

KİRLENMİŞ İZOLATÖRLERİN ATLAMA DAVRANIŞLARININ ANALİTİK İNCELENMESİ İÇİN GELİŞTİRİLEN MODEL KAVRAMI

AHMET RUMELİ
CELAL KORASLI

UDK: 621.315.6:621.317.333

ÖZET

Yüksek gerilim izolatörlerinin kirli şartlar altında davranışlarının teorik ve deneysel incelenmesi, yeni geliştirilen eşdeğer modeller üzerinde yapılmış ve gerilim-kir iletkenlik eğrileri sayısal yöntemlerle bilgisayar kullanılarak üç tip yüksek gerilim izolatörü için hesaplanmıştır. Hesaplanan değerler diğer araştırmaların sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Hesap ve deney sonuçları arasında oldukça iyi bir uygunluk elde edilmiştir.

SUMMARY

A new model concept for the analytical investigation of the flashover performance of a polluted insulation is introduced. Three types of high voltage insulators are considered and their equivalent models are given. In terms of these models, flashover voltage-surface conductivity curves of these insulators are calculated by using analytical techniques and computers. The comparison of the theoretical results with the experimental results obtained by other investigators are made. Good agreement is obtained between the calculated and experimental flashover voltages.

Ahmet Rumeli, Meteoroloji Genel Müdürü
Celal Koraşlı, Asistan, ODTÜ

1. GİRİŞ

Kirli bölgelerde kullanılan yüksek gerilim izolatörleri kirlenme nedeniyle önemli miktarda arızalara sebep olmaktadır. Yüksek gerilim izolatörünün kullanılma bölgesinde göstereceği davranışının önceden bilinmesi gerektiğinden çeşitli kir sinama (test) yöntemleri geliştirilmiştir. Uygulanmakta olan kir sinama yöntemleri aşağıdaki nedenlerden ötürü eleştirilmektedir.

1. Pahalı tesisleri ve tecrübeyi gerektirmeleri,
2. Uzun zamana ihtiyaç göstermeleri,
3. Elde edilen sinama sonuçlarının herkes tarafından aynı derecede benimsenmeyişi.

Son yıllarda yapılan çalışmalar kirlenme atlama-sının mekanizmasının daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Bilgisayarlar ile hesaplama imkanlarının artması, yüksek gerilim izolatörlerinin kirli bölgelerdeki davranışlarını sayısal (nümerik) yöntemler kullanarak analitik yollarla hesaplanması fikri ortaya çıkmıştır. Dikdörtgen modeller için atlama gerilimlerinin ve akım değerlerinin hesaplanış şekli Rumeli [1,2] tarafından aşağıdaki durumlar göz önüne alınarak gösterilmiştir.

- a. Farklı izolatörlerin aynı yüzeyel iletkenlikteki kirle homojen olarak kaplandığı veya,
- b. Farklı izolatörlerin terminalleri arasında aynı ilk iletkenlik ölçülmek üzere değişik yüzeyel iletkenlikteki kirle homojen olarak kaplandığı durumlar.

Wilkins [3], Rumeli tarafından açıklanan yöntemi (a) hali için üç tip izolatöre uygulayarak atlama gerilimlerini hesaplamış, Cron [4] ve Nasser [5] tarafından ölçülen deneysel sonuçlar ile karşılaştırmıştır.

Bu araştırmada (a) hali dikkate alınarak üç tip izolatörün atlama gerilimleri yepyeni bir yaklaşımla hesaplanmış ve sonuçlar yukarıdaki araştırmacıların sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

2. ANALİTİK HESAPLAMALARDA BELİREN ZORLUKLAR ve YAPILAN KABULLER

Bir yüksek gerilim izolatörünün, kirlenme atlama geriliminin hesaplanmasında birçok zorluklar belirmektedir. İzolatörün karmaşık şeklinin sebep olduğu bu zorlukların başlıcaları şunlardır:

- a. İzolatör yüzeyindeki kir dağılımının homojen olmayışı ve kir karakteristiklerinin bilinmeyişi,
- b. İzolatör yüzeyinde tutuşan deşarjların (boşal-

6. teknik kongre

maların) sayı ve tutuşma bölgelerinin kesinlikle bilinmeyişi ve deşarj tutuşmasına kadar geçen süre içindeki kir iletkenliğindeki değişimler,

- c. İzolatör yüzeyinde deşarjların yayılımı sırasında deşarja seri kir direncindeki değişimin bilinmeyişi.

Problemin analitik çözümü için, bu zorluklar bir takım kabulleri zorunlu kılmaktadır, fakat problemin fiziksel karakteri ve bazı pratik durumlar gerektiği gibi dikkate alınmalıdır.

(a) da beliren zorluk, hesaplamalarda izolatörün homojen bir kir tabaka ile kaplandığı kabulü ile çözümlenmektedir. Bu kabul, laboratuvar testlerinde atlama gerilimlerin ölçülmesinde uygulandığından, test sonuçları için geçerli de olacaktır.

Atlama olayında deşarjın oluşturduğu nokta önemlidir. Pratik gözlemler, genellikle deşarjın izolatörün en dar bölgelerinde tutuştuğunu göstermektedir. Bir kasket-pin izolatöründe deşarj kapak ve sap civarında, bir çubuk izolatörde ise en küçük yarıçaplı bölgeden başladığının kabulü pratik koşullarının yeterince dikkate alınması demektir. Laboratuvar testlerinde, kir kaplı izolatöre gerilimin uygulanmasından önceki kir iletkenliği (soğuk) a_s , gerilim tatbikinden sonra kuru bantların ve deşarjların oluşmasına kadar değişmektedir. Deşarjların yayılmasına ve atlama olayına meydana gelmesinde deşarjların tutuştuğu andaki (sıcak) kir iletkenliği, a , etkilidir. Laboratuvar testlerinde, atlama gerilimi ile izolatöre kaplanan kir tabakasının gerilim uygulanmadan önce ölçülen (soğuk) kir iletkenliği arasında bağlantılar bulunmaktadır. Teorik hesaplamaların geçerli olması bakımından sıcak iletkenliğin (a) soğuk iletkenlik cinsinden bilinmesi gereklidir. Wilkins [3] verilen bir izolatör için, gerilim tatbikinden kuru bantın meydana gelmesine kadar geçen süre içinde kir tabakasında açığa çıkan enerji yardımıyla ortalama iletkenlik değişimini ($f = a/a_s$) veren bir bilgisayar hesaplama yöntemi vermektedir.

(c) de belirtilen ve deşarj yayılımı sırasında açığa çıkan enerjinin sebep olduğu deşarjlara seri kir bölgesi direncinin bilinmeyen değişimi, analitik hesaplamalarda önemli zorluğa tekabül etmektedir. Bu konuda yapılan kabuller ve basitleştirmeler kısım 5'de açıklanmıştır.

3. İZOLATÖRLER ve EŞDEĞER MODELLERİ

Bu çalışmada atlama gerilimleri analitik olarak üç tip izolatör (BSPT 9336, 7K3, VKL 75/14) için hesaplanmıştır. Bu izolatörlerin atlama davranışları laboratuvar ölçmeleri ile tesbit edildiğinden, hesaplama sonuçlarının bilinen deneysel sonuçlar ile karşılaştırılması mümkün olmuştur.

İzolatör Eşdeğer Modelleri

İzolatörün kompleks şekli nedeniyle atlama olayının analitik incelenmesi, izolatörün bir eşdeğer model ile temsil edilmesini zorunlu kılmıştır. Model çalışmalarında araştırmacılar deşarjın bir doğru boyunca yayıldığını kabul etmişlerdir.

A. Wilkins Modeli

Wilkins verilen bir izolatörü eşdeğer bir dikdörtgen modelle temsil etmiş ve bu temsilde

- İzolatör ve model sızma uzunlukları eşit alınmıştır (L).
- İzolatör ve modelin aynı yüzeysel iletkenlikteki kirle homojen olarak kaplandığı, izolatör ve terminalleri arasında ölçülen direnç değerlerinin eşitliği kabul edilmiştir.

Sızma boyu L olan bir izolatör yüzeysel iletkenliği σ_s olan bir kirle homojen olarak kaplandığında izolatörün terminalleri arasındaki direnç

$$R_{iz} = \frac{1}{\sigma_s} \int_0^L \frac{dl}{TTDU}$$

olur. Burada dl sızma yüzeyi boyunca alınan uzunluk elemanı ve $D(\&)$ ise dl 'e tekabül eden izolatör çapıdır (Şekil 1).

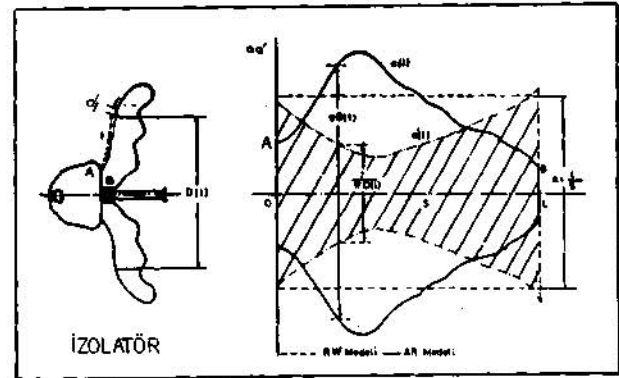
Sızma boyu L, eni a olan ve 0° yüzeysel iletkenlikli kirle homojen olarak kaplı bir dikdörtgen modelin terminalleri arasındaki kir direnci

$$R = L/a, a$$

ve her iki direncin eşitliğinden eşdeğer dikdörtgen modelin eni

$$a = L / f = 7L / \int_0^L \frac{dl}{D(L)}$$

bulunur. d_{eff} izolatörün "effektif izolatör çapı"



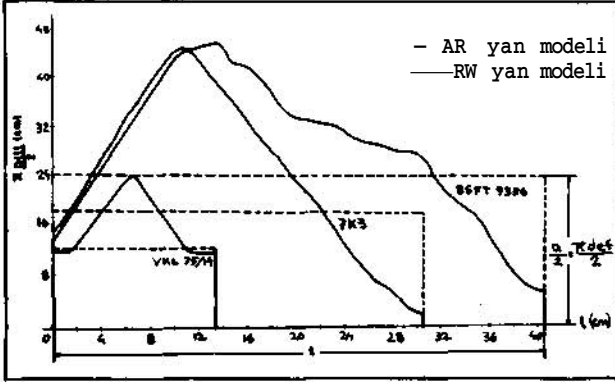
Şekil 1. R_{iz} ve AR modellerinin bulunması

6. teknik kongre

dır. Verilen bir izolatör için a, izolatörün kompleks şekli nedeniyle sayısal yöntemlerle yapılabilmektedir.

B. Rumeli Modeli

Eğer verilen bir izolatör, boyu izolatörün sızma boyuna eşit ve genişliği



Şekil 2. tfilkins ve Rumeli yarı modelleri

$$a(l) = TTD(s),$$

$$0 < l < L$$

bağıntısına göre değişen eşdeğer bir model ile temsil edilmesi halinde, atlama olayında izolatörün fiziksel şeklinin dikdörtgen modele kıyasla tihaha gerçeğe uygun bir şekilde dikkate alınabileceği düşünülebilir (Şekil 1).

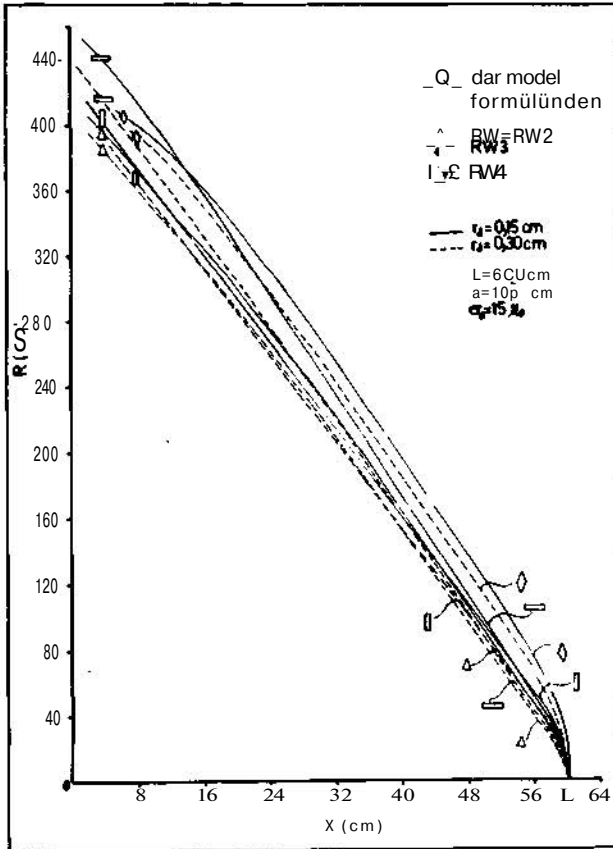
Dikkate alınan izolatörlerin VJilkins ve Rumeli Modelleri Şekil 2'de çizilmiştir.

4. ATLAMA DENKLEMİ ve KİR BÖLGESİ DİRENÇ DEĞİŞİMİ

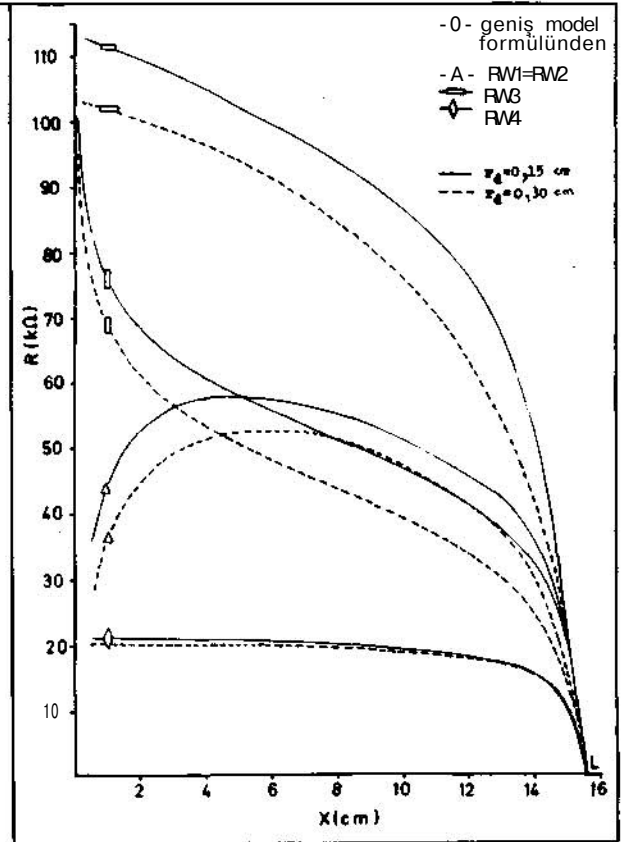
Bir izolatörde atlama olayı uygun bir model üzerinde yayılan bir deşarj ile seri değişken bir kir direnci şeklinde temsil edilebilir. Bu görüşle

$$V = xAi^{-n} + V_{C3} + iR(x,u) = f(i,x,u)$$

atlama denklemi yazılmıştır. Bu denklemde R, kir bölgesi direnci olup deşarj boyu (x) ve kir bölgesinde açığa çıkan (Q) enerji ile değişir. R direncinin (w) ile değişimi genel durumlar için hesaplamak mümkün olmadığından ihmal edilir ($3R/3UJ=0$).



Şekil 3.a) Dar modelde arka seri kir direncinin deşarj boyu ile değişimi



Şekil 3.b) Geniş modelde arka seri kir direncinin deşarj boyu ile değişimi

6. teknik kOBÖTE

R'nin (x) ile değişimi değarjın izolatör yüzeyindeki konumuna bağlıdır.

şekil 4.a,b,d, R(x) değişimlerinin bulunmasında ve atlama gerilimlerinin hesaplanmasında dikkate alınan durumları göstermektedir. şekil 4.c Wilkins tarafından gözönüne alınan durumu göstermektedir. şekil 4.a,b bir kasket-pin izolatöründe değarjın kapak ve sap civarından başlamasını ve şekil 4.c bir kasket-pin izolatöründe değarjın kapak ve sap civarında aynı anda başlamasını ve tekabül eden RW ve AR modellerindeki durumları göstermektedirler. şekil 4.a ve b'de değarja seri kir direnci değişimi farklıdır ve bu özellik RW modelinde dikkate alınmadığı halde (RW1 = RW2) AR modelinde dikkate alınabilmektedir (AR1 + AR2). Wilkins tarafından hesaplamalarında gözönüne alınan şekil 4.c hali, değarjın izolatöre şemsiye civarından başlamasına ve her iki değarj kökünün aynı hızla hareketine tekabül eder. Bu durum, problemin fiziksel yanısı ile uyuşmamaktadır ve hesaplamalarda bu durum dikkate alınmamıştır. Buna karşılık şekil 4.d pratikte rastlanan ve değarjın izolatör üzerinde kapak ve saptan aynı anda başlamasına tekabül eder.

5. R(X) DEğIşİMLERİNİN BULUNMASI

A. Wilkins Yöntemi

Wilkins, şekil 4'deki c durumu için konform tasvir metodunu kullanarak R için aşağıdaki analitik bağıntılarını bulmuştur.

Dar Model: ($\frac{a}{L} < 1$)

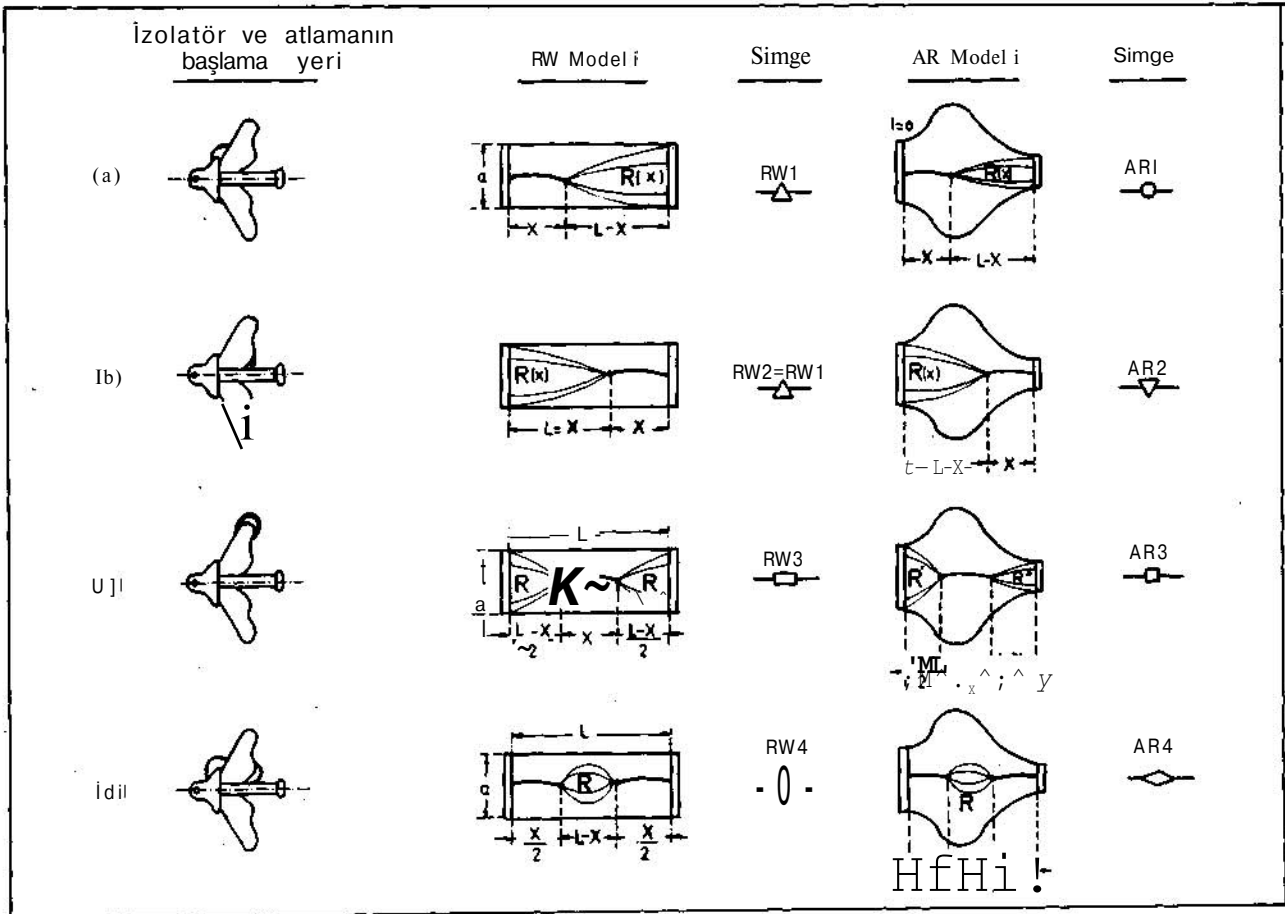
$$R = \frac{1}{2\pi\sigma_s} \left[\frac{\pi(L-X)}{a} + \ln \frac{a}{2\pi r_d} \right] = R(X,d) \quad (D)$$

Geniş Model: ($\frac{a}{L} < 3$)

$$R = \frac{1}{2\pi\sigma_s} \left[\ln \frac{2L}{\pi r_d} - \ln \operatorname{tg} \frac{\pi}{2} \frac{L-X}{L} \right] = R(X,d) \quad (2)$$

Bu bağıntılarda r_j değarj ucunun yarıçapını göstermektedir.

Wilkins tarafından dar ve geniş modeller için verilen 1 ve 2 formüllerinden hesaplanan direnç değişimleri, deneysel olarak ölçülen direnç değerleri şekil 3'de verilmektedir.



şekil 4. R(x) değişimlerinin bulunmasında göz önüne alınan durumlar

6. teknik kongre

Şekillerden görüldüğü gibi dar modelde aynı uzunluktaki bir deşarj için, deşarjın model üzerindeki değişik konumlarına tekabül eden direnç değerleri arasında fazla farklılık olmadığı halde geniş modelde bu farklılık ihmal edilemeyecek kadar büyüktür. Geniş modelde aynı bir deşarj uzunluğu için, deşarjın elektrotlardan birinden başlaması halinde seri direnç, deşarjın orta bölgeden başlaması halinde bulunan seri dirençten çok küçük kalmaktadır.

$X=L$ için (deşarjın elektrotlar arasından tutuşma hali) direnç formülleri 1 ve 2 fiziksel sıfır yerine, dar modelde

$$R(L) = \frac{1}{2\pi\sigma_s} \ln \frac{a}{2\pi r_d} > 0$$

ve geniş modelde $R(L) = -\infty$ olmaktadır. Küçük deşarj boylarında geniş direnç formülü 1,3b den görüldüğü gibi büyük değerler vermektedir ve $x = 0$ için $R(0) = \infty$ olmaktadır. Deşarj boyunun $x = (2L/TT) \text{Arctg}(2L/TT(j))$ olması halinde kir bölgesi uzunluğu sıfır olmadığı bir bölge si direnci sıfır olmaktadır.

Wilkins tarafından göz önüne alınan 7K3 ve VKL 75/14 izolatörleri için $R(x)$ değişimlerinin hesaplanmasında geniş model direnç formülü 2 kullanılmıştır. Fakat bu izolatörler için a/L değerleri ne dar model ve ne de geniş model için öngörülen a/L şartına uymaktadır.

B. Rumeli Yöntemi

Verilen bir izolatör için $R(x)$ değişimi modeller üzerinde yapılan ölçmeler yardımıyla bulunabilir. Kısım 3'de açıklandığı gibi RW ve AR modelleri hazırlanmıştır. Herbir model yüzeyi kalınlığı h ve öz iletkenliği a olan bir su tabakası ile kaplanmıştır. Model alanı bilindiğinden su kalınlığı h , yüzeye dökülen su hacminden hesaplanmıştır. $p=1/x$ ve model üzerindeki direnç ölçmeleri 1592 Hz ile ölçme yapan bir köprü ile yapılmıştır. Bilinen bir $0_s = x.h$ değerinden diğer bir 0_s oranı yardımıyla bulunmuştur.

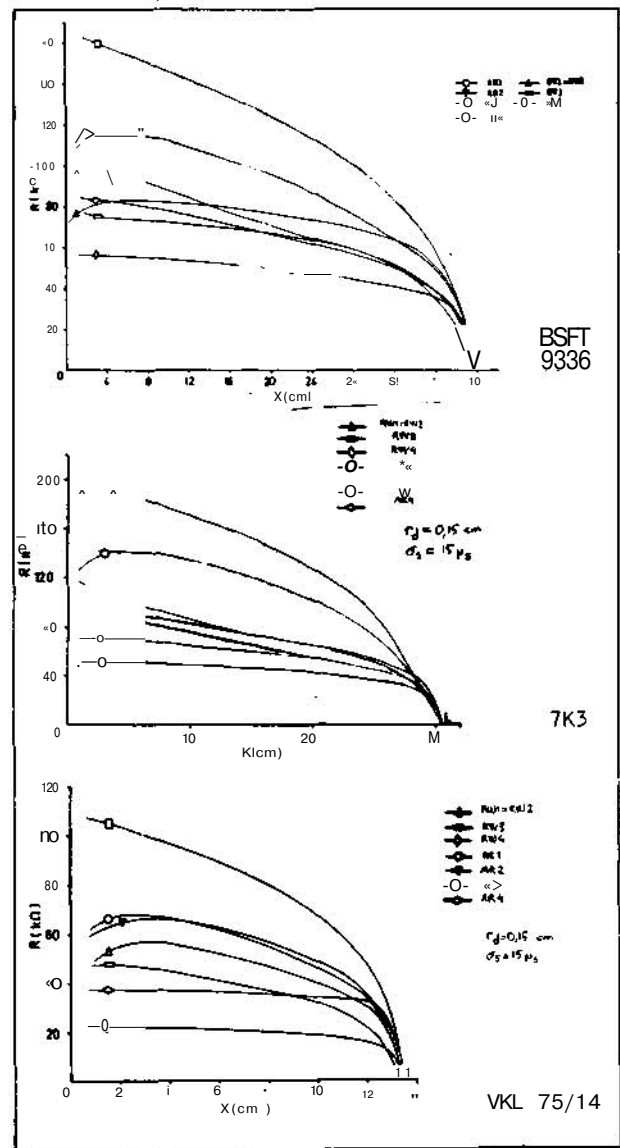
Şekil 4'de belirtilen dört durum için direnç ölçmeleri $r_d=0,15$ cm ve $\hat{a}=0,30$ cm yarıçaplı sondalar kullanılarak ölçülmüştür.

6. $R(x)$ DEĞİŞİMLERİNİN RW ve AR MODELLERİ İÇİN KARŞILAŞTIRILMASI

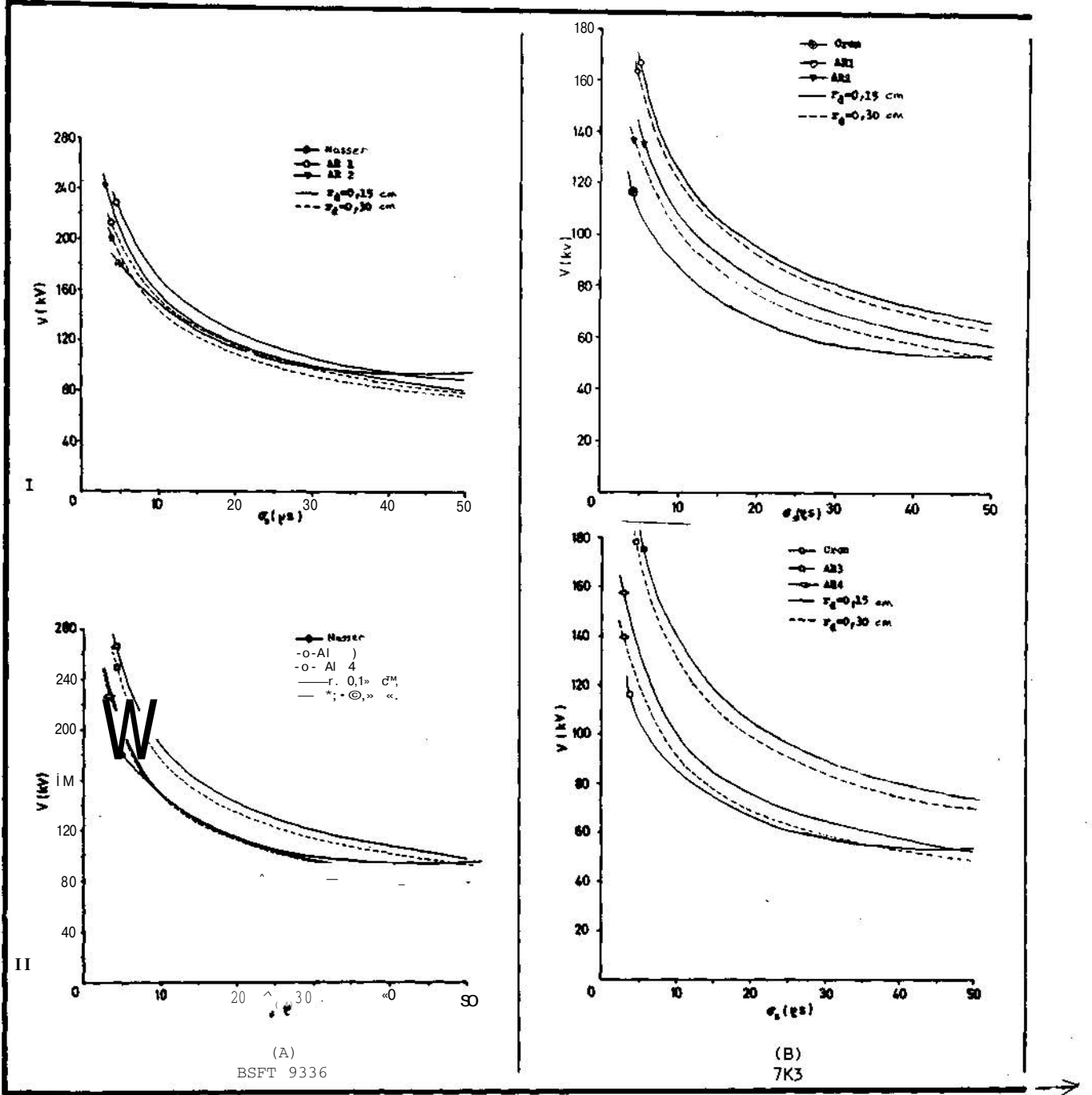
Yukarda açıklandığı gibi, BSF T 9336, 7K3 ve VKL75/14 izolatörlerinin RW ve AR modellerinden ölçülen direnç değerleri Şekil 5'de çizilmiştir. Bu eğrilerden, ölçülen direnç değerlerinden,

- $R(x)$ değişiminin, deşarjın model üzerindeki yayılma durumuna göre farklı olduğu,
- Verilen bir izolatörün RW ve AR modelleri üzerinde yapılan ölçmelerde $R(x)$ değişimlerinin aynı durumlar için değişik olduğu,
- Ölçülen direncin büyüyen sonda çapı ile azaldığı görülmektedir.

Atlama gerilimlerinin hesaplanmasında ölçmelerle bulunan $R(x)$ değerleri kullanıldığında, r^{\wedge} 'nin değişimi ancak değişik r_d lere tekabül eden $R(x)$ değişimleri için ayrı ayrı hesaplamalar yapılarak dikkate alınabilinmiştir. Bu ise $R(x)$ değişimlerinin ölçme yoluyla bulunmasında başlıca mahzuru teşkil etmektedir. Bu mahzur, AR modellerinde $R(x)$ bağıntısının konform tasvir metotları ile bulunabilmesi halinde giderilmiş olacaktır. Buna karşılık AR modelinde su kalınlığı değişik yapılarak izolatörün homojen olmayan bir kirlenme şartındaki davranışı bulunabilme olanağı vardır.



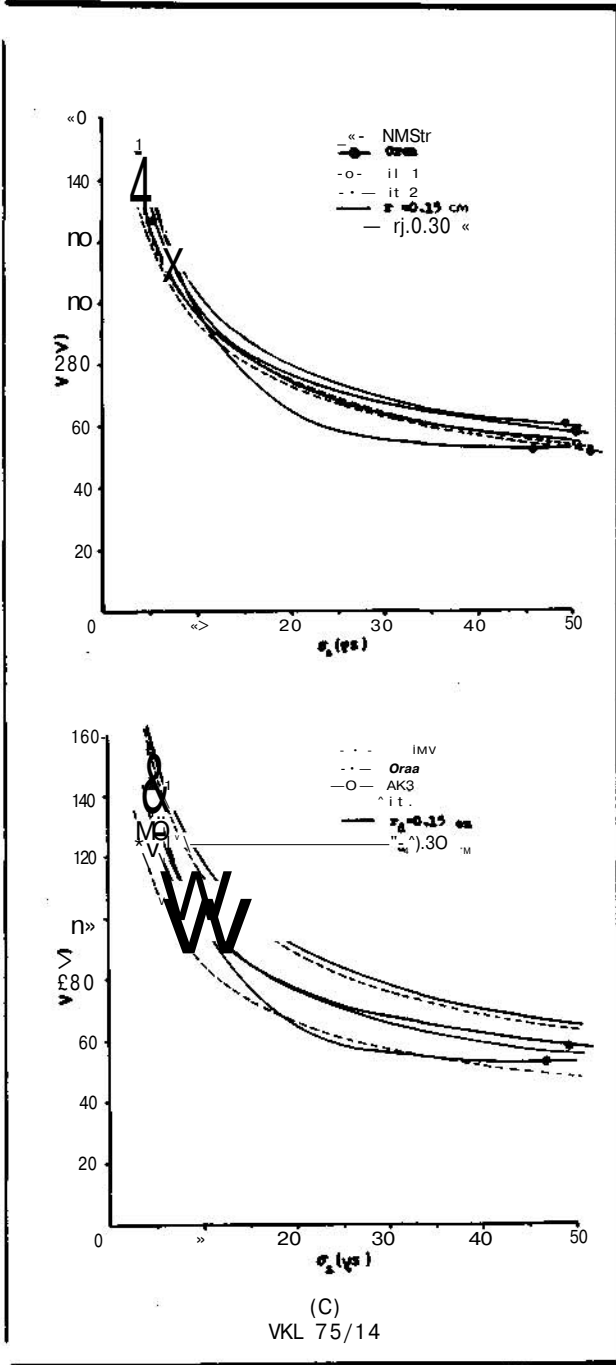
Şekil 5. İzolatörlerin eşdeğer modellerindeki $R(x)$ değişimi



7. ATLAMA GERİLİMİNİN HESAPLANMASI

Atlama gerilimleri $f_m(i_m)$ minimum noktalar eğrisinin "sınır veya limit noktası" [2] yardımıyla bulunmuştur. Verilen bir $R(x)$ değişimi için $f_m(i_m)$ bağıntısının analitik çözümü zorluk arzettiğinden, atlama (sınır veya limit) gerilimleri-

nin bulunması sayısal yöntemle ve bilgisayar kullanılarak yapılmıştır. Hesaplamalarda, gözönüne alınan izolatörlerin ısınma faktörleri için Wilkins [6] tarafından verilen değerler kullanılmış, $A=63$, $n=0,76$ ve $V_a=800$ V ortalama değeri alınmıştır. Kullanılan bilgisayar akış şeması Kaynak 7'de verilmiştir.



Şekil 6. Teorik ve deneysel atlama gerilimlerinin karşılaştırılması

Adı geçen izolatörlerin hesaplanan atlama gerilim-kı (soğuk) iletkenlik eğrileri Şekil 6'da verilmiştir. Hesaplanan değerler Cron [4] ve Nasser [5] tarafından verilen değerler ile kar-

şılaştırıldığında atlama gerilimleri arasında iyi bir uygunluk elde edilmiştir. 7K3 izolatörü için hesaplanan değerler deneysel değerlerden yüzde 15-40 kadar ve VKL75/14 için ise yüzde 20-25 kadar bir farklılık göstermektedir. Bu nedenle teorik ve deneysel sonuçlar arasında sağlanan bu uygunluk birçok faktörün etkilediği karmaşık nitelikteki atlama olayı için oldukça tatminkardır.

8. SONUÇ

Analitik hesaplamalarda bilinmesi gerekli $R(x)$ değişimi için Wilkins tarafından verilen formüller yaklaşık nitelikte olup bu formüllerden hesaplanan direnç değerleri ölçülen direnç değerlerinden oldukça farklı olmaktadır. Ayrıca bu formüller sonsuz ve negatif direnç değerleri verdiği için problemin fiziksel yanı ile çelişmektedir. Bu nedenlerle $R(x)$ 'in modeller üzerinde ölçme yoluyla bulunması tercih edilmiştir. Uç tip izolatör için AR modelinde yapılan $R(x)$ ölçmeleri yardımıyla atlama gerilimleri hesaplanmıştır. Teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmış ve tatminkâr uygunluk sağlanmıştır.

Wilkins tarafından $R(x)$ 'in bulunmasında dikdörtgen model için uygulanan konform eşleme (conformal mapping) yönteminin AR modeline tatbik edilmesi halinde bulunacak $R(x)$ analitik bağıntısı ile yukarıda sunulan analitik hesaplama yöntemi daha cazip hale gelecektir. Teklif edilen bu analitik yöntemin geçiriliğinin ortaya konulabilmesi için, davranışı bilinen çok sayıda izolatörlerle uygulanması ve sonuçların karşılaştırılması faydalı olacaktır.

KAYNAKLAR

1. Rumeli, A., "The Mechanism of Flashover of Polluted Insulation", Ph.D.Thesis, The University of Strathclyde, Glasgow, 1967
2. Rumeli, A., "Theoretical Analysis of Flashover of Contaminated Insulators with a Time-Invariant and Unevenly Distributed Contamination Resistivity", IEEE G.72, 203-3, 1972
3. Wilkins, R., "Flashover of High-Voltage Insulators With Uniform Surface-Follution Films", Proc. IEE. V.116, No.3, 1969
4. Von Cron, H., Die Kriechveglange und das Stehvermögen von Isolatoren Unter Fremdschichteinflu, ETZ-A, Bd.78, H-23, pp.866-869, 1957
5. Nasser, E., "Zum Problem des Fremdschichtüberschlagel an Isolatoren", Elektrotech.Z., 83.A, pp.356-365, 1962
6. Hilkins, R., "Mechanism of Failure of High Voltage Insulation With Surface Contamination", Ph.D.Thesis, University of Manchester, 1968
7. Korash, C., "Model Concept for Analytical Investigation of Flashover Performance of Polluted Insulators", M.S.Tezi, ODTÜ, 1973