriliminin önemli ölçüde artmasına neden olduklarını, darbe geriliminde ise $1,5 \mu s$ 'lik sürenin uzay yüklerinin oluşması için yeterli olmadığını kanıtlamışlardır.

Küre elektrodunun kutbiyetinin negatif olması halinde, pozitif kutbiyete oranla daha geniş bir basınç aralığında kararlı korona deşarjına sahip olduğu gözlenmiştir.



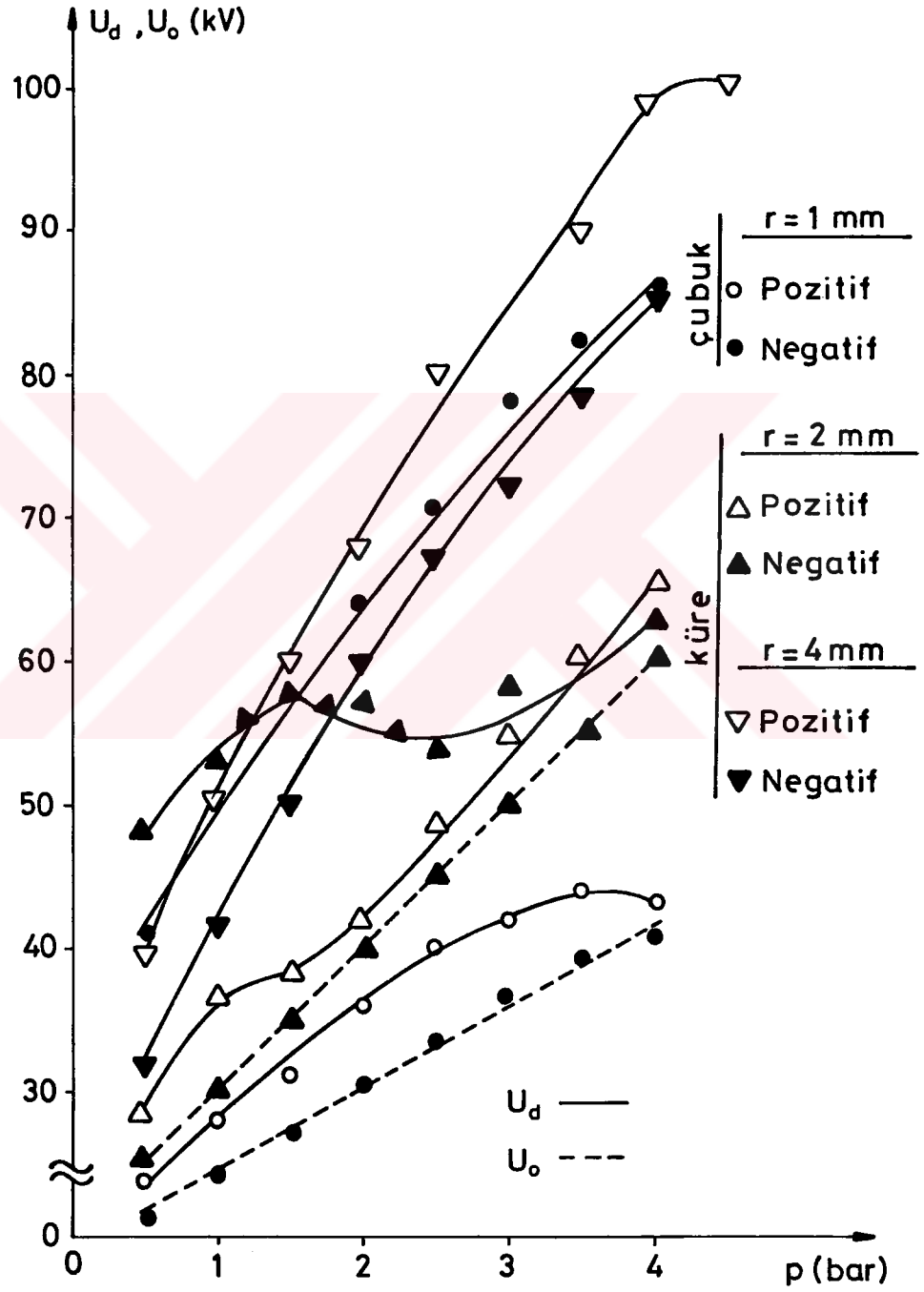
Şekil 4.2. Küre-düzlem ve çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde, SF_6 gazında, pürüzsüz elektrod durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

Bu durum küre elektrodun ucunda oluşan uzay yüklerinin neden olduğu delinme öncesi akımlarıyla açıklanabilir. Çeşitli basınçlarda elde edilen delinme öncesi akımlarının osilogramlarından, kritik basıncın altındaki bölgede söz konusu olan delinme öncesi akımının genliğinin, pozitif kutbiyetde negatif kutbiyete oranla daha büyük olduğu sonucu ortaya çıkmaktadır [8].

Eğrilik yarıçapı 1 mm olan çubuk-düzlem elektrod sisteminde (0+4) bar basınç aralığında pozitif doğru geriliminin negatif doğru gerilimine oranla daha düşük olduğu saptanmıştır (Şekil 4.2). Düzgün olmayan alanda karşımıza çıkan bu durum çubuk elektrodun bir sivri uç gibi davrandığı gerçeğini ortaya koymaktadır [8]. Ayrıca negatif doğru gerilimde korona başlangıç gerilimi delinme geriliminin çok altında olduğu ve korona kararlı bölgesinin pozitif doğru gerilimine göre daha geniş olduğu gözlenmiştir. Söz konusu elektrod sisteminde çubuk elektrodun bir sivri uç gibi davranmasıyla, pozitif doğru gerilimde $U_d=f(p)$ eğrisinin, düşük basınçlarda maksimum ve minimum değerler almasına sebep olduğu saptanmıştır. Örneğin $r=1$ mm çubuk-düzlem elektrod sistemi için $p_{max}=0,2$ bar, $p_{min}=1,5$ bar ve $p_{kr}=1,75$ bar bulunmuştur. Deneyler sırasında karşılaştığımız bu durumu sivri uç-düzlem elektrod sistemlerinde kanal deşarj teorisi ile açıklamak mümkündür [8].

4.1.2. Sıkıştırılmış N_2 Gazında, Küre-Düzlem ve Çubuk-Düzlem Elektrod Sistemlerinde, Gerilimin Kutbiyetinin Korona Başlangıç ve Delinme Gerilimlerine Etkisi

Şekil 4.3'de çizilen eğrilere bakılacak olursa SF_6 gazında olduğu gibi, negatif kutbiyette korona başlangıç geriliminin pozitif kutbiyete oranla daha düşük olduğu görülür. Ayrıca negatif doğru gerilimde küre elektrodun yarıçapı büyüdükçe başka bir deyişle alanın düzgünsüzlük derecesi azaldıkça korona başlangıç geriliminin delinme gerilimi ile çakıştığını görmek de mümkündür.



Şekil 4.3. Küre-düzlem ve çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde, N_2 gazında, pürüzsüz elektrod durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

Öte yandan N_2 gazında söz konusu elektrod sistemlerinde pozitif doğru gerilimde korona olmaksızın delinme meydana geldiği ve $r=1$ mm çubuk-düzlem elektrod sisteminde ise aynı kutbiyet için $U_o \approx U_d$ olduğu saptanmıştır. Buna bağlı olarak, pozitif kutbiyette alanın düzgünsüzlük derecesinin artmasıyla birlikte korona olayının ortaya çıkacağı sonucuna varılmıştır.

Pozitif kutbiyette, negatif kutbiyete oranla yüksek basınç için $U_d=f(p)$ eğrisinin eğiminin azaldığı gözlenmiştir. Ayrıca alanın düzgünsüzlük derecesi arttıkça belli bir basınç değerinden sonra gerilimin hemen hemen sabit kaldığı saptanmıştır. Örneğin $r=1$ mm çubuk-düzlem elektrod sisteminde (3,5÷4) bar basınç aralığında $U_d(+)$ gerilimi sabit kalmıştır.

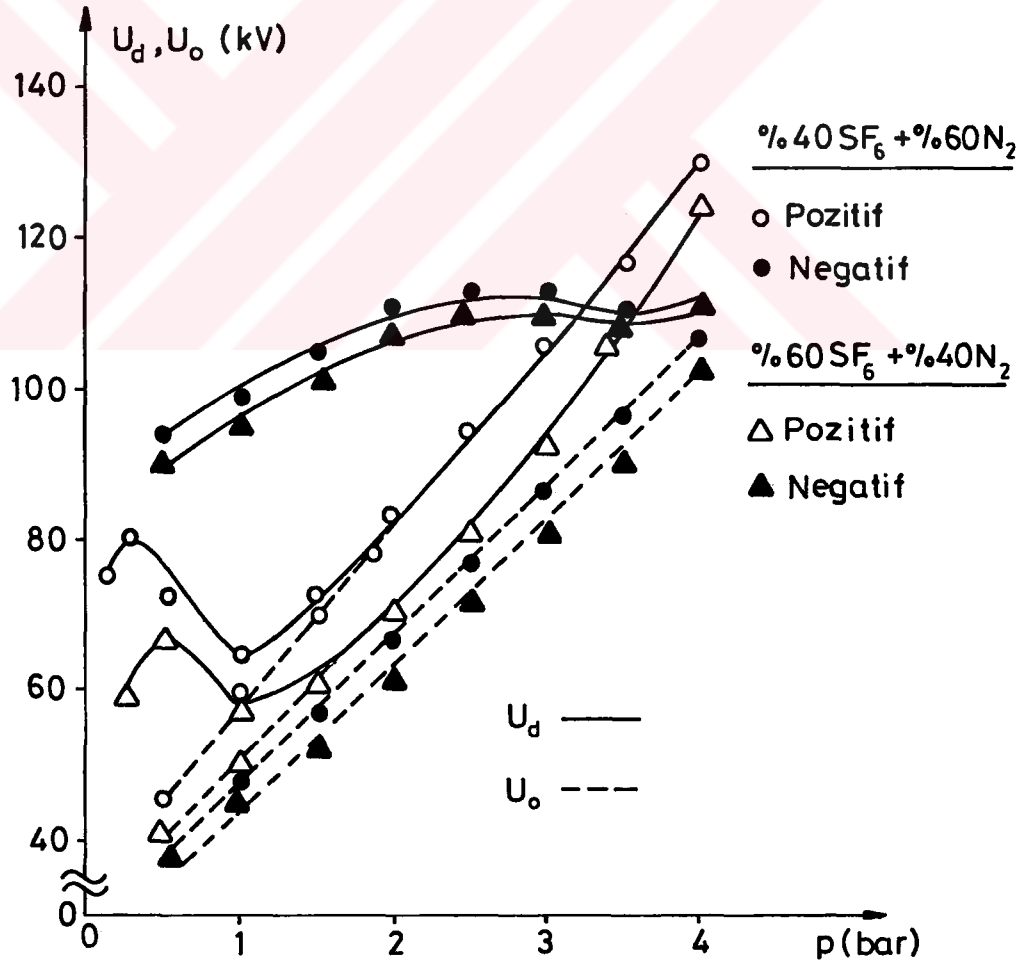
Kutbiyetin delinme gerilimine etkisi, korona başlangıç gerilimine etkisinden daha değişik olmaktadır. Genel olarak alanın düzgünsüzlük derecesi azaldıkça pozitif doğru gerilimdeki delinme gerilimi negatif doğru gerilime göre daha yüksektir. Bu farklılığın basınçla değiştiği Şekil 4.3'de görülmektedir. Nitekim düşük basınçlarda alanın düzgünsüzlük derecesi arttıkça pozitif delinme gerilimi negatif delinme geriliminin altına düşmektedir. Bu durum, SF_6 da olduğu gibi küre elektrodunun ucunda oluşan uzay yüklerinin neden olduğu delinme öncesi akımlarıyla açıklanabilir.

Öte yandan eğrilik yarıçapı 1 mm olan çubuk-düzlem elektrod sisteminde (0÷4) bar basınç aralığında pozitif doğru geriliminin negatif doğru gerilimden çok düşük olduğu da gözlenmiştir (Şekil 4.3). Düzgün olmayan alanda karşılaştığımız bu durum ise çubuk elektrodun bir sivri uç gibi davranmasıyla açıklanabilir. Ayrıca negatif doğru gerilimde korona başlangıç geriliminin delinme geriliminin çok altında olduğu da ortaya çıkmıştır. Bu durum negatif doğru gerilimin pozitif doğru gerilime göre daha geniş bir kararlı korona bölgesine sahip olduğunu

göstermektedir. Karşılaşılan söz konusu durumu sivri uç-
düzlem elektrod sistemlerinde kanal boşalma teorisine gö-
re açıklamak mümkündür.

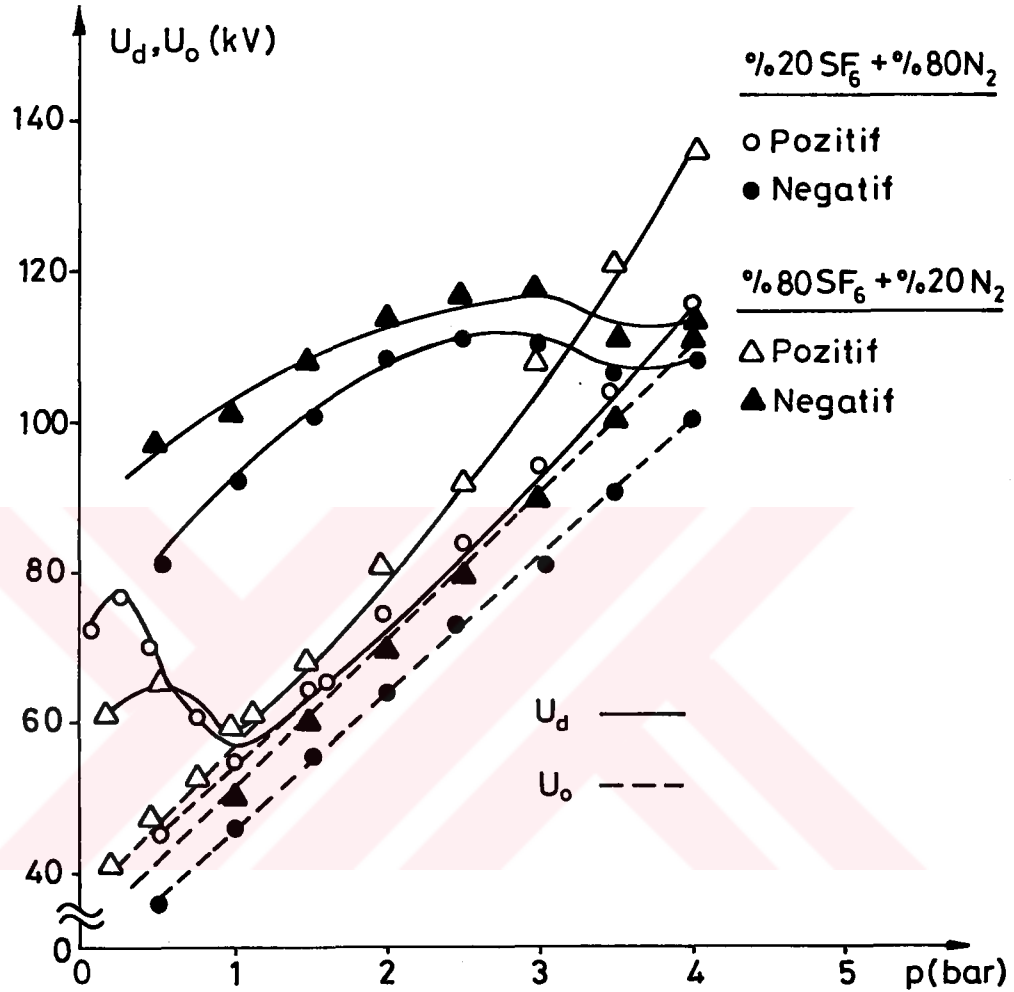
4.1.3. Sıkıştırılmış SF_6+N_2 Gaz Karışımında, Küre-Düzlem
ve Çubuk-Düzlem Elektrod Sistemlerinde, Gerilimin
Kutbiyetinin Korona Başlangıç ve Delinme Gerilim-
lerine Etkisi

Şekil 4.4'den de görülebileceği gibi negatif kut-
biyetde delinme geriliminin maksimumdan geçtiği p_{max} ba-
sıncı pozitif kutbiyettekine oranla daha yüksektir. Ör-
neğin 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde
%40 SF_6 +%60 N_2 gaz karışımında pozitif kutbiyet için



Şekil 4.4. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, doğru gerilimde, delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

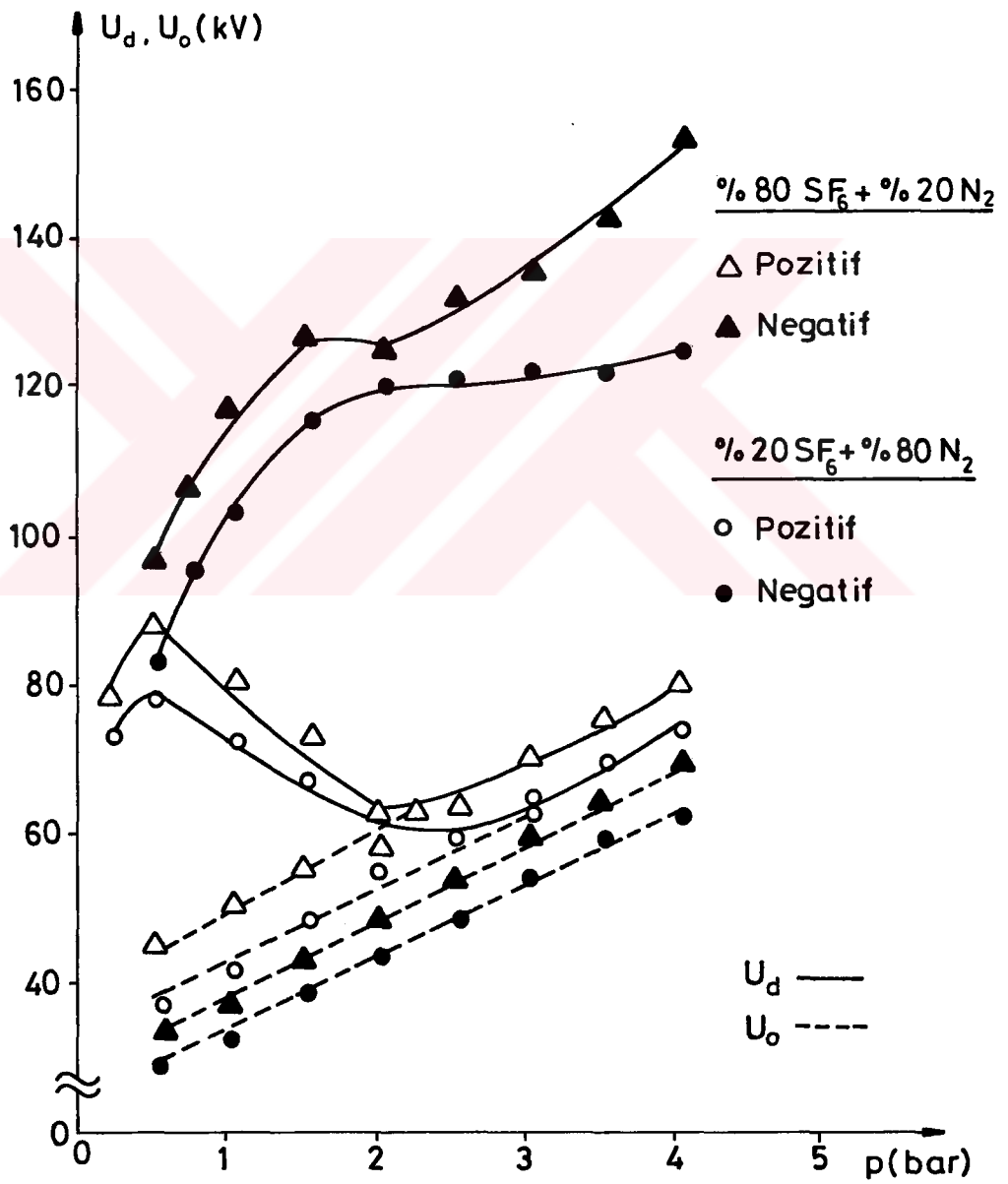
$p_{\max}(+)=0,2$ bar, negatif kutbiyet içinse $p_{\max}(-)=3$ bar değerleri elde edilmiştir.



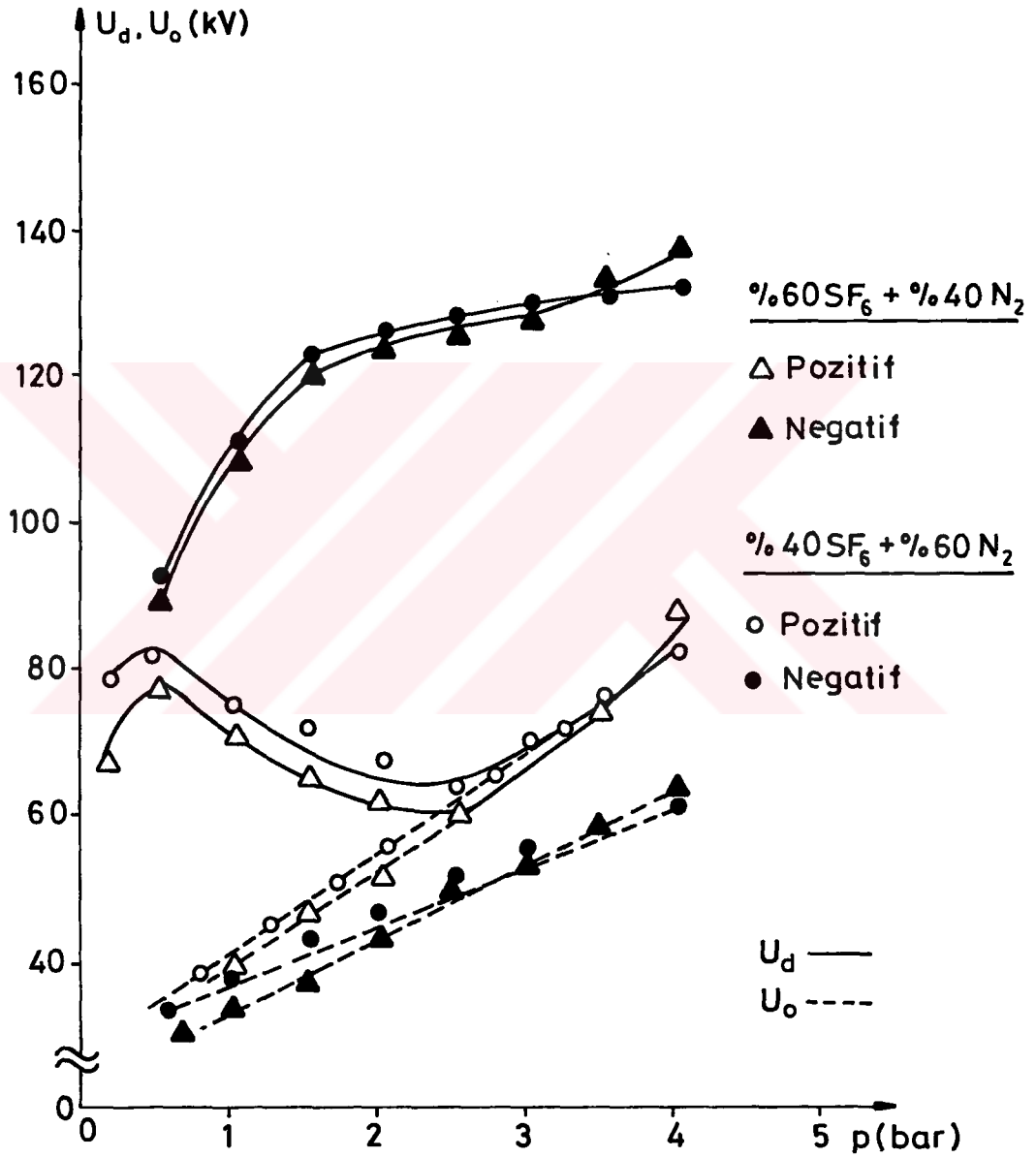
Şekil 4.5. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF₆+N₂ gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, doğru gerilimde, delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

Pozitif doğru gerilimlerde yapılan deneyler sonucunda genel olarak $p_{\max}$ değerinin SF₆ gazının yüzdesi ile orantılı olduğu, bu yüzdenin artmasıyla birlikte $p_{\max}$ ın da yükseldiği görülmektedir (Şekil 4.4, Şekil 4.5).

Negatif kutbiyetde, düzgünlük derecesi büyük olan alanlarda (0+4) bar basınç aralığında $U_d > U_o$ olduğundan kritik basıncın 4 bardan büyük olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.6, Şekil 4.7).



Şekil 4.6. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod $^{6}N_2$ durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

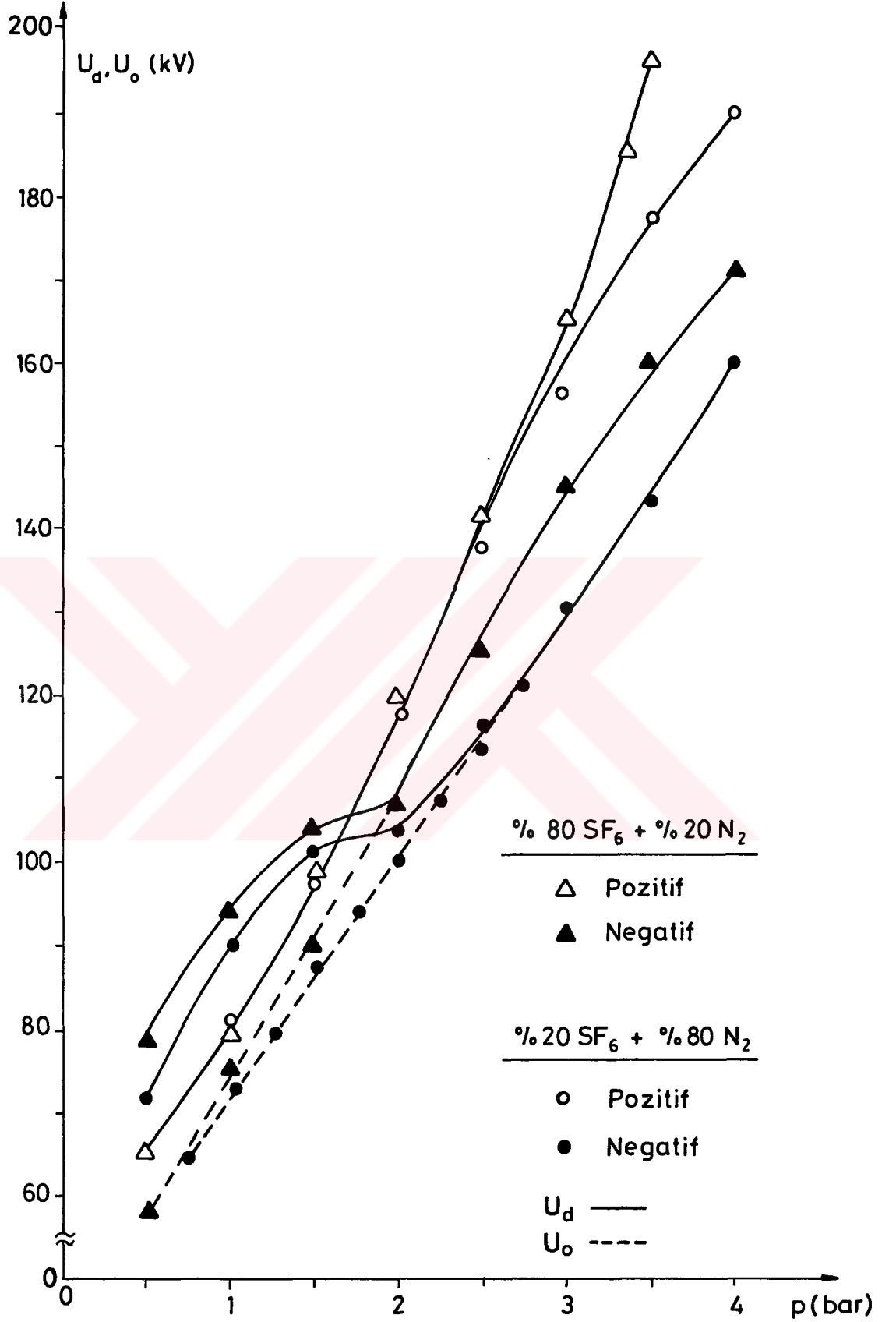


Şekil 4.7. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

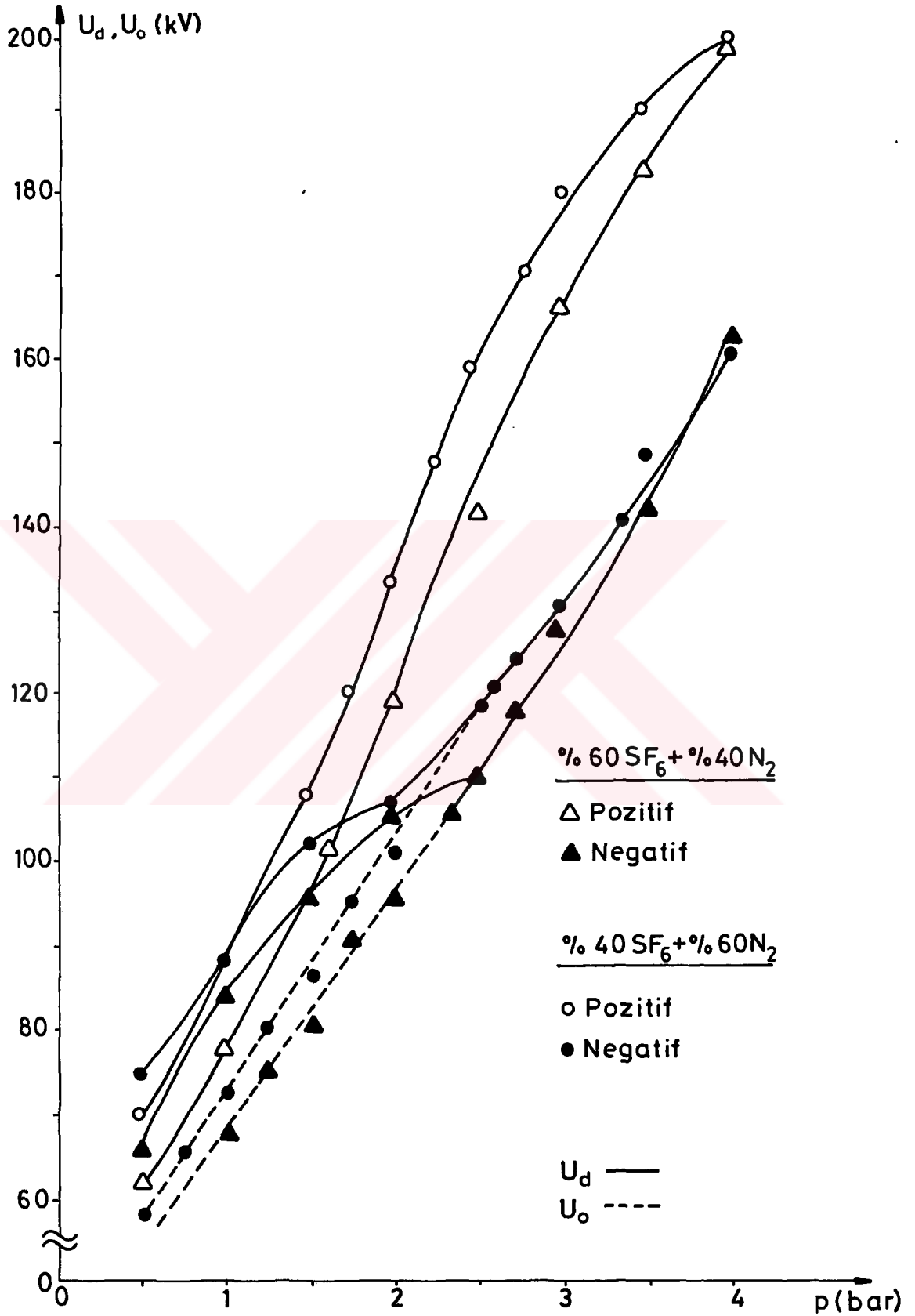
Alanın düzgünsüzlük derecesi küçüldükçe kritik basınç değerinde küçüldüğü gözlenmiştir. Örneğin $r=4$ mm küre yarıçapı ve %20 SF_6 +%80 N_2 gaz karışımı durumunda $p_{kr}(-)=2,75$ bar değeri elde edilmektedir (Şekil 4.8).

Kullanılan gaz karışımlarında N_2 gazının oranının artmasıyla birlikte kritik basınç değerlerinin de yükseldiği görülmektedir. Örnek verilecek olursa, %20 SF_6 +%80 N_2 gaz karışımında küre çapı 4 mm olan sistemde $p_{kr}(-)=2,75$ bar iken aynı elektrod sisteminde %80 SF_6 +%20 N_2 gaz karışımında $p_{kr}(-)=2$ bar'dır. Genel olarak küre elektrodun yarıçapı büyütüldüğünde (alanın düzgünsüzlük derecesi azaltıldığında) korona başlangıç geriliminin delinme gerilimine doğru yaklaştığı söylenebilir. Öte yandan küre çapı 4 mm olan elektrod sisteminde (0+4) bar basınç aralığında ve pozitif doğru gerilimde koronaya rastlanmamıştır.

Kutbiyetin delinme gerilimine etkisi, korona başlangıç gerilimine olan etkisinden daha farklıdır. Genel olarak az düzgün alanlarda pozitif doğru gerilimdeki delinme gerilimleri negatif doğru gerilimdekinden daha büyüktür [24]. Yapılan deneyler, delinme gerilimlerinin alanın düzgünsüzlük derecesine bağlı olduğunu göstermiştir. Küre elektrodunun yarıçapı küçüldükçe, pozitif doğru geriliminin negatif doğru geriliminin altına düştüğü basınç değeri büyümektedir. Örneğin %80 SF_6 +%20 N_2 gaz karışımı için $r=4$ mm olan küre-düzlem elektrod sisteminde pozitif doğru geriliminin negatif doğru geriliminin altına düştüğü basınç değeri 1,75 bar iken aynı gaz karışımında $r=2$ mm alındığında söz konusu basınç değeri 3,25 bar olarak karşımıza çıkmaktadır (Şekil 4.5, Şekil 4.8). Şekil 4.9'da da $r=4$ mm olan küre-düzlem elektrod sisteminde, %40 SF_6 +%60 N_2 ve %60 SF_6 +%40 N_2 gaz karışımları için delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi görülmektedir.



Şekil 4.8. 4 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



Şekil 4.9. 4 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

Tüm gaz karışımlarında, eğrilik yarıçapı 1 mm olan çubuk-düzlem elektrod sisteminde (0+4) bar basınç aralığında pozitif doğru gerilimin negatif doğru gerilime göre daha düşük olduğu gözlenmiştir (Şekil 4.6, Şekil 4.7). Düzgün olmayan alanda karşılaştığımız bu olayı, çubuk elektrodun bir sivri uçlu elektrod gibi davranması şeklinde yorumlamak mümkündür.

Aynı elektrod sisteminde negatif kutbiyette korona başlangıç gerilimlerinin delinme gerilimlerinin çok altında olduğu, ayrıca negatif kutbiyetteki kararlı korona bölgesinin pozitif kutbiyettekine göre daha geniş olduğu gözlenen olaylar arasındadır. Söz konusu elektrod sisteminde çubuk elektrodun bir sivri uç gibi davranması sonucunda pozitif kutbiyette $U_d=f(p)$ eğrisinin bir maksimum-minimumdan geçtiği saptanmıştır. Deney sonuçlarına göre karşılaştığımız bu olayları sivri uç-düzlem elektrod sisteminde kanal boşalma teorisinden hareketle açıklamak mümkündür.

Öte yandan karşılaştığımız ilginç bir durum da $r=2$ mm küre-düzlem ve $r=1$ mm çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde aynı oranda gaz karışımında ve 20 mm elektrod açıklığında farklı basınçlarda olmakla birlikte aynı minimum delinme gerilimlerinin elde edilmesidir. Diğer taraftan küre yarıçapı 4 mm olan elektrod sisteminde (0+4) bar basınç aralığında delinme geriliminin bir maksimum-minimum davranışı göstermemesinden dolayı delinme geriliminin minimum değeri hakkında bir şey söylemek mümkün değildir.

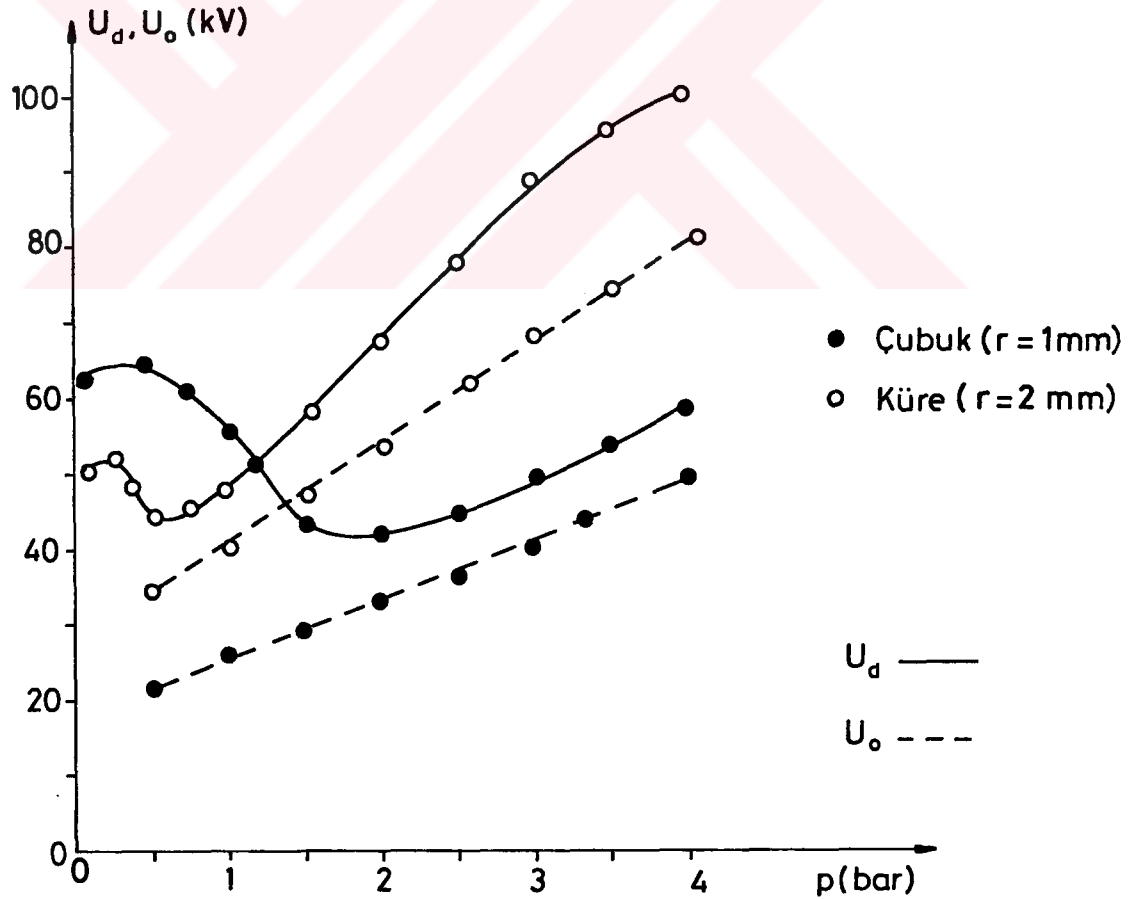
4.2. Alternatif Gerilim

Küre-düzlem ($r=2$ mm) ve çubuk-düzlem ($r=1$ mm) elektrod sistemlerinde, 20 mm açıklıkta delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimini veren eğrilere bakılacak olursa korona başlangıç geriliminin tüm basınç aralığı boyunca lineer olarak arttığı delinme

geriliminin ise doğru gerilimde olduğu gibi bir maksimum-minimum davranışında bulunduğu görülebilir. Alanın düzgünlük derecesinin korona başlangıç ve delinme gerilimlerine etkisini inceleyebilmek için 50 Hz alternatif gerilimde küre-düzlem ve çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde deneyler tekrarlanmıştır.

4.2.1. Alternatif Gerilimde SF₆ Gazının Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerinin İncelenmesi

Yapılan deneyler alanın düzgünlük derecesi arttıkça minimum basınç değerinin (p_{min}) yükseldiğini göstermiştir (Şekil 4.10). Örneğin $r=1$ mm olan çubuk-düzlem elektrod sistemi için $p_{min} \approx 1,75$ bar iken küre-düzlem elektrod sisteminde küre yarıçapı $r=2$ mm için



Şekil 4.10. Çubuk-düzlem ve küre-düzlem elektrod sistemlerinde, SF₆ gazında, pürüzsüz elektrod durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

$p_{min}=0,5$ bar olarak bulunmuştur. Ayrıca alanın düzgünsüzlük derecesi azaldıkça maksimum ve minimum gerilimleri arasındaki farkın da azaldığı görülmektedir. Diğer taraftan alternatif gerilimde çubuk-düzlem ve küre-düzlem elektrod sistemlerinde minimum delinme geriliminin her iki elektrod sistemi için hemen hemen aynı olduğu saptanmıştır.

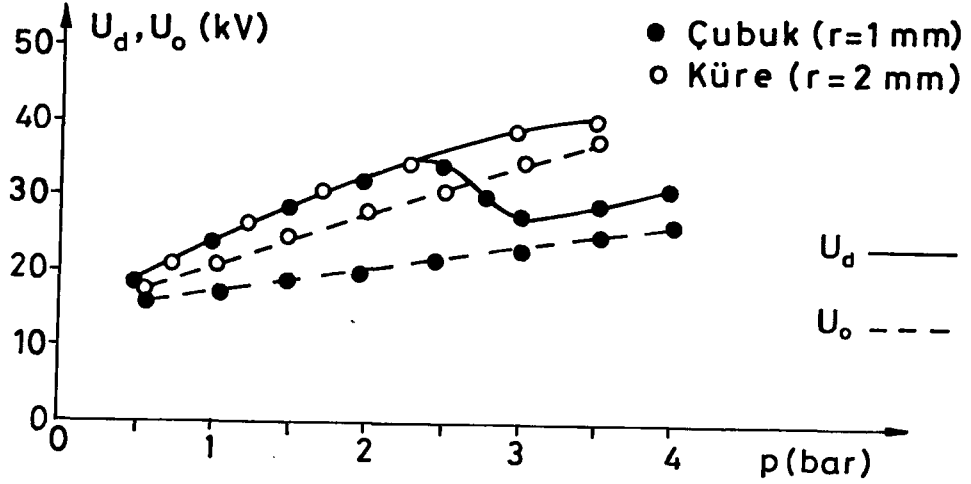
Söz konusu elektrod sistemlerinde minimum delinme geriliminin elektrodun eğrilik yarıçapından bağımsız olması yüksek gerilim aygıtlarının tasarlanması bakımından önemli bir sonuçtur.

Alanın düzgünsüzlük derecesi arttıkça maksimum delinme geriliminin arttığı gözlenmiştir. Örneğin $r=1$ mm olan çubuk-düzlem elektrod sisteminde $U_{dmax}=64,5$ kV iken, $r=2$ mm olan küre-düzlem elektrod sisteminde $U_{dmax}=51,5$ kV olarak saptanmıştır (Şekil 4.10).

Diğer taraftan $U_d=f(p)$ eğrisinin eğiminin negatif olduğu bölgede, küçük ξ değerlerinde delinme gerilimi basınç arttıkça hızla azalmakta, büyük ξ değerlerinde ise bu azalma daha yavaş olmaktadır ($\xi=1/\eta=1/\text{faydalanma faktörü}$).

4.2.2. Alternatif Gerilimde N_2 Gazının Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerinin İncelenmesi

Alanın düzgünsüzlük derecesi arttıkça delinme geriliminin bir maksimum-minimum davranışında bulunduğu saptanmıştır. Her iki elektrod sistemi içinde düşük basınçlarda korona başlangıç gerilimlerinin delinme gerilimlerine doğru yaklaştığı ortaya çıkmaktadır. Küre-düzlem, çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde 20 mm elektrod açıklığı için $p=2,5$ bar basıncın altında delinme gerilimlerinin eşit olduğu sonucuna varılmıştır (Şekil 4.11).

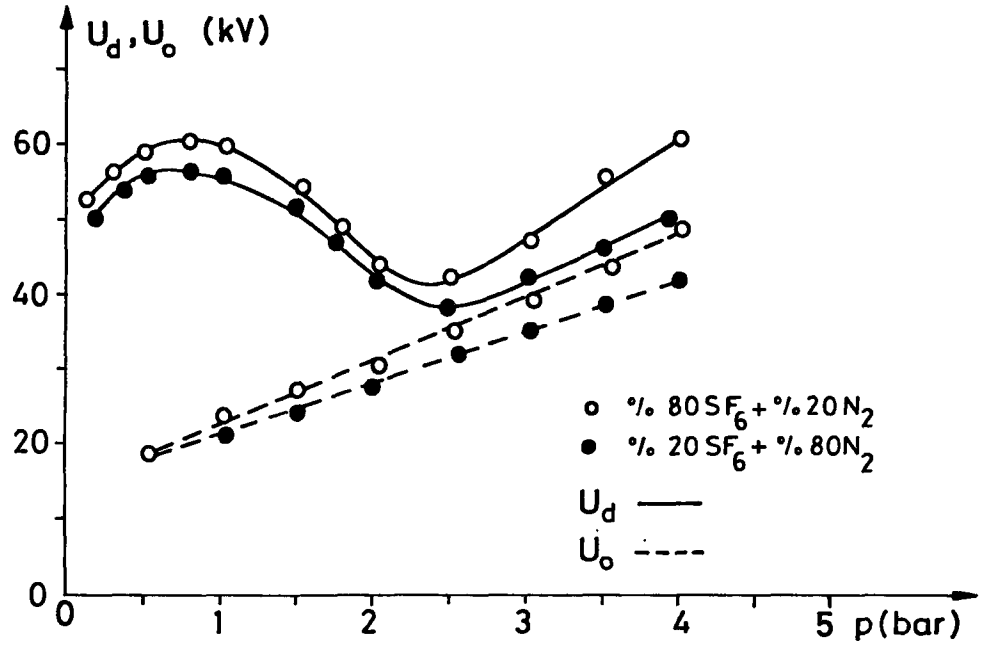


Şekil 4.11. Çubuk-düzlem ve küre-düzlem elektrod sistemlerinde, N_2 gazında, pürüzsüz elektrod durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

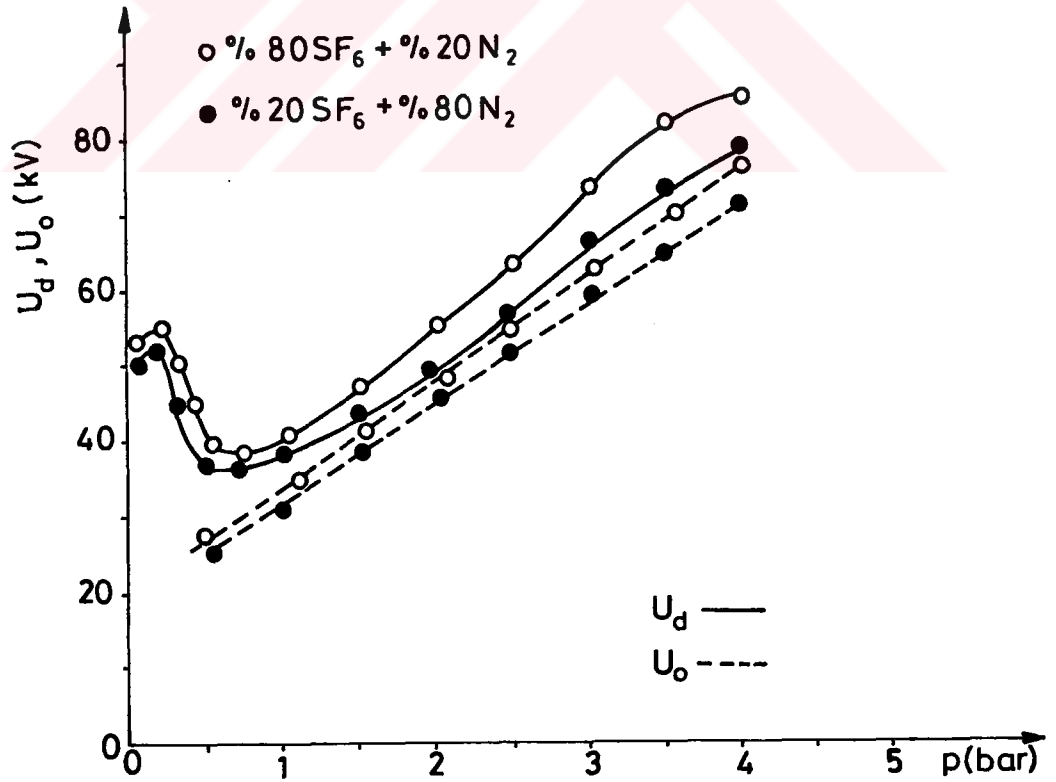
Diğer taraftan, $r=2$ mm küre-düzlem elektrod sisteminde, delinme geriliminin basınçla bağlı olarak yükseldiği, ancak basınç arttıkça yükselme hızının azaldığı gözlenmiştir. Söz konusu elektrod sistemi için (3+4) bar basınç aralığında delinme geriliminin yaklaşık olarak sabit kaldığı görülmektedir.

4.2.3. Alternatif Gerilimde SF_6+N_2 Gaz Karışımının Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerinin İncelenmesi

Deneyler 50 Hz alternatif gerilimde, çeşitli oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, söz konusu elektrod sistemlerinde tekrarlanmıştır (Şekil 4.12, Şekil 4.13). Bu deneylerde de alanın düzgünsüzlük derecesinin artırılmasıyla birlikte minimum basınç değerinin yükseldiği gözlenmiştir. Bunun yanında p_{min} ve p_{max} değerlerinin gaz karışımının oranlarına da bağlı olduğu çizilen eğrilerden ortaya çıkmaktadır. Değişik oranda gaz karışımları ve elektrod sistemlerinde yapılan deneylerden genel olarak delinme gerilimleri arasındaki farkın korona başlangıç gerilimleri arasındaki fark ile orantılı olduğu görülmektedir. 20 mm elektrod açıklığında, küre-düzlem ve çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde aynı orandaki gaz



Şekil 4.12. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF₆+N₂ gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



Şekil 4.13. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF₆+N₂ gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

karışımları için delinme gerilimlerinin minimum değerinin yaklaşık olarak eşit olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca alan düzgünlüğü arttıkça, delinme gerilimlerinin maksimum ve minimum değerleri arasındaki fark büyümektedir.

Söz konusu elektrod sistemlerinde, %20 SF₆+%80 N₂ ve %80SF₆+%20 N₂ gaz karışımlarında delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin düşük basınçlarda çok az fark ettiği, buna karşın bu farkın basınca bağlı olarak arttığı saptanmıştır. Diğer taraftan SF₆ da olduğu gibi, sabit gaz karışımında da, $U_d=f(p)$ eğrisinin negatif olduğu bölgede, küçük ξ değerlerinde delinme gerilimi basınç arttıkça hızla azalmakta, büyük ξ değerlerinde ise bu azalma daha yavaş olmaktadır.

4.3. Doğru Gerilimde Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerine Etkisi

Gerilimin kutbiyetinin yüzey pürüzlülüğü ile birlikte korona başlangıç ve delinme gerilimlerine etkisini inceleyebilmek için tüm deneyler pozitif ve negatif doğru gerilimlerde ve farklı yüzey pürüzlülüğüne sahip elektrod sistemlerinde yapılmıştır. Deney sonuçlarına göre düzgün olmayan alanda $U_d=f(p)$ eğrisinin eğiminin belirli basınç aralıklarında işaret değiştirmekte, kritik basınca kadar delinmeden önce daima korona boşalması söz konusu olmakta, kritik basınçtan daha yüksek basınçlarda ise korona olmaksızın delinme meydana gelmektedir.

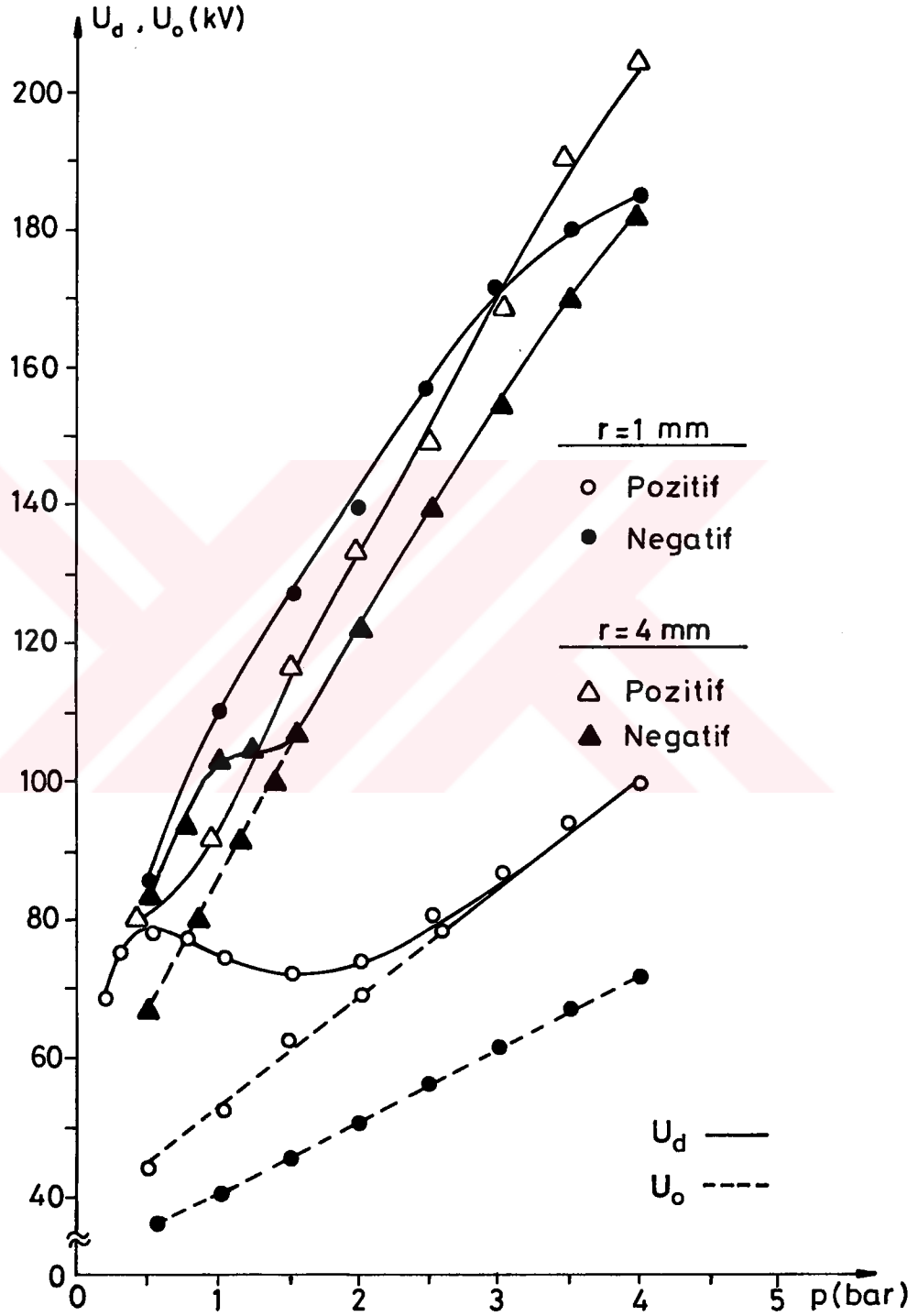
Deneyler, $p < p_{kr}$ için $U_d=f(p)$ eğrisinin bir maksimum minimum davranışında bulunduğunu, $p > p_{kr}$ içinse delinme geriliminin basınçla birlikte arttığını göstermektedir. Korona başlangıç gerilimleri ise hemen hemen tüm basınç aralığında lineer olarak yükselmektedir. Deney sonuçlarına göre çizilen delinme eğrileri incelendiğinde, alçak basınçlardan itibaren delinme geriliminin belirli bir değere kadar basınçla birlikte yükseldiği, maksimumdan

geçtikten sonra azalarak p_{min} basıncında U_{dmin} değerini aldığı, p_{min} in üzerindeki basınçlarda ise tekrar basınçla birlikte arttığı görülebilir. Yukarıda sözü edilen durumlar, elektrod yüzey pürüzsüzlüğü için de geçerli olmaktadır (Bölüm 4.1).

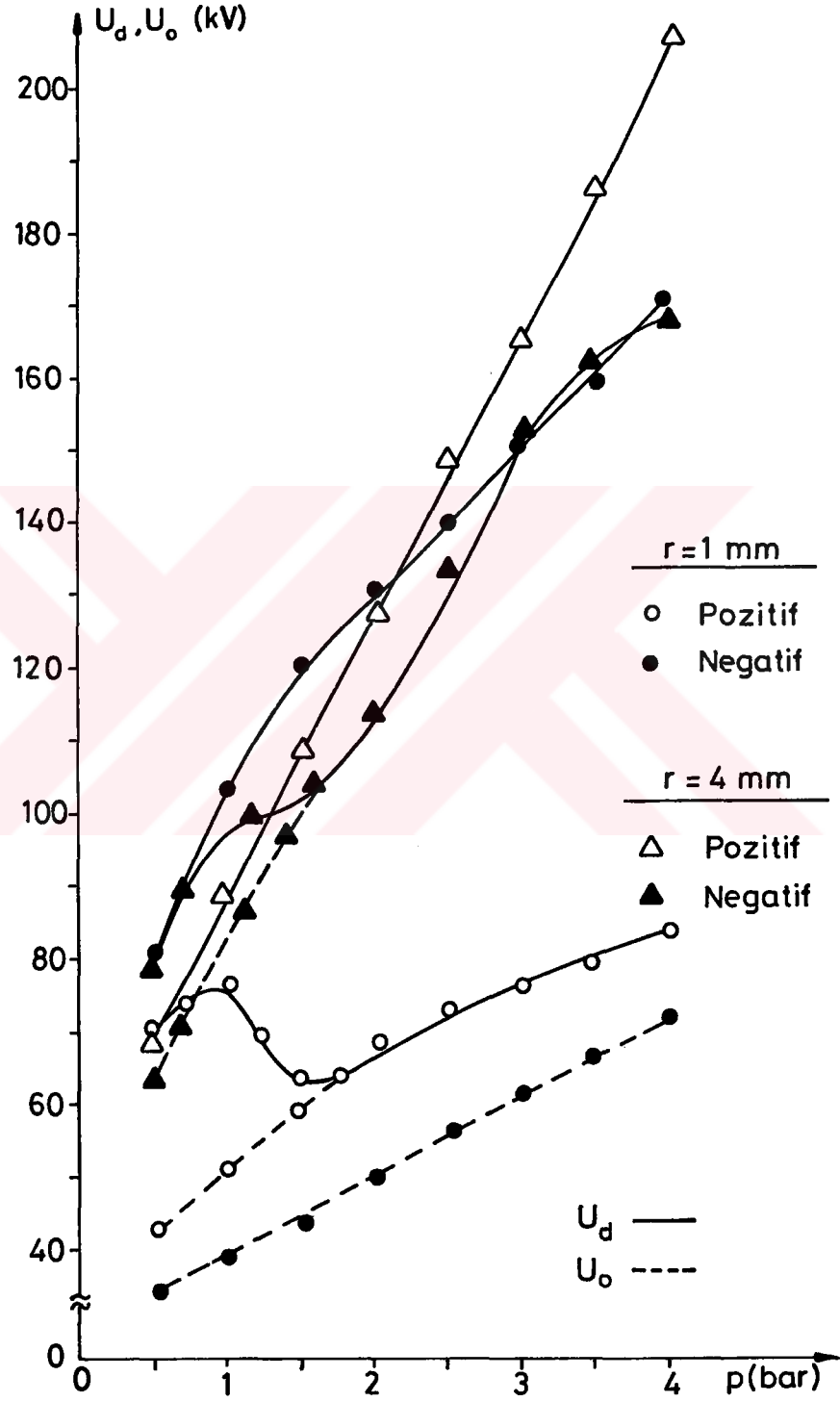
4.3.1. Sıkıştırılmış SF_6 Gazında, Pozitif ve Negatif Doğru Gerilimde, Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerine Etkisi

Doğru gerilimde her iki kutbiyet için değişik elektrod şekillerinde ve farklı yüzey pürüzlülüklerinde yapılan deneylerden hareketle çıkarılan $U_o=f(p)$ ve $U_d=f(p)$ eğrileri incelenecek olursa, alanın düzgünsüzlük derecesinin yeteri kadar küçük olması durumunda p_{kr} , p_{max} ve p_{min} basınçlarının kutbiyete büyük ölçüde bağlı oldukları görülebilir. Genel olarak kritik basınç negatif kutbiyetde pozitifte göre daha yüksek çıkmıştır. Negatif kutbiyettede pozitifdekine benzer olarak bir maksimum-minimum davranışının var olduğu, ancak delinme geriliminin maksimumdan geçtiği p_{max} basıncının pozitif kutbiyettekine oranla daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca negatif kutbiyetde düzgünsüzlük derecesi büyük olan alanlarda (0+4) bar basınç aralığında $U_d > U_o$ olduğundan, kritik basıncın 4 bardan büyük olduğu sonucuna varılmıştır. Düzgünsüzlük derecesi küçük olan alanlarda ise kritik basınç (0+4) bar basınç aralığında kalmaktadır. Örnek olarak küre-düzlem ($r=4$ mm) elektrod sisteminde yüzey pürüzlülüğü 6 mm alındığında $p_{kr}(-)=1,52$ bar olmaktadır.

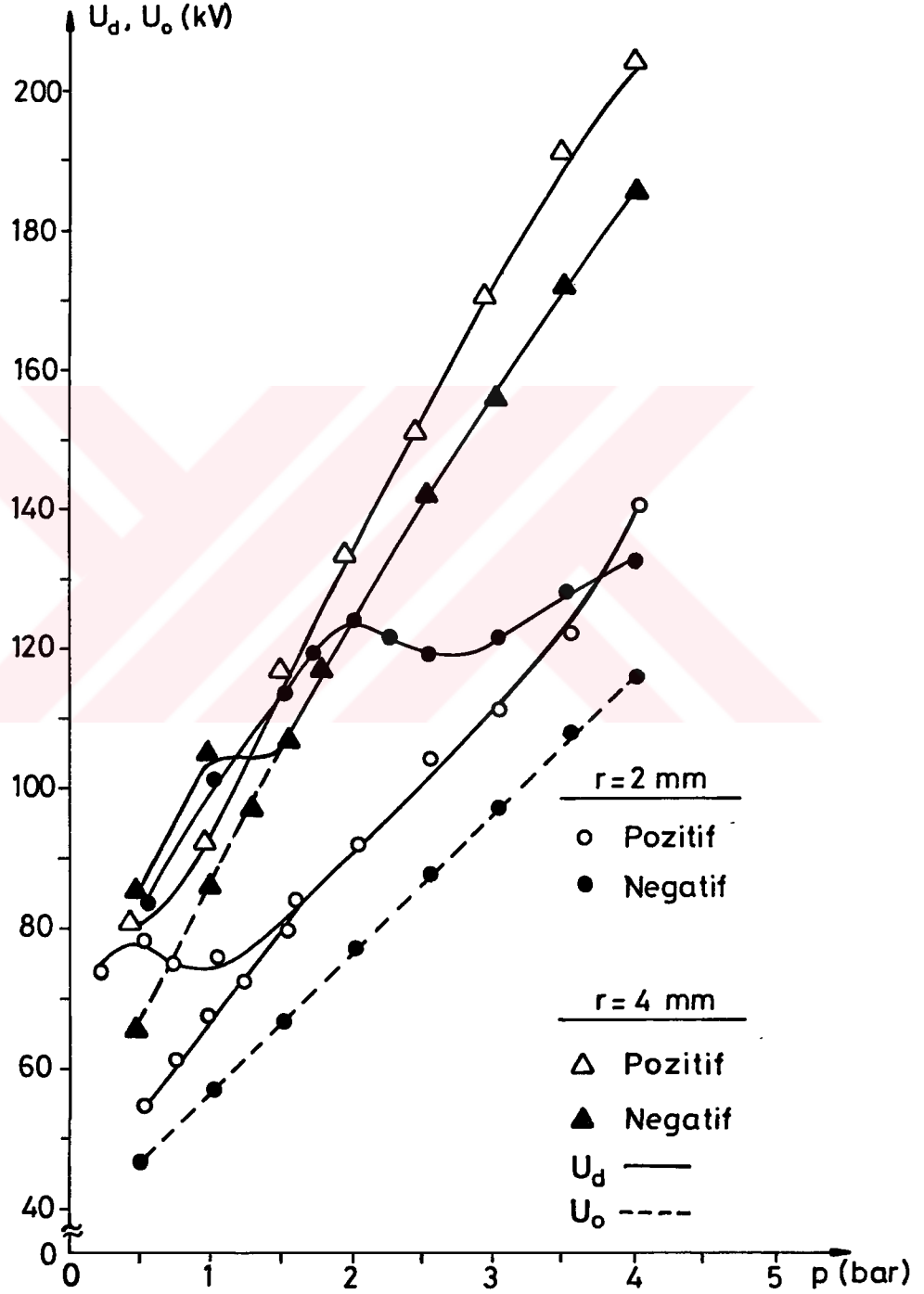
Yüzey pürüzünün yüksekliği arttıkça kritik basıncın azaldığı görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.14 ve Şekil 4.15 den de görüleceği gibi düzgünsüzlük derecesi büyük olan alanlarda yüzey pürüzlülüğünün yükselmesi ile birlikte kritik basıncın azalması, düzgünsüzlük derecesi küçük olan alanlara göre daha fazladır. Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 daki eğrilerden de, negatif kutbiyetdeki



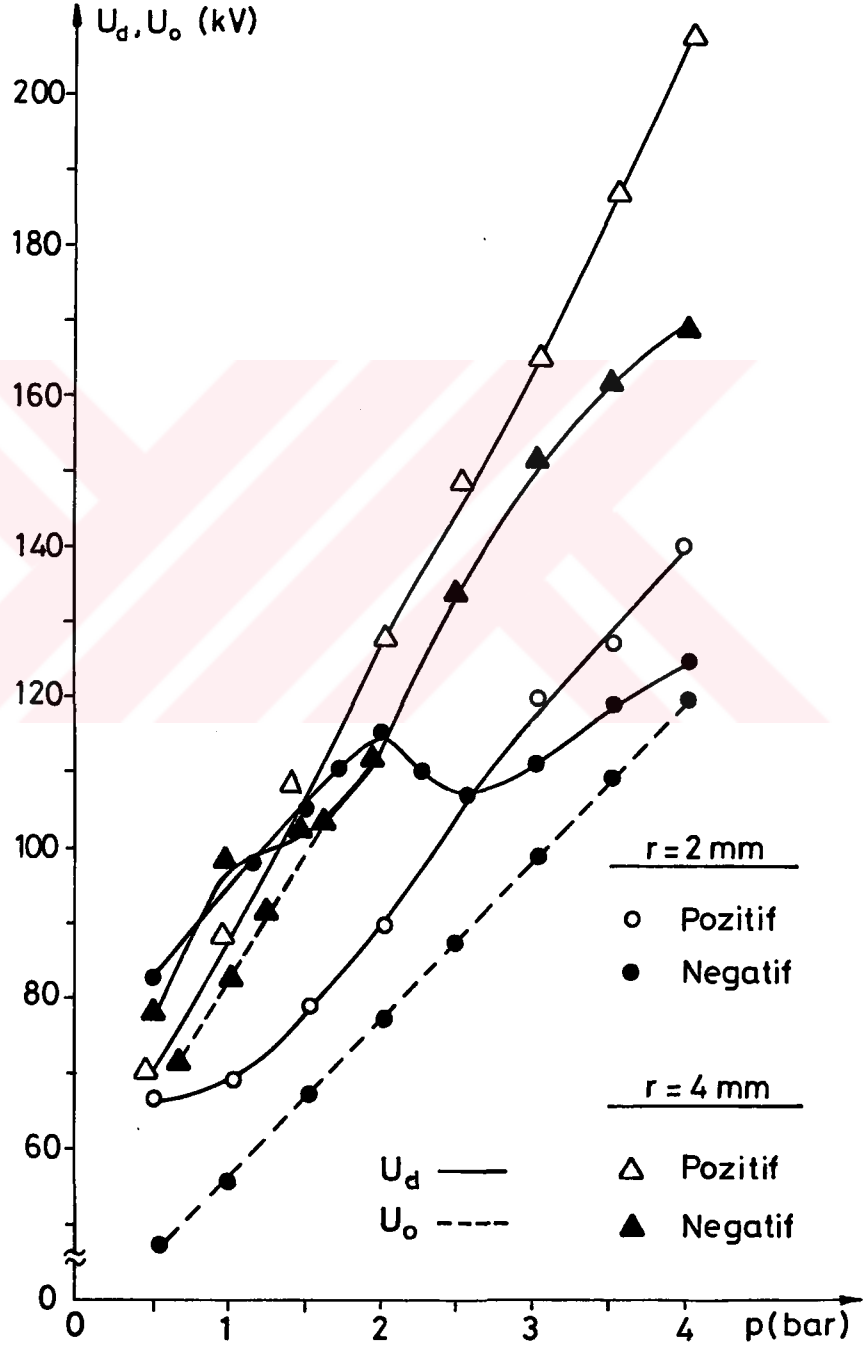
Şekil 4.14. Çubuk-düzlem ve küre-düzlem elektrod sistemlerinde, SF_6 gazında, pürüzlü elektrod ($r=3$ mm) durumunda, doğru gerilimde delinme ve P_{korona} başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



Şekil 4.15. Çubuk-düzlem ve küre-düzlem elektrod sistemlerinde, SF_6 gazında, pürüzlü elektrod ($r = 6$ mm) durumunda, doğru gerilimde delinme ve p korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



Şekil 4.16. Küre-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 gazında, pürüzlü elektrod ($r_p = 3$ mm) durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



Şekil 4.17. Küre-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 gazında, pürüzlü elektrod ($r=6$ mm) durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

korona başlangıç geriliminin pozitif kutbiyetdekine göre daha düşük olduğu görülebilir. Ayrıca elektrod düzeninin verimi arttırıldığında, korona başlangıç geriliminin delinme gerilimine doğru yaklaştığı gözlenmektedir.

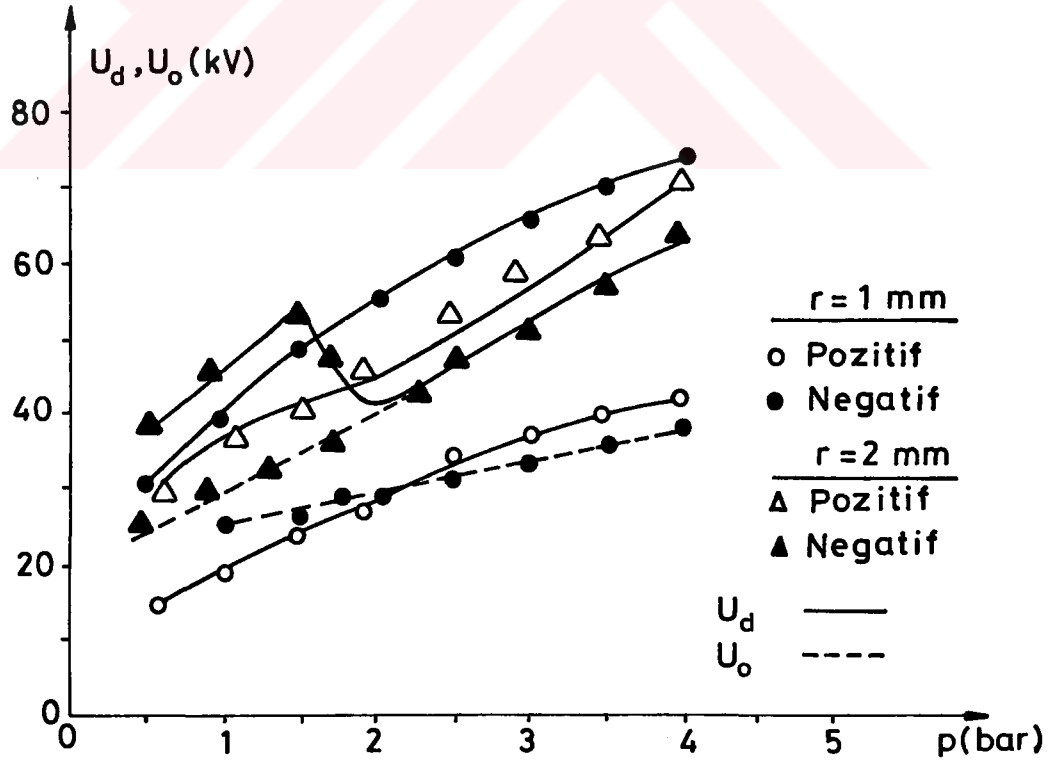
Kutbiyetin delinme gerilimine etkisi, korona başlangıç gerilimine oranla daha değişik olmaktadır. Genel olarak az düzgün alanlarda pozitif delinme geriliminin negatif delinme gerilimlerinden büyük olduğu söylenebilir [24]. Bu farkın alan düzgünsüzlüğüne ve basınca bağlı olduğu yapılan deneyler sonucu ortaya çıkmıştır. Ayrıca küre-düzlem elektrod sisteminde kürenin yarıçapı küçüldükçe pozitif doğru gerilimler ile negatif doğru gerilimler arasındaki farkın basınca bağlı olarak değiştiği saptanmıştır. Bunun sonucunda yüksek basınçlarda pozitif doğru gerilim negatif doğru gerilimden büyük olmuş, düşük basınçlarda ise bu durumun tersi söz konusu olmuştur. Yüzey pürüzünün yükseltilmesi ile birlikte daha küçük basınçlarda pozitif doğru gerilim, negatif doğru gerilimin altına inmektedir (Şekil 4.16, Şekil 4.17).

Küre elektrodun kutbiyetinin negatif olması durumunda, pozitif kutbiyete oranla daha geniş bir basınç aralığında, kararlı korona boşalması görülmüş, bunun yanında yüzey pürüzlülüğü arttıkça, düzgün olmayan alanlarda pozitif ve negatif gerilimlerde daha dar bir aralıkta kararlı korona boşalmasına rastlanmıştır. Eğrilik yarıçapı 1 mm olan çubuk-düzlem elektrod sisteminde, çeşitli yüzey pürüzlülüklerinde (0+4) bar basınç aralığında pozitif doğru gerilimin negatif doğru gerilime oranla daha düşük olduğu saptanmıştır (Şekil 4.14, Şekil 4.15).

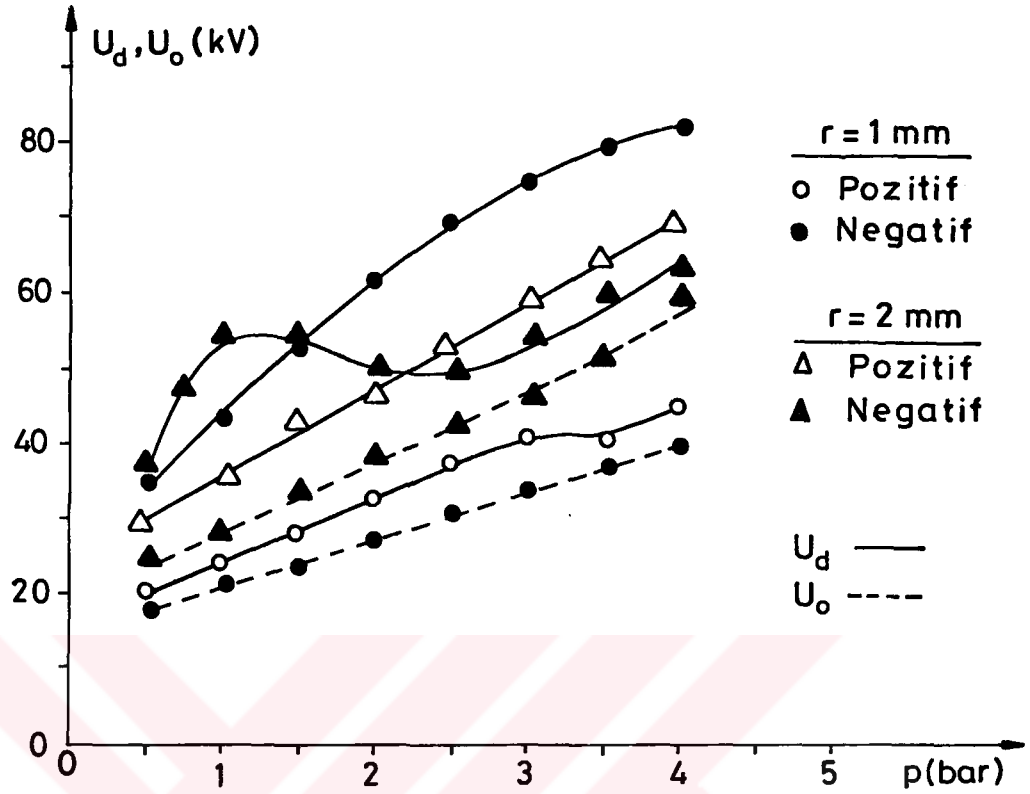
Bu tip elektrod sisteminde çubuk elektrodun bir sivri uç elektrodu gibi davrandığı ve bu nedenle düşük basınçlarda pozitif delinme geriliminin bir maksimum-minimumdan geçtiği sonucuna varılmıştır.

4.3.2. Sıkıştırılmış N_2 Gazında Pozitif ve Negatif Doğru Gerilimlerinde, Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerine Etkileri

Yapılan deneylerden genel olarak kritik basıncın negatif kutbiyetde pozitiftekine göre daha yüksek olduğu gözlenmiştir. Negatif doğru gerilimde küre elektrodunun yarıçapı büyüdükçe korona başlangıç gerilimi delinme gerilimine doğru yaklaşmıştır. Pozitif doğru gerilimde ise sadece çubuk elektrodunun yarıçapı 1 mm olduğunda delinme gerilimine çok yakın değerlerde korona görülmüştür. Ayrıca yüzey pürüzünün yüksekliği arttırıldıkça kritik basınç değerinin küçüldüğü gözlenmiştir (Şekil 4.18, Şekil 4.19). Kutbiyetin delinme gerilimine etkisi korona başlangıç gerilimine etkisinden daha farklı olmuştur. Genel olarak alanın düzgünsüzlük derecesi arttıkça kararlı korona bölgesinde pozitif doğru gerilimler negatif doğru



Şekil 4.18. Küre-düzlem ve çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde, N_2 gazında, pürüzlü elektrod ($r = 6$ mm) durumunda, doğru gerilimde delinme ve p_{korona} başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



Şekil 4.19. Küre-düzlem ve çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde, N_2 gazında, pürüzlü elektrod ($r = 3$ mm) durumunda, doğru gerilimde delinme ve p_{korona} başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

gerilimlerin altına düşmektedir (Şekil 4.19). Öte yandan yüzey pürüzü yükseldikçe kararlı korona bölgesinin daraldığı, buna paralel olarak daha düşük basınçlarda pozitif doğru gerilimin negatif doğru gerilimin altına düştüğü saptanmıştır. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde ise eğrilik yarıçapı 1 mm seçilen çubuk elektrodun (0÷4) bar basınç aralığında sivri uç gibi davranması sonucu 3 ve 6 mm lik düzlem elektrodu yüzey pürüzlerinde, pozitif doğru gerilimdeki delinme gerilimi değerleri negatif doğru gerilimdeki delinme gerilimi değerlerinden daha küçüktür (Şekil 4.18, Şekil 4.19).

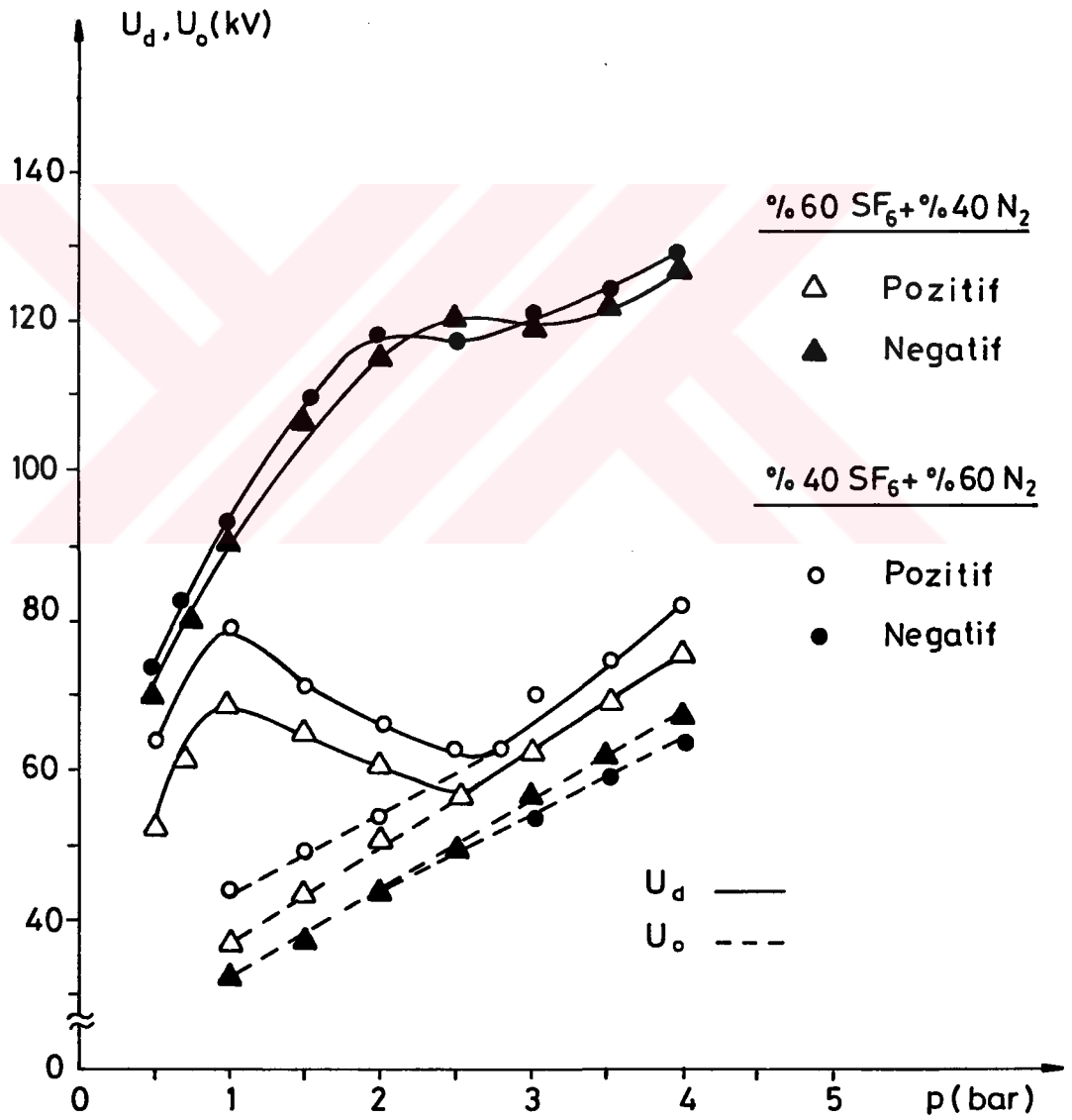
Yüzey pürüzlülüğü azaldıkça negatif kutbiyette delinme geriliminin maksimum ve minimum değerleri arasındaki farkın küçüldüğü aynı zamanda p_{min} basıncının arttığı, p_{max} basıncının ise azaldığı ortaya çıkmıştır.

Örneğin $r=2$ mm küre-düzlem elektrod sisteminde yüzey pürüzünün yüksekliği 6 mm için $p_{\min}=2$ bar, $p_{\max}=1,5$ bar iken yüzey pürüzünün yüksekliği 3 mm yapıldığında $p_{\min} \approx 2,5$ bar'a yükselmiş, $p_{\max} \approx 1,1$ bar'a düşmüştür. Söz konusu elektrod sistemlerinde ve farklı yüzey pürüzlülüklerinde pozitif kutbiyet için delinme gerilimi maksimum-minimum davranışı göstermezken korona boşalmasına da rastlanmamıştır. Öte yandan alanın düzgünlük derecesi azaldıkça korona boşalması görülmeye başlanmıştır. Örneğin $r=1$ mm çubuk-düzlem elektrod sisteminde delinme ve korona başlangıç gerilimleri yaklaşık olarak eşit olmaktadır.

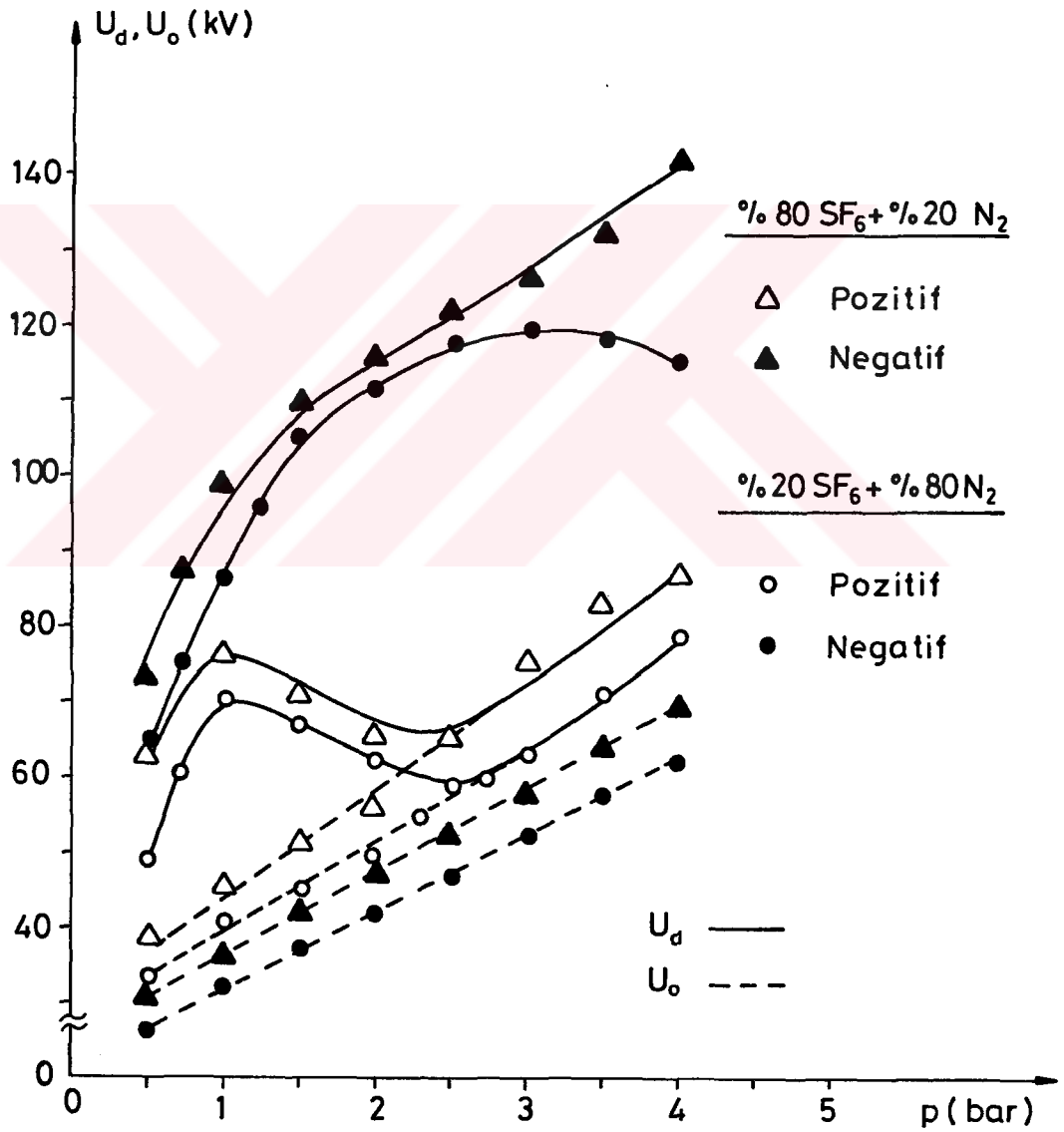
4.3.3. SF_6+N_2 Gaz Karışımında, Pozitif ve Negatif Doğru Gerilimde, Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimine Etkileri

Doğru gerilimde her iki kutbiyet için farklı elektrod sistemlerinde ve yüzey pürüzlülüklerinde çıkarılan $U_o=f(p)$ ve $U_d=f(p)$ eğrileri incelendiğinde, alanın düzgünlük derecesinin yeteri kadar küçük olması halinde p_{kr} , $p_{\max}$ ve $p_{\min}$ basınçlarının kutbiyete büyük ölçüde bağlı oldukları görülmektedir. Deneylerde genel olarak kritik basıncın negatif kutbiyette pozitif göre daha büyük olduğu ortaya çıkmıştır. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça kritik basıncın değeri tüm gaz karışımı oranlarında azalmıştır (Şekil 4.20,21,22,23,24). Negatif kutbiyette de pozitif kutbiyetten benzer olarak bir maksimum-minimum davranışının var olduğu, ancak delinme geriliminin maksimumdan geçtiği $p_{\max}$ basıncının pozitif kutbiyetten orana daha yüksek olduğu tesbit edilmiştir.

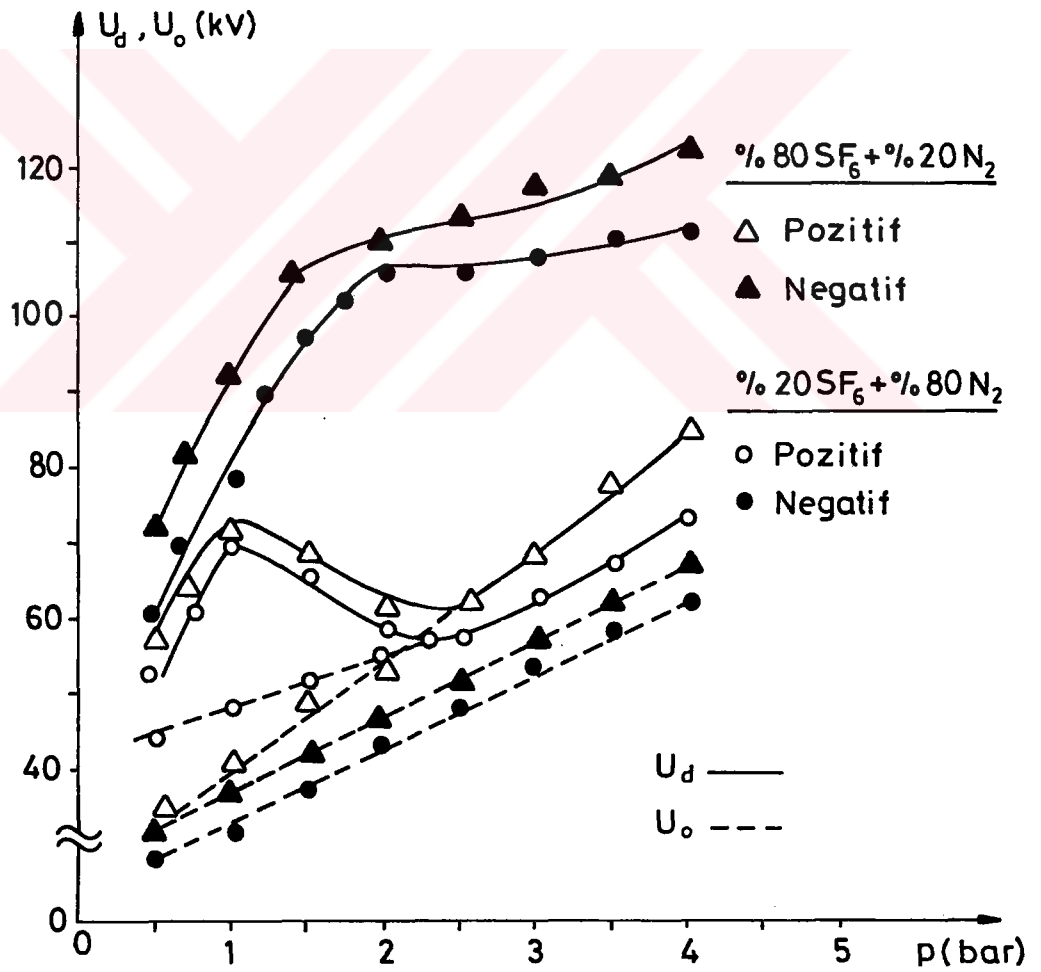
Eğriler incelendiğinde, negatif kutbiyetteki korona başlangıç geriliminin pozitif kutbiyetten orana daha düşük olduğu, ayrıca alan düzgünlüğü azaldıkça korona başlangıç geriliminin delinme gerilimine doğru yaklaştığı görülmüştür. Kutbiyetin delinme gerilimine etkisi korona başlangıç gerilimlerine orana daha değişik



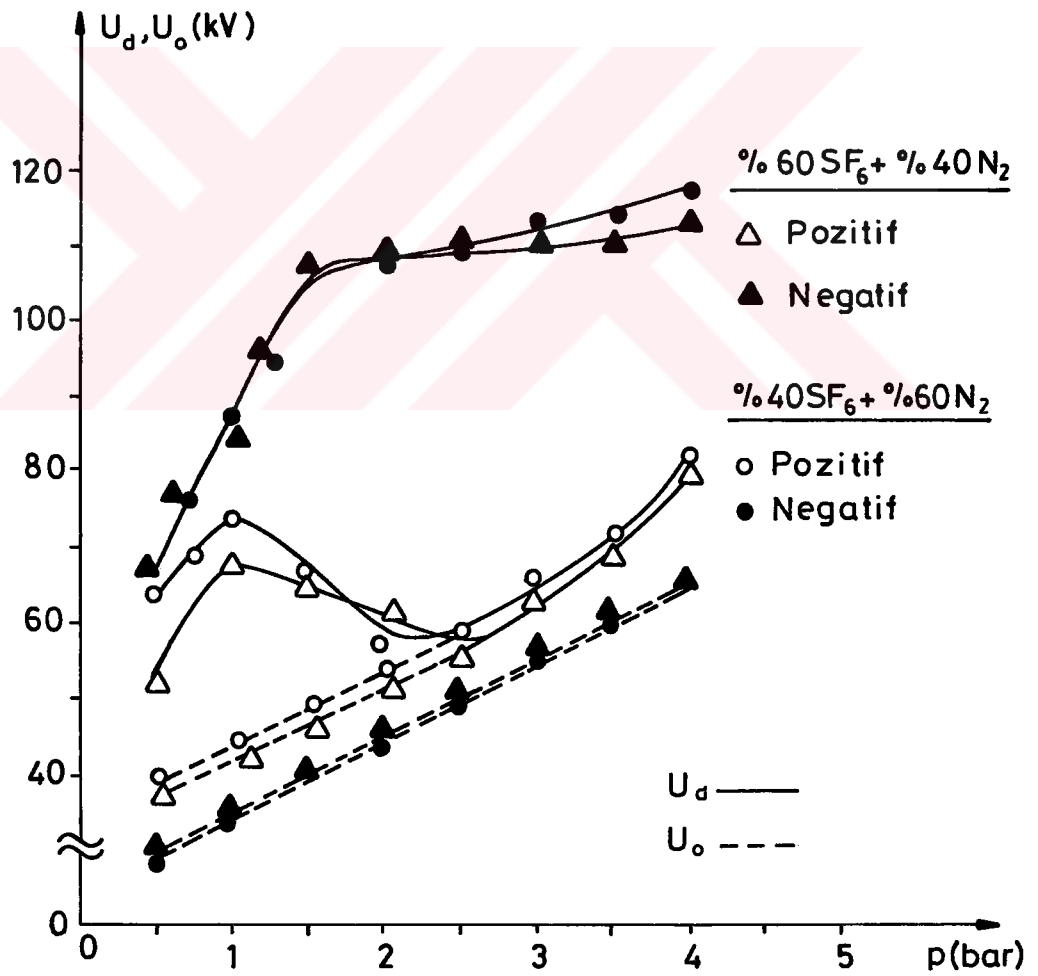
Şekil 4.20. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_p=3$ mm) durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



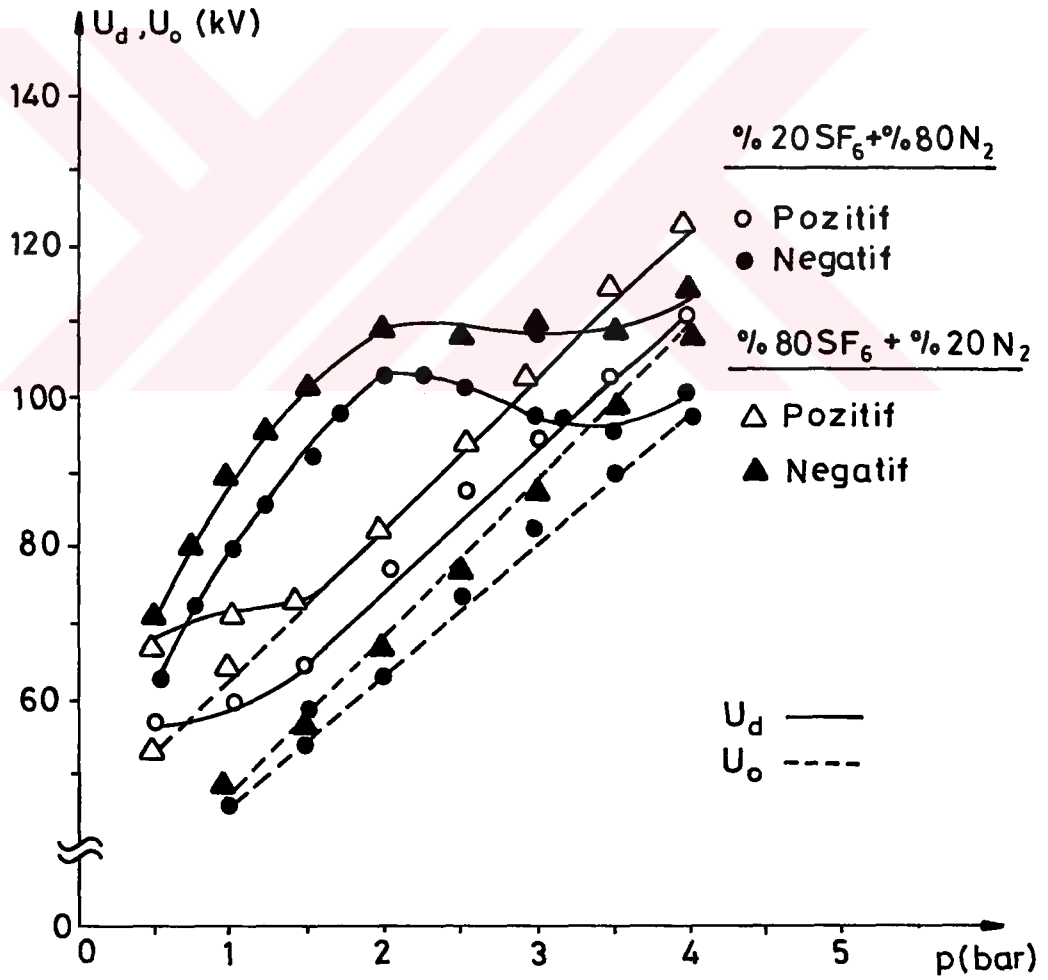
Şekil 4.21. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r = 3 \text{ mm}$) durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



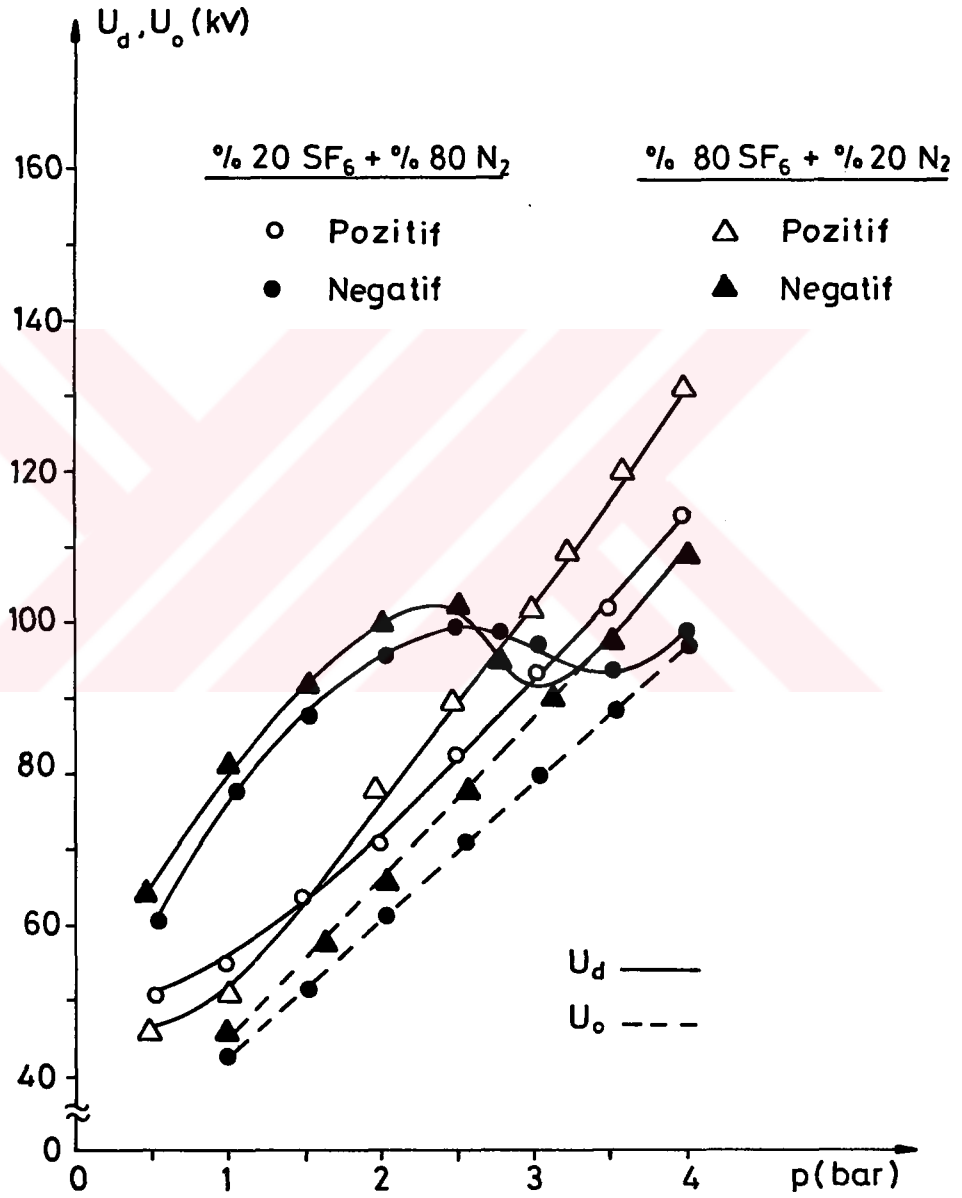
Şekil 4.22. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_p \approx 6$ mm) durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



Şekil 4.23. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_p^2=6$ mm) durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



Şekil 4.24. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_2=3$ mm) durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



Şekil 4.25. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_2=6$ mm) durumunda, doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

olmaktadır. Genel olarak az düzgün alanlarda pozitif delinme geriliminin negatif delinme geriliminden büyük olduğu söylenir [8]. Ancak bu farkın alan düzgünsüzlüğüne ve yüzey pürüzlülüğüne bağlı olduğu yapılan deneyler sonucu ortaya çıkmıştır.

Deney sonuçlarına göre tüm gaz karışımlarında ve çeşitli yüzey pürüzlülüklerinde kararlı korona bölgesinde pozitif doğru gerilimlerin negatif doğru gerilimlerden daha düşük olduğu kararına varılmıştır. Bilindiği gibi alan düzgünsüzlüğü azaldıkça kararlı korona bölgesi daralmakta ve buna paralel olarak pozitif delinme gerilimi daha düşük basınçlarda negatif delinme geriliminin altına düşmektedir (Şekil 4.24, Şekil 4.25). Aynı şekilde yüzey pürüzlülüğünün artması ile kritik basıncın düştüğü, buna bağlı olarak kararlı korona bölgesinin daralması sebebiyle de daha düşük basınçlarda pozitif delinme geriliminin negatif delinme geriliminin altına düştüğü deneylerle ortaya çıkmıştır. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde (0+4) bar basınç aralığında çubuk elektrodun bir sivri uç gibi davrandığı ve bunun sonucunda pozitif doğru gerilimin düşük basınçlarda maksimum-minimumdan geçtiği verilen eğrilere gözükmemektedir. Ayrıca söz konusu elektrod sistemi için, negatif doğru gerilimde ve çeşitli gaz karışım oranlarında, kritik basıncın 4 bar'dan büyük olduğu söylenebilir.

4.4. Alternatif Gerilimde Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerine Etkileri

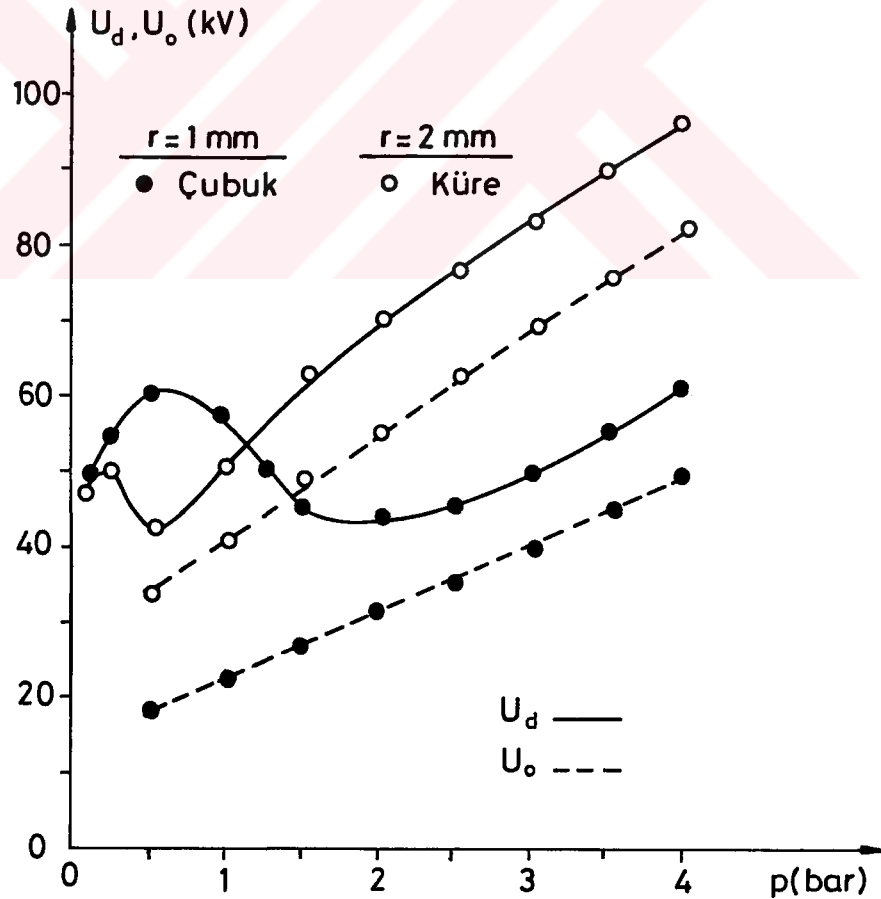
Küre-düzlem ($r=2$ mm), çubuk-düzlem ($r=1$ mm) elektrod sistemlerinde SF_6 ve farklı oranlarda gaz karışımlarında 20 mm açıklıkta delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimini veren eğrilere bakılacak olursa korona başlangıç geriliminin hemen hemen tüm basınç aralığı boyunca lineer olarak arttığı, delinme geriliminin ise doğru gerilimde olduğu gibi bir maksimum-

minimum davranışında bulunduğu görülebilir. Burada da $p < p_{kr}$ bölgesinde delinme öncesi daima korona boşalmasına rastlanmıştır.

Alanın düzgünsüzlük derecesinin ve yüzey pürüzlülüğünün korona başlangıç ve delinme gerilimlerine etkisini bulabilmek için deneyler ayrıca farklı yüzey pürüzleri kullanılarak söz konusu elektrod sistemlerinde 50 Hz alternatif gerilimde tekrarlanmıştır.

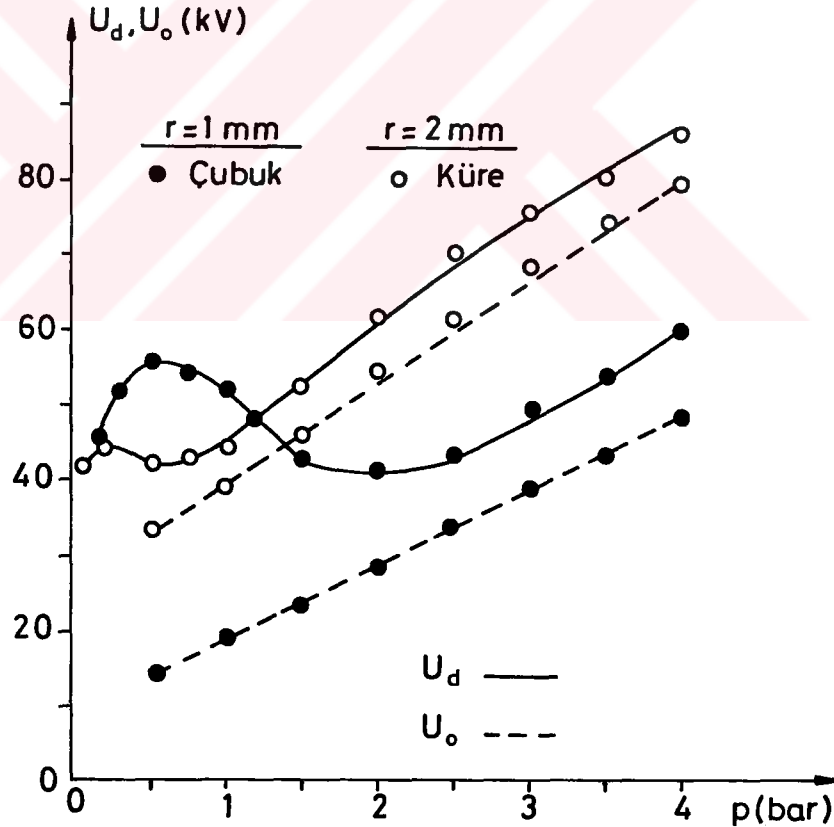
4.4.1. Sıkıştırılmış SF_6 Gazında, Alternatif Gerilimde Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimine Etkileri

Deney sonuçlarına göre düzgün olmayan alanlarda çeşitli yüzey pürüzlülüklerinde delinme gerilimlerinin



Şekil 4.26. Küre-düzlem ve çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde, SF_6 gazında, pürüzlü elektrod ($r=3$ mm) durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

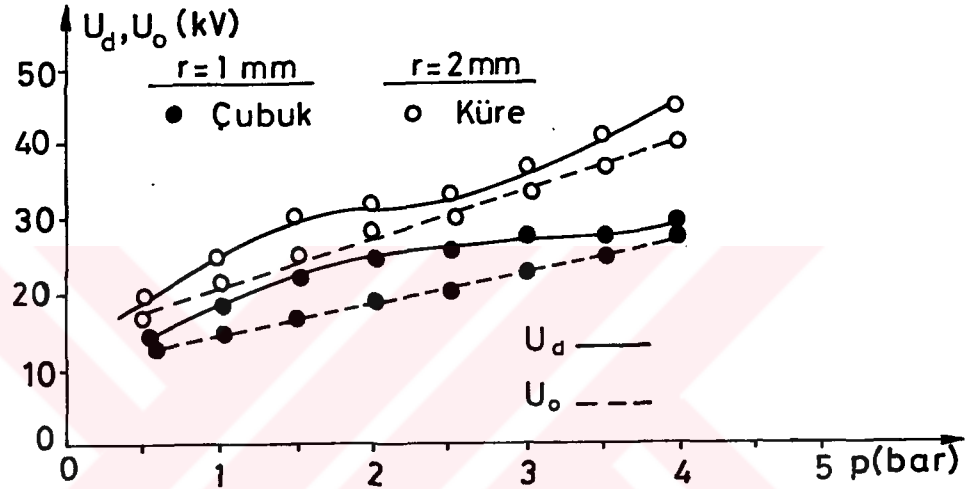
bir maksimum-minimum değerlerini aldığı saptanmıştır (Şekil 4.26, Şekil 4.27). Alanın düzgünsüzlük derecesi arttıkça delinme geriliminin maksimum ve minimum değerleri arasındaki farkın arttığı görülmektedir. Deneylerde kullandığımız her iki elektrod yüzey pürüzlülüğünde düşük basınçlarda çubuk-düzlem elektrod sisteminin delinme gerilimi küre-düzlem elektrod sistemine oranla daha yüksek olmuştur. Diğer ilgi çekici bir nokta da p_{min} ve p_{kr} basınçlarının alanın düzgünsüzlük derecesi ile birlikte yükselmesi ve yüzey pürüzlülüğünün artması ile delinme geriliminin düşmesi ve bu düşüşün küçük basınçlarda daha az olmasıdır. Bunun yanında alan düzgünsüzlüğü arttıkça farklı yüzey pürüzlülüklerinin delinme gerilimi üzerindeki etkisinin (0-4) bar basınç aralığında azaldığı sonucuna varılmıştır.



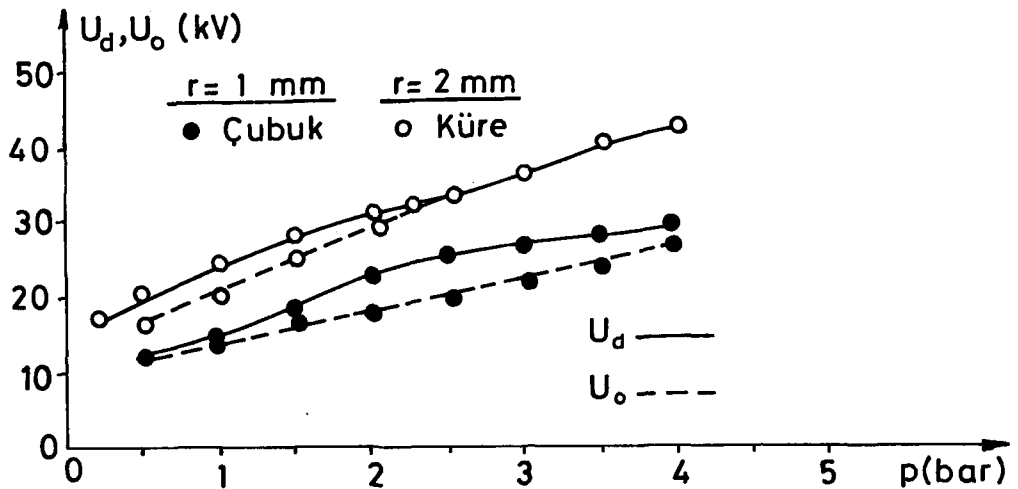
Şekil 4.27. Küre-düzlem ve çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde, SF_6 gazında, pürüzlü elektrod ($r=6$ mm) durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

4.4.2. Sıkıştırılmış N_2 Gazında, Alternatif Gerilimde Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerine Etkileri

Deney sonuçlarına göre çizilen Şekil 4.28 ve Şekil 4.29'daki eğrilerden delinme geriliminin diğerlerinden farklı olarak sıkıştırılmış N_2 gazında maksimum-minimum değerler almadığı görülmektedir. Yüzey pürüzlülüğü arttıkça korona başlangıç gerilimlerinin delinme gerilimine



Şekil 4.28. Küre-düzlem ve çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde, N_2 gazında, pürüzlü elektrod ($r_p=3$ mm) durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

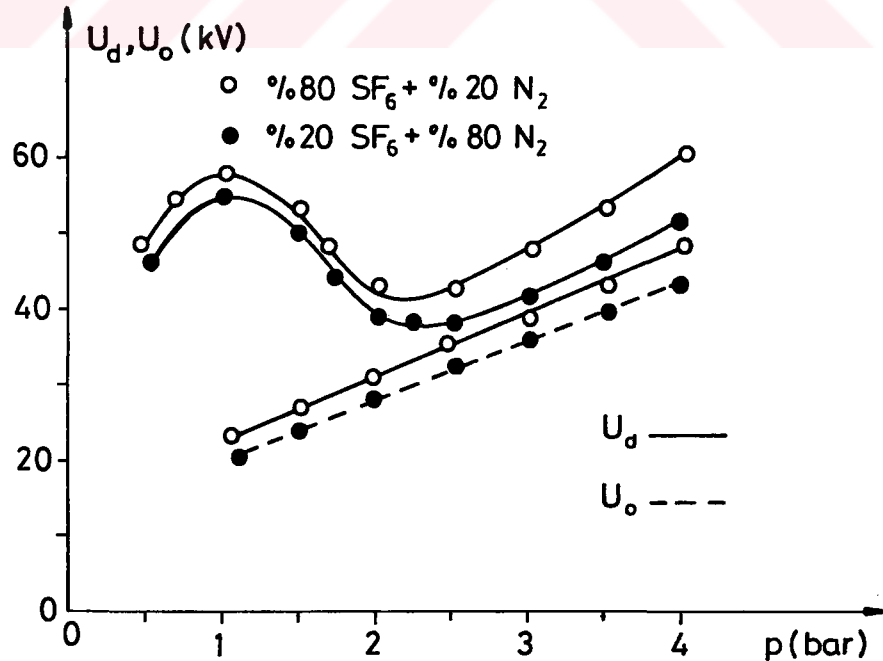


Şekil 4.29. Küre-düzlem ve çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde, N_2 gazında, pürüzlü elektrod ($r_p=6$ mm) durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

yaklaştığı ve kritik basıncında düştüğü sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan çubuk-düzlem elektrod sisteminde delinme gerilimi yaklaşık 3,5 ila 4 bar basınç aralığında hemen hemen sabit kaldığından, bu basınç aralığında yüzey pürüzlülüğünün delinme gerilimine etkisi olmadığı ortaya çıkmıştır.

4.4.3. Sıkıştırılmış SF_6+N_2 Gaz Karışımında, Alternatif Gerilimde, Düzlem Elektrod Yüzey Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerine Etkileri

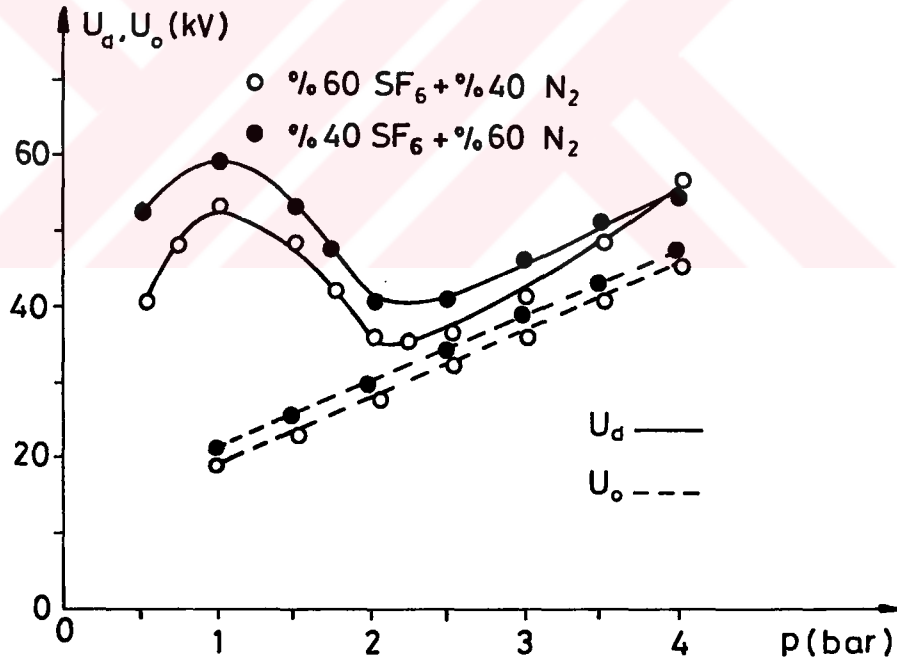
Deney sonuçlarına göre çizilen Şekil 4.30,31,32, 33,34,35 eğrilerinden karakteristiklerin doğru gerilimdeki benzerlik gösterdiği, alanın düzgünsüzlük derecesi büyük olduğunda delinme geriliminin bir maksimum-minimumdan geçtiği, düzgünsüzlük derecesi azaldıkça maksimum ve minimum delinme gerilimleri arasındaki farkın azaldığı görülmektedir. Diğer ilgi çekici bir nokta da p_{min} ve p_{kr} basınçlarının düzgünsüzlük derecesi ile birlikte yükselmesidir. Ayrıca söz konusu elektrod



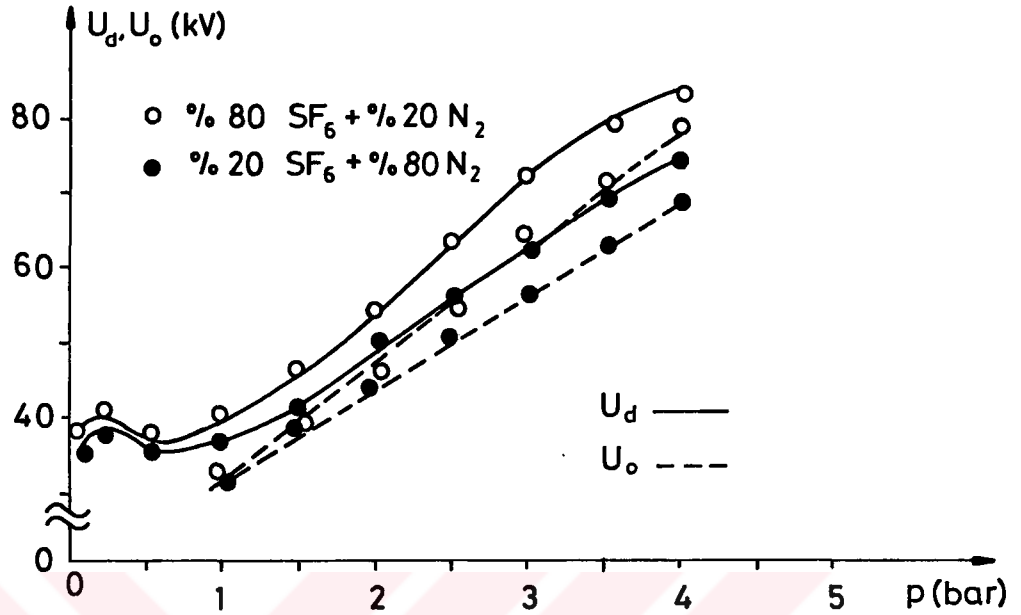
Şekil 4.30. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_2=3$ mm) durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

sistemleri için kritik basıncın 4 bardan daha büyük olduğu sonucuna varılmıştır. $\%20\text{SF}_6 + \%80\text{N}_2$ ve $\%80\text{SF}_6 + \%20\text{N}_2$ gaz karışımlarında yüzey pürüzlülüğü arttıkça delinme geriliminin düşük basınçlarda ($p < 2$ bar) eşit olduğu, ancak yüksek basınçlarda $\%80\text{SF}_6 + \%20\text{N}_2$ gaz karışımının delinme geriliminin $\%20\text{SF}_6 + \%80\text{N}_2$ gaz karışımının delinme gerilimine oranla daha yüksek olduğu gözlenmiştir. $\%40\text{SF}_6 + \%60\text{N}_2$ ve $\%60\text{SF}_6 + \%40\text{N}_2$ gaz karışımlarında ise yukarıdaki durumun tam tersi söz konusu olmaktadır.

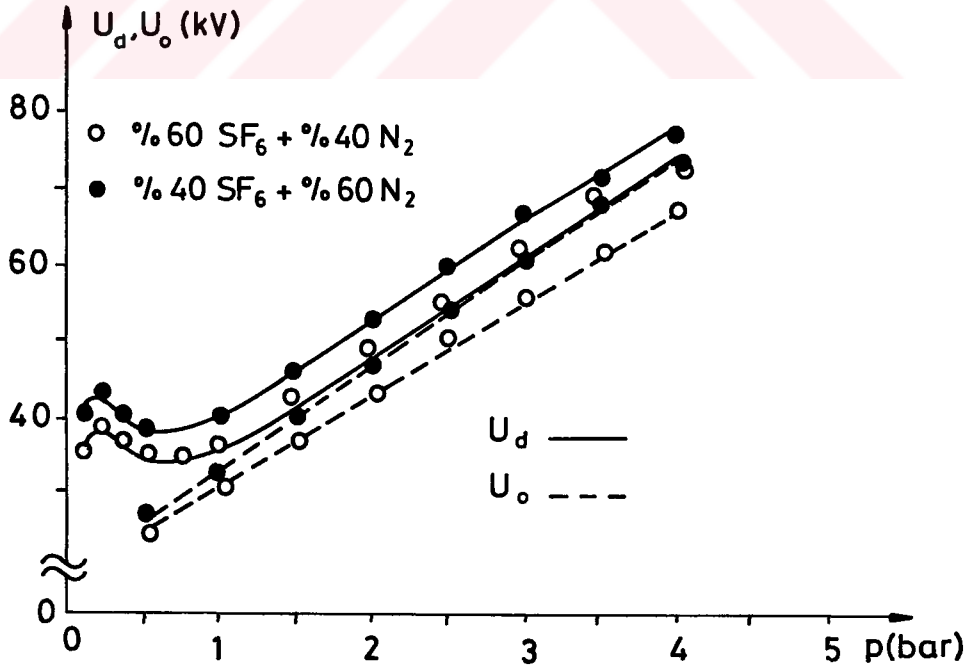
Öte yandan yüzey pürüzlülüğü yükseldikçe delinme geriliminin maksimum ve minimum değerleri arasındaki farkın tüm gaz karışım oranları için azaldığı görülmüştür. Bu durum düzgünsüzlük derecesi büyük olan alanlarda daha belirgin olarak ortaya çıkmaktadır.



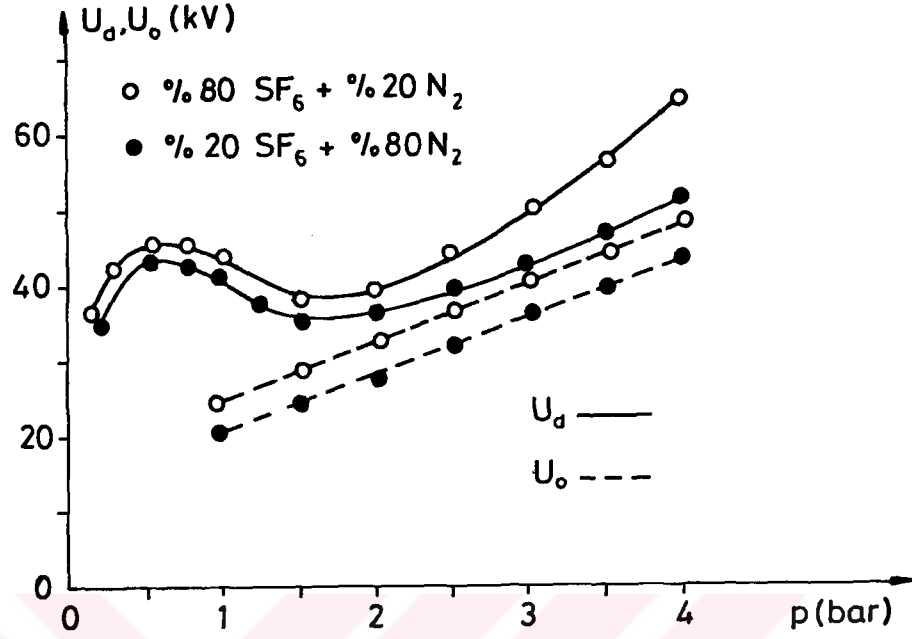
Şekil 4.31. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_p = 3$ mm) durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



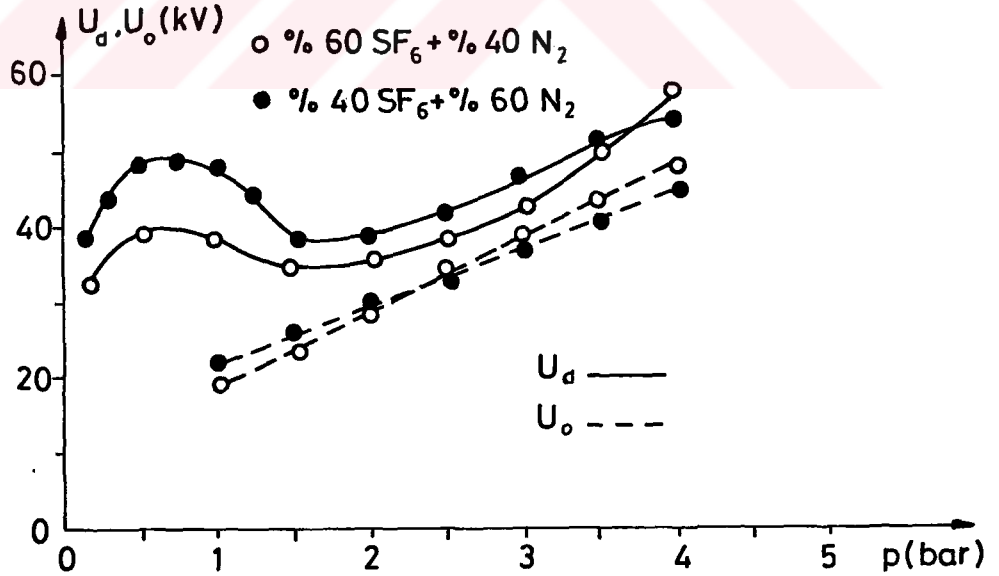
Şekil 4.32. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_6=3$ mm) durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



Şekil 4.33. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_6=3$ mm) durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



Şekil 4.34. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_p=6$ mm) durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.



Şekil 4.35. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, farklı oranda SF_6+N_2 gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_p=6$ mm) durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi.

BÖLÜM 5

DENEY SONUÇLARININ YORUMLANMASI

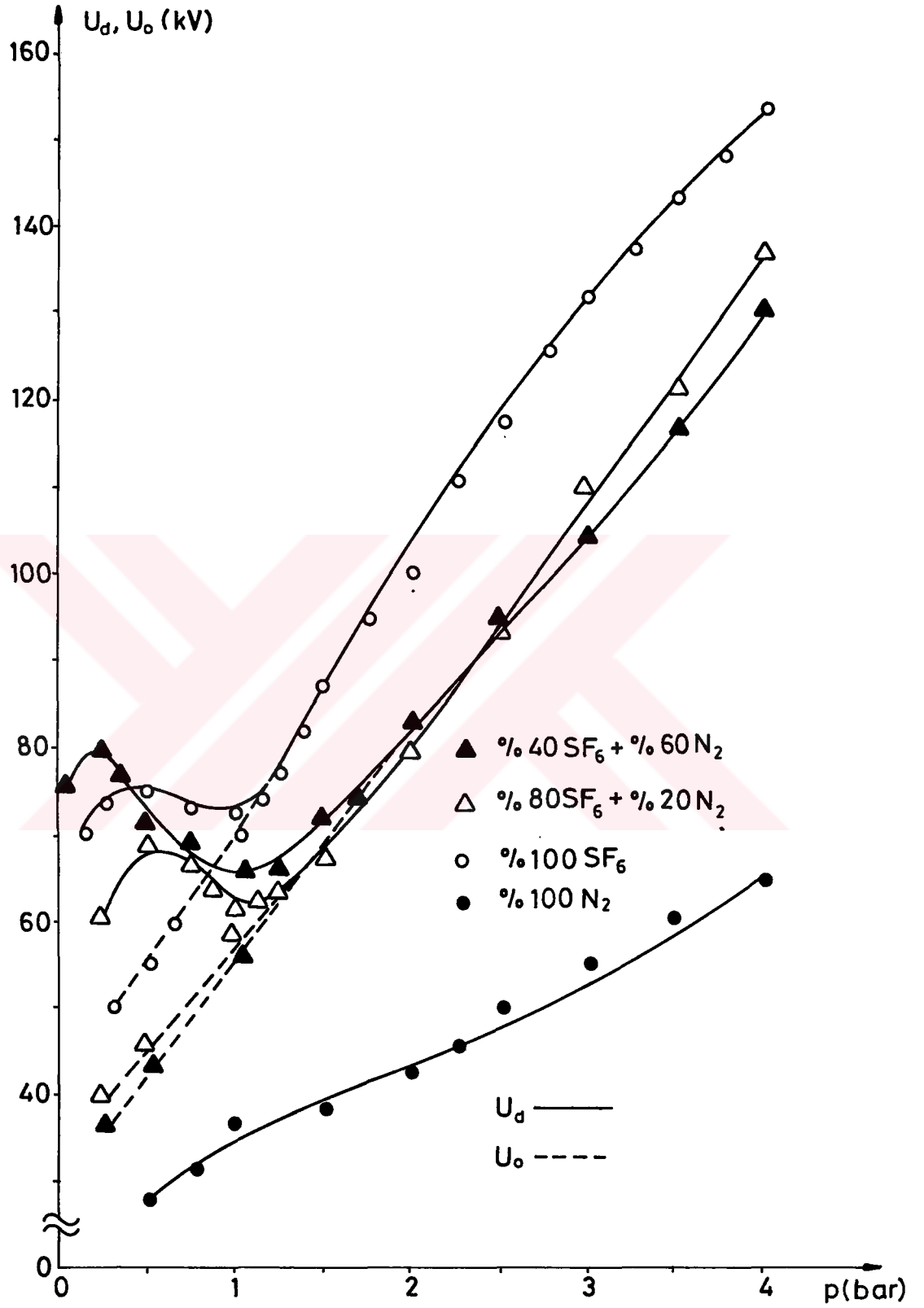
5.1. Pürüzsüz Elektrod Sistemlerinde (Küre-Düzlem, Çubuk-Düzlem) N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 Gazlarında, $a=20$ mm Elektrod Açıklığında Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerinin Karşılaştırılması

5.1.1. Pozitif ve Negatif Doğru Gerilim

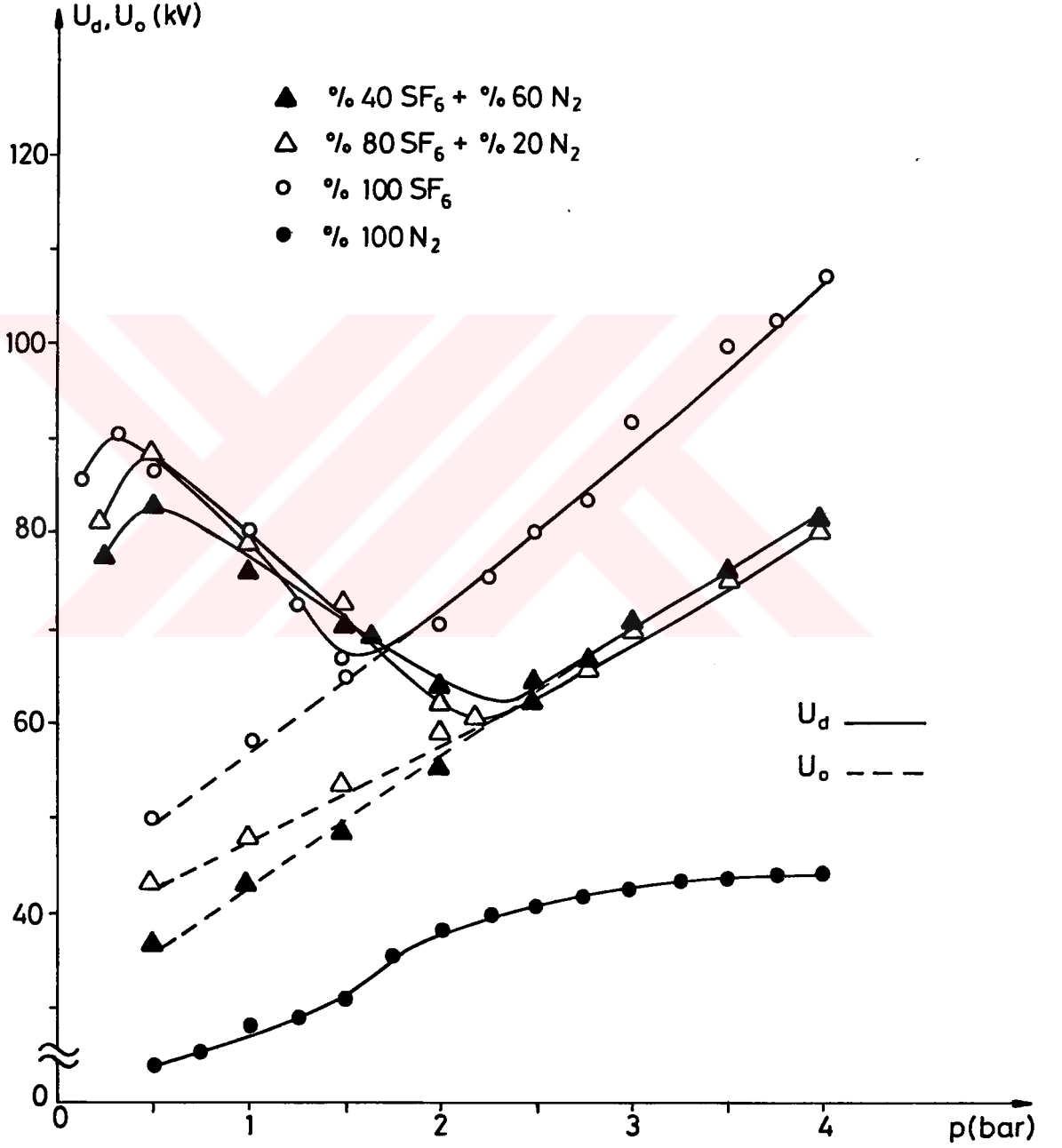
5.1.1.a) Pozitif Doğru Gerilim

Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'de $a=20$ mm için çıkarılan eğrilere bakılacak olursa SF_6 ve SF_6+N_2 gaz karışımlarında kararlı korona bölgesinde delinme geriliminin korona başlangıç geriliminden yüksek olduğu, ayrıca bir maksimum-minimumdan geçtiği görülür. Bu bölgedeki delinme gerilimine literatürde "korona bakımından kararlı delinme gerilimi" adı verilmektedir [25]. Söz konusu bölgede korona ile oluşan uzay yüklerinin, elektrik alanını, küre ve çubuk elektrod üzerinde veya yanında kararlı hale getirmesiyle ortamın delinebilmesi için daha yüksek gerilimlere ihtiyaç duyulduğu gözlenmiştir. Basınç, kritik basıncın üzerine çıkarıldığında aynı eğrilerden korona ile delinme gerilimi eğrilerinin çakıştığı görülebilir (Bölüm 4'de eğrilerin yorumlanmasıyla ilgili olarak daha geniş bilgi verilmiştir). Diğer taraftan SF_6+N_2 gaz karışımlarına ilişkin kritik basınçların, SF_6 gazına ilişkin kritik basınçlardan daha yüksek olduğu saptanmıştır. Örneğin çubuk-düzlem elektrod sisteminde %100 SF_6 için $p_{kr}=1,75$ bar ve %80 SF_6 +%20 N_2 için $p_{kr}=2,5$ bar bulunmuştur (Şekil 5.2).

Genel olarak $p<1$ bar bölgesinde, SF_6 , SF_6+N_2 gaz karışımlarına ilişkin delinme gerilimlerinin değişik

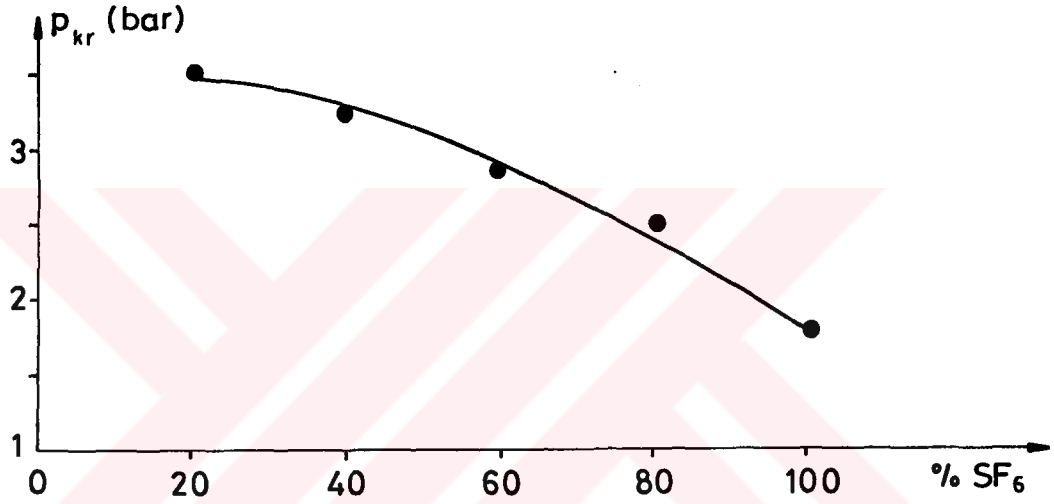


Şekil 5.1. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 , N_2 ve farklı oranda gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, pozitif doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.2. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, SF₆, N₂ ve farklı oranda gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, pozitif doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.

elektrod sistemlerinde, alanın düzgünsüzlük derecesine de bağılı olarak birbirine yaklaştığı söylenebilir. Şekil 5.1 ve Şekil 5.2'ye bakıldığında korona başlangıç gerilimlerinin ise gaz karışımındaki SF_6 yüzdesi ile arttığı görülebilir. Bu durum, SF_6 gaz oranının artmasıyla elektronun bileşke iyonlaştırma sayısının ($\bar{\alpha}=\alpha-\eta$) küçülmesi ve buna bağılı olarak karışımın dielektrik dayanımının artması şeklinde açıklanabilir. Gerçekten de gaz basıncı arttıkça gaz yoğunluğunun artması nedeniyle korona başlangıç gerilimide artar [25],[26]. Şekil 5.3'de pozitif



Şekil 5.3. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, pozitif doğru gerilimde, kritik basıncın gaz karışımındaki SF_6 nın oranı ile değişimi.

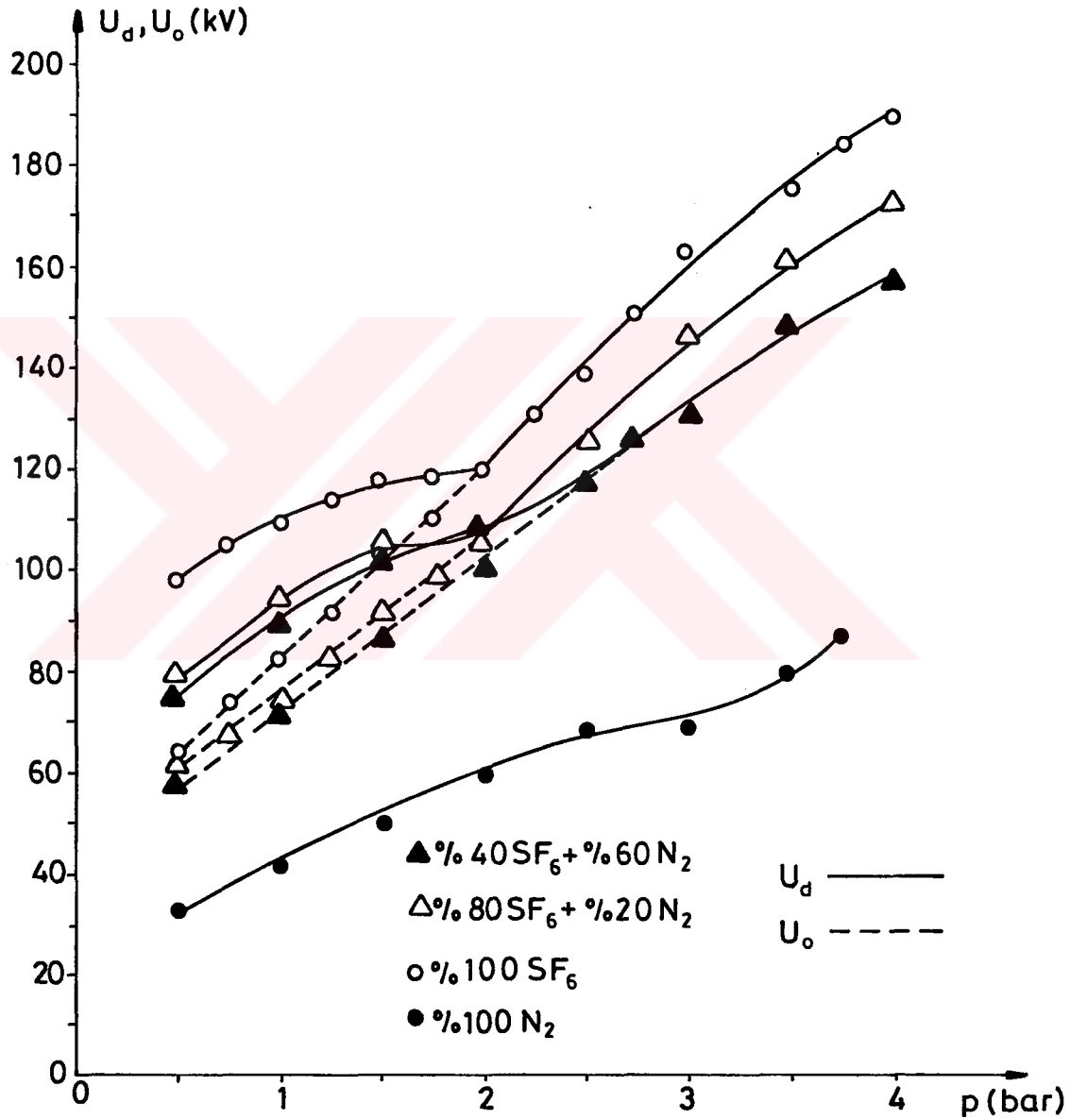
doğru gerilimde SF_6 ve N_2 gaz karışım oranlarına göre p_{kr} basıncı çizilmiştir. Ayrıca alan düzgünsüzlüğü arttıkça, pozitif doğru gerilim için %40 SF_6 +%60 N_2 gaz karışımındaki delinme geriliminin, %80 SF_6 +%20 N_2 gaz karışımının delinme gerilimine yaklaştığı saptanmıştır. Örneğin η =% 12,457 olan çubuk-düzlem elektrod sisteminde söz konusu gaz karışımlarında delinme gerilimleri arasında hemen hemen hiç bir fark olmadığı gözlenmiştir. η <% 12,457 içinse yüksek basınçlarda %80 SF_6 +%20 N_2 gaz karışımının delinme geriliminin %40 SF_6 +%60 N_2 gaz karışımına oranla daha büyük olmuş, düşük basınçlarda ise yukarıda sözü edilen durumun tersi görülmüştür.

Söz konusu elektrod sistemlerinde, %40 SF₆+%60 N₂ gaz karışımı durumunda, pozitif doğru gerilimde delinme gerilimi değerlerinin %60 SF₆+%40 N₂ gaz karışımı durumdaki değerlerden daha yüksek olduğu ortaya çıkmıştır. SF₆+N₂ gaz karışımlarında gözlenen bu ilginç özellikler, elektronlarla ilgili büyüklüklerdeki değişimlerle açıklanabilir. Gaz karışımındaki elektronların enerji dağılımı saf SF₆ gazındakine göre farklılık gösterecektir. Buna bağlı olarak elektron çıkışının ortalama enerjisinde, elektron sürüklenme hızında ve yayılma (difüzyon) katsayılarında farklılıklar olacaktır. Ayrıca SF₆ nın foton yutma katsayısının gaz karışımında artan N₂ gaz oranı ile değiştiği gözlenmiştir [5]. Öte yandan SF₆+N₂ gaz karışımlarında ölçülen bileşke iyonlaştırma katsayısının E/p ye göre değişiminin, saf SF₆ gazına oranla daha yatay bir davranış göstermesi sonucu, düzgün olmayan alanlarda, SF₆+N₂ gaz karışımının SF₆ ya oranla daha iyi davrandığı ortaya çıkmıştır [5],[6].

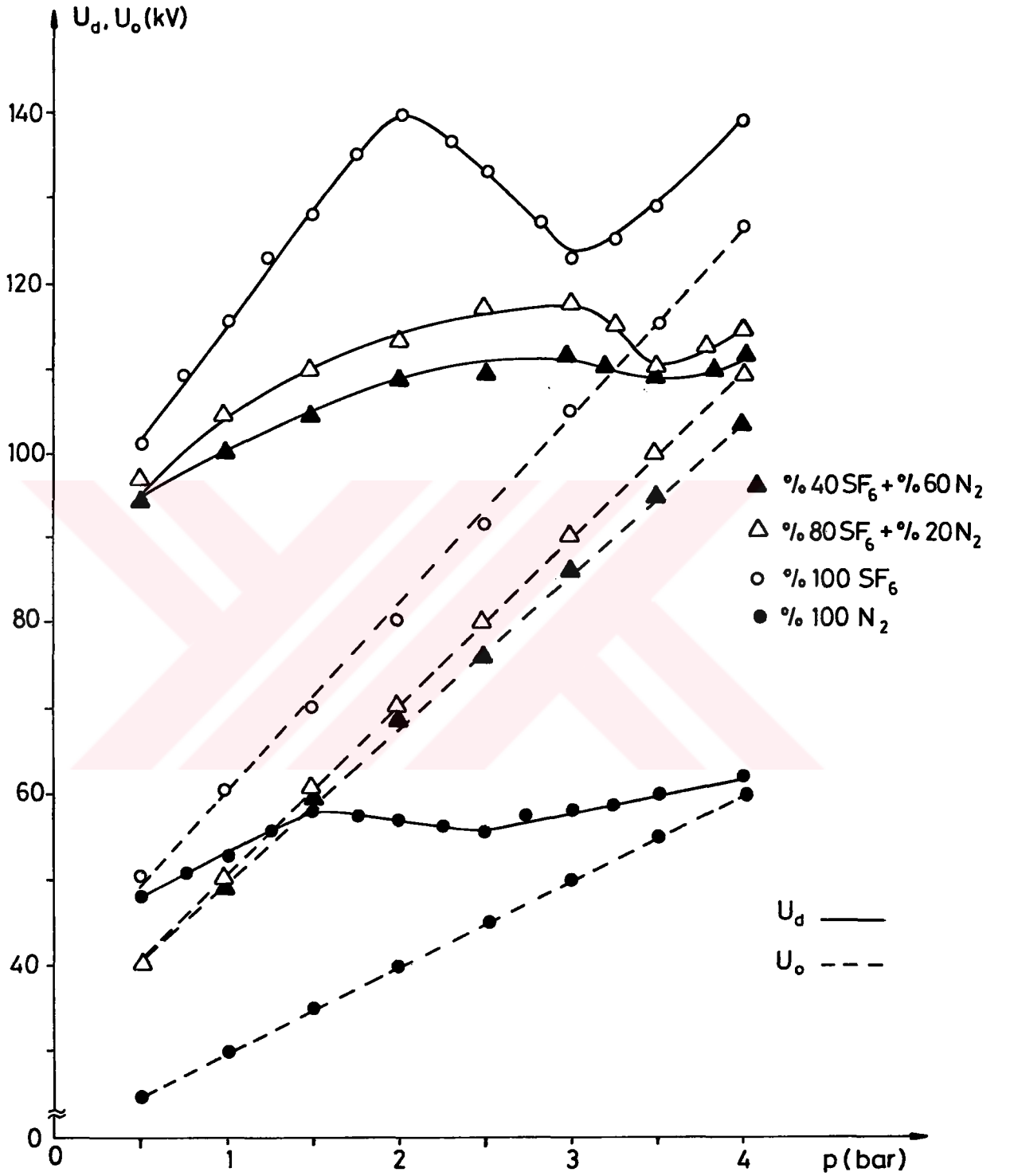
5.1.1.b) Negatif Doğru Gerilim

Şekil 5.4, Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da a=20 mm için çıkarılan eğrilere bakılacak olursa SF₆, N₂ ve SF₆+N₂ gaz karışımlarında negatif doğru gerilimde kararlı korona bölgesinin çok etkin olduğu gözlenir [27]. Genel olarak delinme geriliminin pozitif kutbiyetteki ile aynı karakterde olduğu, bunun yanında kritik basıncın negatif kutbiyetde, pozitifte oranla daha yüksek bulunduğu saptanmıştır [15],[16].

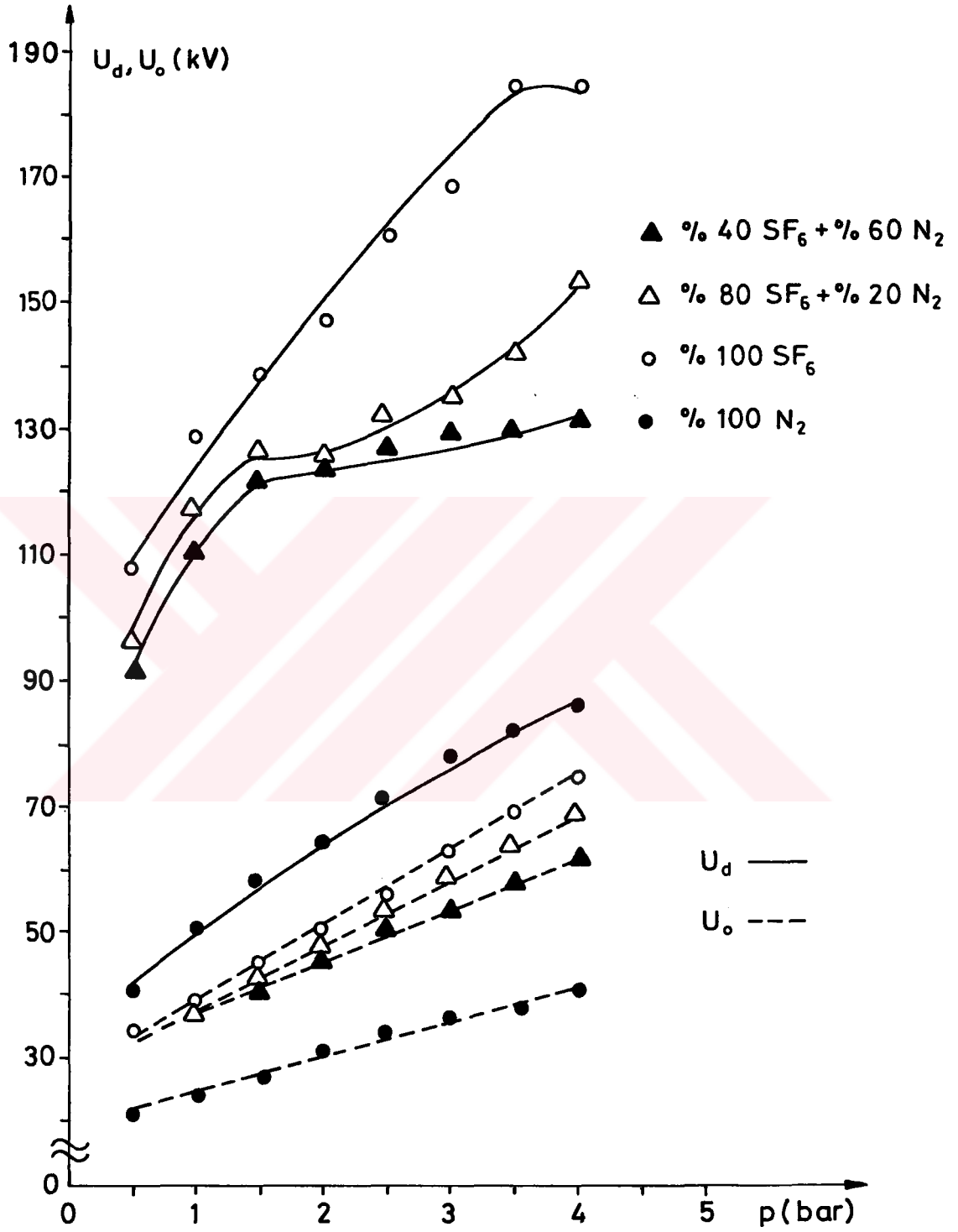
Alanın düzgünsüzlük derecesi arttıkça kritik basıncın arttığı da görülmüştür. Örneğin r=1 mm çubuk-düzlem elektrod sisteminde, kritik basıncın 4 bardan büyük olduğuna karar verilmiştir. Düşük basınçlarda pozitif doğru gerilimde olduğu gibi delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin SF₆ ve SF₆+N₂ gaz karışımlarında birbirine doğru yaklaştığı, ancak yüksek basınçlarda, alanın düzgünsüzlük derecesinin büyüklüğüne de bağlı olarak



Şekil 5.4. 4 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 , N_2 ve farklı oranda gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, negatif doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



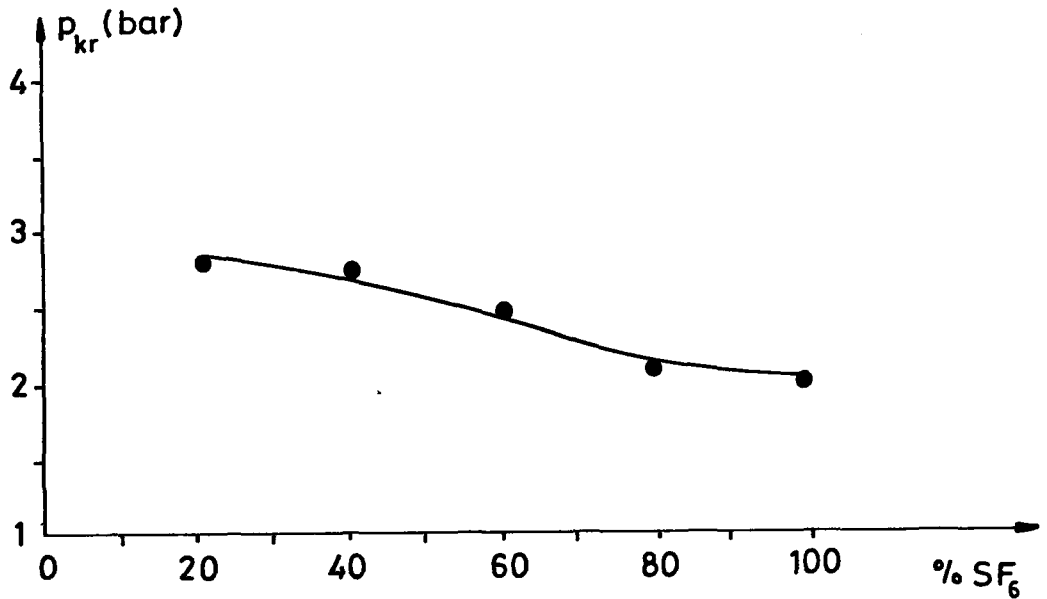
Şekil 5.5. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 , N_2 ve farklı oranda gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, negatif doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.6. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, SF₆, N₂ ve farklı oranda gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, negatif doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.

negatif doğru gerilimde gaz karışımındaki SF_6 oranının artması ile birlikte delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin yükseldiği gözlenmiştir. Pozitif kutbiyette olduğu gibi negatif kutbiyette de $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımına ilişkin kritik basınç SF_6 ya ilişkin kritik basınçtan yüksektir. Ancak $r=1$ mm yarıçapında çubuk-düzlem elektrod sisteminde SF_6 ve $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımına ilişkin kritik basınçların 4 bardan yüksek olduğunun anlaşılması nedeni ile kritik basınç değerlerinin birbirlerine göre olan durumları hakkında bir şey söylemek mümkün değildir.

Korona başlangıç gerilimleri negatif kutbiyette yaklaşık olarak pozitiftekine benzer bir karakteristiğe sahiptir. Şekil 5.7'de negatif doğru gerilimde küre-düzlem ($r=4$ mm) elektrod sisteminde SF_6 ve N_2 gaz karışım oranlarına göre p_{kr} basıncı çizilmiştir. Söz konusu elektrod sistemlerinde %40 SF_6 + %60 N_2 gaz karışımı durumunda, negatif doğru gerilimde delinme gerilimi değerlerinin %60 SF_6 + %40 N_2 gaz karışımı durumundaki değerlere çok yaklaştığı ortaya çıkmıştır. Bu özellik, pozitif doğru gerilimdeki sonuçların karşılaştırılması bölümünde açıklanmıştır.



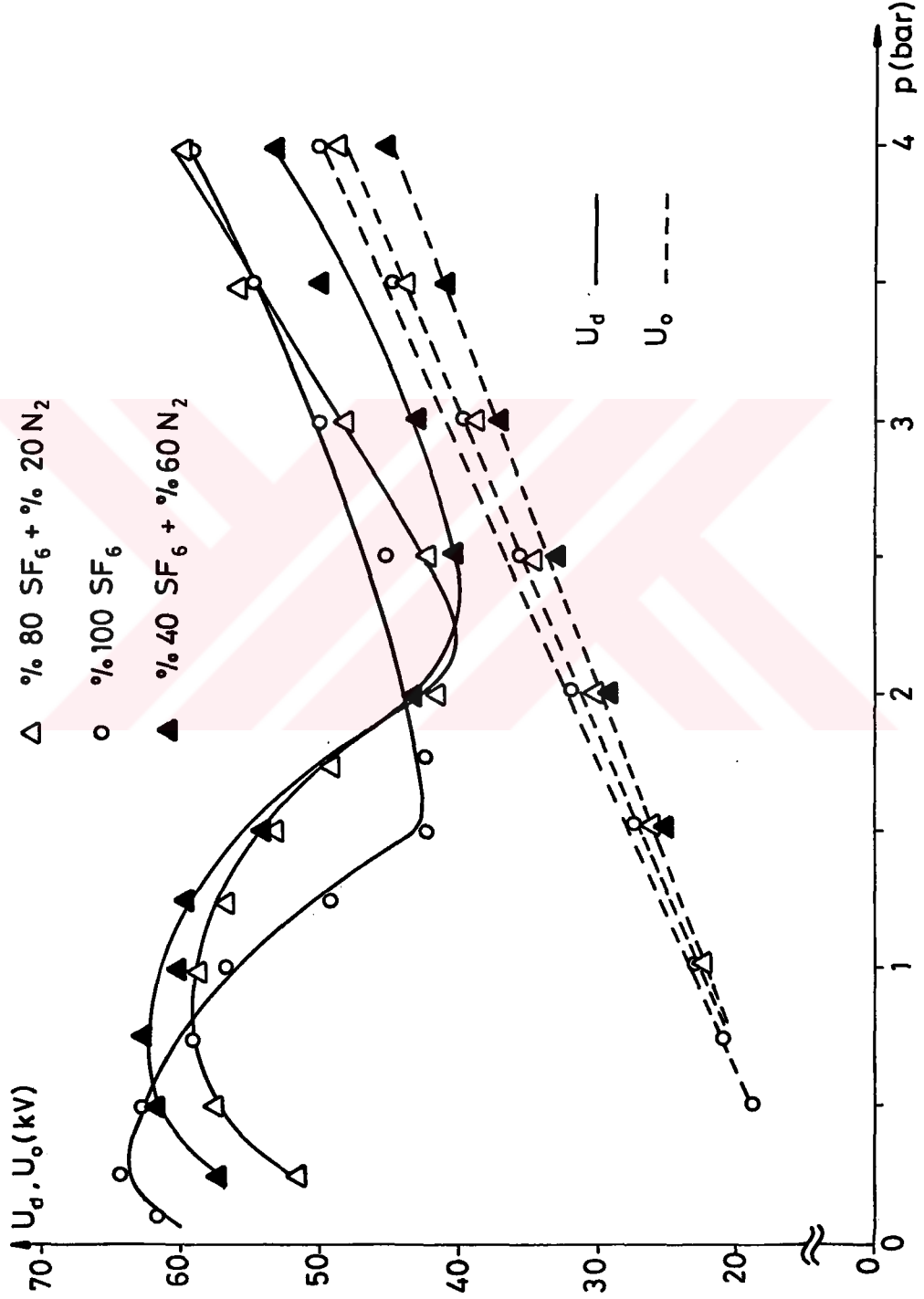
Şekil 5.7. 4 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, negatif doğru gerilimde, kritik basıncın gaz karışımındaki SF_6 nın oranı ile değişimi.

5.1.2. Alternatif Gerilim (50 Hz)

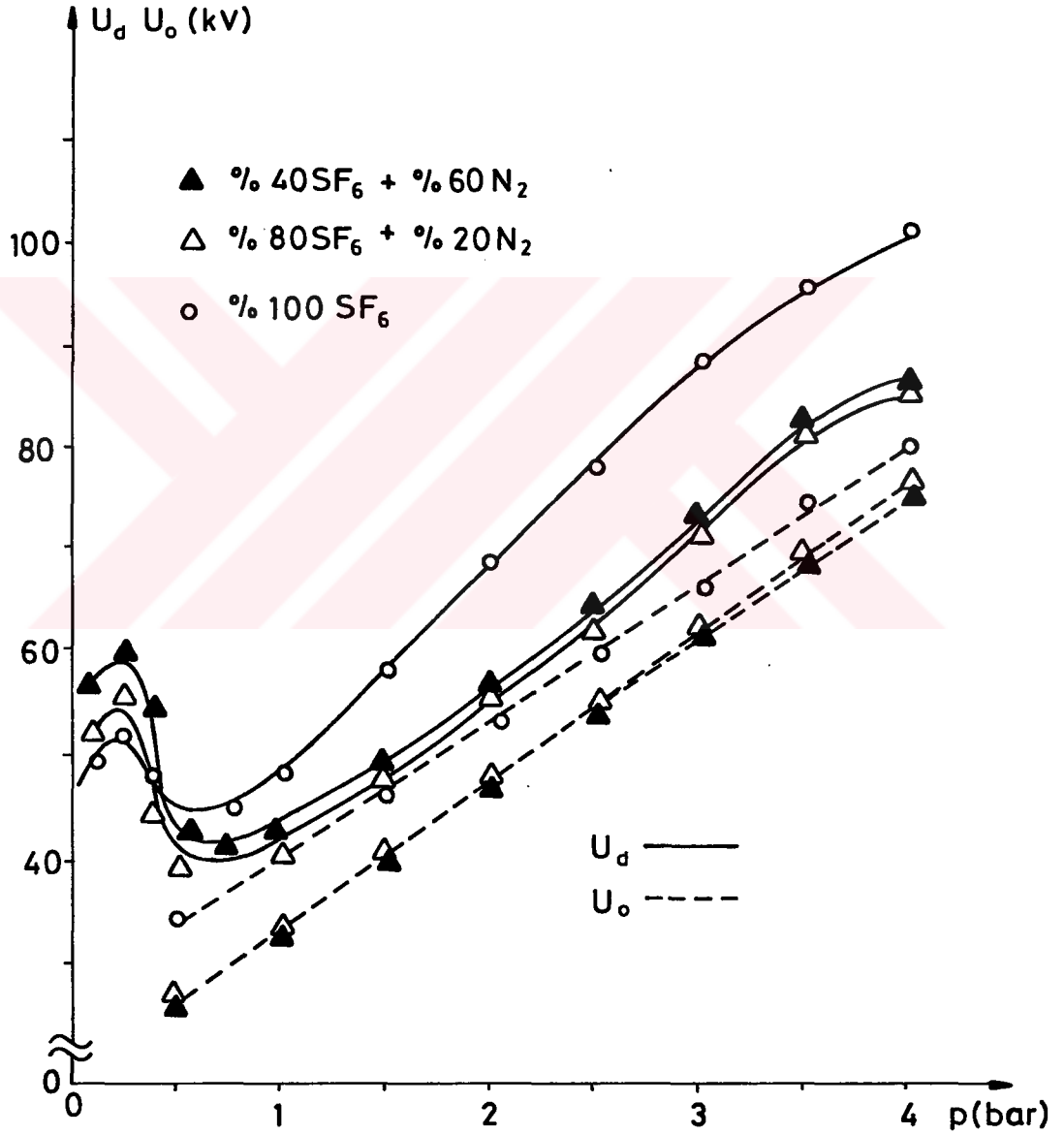
50 Hz alternatif gerilimde, küre-düzlem, çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde $a=20$ mm elektrod açıklığında SF_6 ve SF_6+N_2 gaz karışımlarında yapılan deneyler sonucu çizilen ve Şekil 5.8 ve Şekil 5.9 da verilen eğrilere bakılacak olursa, genel olarak alan düzgünlüğü azaldıkça delinme ve korona başlangıç gerilimleri arasındaki farkın azaldığı görülür. Korona başlangıç gerilimi ise (0+4) bar basınç aralığında hemen hemen lineer olarak artmış ve kararlı korona bölgesinin 4 bar'dan büyük olduğu saptanmıştır. Bu nedenle SF_6 ve SF_6+N_2 gaz karışımları için kritik basıncın ne değeri aldığı konusunda bir şey söylemek mümkün değildir.

Aynı şekiller, korona başlangıç geriliminin gaz karışımında bulunan SF_6 nın yüzdesine de bağlı olarak yükseldiğini göstermektedir. Korona başlangıç gerilimindeki bu yükselme SF_6 yüzdesinin artması sonucu bileşke iyonizasyon katsayısının (α) azalmasıyla açıklanır. Ayrıca U_0 korona başlangıç geriliminin gaz karışımlarının tüm kombinasyonlarında ve (0+4) bar basınç aralığında kararlı bir değere ulaşmadan lineer olarak arttığı gözlenen bir sonuçtur [25]. Öte yandan alan düzgünlüğünün artmasıyla ve SF_6 yüzdesinin azalmasıyla minimum basınç değerinin (p_{min}) yükseldiği gözlenmiştir. Örneğin, çubuk-düzlem elektrod sisteminde ($r=1$ mm) %100 SF_6 için $p_{min}=1,5$ bar iken %80 SF_6 +%20 N_2 için $p_{min}=2,25$ bar olarak tesbit edilmiştir.

Diğer taraftan $U_d=f(p)$ eğrisinin eğiminin negatif olduğu bölgede $\xi=\% 6,9$ için delinme gerilimi basınç arttıkça hızla azalmakta, $\xi=\% 12,45$ değerinde ise bu azalma daha yavaş olmaktadır. Bu durum değişik oranlardaki gaz karışımları için geçerlidir. Diğer önemli bir nokta da, çubuk-düzlem elektrod sisteminde %100 SF_6 ile %80 SF_6 +%20 N_2 gaz karışımının delinme gerilimlerinin hemen hemen (3+4) bar basınç aralığında eşit olmasıdır. Söz konusu



Şekil 5.8. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 ve farklı oranda gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.9. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 ve farklı oranda gaz karışımlarında, pürüzsüz elektrod durumunda, 50 Hz alternatif gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.

durum pozitif doğru gerilimde de açıklandığı gibi ortaya çıkmıştır.

5.2. Pürüzlü Elektrod Sistemlerinde N_2 , SF_6 ve SF_6+N_2 Gazlarının, Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerinin Karşılaştırılması

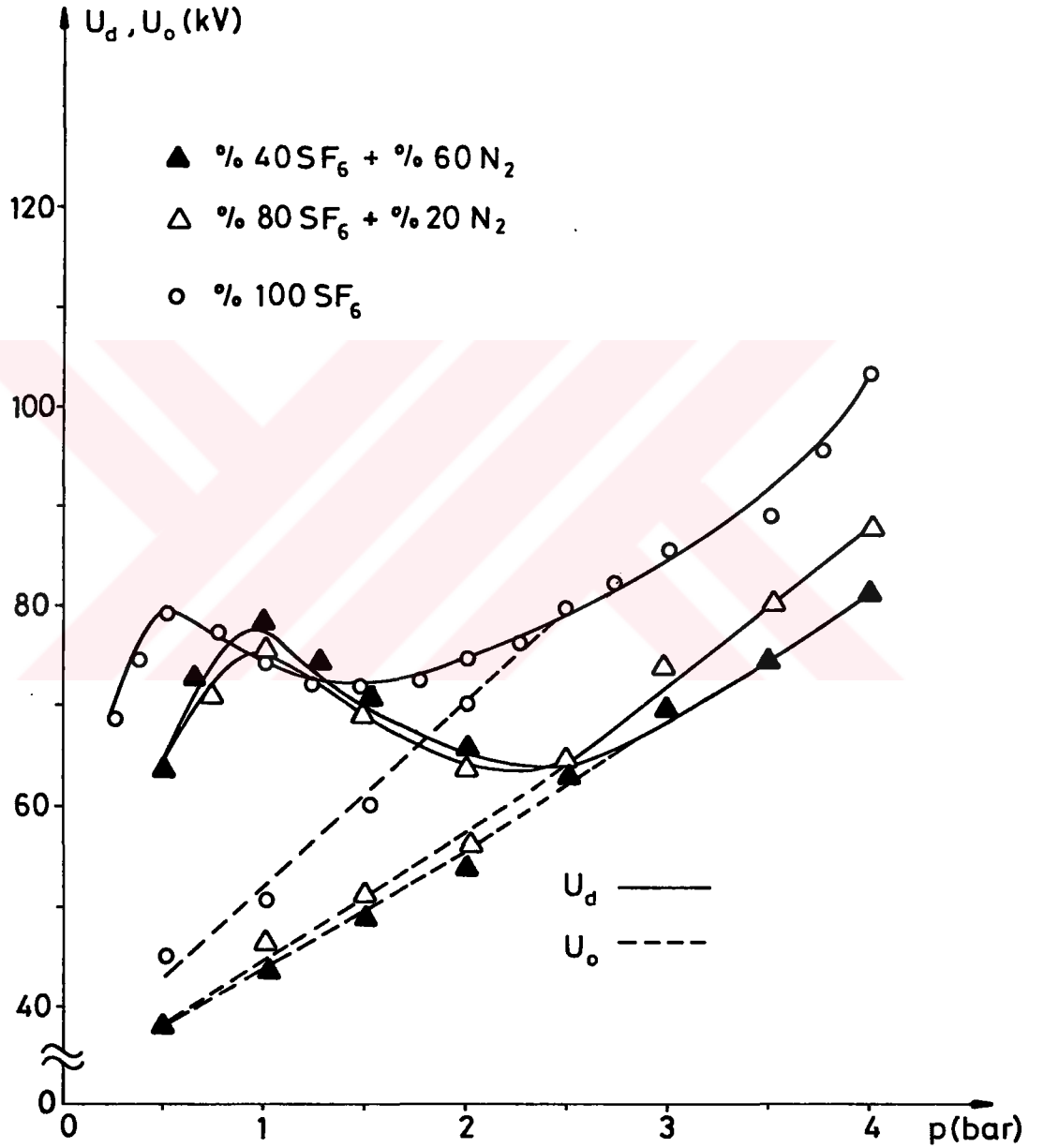
5.2.1. Pozitif ve Negatif Doğru Gerilim

Pürüzsüz elektrod sistemleri için Bölüm 5.1.1'de anlatılan hususlar aynı biçimde pürüzlü elektrod sistemleri için de geçerlidir. Özetlenecek olursa SF_6 gazında kritik basıncın SF_6+N_2 gazı karışımına göre daha düşük olduğu, ayrıca korona başlangıç gerilimlerinin lineer olarak arttığı ve düşük basınçlar durumunda delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin birbirine yaklaştığı söylenebilir. Alanın düzgünsüzlük derecesi büyüdükçe negatif gerilimlerde kritik basıncın 4 bar dan yüksek olduğu ve genel olarak negatif kutbiyette kararlı korona bölgesinin pozitif kutbiyete oranla daha geniş olduğu gözlenmiştir (Şekil 5.10, 5.11, 5.12 ve 5.13).

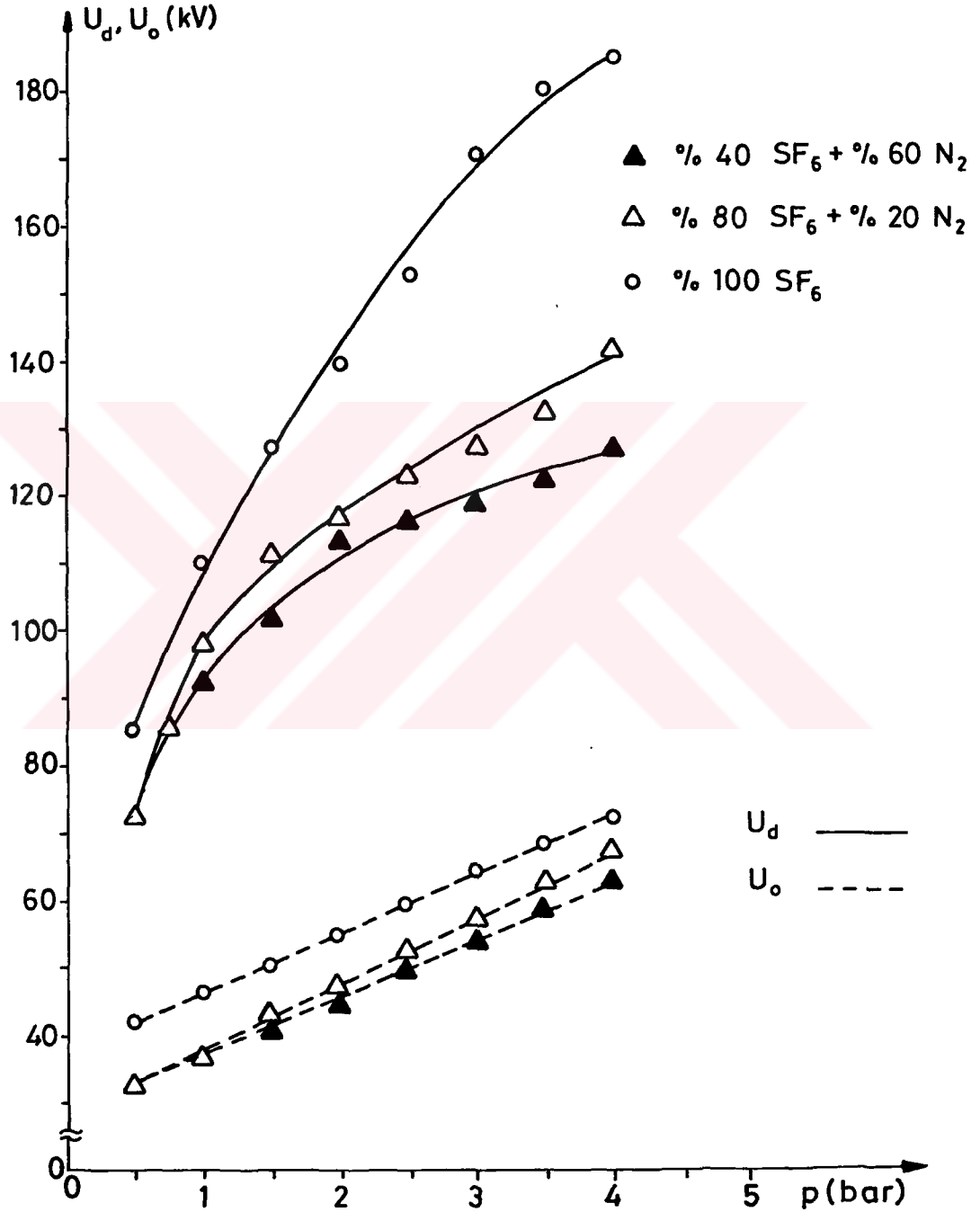
Diğer taraftan çubuk-düzlem elektrod sisteminde ($\xi=12,45$), yüzey pürüzlülüğünün 3 mm olması halinde pozitif doğru geriliminde, kararlı korona bölgesinde ($80\% SF_6 + 20\% N_2$) gaz karışımındaki delinme gerilimi $40\% SF_6 + 60\% N_2$ gaz karışımının delinme gerilimine çok yaklaştığı ve bu bölgenin dışında ise karışımındaki SF_6 oranının artmasıyla delinme geriliminin yükseldiği saptanmıştır.

N_2 gazında ise pozitif doğru gerilimde kullanılan elektrod sistemlerinde koronaya rastlanmamış ve bu nedenle (0-4) bar basınç aralığında "direkt delinme" meydana gelmiştir (Şekil 5.12).

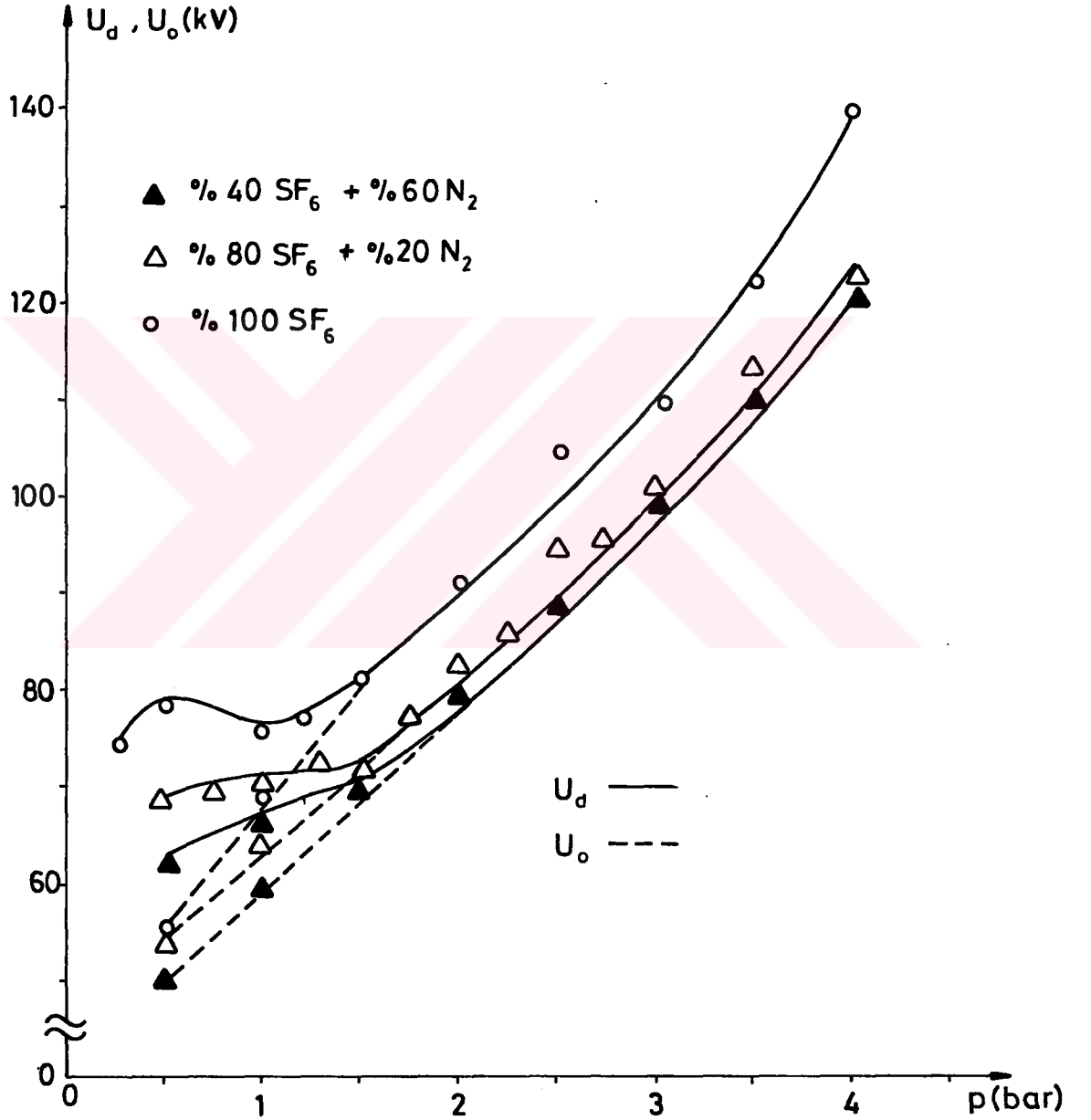
Ayrıca sıkıştırılmış N_2 gazında negatif doğru gerilimde delinmeden önce daima korona başlangıç geriliminin



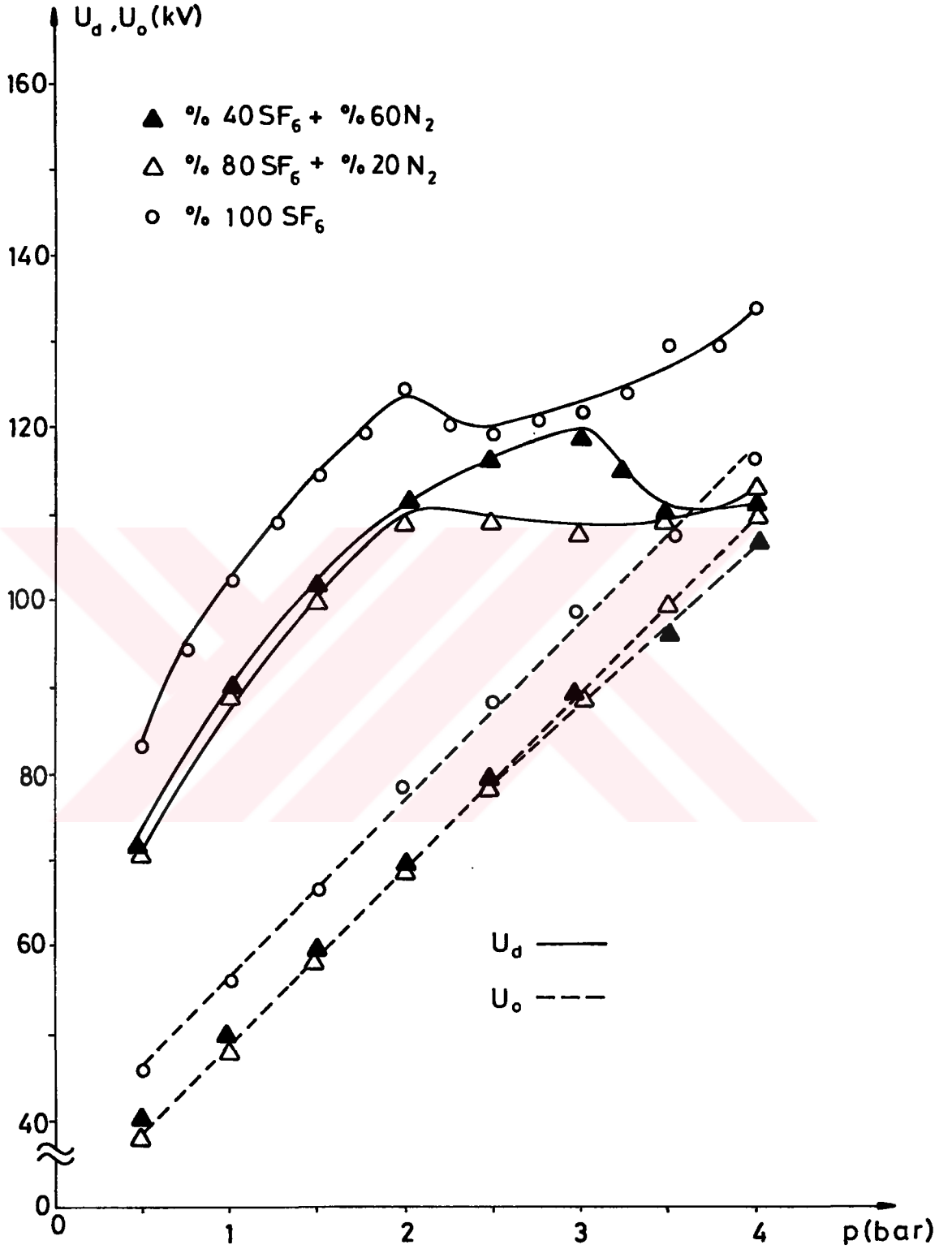
Şekil 5.10. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 ve farklı oranda gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_p=3$ mm) durumunda, pozitif doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.11. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 ve farklı oranda gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_p=3$ mm) durumunda, negatif doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.12. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, SF₆ ve farklı oranda gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod (r_p=3 mm) durumunda, pozitif doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.13. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 ve farklı oranda gaz karışımlarında, pürüzlü elektrod ($r_p=3$ mm) durumunda, negatif doğru gerilimde delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.

görüldüğü ve alan düzgünsüzlüğü azaldıkça bu gerilimin delinme gerilimine doğru yaklaştığı elde edilen diğer bir sonuçtur.

Küre-düzlem elektrod sisteminde, negatif doğru gerilimde yüzey pürüzlülüğü 3 mm iken ($\xi = 6,9$) SF_6 , N_2 ve SF_6+N_2 gaz karışımlarında (0-4) bar basınç aralığında, delinme geriliminin bir maksimum-minimumdan geçtiği saptanmıştır.

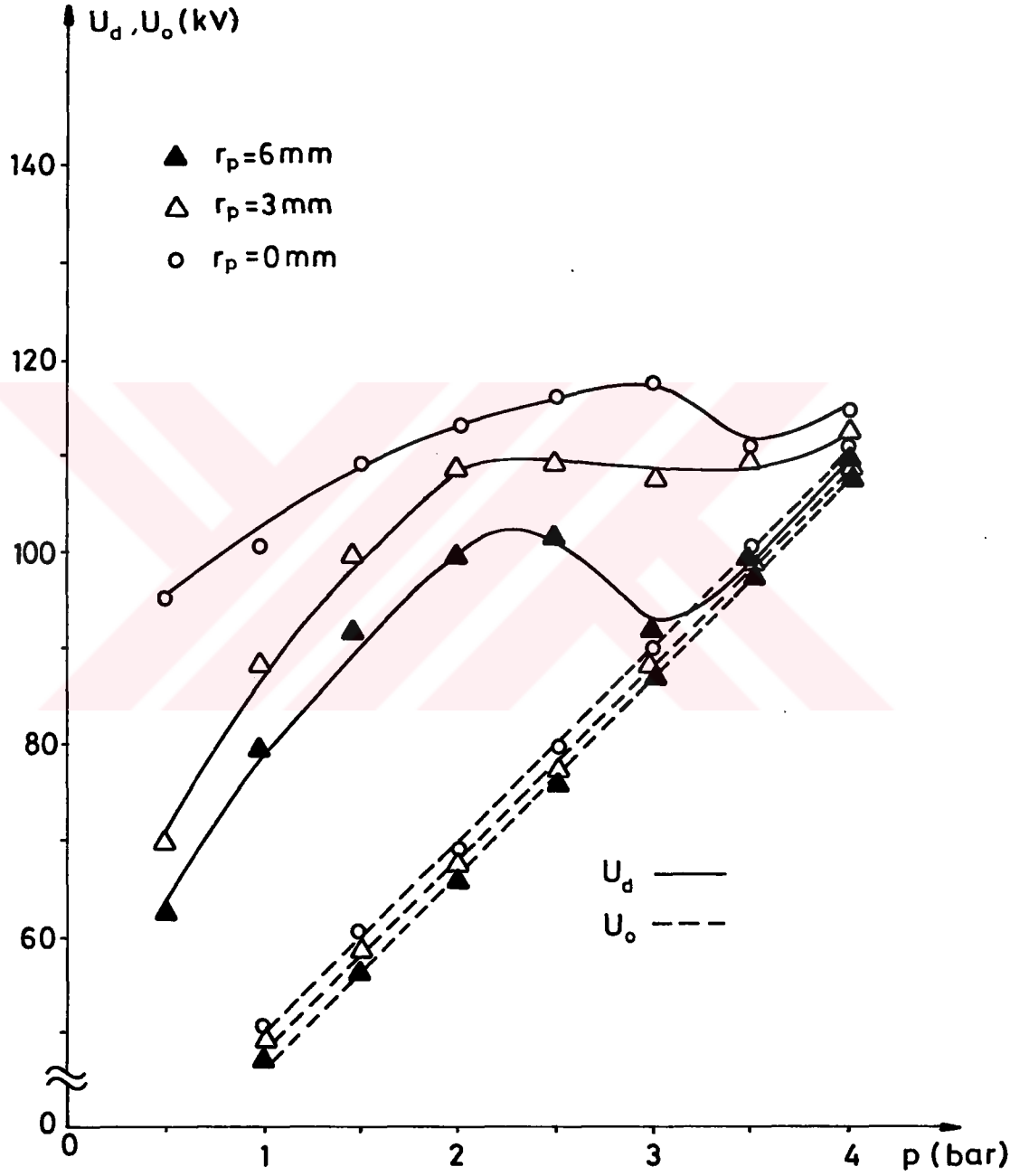
5.2.2. Alternatif Gerilim (50 Hz)

50 Hz alternatif gerilimde, küre-düzlem, çubuk-düzlem elektrod sisteminde $a=20$ mm elektrod açıklığında SF_6 ve SF_6+N_2 gaz karışımlarında ve yüzey pürüzlülüğünün söz konusu olması durumunda yapılan deney sonucu Bölüm 4'de çizilen eğrilere bakılacak olursa yüzey pürüzlülüğünün olmadığı durumda çıkarılan eğrilerle aynı karakteristiğe sahip olduğu gözlenir. Bölüm 5.1.2'de anlatılanlar bu bölüm için de geçerlidir.

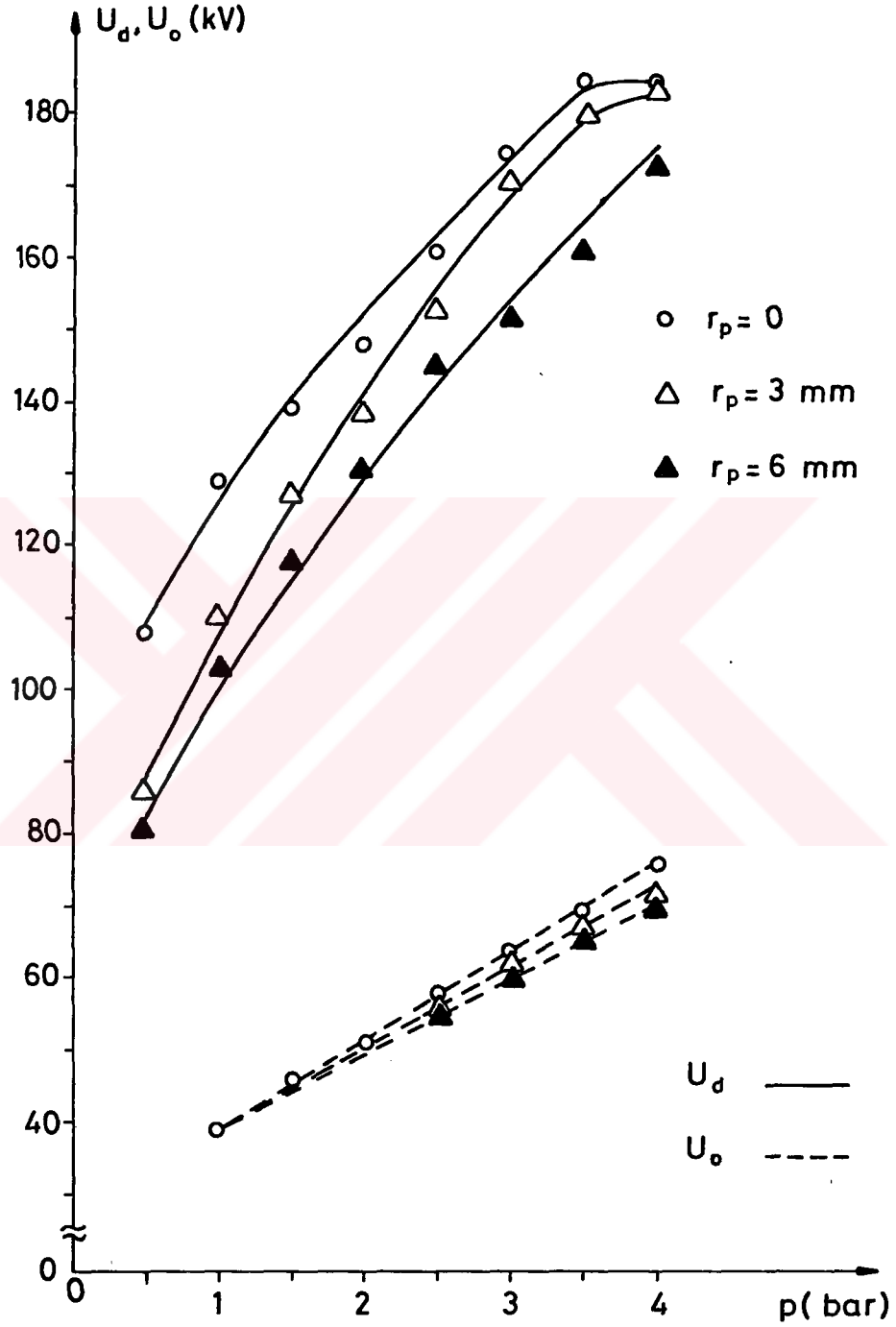
5.3. Pürüzsüz ve Pürüzlü Elektrod Sistemlerinde, SF_6 , SF_6+N_2 Gaz Karışımlarının Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimlerinin Karşılaştırılması

5.3.1. Pozitif ve Negatif Doğru Gerilim

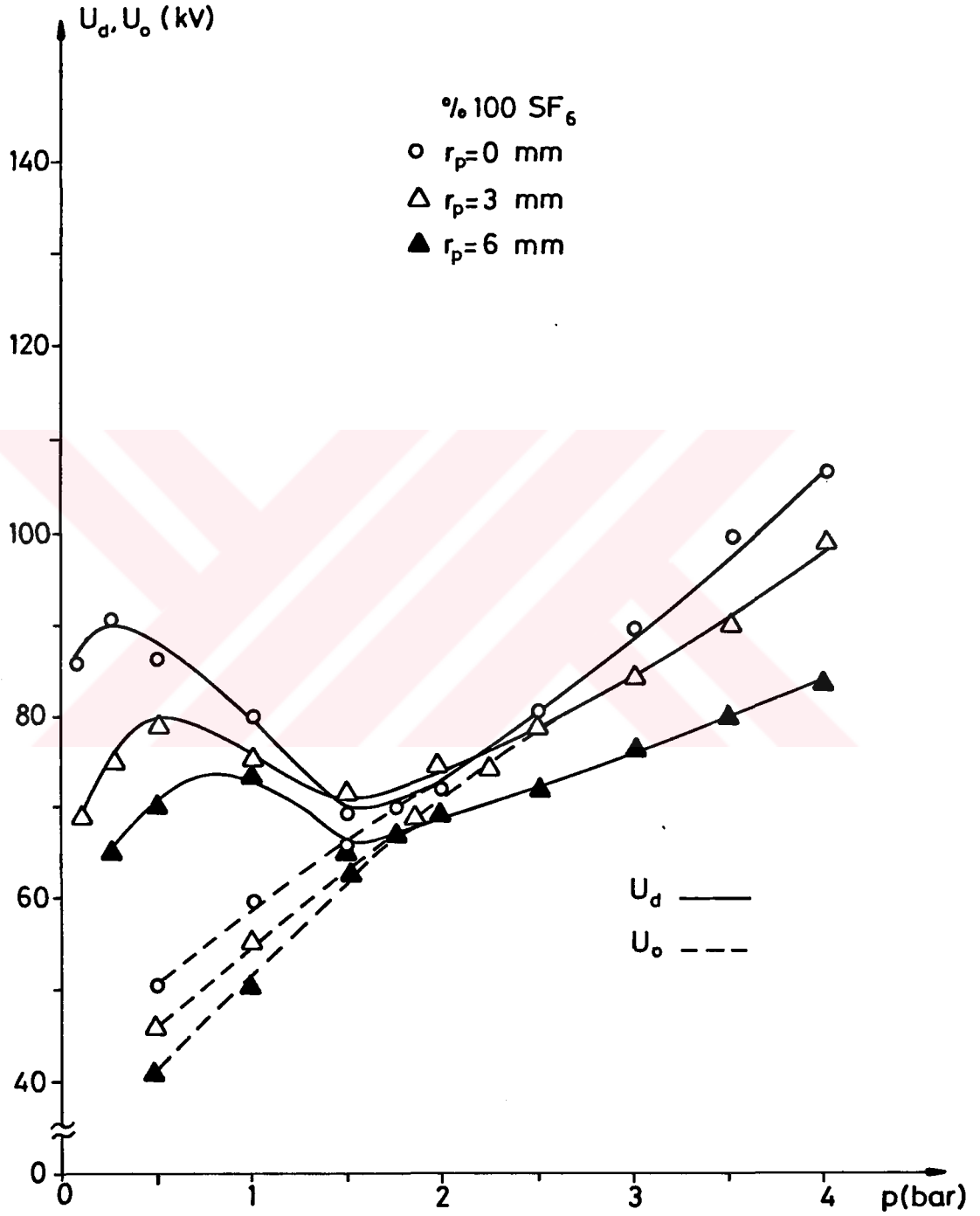
Şekil 5.14, 5.15 ve 5.16'da çeşitli elektrod sistemlerinde, pozitif ve negatif doğru gerilimlerde, yüzey pürüzlülüğünün olması ve olmaması durumlarında, SF_6 ve SF_6+N_2 gaz karışımlarının delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimi incelendiğinde genel olarak SF_6 gazının, SF_6+N_2 gaz karışımlarına oranla, yüzey pürüzlülüğüne karşı hassas olduğu gerçeği ortaya çıkmaktadır. Bu durum gazlı izolasyon sistemlerinde SF_6 gazı yerine değişik oranlarda katılmış SF_6+N_2 gaz karışımlarının kullanılabilmesini mümkün kılmaktadır.



Şekil 5.14. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, %80 SF_6 +%20 N_2 gaz karışımında, negatif doğru gerilimde, pürüzsüz ve pürüzlü ($r=3$ ve 6 mm) elektrod durumlarında delinme^p ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.15. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 gazında, negatif doğru gerilimde, pürüzsüz ve pürüzlü ($r = 3$ ve 6 mm) elektrod durumlarında delinme^p ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.16. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, SF₆ gazında, pozitif doğru gerilimde, pürüzsüz ve pürüzlü (r_p=3 ve 6 mm) elektrod durumlarında delinme^p ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.

Aynı eğrilerden düşük basınçlarda genel olarak delinme gerilimlerinin birbirine yaklaştığı ve bu yaklaşımın pozitif doğru gerilimlerde negatif doğru gerilime oranla daha fazla olduğu görülebilir.

Pozitif ve negatif doğru gerilimde, korona başlangıç gerilimini üç ana bölüme ayırmak mümkündür [28]. Hazzel ve Kuffel birinci bölümde (düşük basınçlarda) korona başlangıç geriliminin tek darbeler halinde olduğunu, ikinci bölümde ise (basınç yükseldikçe), darbelerin çoğaldığı ve daha yüksek basınçlarda ise söz konusu korona darbelerinin çok sıklaştığını saptamışlardır.

1975'de yaptığı bir çalışmada Sangkasaad 40 mm elektrod açıklığında, $r=20$ mm çubuk-düzlem elektrod sisteminde 50 Hz alternatif gerilimde sıkıştırılmış SF_6 ortamda çeşitli basınç değerlerinde boşalmayı görüntülemiştir. Bu çalışmada basınç $p < p_{max}$ olduğunda çubuk elektrodu üzerinde düzgün bir korona olduğu ve bu nedenle boşalmanın elektrodlar arasında en kısa mesafede meydana geldiğini göstermiştir. Basınç p_{max} 'a doğru yükseldikçe kanallı boşalmanın çubuk elektrodu üzerinden çeşitli yönlerle doğru kaydığını söylemiştir. Bu durum uzay yüklerinin radyal yöndeki elektrik alan bileşenini büyüttüğünü göstermektedir. Buna bağlı olarakta boşalma radyal yol takip ederek ortaya çıkmaktadır. Sonuç olarak p_{max} etrafında boşalmanın en kısa elektrod mesafesini izlemediği ve bir eğri çizerek katoda doğru gittiğini saptamıştır. p_{min} civarında ise boşalmanın en kısa yolu seçtiğini göstermiştir [17].

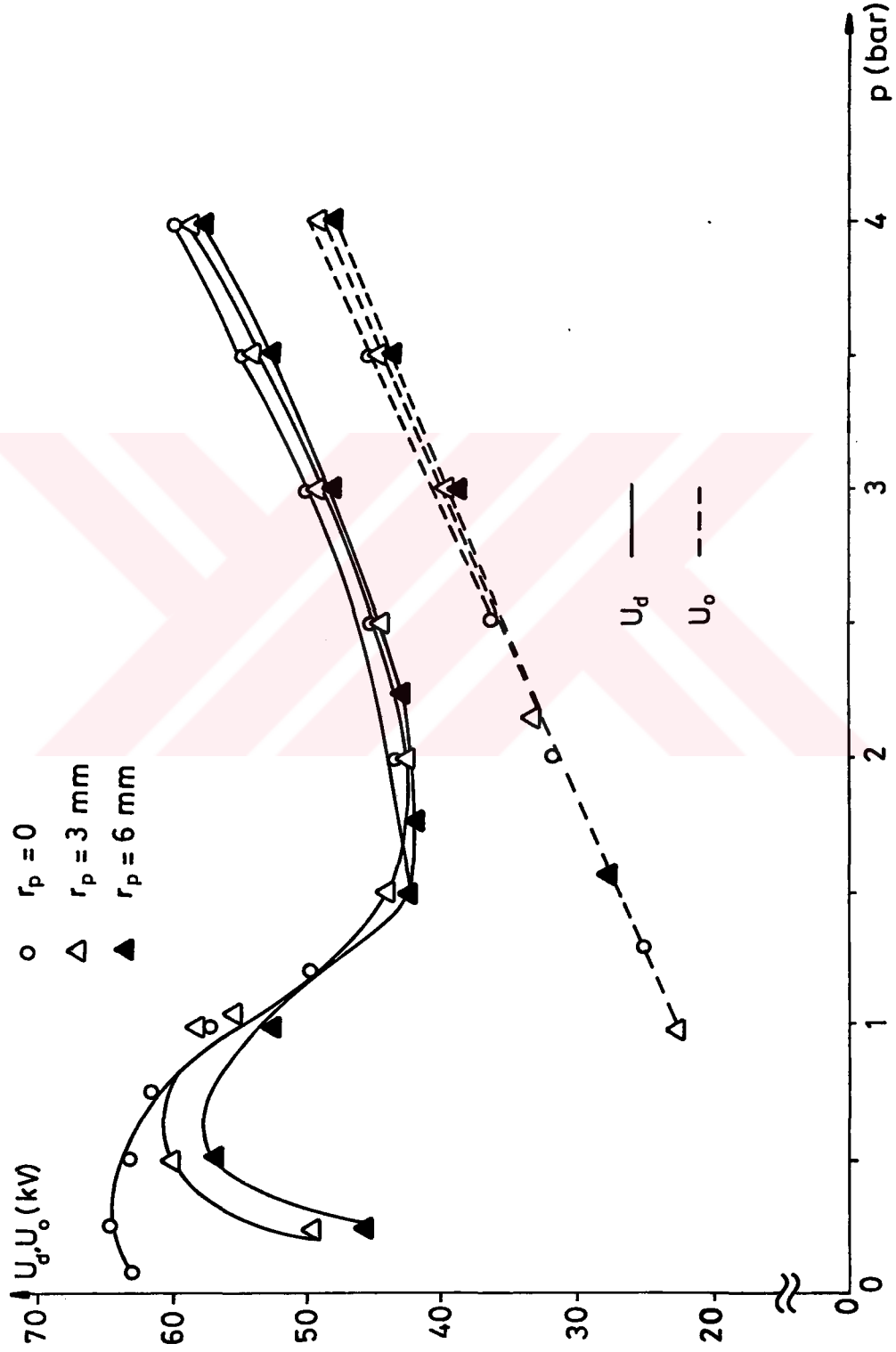
Bu durumları gözönüne alarak elektronegatif gazlarda birinci bölümde yüzey pürüzlülüğünün etkisinin var olduğu ve korona darbeleri sıklaştıkça yüzey pürüzlülüğünün etkisini kaybettiği ve sonuçta korona kararlı bölgesinin dışında tekrar bu etkinin ortaya çıktığı saptanmıştır. Ayrıca $SF_6 + N_2$ gaz karışımlarında, N_2 gazının oranı ile ortaya çıkan durumları gözönüne alındığında, yüzey

pürüzlülüğünün, elektrod sistemine bağlı olarak, değişik bölgelerde, değişik etkiler gösterdiği ortaya çıkmıştır. Korona başlangıç gerilimlerinin ise tüm basınç aralığında lineer olarak değiştiği ve gaz karışımlarındaki SF_6 nın yüzdesindeki ve yüzey pürüzlülüğündeki değişimleri aynı şekilde takip etmediği gözlenmiştir.

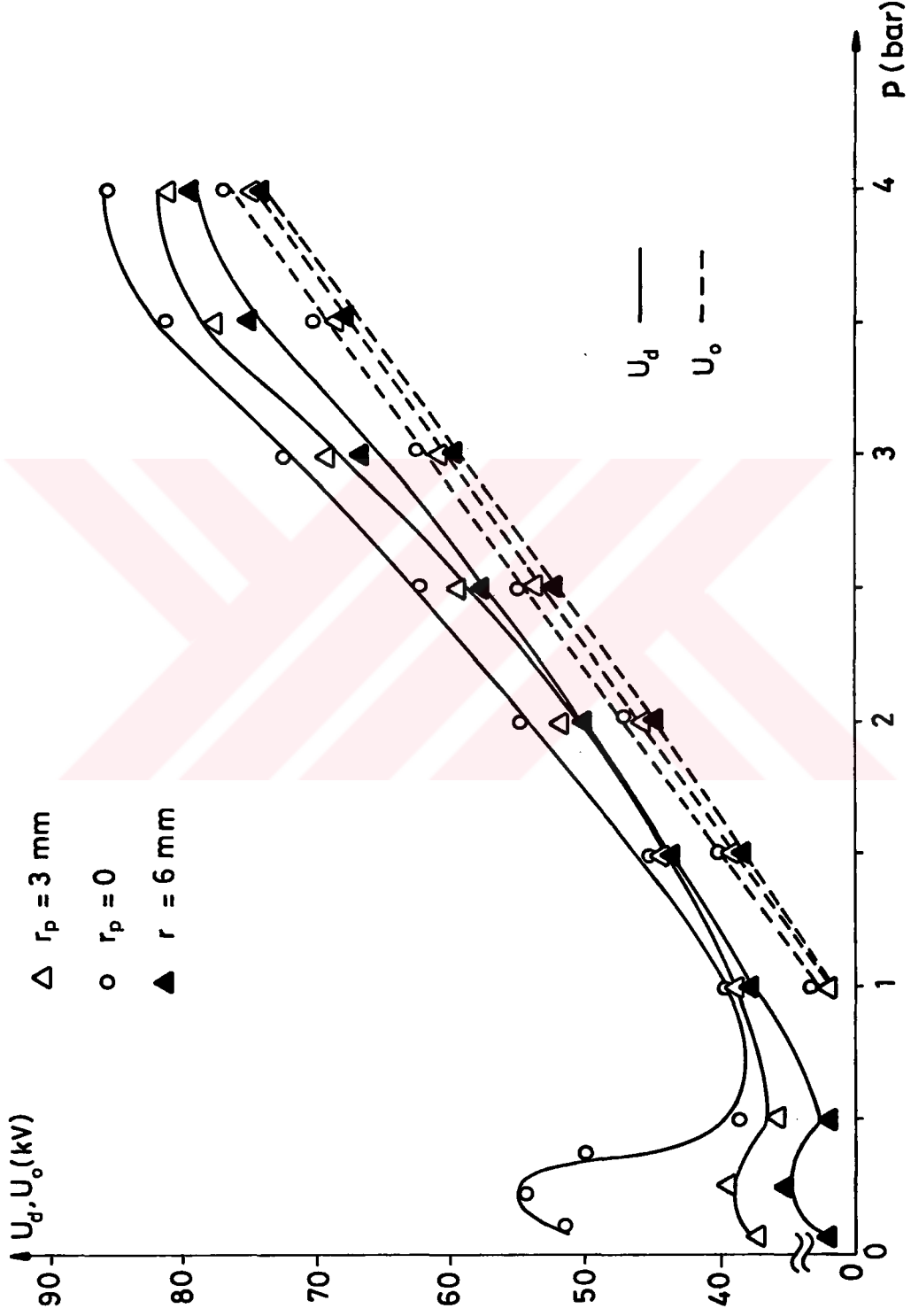
5.3.2. Alternatif Gerilim (50 Hz)

50 Hz alternatif gerilimde yapılan deneyler, yüksek basınçlarda, alanın düzgünsüzlük derecesi azaldıkça $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımlarına göre %100 SF_6 ortamda yüzey pürüzlülüğünün daha etkili olduğu ortaya çıkmıştır. 50 Hz alternatif gerilimde korona başlangıç gerilimini, pozitif ve negatif doğru gerilimde olduğu gibi üç ana bölüme ayırmak mümkündür. Birinci bölümde korona gerilimi tek darbeler halinde olduğundan elektrod yüzey pürüzlülüğü etkisini göstermektedir. Korona gerilim darbeleri sıklaştıkça yüzey pürüzlülüğünün etkisinin azaldığı ve basınç arttıkça bu etkinin kaybolduğu ortaya çıkmaktadır. Daha yüksek basınçlarda ise Bölüm 5.3.1'de anlatıldığı gibi elektrod yüzey pürüzlülüğü etkisini göstermemektedir. Ayrıca pozitif doğru gerilimde olduğu gibi, 50 Hz alternatif gerilimde de $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımlarında, N_2 gazının oranı ile, yüzey pürüzlülüğünün elektrod sistemine bağlı olarak, değişik bölgelerde, değişik etkiler gösterdiği ortaya çıkmıştır.

Öte yandan genel olarak alan düzgünsüzlüğü arttıkça, elektrod yüzey pürüzlülüğünün etkisinin azaldığı saptanmıştır (Şekil 5.17, 5.18).



Şekil 5.17. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, SF_6 gazında, 50 Hz alternatif gerilimde, pürüzsüz ve pürüzlü ($r_p = 3$ ve 6 mm) elektrod durumlarında delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimlerinin karşılaştırılması.



Şekil 5.18. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, %80 SF₆+%20 N₂ gaz karışımında, 50 Hz alternatif gerilimde, pürüzsüz ve pürüzlü ($r=3$ ve 6 mm) elektrod durumlarında delinme ve korona başlangıç gerilimlerinin p basıncı ile değişimlerinin karşılaştırılması.

BÖLÜM 6

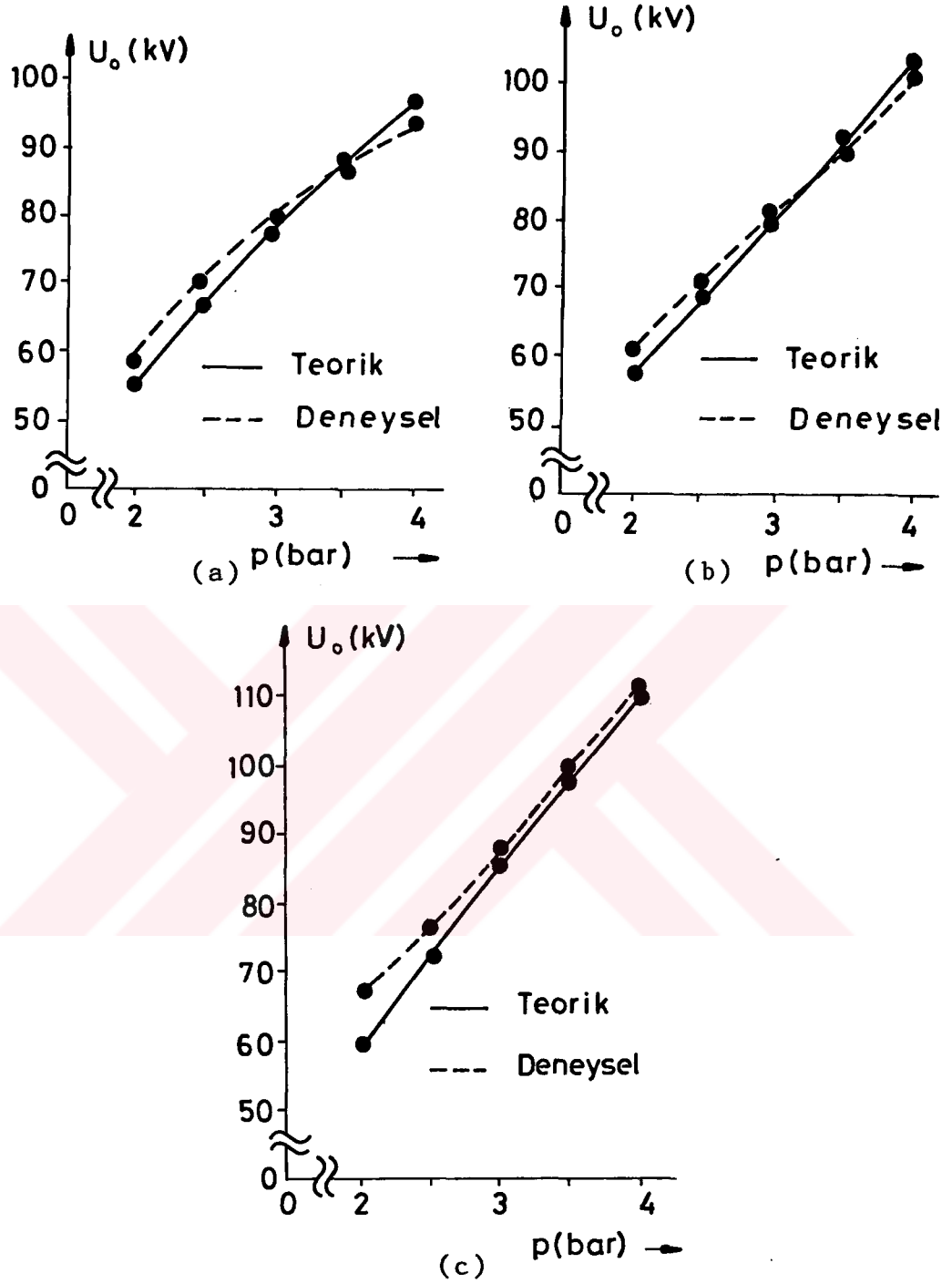
DENEY SONUÇLARININ TEORİ İLE KARŞILAŞTIRILMASI

6.1. Küre-Düzlem Elektrod Sistemlerinde Korona Başlangıç ve Delinme Gerilimleri

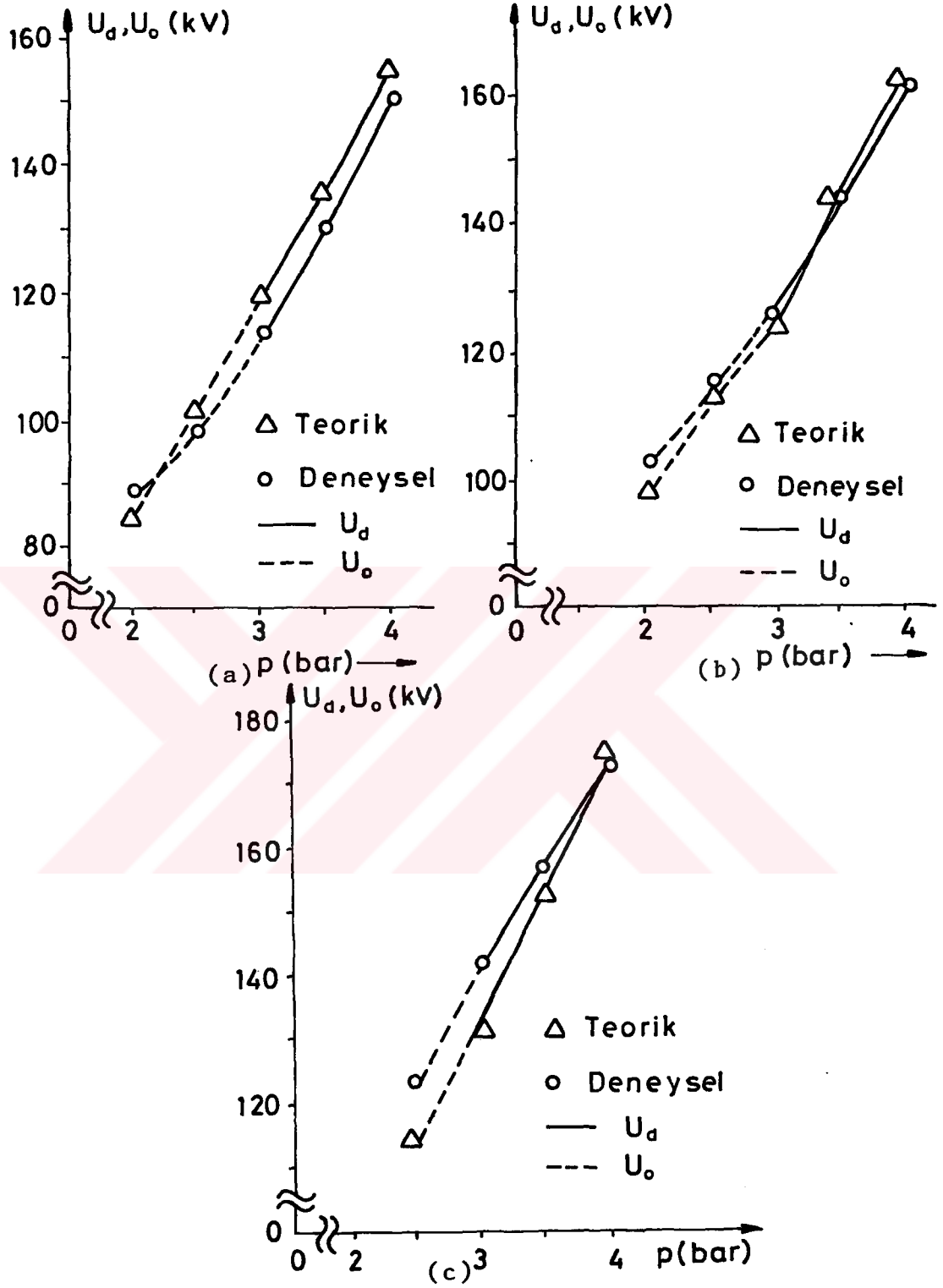
2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, SF_6+N_2 gaz karışımlarında deneysel olarak bulunan sonuçlarla teorik olarak hesaplanan korona başlangıç gerilimi değerleri Şekil 6.1'de gösterilmiştir.

Düzgün olmayan alanda delinme olayı kanal teorisi ile açıklandığından delinme gerilimleri için verilen ampirik formüller alan düzgünsüzlüğü büyük olan elektrod sistemlerinde korona başlangıç gerilimlerinin hesabı için kullanılabilirler [15],[26].

Yapılan deneylerde, düzgün olmayan alan durumunda korona başlangıç gerilimlerinin negatif doğru gerilimde pozitif doğru gerilime oranla daha düşük olduğu saptanmıştır. Bu nedenle 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde yalnız negatif doğru gerilimde korona başlangıç gerilimini hesaplayabilmekteyiz (Şekil 6.1). Deney sonuçları ile hesapla bulunan değerler arasındaki farkın % 8 den az olması genel olarak deney sonuçlarının teori ile uyum içinde olduğunu göstermektedir. Korona başlangıç geriliminin tam kararlı olmadığı düşük basınçlar durumunda teori ile deney sonuçları arasındaki farkın büyüdüğü saptanmıştır. Küre yarıçapı arttırıldıkça (alanın düzgünsüzlük derecesi azaldıkça) korona başlangıç gerilimlerinin delinme gerilimlerine doğru yaklaştığı gözlenmiştir (Bu konu Bölüm 4'de geniş olarak açıklanmıştır). Bu nedenle 4 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde negatif doğru gerilimde 3 bar basınca kadar delinme



Şekil 6.1. 2 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, SF_6+N_2 gaz karışımında, pürüzsüz elektrod durumunda, negatif doğru gerilimde deneysel ve teorik olarak bulunan korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimleri.
a) %50 SF_6 +%50 N_2
b) %60 SF_6 +%40 N_2
c) %80 SF_6 +%20 N_2



Şekil 6.2. 4 mm yarıçaplı küre-düzlem elektrod sisteminde, $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımında, pürüzsüz elektrod durumunda, negatif doğru gerilimde deneysel ve teorik olarak bulunan korona başlangıç ve delinme gerilimlerinin basınçla değişimleri.

a) $50\% \text{ SF}_6 + 50\% \text{ N}_2$
b) $60\% \text{ SF}_6 + 40\% \text{ N}_2$
c) $80\% \text{ SF}_6 + 20\% \text{ N}_2$

gerilimleri, 3 bar'ın altındaki basınçlarda ise korona başlangıç gerilimleri elde edilmiştir. Şekil 6.2'de ölçülen ve hesaplanan delinme ve korona başlangıç gerilim değerleri karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları ile hesaplanan değerler arasındaki farkın % 4 den az olması deney sonuçlarının teori ile uyum içinde olduğunu göstermektedir. Söz konusu fark düzlem elektrod çapının sonlu olmasıyla ($D=75 \text{ mm}\phi$) açıklanabilir. Gerçekten de düzlem elektrodun çapının sonsuz olması durumundaki elektrod sisteminin verimi, kullanılan sistemin veriminden daha büyüktür.

Diğer taraftan alanın düzgünsüzlük derecesi azaldıkça deney ile hesap sonuçları arasındaki farkın tüm basınç aralığında azaldığı ortaya çıkmaktadır.

6.2. Çubuk-Düzlem Elektrod Sisteminde Korona Başlangıç ve Delinme Gerilimleri

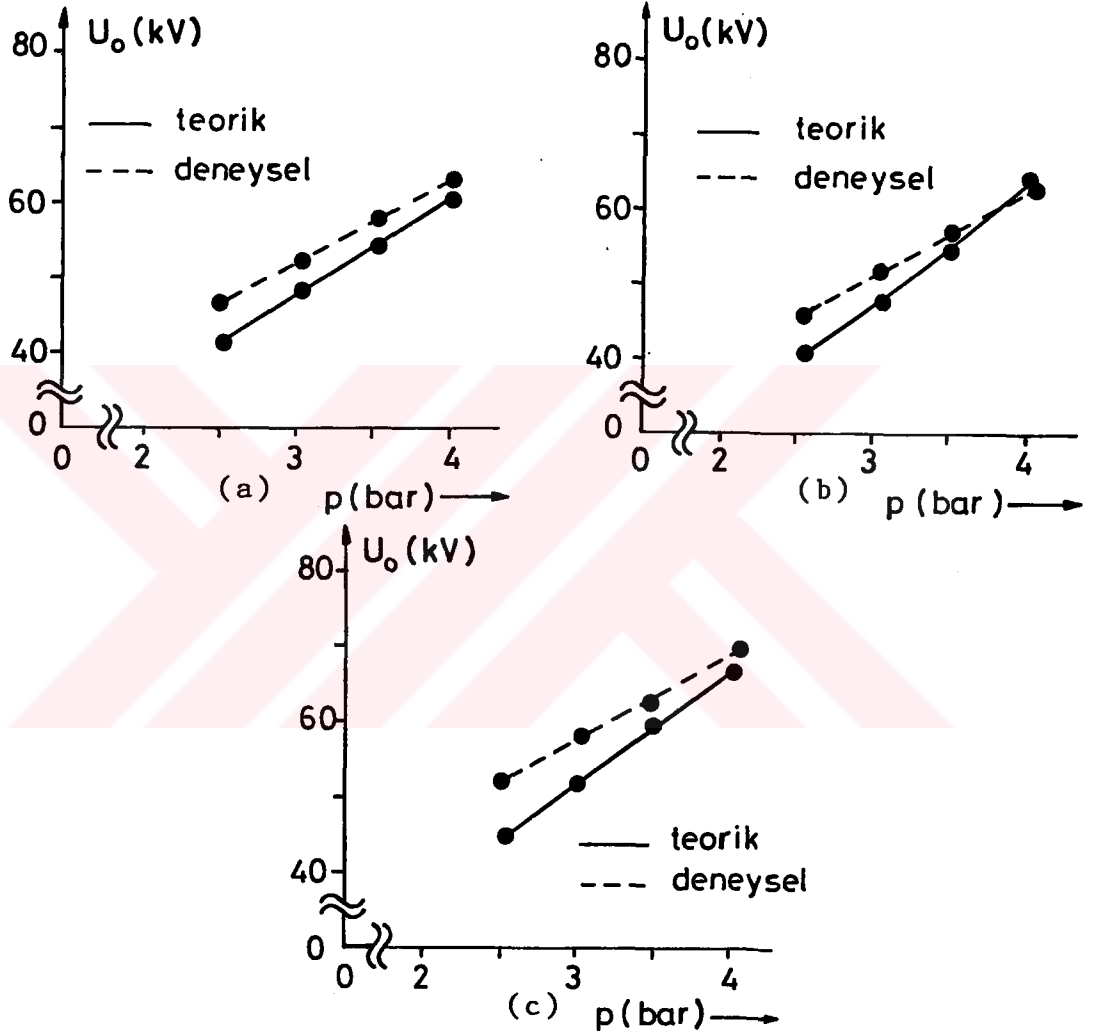
1 mm yarıçaplı çubuk-düzlem elektrod sisteminde $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ gaz karışımlarında, negatif doğru gerilimde deneysel olarak bulunan sonuçlarla teorik olarak hesaplanan korona başlangıç gerilimi değerleri Şekil 6.3'de gösterilmiştir. Genel olarak çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde korona başlangıç gerilimlerinin delinme gerilimlerine oranla daha düşük olduğu ortaya çıkmaktadır [25].

Öte yandan negatif doğru gerilimde korona başlangıç gerilimlerinin pozitif doğru gerilime oranla daha düşük olduğu da gözlenmiştir (Bkz. Bölüm 4). Bu nedenle çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde Bölüm 2'de delinme gerilimi için verilen formüller negatif doğru gerilimde korona başlangıç gerilimleri için geçerlidir. Hesaplanan değerler deney sonuçlarından bir miktar küçük çıkmıştır. Ancak bu farkın % 12 den fazla olmaması genel olarak teori ile deney sonuçlarının uyum içinde olduğunu göstermektedir. Küre-düzlem elektrod sistemlerinde olduğu gibi çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde de düşük

T. C.

Yükseköğretim Kurulu
Dokümantasyon Merkezi

basınçlar durumunda korona başlangıç geriliminin kararlı olmaması düşük basınçlarda teori ile deney sonuçları arasındaki farkı büyötmüştür. Bu farkın diğeri bir sebebi de düzlem elektrodun çapının sonlu olmasından dolayı alanın düzgünsüzlük derecesinin gerçek değeri lerinden büyük olmasıdır.



Şekil 6.3. Çubuk-düzlem elektrod sisteminde, SF_6+N_2 gaz karışımında, pürüzsüz elektrod durumunda, negatif doğru gerilimde deneysel ve teorik olarak bulunan korona başlangıç gerilimlerinin basınçla değişimleri.

a) %50 SF_6 + %50 N_2

b) %60 SF_6 + %40 N_2

c) %80 SF_6 + %20 N_2

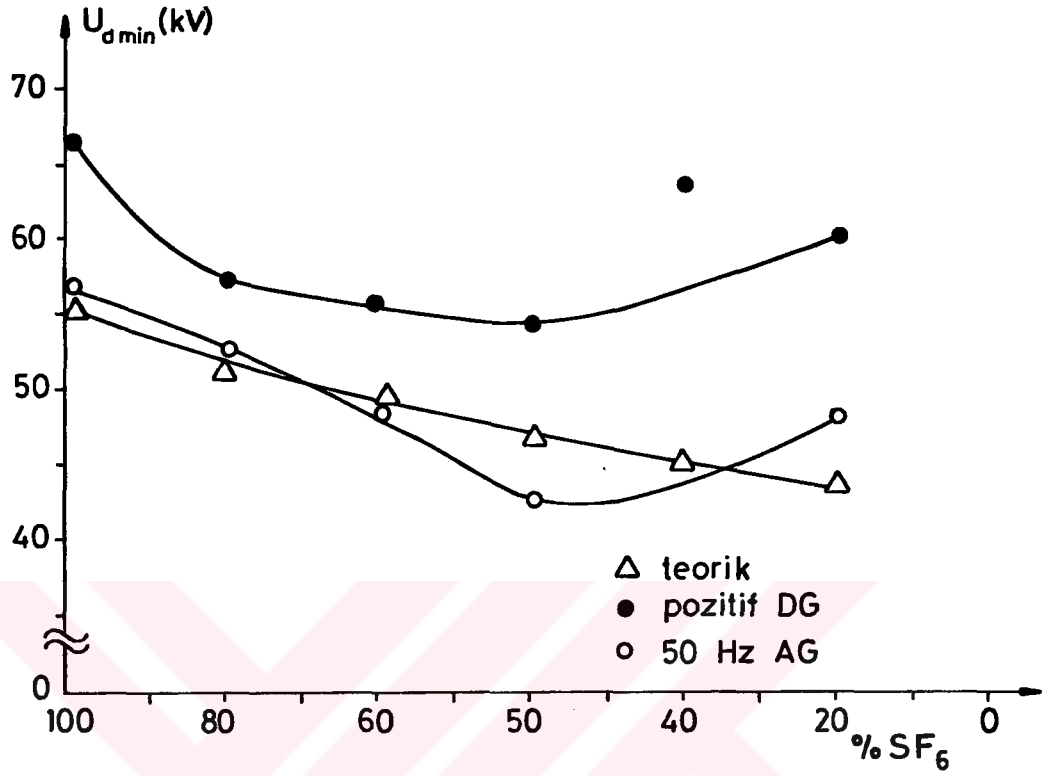
6.3. Sıkıştırılmış SF_6 Gazında, Küre-Düzlem ve Çubuk-Düzlem Elektrod Sistemlerinde Minimum Delinme Gerilimi

$r=2$ mm küre-düzlem ve $r=1$ mm çubuk-düzlem elektrod sistemleri için denklem (2.36) dan yararlanarak U_{dmin} gerilimleri hesaplandığında, deney sonuçlarının teori ile uyum içinde olduğu görülür. Pozitif doğru gerilimde % 18 lik bir hata söz konusu olurken 50 Hz alternatif gerilim için bu hata % 3'e inmiştir. Bunun yanında $r=1$ mm çubuk-düzlem elektrod sisteminde, pozitif doğru ve 50 Hz alternatif gerilimler için hatanın küçük olduğu gözlenmiştir. Buradan hareketle (2.36) denkleminin alan düzgünsüzlüğünün büyük olduğu elektrod sistemlerinde daha doğru sonuçlar verdiğini söylemek mümkündür. $r=4$ mm küre-düzlem elektrod sistemi için (0+4) bar basınç aralığında delinme gerilimi minimum değer almadığından bu tip elektrod sistemi için U_{dmin} hakkında bir şey söylemek mümkün değildir.

6.4. Sıkıştırılmış SF_6+N_2 Gazında, Küre-Düzlem ve Çubuk-Düzlem Elektrod Sistemlerinde Minimum Delinme Gerilimi

Şekil 6.4'de pozitif doğru ve 50 Hz alternatif gerilimler için SF_6 ve SF_6+N_2 gaz karışımlarında deneysel olarak bulunan minimum delinme gerilimleri ile denklem (2.38) den yararlanarak teorik olarak hesaplanan minimum delinme gerilimleri karışımdaki SF_6 yüzdesine göre çizilmiştir.

Burada 50 Hz alternatif gerilimde deneysel olarak bulunan U_{dmin} değerlerinin $\sqrt{2}$ ile çarpılarak tepe değerleri elde edilmiştir. Söz konusu denklem 50 Hz alternatif gerilimde, pozitif doğru gerilime oranla çok daha az hata ile kullanılmaktadır. Öte yandan SF_6+N_2 gaz karışımlarında SF_6 nın yüzdesi azaldıkça hata büyümüştür. Aynı durum pozitif doğru gerilim için de geçerlidir.



Şekil 6.4. Küre-düzlem ve çubuk-düzlem elektrod sistemlerinde, SF₆ ve SF₆+N₂ gaz karışımlarında deneysel ve teorik olarak bulunan minimum delinme gerilimlerinin SF₆ yüzdesi ile değişimleri.

Sonuç olarak bu çalışmada elde edilen (2.38) denkleminin, 50 Hz alternatif gerilimde gaz karışımındaki SF₆ oranının %50 den büyük olduğu durumda %1-2 gibi küçük bir hata payı ile geçerli olduğu ortaya çıkmaktadır.

BÖLÜM 7

SONUÇLARIN ÖZETİ

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

- 1) Düzgün olmayan alanlarda, SF_6 ve SF_6+N_2 gaz karışımında, pozitif doğru ve 50 Hz alternatif gerilimde, 0,5÷4 bar basınç aralığında, $U_d=f(p)$ eğrisinde bir maksimum-minimum davranışının ortaya çıktığı saptanmıştır. Öte yandan alanın düzgünsüzlük derecesinin artması ile birlikte, söz konusu davranış daha belirgin bir şekilde gözlenmiştir. N_2 gazında ise O_2 nin etkisinden dolayı söz konusu davranışın çok az ortaya çıktığı görülmüştür.
- 2) SF_6+N_2 gaz karışımında kritik basıncın N_2 nin oranı ile arttığı ve dolayısı ile korona bölgesinin genişlediği gözlenmiştir. Bu artışın düzgünsüzlük derecesi büyük olan alanlarda, düzgünsüzlük derecesi küçük olan alanlara göre daha fazla olduğu elde edilmiştir.
- 3) Alanın düzgünsüzlük derecesi arttıkça, negatif delinme gerilimi, $U_d(-)$ daha yüksek basınçlarda pozitif delinme gerilimi, $U_d(+)$ den büyük olmuş ve sonuçta çubuk-düzlem elektrod sisteminde, (0,5÷4) bar basınç aralığında, $U_d(-)>U_d(+)$ olduğundan söz konusu elektrod sistemi bir sivri uç-düzlem elektrod sistemi gibi davranmıştır.
- 4) Deneylerde çalışılan basınç aralığında, korona başlangıç gerilimleri hemen hemen basınçla lineer olarak artmıştır. Ayrıca, alanın düzgünsüzlük derecesi azaldıkça, SF_6 gazının, SF_6+N_2 gaz karışımına oranla, yüzey pürüzlülüğüne çok hassas olduğu ortaya çıkmıştır.

- 5) Elektronegatif etkisi gösteren gazlarda, $U_d=f(p)$ eğrisinin negatif olduğu bölgede yüzey pürüzlülüğünün delinme gerilimine hemen hemen etki etmediği, bu bölgenin dışında ise etkisinin var olduğu saptanmıştır. Ayrıca SF_6+N_2 gaz karışımında söz konusu etkinin N_2 gazının oranı ile değiştiği gözlenmiştir.
- 6) SF_6+N_2 gaz karışımlarında, 50 Hz alternatif ve pozitif doğru gerilimde, minimum delinme gerilimi elektrod sistemine bağlı olmaksızın hemen hemen sabit kaldığından, bu gerilimin hesaplanması için bir ampirik formül elde edilmiştir. Bu formülün, 50 Hz alternatif gerilimde SF_6 oranının %50 den büyük olduğu SF_6+N_2 gaz karışımlarında % 1-2 hata ile geçerli olduğu gözlenmiştir. Diğer yandan az düzgün alanlarda $U_d=f(p)$ eğrisinde maksimum-minimum davranışı bulunmadığından, söz konusu formülün, sadece düzgün olmayan alanlar için geçerli olduğu ortaya çıkmıştır.
- 7) Kullanılan elektrod sistemlerinde %40 SF_6 +%60 N_2 gaz karışımı durumunda, delinme gerilimi değerlerinin negatif doğru gerilimde %60 SF_6 +%40 N_2 gaz karışımınıninki ile yaklaşık aynı olduğu, 50 Hz alternatif ve pozitif doğru gerilimde ise, %60 SF_6 +%40 N_2 gaz karışımınınkinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- 8) Düzgün olmayan alanlarda, korona başlangıç gerilimleri, $U_o(-)<U_o(+)$ olduğundan, literatürde verilen ampirik ($U_d=f(p)$) formülleri sadece negatif doğru gerilimde, korona başlangıç gerilimlerinin hesabı için geçerli olduğu bilinmektedir. Bu çalışmada ölçülen negatif korona başlangıç gerilimlerinin, teori ile uyum halinde olduğu gözlenmiştir. Ayrıca, az düzgün alanlarda yapılan deneylerden söz konusu ampirik formüllerin, düşük basınçlarda korona başlangıç gerilimleri için ve yüksek basınçlarda da delinme gerilimleri için geçerli olduğu saptanmıştır [29-59].

KAYNAKLAR

- [1] FATANABE, T., TAKUMA, T., The Breakdown Voltage And Discharge Extention of Long Gaps in Nitrogen-SF₆ And Air-SF₆ Gas Mixtures, Journal of Applied Physics, Vol.48, No.8, pp. 3281-3287, August 1977.
- [2] GARZON, R.D., The Effects of SF₆-N₂ Mixture Upon The Recovery Voltage Capability of a Synchnonous Interrupter, IEEE Trans. on Power Apparatus And Systems, Vol.PAS-95, No.1, pp.140-144, January/February 1976.
- [3] PEDERSEN, A., The Effect of Surface Roughness on Breakdown In SF₆, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-94, No.5, pp. 1749-1753, September/October 1975.
- [4] FARISH, O., İBRAHİM, O.E., Effect of Electrode Surface Roughness on Breakdown in Nitrogen/SF₆ Mixtures, Proc. IEE, Vol.123, No.10, pp. 1047-1050, October 1976.
- [5] GOVINDA RAJU, G.R., DİNÇER, M.S., Measurement of Ionization And Attachment Coefficients in SF₆+N₂, J. Appl. Phys. 53(12), pp. 8562-8567, December 1982.
- [6] DİNÇER, M.S., GOVINDA RAJU, G.R., Ionization And Attachment Coefficients In SF₆+N₂ Mixtures, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol.EI-19, No.1, pp. 40-43, February 1984.
- [7] KUFFEL, E., ABDULLAH, M., High Voltage Engineering, Pergamon Press, 1970.
- [8] MARDİKYAN, K., Düzgün Olmayan Alanda SF₆'nin Delinme Dayanımı, İ.T.Ü. Müh-Mim. Fakültesi, Doktora Tezi, 1981.
- [9] ALSTON, L.L., High Voltage Technology, Oxford University Press., London, 1968.
- [10] MEEK, J.M., CRAGGS, J.D., Electrical Breakdown of Gases, Oxford, Clarendon Press, 1953.
- [11] RAETHER, H., Electron Avalanches And Breakdown in Gases, London, Butterworths, 1964.

- [12] LOEB, L.B., Electrical Coronas: Their Basic Physical Mechanisms, University of California Press, Berkeley and Los Angeles, 1965.
- [13] MALIK, N.H., QURESHI, A.H., Calculation of Discharge Inception Voltages In SF_6 - N_2 Mixtures, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol.EI-14, No.2, pp. 70-76, April 1979.
- [14] NITTA, T., SHIBUYA, Y., Electrical Breakdown of Long Gaps in Sulphur-Hexafluoride, IEEE Trans. on PAS, Vol.PAS-90, No.3, pp. 1065-1071, 1971.
- [15] NEMA, R.S., KULKARNI, S.V., HUSAIN, Ekrem, Calculation of Sparking Potentials of SF_6 And SF_6 -Gas Mixtures In Uniform And Non-Uniform Electric Fields, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol.EI-17, No.1, pp. 70-75, February 1982.
- [16] MALIK, N.H., QURESHI, A.H., Breakdown Gradients In SF_6 - N_2 , SF_6 -Air And SF_6 - CO_2 Mixtures, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol.EI-15, No.5, pp. 413-417, October 1980.
- [17] SANGKASAAD, S., Corona Inception And Breakdown Voltage in Nonuniform Fields in SF_6 , Inter. High-Voltage Symp., pp. 378-384, Zürich (1975).
- [18] SCHWAB, A.J., High-Voltage Measurement Technique, M.I.T. Press, London, 1971.
- [19] ÖZKAYA, M., Yüksek Gerilim Tekniğinde Ölçme, İ.T.Ü. Matbaası, İstanbul, 1973.
- [20] BOWDLER, G.W., Measurements In High-Voltage Test Circuits, Pergamon Press, Braunschweig, 1973.
- [21] WORKS, C.N., DAKIN, T.W., Dielectric Breakdown of Sulfur Hexafluoride in Nonuniform Fields, AIEE Trans., pp. 682-688, 1953.
- [22] BERG, D., WORKS, C.N., Effect of Space Charge on Electric Breakdown of Sulfur Hexafluoride in Nonuniform Fields, AIEE Trans., pp. 820-823, 77 (1958).
- [23] NARBUT, P., BERG, D., WORKS, C.N., DAKIN, L.W., Factors Controlling Electric Strength of Gaseous Insulation, AIEE Trans. pp. 545-547, 1959.
- [24] MALIK, N.H., QURESHI, A.H., A Review of Electrical Breakdown In Mixtures of SF_6 And Other Gases, IEEE Trans. Electr. Insul, Vol.EI-14, No.1, pp. 1-13, February 1979.

- [25] MALIK, N.H., DC Voltage Breakdown of SF_6 -AIR And SF_6 - CO_2 Mixtures In Rod-Plane Gaps, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-18, No.6, pp. 629-635, December 1983.
- [26] MALIK, N.H., QURESHI, A.H., THEOPHILUS, G.D., Static Field Breakdown of SF_6 - N_2 Mixtures In Rod-Plane Gaps, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-14, No.2, pp. 61-69, April 1979.
- [27] MALIK, N.H., QURESHI, A.H., The Influence of Voltage Polarity And Field Non-uniformity on The Breakdown Behavior of Rod-Plane Gaps Filled with SF_6 , IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-14, No.6, pp. 327-333, December 1979.
- [28] ANIS, H., SRIVASTAVA, K.D., Pre-Breakdown Discharges In Highly Non-Uniform Fields In Relation To Gas-Insulated Systems, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-17, No.2, pp. 131-141, April 1982.
- [29] SIDDAGANGAPPA, M.C., LAKSHMINARASIMHA, C.S., NAIDU, M.S., Ionisation And Attachment in Binary Mixtures of $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ And $\text{CCl}_4 + \text{N}_2$, J.Phys. D: Appl. Phys., pp. 763-772, 16(1983).
- [30] ITOH, H., SHIMOZUMA, M., TAGASHIRA, H., SAKAMOTO, S., Measurement of The Effective Ionization Coefficient And The Static Breakdown Voltage In SF_6 And Nitrogen Mixtures, J.Phys. D: Appl. Phys., Vol.12, pp. 2167-2172, 1979.
- [31] QIU, Y., Simple Expression of Field Non-uniformity Factor For Hemispherically Capped Rod-Plane Gaps, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-21, No.4, pp. 673, 675, August 1986.
- [32] MC ALLISTER, I.W., On The Concept of Electrode Surface Roughness with Reference To Discharge Phenomena In Strongly Electronegative Gases, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-21, No.4, pp. 659-662, August 1986.
- [33] QIU, Y., LIU, Y.F., A New Approach To Measurement of The Figure -of- Merit For Strongly Electro-negative Gases And Gas Mixtures, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-22, No.6, pp. 831-834, December 1987.
- [34] SIDDAGANGAPPA, M.C., LAKSHMINARASIMHA, C.S., NAIDU, M.S., Prediction of Breakdown Voltages of Binary Gas Mixtures In Uniform Electric Fields", IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-19, No.4, pp. 359-361, August 1984.

- [35] WOOTTON, R.E., Some Aspects of Breakdown In Gases, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-17, No.6, pp. 499-503, December 1982.
- [36] LEE, Z.Y., Measurements of Breakdown Potential And Ionization And Attachment In $\text{SF}_6 + \text{CO}_2$ Mixtures, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-18, No.6, pp. 637-641, December 1983.
- [37] MORGAN, J.D., ABDELLAH, M., Impulse Breakdown of Covered Cylinders In SF_6 And SF_6 -Gas Mixtures, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.23, No.3, pp. 467-473, June 1988.
- [38] MALIK, N.H., Streamer Breakdown Criterion For Compressed Gases, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-16, No.5, pp. 463-467, October 1981.
- [39] AZER, A.A., COMSA, R.P., Influence of Field Non-uniformity on The Breakdown Characteristics of Sulfur Hexafluoride, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-8, No.4, pp. 136-142, December 1973.
- [40] QIU, Y., ZHANG, M., LIU, R., Effect of Wavefront on Impulse Breakdown Voltages of Slightly Non-uniform Field Gaps In Nitrogen, Air And SF_6 , IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-21, No.4, pp. 575-578, August 1986.
- [41] NAIDU, S.R., PAUIO DE Tarso MEDEROS, Volt-Time Curves For A Coaxial Cylindrical Gap In $\text{SF}_6 + \text{N}_2$ Mixtures, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-22, No.6, pp. 755-762, December 1987.
- [42] ZIQIN, LI., KUFFEL, R., KUFFEL, E., Volt-Time Characteristics In Air, SF_6 /Air Mixture And N_2 for Coaxial Cylinder And Rod-Sphere Gaps, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-21, No.2, pp. 151-155, April 1986.
- [43] CHATTERTON, P.A., RODRIGO, H., Photomultiplier And Field Probe Studies of Positive Point Plane Discharge Development in SF_6/N_2 Mixtures, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-19, No.1, pp. 63-73, February 1984.
- [44] VAN BRUNT, R.J., MISAKIAN, M., Mechanisms For Inception of DC And 60 Hz AC Corona In SF_6 , IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-17, No.2, pp. 106-120, April 1982.
- [45] HAZEL, R., KUFFEL, E., Static Field Anode Corona Characteristics in Sulphur Hexafluoride, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol.PAS-95, No.1, pp. 178-186, January/February 1976.

- [46] PAREKH, H., SRIVASTAVA, K.D., Some Computations And Observations on Corona-Stabilized Breakdown In SF_6 , IEEE Trans. Electr. Insul., Vol.EI-15, No.2, pp. 87-94, April 1980.
- [47] COOKE, CHATHAN, M., Ionization, Electrode Surfaces And Discharges In SF_6 At-Extra High-Voltages, IEEE Transactions on Power Apparatus And Systems, Vol.PAS-94, No.5, pp. 1518-1522, September/October 1975.
- [48] KLINE, L.E., DAVIES, D.K., CHEN, C.L., CHANTRY, D.J., Dielectric Properties For SF_6 And SF_6 Mixtures Predicted From Basic Data, J.Appl.Phys. 50(11), pp. 6789-6796, November 1979.
- [49] DINCER, M.S., GOVINDA RAJU, G.R., Ionization And Attachment Coefficients In FREON-12 And CO_2 Gas Mixtures, IEEE Trans. Electr. Insul., Vol. EI-20, No.3, pp. 595-599, June 1985.
- [50] HAYDON, S.C., WILLIAM, O.M., Combined Spatial And Temporal Studies of Ionization Growth In Nitrogen, J.Phys.D: Appl. Phys., Vol.9, pp. 523-536, 1976.
- [51] BERGER, S., Onset or Breakdown Voltage Reduction By Electrode Surface Roughness In Air And SF_6 , IEEE Transactions on Power Apparatus And Systems, Vol. PAS-95, No.4, pp. 1073-1078, July/August 1976.
- [52] GOVINDA RAJU, G.R., HACKAM, R., Breakdown Field Strength of SF_6 , N_2O , SF_6+N_2 , And $\text{SF}_6+\text{N}_2\text{O}$, J. Appl. Phys. 52 (6), pp.3912-3920, June 1981.
- [53] ITOH, H., SHIMOZUMA, M., TAGASHIRA, H., Boltzman Equation Analysis of The Electron Swarm Development In SF_6 And Nitrogen Mixtures, J. Phys. D: Appl. Phys., pp. 1201-1209, 13 (1980).
- [54] KÜÇÜKARPACI, H.N., LUCAS, J., Simulation of Electron Swarm Parameters In Carbondioxide And Nitrogen For High E/N, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol.12, pp. 2123-2138, 1979.
- [55] NEWMAN, L.A., DETEMPLE, T.A., Electron Transport Parameters And Excitation Rates In N_2 , Journal of Applied Physics, Vol.47, No.5, pp. 1912-1915, May 1976.

- [56] KENNETH DAVIES, D., Analysis of Current Growth Measurements In Attaching Gases, Journal of Applied Physics, Vol.47, No.5, pp. 1916-1919, May 1976.
- [57] DINCER, M.S., GOVINDA RAJU, G.R., Monte Carlo Simulation of The Motion of Electrons in SF₆ In Uniform Electric Fields, J. Appl. Phys. 54 (11), pp. 6311-6316, November 1983.
- [58] HIZIROĞLU, H.R., SAINZ, M.A., COLEMAN, D.M., QURESHI, A.H., Spectrometric Analysis of Sulphur Hexafluoride During An Electrical Discharge, IEEE, pp. 150-153, 1982.
- [59] CARTWRIGHT, D.C., Rate Coefficients And In Elastic Momentum Transfer Cross Sections For Electronic Excitation of N₂ by Electrons, J. Appl. Phys. ²49(7), pp. 3855-3862, July 1978.

ÖZGEÇMİŞ

Y.Müh. Murtaza FARSADİ, 1957 yılında Khoy (Azerbaycan)'da doğdu. İlkokulu, ortaokulu ve liseyi Khoy'da bitirdi. 1975 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi'ne girdi. Bir yıl İngilizce hazırlık sınıfında okudu. 1982 yılında ODTÜ Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1982-1984 yılları arasında ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Programında Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 1984 yılında ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nde Doktora çalışmasına başladı. Bu çalışmasına 1986 yılından sonra İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü'nde devam etti. 1982-1986 yılları arasında ODTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü Elektrik Makinaları ve Elektrik Tesisleri Anabilim Dallarında Araştırma Görevlisi olarak çalıştı. 1986 yılından beri de İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı'nda Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.

Y.Müh. Murtaza FARSADİ, iyi derecede Farsça, Türkçe ve İngilizce bilmektedir. Evli ve bir çocuk babasıdır.