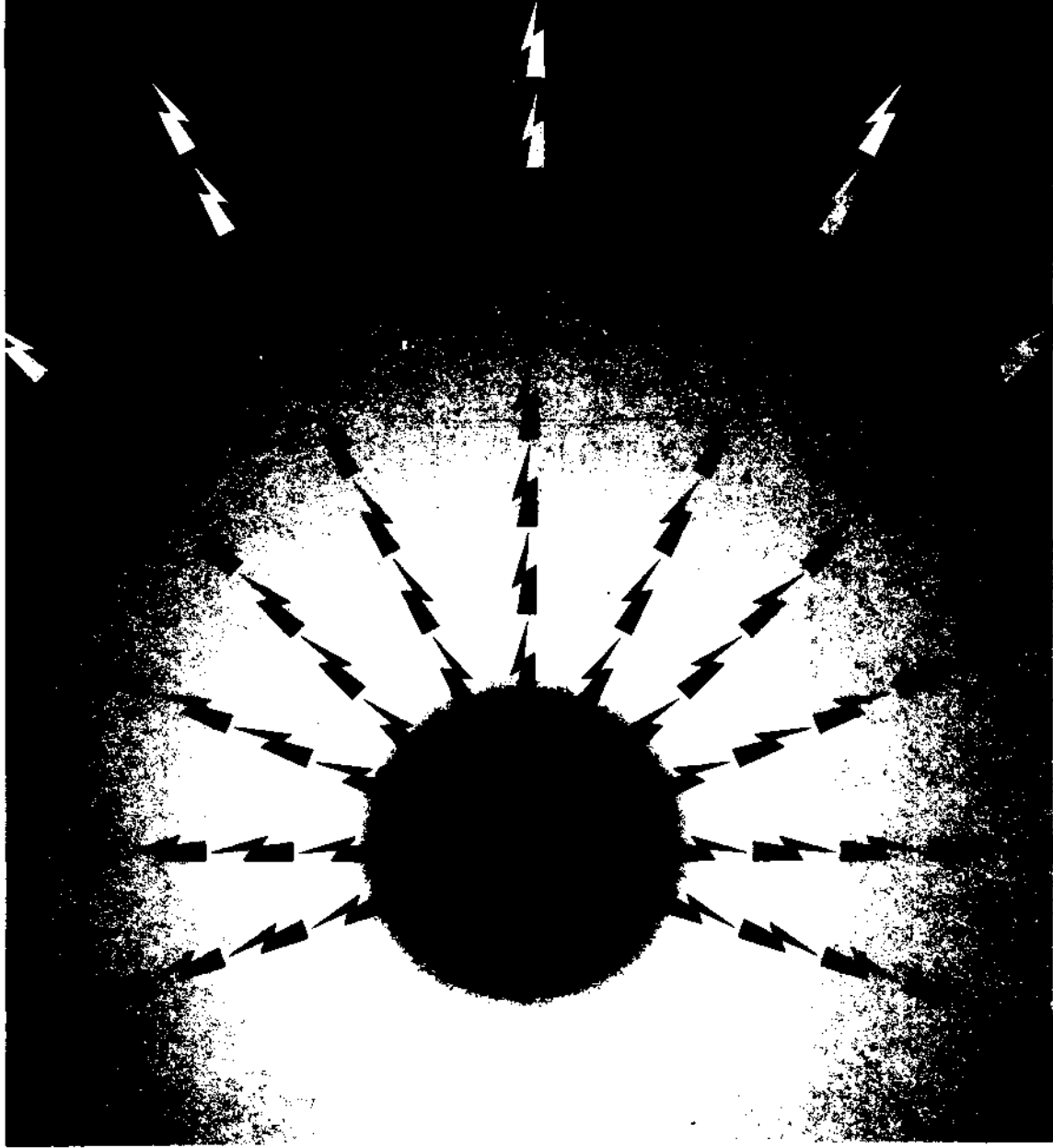


# TMMOB ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI

## ELEKTRİK - ELEKTRONİK BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ 7. ULUSAL KONGRESİ



TMMOB  
ELEKTRİK MÜHENDİSLERİ ODASI  
ANKARA ŞUBESİ



ODTÜ  
ELEKTRİK -ELEKTRONİK  
MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



TÜBİTAK

## ÖNSÖZ

TBMMO Elektrik Mühendisleri Odası Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 7. Ulusal Kongresini ve Sergisini Orta Doğu Teknik Üniversitesi'nde gerçekleştirmiş olmaktan onur ve sevinç duymaktayız. Üniversite olarak kongreye ikinci kez evsahipliği yapmamız bizi fazlasıyla mutlu etmiştir, ama mutluluğumuz asıl geçen süre içinde Odamızın, meslek yaşamımızın ve Üniversitemizin ne kadar gelişmiş olduğunu gözlemekten kaynaklanmaktadır.

Gerçekten de ilgi alanlarımızın çeşitlenmesi, bu alanlarda belli bir beceriye ulaşılmış olması, eskiden güçlü olduğumuz dallarda da gücümüzün sürmesi Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendislerimizin ülke genelinde giderek daha fazla söz sahibi olmaları olgusunu yaratmaktadır. Bireysel başarılarımızın kurumlarımızı da ülke ekonomisi ve gelişmesi bakımından güçlendirmekte olduğu açıktır. Nitekim bu sektörlerde faaliyet gösteren kuruluş sayısı hızla artmaktadır. Bu sayısal gelişmenin nitelik bakımından da aynı hızla sürdüğünü görmek sevindiricidir. Kongremiz ve sergimiz bunun en somut kanıtını oluşturmaktadır.

2000li yılların Türkiye'sinin ihtiyaçlarını yakalayabilmek için daha çok şeyler yapılması gerekmektedir. Endüstri-Eğitim Kurumları ve Meslek Odaları arasındaki iletişim ve karşılıklı etkileşimi güçlendirmek gerekmektedir. Bu geçmişe oranla daha sevindirici bir düzeyde sürüyor da olsa henüz gelişmiş ülkelerdeki başarılı örneklerin uzağındadır. Önümüzdeki yularda bu konuda daha fazla çabaya ihtiyaç vardır.

Tüm katılımcılara Kongre ve Sergimize vermiş oldukları güç için teşekkür ediyorum. Sizleri Üniversitemizde görmenin kıvançıyla selamlıyor saygılarımı sunuyorum.

Prof. Dr. FatıM Canatan  
Yürütme Kurulu Başkanı

ELEKTRİK-ELEKTRONİK-BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ  
7. ULUSAL KONGRESİ

YÜRÜTME KURULU

Fatih CANATAN (Başkan, ODTÜ)

M. Mete BULUT (ODTÜ)  
Cengiz BEŞİKÇİ (ODTÜ)  
Gönül SAYAN (ODTÜ)  
Cemil ARIKAN (TÜBİTAK)  
M. Hacim KAMOY (ASELSAN)  
Hüseyin ARABUL (BARMEK)  
Aydın GÜRPINAR (ENERSİS)

M. Asım RASAN (EMO)  
Cengiz GÖLTAŞ (EMO)  
H. Ali YİĞİT (EMO)  
Kubilay ÖZBEK (EMO)  
M. Sıtkı Çiğdem (EMO)  
Funda BAŞARAN (EMO)  
Mustafa ÖZTÜRK (EMO)

EDITÖRLER

Fatih CANATAN

Mehmet Mete BULUT

## SİLİKAJEL+POLİİMİD KOMPOZİT SİSTEMİNİN ELEKTRİK YÜKLÜ DURUMUNUN TERMAL ANALİZİ

Hafız ALIYEV\*, Muhammed KOKSAL\*, Yunus ÖNAL\*, Turgay SEÇKİN\*\*

\* inönü Üni., Müh. Fakültesi  
\*\* inönü Üni., Fen-Edebiyat Fak.  
44100-MALATYA

### ABSTRACT

*In this presentation the mathematical expressions defining Thermostimulation spectrum of püre polimid and silicagel-polyimid composite materials which are exposed to hözeren and corone discharging in air and SF<sub>6</sub> gas media are formulated. Based on the obtained results, it is found that the temperature at which a-peak maximums are vincident, but the value of maximum is lower for composit materials. However the p-peaks are not coincident at ali. This fact can be explained by the discharge of the bulkcharge(which occurs due to different dielectric constants and conductivity of the components in composite materials) occuring at the boundries of the comonents under isothermy charging proces.*

### I.GİRİŞ

Günümüzde endüstrinin farklı alanlarında pasif veya aktif dielektrik malzemeler yaygın bir kullanım alanına sahiptirler. Genellikle sentetik polimer veya polimer esaslı karışımlardan oluşan bu malzemelerin spesifik fizikokimyasal özelliklerinden dolayı güvenli kullanılabilmeleri için elde edilimleri ile yapıları arasında ilişki kurularak, bunların sentez mekanizmalarının açıklanması güncel bir problemi oluşturmaktadır. Çoğu kez sentez durumunda çok iyi elektro fiziksel

özellikler gösteren bu tür aktif ve pasif dielektrik malzemeler çalışma ortamında belli zamanlardan sonra ilk özelliklerini kaybetmeye başla-maktadır.

Bu tür sistemlerde deneysel sonuçların yorumlarında önemli zorluklarla karşılaşmaktadır. Öyleki bu malzemeler kompleks bir yapıya sahiptirler ve bu tür kompleks yapıli sistemleri, yaklaşık olarak da olsa açıklayacak modeller yok denecek kadar azdır.

### II.YÖNTEMLER

Elektret materyallerinin analiz yöntemlerinden en yaygın olanı termostimülasyon akım yöntemidir. Bazı durumlarda bu yöntemden yararlanılarak yapı bakımından homojen olmayan malzemelerde elektron prosesleri yorumlanabilirdi,2] Fakat bu yöntemin kompleks yapıya sahip malzemeler için genel olarak doğrudan doğruya uygulaması bir çok zorluklar oluşturur.

Bu çalışmada [3-5] 'e uygun kuvvetli elektrik alanı ve farklı ortamlarda (SF<sub>6</sub>, hava) farklı gaz boşalmaları(közeren, koron) etkisine maruz kalmış silikajel+poliimid (1:4 w/w; P=100 Atm; Tg = 100 °C)kompozit sisteminde oluşan elektrik yükü durumun termal analizi incelenmiştir, termostimülas akımları 20-180°C sıcaklık aralığında ölçülmüştür. Bu sıcaklık aralığında saf film şeklinde(40"nm kalınlığında) poliimid polimerinin termostimülasyon akım spektrumunda maksimumları uygun olarak 70°C ve

130°C civarında olan iki relaksion piki görülmüştür. Bu pikler [1,2,4]'e uygun olarak a ve p-piklerine ait olabilir. Ancak poliimid silikajelin katkısıyla termostimülasyon akım spektrumunda değişiklik görülmüştür. Bu beklenen bir sonuç olup yapının davranış özelliklerinin yorumlanmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle deneysel sonuçları yorumlamak için, problem iki yönden ele alınmıştır. Birincisinde saf poliimid, ikincisinde ise silikajel+poliimid kompozit sisteminin depolarizasyon prosesi incelenmiştir.

### III. TEORİ

Elektretin lineer ısıtılması, materyalin yapısında bulunan dipollerin düzeninin bozulmasına neden olur. Bu halde [2]'ye uygun olarak polarizasyon vektörü P(t)'nin zamana göre değişimi Debay denkelemine göre açıklanabilir; yani

$$\frac{dP(t)}{dt} + \alpha(T) P(T) = 0 \quad (1)$$

Burada a(T)-relaksion frekansıdır. Öte yandan polarizasyon vektörünün zamana göre değişimi relaksion akımı i(t)'yi belirlemektedir,

$$i(t) = \frac{dP(t)}{dt} - \alpha(T) P(T) \quad (2)$$

(1) denklemini değişkenlerine ayrılarak çözülürse

$$P(t) = P_0 \exp \left[ - \int_0^t \alpha(T) d(T) \right] \quad (3)$$

elde etmiş oluruz. Burada P<sub>0</sub>- numunede başlangıçta depolanan polarizasyondur.  $p = \frac{dP}{dT}$  olduğu göz

önüne alınarak (3) ifadesi (2) ifadesiyle birleştirilirse

$$i(T) = - a(T) P_0 \exp \left[ - \int_{T_0}^T a(T) d(T) \right] \quad (4)$$

bulunur. Relaksion frekansı genellikle

$$a(T) = a_0 \exp (-A/kT) \quad (5)$$

bağıntısıyla verilir [2]. Burada a<sub>0</sub> - özrelaksion frekansı, A- aktivasyon enerjisidir. Aktivasyon enerjisi termoakım spektrumundaki pikten belirlenebilir. Bu halde

$$AT/T_{max} = 2.47 kT_{max}/A \quad (6)$$

(6)'dan A'yı belirleyerek ve a(T<sub>m</sub>) p kT<sub>m</sub><sup>2</sup>/A = 1 bağıntısından yararlanarak özfrekans relaksionu için

$$a(T) p AT/2.47 = 1 \quad (7)$$

ifadesi elde edilir. Başlangıçta numunede depolanan polarizasyonun termoakım değerini bulmak için spektrumların integrallerinin alınması gerekmektedir;

$$P_0 = \int_{T_0}^{\infty} i(T) dT \quad (8)$$

(5) ifadesi (4)'de yerine yazılırsa ve

$$P_0 \int_0^T a(T) d(T) * a(T) p kT^2(A+1.85kT) \quad (9)$$

olduğuda göz önüne alınırsa, saf poliimid için termoakım ifadesi aşağıdaki şekilde yazılır;

$$i(T) = - a(T) P_0 \exp \left[ - \int_{T_0}^T a(T) p \right]$$

$$kT^2 / (A+1.85kT)] \quad (10)$$

Şimdi ise koron veya közeren boşalma etkisine maruz kalmış silikajel+poliimid kompozit sistemini ele alalım. Bu durumda yüzey tabakasına yakın yerleşmiş silikajel tanecikleri yoğun olarak yüklenecektir. Numunenin bileşiminde bulunan silikajel tanecikleri ise poliimid dielektrik engelinin olmasından dolayı yüklenmeyecektir. Silikajel+poliimid kompozit sistemi için termostimülasyon spektrumları elde edilirken, önce sistemin poliimid dielektriğine ait olan bölgelerindeki yükler serbest bırakılırlar. Kompozit sistemin silikajele ait olan bölgesindeki yükler sıcaklığın daha büyük değerlerinde serbest olmaya başlar. Bunun nedeni poliimid polimer dielektriğinde yüklerin tutulma enerji seviyelerinin, silikajele göre daha düşük olmasıdır. Bu nedenle silikajel+poliimid kompozit sisteminde termostimülasyon akım spektrumları

$$\frac{dP(t)}{dt} + \langle \alpha(T) \rangle P(t) = \langle \alpha(T) \rangle P_e(T) \quad (11)$$

denklemleriyle karakterize olunabilir. Burada;

$$P_{efO} = \frac{\epsilon \gg Np^2}{\dots}. E_0$$

şeklinde verilir[1,2]. Eğer polimerizasyon vektörünün başlangıç değeri  $P_0$  biliniyorsa o zaman (11) denkleminin çözümü şu şekilde olur;

$$P(t) = P_0 \exp \left\{ - \int_0^t a(T) dT + P_e(T) \int_0^t \left\{ \exp - \int_0^t a(T) dt \right\} \right\} \quad (12)$$

Termoakım spektrumunu bulmak için (12) denkleminin diferansiyelinin

alınması gerekmektedir; yani işlem sonucu

$$i(T) = - a(T) P_0 \exp [- a(T) p$$

$$kT^2 / (A+1.85kT) + \langle \alpha(T) \rangle P_e(T) \exp [- a(T)$$

$$\beta kT^2 / (A+1.85kT)] \quad (13)$$

(10) ve (13) denklemleri uygun olarak saf poliimid ve silikajel+poliimid kompozit sistemine közeren veya koron gaz boşalması etkisi sonucu materyallerde oluşan yüklü durumlara karşılık gelen termoakım spektrumlarını karakterize ederler.

#### IV.SONUÇLARIN TARTIŞILMASI

(10) ve (13) ifadelerinin kıyaslanmasına dayanarak, silikajel+poliimid kompozit sisteminde a-pikin değeri küçüldüğü, fakat bu pik maksimumunun her iki malzeme içinde çakıştığı gözlenir.

Bilindiği gibi dielektrik sabitleri ve geçirgenlikleri farklı olan bir sistemde yüklü durum oluştururken, yükler sistemin bileşenleri sınırda birikecektir. Başka deyişle kompozit sistemin farklı bölgelerinde lokal elektrik alanları oluşacaktır. Silikojel + poliimid kompozit sisteminde de böyle bir durumdan dolayı oluşan lokal elektrik alanları kompozit sistemi oluşturan bileşenlerin sınırlarına doğru zıt işaretli yüklerin akışına, dolayısıyla silikojel+poliimid kompozit sisteminin termostimülasyon akım spektrumunda p-piklerin oluşmasına neden olur.

#### V.SONUÇ

İzotermik elektrik yüklenme durumunda hava ve  $SF_6$  ortamlarında közeren ve koron gaz boşalmaları etkisiyle saf ve silikojel+poliimid kompozit sisteminin termoakım

spektrumlarını tanımlayan matematiksel ifadeler elde edilmiştir. Bu ifadelerin yorumu sonucunda saf ve kompozit malzemelerde a-pik maximumlarının olduğu sıcaklığın değişmediği fakat kompozit malzemelerde a-pik'in maksimum değerinin azaldığı görülmektedir.. Saf malzeme ile karışımın spektrumlarındaki p-piklerinin karşılaştırılmasında ise durum karışımı oluşturan bileşenlerin farklı dielektrik sabitlerine ve geçirgenliklerine sahip olmaları nedeniyle onların sınırlarında biriken hacim yüklerinin serbest bırakılmasıyla izah edilir.

Benzer incelemeler yeni hazırlanan [6-8] kil-polimer sol-gel kompozit materyalleri içinde yapılacak olup daha ileriki çalışmaların konusunu oluşturacaktır.

## REFERANSLAR

1. G. A. Luşeykin, Metodu issledovaniya elektrikçeskih svoystv polimerov, Moskova, ximiya, 1988, s.160.
2. Gorohovatskiy Yu.A., "Osnovi Depolyarizovannogo Analiza", -M., Nauka, 1981, p 175
3. H.Z. Aliyev, Y.V.Gorin. "Karmaşık Elektrik Boşalmaları Nedeniyle Yüzeylerde Oluşan Değişiklikler", Vakum Tekniğiyle Kaplama Sempozyumu Kitabı, C 2, p 62, Litvanya-USR., 1987
4. H.Z. Aliyev, P.V. Leonov, "Hacim Yüklerinin Eksponansiyel Optik Udulma Spektrumunun Karakter Enerjisine Etkisi", Elektrik ve Elektrofizik Makaleler Toplusu Kitabı, Moskova-Bakü, V.4, 1994, p.232, İlim Yayımevi.
5. H.Z. Aliyev, "Polimer Yalıtkanlarda Elektrik Yüklerinin Relaksasyon Modelinin İncelenmesi" AzıMU' nun İlimi Yayınları Kitabı, 1993, P 250.
6. T. Seçkin, Y. Önal, I. Aksoy ve E. Yakıncı, "Synthesis and Characterization of Novel polyacrylate Clay Sol-Gel Materials", J. Materials Science 31, (1996),3123
7. T. Seçkin, Y. Önal, A. Gültek ve E. Yakıncı ve I. Aksoy, " Synthesis and Characterization and Thermal Properties of Bentonite-Polyacrylate Sol-Gel Materials", J. Mat. Chem, 7(2),(1997),265.
8. T. Seçkin, Y. Önal, E. Yakıncı, "I. Aksoy, "The Covalent Bond Formation Acrylonitrile and y-methacryloxypropyltriethoxysilane on Kaolinite", J. Materials Science (Yayında)

# YÜKSEK GERİLİM İZOLATÖRLERİNDE ARK'A SERİ KİR DİRENCİ DEĞİŞİMİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE HESAPLANMASI

Muhsin T. GENÇOĞLU, Mehmet ÇANAKÇI\*, Mehmet CEBECİ  
Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü 23279-ELAZIĞ  
\* TEDAŞ İşletme Müdürlüğü ELAZIĞ

## ABSTRACT

*High voltage insulators are supposed to provide a continuous and safe isolation in energy transmission systems. However, the pollution layer occurred on the surface of insulators, decreasing the performance of insulator, causes surface flashovers and thus, short circuit failures. This is one of the most important energy transmission problem.*

*Analytical determination of the behaviour of insulators in polluted conditions has great importance in insulator choice for polluted regions and insulator design and coordination. Basic difficulties of theoretical studies are due to complex shape of insulator and the complexity of flashover phenomenon.*

*First step to prevent pollution flashover is to determine flashover mechanism which is quite complex. For this purpose, considering the flashover equation, the changes in resistance of the pollution layer during pre-discharge and discharge must be correctly determined. Replacing insulator with a suitable equivalent model simplifies the calculations. Analytical determination of pollution behaviour of insulators, is worth attention and as safe as test based determinations.*

## 1. GİRİŞ

İzolatörlerin temel görevi enerji iletim sisteminin yüksek gerilim altındaki kısımlarını izole etmektir. Ayrıca enerji iletim hatlarında olduğu gibi, mekanik taşıma görevi de yaparlar. İzolatörler, genellikle taşıma görevini başarı ile yaptıkları halde, izolasyon görevini zaman zaman yapamamakta ve enerji iletim sistemlerinin başlıca arıza kaynaklarından birini teşkil etmektedirler.

Yüksek gerilim harici tip izolatörler; kıyıya yakın bölgelerde tuzdan, endüstriyel alanlarda toz ve kimyasal artıklardan dolayı kirlenmeye maruz kalırlar. Böyle bir izolatör kuru iken çok küçük bir kapasitif kaçak akım geçer ve gerilim dağılımı basit olarak elektrostatik alanla tanımlanır.

Kirlilik teriminin izolatör yönünden özel bir anlamı vardır. Atlamaya yol açacak kadar fazla deniz orjinli kirle kaplı izolatörler çok yakından bakılsa bile temiz

görülebilir. Bununla birlikte endüstriyel tozlar veya çimento ile ağır biçimde kirlenmiş izolatörler, elektriksel bakımdan yeni izolatör gibi davranabilir. Bunun nedeni atlamaya sebep olan yüzey iletkenliğinin miktar yönünden önemsiz olmasıdır.

İzolatör yüzeyindeki artıklar performansı önemli ölçüde etkiler. Deniz ve göl tuzları, petrokimya endüstrisi artıkları ve asit üreten tesis artıkları gibi suda çözünen kirler daha önemlidir. Hem çözünen, hem de çözünmeyen kirler harekete geçmek için su gerektirirler. Bu nedenle sis, çığ ve kırağı kirlenme atlaması yönünden önemli artıklardır. Karbon, bazı metal oksitler veya metal içeren tozlar su yok iken dahi iletken hale gelebilirler. Bunlar nadiren atlamaya sebep olmakla birlikte bazı demiryolu izolatörlerinde görülebilirler.

Kir tabakasının yağmur, sis, rutubet vb. etkenlerle ıslanması sonucu iletken hale gelen kirlili yüzey boyunca akan kaçak akımlar yüzeyde enerji kaybına sebep olurlar. Enerji kayıp yoğunluğunun büyük olduğu, özellikle izolatörün dar kısımlarındaki kirlili bölgeler daha fazla ısınarak kurur ve "kuru band" denilen kısımların oluşmasına yol açarlar. Bunun sonucunda yüzey boyunca gerilim dağılımı bozularak, homojen olmayan bir yapıya dönüşür. Kuru band bölgelerindeki gerilim düşümü havanın dayanımını aşınca ön deşarjlar oluşur. Ön deşarjlar çoğunlukla söner; bazı şartlarda ise, yüzeye yayılarak kısa devre ile sonuçlanan atlama olayını meydana getirirler. Atlama sonucu meydana gelen yüksek akımlı ark enerjinin kesilmesine, birçok izolatörün tahrir olmasına ve hatta enerji iletim hattının eriyerek kopmasına sebep olabilir.

Problemin çözümü için, deneysel çalışmalara ilave olarak analitik hesaplamalar da yapılmaktadır. Bu çalışmada atlama olayında en önemli konu olan kir direnci değişiminin hesabı için Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) 'nin kullanımı gösterilmiştir.

## 2. TEORİ

Bir yüksek gerilim izolatöründe kirlenme atlaması için üç ana şart veya beş kademe gereklidir.

- 1-İzolatör yüzeyinde iletken kir filminin teşekkülü
  - a)İzolatör yüzeyinin kir tabakası ile kaplanması
  - b)Kir tabakasının rutubet tesiri ile ıslanması



## 2-Kirli izolatör yüzeyinde ön deşarjların teşekkülü

a)Kuru bandların oluşması

b)Kuru bandlar boyunca ön deşarjların tutuşması

## 3-ön deşarjların yüzey boyunca yayılması ve kısa devre

Eğer bu beş kademedan herhangi biri tamamen kont'ol altına alınabilirse, kirlenme atlaması problemi kesin olarak çözülecektir. Pratikteki gözlemlerden izolatör yüzeyinde kaçak akımın 100-200 mA değerine ulaşması halinde atlamanın meydana geldiği görülmüş" jr. Ancak sızma akımının değeri ile atlamanın meydana gelip gelmeyeceği arasında kesin bir bağıntı kurmak mümkün değildir. Islak ve kirli izolatör yüzeyleri yeterince iletken olduğunda 200-400 V/cm 'lik a;^n şiddetlerinde atlamalar olabilir.

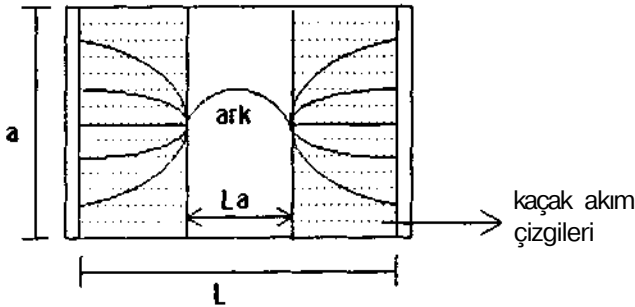
Şekil 1, başlangıçta homojen kirle kaplı olan ve daha sonra kuru band oluşup ark ile köprülenen düz bir yüzeyde tutuşan arkın idealize edilmiş bir modelidir. Birçok araştırmacı bu modeli farklı yaklaşımlarla kullanıp, aynı sonuçlara ulaşmışlardır. Yapılan kabuller şunlardır:

1-Ark uzunluğu kuru band uzunluğuna ( $L_a$ ) eşittir.

2-Kir direnci  $R$ , sadece yüzey tabakasının arksız kısmının bir fonksiyonudur. Yani,  $R=R(L_a)$  ve  $(dR/c")L_a < 0$  dir.

3-Incelemenin çok kısa bir zaman aralığında yapıldığı kabulüyle tabakanın ısınması ve nem değişimi ihmal edilmiştir.

4-Ark uçlarındaki düzensiz akım yoğunluğu dağılımının etkisi ihmal edilmiştir.



ŞEKİL: 1 Bir kısmi ark deşarjı için ideal model

Uygulanan gerilim, tabaka ve ark arasında  $U=U_{-}|+U_a$  şeklinde bölünür.  $U_a=A.I^{n'n}$  deneysel olarak tanımlandığından

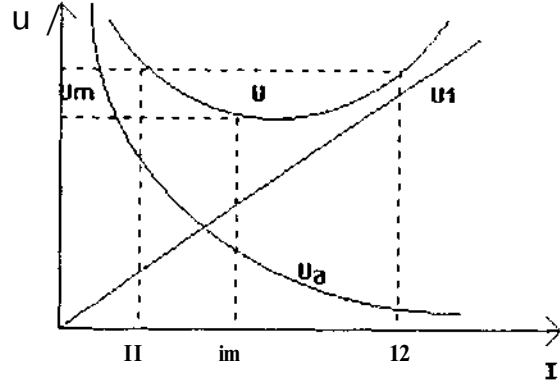
$$U= I.R(L_a) + A.|^{-n} \quad (1)$$

$$R(L_a)= R_c(L - L_a) \quad (2)$$

şeklinde verilir. Bu bağıntı denk. (1) 'de yerine konulursa

$$U=I.R_c(L-L_a) + A.I^{n'n} \quad (3)$$

olur.  $p$  yüzey tabakasının özdirenci ve  $b$  kir tabakasının eni olmak üzere;  $R_c= p/b$  dir. Denk.(3) ile verilen fonksiyon, Şekil 2 'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde  $U_a$ ,  $L_a$  uzunluğundaki arkın üzerinde düşen gerilim;  $U_{-}|$ ,  $(L-L_a)$  uzunluğundaki tabakada düşen gerilim;  $U_m$ , sabit bir  $L_a$  uzunluklu arkın devamı için gerekli minimum gerilim ve  $U$ , atlama gerilimidir.



ŞEKİL: 2 İdeal modelin gerilim eğrileri

Eğer uygulanan gerilim  $U_m$  değerinden aşağı düşerse ark söner. Bu minimum gerilim için böyle bir şartı gerçekleyen  $I_m$  akımı,  $U$  'nun  $I$  'ya göre türevini alıp sıfıra eşitleyerek bulunabilir.

$$m = \left[ \frac{A.n.L_a}{R_c(L - L_a)} \right]^{1/n} > + \quad (4)$$

$I_m$  'nin bu değeri denk( 3) 'de yazılarak,

$$U_m = (1+n) (A.L_a)^{1/n+1} [R_c(L - L_a/n)]^{n/1+n} \quad (5)$$

elde edilir.

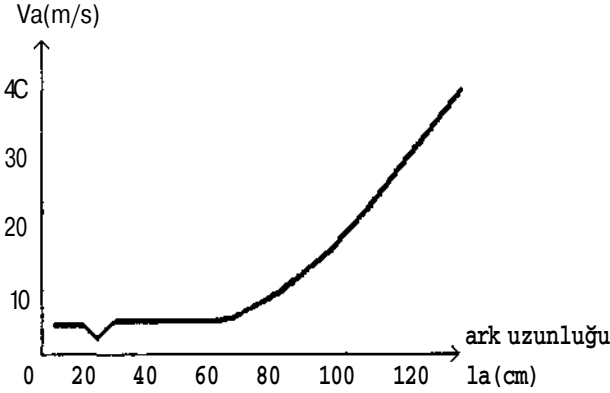
Analitik çalışmalarda atlama problemi, çoğunlukla Şekil 1 'de gösterildiği gibi homojen kirle kaplı iki elektrotlu düzlemsel bir model üzerinde, bir doğru boyunca yayılan bir veya çok sayıda deşarjla temsil edilir. Uygulanan gerilim  $V$ , deşarjlar boyunca toplam gerilim düşümü  $V_a= A.X.I^{n'n} + V_e$ , deşarjlara seri kir bölgesinde gerilim düşümü  $VR = IR$  ise

$$V = A.X.|^{-n} + V_e + I.R = f(I,X) \quad (6)$$

yazılabilir. Bu bağıntıya "atlama denklemi" denir. Burada  $X$  toplam deşarj boyunu,  $I$  akımı,  $V_e$  elektrotların gerilim düşümünü (sabit),  $A$  ve  $n$  sabitler olmak üzere  $A.I^{n'n}$  deşarj gerilim gradyanını göstermektedir.  $A$  ve  $n$  katsayılarının değerleri

deşarjın tuttuğu ortama bağlıdır. İzolatör yüzeylerinde oluşandeşarjların hava ortamında tuttuğu dikkate alınarak,  $A.I^{n-1}$ deşarj gerilim gradyeni V/cm olmak üzere,  $A=63$  ve  $n=0.76$  alınmaktadır. Rdeşarjlara seri toplam kir direncini göstermektedir. R için uygun birbağının bulunması analitik hesaplamalarda karşılaşılan zorluklardan biridir.

Arkın yüzey boyunca yayılma hızı değişik tekniklerle ölçülmüştür. Şekil 3, atlama gelişiminin son safhasının tipik bir eğrisini verir.



ŞEKİL: 3 Ark büyümesinin değişik safhalarında ark hızı

Kirle kaplı bir izolatöre gerilim uygulandığında kir tabakası direncinde meydana gelen değişiklikler,deşarj öncesi vedeşarj sonrası değişimler tarzında incelenir. Laboratuvar testlerinde izolatör kirle kaplandıktan sonra kir tabakası ısıtılarak maksimum iletkenliğe erişilinceye kadar beklenir. Gerilim uygulanmadan önce hesaplanan iletkenliğe "soğuk kir iletkenliği ( $\sigma_c$ )" denir. Gerilim uygulandıktan sonra, kaçak akımın yol açtığı ısınma nedeniyle kir iletkenliği kuru bandlar ve öndeşarjlar oluşuncaya kadar artarak maksimumdan geçer.

Denk.(6) ile verilen atlama denklemindekideşarjlara seri kir bölgesi toplam direnci R, Xdeşarj boyuna ve kir tabakasında açığa çıkan W enerjisine bağlıdır. Deşarj boyunun artması seri kir bölgesi boyunun kısalmasına ve böylece  $R(X,W)$ 'nin azalmasına yol açar. ( $3R/dW < 0$ ) Deşarj öncesi durumda olduğu gibideşarj sonrasında da W enerjisi kir tabakasında değişmelere yol açabilir, öndeşarjların tutuşması ile kaçak akımda ani artışlar görülmektedir. Bu durumun, ısınma-kuruma nedeniyle kir tabakası direncinde artışa yol açacağı ( $8R/3X > 0$ ) düşünülebilir. R direncindeki esas değişimindeşarj boyundaki değişmeden ( $dR/3X$ ) ileri geldiği, bunun yanında özellikledeşarjın yayılma hızının büyük olduğu hallerde enerjinin yol açtığı değişimin ihmal edilebileceği ( $3R/3W=0$ ) kabulü yapılmaktadır.

### 3. SEY İLE ÇÖZÜM

İzolatör yüzeyindeki akım akışı bir laplace problemi olarak incelenebilir. Enerji fonksiyonu

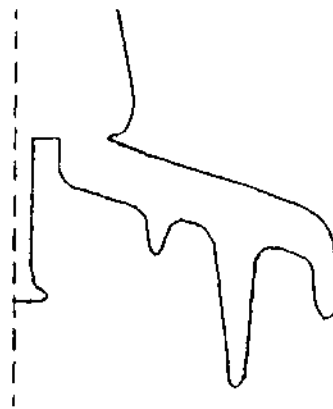
$$W(\phi) = \int_V \rho E^2 dV \quad (7)$$

olur. Burada E, dv hacminin elektrik alan şiddeti ve p, kir tabakasının özgül direncidir. Ele alınan problem bölgesinde geçerli Laplace denklemi için aşağıdaki fonksiyonel ifadesi yazılabilir.

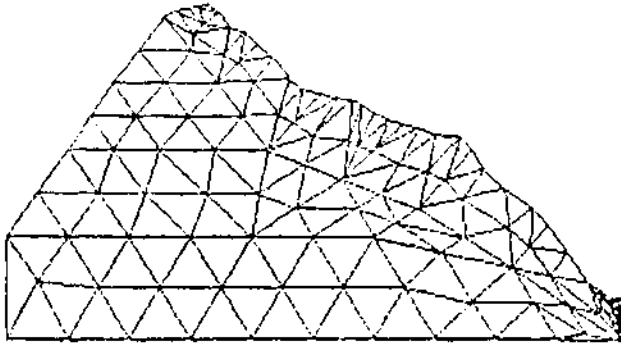
$$W_r = \int_S \rho_s \left[ \left( \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)^2 \right] dx dy \quad (8)$$

Burada  $p_s = p/h$  yüzey iletkenliği olup, h kir tabakasının kalınlığıdır. Bu enerji fonksiyonelinin minimizasyonu sonucunda incelenen bölge için potansiyel dağılımı elde edilir. Şekil 4 'de BSFT-9336 izolatörü ve Şekil 5 'de bu izolatöre ait AR modeli (açık model) gösterilmiştir. AR modeli üzerinde potansiyeller yardımıyla R(x) değişiminin bulunabilmesi amacıyla, bu çözüm bölgesi üçgen elemanlar ile bölmelenmiştir (Şekil 5).

Bölmeleme ile 262 üçgen eleman, 171 düğüm oluşturulmuştur. Sızma aralığı üzerinde değişik noktalarda bulunan sonda ile topraklı elektrod arasında, bu elektroda çok yakın ( $=0.2$  cm) aralıkta bölmeleme yapılmıştır. Bu düğümlerin potansiyelleri ile topraklı elektrod arasında bulunan ve yüzey iletkenlik değeri bilinen kir tabakası parçalarından geçen akımlar bulunmuştur. Sondaya uygulanan gerilim, bu parçalardan topraklı elektroda geçen toplam akıma bölünmek suretiyle direnç değeri hesaplanmıştır. Programın, iterasyon yapmak ve her defasında sonda yerini belirli aralıklarla değiştirmek suretiyle, tüm sızma aralığı boyunca hesaplamayı tekrarlaması sağlanmıştır.

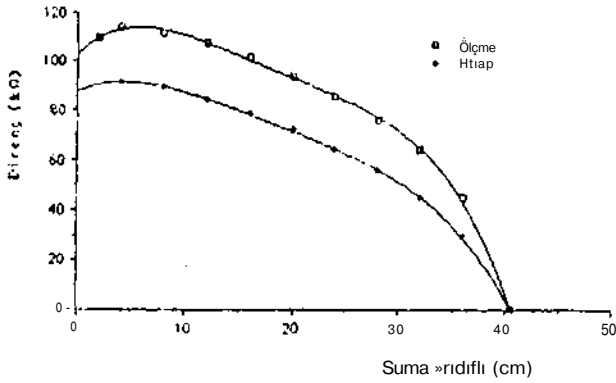


ŞEKİL: 4 BSFT-9336 izolatörü

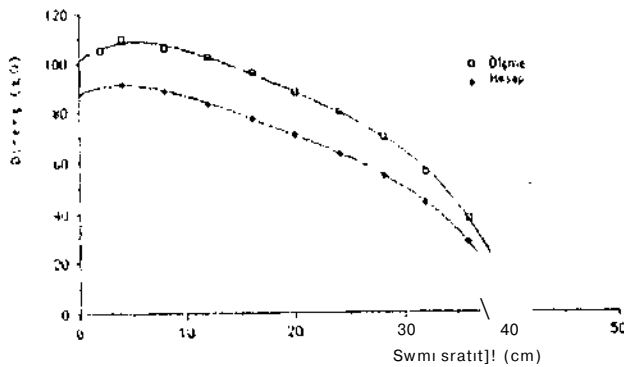


ŞEKİL: 5 BSFT-9336 izolatörü için AR modelinin üçgen elemanlarla bölünmüş hali

BSFT-9336 izolatörünün yapılan hesaplamalar sonucunda elde edilen  $R(x)$  değişimleri Şekil 6 ve Şekil 7 'de gösterilmiştir. Şekil 6 'da 0.15 mm, Şekil 7 'de ise 0.3 mm sonda yarıçapı için hesaplanan sonuçların Rumeli tarafından elde edilen ölçme sonuçları ile karşılaştırması verilmiştir.



ŞEKİL: 6 0.15 mm sonda yarıçapı için ölçülen ve hesaplanan  $R(x)$  değişimleri



ŞEKİL 7 0.30 mm sonda yarıçapı için ölçülen ve hesaplanan  $R(x)$  değişimleri

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, yüksek gerilim izolatörlerinde kirlenme atlamasının genel teorisi verilmiş ve BSFT-9336 izolatörünün kir direnci değişimi bilgisayar programı ile analitik olarak hesaplanmıştır.

Ark 'a seri direnç değişimini hesaplamak üzere, önce izolatörün AR modeli çıkartılmış ve daha sonra bu model üzerinden, SEY yöntemi ile elde edilen lineer denklem sistemi SOR yöntemiyle çözülmüştür. Bilgisayar sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

#### 5. KAYNAKLAR

- 1- ÇANAKÇI, M., (1993). Sonlu Elemanlar Yöntemi Yardımıyla Yüksek Gerilim İzolatörlerinde Yüzey Alan Dağılımının Hesabı. Yüksek Lisans Tezi, Elazığ.
- 2- RUMELİ, A., (1970). İzolatörlerde Gerilim Dağılımı Düzenlenmesi. Elektrik Müh, 167 : 31-36.
- 3- RUMELİ, A., (1973). Kirli İzole Yüzeylerde Deşarjların Yayılımı ve Atlama. Elektrik Mühendisliği, 199: 419-427.

# YÜKSEK GERİLİM İZOLATÖRLERİNDE KİR TABAKALARININ SONLU ELEMAN ANALİZİ İÇİN ÜÇ BOYUTLU YÜZEYSEL AĞ ÜRETİMİ

Zafer AYDOĞMUŞ\* , Mehmet CEBECİ"

\* Fırat Üniversitesi Teknik Eđt. Fakültesi Elektrik Böl. 23279 ELAZIĞ

\*\* Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Böl. 23279 ELAZIĞ

## ABSTRACT

*Especially recent years the Finite Element Method (FEM) in the numerical methods is found the large application fields towards to the any kind of design. Preparing the data automatically for the Finite Element analysis programs gets more easiness in the sight of usages and applications.*

*Different types of element are using in Finite Element analysis. Thangular element is the most used element in two-dimensional analysis. Mid-points are added to triangular elements for modeling the curve-sides. In this study, for the analyzing of surface problems by using the FEM, three dimensional mesh generation program has been deveicped. The program uses 6 nodes triangular elements.*

*The polluted film on high voltage insulators causes surface flashover. In recent years, this problem has also been take in account by using the FEM. To prepare the mesh by the help of the developed program, it's enough that the user only gives the coordinate of critical points along leakage path.*

## 1. GİRİŞ

Mühendislik uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), özellikle son yıllarda tasarıma yönelik olarak geniş bir kullanım alanı bulmuştur. Sonlu Eleman analiz programları için

problem verilerinin otomatik hazırlanması, kullanım ve uygulama bakımından büyük kolaylık sağlar.

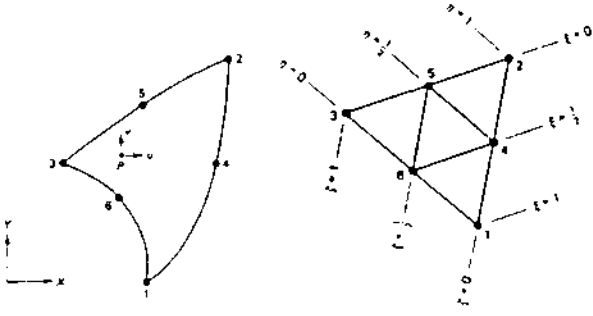
Sonlu Eleman analizleri için veriler; problemin tipine, geometrisine ve özelliklerine uygun elemanlarla ayrıştırma ve tanımlama yapacak şekilde hazırlanır. Bu amaçla kullanılabilir değişik özellikler içeren birçok eleman tipi vardır. Elemanlar, genel (global) koordinat sistemi içerisinde alan koordinatları da denilen tabii koordinatlarla tanımlanırlar.

Problemin konfigürasyonu ve diğer detayları, iki bağımsız uzay koordinatı cinsinden tanımlanabilirse, iki boyutlu elemanlar kullanılabilir, iki boyutlu analiz için en kullanışlı eleman üçgen elemandır, üadriateral bir eleman, iki veya dört üçgen elemanın bir araya getirilmesiyle elde edilebilir. Eğri bir geometri içeren problemlerin ayrıştırılmasında, eğri kenarlı elemanlar daha kullanışlıdır. Eğri kenarları modellemek, üçgen elemana orta noktaların eklenmesiyle elde edilir/1/

Bu çalışmada, yüzey problemlerinin SEY ile analizi için üç boyutlu verileri otomatik olarak hazırlayan bir program geliştirilmiştir. FORTRAN dilinde yazılmış olan program, 3 düğümlü üçgen elemanlar kullanarak 3ğ oluşturur. Program genel bir yapıya sahiptir ve çeşitli uygulama örnekleri gösterilmiştir. Ancak bu çalışmada özellikle yüksek gerilim izolatörlerinin yüzeylerinde Sonlu Eleman ağı oluşturulması amaçlanmıştır.

## 2. TEORİ

Ağ üretiminde kullanılan altı düğümlü üçgen eleman, Şekil. 1 'de gösterilmiştir.



Şekil: 1 Altı düğümlü eleman.

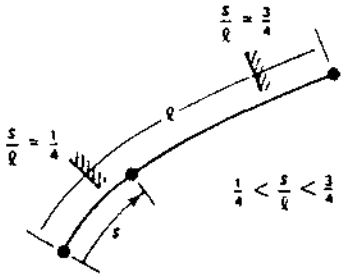
Şekil. 1 'de gösterilen temel eleman dikkate alınarak şekil fonksiyonları aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$\begin{aligned} N_1 &= \xi(2\eta - 1) N_4 = 4\xi\eta \\ N_2 &= \eta(2\xi - 1) N_5 = 4\xi\eta \\ N_3 &= \zeta(2\xi - 1) N_6 = 4\xi\zeta \end{aligned} \quad (1)$$

Burada  $\xi=1-4-n$  'dir. Şekil fonksiyonlarındaki  $\xi^2$ ,  $\eta^2$ , vb. terimlerinden dolayı, bu elemana "kuadratik üçgen" de denir. Izoparametrik gösterimi

$$x = \sum N_i x_i, y = \sum N_i y_i \quad (2)$$

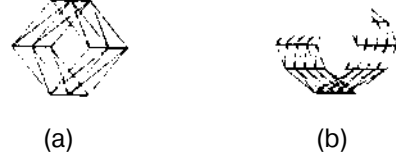
şeklinde dir. Yukarıda bahsedilen yüksek dereceli izoparametrik elemanlarda kenar orta düğümler mevcuttur. Kenar orta düğümü, kenarın merkezine mümkün olduğu kadar yakın olmalıdır. Düğüm, Şekil.2 'de gösterildiği gibi,  $1/4 < s/l < 3/4$  nin dışında olmalıdır/2/



Şekil.2 Kenar orta düğümün yerinin sınırlanması.

## 3. UYGULAMA

**Örnek-1:** Bu uygulamada ince cidarlı bir boruyu Sonlu Eleman ağı ile kaplamak için dört üçgenden oluşan bir eleman gözönüne alınmıştır. Şekil.3.a 'da bu elemanın M=2 durumu için çizilmiş olan şekli görülmektedir. NKXX=0, NKYY=4 ve NKZZ=0 değerleri kullanılmak üzere M=3 ve 5 için Şekil.4.a ve b elde edilmiştir.



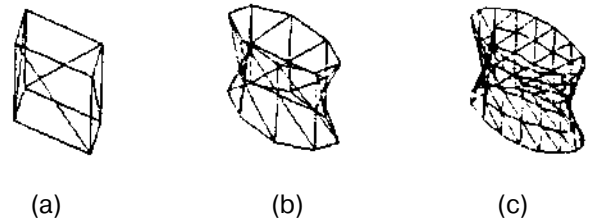
Şekil:3a)M=2,NP=12,NE=16 ve b) M=4,NP=40, NE= 64 durumları için çizilmiş elemanlar.



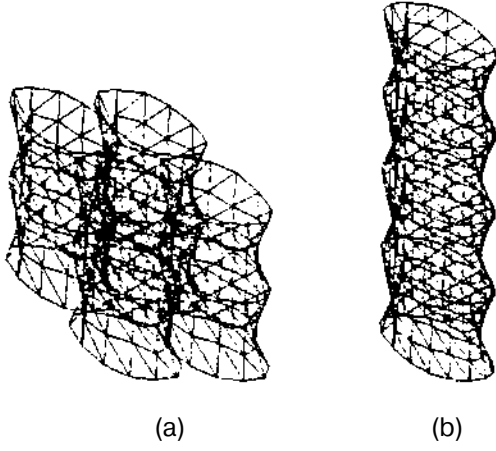
Şekil:4 a) M=3,NP=96,NE=180 ve b) M=5, NP=260, NE=500 değerleri için elde edilmiş elemanlar.

Burada; M, kenar bölmeleme sayısı; NP, düğüm sayısı; NE , eleman sayısı; NKXX, NKYY, NKZZ ise x, y ve z yönlerinde eklenecek aynı yapıdaki eleman sayılarıdır.

**Örnek-2:** Bu uygulama için Şekil.5.a 'da gösterilen parça ele alınmıştır. Bu parçanın değişik M değerleri için elde edilen bölmelemeleri, Şekil.5b ve c 'de gösterilmiştir. x y ve z yönlerince parçalar ilave edilmesine ilişkin şekiller ise Şekil.6 'da verilmiştir. 131



Şekil:5 a) 8-üçgenli temel eleman, b) M=2, NP=24, NE=32, c) M=4, NP=80, NE=128 değerleri için elde edilen elemanlar.



Şekil:6 a) Temel elemana x, y ve z yönlerinde 1 'er parçanın ilave edilmesi, b) Temel elemana z yönünde 3 parçanın eklenmesi.

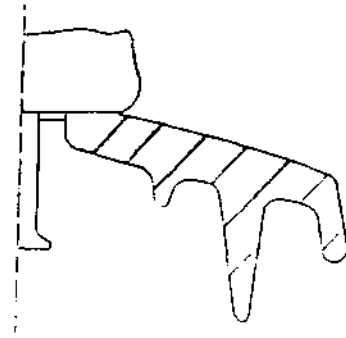
**Örnek-3:** Üç boyutlu yüzey elemanları ile ayrıştırmaya ait bir örnek de izolatördür. Yüksek gerilim izolatörleri yüzeyinde çevre etkileri ile oluşan kir tabakası, sık sık anza'ara neden olmaktadır. Yüzey üzerindeki düzensiz kir dağılımı ve sürekli değişen atmosferik şartlar arıza oluşumunun teorik incelemesini ve ark'a seri kir direnci hesabını zorlaştırmaktadır. Uzun yıllardan beri araştırmacıların üzerinde çalıştığı bu konu, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) ile de incelenmeye alınmıştır.

Ele alınan BSFT 9336 tipi zincir izolatör elemanının (Şekil.7) yüzeyinde toplanacak kir tabakasına ilişkin hesaplamaların yapılabilmesini sağlamak amacıyla bu ayrıştırma gerçekleştirilmiştir. Programa başlangıç bilgisinin verilmesi oldukça kolaydır, izolatör, aksenal simetriye sahip olduğundan, sadece sızma aralığı boyunca bir çizgi halinde noktaların koordinatları belirlenir. Program, istenilen açı miktarınca şeritler oluşturarak 360°'lik tüm bölge için bölmelemeyi yapar.

Oluşturulan her yeni eleman için ortam özellikleri de belirlenir. Sonuçta elde edilen veriler, Sonlu Eleman analiz programı tarafından kullanılmak üzere bir kütüğe kaydedilir. Sonuç verileri; toplam düğüm ve eleman sayıları ile düğümlerin x, y, z koordinatları,

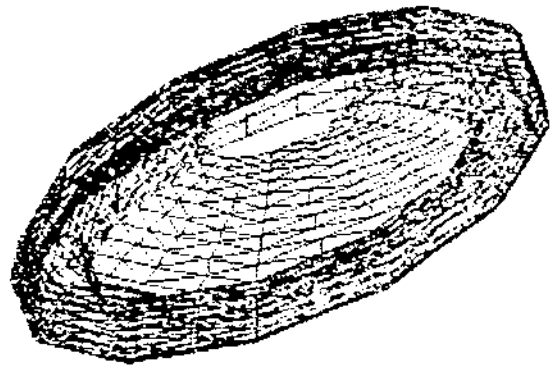
elemanları belirleyen düğüm numaraları ve elemanların ortam katsayılarıdır.

Programda, dönele simetrik problemler için sağlanan bir kolaylık da istenildiğinde üç boyutlu gerçek yapıdan, iki boyutlu açık modele (AR modeline) geçilebilmesidir. Bunun için başlangıçta verilen kesitin sınırı üzerinde oluşan tüm noktalar dikkate alınarak dairesel uzunluklar (çap uzunluğu) hesaplanır. Sızma aralığı boyu yatay eksen, dairesel uzunluklar da düşey eksen üzerinde gösterildiğinde iki boyutlu açık model elde edilmiş olur.

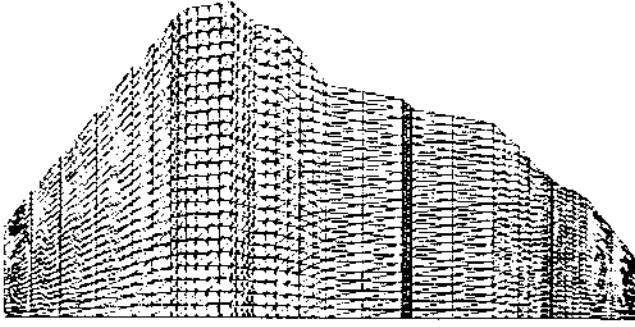


Şekil:7 BSFT 9336 izolatör yarı elemanı.

Şekil.8 'de, 30°'lik şeritlerle ayrıştırılmış olan izolatör görülmektedir (M=2). Şekil, üstten görünüş olarak çizilmiştir. Burada şeklin karışık görünmemesi için, sızma aralığının yaklaşık 3/5 'i kadar olan kısmın bölmelemesi yapılmıştır. Şekil.9 'da ise 30°'lik şeritlerle ayrıştırılmış olan izolatörün AR modeli verilmiştir.



Şekil:8 M=2 için izolatörde yüzeysel ağ oluşturma



Şekil:9 M=2 için izolatörün elemanlara ayrıştırılmış AR modeli.

#### 4. SONUÇ

AR Modeli, yüksek gerilim izolatörlerinde ark 'a seri kir direncindeki değişmelerin hesabını sağlayan izolatör açık modelidir.

Model üzerinden ölçme sonuçları da elde edilebildiğinden hesap ve ölçme sonuçlarının karşılaşt. İma üstünlüğü mevcuttur. Bu nedenle herhangi bir tip izolatöre ait açık modelin elde edilmesi önem taşımaktadır. Bu çalışmada hazırlanan program yardımıyla, izolatörün açık modeli kolaylıkla elde edilebilmekte ve aynı zamanda Sonlu Eleman analizi için gerekli tüm veriler üretilebilmektedir.

#### 5. KAYNAKLAR

- 1-CEBECİ, M., (1992), Zincir İzolatörlerde Elektrik Alan Dağılımının incelenmesi, Doktora Tezi, Elazığ.
- 2-RAO, S.S., (1989), The Finite Element Method in Engineering, Second Edition, Pergamon Press,U.K.
- 3-AYDOĞMUŞ, Z., (1994), Sonlu Eleman Programları için iki ve Üç Boyutlu Otomatik Veri Üretimi ve Elektrik Alan Problemlerine Uygulanması, Y.Lisans Tezi, Elazığ.
- 4- GHASSEMI, F., (1982), Automatic Mesh Generation Scheme for a Two or Three-Dimensional Triangular Curved Surface, Computers and Structures, 15 (6): 613-626.

# SINIR ELEMANLARI YÖNTEMİ İLE İKİ BOYUTLU POTANSİYEL DAĞILIMININ HESAPLANMASI

Selçuk YILDIRIM\*, Mehmet CEBECİ"

\*Fırat Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi, Elektrik Eğitimi Bölümü

\*\*Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Bölümü  
23279 - ELAZIĞ

## ABSTRACT

*In this paper, the Boundary Element Method (BEM) is used to calculate two dimensional potential distribution.*

*The BEM has been successfully applied to variety of problems in engineering. The BEM is based on well established theoretical foundations, such as boundary integral equations, fundamental solutions of partial differential equations and weighted residual methods. The BEM has the advantage over other commonly used numerical methods that they do not require values of the unknowns at points within the solution domain to be computed.*

*Using weighted residual method, the partial differential equations can then be made equivalent to integral equations. After considering the fundamental solutions, which satisfy the same operators as the differential equations and are solved by applying Dirac delta - function.*

*After expressing the variables by means of interpolation functions and discretizing the integral equations, can calculate all the boundary integrals as summations of the values on all boundary elements.*

*As an example, the potential and flux distributions of a coaxial cable has been examined by using the BEM.*

## 1. GİRİŞ

Sayısal analiz yöntemlerinin mühendislik problemlerinin çözümünde çok önemli bir yeri olduğu bilinmektedir. Son yıllara kadar mühendislik analizlerinde genellikle sonlu farklar ve sonlu elemanlar gibi sayısal yöntemler kullanılmıştır. Bu yöntemlerde, problem bölgesi bir takım elemanlar ile bölmeledikten sonra, sınır şartlarını kısmen ya da tamamen sağlayan yaklaşık fonksiyonlarla çözüm yapılmaktadır. Bu yöntemlere ve bölgede uygulanan diğer tekniklere bölgesel yöntemler adı verilir.

Diğer bir yöntem de, sınır şartlarını sağlayan yaklaşık fonksiyonlar yerine, diferansiyel denklemi bölgede sağlayan yaklaşık fonksiyonlar kullanmaktır. Bu yöntemde de, sınır elemanları yöntemi adı verilir ve bölgesel yöntemlere göre daha üstün özellikler gösterir. İM

Sınır elemanları yönteminde problem bölgesinin sınırları, sınır elemanları ile ayrıştırılır ve elemanlar üzerindeki bilinmeyenlerden oluşan lineer bir denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sistemi çözülerek sınır değerleri bulunur. Daha sonra bu sınır değerleri kullanılarak istenen iç noktalardaki değerler hesaplanır. Sınır elemanları yöntemi ile uzayda herhangi bir noktadaki bütün alan değişkenleri doğru bir şekilde elde edilebilir. Aynı zamanda integrasyon işleminin basit olması sebebiyle sonuçların doğruluğu daha fazladır. Ayrıca, sadece sınırın bölmelemesi nedeniyle daha az denkleme ihtiyaç duyulur ve



problem verileri önemli ölçüde azalır. Diğer önemli bir özellik, üç boyutlu problemlerde sonlu elemanlardaki gibi üç boyutlu elemanlar kullanmak yerine, sınırın iki boyutlu yüzey elemanları ile bölmelenmesinin yeterli oluşudur. 121

## 2. TEORİ

Bir potansiyel probleminin sınır elemanları yöntemi ile çözümünde ilk adım verilen problemin sınır integral ifadesinin elde edilmesidir.

$$\nabla^2 u = 0 \quad \text{B bölgesinde,} \quad (1)$$

ve sınır şartları;

$$u = \bar{u} \quad \text{S}_1 \text{ sınırında,} \quad (2)$$

$$q = \frac{\partial u}{\partial n} = \bar{q} \quad \text{S}_2 \text{ sınırında,} \quad (3)$$

şeklinde tanımlanan Laplace denkleminin bir sınır integral denklemi elde etmek için, bir ağırlıklı artıklar tekniği veya 2. Green özdeşliği kullanılır.

Burada B, problem bölgesini ve S toplam sınırı (  $S = S_1 + S_2$  ) gösterir (Üst çizgiler, bilinen sınır şartlarını göstermektedir). Bu problemin ağırlıklı artıklar ifadesi şu şekilde yazılır:

$$\int_B (\nabla^2 u) u^* dB = \int_{S_2} (q - \bar{q}) u^* dS + \int_{S_1} (u - \bar{u}) q^* dS \quad (4)$$

Bu denkleme iki defa kısmi integrasyon işlemi uygulandıktan sonra genel sınır integral denklemi elde edilir.

$$\int_S c, u, + \int_S J u q^* dS = \int_S J u q^* dS \quad (5)$$

Burada  $u^*$ , Laplace denkleminin temel çözümü,  $q^*$  ise bu temel çözümün normale göre türevidir.

$u^*$  temel çözümü, bir "i" noktasında bulunan yoğunlaştırılmış birim kaynak tarafından meydana getirilen alanı temsil eder. Bu kaynağın etkisi, herhangi bir sınır şartı gözönüne alınmaksızın, "i" noktasından sonsuza kadar yayılır. Bu nedenle  $u^*$ , aşağıdaki Poisson denklemini sağlar.

$$\nabla^2 u^* + A, = 0 \quad (6)$$

Bu denklemin çözümü, temel çözümü verir. Burada, A, bir Dirac delta fonksiyonudur. Bu fonksiyon  $x = x$ , noktasında sonsuza giderken, bu nokta dışındaki yerlerde sıfıra eşittir. İki boyutlu problemler için  $u^*$  temel çözümü,

$$u^* = \frac{1}{2\pi} \ln \left( \frac{1}{r} \right) \quad (7)$$

şeklinde dir. Burada r, kaynak noktaları ile alan noktaları arasındaki uzaklıktır. Bir "i" düğümüne uygulanan bu temel çözümün, diğer düğümlere olan etkileri ile sınır bilinmeyenleri hesaplanır.

İki boyutlu durumda sınırlar N parçaya bölünerek sabit, lineer ve eğrisel eleman yaklaşımı olmak üzere üç tip sınır elemanı ile bir sınır problemi çözülebilir.

Sınır elemanları yönteminde, bilinmeyen değerlerin bulunduğu noktalara "düğüm" adı verilir. Düğümler, sabit eleman durumunda elemanın orta noktasında alınır. Lineer elemanlı durumda, düğümlerin elemanların uç noktalarında olduğu kabul edilir. Eğrisel elemanlarda ise, ilave olarak bir orta nokta kabul edilir. /3/

(5) Eşitliği, sınır şartları uygulanmadan önce bir "i" kaynak noktası için,

$$\int_{S_1} c, u, + \int_{S_2} J u q^* dS = \int_{S_1} J u q^* dS \quad (8)$$

şeklinde ayrıştırılır. (Burada, "i" noktası herhangi bir sınır düğümünü, "j" ise sınır elemanlarını göstermektedir).

Elemanlar üzerindeki u ve q 'nun değişimi, şekil fonksiyonları kullanılarak tanımlanır. Sabit eleman yaklaşımında, her bir eleman üzerindeki u ve q değerleri sabit olduğu için integral dışına alınabilirler. Ancak eleman üzerindeki u ve q, lineer veya eğrisel olarak değiştiğinde, şekil fonksiyonları integral dışına çıkmaz ve bu şekilde sayısal integrasyon uygulanır.

"i" düğümünün pozisyonunun 1 'den N 'e kadar değiştiği ve temel çözümün sırasıyla her bir düğüme uygulandığı kabul edilirse, (7) 'nin her bir sınır elemanı üzerine uygulanmasından bir sonuç denklem sistemi elde edilir. Bu denklem sistemi matris şeklinde şöyle yazılır:

$$Hu = Gq \quad (9)$$

Bu eşitliğe sınır şartları uygulanarak denklem sistemi yeniden düzenlenir. Bütün bilinmeyenler sol tarafa toplanarak,

$$Ax = y \quad (10)$$

elde edilir. Bu sistemin çözümüyle istenen sınır değerleri hesaplanır. Burada x, u ve q 'nun bilinmeyen sınır değerlerinden oluşan bir vektördür, y ise, u ve q 'nun bilinen değerleri ile H veya G 'nin kolonlarının çarpılmasıyla bulunur.

Sınır değerleri bulunduktan sonra iç noktadaki potansiyel değerlerini hesaplamak mümkündür. Herhangi bir "i" iç noktasındaki potansiyel değeri

$$u_i = \int_S [qu^* dS - Juq^* dS] \quad (11)$$

formülü ile hesaplanır.

**Bilgisayar Programı:** Sınır elemanları yöntemi ile iki boyutlu potansiyel dağılımını hesaplamak için iki program geliştirilmiştir. C dilinde yazılan bu programlardan birincisinde sabit elemanlar kullanılarak, diğerinde ise lineer elemanlar kullanılarak çözüm yapılmaktadır.

Programlarda, G ve H matrislerinin katsayılarını hesaplamak için 4-noktalı Gauss integrasyonu kullanılmıştır. Ax = y denklem sisteminin çözümü için Gauss Eliminasyon Yöntemi kullanılmıştır.

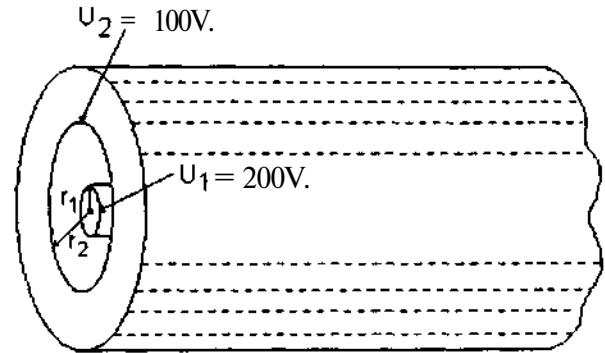
### 3. UYGULAMA

örnek olarak bir koaksiyel kablo incelenmiştir. Kablonun dörtte bir kesiti alınarak sabit eleman, lineer eleman ve analitik çözümleri yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Problemden, iç silindir yarıçapı  $r_1 = 2$  cm. ve dış silindir yarıçapı  $r_2 = 5$  cm. olarak alınmıştır.

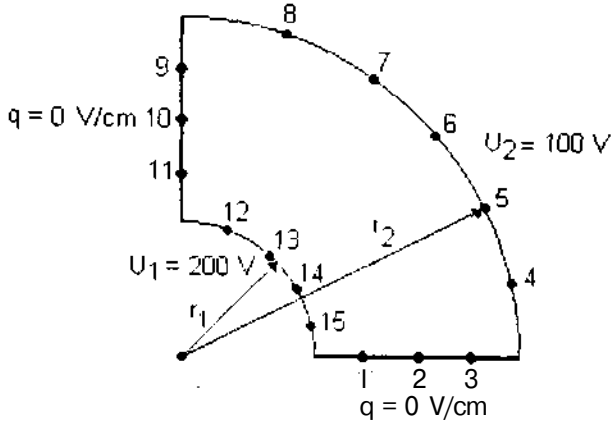
Bölmeleme için 15 sabit eleman (15 düğüm) ve 23 lineer eleman (27 düğüm) kullanılmıştır (Lineer eleman durumunda köşelerde sınır şartları değiştiği için birbirine çok yakın iki düğüm seçilmiştir). Sınır şartları ise şu şekilde verilmiştir:

$$u_1 = 200 \text{ V}, \quad u_2 = 100 \text{ V} \quad (\text{Dirichlet Sınır Şartı})$$

$$q = \frac{\partial u}{\partial n} = 0 \text{ V/cm} \quad (\text{Neumann Sınır Şartı})$$



ŞEKİL: 1 Koaksiyel Kablo



ŞEKİL: 2 Koaksiyel kablonun Vi kesiti ve sınır elemanları ile bölmelenmesi

Tablo: 1 Sınırdaki Potansiyeller

Düğüm No	Potansiyel (V)				
	Analitik Çözüm	Sabit Eleman	Hata (%)	Lineer Eleman	Hata (%)
1	175.647	175.313	0.190	175.573	0.042
2	138.925	137.935	0.712	138.629	0.213
3	111.498	109.921	1.414	111.088	0.367
9	111.498	109.921	1.414	111.088	0.367
iÜ	138.925	137.935	0.712	138.629	0.213
ii	175.647	175.313	0.190	175.573	0.042

Tablo: 2 Sınırdaki Akılar

Düğüm No	Akı (V/cm)				
	Analitik Çözüm	Sabit Eleman	Hata (%)	Lineer Eleman	Hata (%)
4	21.827	22.756	-4256	21.653	0.797
5	21.827	21.869	-0.192	21.902	-0.343
6	21.827	21.918	-0.415	21.897	-0.320
7	21.827	21.869	-0.192	21.902	-0.343
8	21.827	22.756	-4.256	21.653	0.797
12	54.567	58.039	-6.362	53.950	1.130
13	54.567	53.414	2.112	55.634	-1.955
14	54.567	53.414	2.112	55.634	-1.955
15	54.567	58.039	-6.362	53.950	1.130

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, sınır elemanları yönteminin temel prensipleri verilmiş ve bir koaksiyel kablo üzerinde uygulama yapılmıştır. Silindirik şeklindeki bu kablonun dörtte bir kesiti, sabit ve lineer sınır elemanları ile bölmelenerek sınırlar üzerindeki potansiyel ve akı değerleri hesaplanmıştır. Bulunan değerler analitik sonuçlar ile karşılaştırıldığında, az sayıda eleman için dahi doğruluk derecesinin oldukça iyi olduğu görülmektedir. Ayrıca, istenen iç noktalarda da kolaylıkla hesaplama yapılabilmektedir.

#### KAYNAKLAR

- İM C. A. Brebbia, "The Boundary Element Method for Engineers", Pentech Press, London, 1984.
- 121 C. A. Brebbia, J. C. F. Telles and L. C. Wrobel, "Boundary Element Techniques", Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, 1984.
- İZİ P. W. Partridge, C. A. Brebbia and L. C. Wrobel, "The Dual Reciprocity Boundary Element Method", Computational Mechanics Publ., London, 1992.

# ELEKTROD PROFİL ALANLARINDA TEST HÜCRESİ DUVAR ETKİSİ

Erdal BİZKEVELCİ, M.Sezai DİNÇER

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü

Gazi Üniversitesi

06570 Maltepe/ANKARA

## ABSTRACT

*In this study, electrode profiles designed by Rogowski, Bruce and Harrison have been analyzed by using finite element method. Variation of the potential and electrostatic fields for different test chamber wall distances have been observed. For each profile, the gap between electrodes is held constant and the wall distance is taken half of the gap, same as the gap and twice the gap.*

## GİRİŞ

Bu çalışmada Sonlu Elemanlar Metodu kullanılarak yüksek gerilim testlerinde kullanılan elektrod profillerinin oluşturduğu elektrik alan dağılımı, test hücresi duvar etkisi de gözönüne alınarak incelenmiştir.

Sınırlı bir hacim içerisinde düzgün dağılımlı ve izole bir elektrik alan elde etmek oldukça zordur. Teorik olarak sonsuz iki levha arasında elde edilebilen böyle düzgün bir alanı, sonlu levhalar yardımıyla elde etmeye çalışmanın en büyük zorluğu, levha kenarlarında alan homojenliğinin bozulması sonucu elektrik alan büyüklüğünün kontrol edilemez oluşudur. Elektrik alandaki bozulmayı kısmen de olsa azaltmak için silindirik simetriye sahip iki disk kullanılabilir. Böylece problem üç boyutlu uzayda açısız simetriye sahip iki diskin incelenmesine dönüşür.

Test hücresi içerisindeki yalıtkan örneğin delinme geriliminin doğru tespiti için, en büyük elektrik

alan değerinin, alanın dengeli bir biçimde dağıldığı bölge olan profillerin paralel kısımlarında oluşması ve kenarlarda herhangi bir noktada bile olsa bu değerlerin aşılması gerekir. Boyutların da minimum olacağı öyle bir elektrod profili tasarlanmalıdır ki profillere uygulanan gerilim  $V$  elektrodların paralel kısımları arasındaki mesafe  $d$  olmak üzere, düzlemsel bölgenin dışında kalan eğrisel kenarlarda elektrik alan büyüklüğü,  $E=V/d$  değerini aşmamalıdır. Bu ise ancak kenarların uygun yarıya yuvarlatılmasıyla sağlanabilir.

Elektrod profillerinde elektrik alan büyüklüğü değişim oluşumunu önemli ölçüde etkiler. Deşarj ( $E/p$ )'nin bir fonksiyonudur ve  $p$  basıncı sabit tutulduğundan elektron çığı elektrik alanın büyük olduğu bölgelere yönelir. Deşarjın elektrodların düzlemsel bölgesinde oluşabilmesi için maksimum elektrik alan değerinin yine bu düzlemsel bölgede olması beklenir. Bu nedenle elektrod profillerinin performansını karşılaştırmak için elektrik alan değerlerinin test hücresi duvar etkisi de gözönüne alınarak saptanması gerekir.

Uygun elektrod geometrisini sağlamak amacıyla Rogowski, Bruce ve Harrison elektrod profilleri tasarlamışlardır. Rogowski ve Bruce bu profillerin performansının değerlendirilmesi sırasında test hücresi duvar etkisini gözönüne almamışlardır. Bu çalışmada her uç profilin

incelenmesi yapılırken duvar etkileri de dikkate alınmış ve profil performansları karşılaştırmıştır.

Rogowski, Maxwell denklemlerinin sonlu iki levha için çözümünü yapmış ve eşpotansiyel eğrilerini çizmiştir. Daha sonra bu eşpotansiyel eğrilerinden herbirini yüzey kabul eden elektrod profilleri tasarlamıştır. Bu çalışmada, en çok kullanılan Rogowski profillerinden biri olan  $n/2$  profili dört farklı durum için incelenmiştir. Birinci durumda test hücresi duvar etkisi yok kabul edilmiştir. Daha sonra elektrodlar arası uzaklık  $d$ , elektrod kenarlarının test hücresi duvarına uzaklığı  $a$  olmak üzere  $a=d/2$ ,  $a=d$  ve  $a=2d$  durumları incelenmiştir.

Bruce ise elektrod kenarlarındaki eğriselliğin giderek artması gerektiğini düşünerek bir profil önermiştir. Bu öneriye en uygun kenar yüzeyi ise bir sinüs eğrisi olduğundan profil kenarlarına uygun pozisyonda bir sinüs eğrisi oturarak tasarımını gerçekleştirmiştir.

Düzgün elektrik alan profillerinden bir diğeri ise Harrison tarafından tasarlanmıştır. Harrison önerdiği profilin koordinatlarını vermiş ve test hücresi duvar etkisini de gözönüne alarak profil performansını sonlu farklar metodu ile incelemiştir.

Bu çalışmada geliştirilen program yardımıyla Bruce ve Harrison profilleri de yine duvar etkisiz ve duvar etkili durumlar için ayrı ayrı incelenmiştir. Duvar etkili profiller incelenirken  $a=d/2$ ,  $a=d$  ve  $a=2d$  olmak üzere üç farklı konum ele alınmıştır.

#### GELİŞTİRİLEN PROGRAM:

Geliştirilen program Sonlu Elemanlar Metodunu kullanmaktadır. Önce profil geometrisini tanımlayan noktalar girilmekte, bu değerler yardımıyla bir ağ üretilerek istenilen sayıda düğüm oluşturulmaktadır. Ağ üreten program algoritması ŞEKİL: 1'de verilmiştir. Daha sonra ise sınır koşulları (düğüm gerilimleri ve türevsel sınır koşulları cinsinden) tanımlanmaktadır. Bu veriler kullanılarak gerilim değeri bilinmeyen düğümlerin

potansiyelleri hesaplanır. Hesaplanan potansiyel değerlerinden faydalanılarak hem eşpotansiyel eğrileri çizdirilir hem de elektrik alan şiddeti hesaplanır. Böylece profil performansları elde edilmiş olur.

Profil geometrisini yapılan programa tanıtabilmek için, incelenen dörtgenel bölgenin sekiz adet nokta koordinatına gerek vardır. Nokta koordinatları silindirik koordinatlar kullanıldığı için  $r$  ve  $z$  olarak tanımlanır. Bu sekiz noktanın dördü köşe noktası, diğer dördü ise kenarların orta noktalarıdır. Nokta koordinatları, herhangi birinden başlayarak saatin tersi yönünde sırayla verilir. Bölgenin dörtgenel olması gerek ve yeter koşuldur. Eşkenar veya paralelkenar olma koşulu yoktur. Eğer bölge tek bir dörtgenel bölge ile tanımlanamıyorsa, dörtgenel alt bölgelere ayrılır ve bu alt bölgelerin bileşimi olarak tanımlanır. Her bir alt bölgenin sekiz adet nokta koordinatı verilerek bütün bölgenin geometrisi programa tanıtılmış olur. (ŞEKİL2)

Bölgenin sınırları tanımlandıktan sonra, her bir dörtgenel alt bölgenin yatay ve dikey olarak kaçta ayrılacağı ayrı ayrı belirtilir. İstenildiğinde bu bölüntüleme işlemi değişik ağırlıklarda yapılabilir. Yani yatay veya dikey bölüntüleme yapılırken istenilen dilimlerin daha geniş veya daha dar olması ağırlık katsayıları yardımıyla tanımlanabilir. Bölüntüleme bilgisi verildikten sonra ağ üretici çalıştırılır ve bölge düğüm noktaları cinsinden tanımlanmış olur. (ŞEKİL:3)

Sınır koşulları tanımlanırken gerilim değeri verilen yani zorlanmış düğümlerin potansiyel değerleri tek tek girilir. Bunlar skaler sınır koşullarıdır. Diğer bir sınır koşulu ise türevsel sınır koşuludur ve skaler koşulun tanımlanmadığı dış bölgenin sınır noktalarında sıfır kabul edilir. Böylece bu noktalarda alan değerinin yüzey

normali doğrultusunda sabit kaldığı tanımlanmış olur.

Programa veriler girildikten sonra ilgili Sonlu Elemanlar denklemleri silindirik koordinatlar için oluşturulur. Daha sonra uygun bir metodla bu doğrusal denklem takımları çözülür. Elde edilen sonuçlar, skaler sınır koşulu belirtilmeyen düğüm değerleridir.

Bütün düğümlerdeki potansiyel değerleri bilindiğinden, düğümler arası potansiyellerin doğrusal değiştiği varsayılarak geliştirilen bir altprogram yardımıyla eşpotansiyel eğrileri çizdirilir. Bu eşpotansiyellerin sıkıştığı bölgelerde elektrik alan değeri seyrek kısımlara oranla daha büyüktür. (ŞEKİL4)

Elektrik alan değeri, potansiyelin gradyenti olduğu için artık bu değerler hesaplanabilir. Silindirik koordinatlardaki gradyent ifadesi yardımıyla her bir düğüm noktasındaki elektrik alan değerine ulaşılabilir. Bu değerler yardımıyla deşarjın hangi bölgelere yönleneceği saptanabilir.

Bu çalışmada elektrodlardan birine 0 p.u. değerine 1.0 p.u. gerilim uygulandığı varsayılmıştır. Elde edilen sonuçlar yardımıyla üç profili birbiriyle daha kolay karşılaştırabilmek için bir sapma değeri tanımlanabilir. Elektrodların düzlemsel bölgesinde oluşan elektrik alan değeri  $E_0 = \dot{v}7d$ , incelenen düğümdeki hesaplanan alan değeri E ise sapma değeri  $s=(E-E_0)/E_0$  olarak tanımlanır. Sapmanın pozitif olduğu düğümlerde elektrik alan, düzlemsel bölgedekinden daha büyüktür.

Bu çalışmada her üç profilin değişik duvar uzaklıkları için bütün düğüm noktalarında sapma değerleri hesaplanarak birbirleriyle karşılaştırmıştır.

#### SONUÇLAR:

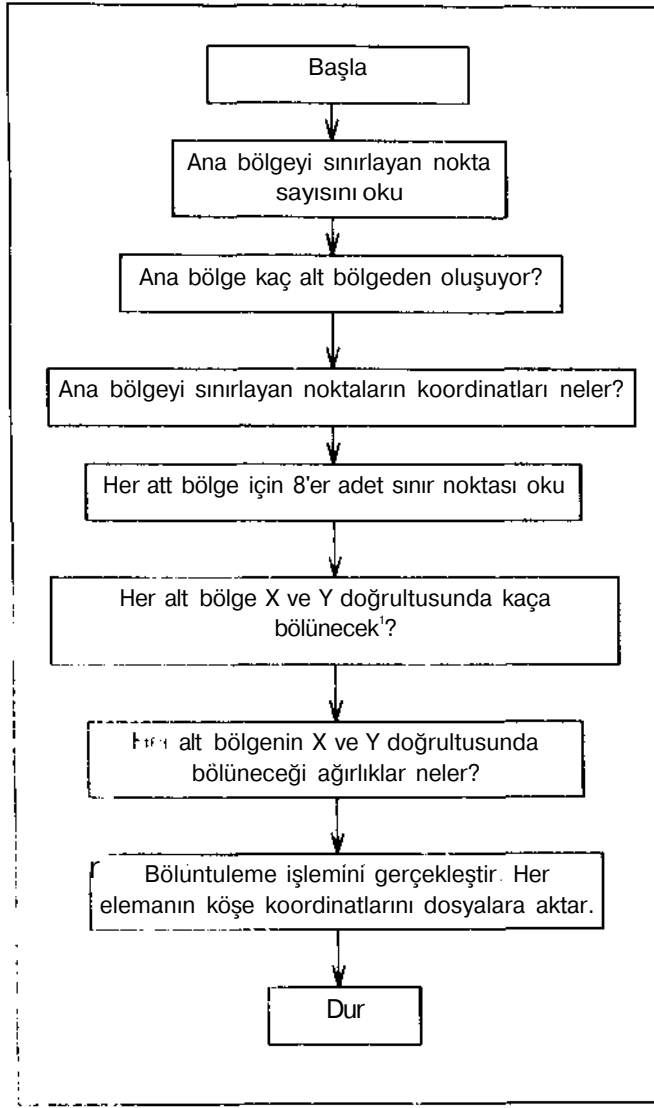
Duvar etkisiz Rogowski profilinde en büyük elektrik alan değerinin düzlemsel bölgede oluştuğu

görüldür. Elektrod kenarlarına doğru gidildikçe sapma azalır. Yatay simetri ekseninde kalan noktalarda potansiyel değeri sabit olmasına rağmen elektrik alan dışa doğru azalır. Bu profilde deşarj istenildiği gibi düzlemsel bölgeye yönelir fakat test hücresi duvar etkisi gözönüne alınmadığı için tasarım gerçekçi değildir.

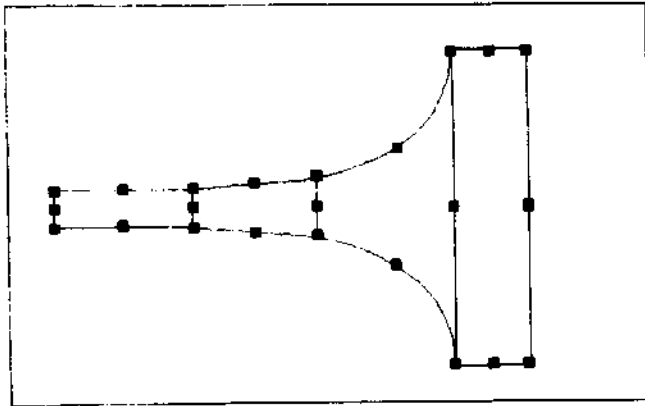
Duvar etkili Rogowski profilinin incelenmesi üç değişik duvar uzaklığı için yapılmıştır. İlk olarak incelenen  $a=2d$  profilinin kenar düğümlerinde sapma 1.2 p.u.'e kadar çıkar. Bu profilde deşarj ölçümü yapılması durumunda %10 ile %20 arası bir hata yapmak olasıdır.  $a=d$  Rogowski profilinde en büyük sapma 1.25 p.u.,  $a=2d$  Rogowski profilinde ise 1.80 p.u. olarak gerçekleşir ki her iki profilinde kullanılması durumunda sağlıklı ölçüm yapılamaz.

Duvar etkisiz Bruce profilinde eğrisel kısımlarda sapma daima negatiftir. En büyük elektrik alan değeri düzlemsel bölgede oluşur.  $a=2d$  Bruce profilinde bir iki düğüm dışında bütün noktalarda sapma negatiftir ve bu tasarım delinme gerilimlerinin ölçümleri için uygundur.  $a=d$  Bruce profilinde en büyük sapma 1.01 p u olup herhangi bir sorun çıkarmaz.  $a=d/2$  Bruce profili ise 1.9 p.u 'e varan sapma değeriyle ölçümler için uygun değildir.

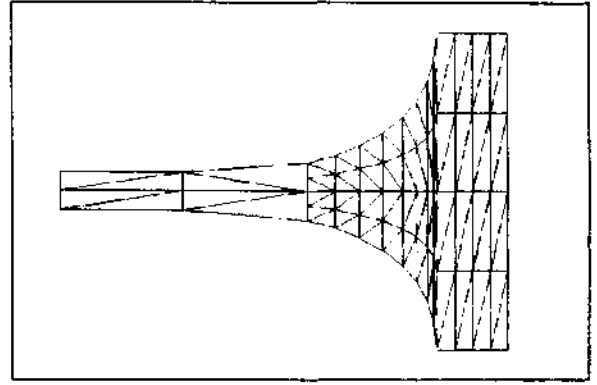
Duvar etkisiz Harrison profilinde profil kenarlarında sapma daima negatiftir. Duvar  $a=2d$  Harrison profilinde sapma hiçbir zaman pozitif olmadığı için kullanılması uygundur. Harrison profilinde 1.40 p.u. değerine  $a=d/2$  Harrison profilinde sapma 2.0 pu değerim keskinlikle kullanılmamalıdır



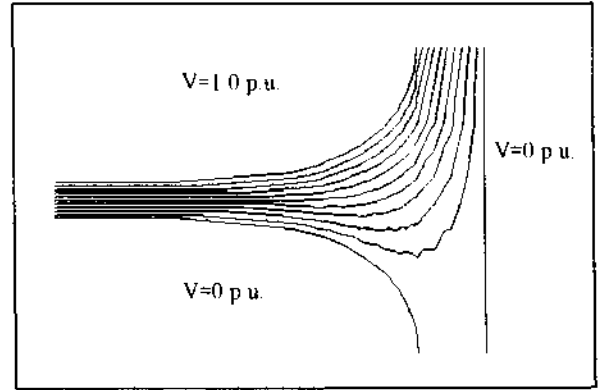
ŞEKİL 1 Otomatik ağ üreten bilgisayar programının akış diyagramı



ŞEKİL 2: Ana bölgenin alt bölgelere ayrılması



ŞEKİL 3:  $a=2d$  Bruce profili için kullanılan ağ



ŞEKİL 4: Sonlu elemanlar metodu yardımıyla  $a=2d$  Bruce profili için elde edilen eşpotansiyel eğrileri

#### REFERANSLAR:

- Bizkevelci, E., 1996, Yüksek lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bruce, F. M., 1947, Calibration of uniform field spark gaps for high voltage measurements at power frequencies. Proc. IEE 94, Part II, pp. 138.
- Harrison, J. A., 1967, Brit. J. Appl. Phys. 18, pp. 1617.
- M. Fujita, M. Yamana, IEEE Trans. On Magnetics, Vol.24, No:1, January 1988, pp.303-306
- Rao, S. S., 1982, The finite element method in engineering, Pergamon Press. John Wiley and Sons, Inc.
- Seegerind, L. J., 1984, Applied finite element analysis,

# STANDART (YILDIRIM) DARBE GERİLİMLERİNİN DIGITAL KAYDI ve ZAMAN PARAMETRELERİNİN HESABI

Cenk BULCA  
Simko Tic. ve San. A.Ş.  
Kartal/İstanbul

Özcan KALENDERLİ  
İTÜ Elektrik-Elektronik  
Fak. Elektrik Müh. Böl.  
Maslak/İstanbul

Serhan BULCA  
SGM Ltd. Co.  
Bostancı/İstanbul

## Abstract:

*This study presents a software which is developed in Microsoft Visual Basic 3.0. The software yet can calculate the peak value, the front time ( $T_1$ ) and time to half value ( $T_2$ ) of an impulse. The software is calculating time to half value ( $T_2$ ) for chopped impulses as the chopping time.*

*In the tests the impulse voltage is produced by a single stage impulse generator and measured by a digital oscilloscope. A IEEE 488 interface board built in the oscilloscope contributes to processing of the digitized data. The connection is established from the oscilloscope's 25-pin port to the computer's 9-pin comm. port. By processing the data, sent by the oscilloscope, the waveform can be plotted just as the same as seen on the oscilloscope's display.*

*For this purpose a computer equipped with a 386 processor and 4 Mbytes RAM is used. Recorded data have the size of approximately 2,5 Kbytes in the computer.*

## 1. Giriş:

Yüksek gerilim deney çalışmaları dijital kaydedici olarak dijital osiloskopların kullanımı ile bilgisayarlardan doğrudan yararlanma olanağına kavuşmuştur. Dijital kaydedicilerin en önemli özelliği analog kaydedicilerin (hafızalı analog osiloskop) aksine kaydedilen işaretleri bilgisayara aktarmaya olanak sağlaması ve bu işaretlerin bilgisayarda depolanabilir olmasıdır. Darbe şekli parametreleri hafızalı bir analog osiloskop ekranından çekilen fotoğraf yardımı ile uzun uğraşılardan sonra hesaplanabilirken, ölçme devresinde bir dijital kaydedicinin kullanılması, kaydedilen işaretin bilgisayar ortamına aktarılmasına ve bir yazılım yardımı ile otomatik olarak elde edilmesine olanak vermiştir. Deney sırasında kaydedilen darbe gerilimi işaretinin analizinden darbe gerilimi üzerindeki varsa bozucu etkilerin ne zaman başladığı, frekansı ve genliği gibi konular hakkında da bilgi elde edilebilir. Bozucu etkiler hakkındaki bu gibi bilgiler ölçme devresinde yapılması gereken düzeltmeler için de bir ipucu olmaktadır.

Çalışmanın amacı darbe gerilimi parametrelerini otomatik olarak hesaplayabilen bir yazılımla desteklenmiş dijital ölçme sisteminin kurulmasıdır. Bu amaçla darbe gerilimi üreticinin ölçme devresine veri transferine izin veren bir dijital osiloskop bağlanmıştır. Analog darbe işareti osiloskoba kompanze edilmiş bir zayıflatıcı ile on kat zayıflatılarak uygulanmıştır. Dijital osiloskoptaki sayısal işaret, osiloskop üzerindeki, veri transferine izin veren IEEE 488 elektronik kartı yardımıyla, bilgisayarın haberleşme seri bağlantı uçlarından (serial port) birine aktarabilmektedir. Dijital osiloskoptan bilgisayara aktarma işleminde uç sayıları ve bağlantı noktaları birbiriyle uyumlu RS423 tipi standart veri kablosu kullanılmıştır. Bu çalışmada Microsoft Visual Basic 3.0'da geliştirilen bilgisayar programı ile osiloskoptan alınan bilgiler değerlendirilerek bilgisayar ekranına darbe şekli çizdirilmekte ve darbe geriliminin tepe değeri, cephe ve sırt yarı değer süreleri gibi önemli parametreleri hesaplandıktan sonra ekranda yazdırılmaktadır.

## 2. Darbe Şekli Parametrelerinin Hesaplanması:

Darbe gerilimi zaman parametrelerinin hesabında tanımlarına uygun olarak aşağıdaki bağıntılardan yararlanılmıştır. Buna göre darbe geriliminin tepe değerinin %30'una ulaştığı an olan  $t_{30}$  ile %90'ına ulaştığı an olan  $t_{90}$  anlarından yararlanarak  $T_1$  cephe süresinin hesabı için  $T_1 = t_{90} - t_{30}$  olmak üzere

$$T_1 = 1,67 T \quad (1)$$

bağıntısı,  $T_2$  sırt yarı değer süresinin hesabı için

$$T_2 = t_{50} - (t_{30} - 0,5 T) \quad (2)$$

bağıntısı kullanılmıştır. (2) eşitliğinde ( $t_{30} - 0,5T$ ) anı darbe geriliminin anma başlangıç noktasına karşı düşmektedir.  $I_x$  darbe geriliminin sırtta tepe değerinin %50'sine düştüğü anı belirtmektedir.



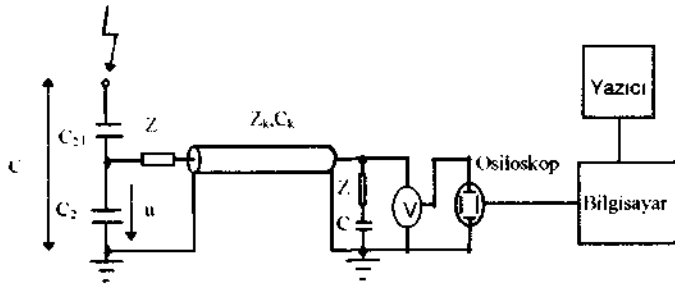
### 3. Deney:

Bir yüksek darbe geriliminin parametreleri olan cephe süresi, sırt yarı değer süresi ve tepe değerinin ölçülmesi önemlidir. Deneylerin daha hızlı yapılması ve deney sonuçlarının daha kesin olması darbe deneylerinde dijital kaydedicilerin ve bilgisayarların birlikte kullanılmasıyla sağlanabilir. Ayrıca dijital çeviriciler tarafından işlenmeye hazır hale getirilen ayrı darbe işaretinin analizi deneyi yapan kişiye devredeki olası bozucu etkiler hakkında bilgi verir. Bozucu etkiler kendini ölçülen darbe geriliminin cephesinde veya tepe bölgesinde salınımlar olarak gösterdiği için bu etkilerin ölçme devresine geçmesini engellemek ölçülecek işareti filtrelemek gibi önlemlerle aşılabilir. Bu sayede deney sonuçlarının daha az karmaşık yöntemlerle analizi sağlanır.

Bu çalışma sırasında yapılan deneylerde kullanılan ölçme sistemi (kullanılan bilgisayarda) on saniye gibi kısa bir sürede kaydedilen darbe geriliminin tepe değerini ve oluştuğu anı, cephe süresini ve sırt yarı değer süresini bilgisayar ortamında hesaplayabilmece ve darbe geriliminin şeklini çizebilmektedir. Elle yapıldığında dakikalarca sürececek bir işlemin bu kadar kısa sürede yapılması rutin deneylerde yapılacak bir otomasyonun hızına da büyük katkıda bulunacaktır. Bu da deneylerin yapımı sırasında deneyi yapan kişiye büyük bir rahatlık getirir. Ayrıca bilgisayar ortamında bulunan kayıtların deneyden sonra da her an değerlendirilmesi olanaklıdır. Osiloskopta sadece iki dalga şeklini hafızada tutmak mümkünken bilgisayarda böyle bir sınırlama yoktur.

#### 3.1. Deney Sırasında Kaydedilen Dalga Şekilleri:

Şekil 1'de deneyde kullanılan ölçme devresi görülmektedir. Programın performansını denemek amacıyla Şekil 2.4'de verilen prensip şemasına uygun tek katlı bir darbe generatörü kullanılmıştır. Darbe generatörünün besleme transformatörünün primer gerilimi kumanda masasındaki bir varyak yardımıyla



Şekil 1. Deneylerde kullanılan ölçme devresi.

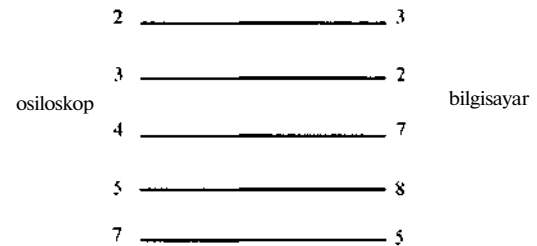
$C_{21}$ ,  $C_{22}$ : Kapasitif gerilim bölücü kondansatörleri.

$Z_k$ ,  $C_k$ : Ölçme kablosu karakteristik empedansı ve kapasitesi.

V: Dijital darbe voltmetresi

ayarlanmaktadır. Tek yönlü bir doğrultma devresi ile doğrultularak elde edilen yüksek doğru gerilim kullanılan

darbe generatörünün d darbe kondansatörünü doldurmaktadır. Generatörün kat küreleri açıklığına bağlı olarak belli bir gerilime kadar dolan  $C_j$  kondansatörü, kat küreleri arasında bir boşalma olduğu anda  $R-l$  direnci üzerinden  $C_2$  kondansatörünü yüklemektedir. Yüklü  $C_2$  kondansatörü  $R_2$  direnci üzerinden boşalarak darbe gerilimi elde edilmektedir. Elde edilen darbe geriliminin tepe değeri, kapasitif bir gerilim bölücünün ölçme ucuna bir koaksiyal kablo ile bağlanan dijital bir darbe tepe değer voltmetresi yardımıyla ölçülmektedir. Dijital osiloskobun devre bağlantısı kullanılan darbe tepe değer voltmetresinin osiloskop çıkışından yapılmıştır. Dijital osiloskopta alınan analog darbe işareti sayısal işarete dönüştürülmektedir. Dijital osiloskoptaki sayısal işaret, osiloskop üzerindeki, veri transferine izin veren IEEE 488 elektronik kartı yardımıyla, bilgisayarın haberleşme seri bağlantı uçlarından (serial port) birine aktarabilmektedir. Dijital osiloskoptan bilgisayara aktarma işleminde uç sayıları ve bağlantı noktaları birbiriyle uyumlu RS423 tipi standart veri kablosu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan veri kablosu osiloskop kullanıcı kılavuzunda verilen bağlantı bilgisinden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2).



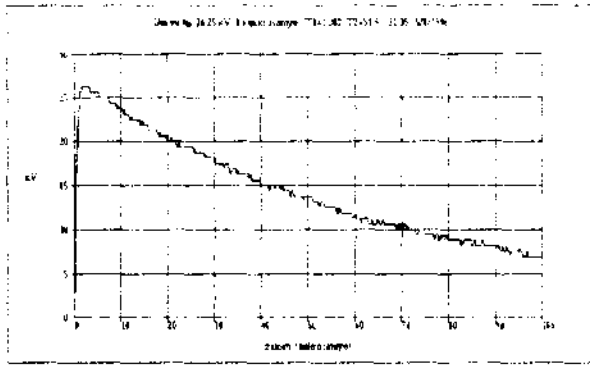
Şekil 2. Veri kablosu bağlantı şeması.

Geliştirilen bilgisayar programı osiloskoptan gönderilen veriyi bilgisayarın ikinci bağlantı ucundan (serial port 2) almaktadır. Bu çalışmada osiloskobun 25 pinli çıkış ucu (portu) bilgisayarın 9 pinli ikinci bağlantı ucuna (portuna) bağlanmıştır. Burada iki önemli nokta gözönünde bulundurulmalıdır: Birincisi kullanılan kablo uçlarının bağlantı şemasına uyması, ikincisi kablunun bilgisayarın ikinci seri bağlantı ucuna bağlı olmasıdır. Birinci özellik bağlantı uçlarının pin sayısından çok bağlantı durumunun önemli olduğunu belirtmektedir. Bilgisayar bağlantı uçlarının (portların) pin sayısı farklı bilgisayarlarda farklı olabilir, ikinci özellik geliştirilen bilgisayar programı için bu şekilde alınmıştır. İstenirse program yapısında yapılacak değişikliklerle bilgisayarın birinci seri bağlantı ucundan (serial port 1) veri akışı sağlanacak yapı elde edilebilir. Çalışmada 4 Mbyte RAM ve 386 mikroişlemciye sahip ve 9 pinli ikinci seri bağlantı ucu bulunan bir bilgisayar kullanılmıştır. Deneyde osiloskoptan

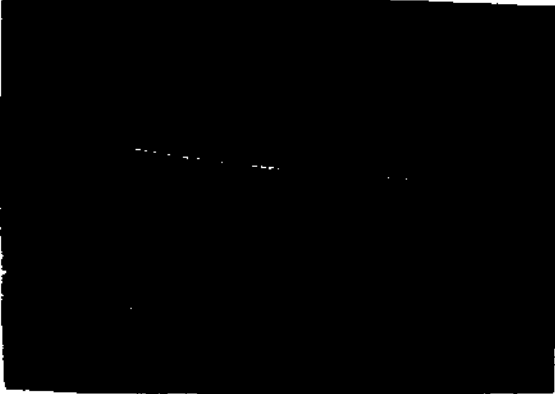
gönderilen veri bilgisayarın 9 pinli ikinci seri bağlantı ucundan alınmıştır.

Şekil 3' de üretilen standart tam darbenin tepe değeri, bilgisayarda 26,25 kV, darbe voltmetresi ile 26,4 kV ölçülmüştür. Bu iki değer arasındaki bağıl hata %0,568 olup ölçme doğruluğu bakımından bu iki değer birbirine çok yakındır. Bunun yanında program tarafından hesaplanan cephe ve sırt yarı değer süreleri de standart darbe gerilimi zaman sabitlerine çok yakın değerlerdir.

Deneyde üretilen darbenin cephe süresi olarak 1,002 (is, sırt yarı değer süresi ise 51,9  $\mu$ s olarak hesaplanmıştır. Osiloskoptan alınan bir işaret 500 eşit aralıklı noktada örneklenmektedir. Dolayısıyla darbe gerilimi gibi kısa cephe süreli bir işaretin cephe bölümüne düşen örnek sayısı sırt bölümüne düşen örnek sayısına göre çok az olmaktadır. Bu durum cephe süresinin hesaplanmasındaki hatanın başlıca kaynağıdır. Yani cephe süresi hesabının doğruluğunun cephe bölümündeki örnek sayısına bağlı olduğu açıktır. Örnek sayısı artırılarak doğruluk artırılabilir. Örnek sayısı da osiloskobun zaman kademesinin azaltılması ile artırılır.



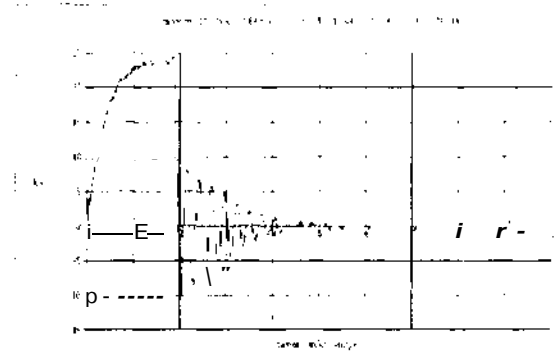
Şekil 3.a.



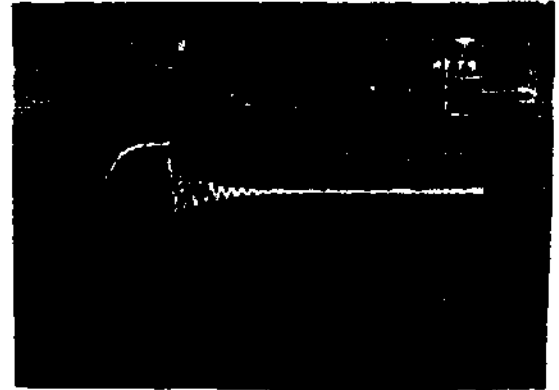
Şekil 3.b.

İkinci olarak kesik darbe şekilleri ile çalışılmıştır. Bunun için küresel elektrot sisteminin elektrot açıklığı ayarlanmış ve küreler arasında bir boşalmanın oluşması sağlanmıştır. Küre açıklığı değiştirilerek cephede ve sırtta kesik darbeler üretilmiştir. ŞekiU.a ve b'de bu tür bir darbenin osiloskop görüntüsünün fotoğrafı ve bilgisayarda elde edilen şekli ve parametreleri görülmektedir. Yapı olarak

bu iki şekil aynı karakteristiklere sahiptir. Deneyler standart darbe gerilimi ile yapılmıştır. Üretilen darbenin tepe değeri, bilgisayarda 24,375 kV, darbe voltmetresi ile 24,7 kV ölçülmüştür ve bağıl hata %1,31'dir. Cephe süresi yine elde edilen darbe şeklinden 1,269  $\mu$ s olarak hesaplanmıştır. Bunun yanında kesik darbeler için önemli bir parametre olan darbenin kesilme anı ise 1,93 us olarak hesaplanmıştır. Programda parametrelerin hesabı bakımından kesik darbe ile tam darbeyi ayırt edecek yapının bulunmaması nedeni ile darbenin kesilme anı sırt yarı değer süresi yerine yazılmaktadır. Bu da osiloskop ekranından sadece merteye olarak tahmin edilebilmektedir.



ŞekiU.a.

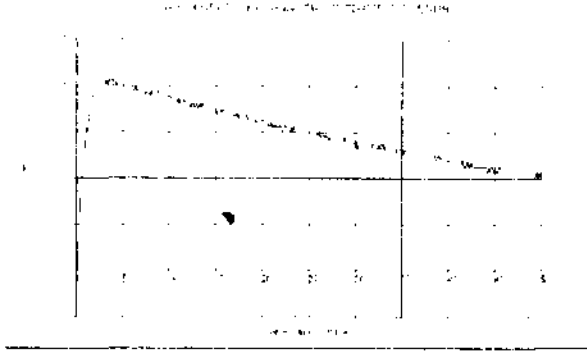


Şekil 4.b.

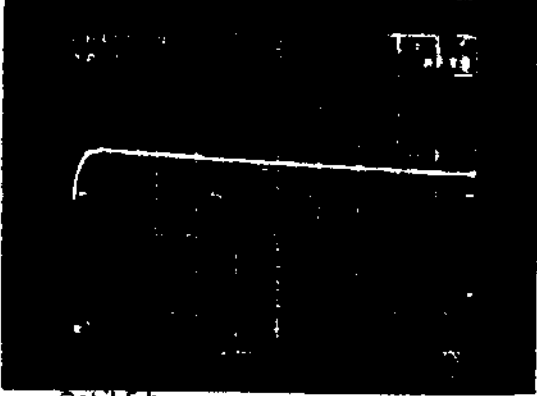
Buraya kadar darbe generatörünün ürettiği darbe standart yani 1,2/50'lik darbe gerilimi idi. Darbenin cephe süresini uzatmak için generatör çıkışındaki kondansatörü dolduran direncin değeri iki katına çıkarılmıştır. Şekil 5.a ve b'de üretilen standart olmayan darbenin osiloskoptan görüntüsünün fotoğrafı ve bilgisayardan elde edilen görüntüsü görülmektedir.

Şekil 5'den de görüleceği gibi devre elemanı iki kat büyütüldüğünde cephe süresi de yaklaşık olarak iki kat büyümüş ve 2,338  $\mu$ s olmuştur. Sırt yarı değer süresinde fazla bir değişim  $R_1 \ll R_2$  olduğu için zaten beklenmemekteydi.  $R_1=750 \Omega$  için bilgisayarın ölçtüğü sırt yarıdeğer süresi

49.25 (ıs olmuştur. Bu deneyde dijital voltmetrede görülen darbe tepe değeri ise 21,9 kV'tu.



Şekil 4.13 a.



Şekil 5 b

#### 4.Sonuç:

Deneylerden çıkan sonuçlar bu sistemin getirdiği kolaylığı açıkça göstermektedir. Geliştirilen programın hiçbir ek çalışma yapmadan dalga şekli parametrelerini büyük bir doğrulukla çıkarması bu konuda daha ileri çalışmaların yapılmasını teşvik etmektedir.

Geliştirilen programa pekçok yeni özellik eklenebilir. Örneğin programa analiz yapma, veri işleme, veri tanıma, rapor yazma ve devreyi denetleme gibi özellikler katılabilir. Analiz sonuçları bir grafiğe çizdirilip frekans ve genlik spektrumları da çıkarılabilir.

Geliştirilen program gerçek deney devresinde farklı darbe şekilleri ile denenmiş ve sonuçlar ölçme devresindeki diğer ölçme aletleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçların diğer ölçme olanakları ile elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür. Kurulan deney düzeneği ve geliştirilen bilgisayar programı ile bilgisayar destekli darbe gerilimi deneyleri yapma olanağının bulunması ile çalışma hedefine ulaşmıştır. Ulaşılan bu hedef bundan sonrasında bilgisayar programının daha da geliştirilmesi, yeni özellikler katılması (veri işleme, tanıma, analiz, rapor gibi) ve deney otomasyonuna gidilmesi gibi yeni ufuklar açmıştır.

Yüksek gerilim ölçme sistemlerinde bilgisayarların doğrudan kullanılması zaman kaybını önlediği gibi ekonomik yönden büyük tasarruf yapılmasını da sağlar. Bilgisayar ekranında çizilen darbe gerilimi şeklinin yazıcıya aktarılması, osiloskoptan darbe şekli fotoğrafını çekme zorunluluğunu ortadan kaldırmıştır. Böylece bir yüksek gerilim laboratuvarı için ek masraf olan ve zaman kaybına yol açan osiloskoptan dalga şeklinin fotoğrafını çekmek, filmini banyo etmek ve karta basmak gibi işlemler kalkmaktadır.

#### KAYNAKLAR

- [1] RYAN, H. M. High Voltage Engineering and Testing, Peter Peregrinus Ltd., London, 1994.
- [2] LOPES I. J. S., BOAVENTURA, W. C., GODINHO, R. P. Evaluation of Parameters of Digitally Recorded High Voltage Impulses: Frequency and Time Domain Approaches, Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, 4466, Graz, 1995.
- [3] MALEVSKI, R., Digital Techniques in High Voltage Testing, Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, 9004, Graz, 1995.
- [4] TS 3008, "Yüksek Gerilim Deney Yöntemleri-Bölüm:1 Genel Tanımlar ve Deney Koşulları", Şubat 1978.
- [5] ÖZKAYA, M., Yüksek Gerilim Tekniği Cilt.2, İTÜ Kütüphanesi Sayı:1367, İstanbul, 1988.
- [6] KUFFEL, E., ZAENGLE, W.S., High Voltage Engineering Fundamentals, Pergamon Press, Oxford, 1984.
- [7] KHALIFA, K., High Voltage Engineering Theory and Practice, Marcel Dekker Inc., New York, 1990.
- [8] KIND, Dieter, An Introduction to High Voltage Experimental Technique, Vieweg, 1978.
- [9] TS 3009, "Yüksek Gerilim Deney Yöntemleri-Bölüm:2 Deney Yöntemleri, Şubat 1978.
- [10] VIOLA F., RINALDI E., PESAVENTO G., High Voltage Impulse Test with Digital Measuring System in Windows, Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, 4631, Graz, 1995.
- [11] DIASC. P, VALE A. Almeida do, Digital Analysis and Processing of the High Voltage Impulse Tests Results, Seventh Mediterranean Electrotechnical Conference, 1994, Antalya.
- [12] DIAS C. P., VALE A. Almeida do, Time-Frequency Representation of the High Voltage Impulse Test Results, Ninth International Symposium on High Voltage Engineering, 4545, Graz, 1995.
- [13] Gould 400 Series Digital Storage Oscilloscopes Operators Manuel, Gould Electronics Ltd., 1991.
- [14] Gould 400 Series Digital Storage Oscilloscopes Service Manuel, Gould Electronics Ltd., 1991.

# Küre-Düzlem Elektrot Sisteminde Azotun Darbe Delinme Gerilimi

H. İSMAİLOĞLU, Ö. KALENDERLİ  
İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi  
Elektrik Mühendisliği Bölümü  
80626 - İSTANBUL

## ABSTRACT

*Breakdown strength of nitrogen (N<sub>2</sub>) under standard lightning impulse voltages at non-uniform field was experimentally investigated. The experiments were carried out with sphere-plane electrode system placed in a pressure vessel. The electrode gap spacing and the relative gas pressure were varied within the range of 5 mm to 25 mm and of 0 bar to 4 bars, respectively. At each pressure, lightning impulse breakdown voltages for both negative and positive polarities were measured.*

*Breakdown voltage of N<sub>2</sub> increases either with an increasing gap spacing or with an increasing gas pressure. Breakdown voltages of N<sub>2</sub> in used electrode system under positive impulses, were higher than those of under negative impulses at small gap spacing; but much lower at greater gap spacing. In the experiments, breakdown voltages of sphere-plane with protrusion electrode system were found to be higher than those of sphere-plane electrode system under both polarities.*

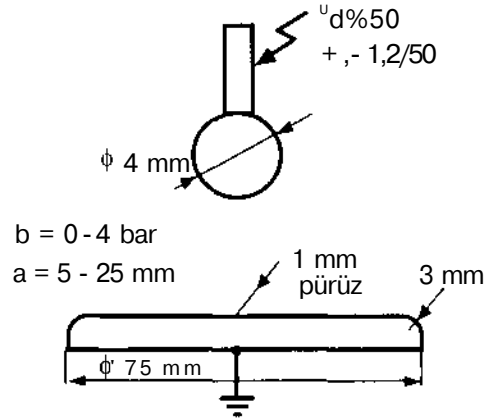
## GİRİŞ

Yüksek gerilim sistemlerinde gazlar farklı ölçülerde de olsa yalıtım işlevine katılmakta veya ana yalıtkan olarak kullanılmaktadır. Sistemlerin işletimi ve güvenilirliği bakımından gazların elektriksel delinme gerilimlerinin ve delinme dayanımlarının bilinmesi önemlidir. Gazların delinme dayanımları normal koşullarda katı ve sıvı yalıtkanlara göre daha düşüktür. Bu nedenle yalıtımında gazların bulunduğu sistemlerde daha dikkatli davranılmasını gerektirmektedir. Bu nedenle, düzgün ve düzgün olmayan alanlarda çeşitli elektrot sistemleri için hava, azot, kükürthekezaförür veya bu gibi gazların veya bunların ikili veya üçlü karışımından oluşan ve yüksek gerilim sistemlerinde yalıtım amacıyla kullanılan gazların alternatif, doğru ve darbe gerilimlerinde delinme gerilimlerinin ve delinme dayanımlarının elektrot biçimi, elektrot boyutları, elektrot açıklığı, elektrot yüzey durumu, elektrot malzemesi, gaz basıncı, gaz sıcaklığı ve nemi gibi değişkenlere bağlı olarak değişimleri çok uzun zamandan beri incelenmektedir [1-9]. Amaç yalıtkanların farklı koşullardaki davranışlarını incelemek ve olumlu ve olumsuz yanlarını ortaya koymak, davranışlarının nedenlerini araştırmak ve ona göre seçimini ve kullanımını sağlamaktır [10-13].

Sunulan bu çalışmada, yukarıda belirtilen amaç çerçevesinde, küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde, azot (N<sub>2</sub>) gibi yüksek gerilim tekniğinde yaygın kullanım alanı bulan teknolojik ve elektronegatif bir gazın yıldırım darbe geriliminde delinme gerilimlerinin, elektrot açıklığına, gaz basıncına ve gerilimin ucayına (kutbiyetine) bağlı olarak değişimleri deneysel olarak incelenmiş, kullanılan deney düzeni, deneyin yapılışı, deney sonuçları ve değerlendirmeleri açıklanmıştır.

## DENEY DÜZENİ VE DENEYİN YAPILIŞI

Çalışmada, uygulamada pekçok durumda aynen veya benzer olarak karşılaşılan bir elektrot sistemi olması ve düzgün olmayan elektriksel alan dağılımına sahip bulunması ve boşalma olayları bakımından daha kritik davranışlar göstermesi nedeniyle küre-düzlem elektrot sistemi kullanılmıştır (Şekil 1).



Şekil 1. Elektrot sistemi.

Kullanılan elektrot sistemi, 4 mm çapında küre elektrot ile 3 mm'lik kenar eğrilik yarıçapına sahip 15 mm kalınlığında ve 75 mm çapında disk biçimi düzlem elektrottan oluşan bir elektrot sistemidir. Çalışmada azotun delinme dayanımına elektrot yüzey pürüzünün varlığının etkisini incelemek amacıyla ikinci bir düzlem elektrot daha kullanılmıştır. İkinci düzlem elektrot birincisi ile aynı boyutlardadır. Bu elektrodun üst yüzeyinin ortasına yapay olarak 1 mm yarıçaplı yarıkürensel iletken pürüz oluşturulmuştur. Deneyler küre-düzlem ve küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemlerinde ayrı ayrı gerçekleştirilmiştir. Söz konusu elektrot sistemi, 6 bar'lık saydam pleksiglas gövdeli özel bir basınç kabı içine yerleştirilerek yapılmıştır.

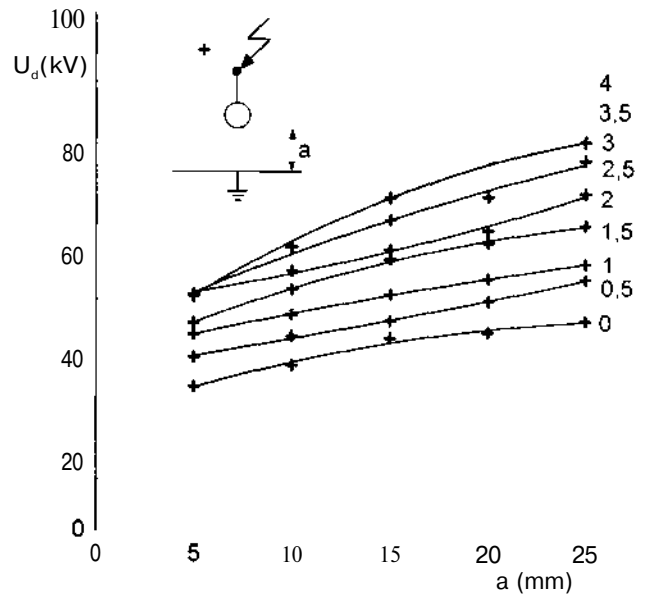
Deneylerde elektrot sisteminin küresel elektrodu gerilim kaynağına bağlanmış, düzlem elektrot ise topraklanmıştır.

Deneyler, elektrot sistemine pozitif ve negatif ucaylı standart yıldırım darbe gerilimleri uygulanarak yapılmıştır. Bu gerilim türü, azotun yıldırım aşırı gerilimlerine karşı davranışını ve bu davranışta aşırı gerilimin ucayının etkisini görmek amacıyla seçilmiştir. Deneylerde, pozitif ve negatif ucaylı standart yıldırım darbe gerilimleri (1,2/50 (.s), 280 kV, 200 J'luk iki katlı darbe gerilimi üreticinden elde edilmiştir. Delinme gerilimlerinin tepe değerleri, darbe gerilimi üreticinin çıkışına bağlı bir kapasitif gerilim bölücü üzerinden bir dijital tepe değer voltmetresi ile ölçülmüştür. Ölçmelerde delinme gerilimi değeri olarak % 50 atlama gerilimi değeri esas alınmıştır. % 50 atlama geriliminin saptanmasında, alışılmış yöntemlerden farklı olarak, ölçülen gerilim değerlerinden yararlanılarak en küçük kareler yöntemine dayanan eğri uydurma yöntemi kullanılmıştır. Bu uygulamanın doğruluğu alışılmış yöntemlerle bulunan hesap ve deney sonuçları ile karşılaştırılarak sınanmış, bu yaklaşımın çok iyi sonuç verdiği görülmüştür.

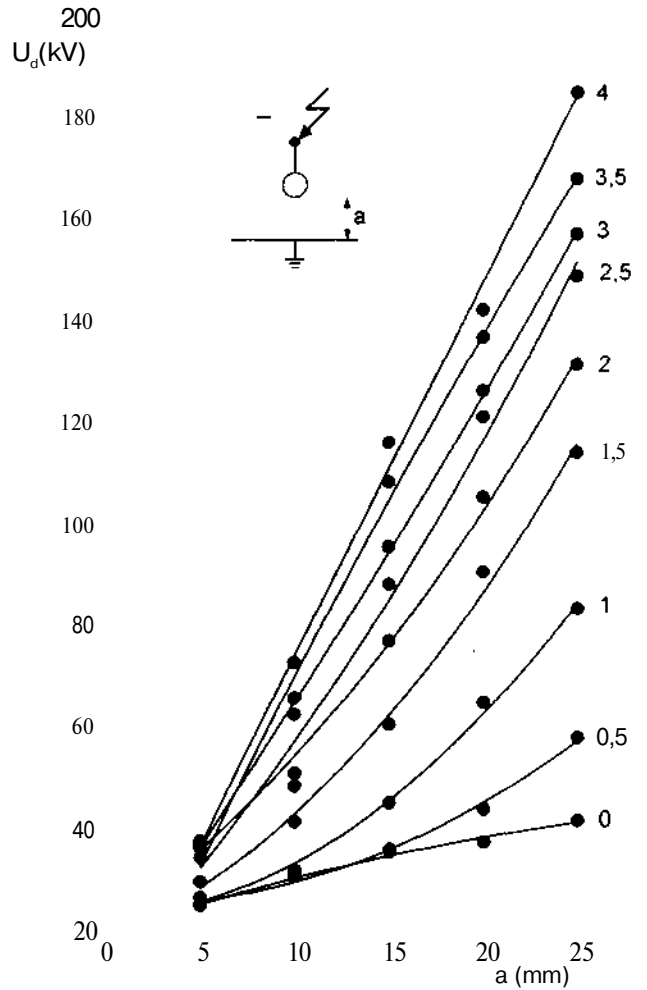
Azot için delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişiminin elde edildiği deneylerde, elektrot açıklığı 5 mm'den 25 mm'ye kadar 5 mm'lik açıklık artımları ile değiştirilmiştir. Elektrot açıklığını yüksek gaz basınçlarında da gaz sızdırma sorunu ile karşılaşmadan değiştirebilmek için basınç kabına özel bir düzenek yapılmış ve elektrot açıklığı masterlar yardımıyla  $\pm 0,001$  mm tolerans ile ayarlanabilmiştir. Çalışmada, uygulamada gazların farklı basınç koşullarında da bulunabilecekleri gözönüne alınarak basıncın delinme gerilimine etkisini incelemek amacıyla, gaz basıncı 0-4 bar arasında (normal atmosfer basıncı 0 bar alınmıştır) 0,5 bar basınç artımları ile değiştirilerek deneyler yapılmıştır. Deneylere başlamadan önce basınç kabı vakumla boşaltılıp içinde yabancı gaz kalması önlenmiş, daha sonra istenen basınca kadar azot gazı doldurulmuştur. Basınç değiştirilerek yapılan deneyler sırasında her basınç kademesinde gaz basıncının kararlı duruma gelmesine kadar beklenmiş ve daha sonra düzenli zaman aralıkları ile darbe gerilimleri uygulanmıştır.

#### DENEY SONUÇLARI

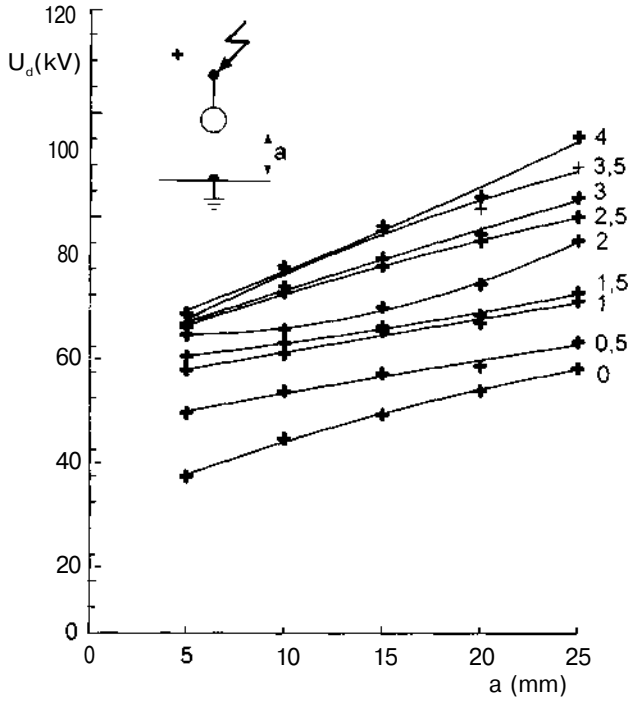
Şekil 2 ve 3'de, küre-düzlem elektrot sisteminde farklı basınçlarda azotun sırasıyla pozitif ve negatif darbeye delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimleri gösterilmiştir. Şekil 4 ve 5'te ise küre - üzerinde 1 mm yarıçaplı pürüz bulunan düzlem elektrot sisteminde, farklı basınçlarda azotun sırasıyla pozitif ve negatif darbe geriliminde delinme geriliminin elektrot açıklığı ile değişimleri verilmiştir.



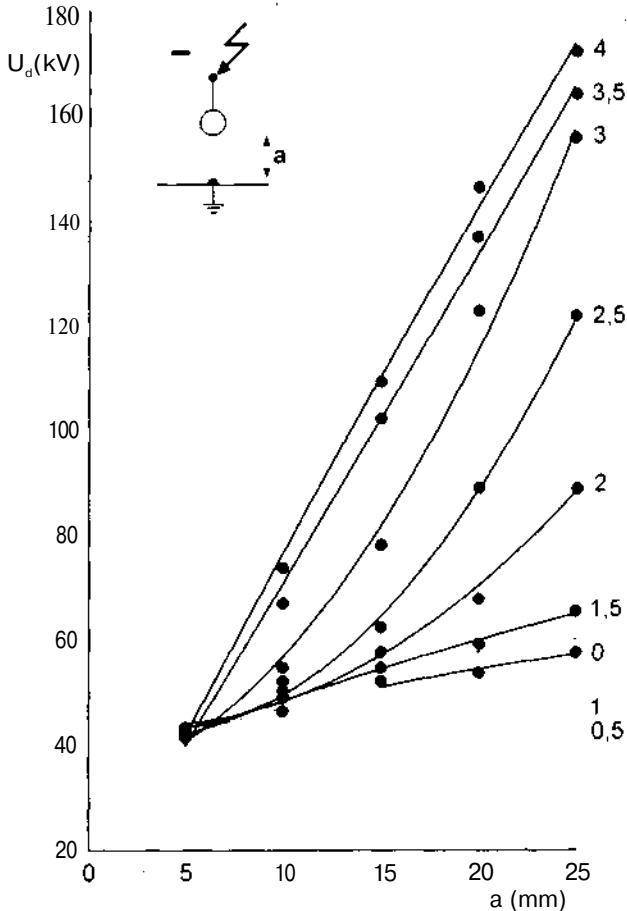
Şekil 2. Küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında azotun pozitif darbe geriliminde  $U_d=f(a)$  eğrileri.



Şekil 3. Küre-düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında azotun negatif darbe geriliminde  $U_d=f(a)$  eğrileri.



Şekil 4. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında azotun pozitif darbe geriliminde  $U_d=f(a)$  eğrileri.



Şekil 5. Küre-pürüzlü düzlem elektrot sisteminde, 0-4 bar basınç aralığında azotun negatif darbe geriliminde  $U_d=f(a)$  eğrileri.

Şekil 2'den, pozitif küre-düzlem elektrot sistemi için delinme gerilimlerinin elektrot açıklığı ve basınçla arttığı ve yaklaşık 20 mm'den sonra eğrilerde bir doyuma başladığı görülmektedir. Şekil 3'teki negatif küre-düzlem elektrot sisteminin delinme eğrileri pozitiftekine göre farklı bir değişim göstermektedir. Negatif darbedeki delinme gerilimleri genel olarak pozitif darbedekinden daha yüksektir. Ayrıca negatif darbedeki delinme eğrileri pozitiftekilere göre çok hızlı bir yükselme göstermektedir.

Küre-pürüzlü düzlem elektrot sistemi durumunda ise azotun pozitif darbe delinme gerilimleri, çalışılan basınç ve açıklıklarda; negatif darbe gerilimleri ise küçük açıklık ve basınçlarda, küre-düzlem sistemi durumundakine göre daha yüksektir. Açıklık ve basınç büyüdükçe pürüzün etkisi hemen hemen kalmamaktadır. Şekil 4 ve 5'te küre-pürüzlü düzlem sisteminde elektrot açıklığı ve basınçtaki artışla delinme gerilimlerinde sürekli yükselme gözlenmektedir.

Pozitif darbe gerilimlerinin basınçla değişimi, Medeiros ve Naidu'nun çalışmalarına [3] benzemekle birlikte; düşük basınçlarda daha büyük ve basınç büyüdükçe daha küçük bir eğim izlemektedirler. Negatif darbe gerilimleri ise söz konusu çalışma sonuçlarına göre basınçla daha hızlı bir artış göstermektedir. Pozitif darbede 25 mm elektrot açıklığında elde edilen delinme gerilimi, 0 bar basınçta, 30 mm elektrot açıklığındaki 0,4 mm yarıçaplı çubuk-düzlem elektrot sistemi için Voss tarafından verilen değerle [14] uyumludur.

Pozitif darbe geriliminde, 10 mm elektrot açıklığında, 0-4 bar basınçlarında elde edilen delinme gerilimi eğrileri, Yalızis ve arkadaşlarınınca [7], aynı elektrot açıklığı ve basınç aralığında 6,3 mm yarıçaplı çubuk-düzlem elektrot sistemi için verilen eğri ile benzer karakterdedir. Aynı gerilimler, Kuffel ve Yalızis'in, 0,8 mm yarıçaplı çubuk-düzlem elektrot sisteminde, 5, 10 ve 20 mm elektrot açıklığı için vermiş oldukları [8] delinme gerilimlerine yaklaşık eşittir. Negatif darbe geriliminde, 10 mm elektrot açıklığındaki sonuçlar da, araştırmacıların verdikleri sonuçlarla uyumludur.

Elde edilen sonuçlara bakılarak yüzey pürüzlerinin, küçük elektrot açıklıklarında alanın bozulmasına, iyonizasyona ve boşalmanın yoluna etki ederek daha düşük gerilimlerde delinme oluşmasına yol açtığı kabul edilebilir. Uzay yüklerinin etkisinin arttığı elektrot açıklıklarında boşalma yolunun, deneyler sırasında gözlemlendiği gibi, elektrotların en kısa açıklığından (orta bölgeden) yan bölgeye kayması yüzey pürüzlülüğünün etkisini azaltmakta hatta boşalma yolunun uzamasına yol açarak delinme geriliminin yükselmesine neden olmaktadır. Darbe geriliminde boşalma için gerekli elektrikli parçacıkların oluşumu ve birikimi için sürenin yeterli uzunlukta olmaması da, ucayın ve pürüzün etkisinin az olmasına yol açmaktadır [14-17].

## SONUÇLAR

Sonuç olarak çalışmada, küre-düzlem elektrot sisteminde yıldırım darbe geriliminde azotun delinme gerilimine elektrot açıklığının, gaz basıncının, gerilim ucayının ve elektrot yüzey pürüzlülüğünün etkileri deneysel olarak incelenmiş, delinme gerilimi değerleri ayrı ayrı verilmiş ve yorumlanmıştır. Bunlara göre azotun delinme geriliminin çalışılan koşullarda elektrot açıklığının ve basıncın artışı ile arttığı ve negatif darbe gerilimindeki delinme gerilimi değerlerinin pozitif darbe gerilimindeki delinme gerilimi değerlerine göre daha yüksek olduğu ve daha hızlı yükseldiği gözlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] H. İsmailoğlu, Ö. Kalenderli, M. Özkaya, İ. Gönenç, Darbe geriliminde havanın delinme dayanımı, Elektrik Mühendisliği 6. Ulusal Kongresi, Bursa, 11-17 Eylül 1995, s. 257-260.
- [2] M. Farsadi, K. Mardikyan, M. Özkaya, Düzgün ve Düzgün Olmayan Alanlarda Sıkıştırılmış N<sub>2</sub> Gazında Elektrot Pürüzlülüğünün Delinme ve Korona Başlangıç Gerilimine Etkisi, Elektrik Mühendisliği 3. Ulusal Kongresi, İstanbul, Cilt 3/1, s.213-216.
- [3] P.T. Medeiros and S.R. Naidu, Positive and Negative Lightning Impulse Breakdown of Rod-Plane Gaps in Nitrogen, Conf. on Electr. Insul. and Dielectric Phenomena, PA, 83CH1902-6, Oct. 16-20, 1983, pp.48-53.
- [4] Z. Li, R. Kuffel and E. Kuffel, Volt-time Characteristics in Air, SF<sub>6</sub>/Air Mixture and N<sub>2</sub> for Coaxial Cylinder and Rod-sphere Gaps, IEEE Trans. on Electr. Insul. Vol.EI-21, No.2, pp.151-55, 1986.
- [5] T. Shimazaki, Flashover Characteristics and Surface Processes under Negative Impulse Voltage in Atmospheric Air, IEEE Trans. on Electr. Insul., Vol.27, No.3, 1992, pp.488-495.
- [6] S. Berger, Onset or Breakdown Voltage Reduction by Electrode Surface Roughness in Air and SF<sub>6</sub>, IEEE Trans. on Power App. and Sys., Vol.PAS-95, No.4, 1976, pp.1073-79.
- [7] A. Yializis, N.H. Malik, A.H. Qureshi, and E. Kuffel, Impulse Breakdown and Corona Characteristics for Rod-Plane Gaps in Mixtures of SF<sub>6</sub> and Nitrogen with Less Than 1% of SF<sub>6</sub> Content, IEEE Trans. on Power App. and Sys., Vol.PAS-98, No.5, 1979, pp. 1832-1839.
- [8] E. Kuffel and A. Yializis, Impulse Breakdown of Positive and Negative Rod-Plane Gaps in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Mixtures, IEEE Trans. on Power App. and Sys., Vol.PAS-97, No.6, 1978, pp.2359-2366.
- [9] M. Honda, H. Okubo, H. Aoyagi and A. Inui, Impulse Breakdown Characteristics of Coated Electrodes in SF<sub>6</sub> Gas, IEEE, Trans. on Power Delivery, Vol.PWRD-2, No.3, 1987, pp.699-708.
- [10] L.G. Christophorou and LA. Pinnaduwage, Basic Physics of Gaseous Dielectrics, IEEE Trans. on Electrical Insul., Vol. EI-25 No.1, pp.55-74, 1990.
- [11] T. Takuma, Discharge Characteristics of Gaseous Dielectrics, IEEE Trans. on Electr. Insul. Vol.EI-21, No.6, pp.855-867, 1986.
- [12] A. Pedersen, On The Electrical Breakdown of Gaseous Dielectrics, IEEE Trans. on Electr. Insul., Vol.EI-24, No.5, pp.721-739, 1989.
- [13] A.H. Cookson and B.O. Pedersen, Analysis of The High Voltage Breakdown Results for Mixtures of SF<sub>6</sub> with CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> and Air, 3rd Int. Symp. on HV Engineering, 31.10, Milan, 28-31 August 1979.
- [14] W. Voss, Discharge Development of Non-Uniform Gaps in SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Gas Mixtures, 3rd Int. Symp. on HV Engineering, 31.13, Milan, 28-31 August 1979.
- [15] L.G. Christophorou and R.J. Van Braunt, SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> Mixtures-Basic and HV Insulation Properties, IEEE Trans. on Diel. and Electr. Insul., Vol.2, No.5, 1995, pp.952-1003.
- [16] N.H. Malik and A.H. Qureshi, A Review of Electrical Breakdown in Mixtures of SF<sub>6</sub> and Other Gases-Plane Gaps, IEEE Trans. on Electr. Insul, VolEI-14No2, 1979, pp.61-69.
- [17] N.H. Malik, A.H. Qureshi, G.D. Theophilus, Static Field Breakdown of SF<sub>6</sub>-N<sub>2</sub> Mixtures in Rod-Plane Gaps, IEEE Trans. Electrical Insul., Vol.EI-14, No.2, 1979, pp.61-69.

# Yük Benzetim Yönteminde Haikasal Yükün Kullanımı

H. YILDIRIM, Ö. KALENDERLİ  
İTÜ Elektrik-Elektronik Fakültesi  
Elektrik Mühendisliği Bölümü  
80626 - İSTANBUL

## ABSTRACT

*Charge Simulation Method (CSM) is one of the numerical methods used for the computation of electric fields in high-voltage technique. The method is based on the simulation of the actual field by using simple and basic discrete electrical charges, called simulation charges. In CSM, various simulation charges such as point, line and ring charges are used. Potential and field coefficients of ring charge are more complex than the ones of the other charge types. Hence, use of this charge in field computation by CSM is more difficult. In this paper, the potential and field coefficients of a ring charge having constant charge density is evaluated and to demonstrate the use of ring charge, an application is presented.*

## GİRİŞ

Elektrik alanlarının bilgisayar yardımıyla sayısal yöntemler kullanarak çözümü yaygın bir uygulamadır. Kullanılan çeşitli sayısal yöntemler içinde Yük Benzetim Yöntemi (YBY) diğerlerine göre üstünlükleri ve uygulama kolaylığı nedeniyle son yıllarda öne çıkmıştır. YBY'de herhangi bir yük tipinin benzetim yükü olarak kullanılabilmesi için onun potansiyel ve elektrik alan bağıntılarının bilinmesi gerekir. Noktasal, sonsuz çizgisel ve sonlu çizgisel yüklerin potansiyel ve elektrik alan bağıntıları basittir. Bu bağıntılar konuyla ilgili çoğu literatürde verilmektedir [1-4]. Ancak daha karmaşık alan problemlerini çözmek, çözüm hızını ve doğruluğunu artırmak için başka yük tiplerini de kullanmak gerekmektedir. Örneğin bu yük tiplerinden biri haikasal yüküdür.

Bu çalışmada, Yük Benzetim Yönteminde haikasal yükün potansiyel ve elektrik alan ifadelerinin elde edilmesi, birinci ve ikinci tür komple eliptik integrallerin hesaplanması açıklanarak bir örnek üzerinde haikasal yükün kullanımı gösterilmiştir.

## YÜK BENZETİM YÖNTEMİ

Yük Benzetim Yöntemi, yüksek gerilim tekniğinde elektrostatik alan hesabında yaygın olarak kullanılan sayısal yöntemlerden biridir [4]. Yüksek gerilim aygıtlarının bilgisayar destekli tasarım ve analizinde elektrostatik alan hesabında ve elektriksel boşalma olaylarındaki uzay yüklü elektrik alanların hesabında

etkin uygulamaları görülen YBY'nin ilkesi, bir elektrot sisteminde elektrot yüzeylerine dağılmış olan ve değeri bilinmeyen yüzeysel yükler yerine elektrotların içerisine benzetim yükü adı verilen belirli sayıda ve tipte ayrıık elektrik yükünün yerleştirilmesine ve böylece gerçek yüzeysel yüklerin yarattığı potansiyel ve elektrik alan dağılımının bilinen temel elektrik yükü tipleri ile modellenerek incelenmesine dayanır

YBY'de, iletkenlerin içine yerleştirilen  $n_q$  sayıda ve uygun tipte elektriksel yükün yarattığı alan gözönüne alınmakta ve bu yüklerin sayısı ve yerleri, verilen sınır koşullarının  $n_s$  sayıda sınır noktasında yeterli doğrulukla sağlanması koşuluyla belirlenmektedir. Potansiyel katsayısı kavramından yararlanılarak sınır noktalarının potansiyeli için toplama ilkesiyle

$$[p] \cdot [q] = [V] \quad (1)$$

lineer denklem sistemi yazılabilir. Burada  $[p]$  potansiyel katsayıları matrisi,  $[q]$  benzetim yükleri sütun matrisi,  $[V]$  ise iletken potansiyeline eşit sınır noktaları potansiyelleri sütun matrisidir. Benzetim yüklerinin değerleri, (1) eşitliğinden belirlenir. Yük değerleri belirlendikten sonra herhangi bir noktadaki potansiyel, bütün yüklerin söz konusu noktada oluşturdukları potansiyellerin toplanması ilkesi ile

$$V_i = \sum_{j=1}^{n_q} p_{ij} \cdot q_j \quad (2)$$

bağıntısından hesaplanır. Elektrik alanı ise çeşitli doğrultulardaki bileşenlerinin toplanmasıyla vektörel olarak hesaplanır. Örneğin silindirselsel koordinat sisteminde, eksenel simetrisinin göz önüne alındığı alan problemlerinde herhangi bir noktadaki iki boyutlu elektriksel alan

$$\begin{aligned} \vec{E}_i &= E_r \cdot \vec{i}_r + E_z \cdot \vec{i}_z \\ &= \left( \sum_{j=1}^n \frac{\partial p_{ij}}{\partial r} \cdot q_j \right) \cdot \vec{i}_r + \left( \sum_{j=1}^n \frac{\partial p_{ij}}{\partial z} \cdot q_j \right) \cdot \vec{i}_z \\ &= \left( \Gamma_{ij} \right)_r \cdot q_j + \left( \Gamma_{ij} \right)_z \cdot q_j \end{aligned} \quad (3)$$

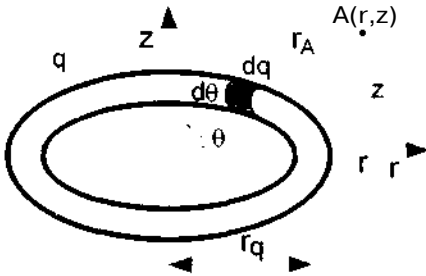
bağıntısıyla hesaplanabilir. Burada  $n=n_q=n_s$  yük sayısı;  $(f_{ij})_r$  ve  $(f_{ij})_z$  alan katsayıları;  $\vec{i}_r$ ,  $\vec{i}_z$  ise r ve z doğrultularındaki birim vektörlerdir.



## HALKASALYÜK

YBY'nin başarılı bir şekilde uygulanabilmesinde problemin geometrik yapısına uygun benzetim yükü kullanımı önemlidir. Bir yük tipini kullanabilmek için bu yükün elektrik alanı ve potansiyel bağıntılarını bilmek gerekir.

Eksenel simetrik üç boyutlu elektrik alanlarının benzetiminde bir çember üzerine eşit aralıklarla yerleştirilmiş birçok noktasal yük yerine sabit yük yoğunluklu bir tek "halkasal yük" yerleştirmek benzetimi kolaylaştırmakta ve çözüm sırasında oluşan lineer denklem sisteminin boyutunu küçülterek bilgisayarda kullanılan bellek miktarını ve hesap süresini azaltmaktadır. Halkasal yüke ilişkin bağıntıları elde etmek için Şekil 1'deki gibi  $z=0$  düzleminde bir halkasal yük göz önüne alalım. Bu yükün birim yük yoğunluğu  $X$  ile gösterilsin. Bu yükün herhangi bir noktada oluşturduğu potansiyeli bulmak için halka üzerinde alınan bir noktasal yükün o noktada oluşturduğu potansiyelin halka üzerinde çizgisel integralinin alınması gerekir [5].



Şekil 1. Halkasal yük.

$q$  toplam yüküne sahip  $r_q$  yarıçaplı sabit yük yoğunluklu bir halkasal yükün yük yoğunluğu

$$\lambda = q / 2\pi r_q \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir. Halka üzerinde alınan bir  $dq$  yükü

$$dq = \lambda \cdot r_q \cdot d\theta \quad (5)$$

olur. Problemin eksenel simetrisinden dolayı  $\theta = 0$  düzlemindeki izi alınarak problem iki boyuta indirgenir. Bu durumda  $dq$  yükünün herhangi bir  $A(r, z)$  noktasında oluşturduğu potansiyel

$$dV = \frac{dq}{4\pi\epsilon r_A} = \frac{\lambda \cdot r_q \cdot d\theta}{4\pi\epsilon} \frac{1}{\sqrt{z^2 + r^2 + r_q^2 - 2rr_q \cos\theta}}$$

dir. Bunun O'dan  $2\pi$ 'ye integrali halkasal yükün  $A$  noktasında oluşturduğu toplam potansiyeli verecektir.

$$V = \int_0^{2\pi} dV = \frac{q}{4\pi\epsilon} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \frac{d\theta}{\sqrt{z^2 + r^2 + r_q^2 - 2rr_q \cos\theta}} \quad (6)$$

Bu integralin çözümünde  $9=7t-2(3, \cos\theta = 2\sin^2(\theta/2) - 1$  ve  $d\theta = -2dp$  dönüşümleri yapılırsa

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon} \frac{1}{\sqrt{z^2 + (r+r_q)^2}} \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{dp}{\sqrt{1-k^2 \sin^2 p}} \quad (7)$$

olur. Burada

$$k^2 = (4rr_q) / a^2 \text{ ve } a = \sqrt{z^2 + (r+r_q)^2} \quad (8)$$

dir.  $V$  bağıntısında integral terimi

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} (1-k^2 \sin^2 p)^{-1/2} dp, \quad 0 < k < 1 \quad (9)$$

şeklinde birinci tür komple eliptik integraldir. Bu integralin çözümü için aşağıdaki Binom açılımı göz önüne alınarak terim terim integre edilirse

$$\left(1 - k^2 \sin^2 p\right)^{-1/2} = 1 + \frac{1}{2} k^2 \sin^2 p + \frac{3}{8} k^4 \sin^4 p + \dots$$

$$K(k) = \int_0^{\pi/2} \left[ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1 \cdot 3}{2 \cdot 4}\right)^2 k^4 + \dots \right] dp \quad (10)$$

elde edilir. Bu durumda potansiyel bağıntısı

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon} \frac{2K(k)}{a} \quad (11)$$

olur. Sıfır potansiyelli düzlemin benzetimi için Şekil 2'deki gibi merkezi  $+Z_q$  noktasında bulunan  $r_q$  yarıçaplı halkasal yükün  $r$  eksenine göre görüntüsü de gözönüne alınırsa  $A(r, z)$  noktasındaki potansiyel

$$V = \frac{q}{4\pi\epsilon} \frac{2}{a} \left[ \frac{K(k_1)}{a_1} - \frac{K(k_2)}{a_2} \right] \quad (12)$$

bağıntısıyla verilebilir. Burada

$$a_1 = \left[ (r+r_q)^2 + (z-z_q)^2 \right]^{1/2} \quad (13a)$$

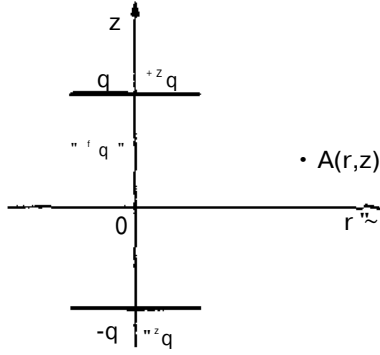
$$a_2 = \left[ (r+r_q)^2 + (z+z_q)^2 \right]^{1/2} \quad (13b)$$

dir.  $K(k)$ 'lar ise birinci tür komple eliptik integrallerdir.

(12) eşitliği  $V=p \cdot q$  şeklinde göz önüne alınarak bir halkasal yükün  $p$  potansiyel katsayısı,

$$p = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{2}{a} \left[ \frac{K(k_1)}{a_1} - \frac{K(k_2)}{a_2} \right] \quad (14)$$

şeklinde yazılabilir.  $f_1$  ve  $f_2$  alan katsayıları ise



Şekil 2. Silindriyel koordinatlarda halkasal yük.

$$E_r = -dV/dr = -(dp/dr) - q = f_r - q \quad (15a)$$

$$E_z = -dV/dz = -(dp/dz) - q = f_z - q \quad (15b)$$

eşitlikleri göz önüne alınarak

$$f_r = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{1}{r_1} \left[ r_q^2 - r^2 + (z_q - z)^2 \right] E(k_1) - \beta_1^2 K(k_1) \right. \\ \left. - \frac{1}{r_2} \left[ r_q^2 - r^2 + (z_q + z)^2 \right] E(k_2) - \beta_2^2 K(k_2) \right] \quad (16a)$$

$$f_z = -\frac{y}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{z_q - z}{r_1^2} E(k_1) + \frac{z_q + z}{r_2^2} E(k_2) \right] \quad (16b)$$

şeklinde elde edilir. Bu bağıntılarda

$$P_1 = \left[ (r - r_q)^2 + (z - z_q)^2 \right]^{1/2} \quad (17a)$$

$$P_2 = \left[ (r - r_q)^2 + (z + z_q)^2 \right]^{1/2} \quad (17b)$$

$$k_1 = \left[ \frac{2(r \cdot r_q)^{1/2}}{\alpha_1} \right] \quad (18a)$$

$$k_2 = \left[ \frac{2(r \cdot r_q)^{1/2}}{\alpha_2} \right] \quad (18b)$$

dir. E(k)'lar ise ikinci tür komple eliptik integrallerdir:

$$E(k) = \int_0^{\pi/2} \frac{1 - k^2 \sin^2 p}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 p}} dp, \quad 0 < k < 1 \quad (19)$$

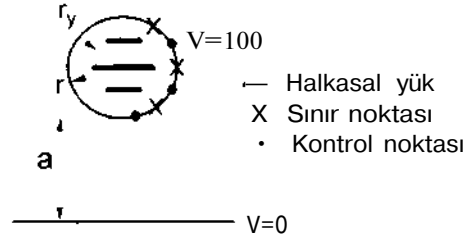
Bu integral, birinci tür komple eliptik integralin hesabındaki yöntem uygulanarak

$$E(k) = \frac{\pi}{2} \left[ 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} \right)^2 \frac{1}{3} \left( \frac{1}{2} \right)^4 \frac{1}{5} \dots \right] \quad (20)$$

şeklinde bulunur.

## UYGULAMA

YBY'de halkasal yük kullanımına bir uygulama olarak küre yarıçapı  $r=4$  cm, elektrot açıklığı  $a=6$  cm olan bir küre-düzlem elektrot sisteminin elektrik alan hesabı yapılmıştır (Şekil 2). Küre-düzlem elektrot sisteminde küre içerisine yerleştirilen halkasal yüklerin sayısının ve yarıçapının doğruluk üzerindeki etkisi incelenmiş, yeterli doğruluk elde edilince elektrotlar arası açıklıkta simetri ekseninde potansiyel ve elektrik alanın uzaklıkla değişimi elde edilmiştir.



Şekil 2 Küre-düzlem elektrot sisteminin halkasal yüklerle benzetimi.

Bu düzenin elektrik alanının YBY ile benzetiminde 3 adet halkasal yükü kullanılmıştır (Şekil 2). Benzetim yükleri küre elektrot içinde  $r_y$  yarıçaplı ( $r_y < r$ ) bir daire içine birbirine paralel olarak yerleştirilmiştir. Sınır noktaları, halkasal yüklerin uçlarından geçen ışınlar üzerinde alınmıştır. Sınır noktaları arasındaki uzaklıkların ortasında alınan kontrol noktalarında potansiyeller hesaplanarak benzetimdeki potansiyel hatası belirlenmiştir.

Yük sayısı değiştirildiğinde sınır noktalarının yerleşimi bakımından yüklerin yerleştirildiği dairenin yarıçapı ( $r_y$ ) da değiştirilmelidir. Yük yarıçapı benzetimin doğruluğunda etkin parametrelerden biridir. 3 yükü yapılan bu uygulamada  $r_y$  yük yarıçapı  $0,025 < r_y < 0,25$  r arasında değiştirilerek benzetim yapılmıştır. 3 adet halkasal yükü yapılan benzetimde en küçük potansiyel hatası  $r_y=0,21$  cm için % 0,059 olarak elde edilmiştir. Yük sayısı iki katına çıkarıldığında (6 adet halkasal yük ile) en küçük potansiyel hatası  $r_y=2,12$  cm için % 0,059 bulunmuştur.

Hesaplama ve eşpotansiyel ve alan çizgilerinin çizimi için Quick Basic 7.1 programlama dilinde bir bilgisayar programı yazılmıştır. Programda lineer denklem sisteminin çözümünde Gauss İndirgeme Yöntemi, eşpotansiyel noktaların bulunmasında ise Newton Raphson Yöntemi kullanılmıştır.

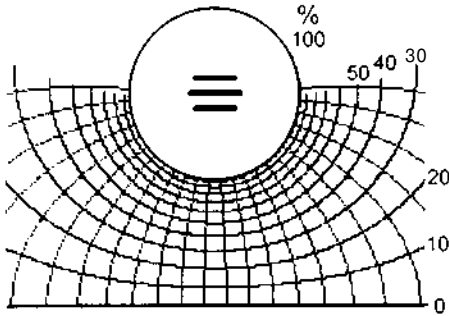
Çizelge 1'de  $r_y$  nin iki farklı değeri için elde edilen hesap sonuçları ile aynı problemin 3 adet noktasal yük kullanılarak yapılan benzetim [1] sonuçları verilmiştir. Çizelgede son satırda verilen maksimum alan şiddeti değeri, yaklaşıklık katsayısı  $k=0,88$  alınarak yaklaşık alan hesabı yöntemi ile bulunmuştur. Çizelge 1'de potansiyel hatasının en küçük olduğu durumda alan hatasının da % 0,59 mertebesinde olduğu göz önüne

alınır. İncelenen probleme ilişkin maksimum elektrik alan şiddeti değerinin 36.52 kV/cm olduğu söylenebilir. Bu değere göre diğer sonuçlara bakıldığında  $r_y = 1$  cm olan halkasal yük durumu için alan hesabında % 0,85 hata, noktasal yükün kullanıldığı benzetim için ise % 2,35 hata yapıldığı görülmektedir. Bu sonuç aynı potansiyel hatası için halkasal yükle benzetimin doğruluğunun noktasal yükle benzetimin doğruluğuna göre daha büyük olduğunu göstermektedir.

Çizelge 1 Hesap sonuçları.

Yöntem	$E_{max}$ (kV/cm)	Potansiyel hatası
YBY (halkasal yük, $r_y = 1$ cm)	36,21	% 0,126
YBY (halkasal yük, $r_y = 0,21$ cm)	36,52	% 0,059
YBY (noktasal yük) [1]	37,38	% 0,128
Yaklaşık hesap ( $k=0,88$ )	36,66	-

Şekil 3'te problemin geliştirilen bilgisayar programı ile elde edilen %10 aralıklarla eşpotansiyel çizgileri ve buna uygun elektrik alan çizgileri verilmiştir. Şekilden de görüleceği gibi alan dağılımı simetri ekseninde yoğunlaşmakta ve küre elektrodun alt ucunda elektrik alanı maksimum olmaktadır.

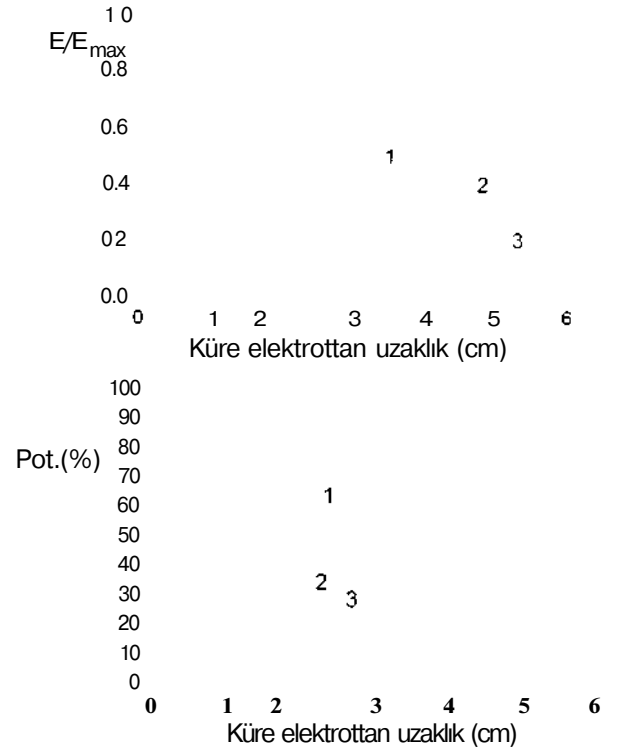


Şekil 3. Alan dağılımı.

Farklı benzetim yükü durumları için YBY ile hesaplanan, elektrotlar arası açıklıkta simetri ekseninde küre elektrodun ucundan uzaklıkla  $E/E_{max}$  ve potansiyel dağılımı eğrileri Şekil 4'te gösterilmiştir. Bu şekilden görüldüğü gibi elde edilen dağılımlar incelenen aralıkta birbirine çok yakındır.

## SONUÇ

Bu çalışmada YBY'de halkasal yükün kullanımı açıklanmıştır. Halkasal yükün potansiyel ve elektrik alan bağıntıları, noktasal ve çizgisel yük tiplerininkine göre daha karmaşık ve ileri matematik bilgisi gerektirmektedir. Bu bağıntılarda "birinci ve ikinci tür komple eliptik integraller" yer almakta ve literatürde halkasal yükün kullanıldığı çalışmalarda bu integrallerin hesabına ilişkin açıklamalara rastlanmamaktadır. Bunun yanında YBY'de halkasal yüklerin kullanımını da zordur; yüklerin yerleri, sayısı gibi her yük tipi için yapılan seçimlerin dışında yüklerin yarıçaplarının seçimine de gereksinim vardır.



Şekil 4. Elektrik alan şiddetinin (a) ve potansiyelin (b) kritik alan çizgisi üzerindeki değişimi.

1: Üç halkasal yük,  $r_y = 1$  cm; 2: Üç halkasal yük,  $r_y = 0,21$  cm; 3: Üç noktasal yük [1],

Halkasal yükün kullanımında benzetimin doğruluğu bakımından, yüklerin yarıçapını ve yerini belirleyen yerküresinin yarıçapının ( $r_y$ ) ve yük sayısının önemi büyüktür. Yük sayısı arttırıldıkça  $r_y$ 'nin de büyütülmesi gerekmektedir. Sınır noktalarının yeri bakımından ise benzetimde en yüksek doğruluk, sınır noktalarının küre merkezinden çıkan ve herbir yükün ucundan geçen radyal doğruların küre sınırını kesim noktaları olarak alınması durumunda elde edilmektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] H. Yıldırım, Ö. Kalenderli, M. Özkaya, Yüksek Gerilim Alan İncelemelerinde Yük Benzetim Yönteminin Kullanımı, Elektrik Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi (EMUK), İzmir, 1991, s.373-376.
- [2] H. Yıldırım, Ö. Kalenderli, Kablolarda Elektrostatik Alan Dağılımının Yük Benzetim Yöntemiyle Analizi, 6. EMUK, Bursa, 1995, s. 130-133
- [3] H. Yıldırım, Ö. Kalenderli, B. Turbay "A Çelikyay, Topraklama Ağlarının Bilgisayarlı Analizi, 6. EMUK, Bursa, 1995, s.261-264
- [4] H. Singer, H. Steinbigler, P. Weiss, A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields, IEEE Trans. on PAS, Vol.93, 1974, pp.1660-1667.
- [5] Ollendorf, F., Potentialfelder der Elektrotechnik, Berlin, 1932, p.100.