



EMO



KTÜ



TÜBİTAK

## ÖNSÖZ

Giderek gelenekselleşen Elektrik Mühendisliği Ulusal Kongrelerinin beşincisinde Trabzon'da buluşuyoruz. EMO ile KTÜ Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nün işbirliği ve TÜBİTAK'ın katkısıyla gerçekleşmekte olan Kongremizin başarılı ve verimli geçmesi umundayız. Kongre sonuçlarından kıvanç duymak istiyoruz.

Kongre'de, bugüne kadar yapılmış çalışmalar ve yayınlanmış duyurulardan da anlaşılacağı gibi, bilinen yöntemlerin yanı sıra gelecek yıllara deneyim aktarabilecek yeni yaklaşımlar uygulanmaya çalışılmıştır. Bildiri özetlerinin değerlendirilmesine katılan uzman sayısının sistematik olarak artırılması, değerlendirme biçiminin daha da nesnel leşti rmesi, bildiri kitabında yeni yazım ve sunuş biçimlerinin oluşturulması gibi teknik gelişmelerin dışında ilginç olacağı sanılan panellerle güncel sorunların irdelenmesi ve yöresel öğelerle sosyal etkinliklere renk katılması amaçlanmıştır.

Kongrenin hazırlık ve düzenleme çalışmalarında bazı aksaklıklar olmuştur. Öncelikle kongre kararının olması gerekenden daha geç alınabilmiş olması, özet değerlendirme sürecinin posta trafiğinin çok yoğun olduğu bayram dönemlerine rastlaması hem Yürütme Kurulu'nu hem de Kongre'ye katılmak isteyenleri zor durumda bırakmıştır.

Kongrenin düzenlenmesi sırasında edinilen deneyimler ışığında sorunları çözücü ilkesel önerilerin ortaya konması yararlı olacaktır. Bunları kısaca sıralayabiliriz. Örneğin 6. Kongre'nin ya da kısaca EMUK'95'in nerede ve ne zaman yapılacağını şimdiden kararlaştırmak gerekmektedir. Bundan sonra Konferans olarak adlandırılması daha uygun olacak Kongre için sürekli ya da uzun süre görevli bir 'Ulusal Düzenleme Kurulu' nun oluşturulması ve bu Kurul' un temel ilkesel karar ve yöntemleri üretmesi daha elverişli olacaktır. Kongre'nin yapılacağı konumdaki işleri ise Yerel Düzenleme Kurulu' üstlenmelidir. 'Bilimsel Değerlendirme Kurulu'nun da ayrıntılı bir sınıflandırma ve nitelik belirlenmesi ile bir kere oluşturulması, yalnızca gelişen koşullara göre güncelleştirilmesi düşünülebilir.

EMUK, böylesi bir yapılaşma ile daha sağlıklı, zaman planlaması daha verimli bir konferansa dönüşecektir kanısındayız. Örneğin bu durumda bildiri tam metinlerinin de değerlendirme ve denetim sürecine girmeleri olanaklı kılınacak, şu ana kadar ancak Yürütme Kurulları'nın ayrıntılı olarak bilincine varabildiği teknik sorunlar ortadan kalkacaktır. Konferansda da içerik ve düzey açısından belirli bir iyileştirme sağlanabilecektir. Bunu en yakında, EMUK'95'de gerçekleşmiş olarak görmek dileğindeyiz.

Bilindiği gibi Kongremiz Elektrik, Elektronik-Haberleşme, Kontrol ve Bilgisayar Sistemleri alanlarında bilimsel-teknolojik özgün katkıların tartışılıp değerlendirilmesi ile araştırma, geliştirme, uygulama ve eğitim süreçlerindeki kişi ve kuruluşların birbirleriyle doğrudan iletişimini sağlamayı amaçlamaktadır. Ayrıca sosyal yaklaşma ve dayanışmaya da

katkıda bulunmaktadır. Ancak Kongre ve onunla birlikte oluşturulan sergi/fuarın çok değerli bir 'Mesleki Eğitim ve Geliştirme' aracı olduğu bilincinin kişi ve kurumlarda daha çok yerleşmesi için çaba gösterme gereği de ortaya çıkmaktadır.

Kongrenin gerçekleşmesini sağlayan, hazırlık ve düzenlemeleri üstlenen KTÜ, EMO ve TÜBİTAK'a, oluşturulmuş olan kurulların üyelerine, ayrıca burada adlarını saymakla bitmeyecek kişi ve kamu - özel - akademik nitelikli kuruluşlara, yardım ve katkıları nedeniyle, Kongre'nin yararlı sonuçlarını paylaşacak olan topluluğumuz adına teşekkürlerimizi sunmak isteriz.

Kongremizin başarılı ve verimli bir biçimde gerçekleşmesi, ülkemiz için bilimsel - teknolojik kazanımlar üretmesi dileğiyle Yürütme Kurulu olarak saygılarımızı iletiriz.

Doç. Dr. Güven ÖNBİLGİN  
Yürütme Kurulu Başkanı

# ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ 5. ULUSAL KONGRESİ

## YÜRÜTME KURULU

Güven ÖNBİLGİN (K1U)  
Yakup AYDIN (EMO) Sefa AKPINAR (KTU)  
Canan TOKER (ODTU) Kaya BOZOKLAR (EMO)  
Hasan DİNCER (KTU) A.Oğuz SOYSAL (IU)  
Abdulhalim SEZGİN (KTU) İrfan SENLİK (EMO)  
Kenan SOYKAN (EMO) Y.Nuri SEVGEN (EMO)

## DANIŞMA KURULU

Rasim ALDEMİR (BARMEK) Mehmet KESİM (Anadolu U)  
Teoman ALPTURK (TMMOB) Macit MUTAF (EMO)  
Ahmet ALTINEL (TEK) Erdiñç ÖZKAN (PTT)  
İbrahim ATALI (EMO) Kamil SOGUKPINAR (TETSAN)  
Malik AVİRAL (ELIMKO) Sedat SİSBOT (METRONİK)  
Emir BİRGUN (EMO) Atıf URAL (Kocaeli U.)  
Sıtkı ÇİĞDEM (EMO) I. Ata YİĞİT (EMO)  
R. Can ERKÖK (ABB) Fikret YÜCEL (TELETAS)  
Bülent ERTAN (ODTÜ) Hamit SERBEST (CU)  
Uğur ERTAN (BARMEK) Canan TOKER (ODTÜ)  
İsa GÜNGÖR (EMO) Nusret YUKSELER (İTU)  
Ersin KAYA (Kaynak) Kemal ÖZMEHMET (DEU)  
Okyay KAYNAK (Boğaziçi U)

## SOSYAL ETKİNLİKLER KURULU

Y. Nuri SEVGEN (EMO)  
Necla ÇORUH (PTT) Hatice SEZGİN (KTU)  
Esen ÖNKIBAR (TEK) Yusuf TANDOGAN (PTT)  
Abdullah SEZGİN (KTU) Ömer K. YALCIN (TELSER)

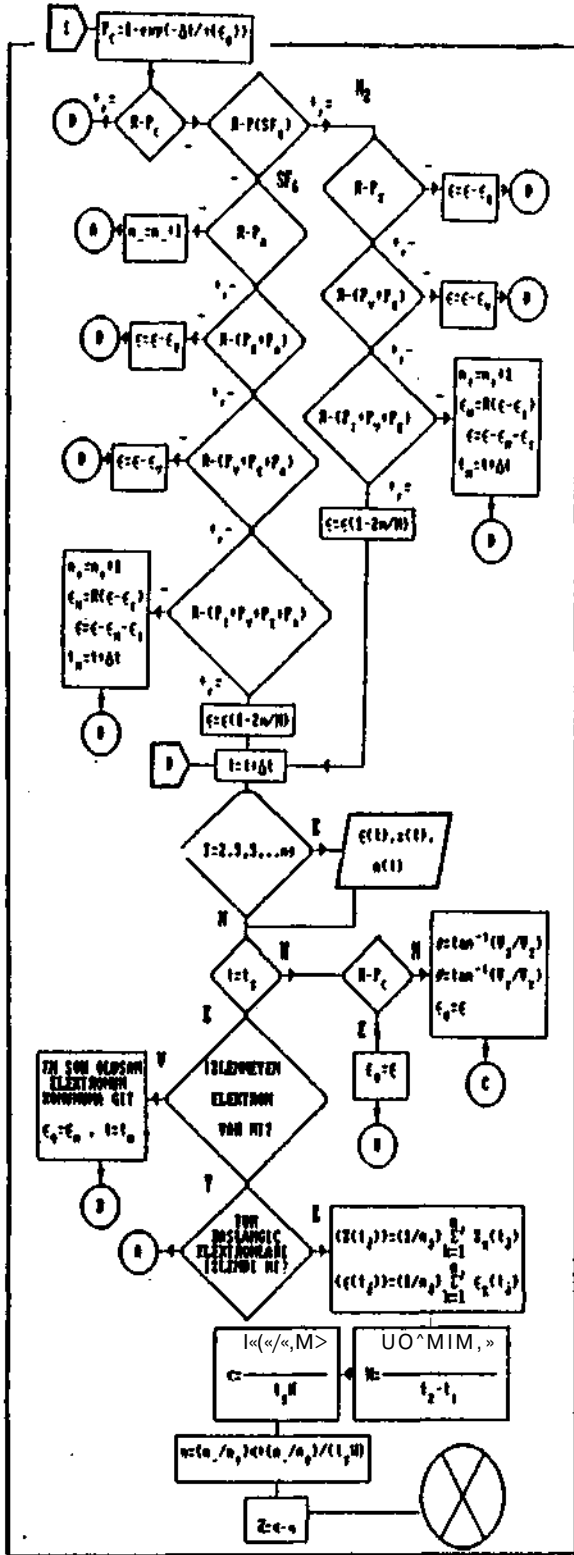
## SEKRETERLİK HİZMETLERİ

Necmi İKİNCİ (EMO) Elmas SARI (EMO)

BİLİMSEL DEĞERLENDİRME KURULU

Cevdet ACAR (İTU)  
İnci AKKAYA (İTU)  
A.Sefa AKPINAR (KTU)  
Ayhan ALTINTAŞ (Bi I.U)  
Fuat ANDAY (İTU)  
Fahrettin ARSLAN (IU)  
Murat ASKAR (ODTÜ)  
Abdullah ATALAR (BiI.U)  
Selim AY (YTU)  
Ümit AYGÖLU (İTU)  
Atalay BARKANA (Anadolu U)  
Mehmet BAYRAK (Selçuk U)  
Atıma BİR (İTU)  
Galip CAÑSEVER (YTU)  
Kenan DANIŞMAN (Erciyes U)  
Ahmet DERVISOGLU (İTU)  
Hasan DİNCER (KTU)  
M.Sezai DİNCER (Gazi U)  
Günsel DURUSOY (İTU)  
Nadia ERDOĞAN (İTU)  
Aydan ERKMEN (ODTÜ)  
İsmet ERKMEN (ODTÜ)  
H.Bülent ERTAN (ODTÜ)  
Selçuk GEÇİM (Hacettepe U)  
Cem GÖKNAR (İTU)  
Remzi GULGUN (YTU)  
Filiz GUNES (YTU)  
İrfan GÜNEY (Marmara U)  
Fikret GÜRGEN (Boğaziçi U)  
Fuat GURLEYEN (İTU)  
Cemi I GURUNLU (KTU)  
Nurdan GUZELBEYOGLU (İTU)  
Emre HARMANCI (İTU)  
Altuğ İFTAR (Anadolu U)  
Kemal İNAN (ODTÜ)  
Asım KASAPOGLU (YTU)  
Adnan KAYPMAS (İTU)  
Ahmet H. KAYRAN (İTU)  
Mehmet KESİM (Anadolu U)  
Erol KOCAOGLAN (ODTÜ)  
Muhammet KOKSAL ( İnönü U)  
Hayrettin KÖYMEN (Bil. U)  
Hakan KUNTMAN (İTU)  
Tamer KUTMAN (İTU)  
Duran LEBLEBİCİ (İTU)  
Kevork MARDIKYAN (İTU)  
A.Faik MERGEN (İTU)  
Avni MORGUL (Boğaziçi U)  
Güven ÖNBİLGİN (KTU)  
Bülent ÖRENCİK (İTU)  
Bülent ÖZGUC (BiI.U)  
A.Bülent ÖZGÜLER (BiI.U)  
Yılmaz ÖZKAN (İTU)  
Muzaffer ÖZKAYA (İTU)  
Kemal ÖZMEHMET (DEU)  
Osman PALAMUTCUOGLU (İTU)  
Erdal PANAYIRCI (İTU)  
Halit PASTACI (YTU)  
Ahmet RUMELİ (ODTÜ)  
Bülent SANKUR (Boğaziçi U)  
M.Kemal SARIOĞLU (İTU)  
Müzeyyen SARTAS (Gazi U)  
A.Hamit SERBEST (CU)  
Osman SEVAİOGLU (ODTÜ)  
A.Oğuz SOYSAL (IU)  
Taner SENGÖR (YTU)  
Emin TACER (İTU)  
Nesrin TARKAN (İTU)  
Mehmet TOLUN (ODTÜ)  
Osman TONYALI (KTU)  
Ersin TULUNAY (ODTÜ)  
Nejat TUNCAY (İTU)  
Atıf URAL (Kocaeli U)  
Alper URAZ (Hacettepe U)  
Gökhan UZGÖREN (IU)  
Yiğdirim UCTUG (ODTÜ)  
Asaf VAROL (Fırat U)  
Siddik B. YARMAN (IU)  
Mümtaz YILMAZ (KTU)  
Melek YÜCEL (ODTÜ)  
Nusret YUKSELER (İTU)  
Selma YUNCU (Gazi U)





Şekli lb

Şokll J Akı? Dintfrnma

## 2. MONIF-CARLO SİMULASYONU

### 2. i. Modol ve Mol(xl)

Bu simülasyonda ortalama serbest uçuş süre metodu FH,91 kullanılmıştır. Simülasyonda yapı İnn yaklaşımlar aşağıdaki çöki İde sıralnnnhil ir.

n) Gnz molekülleri olrkİKMi İbrekelİne karşı sahil . (İirinnldm.hr.

b) D.C. clo<(ril< nlan / rkr;piİtu\* İrrs yöİKİe vo diİzj(ii) olarak uyguİnnmnkİndir.

e) Kosirilip dnSfi İ İmİna jİİro nlrkl.ron sa-çan noklasnl bir kaynık koordinat, sisteminin merkezine yerleştİrİlmİş ve e-lektronlar bu kaynakİnn snbi! bir enerjİyle (0.1 eV) saçİlİnmktadır.

d) İzol.ropik saçİlma kabul edilmiştir.

e) Geri yansıyan (./,-/) konumuna uloşnn) bir elektron kalod t.nrnf MKİnn emi İmek-tecl ir.

f) Coulambelki leşimi ihmal edilmişir, Tonİnnn gaz moleköl yogunluju N=3. )'2xlü<sup>16</sup> cm<sup>-3</sup> (1 lorr, 20°C) olarak alınmış ve n<sub>0</sub> ndel. başlangİç elektronu I<sub>0</sub>=50 ns simu-lasyon süresinee 2,T> ns örnekleme aralıklarıyla izlenmiştir. Başlangİç elektron sayısı uygulanan İ<sub>0</sub>/pjn (Van<sup>-1</sup>torr<sup>-1</sup>) değerine bağlı olup en dişİtk İ7p<sub>0</sub>q değerinde n=6(K) olarak seçilmiştir. Yapılan bu seçimle, en külli koşullu durumda, elektron çİğ enerjisinin dengeye girmesi için geçen sürenin yaklaşık 5 ns olduğu görölmüştür.

İler örnekleme aralığında çİğ i-çitKİe bulunan elektronların koordinat sistemindeki konumu, enerjisi, yaptığı çarpİşma sayısı ve türü ile ilgili bilgi toplanmış ve bilginin analizi ile çİğ parametreleri saptanmıştır. Detaylı akİş diagramı Şekil 1 'de verilmiştir.

Simülasyonda, 0 ve \$ açılarının, çarpİşma olayının olup olmadİğının ve çarpİşma türünün belirlenmesi için (0, 11 arasında düzgün dağılımlı dört ayrı rastgele sayı zinciri kullanılmaktadır.

## 2.2. F.lektron-Molekül Çarpışma. KCMil-leri

Gaz içindeki elektron çık gelişimi gerek UoUzman Denklem iyi e gerekse Montc-C'arlo Similasyonu ile inceleyenirken gaza ait elektron-molekül çarpışma kesitlerinin bilinmesi gerekir.

Hızlı bir parçacık molekülür hızı ihmal edilebilecek kadar küçük olan bir gaz içinde yol aldığında çarpışma yapma olasılığı elektron-molekül çarpışma kesitlerinden yararları olarak bulunur itti. örneğin bir çarpışma meydana, geldiğinde bu çarpışmanın elastik bir çarpışma olma olasılığı

$$\frac{Q_{EL}}{Q_T} \quad (1)$$

ve elastik olmayan bir çarpışma olma olasılığı

$$P_{inelastik} = 1 - P_{elastik} = 1 - \frac{Q_{EL}}{Q_T} \quad (2)$$

şekilde ifade edilir. Hu iradelerde  $Q_T$ ; toplam çarpışma kesitinin genliği ve  $Q_{EL}$ ; elastik çarpışma kesitinin genliğidir. Aynı şekilde elastik olmayan çarpışmalar için ayrı ayrı çarpışma olasılıkları hesaplanabilir. örneğin iyonlaşma türü bir çarpışma için olasılık

$$P_i = \frac{Q_i}{Q_T} \quad (3)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada  $Q_i$ ; iyonlaşma çarpışma kesitidir.

Eğer ortamda iki gaz varsa çarpışmanın birinci gaz molekül Uy I e olma olasılığı

$$P_1 = \frac{J_c \cdot Q_{11}}{k \cdot Q_{T1} + (1-k) \cdot Q_{T2}} \quad (4)$$

şeklinde ifade edilebilir. Bumda k; birinci gazın ortamdaki kısmi basınç oranıdır.  $Q_{11}$  ve  $Q_{12}$  sırasıyla birinci ve ikinci gazın toplam çarpışma kesitleridir.

Bu çalışmada ortam SF<sub>6</sub>+N<sub>2</sub> gaz karışımından oluştuğu için toplam çarpışma kesiti

$$Q_T = k \cdot Q_{T_{SF_6}} + (1-k) \cdot Q_{T_{N_2}} \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada

$$Q_{T_{SF_6}} = Q_m + Q_a + Q_o + Q_v \quad (6)$$

ve

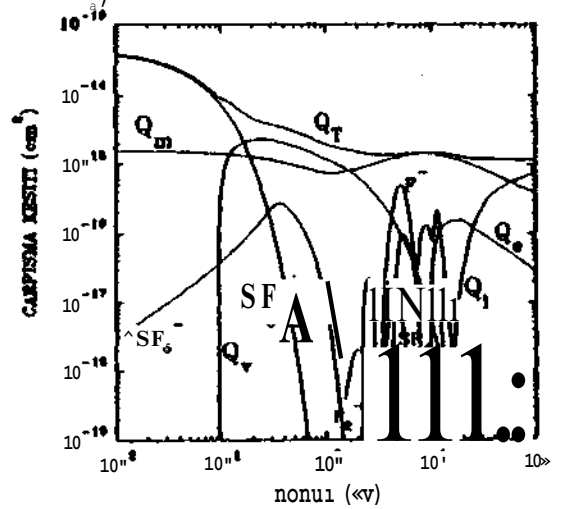
$$Q_{T_{N_2}} = Q_m + Q_{Et} + Q_{Es} + Q_I + Q_v \quad (7)$$

olmak üzere sırasıyla loj.dam toplum N<sub>2</sub> çarpışma kesitleridir. Bu ifadelerde  $Q_m$ ; moment-transfer,  $Q_a$ ; yapışma,  $Q_o$ ; elektroniksel uyarım,  $Q_v$ ; iyonlaşma,  $Q_{Et}$ ; titreşimsel uyarım,  $Q_{Es}$ ; toplam üçlü elektroniksel uyarım ve  $Q_I$ ; toplam tekli elektroniksel uyarım çarpışma kesitleridir.

Bu çalışmada kullanılan SF<sub>6</sub> ve N<sub>2</sub> elektron-molekül çarpışma kesitleri aşağıdaki gibidir.

### 2.2.I. SF<sub>6</sub> Çarpışma Kesitleri

SF<sub>6</sub> için dokuz grup çarpışma kesiti kullanılmıştır. Bunlar moment transfer, iyonlaşma, Q<sub>1</sub>, elektroniksel uyarım, Q<sub>2</sub>, titreşimsel uyarım, Q<sub>3</sub> ve beş tane yapışma (SF<sub>6</sub><sup>-</sup>, SF<sub>6</sub><sup>-</sup>, F<sup>-</sup>, SF<sub>5</sub><sup>-</sup>, F<sub>2</sub><sup>-</sup>), Q<sub>4</sub> kesitleridir.



Şekil 2 SF<sub>6</sub> Çarpışma Kesitleri

Bu çalışmada kullanılan SF<sub>6</sub> çarpışma kesitlerinin grafikleri Şekil 2 'de gösterilmiştir.

Moment transfer kesiti Q<sub>m</sub>



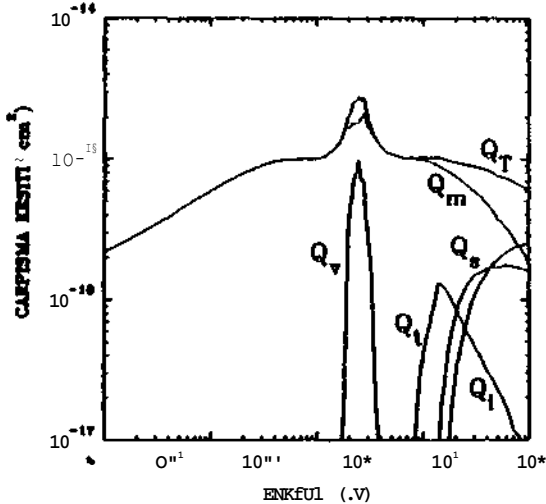
Trnjamr el al. 110] 'don alınmıştır.

Titreşimsel uyarım kesiti  $Q_v$ , Hohn [İli '(lan alınmıştır ve titreşimsel uyarım eşik enerjisi 95 meV 'dur.

İyonlaşma kesiti  $Q_i$ , Itapp ve Englander-Golden [12] 'den alınmıştır ve iyonlaşma eşik enerjisi 15.8 eV 'dur.

SFg, SFj, F, Siy, F, iyonlarının oluşması için sırasıyla  $Q_{si}$ ,  $Q_{si}$ ,  $Q_{si}$  ve  $Q_{si}$  yarımpışma kesitleri kullanılmıştır.  $Q_{si}$  için  $e < 0.14$  değerlerinde Ouljian ve Alajajian 1131 ve  $e > 0.14$  değerlerinde Chutjian 1141 'in ölçümlerinden yarar lanmıştır.  $Q_{si}$  'nin şekli Cristophorou el: al. 1151 'den alınmış ve tepe değeri ayarlanmıştır. Diğer yapıpışma kesitleri Kline et al. [IGI 'dan alınmıştır.

Elektroniksel uyarım kesiti  $Q_e$ , iyonlaşma ve yapıpışma kesitleri deneysel değerlerle uyum sağlayacak şekilde ayarlanmıştır ve elektroniksel uyarım eşik enerjisi 9.8 eV 'dur. Trajmar ve Chutjinn 1171 SFg için 5 tane elektroniksel uyarım eşik enerjisi (9.8, 11, 11.6, 12.8 ve 13.3 eV) belirlemişlerdir fakat bunların şekli ve genlikleri verilmemiştir.



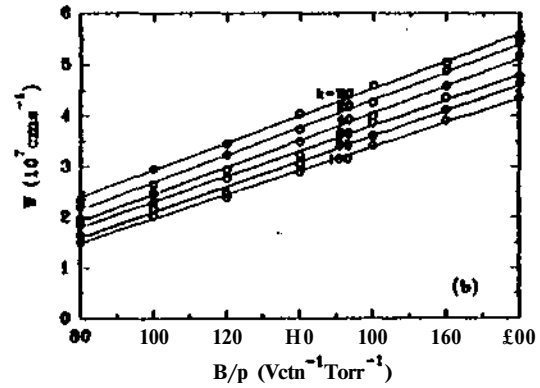
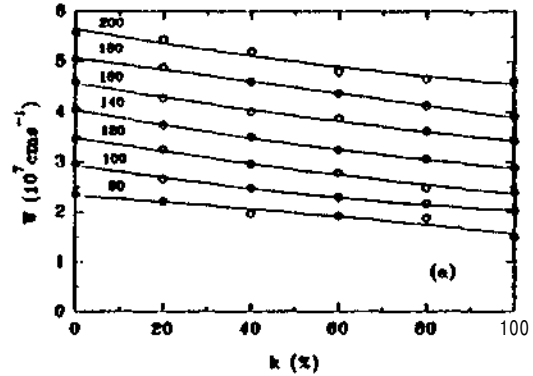
Şekil 3 N<sub>2</sub> Çarpışma Kesitleri

## 2.2.2. N<sub>2</sub> Çarpışma Keşifleri

N<sub>2</sub> için ona İti grup çarpışma kesiti kullanılmıştır. Bunlar momenttim transfer,  $Q_a$  iyonlaşma,  $Q_i$ , elektroniksel uyarım (12 tane üçlü,  $Q_v$ , 1 tane tekli,  $Q_s$ ), ve titreşimsel uyarım,  $Q_v$ , keşifleridir.

Du çalışmada kullanılan N<sub>2</sub> çarpışma kesitlerinin grafikleri Şekil 3 'de gösterilmiştir.

Tüm çarpışma kesitleri l'helps ve l'itchford I 181 'den alınmıştır. İyonlaşma eşik enerjisi 15.5 eV ve titreşimsel uyarım eşik enerjisi 1 eV 'dur.



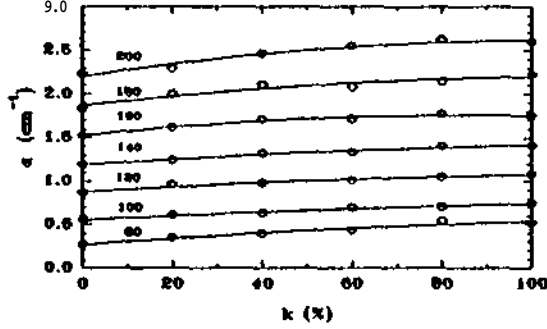
Şekil 4 SF<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> gaz karışımı için sürüklenme hızı

## 3. ÇİĞ PAHAMFULUM

### 3.1. Elektron Sürüklenme Hızı

SF<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> gaz karışımı için sürüklenme hızının, sabit F./p<sub>20</sub> değerlerinde.

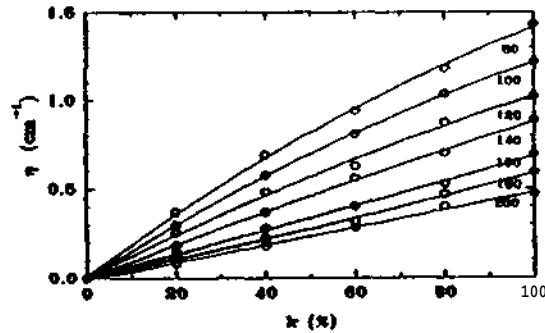
SF<sub>6</sub> gazının kısmi basınç oranına bağlı olarak değişimi Şekil 4a 'da vo SF<sub>6</sub> fazının kısmi basınç oranının sabit değerlerinde, basınca indirgenmiş elektrik alana bağlı olarak değişimi Şekil 4b 'do verilmiştir. SF<sub>6</sub> oranı arttıkça sürüklenme hızının azaldığı görülmektedir. Ayrıca sabit bir karışım oranında artan F/p<sup>TM</sup> ile sürüklenme hızı da artmaktadır.



Şekil 5 SF<sub>6</sub>+N<sub>2</sub> gaz karışımı için iyonlaşma sabitleri

### 3.2. İyonlaşma sabitleri

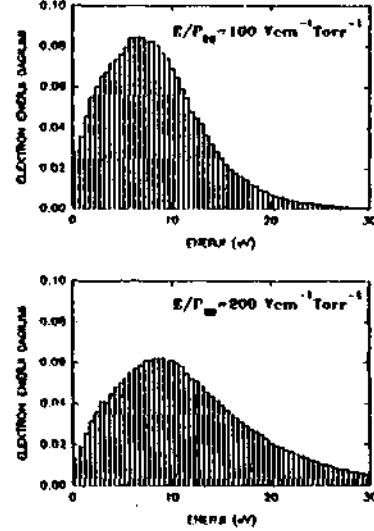
Sl<sub>2</sub>+N<sub>2</sub> gaz karışımı için hesaplanan iyonlaşma sabitinin, sabit E/P<sub>0</sub> (cm<sup>-1</sup>) değerlerinde SF<sub>6</sub> gazının kısmi basınç oranına bağlı olarak değişimi Şekil 6 'de verilmiştir. Şekilden Sl<sub>2</sub> oranı arttıkça iyonlaşma sabitinin arttığı görülmektedir. Bunun nedeni SF<sub>6</sub> gazının iyonlaşma kesitinin N<sub>2</sub> gazından fazla olmasıdır. Buna rağmen çığ içindeki elektronların artış oranı, elektronların SF<sub>6</sub> moleküllerine yapışması nedeniyle, SF<sub>6</sub> oranı arttıkça azalır.



Şekil 6 SF<sub>6</sub>+N<sub>2</sub> gaz karışımı için yapışma sabitleri

### 3.3. Yapışma Sabitleri

SF<sub>6</sub>+N<sub>2</sub> gaz karışımı için hesaplanan yapışma sabitinin, sabit F/p<sub>0</sub> değerlerinde SF<sub>6</sub> gazının kısmi basınç oranına bağlı olarak değişimi Şekil 6 'da verilmiştir. Şekilden SF<sub>6</sub> oranı arttıkça veya t/p<sup>TM</sup> değeri azaldıkça yapışma sabitinin arttığı görülmektedir.



Şekil 7 %80 SF<sub>6</sub> + %20 N<sub>2</sub> karışımı için elektron enerji dağılımları

### 3.4. Elektron Enerji Dağılımları

Şekil 7 'de %80 SF<sub>6</sub> + %20 N<sub>2</sub> karışımı için elektron enerji dağılımları iki ayrı F/p<sup>TM</sup> için verilmiştir. Artan E/p<sub>0</sub> ile enerji dağılımının tepe değeri yüksek enerji bölgesine kaymaktadır. Bu davranış ise çığ içindeki yüksek enerji) i elektron sayısının arttığını gösterir. Enerji dağılımları

$$\int_0^{\infty} f(e) de = 1$$

olacak şekilde normalize edilmiştir,

### 4. SONUÇ

Bu çalışmada düzgün elektrik alan altındaki SF<sub>6</sub>+N<sub>2</sub> gaz karışımları için elektronların davranışı, Monte-Carlo

Simulasyonu i Io, geniş bir F./p<sub>20</sub> aralığında incelenmiştir. Gazların l>oşalımı için önemli olan parametrelerin Sİy+N, gaz karışımını için Sf<sub>y</sub> kısmi basınç oranına göre değişimi gözlenmiştir. Arlan SF» kısmi basınç oranıyla, beraber, sahil bir l'vpg için, elektron enerji dağılım fonksiyonlarının biçimi değişmekte, elektron sürüklenme hızları düşmekte, iyonlaşma ve yapısına sabitleri artmaktadır.

#### KAYNAKLAH

- (II G.H.Govinda Haju ve M.S.Dincer, J. Appl. Phys. , 53, 21B7-72, 1982.  
 12] M.S.Dineer ve G.H.Govinda Haju, IFFK Trann. on F.leel r. Insul. , in, 40-14, 1984.  
 131 II. İtoh, M. Khimo/urna, II. Tagashi ra ve S.Sakamota, J. Phys. I): Appl. l'hs. , 12, 2107-72, 1979.  
 14) İh. Aeshvanden, Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on GaseoiiH Diele.rtrics", Pergamon-New York. 24-33, 1984.  
 151 M.F.Frechette, J.Appl.Phys., 59, 3684-93, 190(5).  
 16) M.Yousfi, P.Segur, ve T.Vnssiliadis, J. l'hs. D.: Appl.F'hs., 18, 359-75, 1985.  
 171 II. Itoh, Y.Ohmori, M. Knwngue.lü, Y.Mivira, Y.Nakao, ve II. Talaşlı i ra, J.l'hs.D.: Appl.l'hs., 23, 415-21, 1990.  
 181 M.S.Dineer, ve G.H.Govinda Haju. J. Appl. l'hs. , 54, 0311-1G, 1983.  
 191 M.S.Dineer. J. l'hs. D: Appl. Phys., 23, 622-23, 1990.  
 1101 S.Trajmar, I). F. Ke^ister, ve A. Chutjian, l'hs. Kep, 97, 219-50, 1983.  
 (111 K.Huhr, J. l'hs.U: Al .Mol. l'hs. , 12. 1.185-188, 1979.  
 1121 D.Hnpp, ve I'. F.nglander Golden, J.Chem.l'hs., 43, 1404-79. 1965.  
 [131 A.ChulJian, vo S. II. Alajajian, l'hs.Uev.A, 31, 2885-92, 1985.  
 [141 A.Chit jian, l'hs.Kev.I.el.t. , 40, 1511-14. 1981.  
 [ 15) I. G. Christophorou, D. L. McCorkle ve J.D.Carter, .l. Chem. 'l'hyK. , 57, 253-RO, 1971.  
 [in l I.F.Kline. D.K.Davies, C. I..Chen

ve l'.J.Chantry, J. Appl. l'hs. , 50, 6789-90, 1979.

I 171 S.lrajmar ve A.Chutjian, J.Phys .H: At.Mol.Phys. , 10, 2943-49, 1977.

1181 A.V.I'helms ve L.C.Pilchroed, Jll.A Information Center Hecpjrt, No: 26, 1985.



Doç. Dr.M.S(î/n i Dinçer 19.6.1952 tarihinde Ankara 'da doğmuştur. Yüksek Gerilim ga/boşa I unları konusunda çeşilli i uluslararası yayını bulunan ya/ar 1979 Omt) F.lektrik Mühendisi i fi i Bölümün 'den Yüksek Mühendis

ve 1985 yılında Department of Klectrical Fn.iineering, University of Windsor 'dan l'h.l). derecelerini almıştır. 1980-84 yıllarında Windsor 'da asistan olarak çalışmış ve 1984-80 yıllarında aynı üniversitenin lilcktrik Mühendisliği Holümü 'nde öğretim görevlisi olarak görev almıştır. OÜ'Ü Eleklrik-F.lokt.ronik Mül ieiKİis liği Kil ünün 'de 1988 yj-1 mda IXçent olalı yazar halen Gazi Oniversit esi F.lektrik-Elektronik Mühendisli gi Dölümünde Elektrik 'Tesisleri ABD başkanıdır.



Timur Aydın 12.6.1907 yi lında Samsun 'ela doğan yazar Samsun Anadolu Lisesi 'ni 1985 tarihinde bitirmiş ve 1990 yılında Gazi Üniversitesi Flektrik-F.lektronik Mühendisliği Bölümü 'nden Elektrik-FJektronik Mühendisi ve 1993 yi lında Yüksek Lisans derecelerini almıştır. Aynı bölümde araştırma görevlisi olarak çalışan yazarın çalışma alanları yüksek gerilim gaz boşalımları Üzerinedir.

# ELEKTRİKSEL İÇ KISMI BOŞALMALARA BOŞLUK BOYUTLARININ ETKİSİ

Can YENİDOĞAN

Ö/can KALENDERLİ

İ.T.Ü. Elektrik - Elektronik Fakültesi

Fuat Kılınk Yüksek Gerilim Laboratuvarı

80191 Gümüşsüyü / İSTANBUL

## Özet

Son yıllarda kısmi boşalma olaylarının bilgisayar destekli incelenmesi güncellik kazanmıştır. Bu tür çalışmalar yalıtkan içindeki yabancı madde, boşluk gibi kusurlar ile boşalma davranışı arasındaki ilişkileri çok yönlü, hızlı ve kolay bir şekilde inceleme olanağını vermektedir.

Bu çalışmada da uçlarına yüksek gerilim uygulanmış ve içinde dairesel silindirel hava boşluğu bulunan bir katı yalıtkanındaki kısmi boşalma davranışına boşluk boyutlarının etkisi bilgisayar yardımıyla incelenmiştir. İncelemeler, EMTP (Electromagnetic Transients Program) da, probleme ilişkin bir eşdeğer devre tanımlanarak yapılmış ve tanımlanan bu devre üzerinde, değerleri boşluk çapı ve yüksekliğine bağlı olarak değişen devre kapasiteleri değiştirilerek, boşluk boyutları ile kısmi boşalma olayları arasındaki ilişkileri gözlemeleme olanağını veren boşluk uçlarındaki akım ve gerilim değişimleri elde edilmiştir.

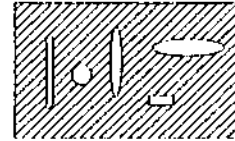
## I. Giriş

Elektriksel kısmi boşalma olayı alan şiddetinin yerel olarak ortamın delinme alan şiddetinden büyük olduğu yerlerde görülen tam olmayan ancak kendini besleyebilen bir boşalma olayıdır. Bu olaya eğrilik yarıçapı, elektrotlar arası açıklığa göre küçük olan elektrotlarda ve yalıtkan maddelerin içinde veya yalıtkan maddeler ile elektrotlar arasındaki küçük boşluk veya aralıklarda rastlanır. Kendini ısı, ışık, elektromagnetik dalga, koku ve kimyasal bozulmalar şeklinde belli eden bu olay yalıtımın dolaşısıyla aygıt ve sistemin güvenilirliğine, kalitesine ve ömrüne etki eder 11-41.

Kısmi boşalmaların varlığının belirlenmesi, ölçülmesi, yerinin bulunması ve olayın değerlendirilmesi işlemleri, etkenlerin çokluğu nedeniyle çok yönlü, hızlı ve kolay bir şekilde, üzerinde kuramsal ve deneysel incelemeler yapma olanağını veren bilgisayar destekli çalışmaların önemini artırmış, kısmi boşalmaların ölçülmesi, izlenmesi ve değerlendirilmesinde sinir ağlarının kullandığı uygulamalara hız kazandırmıştır 15-1/.

Kısmi boşalmalar, iç ve dış kısmi boşalmalar olmak üzere iki genel grupta incelenebilir. Bu çalış-

mada, katı yalıtkan içindeki hava dolu boşluklarda söz konusu olan iç kısmi boşalmalar göz önüne alınmıştır. Bir katı yalıtkan içindeki kısmi boşalmalara, uygulanan gerilimin türü, değeri, frekansı, yalıtkanın fiziksel ve elektriksel özellikleri, ortam koşulları, sıcaklık, boşluk boyutu, biçimi, sayısı ve yeri gibi bir çok etkenin etki etliği bilinmektedir /8-10/. Örneğin, boşluğun boyutunu, yüksekliği ve yarıçapı ile; biçimini, gerçekte rasgele olmalarına karşın, yaklaşığı olan küresel, dairesel veya eliptik silindirel, uzamış veya yassılaştırılmış sferoidal gibi bilinen uygun geometrik şekillerle; içindeki ortamın durumunu, genellikle hava olmakla birlikte, başka bir gaz veya yağ ile dolu olarak ve yüzeysel ve hacimsel iletkenlikleri ile göz önüne alarak incelemek mümkündür (Şekil 1). Görüldüğü gibi kuramsal ve deneysel incelenecek pek çok etken bulunmaktadır. Bu da yapılacak çalışmaların zenginlik kaynağıdır.



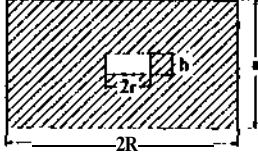
Şekil 1. Boşluk biçimleri

Bu çalışmada da uçlarına yüksek gerilim uygulanmış ve içinde dairesel silindirel hava boşluğu bulunan bir katı yalıtkanındaki kısmi boşalma davranışına boşluk boyutlarının etkisi bilgisayar yardımı ile incelenmiştir. İncelemeler, EMTP (Electromagnetic Transients Program /11-12/) da, probleme ilişkin bir eşdeğer devre tanımlanarak yapılmış ve tanımlanan bu devre üzerinde, değerleri boşluk çapı ve yüksekliğine bağlı olarak değişen devre kapasiteleri değiştirilerek, boşluk boyutları ile kısmi boşalma olayları arasındaki ilişkileri gözlemeleme olanağını veren boşluk uçlarındaki akım ve gerilim değişimleri elde edilmiştir.

## 2. Boşluğu Katı Yalıtkan

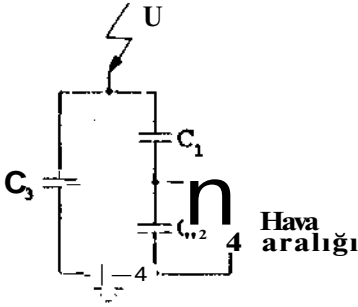
Uygulamada, yalıtkan maddelerde yapımları ve kullanımları sırasında arzu edilmeyen yabancı ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ 5. ULUSAL KONGRESİ

madde ve boşluklar kalabilir veya oluşabilir. İçinde dairesel silindirselsel bir hava boşluğu bulunan bir katı yalıtkanı Şekil 2 deki gibi göz önüne alabiliriz.



Şekil 2. Boşluklu katı yalıtkan

Şekil 2 de a yalıtkanın kalınlığını, 2R disk şeklinde olduğu düşünülen yalıtkanın çapını, h boşluğun yüksekliğini ve 2r boşluğun çapını göstermektedir. Düzlemsel elektrot sistemi arasına yerleştirilmiş ve uçlarına alternatif gerilim uygulanmış boşluklu bir katı yalıtkanın elektriksel eşdeğer devresi Şekil 3 deki gibi göz önüne alınabilir [1-10/.



Şekil 3. Boşluklu bir katı yalıtkanın elektriksel eşdeğer devresi

Şekil 3 de C, yalıtkanın boşluksuz (sağlam) kısmının eşdeğer kapasitesi, C, boşluğun kapasitesi ve C, boşluğa seri katı yalıtkan parçalarının eşdeğer kapasitesini göstermektedir. C, ye paralel bağlı hava aralığı, boşluktaki boşalma davranışını veren elektrot sistemidir. Çalışmalarımızda yalıtkan ve boşluk biçimleri dairesel silindirselsel alınmış ve eşdeğer devredeki kapasitelerin hesabında kenar etkileri olmayan düzlemsel elektrot sisteminin kapasite hesabı kullanılmıştır. Düzlemsel elektrot sistemli bir kondansatörün kapasitesi, S elektrot kesiti, d dielektriğin kalınlığı ve e yalıtkanın dielektrik sabiti olmak üzere,

$$C = \frac{eS}{d} \quad d)$$

bağıntısı ile hesaplanabilir. Buna göre eşdeğer devredeki silindirselsel geometri düzlemsel elektrot sistemleri olarak göz önüne alınabilecek kapasitelerin

değerleri,

$$C_1' = \frac{\epsilon_{r1} \epsilon_0 \pi r^2}{a}$$

$$C_1'' = \frac{C_n C_{tt} r^2}{a l'}$$

$$C_1 = \frac{C_1' \cdot C_1''}{C_1' + C_1''}$$

$$C_2 = \frac{\epsilon_{r2} \epsilon_0 \pi R^2}{h} \quad (3)$$

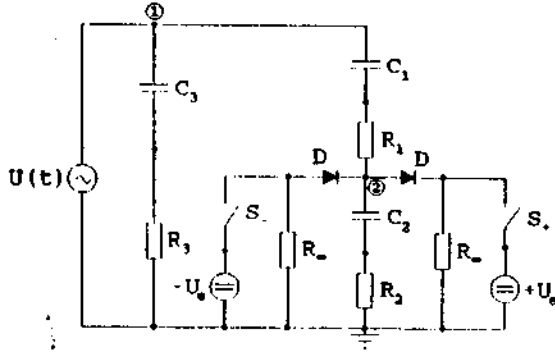
$$C_3 = \frac{\epsilon_{r1} \epsilon_0 \pi (R^2 - r^2)}{a} \quad i^*y$$

bağıntılarından hesaplanabilir. Bu bağıntılarda C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub> sırasıyla boşluğa seri üst ve alt yalıtkan parçalarının kapasiteleri, a<sub>1</sub>, a<sub>2</sub> de bu parçaların kalınlıklarıdır. Boşluğa seri üst ve alt yalıtkan parçaların çapları, boşluğun çapına (2r) eşittir. C<sub>1</sub> kapasitesi C<sub>1</sub>' ve C<sub>1</sub>'' kapasitelerinin seri eşdeğeridir. ε<sub>r1</sub> katı yalıtkanın, ε<sub>r2</sub> boşluk içindeki ortamın (hava için ε<sub>r1</sub> = 1) bağıl dielektrik sabitleri olup ε<sub>0</sub> = 8,86.10<sup>-12</sup> F/m dir. Bağıntılardaki boşluğa ilişkin yükseklik (h) ve çap (2r) büyüklükleri değişken, diğer büyüklükler sabit alınarak boşluk boyutlarıyla devre kapasitelerinin değişimi hesaplanabilir dolayısıyla kapasite uçlarına düşen gerilimlerin değişimleri kapasitif gerilim dağılımından elde edilebilir.

### 3. Model Devre

Boşluklu bir yalıtkanın boşluk içindeki hava, boşluk uçlarındaki gerilim dolayısıyla elektriksel alan şiddeti boşluk içindeki ortamın (havanın) delinme gerilimine veya alan şiddetine ulaştığında delinir. Kısmi boşalma denilen bu delinmeden sonra boşluk uçlarındaki gerilim, hızla boşalma sönmeli gerilimi (±U<sub>0</sub>) olarak adlandırılan ve literatürde yaklaşık 100 V mertebesinde olduğu belirtilen bir değere düşer [10]. Yalıtkan maddeye uygulanan gerilimin boşluk uçlarına düşen kısmı, boşlukta boşalma başlangıç gerilimini (±V<sub>0</sub>, y<sub>0</sub>) aştığı sürece tekrarlanan boşalmalar oluşur. Bu temel boşalma davranışı dikkate alınarak Şekil 4 de verilen bir model devre geliştirilmiştir.

Şekil 4 de gösterilen ve tarafımızdan geliştirilen model devrede, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub> ve C<sub>3</sub> yukarıda sözü edilen basitleştirilmiş eşdeğer devredeki Kapasiteleri,



Şekil 4. Önerilen Model Devre

$R_1$ ,  $R_2$  ve  $R_3$ , EMTP (Electromagnetic Transients Program) da bu tip kapasitif devrelerin çözümünde kullanılan yöntemin getirdiği salınımları önleyici, At zaman adımlarıyla seri bağlı olduğu C kapasitesinin değerine göre

$$R = 0,15 \cdot \frac{At}{2C} \quad (5)$$

bağıntısıyla hesaplanan sönüm dirençlerini göstermektedir  $İMİ$ . Devrede boşalma sönme gerilimini modellemek amacıyla  $\pm U_0$  değerli doğru gerilim kaynakları kullanılmıştır.  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarları uygulanan  $u(t)$  alternatif geriliminin pozitif ve negatif yarı dalgalarındaki kısmi boşalma oluşumunu ve başlangıcını belirleyen anahtarlardır.  $D_1$  ve  $D_2$  diyotları sırasıyla uygulanan geriliminin pozitif ve negatif yarı dalgalarında iletme geçen dolayısıyla boşalma kutbietetini tanımlayan diyotlardır. Bu diyotların  $S_1$  ve  $S_2$  anahtarlarının açık konumlarında toprak ile bağlantılarını  $R_m$  dirençleri sağlamaktadır. Model devrenin uçlarına 50 Hz frekanslı sinüsoidal alternatif gerilim uygulandığı kabul edilmiştir. Bu modelde gerilimin pozitif ve negatif yarı dalgaları için kısmi boşalma başlangıç ve sönme gerilimlerini ayrı ayrı tanımlama olanağı olduğundan bu devre ile yarıdalgalara göre farklı genlikli ve sıklıklı boşalma davranışları incelenebilir.

#### 4. Modelleme Sonuçları

Şekil 4 de önerilen model devre ve (2), (3), (4) bağıntıları göz önüne alınarak uçlarına yüksek gerilim uygulanmış ve içinde dairesel silindrsel hava boşluğu bulunan bir katı yalıtıkandaki kısmi boşalma davranışına boşluk boyutlarının etkisi bilgisayar yardımıyla incelenmiştir. İncelemeler, EMTP (Electromagnetic Transients Program) Sürüm 6.0 da yapılmıştır /11-12/.

#### 4.1. Boşluk Çapının Etkisi

Bu incelemede, yalıtkanın boyutları ( $2R=50$  mm,  $a=25$ mm) ve bağıl dielektrik sabiti ( $\epsilon_r=6$ ), boşluğun yüksekliği ( $h=0,1$  mm) ve sisteme uygulanan gerilim ( $U = 75$  kV,  $f=50$  Hz) sabit tutulmuş, boşluğun çapına sırasıyla  $2r= 1-2-3$  mm değerleri verilerek boşluk uçlarındaki gerilim ve akımın zamana göre değişimleri elde edilmiştir (Şekil 5, Şekil 6).

Şekil 5 ten görüldüğü gibi incelenen boşluk çapı aralığında boşluk uçlarındaki gerilimlerin zamanla değişimlerinde bir fark görülmemekte, hepsinde aynı sayıda ve genlikte boşalmalar izlenmektedir. Bu durum, boşluk çapının değişimi ile eşdeğer devredeki kapasite değerlerinin birbirlerine göre bağıl değişiminin yaklaşık aynı kaldığı ve boşluk çapındaki değişimlerin kısmi boşalma olaylarına etkisinin göz ardı edilebileceği şeklinde yorumlanabilir. Çap ile boşluk uçlarındaki gerilim değişmemesine karşılık Şekil 6 nun incelenmesinden boşluk üzerinden geçen akımda bir artış gözlenmektedir. Bu durum, boşluk çapının büyümesi ile boşluk kapasitesinin artışına bağlanabilir.

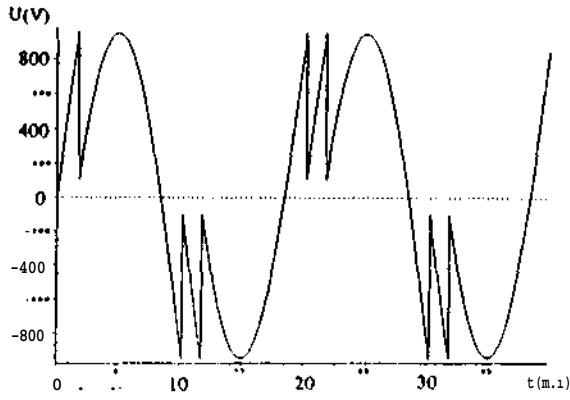
#### 4.2. Boşluk Yüksekliğinin Etkisi

Bu incelemede, alt bölüm 4.1 den farklı olarak boşluk çapı ( $2r=0,1$  mm) sabit alınmış, boşluk yüksekliğine sırasıyla  $h= 1-0,1-0,01$  mm değerleri verilerek boşluk uçlarındaki gerilim ve akımın zamana göre değişimleri elde edilmiştir (Şekil 7, Şekil 8).

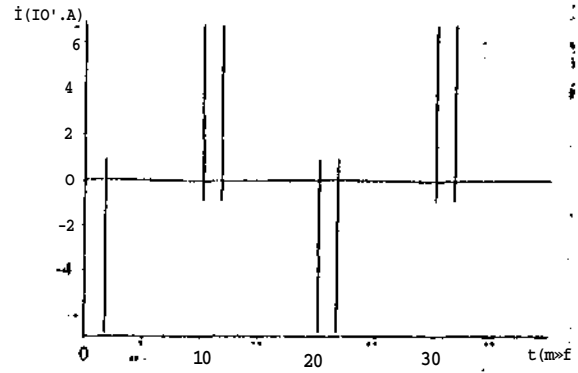
Şekil 7 den görüldüğü gibi incelenen boşluk yüksekliği aralığında, boşluk yüksekliği azaldıkça boşluk uçlarındaki boşalma sıklığında ve genliğinde boşalma belirgin bir azalma görülmektedir. Bu durum, boşluk yüksekliği azaldıkça boşluk içindeki havanın delinme dayanımının dolayısıyla kısmi boşalma başlangıç geriliminin yükselmesine bağlanabilir /13/. Şekil 8 in incelenmesinden ise yüksekliği azaldıkça boşluk üzerinden geçen akımda, delinme gerilimini izleyen ancak değerinde belirgin bir değişim gözlenmeyen bir durum saptanmaktadır. Bu durum, boşluk yüksekliği azaldıkça boşluk kapasitesinin artmasına karşılık boşluk uçlarındaki gerilimin de azalması ile açıklanabilir.

#### 5. Sonuçlar

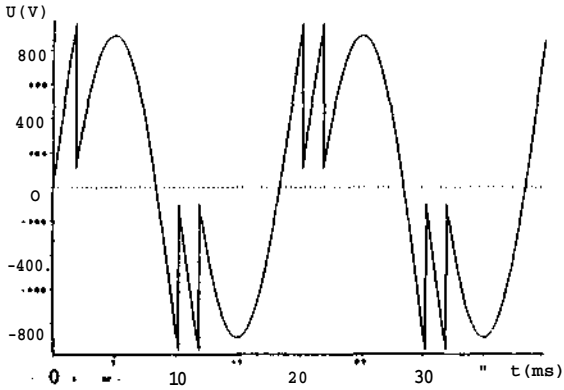
Elektriksel kısmi boşalmaların ölçülmesinde ve değerlendirilmesinde bilgisayar destekli çalışmaların hızla arttığı günümüzde çok değişkenli bir olay



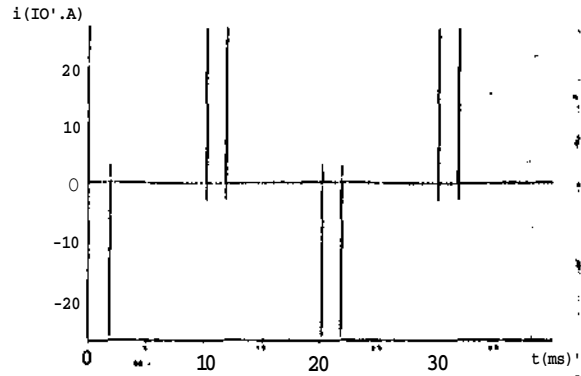
(a)



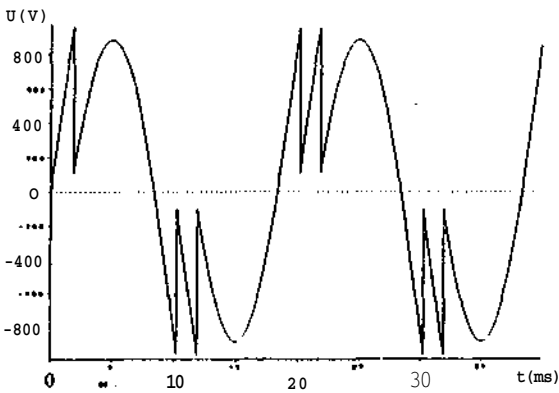
(a)



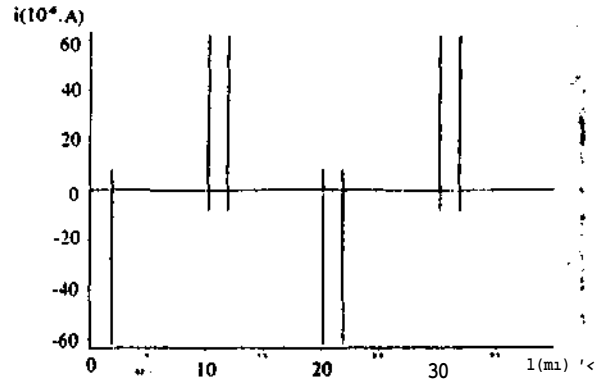
(b)



(b)



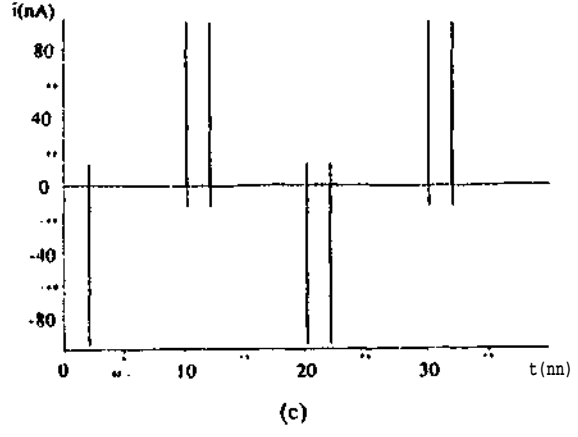
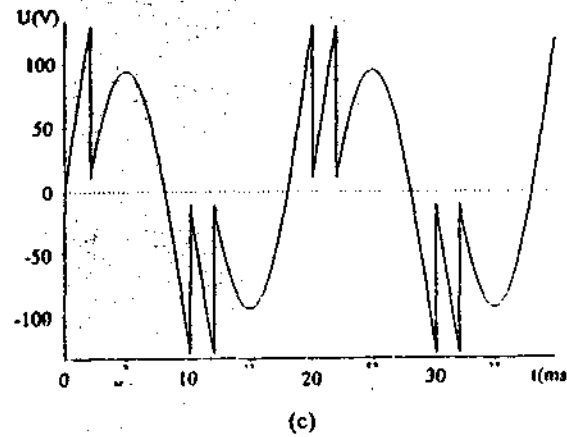
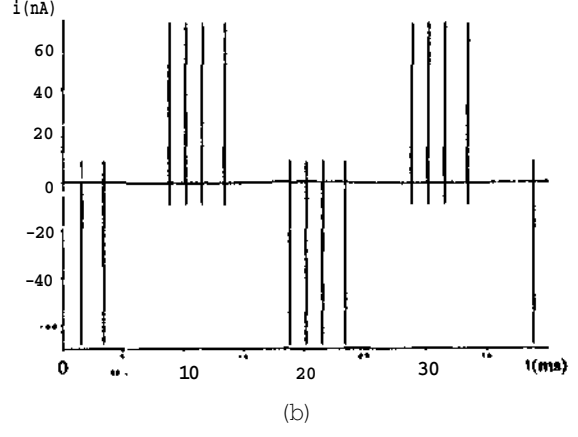
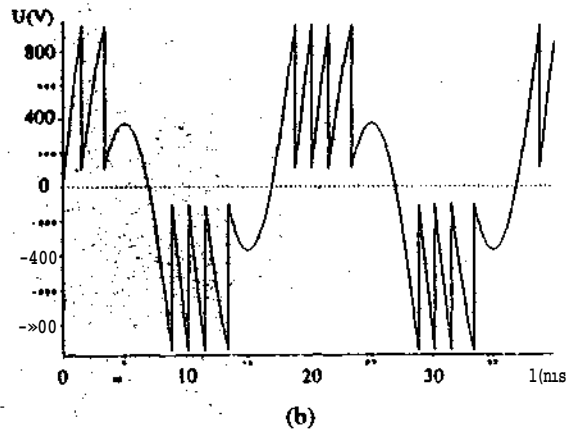
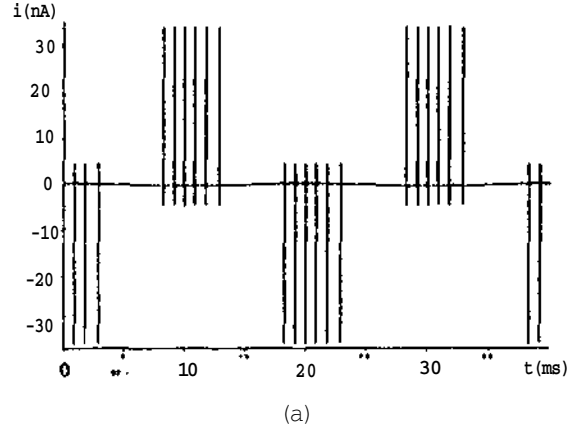
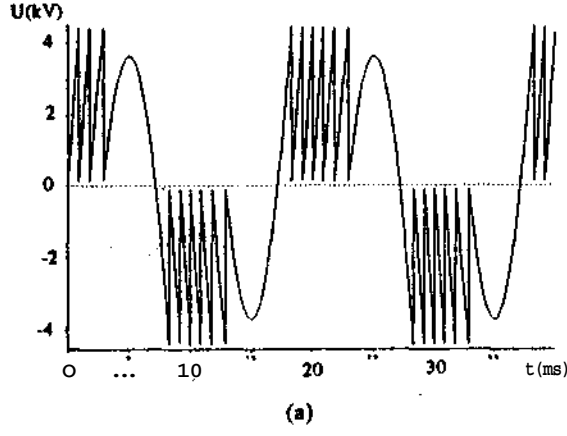
(c)



(c)

Şekil 5. Farklı boşluk çapları ( $2r$ ) için boşluk uçlarındaki gerilimin zamanla değişimi  
a)  $2r=1$  mm  
b)  $2r=2$  mm  
c)  $2r=3$  mm

Şekil 6. Farklı boşluk çapları ( $2r$ ) için boşluk üzerindeki akımın zamanla değişimi  
a)  $2r=1$  mm  
b)  $2r=2$  mm  
c)  $2r=3$  mm



Şekil 7. Farklı boşluk yükseklikleri ( $h$ ) için boşluk uçlarındaki gerilimin zamanla değişimi

- a)  $h=1,00$  mm
- b)  $h=0,10$  mm
- c)  $h=0,01$  mm

Şekil 8. Farklı boşluk yükseklikleri ( $h$ ) için boşluk üzerindeki akımın zamanla değişimi

- a)  $h=1,00$  mm
- b)  $h=0,10$  mm
- c)  $h=0,01$  mm



ulan elektriksel kısmi boşalma olayı çekiciliğini sürdürmektedir. Yapay sinir ağlarının ölçme ve değerlendirme aşamalarında kullanılmaları çalışmalarının başarılı olabilmesi, bu çalışmada olduğu gibi, yan çalışmalardan elde edilen bilgilerin çokluğu ve doğruluğu ile orantılıdır.

Uçlarına yüksek gerilim uygulanmış ve içinde dairesel silindirik hava boşluğu bulunan bir katı yalıtımdaki kısmi boşalma davranışına boşluk boyutlarının etkisinin bilgisayar yardımıyla incelendiği bu çalışmada, ileri çalışmalarda veri artışına bir katkıda bulunacaktır. Hoşluk çapının büyümesi ile boşluk uçlarındaki gerilimin değişmemesi, buna karşılık akımın artması; boşluk yüksekliğinin azalması ile boşluk içinde boşalma sıklığının artması, buna karşılık akımın fazla değişmemesi sonuçları genişletilerek kullanılabilir.

Tefekkür

Yazarlar, EMTP nin kullanımı aşamasındaki katkılarından dolayı Y.Doç.Dr. Aydoğru ÖZDEMİR'e teşekkür ederler.

#### KAYNAKÇA

// KREUGER, F.M., Discharge Detection in High Voltage Equipment, Temple Press Books Ltd., London, 1964.

III MASON, J.M., Discharge Detection and Measurement, Proc.IEE, Vol.112, No.7, pp. 1407-1423, July 1965.

/3/ NATTRASS, O.A., Partial Discharge Measurement and Interpretation, IEEE Electr. Insul. Magazine, Vol.4, No.3, pp. 10-23, May/June 1988.

İM DEVINS, J.C., The Physics of Partial Discharge in Solid Dielectrics, IEEE Trans. on Electr.Insul., Vol.EI-19, No.5, pp.475-495, Oct. 1986.

151 MELVILLE, D.R.G., SALVAGE, B., STEINBERG, N.R., Discharge Detection and Measurement Under Direct Voltage Conditions: Significance of Discharge Magnitude, Proc. IEE, Vol.112, No.9, pp.1815-1817, Sep. 1965.

16/ OKAMOTO, T., TANAKA, T., Novel Partial Discharge Measurement Computer-Aided Measurement Systems, IEEE on Electr. Insul., Vol.EI-21, No.6, pp. 1015- 1019, Dec. 1986.

III GUUSKI, E., KREUGER, F.H., Computer Aided Analysis of Discharge Patterns, Phys. D: Appl. Phys.23, pp. 1569-1575, 1990.

/87 SCIIIFANI, R., A Novel Histogram for Partial Discharge Signals in HV Insulating Systems.IEEE Trans. on Electr. Insul., Vol.EI-21. No.1, pp.89-99, Feb. 1986.

191 HALL, H.C., RUSSEK. R.M., Discharge Inception and Extinction in Dielectric Voids, Proc.IEE, Vol. 101, No.79, pp.47-55, Feb. 1954.

/10/ BANIA, J.W., RAGMUVEER. R., A New Approach to Define Internal Partial Intensity, IEEE Trans. on Electr.Insul., Vol.EI-21, No.1, pp.79-87, Feb. 1986.

/11/ DOMMEL, H.W. et al, Electromagnetic Transients Program Reference Manual, EMTP Theory Book, Bonneville Power Administration, Portland, Ore., Aug. 1986.

IIII Alternative Transient Program (ATP) Rule Book, Lcivem EMTP Center (LEC), Belginin, 1987.

/13/GÖNENÇ.İ., Yüksek Gerilim Tekniği, Cilt 1, Statik Elektrik Alanı ve Basit Elektrod Sistemleri, İTÜ Kütüphanesi Sayı: 1085, İstanbul, 1977.



**Can YENİDOĞAN**, 1966 yılında İstanbul'da doğdu. 1988 yılında İTÜ Elektrik Elektronik Fakültesi (CEF) Elektrik Mühendisliği Bölümü (EMB)den Müh., 1991 de İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü (FBE) Elk. Müh. programından Y.Müh. olarak mezun oldu. YENİDOĞAN, 1991 yılından beri İTÜ FBE Elektrik Mühendisliği programında doktora çalışmalarını sürdürmekte ve 1990 dan beri de İTÜ EEF EMB, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalında Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.



**Özcan KALENDERLİ**, 1956 yılında İstanbul'da doğdu. İTÜ EEF'den 1978 de Müh., 1980 de Y.Müh. olarak mezun oldu. 1990 da İTÜ FBE Elektrik Mühendisliği programında doktora çalışmalarını tamamladı. İTÜ EEF EMB, Elektrik Tesisleri Anabilim Dalında 1979-1980 arasında Müh., 1980-1991 arasında Y.Müh. olarak çalışan KALENDERLİ, 1991 den beri aynı Bölümde Y.Doç. olarak görev yapmaktadır. KALENDERLİ, çalışmalarını ağırlıklı olarak yüksek gerilim tekniği konularında sürdürmektedir.

**İ.T.Ü. Elektrik - Elektronik Fakültesi  
Fuat Külünk Yüksek Gerilim Laboratuvarı  
80191 Gümüşsüyu / İSTANBUL**

**ÖZET**

Yıldırım, doğal ve büyük bir boşalma olayıdır. Bu olayın oluşumu, gelişimi ve etkinliği konusunda açıklık kazandırıcı kuramsal ve deneysel çalışmalar sürmektedir. Bu çalışmada da yıldırımın kutbiyeti ile etkin olduğu bölge arasındaki ilişkiyi incelemek üzere yapılan deneysel bir çalışma ve sonuçları sunulmaktadır. Kurulan bir model düzeninde gerçekleştirilen bu çalışmada, yer düzlemine yerleştirilen bina modellerine yıldırım kaynağından uzaklıkla atlama gerilimlerinin, gerilimin kutbiyetine bağlı olarak değişimleri ve davranışları incelenmiştir.

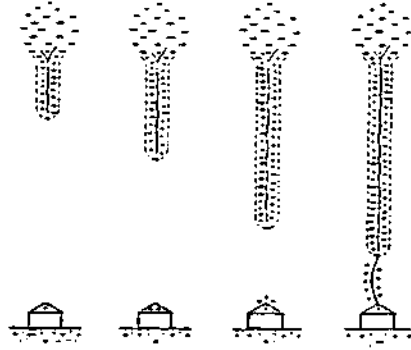
**1. GİRİŞ**

Yıldırım doğada karşılaşılan en büyük boşalma olayıdır. Bu olayın oluşumu, gelişimi ve etkinliği konusunda yapılan kuramsal ve deneysel çalışmalar sürmektedir. Yıldırımın darbe karakterinde ve çok büyük açıklıklarda oluşan bir boşalma olayı olması, modellemelerin hareket noktasıdır. Bu konudaki deneysel çalışmalar darbe gerilimi ile büyük açıklıklarda düzgün ve düzgün olmayan alanda pek çok etkeni göz önüne alarak genelde modeller üzerinde yapılmaktadır /1-4/. Bu çalışmada da yüklü yıldırım bulutu ve yerin düzlem elektrotlarla, öncü boşalmanın bir çubuk elektrotla ve yer yüzeyindeki binaların da düzenin ölçeğine uygun boyutlarda bina biçimi elektrotlarla modelendiği bir model düzen üzerinde yıldırımın kutbiyetinin yıldırımın etkinliği üzerine etkisi deneysel olarak incelenmiştir.

**2. YILDIRIM BOŞALMALARI**

Yıldırım, büyük elektrot açıklıklarında kanal boşalması şeklinde oluşan bir boşalma olayıdır. Yüklü bir bulutta alan

şiddeti yeteri kadar yükseldiği zaman ya bulut - bulut yıldırımı (bulut yıldırımı) ya da bulut - yeryüzü yıldırımı (aşağıya doğru inen yıldırım) oluşur. Yeryüzündeki alanı bozarak yüksek veya sivri yerler nedeniyle yeryüzü - bulut yıldırımı (yukarıya doğru çıkan yıldırım) oluşabilir (Şekil 1).



Şekil 1. Yıldırımın gelişimi.

Yeryüzü yıldırımları buluttaki artı veya eksi yüklü merkezlerden ya da yeryüzündeki artı veya eksi yüklü sivriliklerden ileri gelebildikleri için dört tür yıldırımdan söz edilebilir:

- 1) Eksi buluttan aşağıya doğru inen yıldırım,
- 2) Eksi buluta doğru yükselen yıldırım,
- 3) Artı buluttan aşağıya doğru inen yıldırım,
- 4) Artı buluta doğru yükselen yıldırım.

Yıldırım bulutu ile toprak arasındaki kuvvetli elektrik alanlarının kaynağı, yıldırım bulutundaki elektrik yükleridir. Bulutta var olan girdaplı hava akımları nedeniyle elektrik yükleri bulut içinde ayrı ayrı yerlerde toplanırlar. Yıldırım, elektrik alanının en büyük olduğu yük birikmesi durumunda başlar. Bir merkezin ön boşalması toprağa erişene kadar, bu merkezin potansiyeli

yaklaşık olarak sahil; kalır ve bulutta-ki yük birikmeleri arasında karşılıklı bir etki olmaz. Ana boşalmadan sonra bulutun birinci yük merkezi toprak potansiyelinde olur. Boşalma olan birinci merkezle komşu merkez arasında potansiyel farkı büyür; böylece bu iki merkez arasında boşalma oluşur. Boşalma komşu merkezden birinci boşalmanın kanalına eriştikten sonra, bu yol boyunca hızla bir ön boşalma oluşmaya başlar /5/.

Yıldırım darbe karakterinde tek kutbiyetli bir boşalma olayıdır. Kutbiyeti artı veya eksi olabilir. Doğada oluşan yıldırımların %70 ile %90' ı eksi kutbiyetlidir /6/.

Yıldırımın akımı da birkaç kiloamper ile 200 kA arasında oldukça geniş sınırlar içinde değişmektedir. Yıldırımların çoğunun akım şiddeti 20 kA'in altındadır. Akımı 200 kA den büyük yıldırımlara az rastlanır /6-8/.

### 3. YILDIRIMIN GELİŞTİMİ /4-8/

Büyük açıklıklarda boşalma olayları, kanal boşalma teorisi ile açıklanabilmektedir. Yıldırım da büyük elptrot açıklığında gerçekleşen bir boşalma olayı olarak kanal teorisi ile incelenebilir. Bu incelemede bulut ve yeryüzü, elektrotlar olarak düşünülebilir.

#### 3.1. Düzgün Alanda Kanal Boşalması

Düzgün alanda kanal teorisine göre atmosfer basıncı veya daha yüksek basınçlarda ve büyük elektrot açıklıklarında katot yakınında oluşan her serbest elektron, anot doğrultusundaki devinimi sırasında bir elektron çığı oluşturur. Birbirlerini<sup>1</sup> göre eşit ve yüksek hızda devinen elektronlar çığın başını (elektron bulutunu) oluştururlar. Elektronlara göre çok daha yavaş devinen iyonlar ise geri kalarak çığın artı yüklü gövdesi ile kuyruğunu oluştururlar /6/.

Artı iyonların oluşturduğu elektrik alanı, kolayca dış alan mertebesine erişebilir. Dolayısıyla çığ başında toplam alan, sıfır hatta ters yönde olabilir. Bu durumda çığ başındaki elektronlar artık anoda varamazlar, uksine frenlenirler ve artı yüklere doğru çekilirler. Böylece artı ve eksi yükler birbiri içine girerek boşalmanın

ikinci evresi olan plazma veya kanalı oluştururlar. Plazmada bulunan artı ve eksi elektrikli parçacıklar birbirleriyle birleşmeye ve fotoiyonlaşma ile yeni serbest elektronlar oluşturmaya başlarlar.

Çığın baş tarafından çıkan mor ötesi ışımının yoğunluğu, elektron çığının önünden belirli bir uzaklıkta bir fotoelektron oluşturabilecek kadar büyür. Bu foto-elektron, dış alanla çığ alanının toplamından oluşan bir alan içinde bulunur. Foto-elektron bu alan etkisi ile anot doğrultusunda hızlanarak çarpma suretiyle iyonlaşma ve ayrı bir çığ (sekonder çığ) oluşturmaya başlar.

Birinci ve ikinci çığların ön yüzleri arasındaki bölge, birinci çığın elektronları ve ikinci çığın artı iyonlarıyla dolar ve bunlar kanal plazmasını oluştururlar. Foto-elektronlar yardımcıyla sekonder çığların oluşumunu yeni fotonların üretimi izler ve böylece olayın kendi kendine devamı sağlanmış olur. Bu şekilde gelişen kanala katot kanalı adı verilir.

Eğer çığ evresinden plazma evresine geçiş elektrotlar arası açıklıkta, anot önünde olursa, bu durumda anot kanalı söz konusu olur /4/, /6/.

#### 3.2. Düzgün Olmayan Alanda Kanal Boşalması

Düzgün olmayan alanda boşalma, eğrilik yarıçapı küçük olan elektrotta başlar ve elektrodun kutbiyetine bağlı olarak gelişir.

Eksi çubuk-artı düzlem elektrot durumunda, ilk elektron çığı doğrudan doğruya katottan başlar ve anot doğrultusunda büyür. Bu sırada çığ gövdesindeki artı iyonlar, elektrik alanını katot yönünde kuvvetlendirirken, anot yönünde de zayıflatırlar. Bunun sonucu, iyonlaşma bölgesi katoda doğru kayar, dolayısıyla kanalın anot yönünde gelişmesi güçleşir. Gerilimin yükseltilmesi durumunda, artı yüklerin anot yönündeki alanı zayıflatıcı etkisi azalır ve bir kanalın oluşması söz konusu olur. Kanal tamamen geliştikten sonra, çığ birinci iletken plazma ile dolar ve bu, katodun anoda doğru yaklaşması şeklinde etkir. Sonuçta plazmanın ucunda elektrik alanı

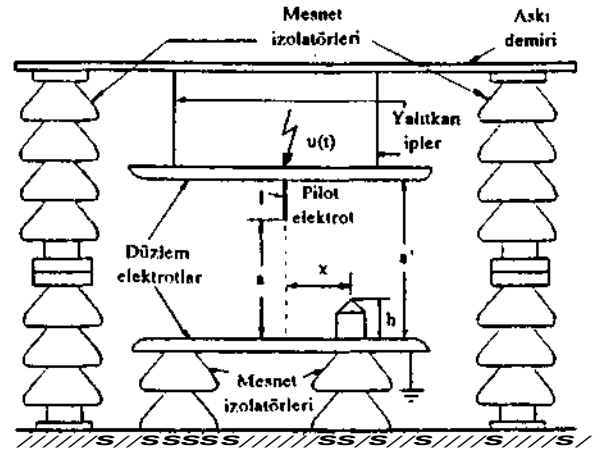
tekrar büyür ve dolayısıyla bu bölgeden anoda doğru yayılan yeni bir elektron çığı oluşur.

Eksi sivri uçtan başlayan kanal, toplam kanalın yayılma doğrultusuna zıt yönde gelişen bir sıra kanalcıktan oluşur. Artı sivri uç-eksi düzlem elektrot durumunda ise boşalma olayı başka bir karakter gösterir. Burada ilk çığ, çubuk elektrottan belirli bir uzaklıkta oluşur ve çubuk elektroda doğru gelişir. Çığın elektronları artı çubuk elektrotta nötralize olurken, artı iyonlar da eksi düzlem elektrot yönünde elektrik alanını kuvvetlendirirler. Bundan sonra iyonlaşma bölgesi eksi düzlem elektroda doğru kayar ve kanalın gelişmesi kolaylaşır. Burada ikinci bir çığın oluşması için birinci kanalın tamamen gelişmesine, yani birinci elektron çığının tamamen plazma ile dolmasına gerek yoktur, çünkü ilk çığın artı yükleri iyonlaşma olasılığı büyük olan yüksek alan şiddetli bölgeyi içe doğru genişletir ve yeni elektron çığlarının oluşumunu kolaylaştırır. Sonunda ikinci çığın başı plazmanın başına kadar yaklaşır ve bu çığın elektronları da artı çubuk elektrotta nötralize olurlar. Böylece sivri uçtan itibaren iletken kanalın gelişmesi, büyük bir hızla, sürekli biçimde olur ve eksi sivri uç durumundakinden daha küçük bir gerilime gereksinim gösterir. Bu durumda kanal, toplam kanalla aynı doğrultuda gelişen birçok kanaldan oluşur /4-8/.

#### 4. DENEYLER

##### 4.1. Deney Düzeni

Yıldırımın etkinliği üzerine kutbiyetin etkisini incelemek amacıyla olayın laboratuvar koşullarında modellemesi yoluna gidilmiştir (Şekil 2). Bu amaçla, t.T.Ü. Fuat Külünk Yüksek Orilim laboratuvarında gerçekleştirilen deneysel çalışmada, yüklü yıldırım bulutu ve yeryüzü,  $85 \times 185 \text{ cm}^2$  boyutlarında, birbirine paralel iki düzlem elektrotla (bulut ve yer elektrotları); öncü (pilot) boşalma, bulut elektrodunun ortasına yerleştirilmiş  $21,5 \text{ cm}$  uzunluğunda ve  $1,8 \text{ mm}$  çapında bir çubuk elektrotla (pilot elektrot) ve yer yüzeyindeki binalar da düzenin ölçeğine uygun boyutlarda yapı imiş bina biçimi elektrotlarla modellerimştir.

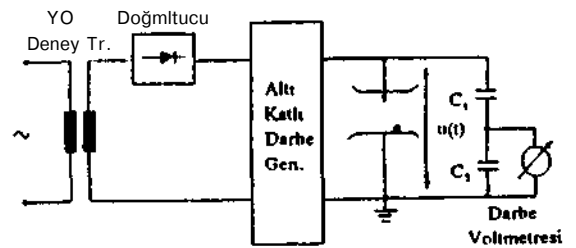


Şekil 2. Model düzeni.

Yeryüzünü modelleyen düzlem elektrot ile toprak arasına ölçü direnci bağlayabilmek amacıyla yer elektrodunu mesnet izolatörleri üzerine yerleştirilmiştir.

Bulut elektrodu, yerden yalıtımını sağlamak ve elektrot açıklığını ayarlayabilmek amacıyla, dört adet mesnet izolatörü üzerine tutturulan askı demirlerine yalıtkan iplerle asılmıştır. Bulut elektrodu bir darbe üreticinin çıkışına bağlanmıştır. Bulut elektrodunun ortasına yerleştirilmiş olan pilot elektrodunun uzunluğu (1), atlamalar pilot elektrodunun ucundan olacak şekilde, deneysel olarak saptanmıştır.

Bulut ile yer elektrodu arası açıklık sabit ( $a' = 50,5 \text{ cm}$ ) tutulmuş, buna göre pilot elektrodunun alt ucu ile yer elektrodu arasındaki açıklık ( $a$ )  $29 \text{ cm}$  olmuştur. Model düzende yeryüzündeki binaları modellemek amacıyla, yer elektrodunun ortasına, sırasıyla  $1,3 - 2,3 - 3,3 - 4,3$  ve  $5,3 \text{ cm}$  yüksekliklerindeki ( $h$ ), bina biçimi elektrotlar yerleştirilmiştir.



Şekil 3. Deney düzeni.

Model düzen, Şekil 3 de gösterilen yıldırım darbe gerilimlerinin elde edildiği ve ölçüldüğü, 1 MV, 50 kJ'luk Marx bağlamı tipinde altı katlı bir darbe üretici ve ölçme düzenine ( $C_1$ ,  $C_2$  ve darbe voltmetresine) bağlanmıştır.

#### 4.2. Deney Sonuçları

Bu model elektrot düzeninde bulut-yer düzlem elektrotları arası açıklık ( $a^1$ ) sabit tutularak, bina modeli elektrodun yüksekliği ( $h$ ) ve öncü boşalmayı modelleyen çubuk elektrodun eksenine göre uzaklığı ( $x$ ) değiştirilerek deneyler yapılmıştır.

Deneyler, kutbiyet etkisini incelemek amacıyla hem artı hem de eksi kutbiyetli, 1,2/50  $\mu$ s'lik standart darbe gerilimleri ile yapılmıştır. Her deneyden önce sıcaklık, basınç ve nem ölçülerek ortam koşulları göz önünde bulundurulmuştur.

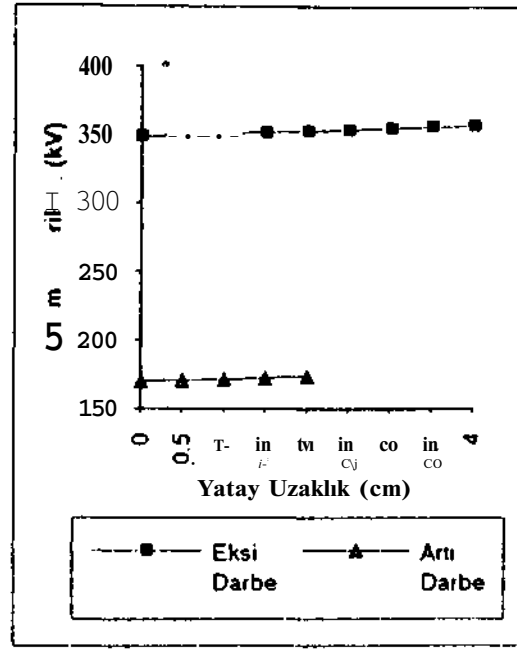
Farklı bina modeli elektrot yükseklikleri ve uzaklıkları için pilot elektrot ile bina modeli arasındaki %50 atlama gerilimleri saptanmıştır. Bu amaçla model düzene her elektrot durumu için belirli sayıda darbe gerilimi uygulanmış ve uygulanan darbeler için %50'sinin deney düzeninde atlama oluşturduğu gerilimler ölçülmüştür. Boşalmalar pilot elektrot ile yer elektrodu veya bina modeli ile bulut elektrodu arasında olmaya başladığında, deneye son verilmiştir.

Şekil 4'den Şekil 8'e kadar 1,3 cm - 2,3 cm - 3,3 cm - 4,3 cm ve 5,3 cm yüksekliğindeki bina modeli elektrotlar için artı ve eksi kutbiyetli darbe gerilimlerinde elde edilen %50 atlama gerilimlerinin, öncü boşalmayı modelleyen çubuk elektrodun eksenine olan yatay uzaklığına göre değişimleri verilmiştir.

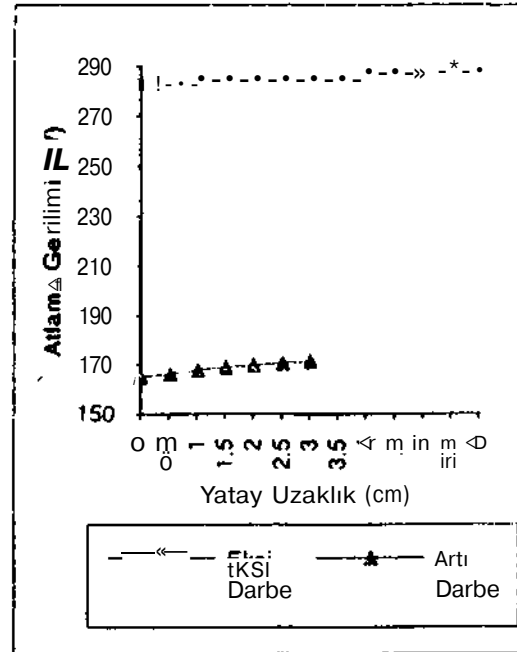
#### 5. SONUÇLAR

Bina modeli elektrotların çeşitli yükseklik ve açıklıkları için atlama gerilimlerine kutbiyetin etkisinin deneysel olarak araştırıldığı bu çalışmadan aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

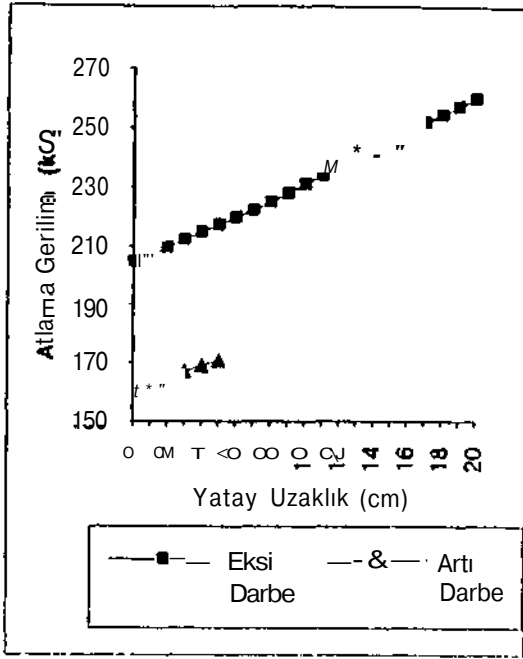
- 1) Artı darbe geriliminde açıklık artırıldıkça %50 atlama gerilimi de artmaktadır. Ancak boşalma, belirli



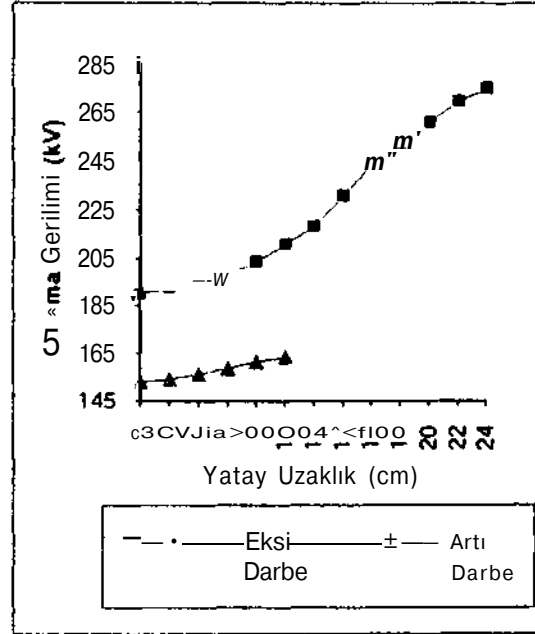
Şekil 4. 1,3 cm yüksekliğindeki bina modeli için artı ve eksi darbe geriliminde elde edilen %50 atlama gerilimlerinin yatay uzaklık ile değişimleri.



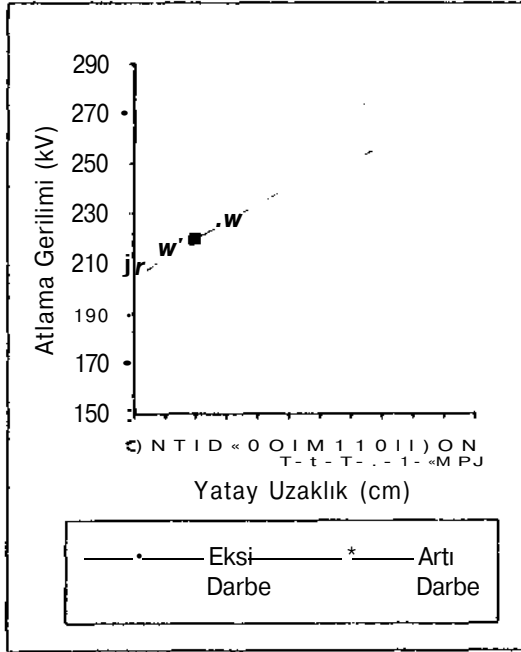
Şekil 5. 2,3 cm yüksekliğindeki bina modeli için artı ve eksi darbe geriliminde elde edilen %50 atlama gerilimlerinin yatay uzaklık ile değişimleri.



Şekil 6. 3,3 cm yüksekliğindeki bina modeli için artı ve eksi darbe geriliminde elde edilen %50 atlama gerilimlerinin yatay uzaklık ile değişimleri.



Şekil 8. 5,3 cm yüksekliğindeki bina modeli için artı ve eksi darbe geriliminde elde edilen %50 atlama gerilimlerinin yatay uzaklık ile değişimleri.



Şekil 7. 3,3 cm yüksekliğindeki bina modeli için artı ve eksi darbe geriliminde elde edilen %50 atlama gerilimlerinin yatay uzaklık ile değişimleri.

bir açıklıktan sonra, bulut elektrodu ile bina modeli arasında olmaktadır. Yani artı kutbilyetli yıldırımların binalara düşme olasılığı, binaların yıldırımın öncü boşalmasına yakınlığı ile artmakta, ancak öncü boşalma binalardan uzaklaştıkça atlama gerilimi ve olasılığı hızla azalarak çok dar bir bölgeden sonra sıfıra düşmektedir.

- 2) Eksi darbe geriliminde de yatay uzaklık arttırıldıkça, %50 atlama gerilimi artmaktadır. Bu durumdaki atlama gerilimi değerleri, artı darbe gerilimindekilere göre daha yüksek elde edilmiştir.
- 3) Eksi darbe geriliminde bina modeli elektrodun yatay açıklığı, artı darbedekine göre daha fazla arttırılabilmektedir. Yani eksi kutbilyetli yıldırımların binalara düşme olasılığı, yıldırımın geriliği arttıktıkça artmakta ve artı kutbilyetli yıldırıma göre daha geniş bir bölge içinde yıldırım düşme olasılığını sürdürmektedir.

1) Binaların yüksekliğinin de yıldırım-  
ların binalara düşme olasılığında  
payı vardır. Yüksek binalara yıldır-  
ımların düşme olasılığı her il urumda  
alçak binalara göre daha yüksektir.  
Ayrıca, deneyler sırasında da göz-  
lendiği gibi yıldırımların bina mo-  
dellerinin yalnızca en yüksek nokt-  
larına değil, bazı durumlarda yan  
yüzlerine de düştüğü görülmüştür. Bu  
durum, özellikle modellerin çubuk  
elektrottan (öncü boşalmadan) uzak  
olduğu, yani boşalmalarda kararsız-  
lıkların görülmeğe başladığı uzak-  
lıklarda gözlenmektedir. Uygulamada,  
yüksek binaların yitirdiğine karşı  
korunması için bu durumun gö/, önüne  
alınması gerekir.

#### KAYNAKÇA

- /1/ SUZUKI, T., MIYAKK.K., KISHIZUMA, I.,  
Üniversite Experimentel Simulation of  
Lightning Discharge, IEEE Trans. on  
FAS, Vol. PAS-100, No. 1, pp. 170Ü-171 I,  
Apr. 1981.
- /2/ PELIERA, I., GARB (JOURNAL), Light-  
ning Stroke Simulation by Means of  
The Leader Process Model, IEEE  
TRANSACTIONS ON SUPERCONDUCTIVITY,  
No. 1, pp. 2009-2022 - pp. 2023-2029,  
Oct. 1990.
- /3/ SUZUKI, T., MIYAKE, K., SHINDO, T.,  
Discharge Path Model in Model Test  
of Lightning Strokes to Tall Mast,  
IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100,  
No. 7, pp. 1553-3502, July 1981.
- /4/ EMRK, S., Yıldırım Boşalmaları ve  
Etkinlik Bölgelerinin incelenmesi,  
Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bil-  
imleri Enstitüsü, İstanbul, 1992.
- /5/ KHALIFA, K., High-Voltage Engineering,  
Theory and Practice, Marcel  
Dekker, Inc., New York, 1990.
- /6/ UKYFR, M., BOECK, W., MÖLLER, K.,  
ZAENGL, W., Hochspannungstechnik,  
Theoretische und Praktische  
(Grundlagen, Einführung in die  
Lehre, Berlin, 1980.
- /7/ ZAENGL, W., Hochspannungstechnik,  
Die Blitzenladung, Eidgenössische  
Technische Hochschule, Zürich, 1980.

/B/ PKISKR, R., Hochspannungstechnik,  
KajMetel 1-2, Tecimische Unjver;sil  
Berlin, 1990.



İsmail KARAF-AKIOÖLU, 1908 yılında  
İstanbul'da doğdu. HiRG'da  
İstanbul Erkek Lisesi'nden  
mezun oldu. 1990'da İ.T.Ü.  
Elektrik - Elektronik Fa-  
kültesi (EEF) Elektrik Müh-  
endisliği Bölümü (EMİ)ni  
bitiren birincisi, Fakülte  
Öğrencisi olarak bekiyi derve ile Öd.  
İsmail KARAF-AKIOÖLU ödülünü kazana-  
rak bilirdi. 1992 de İ.T.Ü. Fen Bilim-  
leri Enstitüsü (FBE), Elk. Müh. progra-  
mından "İ.Müh. (İlk) mezun oldu. EMRE,  
1992 yılından beri İ.T.Ü. FBE Fık. Müh.  
programında doktora çalışmalarını sür-  
dürmekte ve 1991 den beri İ.T.Ü. EEF  
KMI', Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı-  
nda Araş. Gör. olarak çalışmaktadır.



Üzcan KALENDERİ, I. İlişci.  
1971'de İstanbul MÜ doğdu.  
İ.T.Ü. EEFME 197HM"  
Müh., İOTU' Me Y.Müh. ola-  
rak mezun oldu. 1978 Ma  
İ.T.Ü. FBE Elektrik Müh-  
endisliği programında dokto-  
ra çalışmaları tamamladı.  
İ.T.Ü. EEF EMİ', Elektrik Tesisleri  
Anabilim Dalı'nda 1979 - 1980 arasında  
Müh., 1980 - 1991 arasında Y.Müh olarak  
çalışan KALENDERİ, 1991 den beri aynı  
Bölümde Yrd. Doç. olarak görev yapmaktadır.  
KALENDERİ, 1, çalışmalarını ağır-  
lıklı olarak yüksek gerilim tekniği ko-  
nularında sürdürmektedir.

Muzaffer ÜZKAYA, 1927 yılında Çanakka-  
le'de doğdu. İ.T.Ü. Elektrik Fakültesi-  
sinden Y.Müh. olarak mezun oldukları  
sonra doktorasını Almanya'da tamamladı.  
Uzun yıllar İ.T.Ü. de Dekanlık ve Bölüm  
Başkanlığı yapan ÜZKAYA, halen İ.T.Ü.  
Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik  
Mühendisliği Bölümü, Elektrik Tesisleri  
Anabilim Dalı'nda profesör ve Anabilim  
Dalı Başkanı olarak görev yapmaktadır.  
ÜZKAYA'nın yüksek gerilim tekniği ve  
aydınlatma tekniği konularında basılmış  
çok sayıda kitabı bulunmaktadır.





vakum alınla ısıtma işlemi tabii tutulur ve gaz alınır. Sıcak reçine düşük viskozitedir ve tüm gözenekli malzemelerin içine girecek boşlukları doldurur. Isıtma işlemi, polimerizasyon iyi bir ılıma gelinceye kadar devam ettirilir. Bobin belirli bir aşamada kalıptan çıkarılarak ayrı bir ısıtma çözümleri olarak polimerizasyon tamamlanır.

Bobinlerin çekirdek üzerine montajında yüksek gerilim bobinin tespit takozları vasıtasıyla olur. Aksiyal sıkıştırma yüksek sıcaklığa dayanıklı elastik takozlar yardımıyla yapılır. Bu takozlar aynı zamanda çekirdek titreşimlerini absorbe ederek bir izolasyon sağlar. Bu uygulama ile gürültü seviyesi de düşürülür.

### 3. Kısmi Değer Nedenleri

Dökme Keçinli Transformatörlerin üretimi yapılırken ısıtma ve soğutma işlemleri esnasında oluşabilecek mekanik gerilmelerden kaçınılmaya gayret gösterilmelidir. Böyle bir mekanik gerilme reçinede çatlaklara ve neticede kısmi deşarj neden olabilir (1).

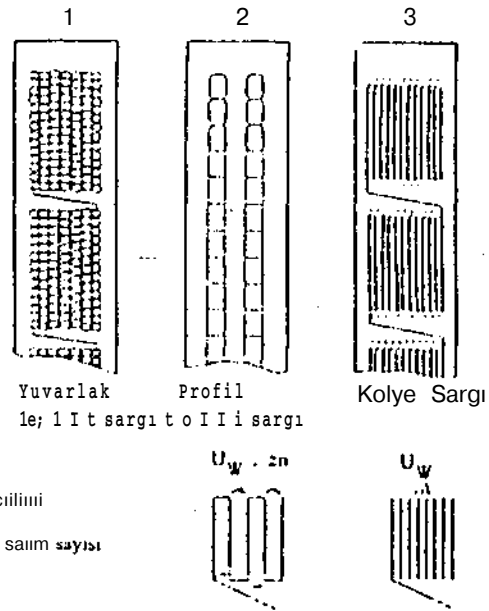
Bu durumu önüne geçilebilmesi için yapılması gereken çalışmalardan birisi reçine ve metalin termal genişleme katsayıları birbirleriyle uyumlu hale getirilmelidir. Epoksi reçinenin termal genişleme katsayısı  $60 \cdot 10^{-6}$  /C olmasına karşın, bakırın  $16 \cdot 10^{-6}$  /C ve alüminyumun ise  $22 \cdot 10^{-6}$  /C dir. Reçinenin genişleme katsayısı belirli bir miktarda dolgu maddesi (genellikle cam elyaf bazlı kâğıt) katılarak yukarıda verilen değerin yarısına düşürülebilir (1). Polimerizasyon olayından sonra bobin soğuduğu zaman yaklaşık %1 kadar büzülme kaçınılmazdır. Bu tür transformatörlerde alüminyum sargılar kullanılması halinde genişleme katsayılarının yaratacağı sorunlar daha az olacaktır.

Dökme Reçineli bobinlerde dahili mekanik gerilmeleri azaltmak için elektriksel olarak gerekenden fazla kalınlıkta reçine kullanmaktan kaçınmak gerekir.

İzolasyon sisteminin bozulmasına neden olan en yaygın hata çeşitli üretim aşamalarında yapılan boşluklardır. Ayrıca bunlar yetersiz vakum veya

empresasyon süresince gaz boşaltmasından kaynaklanır. Hatanın boşluklarda olup olmadığı delinme ölçüme kadar belli olmaz. Bu delinme ilk olarak, çalışma geriliminde meydana gelen gerilmeler altında korona deşarjını hızlandıran boşluklara, deşarjın yoğunluğuna, ve izolasyon malzemesinin alçalma karakteristiğine bağlıdır (-1).

Dökme Keçinli Transformatörlerde kısmi deşarj olayına başka bir etkiyi de yüksek gerilim sargı tipleri ve bobinin imalat biçimi yapar (3). Şekil 1 ile yüksek gerilim sargısının dizayn çeşitleri görülmektedir. Akım yoğunluğuna bağlı olarak iki çeşit sargı yaygındır:



thv s.tının gerilimi

li- kuldaşına sarım sayısı

Şekil 1. Yüksek gerilim sargılarının üçü ayrı ayrı

birincisi yuvarlak emaye telden tek bobin şeklinde yapılan sargı şeklindedir. Uurada kat izolasyonu olarak plastik lümler ve cam elyaf bazlı hasıllar kullanılabilir. Bu tek bobinler birbirleriyle seri bağlantılıdır. İkinci tip ise emaye profil tel ile sarılan kat sargısıdır. Uurada da kat izolasyonu olarak cam elyaf kullanılır. İki kat arasında kat izolasyonu ile birlikte bir soğutma kanalı da yapılabilir. Bu iki sargı çeşidinde ortak olan nokta, sarım gerilimi ile sarım sayısının çarpımı sonucu, her bobinde üretilen gerilmelerin toplamının kilovolt mertebesine ulaşabilir. Bu durumda sargılar arasındaki mesafe yeterli olmadığı takdirde kısmi deşarj meydana gelebilir. Bu olay ince alüminyum (biyelerden veya

bantlardan yapılan sargılında daha farklıdır. Hu sardılar iletkenin spiral şeklinde üst üste satılması ve alalarına kat izolasyonu koyulması ile yapılır (3).Böyle folye sargılarda iki kat arası gerilim en fazla 60 volt kadardır(3).İzolasyondaki alan şiddeti ise 200V/nım nin alımdadır.Bu durumda folye sargılarda kısmi deşarj başlama şartlarının olmadığı görülür.

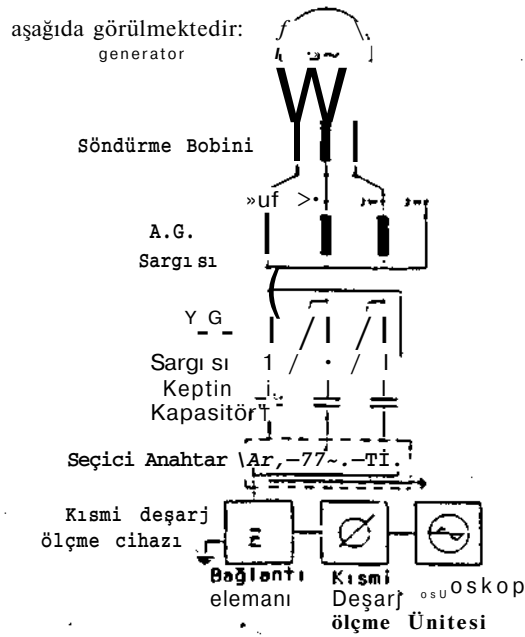
Dökme Reçineli Kuru Tip Transformatörleide kısmi deşarjların olabileceği bölgeler şunlardır:

- Yüksek gerilim bobininin iç kısımları
- Yüksek gerilim sargısını oluşturan kısmi bobinler arasındaki bölgeler.
- Bazı firmaların yaptığı yüksek gerilim fazlarının üçgen oluşturması için reçineden yapılan bağlantı köprüleridir.

Reçineli Transformatörlerde yüksek gerilim bobininin iç kısımlarındaki reçine maddesi yüksek değerde elektriksel zorlamaya maruz kalır.Bu reçine maddesinin kısmi deşarjsız olması için üretim esnasında yada işletmede mekanik gerilmeler sonucu bir çatlak meydana gelip hava kabarcıkları olmaması gerekir.

#### 4.Ölçme Metodları

Kısmi deşarjları ölçmede kullanılan bağlantı şekli aşağıda görülmektedir:



Sekil 2. Kısmi deşarj ölçme devresi  
1358

Burada bobinler transformatör anma frekansının üzerindeki bir fıkans ile anma geriliminin iki katına kadar zorlanır.(Jeneratör çıkışma dış parazitillei önleyici elemanlar bağlanmıştır. Yüksek genimi çıkışlarına 1000 pF den büyük olmak üzere kondansatörler bağlanır. Kondansatörler üzerinde oluşan kısmi deşarjlar bu 4 kutuplu bağlantı elemanı vasıtası ile ölçü aletine gidcick grafik halinde ortaya çıkar. İlave olarak iki ışnılı bir osiloskop kullanılmıştır.Osiloskoba sinüs şekilli uyarma gerilimi ve kısmi deşarj darbeleri verilmektedir. Transformatör klcmensciince ortaya çıkan kısmi deşarj darbeleri geniş bant atalıklarında selektif çalışan ölçü aletlerine gönderilirler. Fakat ölçme yapılan yerdeki bozucu etki seviyesi yüksek olursa geniş bant aralıklarında ölçme yapılması zordur.Bu nedenle 500 ki İz. civarında ölçme yapmaya önem verilir.

İİC 726/4/4 standart ölçü metodları ve ölçü prosedürleri üzerine bize yeterli bilgi vermektedir. Ancak maksimum kabul edilebilen "pC" yoğunluk değeri konusunda bir bilgi yoktur. Bu nedenle dökme reçineli transformatör üreticileri pC yoğunluk değerinden ziyade kısmi deşarjın başlama ve sona erme gerilim değerlerine daha çok önem vermektedirler.

Sargı içindeki kısmi deşarj hysterezis etkisi **altında** gerilimin artması ile beraber başlar ve başlama geriliminden daha küçük değerlerde son bulurlar. Bütün bunları göz önüne aldığımızda kısmi deşarjın sönmesi en azından nominal gerilimin %10 u üzerinde olması gerekmektedir.

Reçineli transformatörler için kısmi deşarj sönme gerilimi (Ve) başlama gerilimine  $\frac{V_e}{V_i}$  nazaran daha önemlidir. Fakat  $V_e$ 'yi ölçmek için  $V_i$  geriliminden daha büyük  $V_e$  gerilimini uygulayarak deşarjın meydana gelmesi gerekir.Bunun aksine izolasyonda meydana gelecek bir hasan önlemek için daha düşük bir gerilim istenir. Uygulanan gerilimin yarım periyodunda kısmi deşarjın tekrarlanma oranı (n) 1 nolu ifadede verilmiştir

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ 5. ULUSAL KONGRESİ

$$\eta = \frac{2(V-V_r)}{V_i - V_r} - 1 \quad (1)$$

İfadeye V uygulanan gerilim ve Vr deşarj bitlikten sonraki artık gerilim. 1 nolu ifadeden  $V_e/V_i$  oranı için

$$V_e A' = 1/2 (1 - V_r/V_i) \quad (2)$$

yazılabilir.

n=0 halinde V=Ve dir. 2 nolu ifade Vr=0 halinde  $V_e/V_i=1/2$  ve Vr=Vi durumunda  $V_e/V_i=1$  olduğunu göstermektedir. Buradan  $V_e/V_i$  değeri için;

$$1/2 < V_e A' K1 \quad (3)$$

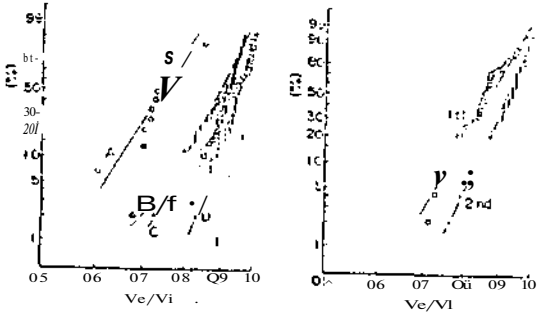
yazılabilir. Kısmi deşarj ile ilgili izolasyon dizaynı için;

$$V_t > V_i > (1/(V_e/V_i)) \times V_e \quad (4)$$

$$V_e > V_w \times \alpha \quad (5)$$

yazılabilir (4).

İfadelerde  $\alpha <$  güvenlik faktörü,  $V_w$  müsaade edilen max. çalışma gerilimi ve  $V_i$  test gerilimidir.  $V_t$  test gerilimi  $V_e/V_i$  değeri tarafından belirlenmelidir. Yüksek sönme gerilimi ve düşük test gerilimi tercih edilir(4). Sönme gerilimi için optimum gerilim değeri nominal gerilimin 1,5-2 katı kadardır. Şekil 3 deki  $V_e/V_i$  değerleri birkaç çeşit bobin izolasyonu için elde edilmiştir. Bu şekilden  $V_e/V_i$  değerinin izolasyon sisteminin hesaplanmasından farklı olduğu görülmektedir. Ayrıca  $V_e/V_i$  nin ilk ölçüm değeri Şekil 4 de görülen ikinci ölçümden daha düşüktür.



Şekil 3. Birkaç çeşit bobin izolasyonu için  $v_e/v_i$  değerleri

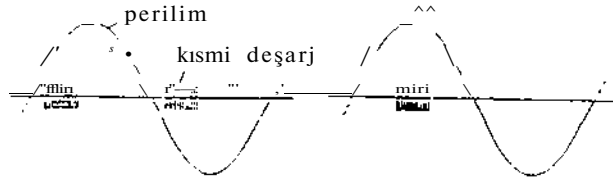
Şekil 4. İlk ölçümle ikinci ölçüm arasındaki  $v_e/v_i$  değerlerinin kıyaslanması

## 5. Kısmi Deşarj Yerlerinin Saptanması

Eğer bir kısmi deşarj meydana gelirse bu deşarjın yeri mutlaka net-olarak tespit edilmelidir. Bu tip transformatörlerde kısmi deşarjın yerinin belirlenmesi büyük güç transformatörlere nazaran daha kolay olur. Hangi bobinde kısmi deşarj varsa o bobin değiştirilmelidir.

Yer bulma yöntemi genel olarak şöyledir:

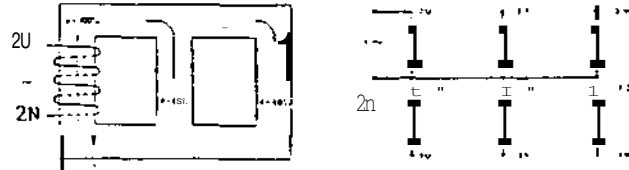
önce kısmi deşarj yerlerinin osiloskopta gözlenmesinden ve bu darbelerin gerilim yükselmesi ve alçalmasındaki davranışlarından kan dielektrik maddede hysterezis etkisi altında deşarjların olup olmadığı anlaşılabilir. Bundan başka darbelerin polarileye bağlı olup olmadıkları ve hysterezis etkisi etkisinde kalmadıkları ve havada normal deşarj olayı olduğu da anlaşılabilir. (Şekil. 5)



Şekil 5. Reçinedeki polarileye bağımsız kısmi deşarj

Bu durumlara yüksek gerilim terminallerinin sivri köşelen ve metalik kısımlarda rastlanabilir. Hoyle deşarjlar iyi tespit olunursa reçineli transformatörlerin ömrünü azaltmayacağı yorumu yapılabilir.

Eğer reçinede bir deşarj tespit edilmişse bu deşarjın bağlamı köprüsünden mi yoksa yüksek gerilimin başka kısımlarından mı kaynaklandığını bulmak gerekir. Bunun için transformatör köprüsü ve köprüsüz olarak ayrı ayrı test edilmelidir. Eğer kısmi deşarj halü devanı ediyorsa üçgen bağlantı açılır ve transformatör Şekil 6 da görüldüğü gibi her faz için ayrı ayrı testi edilir.



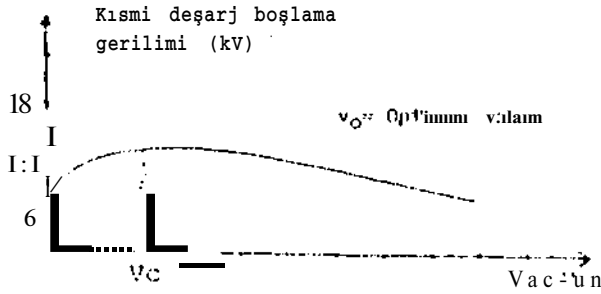
Şekil 6. Her faz için ayrı ayrı kısmi deşarj ölçme devresi

## 6.Sonuç:

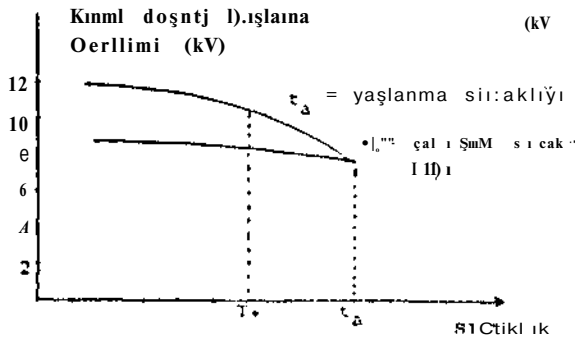
Reçinedeki geilmeleri dolayısıyla buna bağlı olarak meydana gelen kısmi deşarjları önlemek için reçine ve metalin termal genişleme katsayıları birbirleri ile uyumlu hale getirilmelidir. Dökme Reçineli bobinlerde dahili mekanik geilmeleri a/altmak için elektriksel olarak gerekenden fazla reçine kullanmaktan kaçınılmalıdır.

Bobin imalatında lilye sargının yuvalık yada pilol tellerle sarılan kat sargıdan daha iyi karakteristiklere sahip olduğu anlaşılmıştır 1).

Vakum altında bobinlere reçine enulimic yöntemi kısmi deşarj açısından ideal dundur. Öelliue bu hususlar transformatörün işletme esnasında kısmi deşarjlardan / arar görmenn:si için gö/ önüne alınmalıdır. Şekil 7 vakum allımla döküm yapmanın ne derece önemli olduğunu göstermektedir:



Şekil 8 deki grafiklerde 10 kV hık bir transformatörde kısmi deşarj başlama geriliminin sıcaklıkla düştüğü ve soğumadan sonra tekrar eski değerine dönmediği görülmektedir.



1360

## Kaynaklar:

(1) Diekson.M R . . *The Linv-h'ummulility Transfoiner*

*I'ra Repoil, April 1957.*

(2) Altman,(i. , *Speial Aspeels ol the Jartial Pistharge Characterislie.s of MoLled Resin Dry Transforineis Trafo Union 19/S*

(1) (ile/.,I., Rojas, 'I. . *SUnle.l Coils for the I' vahntion of Fibciglass Rriuforeel Resin husulalini; Sr.stenis , IEEE, 1)S7.*

(-1) Iliiasawa, V. and Shibuya ,Y. *Iustlali.m I'şiy,n tiül hlvaiuation oj ,\e\ply Nr< loped İntimi (.l,l,\ /' i'jhny Resin Molded Transfinuei . 11:İü. ; IV.V7.*



Süleyman İM MUKAVA

1948'de Isparta'da doğdu İlk orta ve Teknik Lise tahsilini İsparta'da tamamladıktan sonra 1968 yılında Marmara İhüvcsilesi 'Teknik İğitim İakültesi Hlektik İnlününe girdi.1987 yılımla binadan ine/un oldu 2 yıl çeşitli lınuahıuKı çalıştıktan ve vatani gücvindcn sonra Y(K 'Dünya Hankası işbiligi ile Meslek Yüksek Okullarını (ieliştinric l'ujesi kapsamında İlyilteie'de Manchester C'ollege of Ait and Teehnology 'de 9 ay boyunca çeşitli çalışmalar yaptı.İngiltere dönüşünde Anadolu İJniveisilesi Uilecik Meslek Yüksel; Okulu'nda öğretim görevlisi olarak göievç başladı .Hu arı:da Marmara İlniveisitesi İxn İllilmleri İ'nstitüsü'nde Yüksek Lisansa başla<lı. 4 yıl öğietini görevliliği yaptıktan sonra ayrılarak Ali(S - li'l'l 'Transfoinatör Fabrikasında çalışmaya başladı Halen burada çalışmakta olup Dökme Reçineli Kuru Tip Transfoimalöilerdi: Kısmi Deşarjlar kousında Yüksek İ isans Te/i İlazırlanaktadı.

ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ 5. ULUSAL KONGRESİ

## Yazarlara İlişkin Bilgiler

Doc.Dr.irfan GÜNEY



1957 senesinde İstanbul'da doğdu. I.D.M.M.A Elektrik Mühendisi iğinden 1979 da mezun olarak Adapazarı Şeker fabrikasında göreve başladı. Daha sonra T. E. K ma geçti. İ.T.Ü. Elektrik Fakültesinde yüksek lisansa başladı ve 1982 de mezun oldu. Kısa dönem askerlik görevinden sonra T.E.K da çeşitli birimlerde görev aldı. 1987 yılında doktora çalışmasını tamamladı ve Marmara üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesine yardımcı doçent olarak atandı. 1989 da Elektrik Tesisleri Anabilim Dalında doçent oldu. Halen aynı fakültenin bölüm başkanlığı görevini sürdürmektedir.

**YÜKSEK GERİLİM İZOLATÖRLERİNİN KİRLENME ATLAMASI DAVRANIŞLARININ  
ANALİTİK HESAPLANMASINDA MODEL KAVRAMI**

Ahmet Rumeli      Mirzahan Hızal  
Orta Doğu Teknik Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Müh. Böl.

Celal Koraşlı  
Gaziantep Üniversitesi  
Elektrik-Elektronik Müh. Böl.

**ÖZET**

Yüksek gerilim izolatörlerinin kirli ortamlarda atlama davranışlarının analitik olarak belirlenmesinde kirli yüzeyde oluşan deşarjlara seri kir bölgeleri dirençlerinin değişimlerinin bilinmesi gerekmektedir. İzolatörün karmaşık şekli nedeniyle bu direnç değişimleri ancak, izolatörün bir eşdeğer modelle temsil edilmesi ile yaklaşık olarak bulunabilmektedir. Bu çalışmada, verilen bir izolatöre eşdeğer alınan ve "Dikdörtgen" ve "Açınmış" olarak adlandırılan iki eşdeğer model dikkate alınarak bunlar yardımıyla bulunan direnç değişimleri incelenmiştir. Hesap ve deney sonuçlarının karşılaştırılmasından, verilen bir izolatörün dikdörtgen bir eşdeğer modelle temsil edilmesinin uygun olamayacağı, buna karşılık açınmış modelin verilen bir izolatörü daha gerçekçi olarak temsil edebildiği ve direnç değişiminin sayısal veya deneysel olarak bulunmasında kullanılabileceği gösterilmiştir.

**ÖNEMLİ SEMBOLLER LİSTESİ**

- 1 Akım (A)
- J Akım yoğunluğu ( $A/cm^2$ )
- V Uygulanan gerilim-Düğüm potansiyeli (V)
- R Deşarj seri kir bölgesi direnci ( $\Omega$ )
- r özdlrenç (Q cm)
- $\sigma_c$  Kir tabakası soğuk yüzeysel iletkenliği (S)
- x Deşarj boyu (cm)
- L Sızma uzunluğu (cm)
- a Model eni (cm)
- $r_d$  Deşarj kökü (ucu) yarıçapı (cm)
- h Yüzeysel kir kalınlığı (cm)

**1. GİRİŞ**

Kirli endüstriyel ve sahil bölgelerdeki yüksek gerilim elektrik enerji iletim ve dağıtım

izolatörlerinde kir ve nemin (sis, yağmur..) yolaçtığı ve "Kirlenme Atlaması" olarak adlandırılan arızalar büyük ekonomik kayıplara neden olur. Bu konuda yapılan araştırmaların amacı, böyle ortamlarda atlama yapmayan bir izolatör türü geliştirmektir. Ancak, geliştirilen izolatör türleri atlama riskini kısmen azaltmakla beraber tamamen ortadan kaldıramamışlardır.

Geliştirilen bir izolatör tipinin kirli bölgelerde nasıl bir davranış göstereceği, ya seçilen kirli bir bölgede tabii şartlar altında yıllar süren deneme ile ya da laboratuvarlarda yapılan yüksek gerilim kir testlerinden belirlenmeye çalışılmaktadır. Ancak bu testler yoluyla bulunan sonuçlar yeterli güvenilirlikte olmamakta, zaman almakta ve testler pahalı tesisleri gerektirmektedir [1].

Son yıllarda yapılan çalışmalarla kirlenme atlamasının fiziksel mekanizmasının daha iyi anlaşılması ve bilgisayarla hesaplama kolaylıklarının ortaya çıkışı sonucu, izolatörlerin kirlenme atlaması davranışlarının modelleme ile ve analitik olarak hesaplanması çalışmaları önem kazanmıştır [2-7]. Verilen bir izolatörün değişik kirlenme şartlarında nasıl bir davranış göstereceği analitik hesaplamalarla çabuk ve ucuz olarak belirlenebilmektedir. Ancak, analitik yöntemlerin geliştirilmesi ve deneysel sonuçlarla daha iyi uyumlanması gerekmektedir. Bu çalışmada analitik hesaplamalarda dikkate alınan iki tür izolatör eşdeğer modelinin geçerliliği incelenmiştir.

**2. KİRLENME ATLAMASI VE MODELLEME KRİTERLERİ**

Kirli bir izolatör yüzeyinde atlama olabilmesi için; izolatör yüzeyinde bir iletken kir tabakasının oluşması, kaçak akımların neden olduğu ve havanın

dayanımının aşıldığı kuru bölgeler boyunca deşarjların tutuşması ve bu deşarjların yayılarak kısa devre yapması gerekir.

Bir atlama olayında en karmaşık olan son safhada izolatör yüzeyinde deşarjla kaplı bölgelerle bunlara seri kir-direnç bölgeleri bulunur. İzolatörlerin kompleks şekilleri nedeniyle, seri kir-direnç bölgesi dirençlerinin değişimlerini etkileyen faktörleri analitik hesaplamalarda dikkate almak için bazı basitleştirmeler yapmak kaçınılmaz olmaktadır. Bu basitleştirmelerde, karmaşık şekilli izolatörü bir eşdeğer modelle temsil etmek ilk adım olmaktadır. En basit durumda, homojen kirle kaplı model yüzeyinde bir doğru boyunca yayılan bir veya birçok deşarjla bunlara seri değişken kir dirençleri dikkate alınır. Ancak, seçilecek izolatör eşdeğer modeli aşağıdaki kriterleri sağlamalıdır:

- Atlama olayının fiziksel karakteri korunmalıdır.
- İzolatör biçimi modelde yeterince temsil edilebilmelidir.
- İzolatör ve model sonuçları arasında yeterli bir uyum bulunmalıdır.

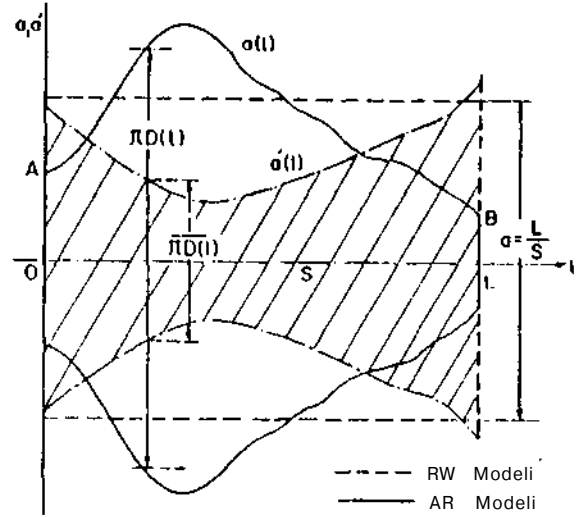
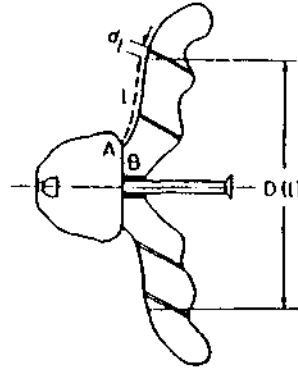
### 3. DİKDÖRTGEN VE AÇINMIŞ İZOLATÖR EŞDEĞER MODELLERİ

#### 3.1 Dikdörtgen Model

RW olarak da isimlendirilen dikdörtgen modelde verilen bir izolatör aşağıda tanımlanan şekilde bir dikdörtgenle temsil edilmektedir [2]. Bu temsilde aşağıdaki kabuller yapılmaktadır:

- İzolatör ve model sızma uzunlukları (L) eşittir.
- İzolatör ve model yüzeyleri aynı özidirençli (r) kirle homojen olarak kaplıdır.
- İzolatör ve eşdeğer dikdörtgen model terminalleri arasında ölçülen soğuk kir tabakası dirençleri eşittir ( $R_{iz} = R_{RH}$ ).

İzolatör ve model terminalleri arasındaki kir tabakası dirençleri (1) ve (2) nolu bağıntılarla verilmektedir. Bu bağıntılarda  $dT$  sızma boyu elemanını,  $D(T)$  buna



Şekil 1 Verilen bir izolatörün RW ve AR modellerinin bulunması

$$R_{iz} \cdot \int_{oj}^{oj} \frac{r \, dT}{D(T)} = F \quad (D)$$

$$R_{RW} = \frac{r L}{h a} \quad (2)$$

karşılık olan izolatör çapım ve a eşdeğer modelin enini göstermektedir. F ye izolatörün "Form (biçim veya şekil) Faktörü" denilmektedir (Şekil 1). Dirençlerin eşitliğinden RW modelinin a eni

$$\int_{oj}^{oj} \frac{L}{n D(T)} \sim \int_{oj}^{oj} \frac{L}{Y(T) dT} = \frac{L}{S} \quad (3)$$

Olur. Verilen bir izolatör için a model eninin hesaplanması, izolatör şeklinin genellikle karmaşık olması nedeniyle ancak sayısal yolla yapılabilmektedir. (3) bağıntısından  $S, Y(T)=1/(2nD)$  eğrisinin altındaki alana eşit olur.

Aynı L sızma uzunluğunda ve Y(T) eğrisi altında aynı S alanını verecek şekilde sonsuz sayıda izolatör şekli tanımlanabilir [5]. Bu izolatörlerin hepsinin RW modeli aynı olacaktır. Seçilen izolatörler farklı R(x) değişimleri verirken, RW modelinde tek bir R(x) değişimi elde edilecektir. Bu açıklamaların ışığında, RH modelinin eşdeğerlik yönünden herhangi bir pratik ve teorik değeri olmayacaktır.

### 3.2 Açınmış Model

AR adı da verilen açınmış eşdeğer modelde izolatör ve model sızma uzunlukları aynı olup değişken olan model eni

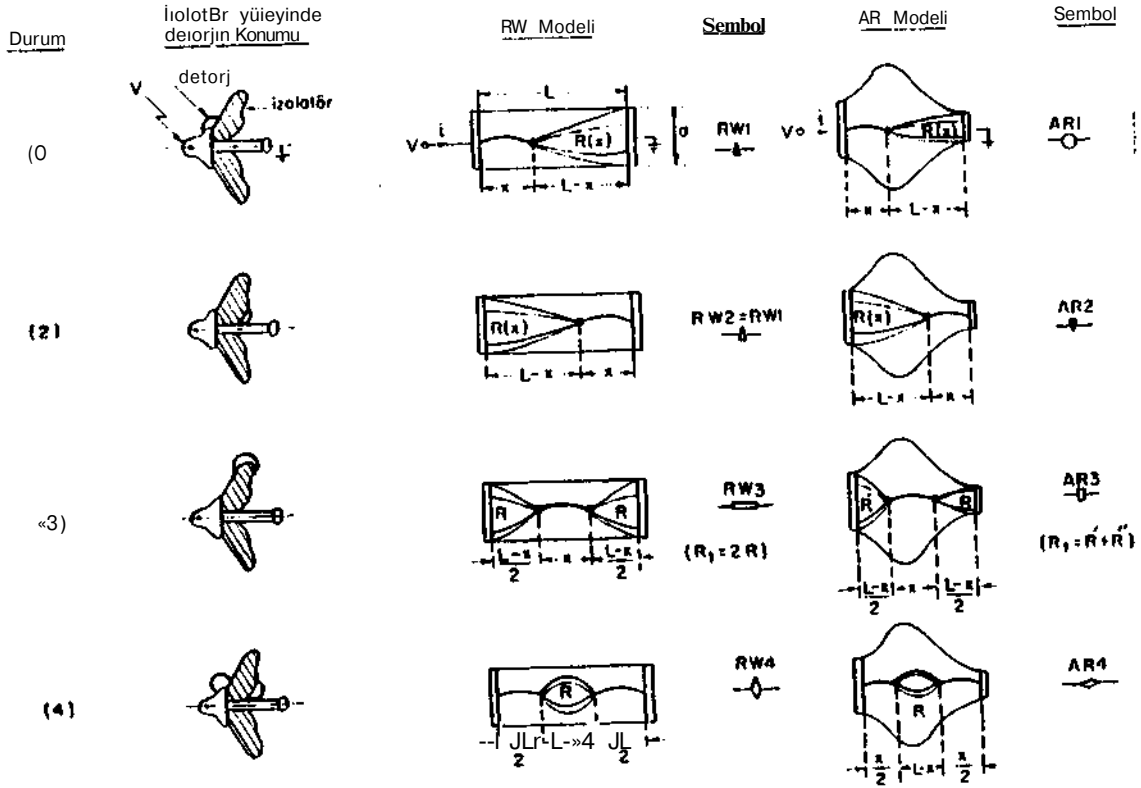
$$a(T) = n D(T), \quad 0 < T < L \quad (4)$$

bağıntısına göre belirlenir (Şekil 1). Fiziksel olarak AR modeli, izolatör yüzeyini kaplıyan kir tabakasının dT uzunluklu ve a(T) eninde kir şeritleri halinde sıyrılarak ucuca seri olarak eklenmesinden oluşur [3]. Böylece izolatörün şekli hesaplamalarda gerçeğe daha uygun bir şekilde dikkate alınmış olacaktır. Her iki model yatay bir eksen yardımıyla 1kl eşdeğer yarı modele bölünebilmektedir. Bu modellerin direnç değişimleri ve verilen bir izolatörü gerçekten temsil edebilme yeteneği aşağıda incelenmiştir.

### 4. RW VE AR MODELLERİNDE SERİ KIR BOLGEST DİRENÇ DEĞİŞİMİ

#### 4.1. Direnç Değişimini Etkileyen Faktörler

Şekil 2, homojen kirle kaplı ve çeşitli konumlarında deşarjlar taşıyan bir kasket-pln tip izolatör ile bunlara karşılık olan RW ve AR modellerini şematik olarak göstermektedir. Şekilde x, yüzeydeki deşarjların toplanı boyunu ve R deşarjlara seri kir bölgelerinin



Şekil 2. RW > deşarjının belirlenmesinde diHkole ol.non durumlör



direncini göstermektedirler. Deşarj boyu (x) ve kir bölgesinde açığa çıkan ısı enerjisi (w) tarafından kontrol edilen R direncinin değişim biçimi deşarj yayılımı ve atlama olayını kontrol eden en önemli faktördür [5]. Bu çalışmada w ısı enerjisinin R direncinin değişimine etkisi dikkate alınmamıştır.

Deşarj boyunun artması seri kir bölgesinin boyunun kışalmasına ve ve böylece R direncinin azalmasına neden olur ( $R/x < 0$ ). R(x) değişimi yüzeydeki deşarjların sayısına ve konumlarına bağlıdır. Şekil 2 de, (1) ve (2) nolu durumlarda aynı deşarj uzunluğu için R(x) değişimlerinin gerçekte farklı olacağını açıklar. Bu durum RW modelinde dikkate alınmazken (RW1=RW2) AR modelinde dikkate alınabilmektedir. (3) nolu durumda deşarj uçları ile elektrotlar arası dirençler eşit değillerdir. RW modelinde bu dirençler eşit olmaktadır. (4) nolu durumda deşarj uçları arasındaki R direnci, izolatör yüzeyinde ve AR modelinde birbirine eşit olurken aynı şey RW modeli için söylenemez.

#### 4.2. Model Direnç Değişimlerinin Bulunması

İzolatörlerin atlama gerilimlerinin hesaplanmasında R(x) bağıntısının yeterli doğrulukta bilinmesi gerekmektedir. Bu değişim hesap ve ölçme yoluyla bulunmaktadır.

##### 4.2.1. Direnç Değişiminin Hesaplanmasının Bulunması

Açıklanan dikdörtgen biçimli RW modelinde Şekil 2 de (3) nolu durum için R(x), konform-tasvir metodu kullanılarak aşağıdaki yaklaşık bağıntılarla hesaplanmıştır [2].

Dar model: ( $a/L \ll 1$ )

$$R_n = \frac{1}{2n\omega c} \left[ \frac{n(L-x)}{a} + \log \frac{a}{2nr d} \right] \quad (5a)$$

Geniş model: ( $a/L \gg 1$ )

$$R^* = \frac{1}{2n\omega c} \left[ \log \frac{2L}{nr d} - \log \tan \frac{\pi x}{2L} \right] \quad (5b)$$

Bu bağıntılarda, rd kir tabakası ile temas eden ve dairesel olarak kabul edilen deşarj ucunun yarıçapı ve  $\omega_c$  normal sıcaklıktaki (soğuk) yüzeyel kir iletkenliğini göstermektedir.

Sonlu fark (finite-difference) yöntemi kullanılarak dikdörtgen bir modelde R(x) in sayısal olarak hesaplanmasına ilişkin bir açıklama EK te verilmiştir.

#### 4.2.2. Direnç Değişiminin Deneysel Olarak Bulunması

Verilen bir izolatör için R(x) değişimi, bu izolatöre karşılık olan RW veya AR modelleri üzerinde yapılan ölçmeler yardımı ile bulunabilir. Bu amaçla model yüzeyi, öz direnci r ve kalınlığı h olan bir su tabakası ile doldurulmuştur. İzolatör yüzeyini kaplayan kir tabakasını temsil eden su tabakasının soğuk yüzeyel iletkenliği

$$\sigma_c = h/r \quad (6)$$

olur. Ölçmelerde deşarj ucu değişken yarıçaplı iletken sonda ile temsil edilmiştir. Direnç değişimi sonda-elektrot veya sondalar arasında 1592 Hz de ölçme yapan bir admitans köprüsü ile ölçülmüştür. Ölçmelerin yüksek frekansta yapılması elektrolitik polarizasyonu önlemek içindir. Su modeli yerine dirençli kağıttan hazırlanan modeller kullanılarak direnç ölçmeleri yapılabilir.

#### 4.2.3. Hesap ve Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

R(x) direnç değişiminin hesaplanması için verilen dar model (5a) ve geniş model (5b) bağıntılarının geçerliliği, (a/L) değerleri farklı seçilen ölç RW modeli için incelenmiştir. Şekil 3, deşarjın bir elektrottan başlayarak yatay eksen boyunca yayılması durumunda,  $r_a=0.15$  cm yarıçaplı sonda kullanılarak ölçülen R(x) değişimlerini göstermektedir. Aynı modeller için (5a), (5b) ve (15) bağıntılarından hesaplanan direnç değişimleri de Şekil 3 de gösterilmişlerdir.

$a/L=0.1656$  olan dar modelde ölçülen ve hesaplanan direnç değerleri yakın bulunmuştur. Ancak,  $x=L$  için fiziksel olarak  $R=0$  olması gerekirken, (5a) bağıntısı sıfırdan farklı bir değer

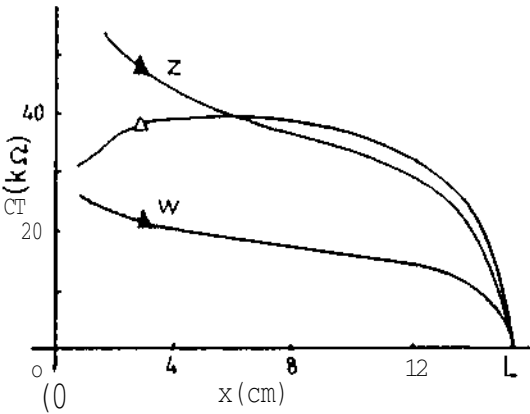
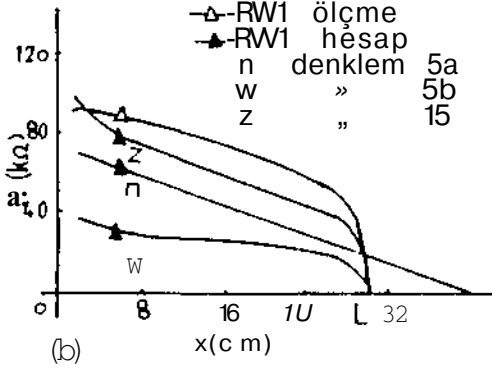
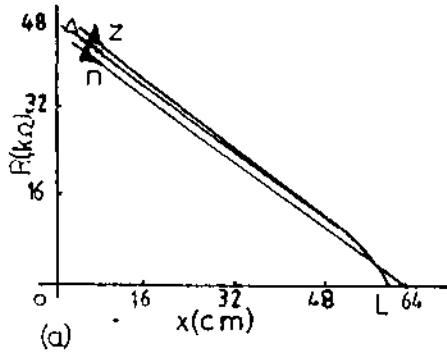
$R(x=0)=-\langle \rangle$  ,  $R(x=L)=+\rangle \rangle$  ve  $x_c=Atan(4L/(nr_a))$  için  $R(x=x_c)=0$  gibi fiziksel durumla bağdaşınıyan değerler vermektedir.

Her üç durumda da, (15) bağıntısı ile sayısal olarak hesaplanan direnç değerleri ile ölçme yoluyla bulunan direnç değerleri arasında daha iyi uyum elde edildiği görülmektedir. Yukardaki sonuçlar, analitik hesaplamalar için gerekli  $R(x)$  değişiminin hesaplanması için verilen dar ve geniş model direnç hesaplama bağıntılarının yeterli hassaslıkta olmadığını göstermektedir.

## 5. SONUÇ

İzolatörlerin kirlenme atlama davranışlarının analitik olarak belirlenebilmesi, kirli bölgeler için kolayca izolatör seçimi ve izolatör tasarım ve geliştirme çalışmaları için büyük önem taşır. Analitik çalışmalarda temel zorluklar izolatörün karmaşık şeklinden ve atlama olayının kompleks fiziksel niteliğinden kaynaklanmaktadır. İzolatörün uygun bir eşdeğer modelle temsil edilebilmesi ve bilgisayar kullanımı hesaplamalarda önemli kolaylıklar sağlamaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalarla atlama olayının fiziksel mekanizmasının daha iyi anlaşılması teorik hesaplamaların daha güvenli olmasını sağlamıştır. Yakın bir gelecekte, izolatörlerin kirlenme atlama davranışlarının analitik yolla belirlenmesinin testler yoluyla belirlenmesi kadar ilgi ve güvenilirlik sağlayacağı söylenebilir.

Verilen bir izolatörün kirlenme atlama davranışını çabuk ve ucuz bir şekilde belirlemeye yarayan analitik yöntemde en önemli noktalardan birisi izolatöre eşdeğer uygun ve güvenilir bir model bulmaktır. Bunlar arasında dikkörtgen ve açınmış model en çok ilgi çekmiş olanlardır. Ancak, dikkörtgen model izolatörün şeklini ve atlama olayının fiziksel karakterini uygun bir şekilde dikkate alamamaktadır. Ayrıca, aynı dikkörtgen eşdeğer modele karşılık olan ve birbirinden farklı şekilleri olan sonsuz sayıda izolatör bulmak mümkündür. Bu nedenlerle dikkörtgen modelin verilen bir izolatörü temsil edemeyeceği sonucuna varılmıştır. Açınmış model izolatörün şeklini yeterince temsil edebildiği gibi,



Şekil 3 Hesap ve deney direnç değerlerinin karşılaştırılması: (a) U630.4 cm, a=10 cm, (b) L=30.4 cm, a=36.6 cm, (c) L=15.6 cm a=54 cm

vermektedir (Şekil 3a).

a/L=1.204 olan yaklaşık kare modelde hesaplanan ve ölçülen  $R(x)$  değerleri arasında büyük farklılıklar görülmektedir (Şekil 3b).

a/L=3.4615 olan geniş dikdörtgen modelde ölçme ve hesap direnç değerleri arasında ihmal edilemeyecek kadar büyük farklar görülmektedir (Şekil 3c). Ayrıca (5b) bağıntısı;

Gerçek izolatörle deşarja seri aynı kir direnç değişimini verme yönünden atlama olayının fiziksel karakterini de daha iyi koruyabilmektedir. Böylece güvenilir bir model olan açınmış modelde direnç değişiminin deneysel bulunuşu yerine sayısal olarak hesaplamalara katılmasıyla izolatörlerin atlama davranışlarının belirlenmesinde deneysel külfet ve masraftan kurtulmak mümkün olabilecektir.

## 6. KAYNAKLAR

1. "Artificial Pollution Tests on High Voltage Insulators to be Used on AC Systems", IEC-507-1975.
2. Wilkins, R.: "Flashover Voltage of High Voltage Insulators With Uniform Surface Film", Proc. IEE, 116, 457-465, 1969.
3. Rumeli, A.: "Yüksek Gerilim İzolatörlerinin Kirlenme Atlama Gerilimlerinin Hesaplanması", TBTA, MAG 294, 1973.
4. Rumeli, A.: "Theoretical Analysis of Flashover of Contaminated Insulators With a Time-Invariant and Unevenly Distributed Contamination Resistivity", IEEE Conference Paper, C 72 203-3.
5. Rumeli, A.: "Homojen Kirle Kaplı Yüksek Gerilim İzolatörlerinin Dayanım Gerilimlerinin Hesaplanması, Profesörlük Çalışması, ODTÜ 1979.
6. Koraşlı, C: "Model Concept for Analytical Investigation of Flashover Performance of Polluted Insulators", M.Sc. Thesis, METU, 1973.

7. Ghosh, P. S., Chakravorti, S. ve Chatterjee, N.: "Pollution Flashover of Electrolytic Surface Under Power Frequency High Voltages", IE(I) Journal -EL, Vol.72, 180-184, 1991.

8. Vitkovitch, O.: "Field Analysis, Experimental and Computational Methods", Varı Nostrand, 1966.

EK: BİR DİKDÖRTGEN MODELDE R(x) DEĞİŞİMİNİN SAYISAL OLARAK HESAPLANMASI

Dikdörtgen modelde R(x) değişimi Şekil 4 deki yarı model üzerinde gösterilen bölümlene yardımıyla sonlu fark yöntemi kullanılarak bilgisayarla sayısal olarak hesaplanmıştır. (v,2) noktasında yarıçapı rd olan ve V=100 volt potansiyelinde tutulan sonda ile sıfır potansiyelindeki elektrot (i=m,j; j=2,...,n) arasındaki toplam direnç, aşağıda açıklanan şekilde V=0 denkleminin belirtilen sınır şartları altında çözümünden bulunmuştur.

Bir (i,j) düğüm noktasındaki potansiyelin (u+1). değeri bir önceki (M), değer cinsinden iterasyon yoluyla

$$V^{u+1}(i,j) = V^u(i,j) + \frac{a}{C_0} [C_1 V(i,j-1) + C_2 V(i+1,j) + C_3 V(i,j+1) + C_4 V(i-1,j)] \quad (8)$$

olur [10]. C katsayılarının bağıntıları Şekil 4 de verilmiştir. (8) nolu denklemdeki a ya "Hızlandırma Faktörü" adı verilmektedir (1<a<2). mxn sayıda düğüm noktası olan bir dikdörtgen model için a nın yaklaşık optimum değeri

$$a = 2[1-rt / (\frac{1}{(m-1)^2} + \frac{1}{(n-1)^2})] \quad (9)$$

bağıntısıyla verilmiştir [8].

5 seçilen hata değeri ise (5=0.01-0.02) hesaplamaya

$$V^{u+1}(i,j) - V^u(i,j) \leq \delta \quad (10)$$

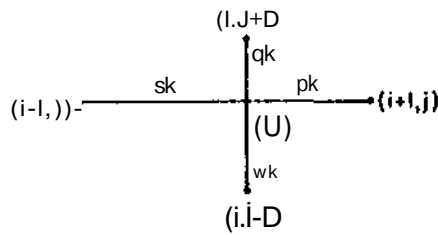
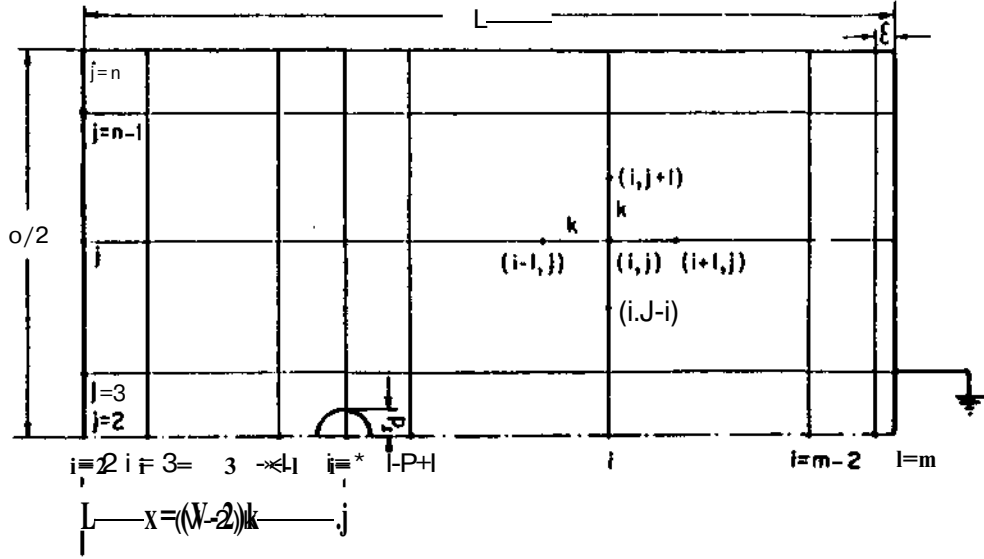
i=2,...,m; j=2,...,n

sağlanıncaya kadar devam edilmektedir.

Sonda ile topraklı elektrot arasındaki toplam direnç değeri aşağıdaki şekilde hesaplanmıştır. Topraklı elektroda oldukça yakın (esfl.2 cm ,k=1 cm, k»e) i=m-1 düşey bölümlenmesi üzerindeki noktalarda alan şiddeti

$$E(m-1,j) = \frac{V(m-1,j)}{\epsilon} , j=2,...,n \quad (11)$$

yazılabilir. Akım yoğunluğu (J), kir özdirenci (r) ve elektrik alanı



$$C1 = \frac{S+P}{W}$$

$$C3 = \frac{P+S}{q}$$

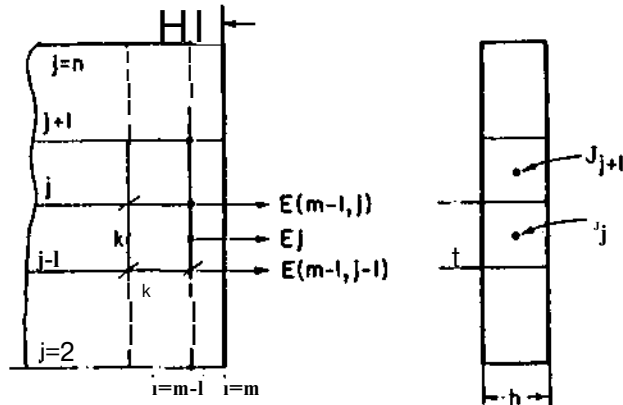
$$C2 = \frac{q+W}{P}$$

$$C4 = \frac{q+W}{S}$$

$$C0 = C1 + C2 + C3 + C4$$

Özel şartlar:

- $i=2$   $j=2, \dots, n$   $V(2, j-1) = V(2, j+1)$
- $i=2, \dots, m$   $j=2$   $V(i, 1) = V(i, 3)$
- $i=$   $j \gg 2$   $V(?, 2) = 100 \text{ volt}$
- $i=2, \dots, m$   $j=n$   $V(i, n-1) = V(i, n+1)$
- $i=m$   $j=2, \dots, n$   $V(m, j) = 0 \text{ volt}$



Sekil 4 Dikdörtgen »odelde R<\*> direncinin hesaplanması

arasında

$$J_j = E_j / r \ll \frac{E(m-1, j-1) + E(m-1, j)}{2r} \quad (12)$$

$j=3, \dots, n$

veya

$$J_j \ll \frac{V(m-1, j-1) + V(m-1, j)}{2er} \quad (13)$$

$j=3, \dots, n$

yaklaşık bağıntıları yazılabilir. Kir tabakası kalınlığı  $h$  iso, topraklı elektrodun topladığı toplam akım

$$i = \frac{2}{j} \frac{1}{r} (hk) J_j \frac{koc}{e} [V(m-1, 2) + V(m-1, n) + 2 \sum_{j=3}^{n-1} V(m-1, j)] \quad (14)$$

ve sonda ile topraklı elektrot arasındaki toplam direnç  $R=1/G$

$$G = \frac{koc}{100e} [V(m-1, 2) + V(m-1, n) + 2 \sum_{j=3}^{n-1} V(m-1, j)] \quad (15)$$

olur. Değişik dikdörtgen modeller için (15) bağıntısından hesaplanan direnç değişimleri Çekil 3 de çizilmişlerdir.

#### YAZARLAR



**AHMET EUMELİ:** 1938 yılında Bitlis te doğdu. 1962 de İTÜ Elektrik Fakültesi Kuvvetli Akım Kısımından Y. Mühendis ve 1967 de İngiltere'nin Glasgow\* şehrindeki Strathclyde Üniversitesi'nden yüksek gerilim alanında Doktora

diplomalarını aldı. Orta Doğu Teknik üniversitesinde; 1962 de Asistan, 1968

de Y. Doçent, 1974 de Poçorit ve 1Wf) d\* Profesör oldu. Halen ODTÜ Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölürçüite Elektrik Tesisleri Annbilim IVılı Başkanlığı görevini yürütmekte olup "Yüksek Gerilim İzolatörlerinin Kirli Ortamlarda Atlama Davranışlarının Çeşitli Yönleri ile Araştırılması" temel ilgi alanını oluşturmaktadır.



**MİRZAHAM HIZAL:** 1919 yılında Kayseri de doğdu. 1969 da 01)10 Elektrik Mühendisliği Bölümünden Lisan<sup>o</sup>; v» İngilterenin Mnnchester şehrindeki UMİST den (llniversity of Mnncliester Scienco 5 Technology) yüksek gerilim alanında; 1971 de Master ve 1973 da 0'>Morri

diploTaların aldı. ODTÜ El(?Ktrü: Müh«fil.Msl işi Pölümürüdr»; 1973 de (İğirt. İm Görevlini, 1974 dn Y.Doçent, 19f? d'> DOÇRİİ!. vr? 19R9 da Profnsör oldu. llal^n aynı üniversitede Profesör olarnk y>rpv yapmnktn olup "Yalıtkan Sıvıl'irdn Elektriksel Pelinme Moknnizmalnr mm Araştırılması" temel ilgi alntı>rı girmektedir.



**CFLAL KORAŞLI** 1919 yılında Ankara wa doğdu. Odlü Elektrik Mühendisliği Bölümünden; 1971 do Lisans ve 1973 de Y. Lisans diplomalarını aldı. 1902 de İngiltere'nin Glasgow şehrindeki Strathclyde üniversitesinden yüksek gerilim

alanında Doktora diplomasını aldı.1987 de Y. Doçent, 1987 de Doçent oldu. Halen Gaziantep Üniversitesi Elekt.rik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde Doçent olarak görev yapmakladır. "Gazla l^ole Edilen Yüksek Gerilim Sistemlerinin Tasarımı" ve "Mikro-İplemcilerin Güç Sistemlerinde Kullanımı" temel ilgi alanlarını oluşturmaktadır.