

GUÇ SİSTEMLERİNİN TOPRAKLANMASI *

Yazan :

Ziyaretçi T. Prof. Dr. Bobert WtLKİNS

Çeviren :

Y. Prof. Dr. Ahmet RUMELİ

ODTÜ

ÖZET

- Toprakla bağlantıların ana ilkelerini kapsayan bir tekrar ve yarı küresel toprak elektrodlan temel alınarak açıklamalar.
- Toprak elektrodunun ve toprağın öz direncini ölçme yöntemleri.
- Çubuk elektrodlar, gömülü teller ve levhaların özellikleri ve karşılaştırılması.
- Bu ilkelerin güç sistemlerinde sık karşılaşılan iki problem ile açıklanması.
 - a) Büyük EHV trafo merkezinin topraklama sisteminin tasarımı ve AIEE yöntemi ile adım ve dokunma gerilimlerinin hesaplanması.
 - b) MV dağıtım sistemlerinin topraklama problemleri ve bu problemleri gidermek için geliştirilen yöntemler.

SUMMARY

The basic principles involved in making a connection to earth are first reviewed, and illustrated by reference to a hemispherical earth electrode. Methods of measurement of the resistance of an earth electrode and the specific resistivity of the earth are described. The relative merits of rod electrodes, buried wires and plates are compared.

These principles are then illustrated by reference to two common power system problems. Firstly the design of the earthing system for a large EHV substation is discussed, and the AIEE method of estimating step and touch voltages is described. Secondly the problems of earthing MV distributive systems are described, together with some of the methods which have been developed to overcome these problems.

1. GİRİŞ

Bu konferansın gayesi toprağa bir bağlantı yapılması halinde g-özönünde tutulması gereken ana prensipleri ve bu prensiplerin yüksek gerilim trafo merkezleri ve orta gerilim dağıtım şebekelerine nasıl tatbik edilebileceğini belirtmektir.

2. TOPRAĞIN SPESİFİK DİRENCİ

Toprak iletkenlere kıyasla çok kötü bir iletken olup spesifik direnci ortalama 100 n/m mertebindedir (karşılaştırma bakımından, bakırın spesifik direnci $1,6 \times 10^{-10}$ so/m dir). Gerçekte toprağın spesifik direnci bir çok faktörlere bağlı olarak çok değişebilir. Bu faktörlerin başlıcaları şunlardır:

- a. Toprağın cinsi,
- b. Kimyasal bileşimi,
- c. Nem miktarı,
- d. Nem altında çözülebilir tuz konsantrasyonu,
- e. Toprağın sıcaklığı;
- f. Toprak tanesinin büyüklüğü ve dağılımı,
- g. Toprağın, sıkışık veya gevşek oluşu.

Bu faktörlerden nem ve çözülür tuzlar toprakta iletkenlik sağlanması bakımından en önemli faktörlerdir. Çünkü toprakta elektrik akışı bir elektrolitik hadisedir.

* 9.2.1972 tarihinde FÎE İdaresi salonunda verilmiştir.

Yukarıda belirtilen faktörler nedeniyle toprağın spesifik iletkenliği Tablo 1'de görüldüğü gibi çok fazla değişir.

Tablo 1.

Değişik şartlarda toprak spesifik direnci (ρ):

Toprağın cinsi	ρ (fi/m)
Islak organik toprak	10
Nemli toprak	10^2
Kuru toprak	10^8
Kaya tabakası	10^*

Tablo 1'den görüldüğü gibi ρ çok fazla değişmekle beraber çok güzel şartlar dışında, hesaplamalarda genellikle 100 fi/m alınır ve toprak tabakası homojen ve izotropik kabul edilir.

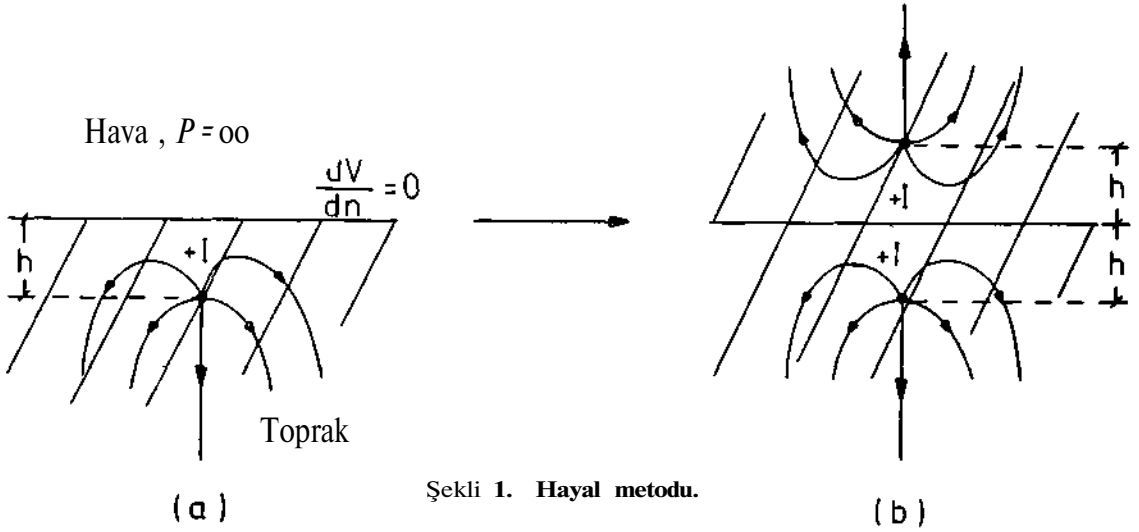
3. İLETKEN BİR ORTAMDA AKIM AKIŞI

Homojen ve izotropik iletken bir ortamda akım akışı Laplace denklemi ile belirlenir. Herhangi bir noktada akın yoğunluğu (J), spesifik iletkenlik (σ) ve elektriki alan (E) veya potansiyel (V) arasında aşağıdaki bağıntılar yazılabilir.

$$J = \sigma E \text{ ve } \text{Div } J = 0 \quad (1)$$

$$\text{Div } (\sigma \text{-grad } V) = 0 \text{ veya } \nabla^2 V = 0 \quad (2)$$

Laplace denkleminin analitik çözümü sınır şartlarının karışık olması halinde zorlaşır. Topraklama yönünden en çok rastlanan iki sınır şartı şunlardır :



Şekli 1. Hayal metodu.

a. Toprak ve topraklama elektrodu temas yüzeyi : Temas yüzeyi boyunca potansiyel, elektrodun potansiyeline eşit ve sabittir.

b. Toprak-hava geçiş yüzeyi: Havanın spesifik direnci sonsuz büyük kabul edilebileceğinden geçiş yüzeyi boyunca normal doğrultuda akım yoğunluğu ve potansiyel değişimi safır olur; $J_n = 0$ ve $V/dn = 0$ (n normal doğrultuyu göstermektedir).

Topraklamada genellikle bir toprak-hava geçiş yüzeyi bahis konusudur. Bu halde, Şekil 1a' da gösterildiği gibi, $x-y$ koordinat sisteminde $y < 0$ yan-sonsuz bölgesi, içinde kaynak (source) ve tüketici (Sink) bulunan sonsuz bir toprak bölgesi olarak düşünülür ve çözüm Şekil 1b'de gösterildiği gibi hayal metodu ile sağlanır. Esas ve hayal kaynaklar nedeniyle meydana getirilen potansiyellerin süperpozisyonundan toprak tabakasındaki gerçek potansiyel dağılımı bulunabilir.

4. TABİ KÜRESEL TOPRAKLAMA ELEKTRODU

Yarı küresel şekil pratik topraklamalarda karşılaşılan bir topraklama elektrodu şekli olmamakla beraber, teorik hesaplama kolaylığı ve bazı prensiplerin kolayca anlaşılmasını sağlaması bakımından aşağıda incelenmiştir. Pratikte kullanılan bir çok topraklama elektrod sistemlerinin hesaplanmalarında, bunların «yarı küresel eşdeğerleri» sık sık gözönüne alınır.

Toprağa I akımı veren yarı küresel bir topraklama elektrodunu gözönüne alalım (Şekil 2). Toprak tabakasında x yarıçaplı dx yarı küre yüzeyinde akım yoğunluğu J_x sabit olup, E , bu yüzeydeki gradyan ise

$$J_x = \sigma E_x = \frac{I}{2\pi x^2} \quad (3)$$

$$B_x = \frac{I\rho}{2\pi x^2} \quad (4)$$

yazılabilir, p noktasındaki V_x potansiyeli, sonsuzun potansiyeli referans (sıfır) alınarak

$$V_x = \int_x^\infty \frac{I\rho}{2\pi x^2} dx = \frac{I\rho}{2\pi x} \quad (5)$$

olur. Yan küresel elektrodun potansiyeli V , $x = a$ konarak

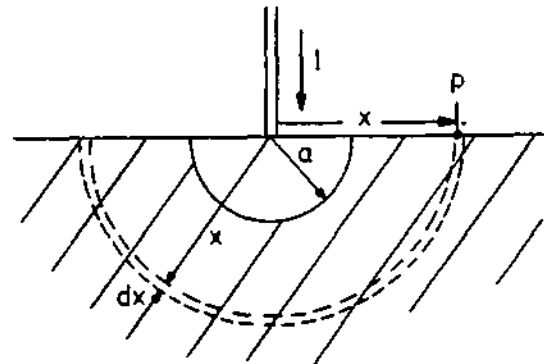
$$V_a = \frac{I\rho}{2\pi a} \quad (6)$$

ve toprak tabakası direnci R

$$R = \frac{P}{2\pi a} \quad (7)$$

bulunur.

Yukarıdaki bağıntı U_e verilen R direnci topraklama elektrodu U_e sonsuz arasındaki toplam



Şekil 2. Yarı küresel topraklama elektroda.

toprak tabakası direncini göstermektedir. Buna topraklama direnci denilmektedir. Elektrod yarıçapı $a = 10$ cm ve toprak spesifik direnci $\rho = 100$ fl/m ise topraklama direnci $R \leq 160 \Omega$ olur. Bu basit hesaplama normal bir toprak tabakasına düşük dirençli bir topraklama yapmanın zorluğunu ortaya koymaktadır.

Yan küresel elektrod ile x yarıçaplı yan küresel bir yüzey arasında kalan toprak tabakasının direnci R_x ,

$$R_x = \frac{\rho}{2\pi a x} \quad (8)$$

Yukardaki bağlantılar yardımı ile

$$R_x = \frac{\rho}{2\pi a x} \quad (9)$$

bulunur. (9) denkleminde R_x topraklama direncini göstermektedir. Tablo 2'de görüldüğü gibi, R_x , artan x ile süratle R ye yaklaşır, yani topraklama direncinin büyük çoğunluğu elektroda yakın toprak bölgesine isabet eder.

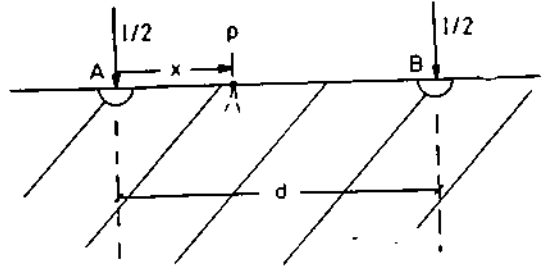
Tablo 2.

Toprak direncinin yarıçapla değişimi :

x	$2a$	$10a$	$20a$	$100a$
R_x	K	$0,5R$	$0,9R$	$0,95R$

Pratikte bir topraklama elektrodunun «direnç bölgesi»nden sık bahsedilir. Direnç bölgesi diye bir topraklama elektrodunun topraklama direncinin büyük çoğunluğunun isabet ettiği elektrod civarındaki yan küresel toprak bölgesine denilmektedir. Bu tarif açık olmayıp yanlış anlamalara yol açmaktadır. Çünkü topraklama direncinin büyük çoğunluğu kesinlikle belirtilmemiştir. Meselâ, topraklama direncinin büyük çoğunluğu % 99R ve % 95R olarak tarif edilirse, tekabül eden direnç bölgeleri, Yarıçapları $100a$ ve $20a$ olan yarı küresel toprak bölgeleri olur. Gerçekte, bir topraklama elektrodunun «toplam direnç bölgesi» sonsuz olur.

iki yan küresel topraklama elektrodu paralel bağlanırsa toplam topraklama direnci ancak elektrodlar arası açıklık sonsuz ise $R/2$ olur. Pratik şartlarda bu durum, «paralel bağlı iki topraklama elektrodunun toprak direnci, elektrodlar arası uzaklık bunların direnç bölgeleri çakışmıyacak kadar büyükse $R/2$ alınabilir» şeklinde ifade edilir. Bu ifade direnç bölgelerinin yeterince tarif edilmeyişi nedeniyle gene müphemdir. Gerçekte, n sayıda topraklama elektrodunun paralel bağlanması halinde toplam topraklama direnci daima R/n 'den büyük olur (R , bir topraklama elektrodunun topraklama direnci). Ancak, elektrodlar arası uzaklık çok büyükse toplam topraklama direnci R/n 'ye eşit alınabilir.



Şekil 3. Paralel iki yan küresel topraklama elektroda.

Şekil 3'de gösterilen iki yan küresel topraklama elektrodunu gözönüne alalım. Elektrodlar arası açıklık yeteri kadar büyükse (meselâ $d \gg 10a$) potansiyel dağılımı süperpozisyonla bulunabilir.

P noktasındaki V_p potansiyeli

$$V_p = \frac{\rho^{1/2}}{2\pi x} + \frac{\rho^{1/2}}{2\pi(d-x)} \quad (10)$$

elektrodların potansiyeli V_a ; $K=0$,

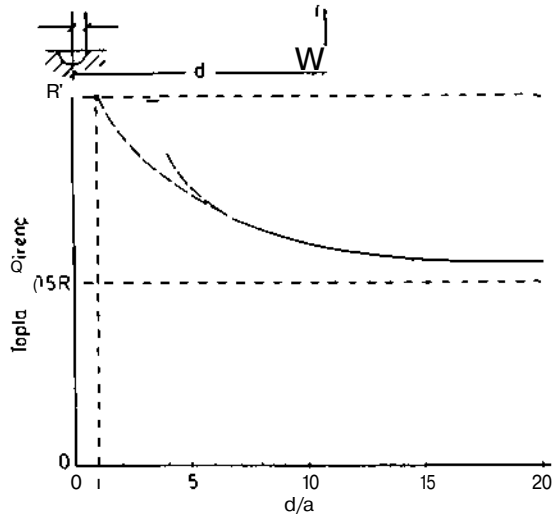
$$V_a = \frac{\rho^{1/2}}{2\pi a} + \frac{\rho^{1/2}}{2\pi(d-a)} \quad (11)$$

toplam topraklama direnci, $R' = V_p/I$

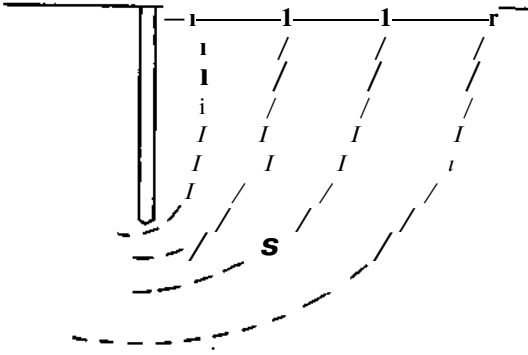
$$R' = \frac{R}{2} \left(1 + \frac{2}{d/a} \right) \quad (12)$$

bulunur ($R = \frac{\rho}{2\pi a}$, yalnızca bir elektrod halinde topraklama direncidir).

R' 'nin d/a ile değişimi Şekil 4'de çizilmiştir. Yukarıda verilen direnç bağıntısı küçük elektrod açıklıkları için hatalı olmakla beraber Şekil 4'de (verilen eğri, direncin genel değişimi hakkında doğru bir fikir verir.



Şekil 4. Paralel iki yan küresel topraklama elektrodu topraklama direnci.



Şekil 5. Bir çubuk topraklama elektrodunun etrafında eşpotansiyel yüzeyler.

5. EŞDEĞER YARI KÜRESEL ELEKTROD SİSTEMİ

Pratik bir topraklama elektrodunu, eşdeğer yarı küresel elektrod sistemi ile temsil etmek hesaplamalar için oldukça faydalı bir tekniktir. Şekil 5, bir çubuk topraklama elektrodunun etrafında eşpotansiyel yüzeyleri göstermektedir. Elektrodun uzaklaştıkça eşpotansiyel yüzeyler yarı küresel yüzeylere yaklaşır. Elektroda çok yakın alan dağılımını gözönüne almamak şartı ile, yarı küresel şekilde alınabilen eşpotansiyel yüzeydeki gTadyan değerini dikkate alabiliriz.

Herhangi bir topraklama elektrodunun yarı küresel eşdeğeri, aynı topraklama direncini veren yarı küresel elektrod sistemi olarak tarif edilir. Bu tariften ve denklem (7)'den, eşdeğer yarı küresel elektrodun yarıçapı, a

$$a = \sqrt{\frac{\rho}{2\pi R}} \quad (13)$$

olur. Bu bağıntıda R, eşdeğeri bulunan topraklama elektrodunun gerçek topraklama direncidir. Bu bağıntı yardımı ile herhangi bir geometriki topraklama elektrodu, R biliniirse, eşdeğer bir yarı küresel elektrod ile temsil edilebilir.

6. TOPRAK SPESİFİK DİRENCİNİN ÖLÇÜLMESİ

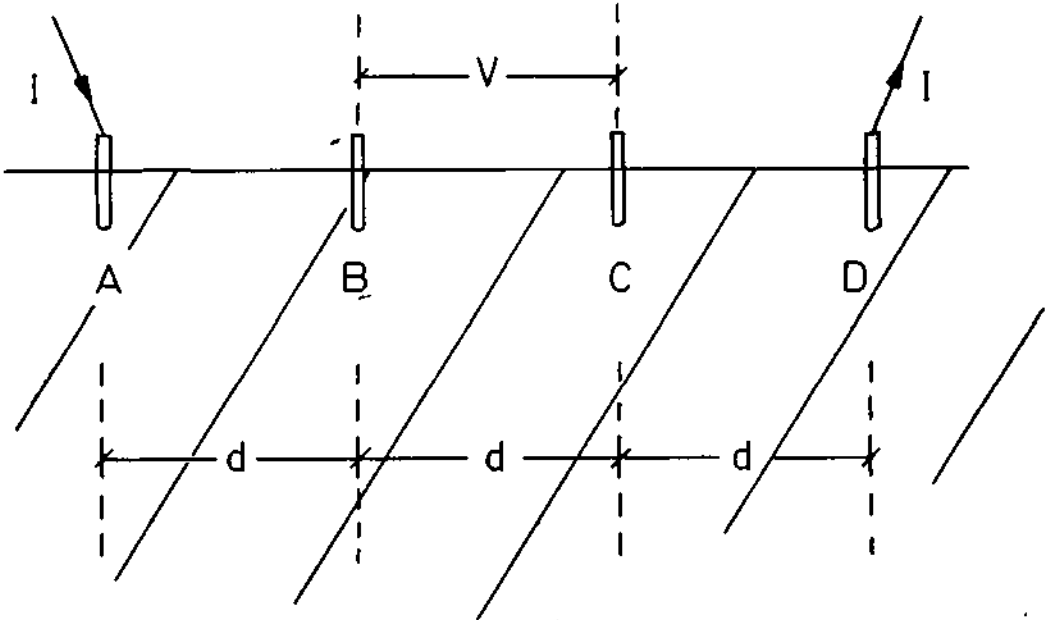
Toprak spesifik direncini ölçmede en çok kullanılan metod Şekil 6'da gösterilen Wenner metodudur. Aralandaki uzaklık boyutlarına göre büyük olan dört ölçü elektrodu toprağa bir doğru boyunca çakılır. Bunlardan A ve D elektrodlarından I akımı akıtılırken B ve C sonda elektrodları arasında beliren V potansiyeli ölçülerek, toprak spesifik direnci aşağıdaki tarzda hesaplanabilir.

Elektrod boyutları elektrodlar arası açıklığa göre küçükse, A ve D elektrodlarından akıtılan I akımı nedeniyle B ve C noktalarında beliren potansiyeller, A ve D elektrodlarını yarı küresel şekilde düşünerek süperpozisyonla bulunabilir. B ve C noktalarının potansiyelleri

$$V = \frac{I\rho}{2,rd} - \frac{I\rho}{2,2d} + \frac{I\rho}{2,r.2d} \quad (14)$$

ve benzer şekilde

$$V_c \sim \frac{J\hat{I}}{2u.2d} \quad (15)$$



Şekil 6. Wenner'in dörtlü elektrod sistemi.

B ve C noktaları arasında potansiyel farkı V

$$V = V_B - V_G = \frac{\rho}{2\pi d} \quad (16)$$

ve bu iki nokta arasında direnç $R = V/I$ den

$$R = \frac{P}{2\pi d} \quad (17)$$

ve toprak spesifik direnci

$$\rho = 2\pi d \cdot R = 2\pi d \frac{V}{I} \quad (18)$$

buhmur.

Toprağın homojen olmayışı nedeniyle bu şekilde hesaplanan spesifik direnç gerçek toprak spesifik direncinden farklı olabilir. Bir çok noktalarda ölçmeler tekrarlanır ve ortalama değerler alınır. Bu fark azaltılabilir. Diğer bir hata kaynağı, topraktaki doğru, şebeke frekansı ve üçüncü harmonik kaçak akımların bulunmasıdır. Bu kaçak akımlar B ve C sonda elektrodun arasında ilâve gerilim düşümüne ve ölçmelerde hatalara sebep olurlar. Bunu önlemek için toprak direnci ölçmeleri genellikle 70 Hz'de yapılır, ayrıca ölçme devresi kaçak akımlarının etkisini azaltıcı şekilde tasarlanır. Yüksek frekanslarda ölçme yapılması halinde bağlantı iletkenleri ve bunlarla toprak arası müşterek tesirler ölçme hatalarına yol açarlar, ölçmelerde kullanılan gerilim 50-500 V arasında değişir.

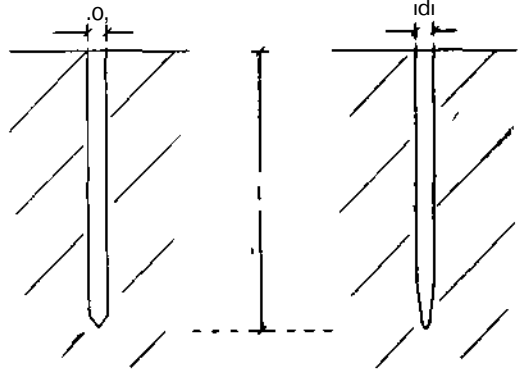
7. TOPRAKLAMA ELEKTRODU ŞEKİLLERİ

Pratikte en çok rastlanan topraklama elektrodları şekil yönünden çubuk, iletken veya şerit ve levha elektrodlar olmak üzere üç ana grupta sınıflandırılır.

7.1. Çubuk topraklama elektrodları :

Bir topraklamada kullanılacak metal elektrod malzemesinin iletkenliğinin topraklama direncine etkisi bakımından hiç bir önemi olmayacağı açıktır. Ancak korozyona dayanıklılık, akım taşıma kapasitesi ve mekanik mukavemet elektrod malzemesinin seçiminde gözönünde tutulmalıdır. Bu bakımlardan en uygun elektrod malzemesi bakır alaşımlarıdır. Çubuk topraklama elektrodları genellikle 0,5-3 cm çapında 1 m kadar uzunlukta uç uca vidalanabilir şekilde bakır alaşımlarından yapılır. Elektrodlar uç uca vidalanarak havalı veya elektriksel çekiçlerle toprağa kolaylıkla çakılır. Topraklama derinliği 3-20 m arasında değişebilir.

Bir çubuk topraklama elektrodunun topraklama direncini tam olarak veren bir formül yok-



Şekil 7. Bir çubuk topraklama elektrodunun bir elipsoid ile temsil edilmesi.

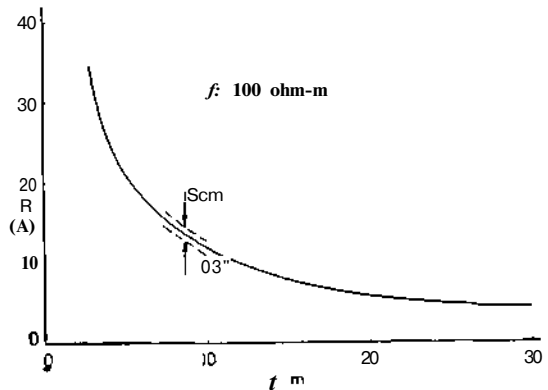
tur. Ancak, çubuk elektrodu Şekil 7'deki tarzda İnce, uzun bir elipsoid şeklinde temsil edilerek topraklama direnci bulunan yaklaşık bir

formül $R = \frac{\rho}{2\pi \cdot l} \cdot \log \frac{l + \sqrt{l^2 + d^2}}{d}$ dir. Pratik hesaplamalarda bu direncin iki katı alınarak

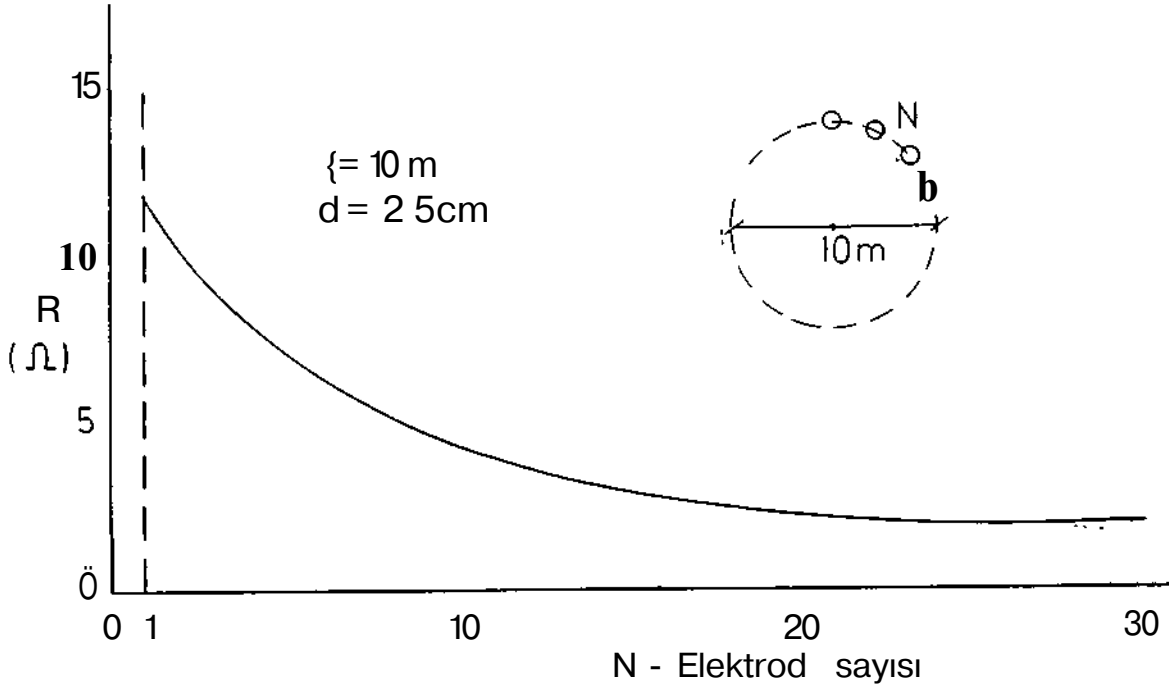
$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \cdot \log \left(\frac{l + \sqrt{l^2 + d^2}}{d} \right) \quad (19)$$

formülü kullanılmaktadır. Bu bağıntı pratik maksatlar için $\rho \cdot l$ 'a yeterlidir. Çünkü pratikte toprak spesifik direnci hiç bir zaman hassas olarak bilinmemektedir.

Yukarıdaki formülde elektrod çapı d yalnızca logaritmik terim içinde belirlediğinden elektrod boyu l kadar direnç değişimini etkilemez. Bu husus Şekil 8'de görülmektedir. Elektrod çapı $0.5 \leq d \leq 3$ cm arasında değiştiği takdirde eğri noktalı çizgilerle belirtilen bölgede değişir. Elektrod boyu l in küçük değerlerinde direnç çok değişirken l arttıkça bu değilde azalmaktadır, meselâ elektrod boyunu 10 m'den 20 m'ye çıkarmakla topraklama direncinde sağlanacak azalma % 50 olup önemsizdir. Bu yüzden topraklama çubuğunun çok derinlere kadar çakılması zannedildiği kadar fayda sağlamamaktadır.



Şekil 8. 2,5 cm çapında bir çubuk topraklama elektrodunun topraklama direncinin çubuk boyu ile değişimi.



Şekil 9. N sayıda çubuk topraklama elektrodunun bir daire boyunca düzenlenmesi halinde topraklama direncinin değişimi.

Eşdeğer yan küresel elektrod yarıçapı (7) ve (19) denklemlerinden

$$a = \frac{1}{\log \frac{4.1}{d}} \quad (20)$$

bulunur, meselâ $l = 10 \text{ m}$, $d = 2,5 \text{ cm}$ İse $a = 1,67 \text{ m}$ olur.

Düyük topraklama direnci gerektiğinde çok sayıda çubuk elektrod paralel bağlanabilir. Meselâ, $l = 10 \text{ m}$, $d = 2,5 \text{ cm}$ boyutlarında bir çubuk elektrod ortalama toprak şartlarında ($\rho = 100 \text{ n/m}$) 12 fl'lık bir topraklama direnci sağlar. 1 fl'lık topraklama direnci isteniyorsa, aralarındaki açıldık direnç bölgeleri çakışmıyacak kadar büyük olmak şartıyla pratik olarak en az 12 çubuk elektrod paralel bağlanmalıdır. Topraklama sahası sınırlı veya elektrodların uzak aralıklarla çakılması mümkün değilse, aynı topraklama direnci için daha çok sayıda veya uzun elektrodun daha yakın mesafelerle çakılması gerekir. Elektrodlar doğrusal, bir daire veya bir kare çevresi boyunca dizelebilirler.

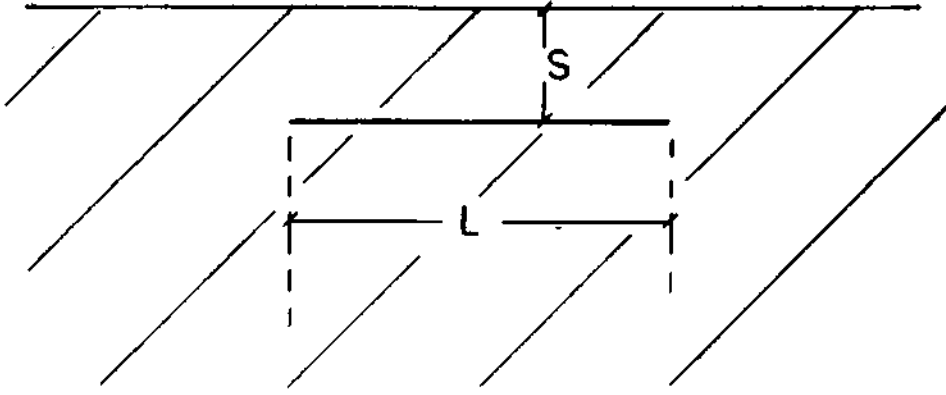
Şekil 9, 10 m yarıçaplı bir daire boyunca N sayıda paralel çubuk elektrodlarla sağlanan topraklama direncinin N ile değişimini göstermektedir. N artarken başlangıçta direnç çok düşmekte, N'nin büyük değerlerinde direnç az değişmektedir. Bu bakımdan paralel elektrod sa-

yasını fazlaca arttırmakla karşılığında sağlanan topraklama direncindeki düşme ekonomik olmaz. Elektrodlar arası açıklık eşdeğer yarı küre yarıçapına yakınsa, paralel elektrod sayısı 20'den fazla olmamalıdır. Keza N büyükse, dairenin merkezine ilâve paralel elektrodlar çakılması topraklama direncinde fazlaca bir düşme sağlamaz. Paralel çubuk sistemin topraklama direnci her bir elektrodun yan küresel eşdeğeri gözönüne alınarak hesaplanabilir. Bu hesap metodu, gerçek toprak direncinden daha büyük sonuç verir.

7.2. İletken veya şerit topraklama elektrotları :

Topraklama yapılacak bölgenin alt kısımları kayalık ise çubuk elektrotların derine çakılması ve uygun bir topraklama sağlanması mümkün olmayabilir. Bu durumda, yuvarlak kesitli veya şerit şeklindeki iletkenlerin zemine gömülmesi ile uygun bir topraklama sağlanır. Bu tür topraklamaya laboratuvarlarda ve ekseriya birçok noktalarının birbirine ve toprağa bağlanması gereken büyük transformatör merkezlerinde rastlanır.

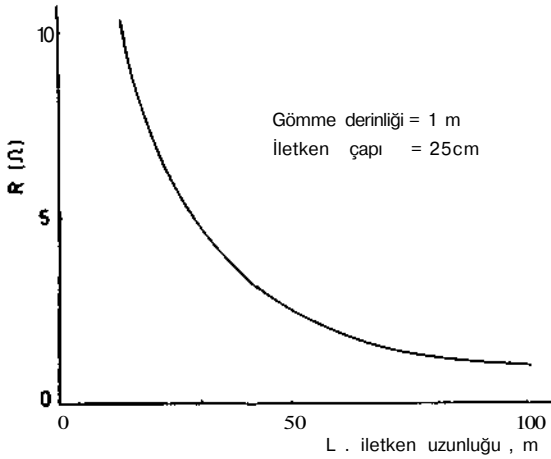
Topraklama direncinin hesabı oldukça karışıktır ve kesin sonuç veren formüller yoktur. Şekil 10'da, toprağa gömülü L uzunluğunda doğrusal bir iletkenin topraklama direncini veren yaklaşık bir formül verilmiştir. Bu formülle hesaplanan 2,5 cm çapında ve 1 m derine gömülü bir top-



$$R = \frac{\rho}{2TTL} \left[\log_{10} \frac{M_0 g L t M_j K}{2S} - \frac{\sqrt{4S^2 + L^2}}{L} \right]$$

Şekil 10. L uzunluğunda ve a yarıçapında doğrusal gömülü bir topraklama iletkeni.

İletkeninin topraklama direncinin iletken boyu L ile değişimi Şekil 11'de çizilmiştir, (gömme derinliğinin toprakla direnci üzerine etkisi küçük kalmaktadır).



Şekil 11. Gömülü bir doğrusal topraklama iletkeninin direncinin boyyla değişimi.

Topraklamanın yapıldığı bölge sınırlı ise, Şekil 12'de gösterilen çoklu bağlantı şekilleri tercih edilir. Sabit bir iletken uzunluğu için Şekil 12a tertibi en düşük topraklama direncini verir Şekil 12f tertibi 12a tertibine nazaran 4 misli

ileken gerektirmesine rağmen yaklaşık olarak yan değerde bir topraklama direnci sağlar.

Kesiti herhangi bir şekilde olan bir iletken topraklama elektrodunun topraklama direnci aynı temas yüzeyini haiz yuvarlak kesitli bir iletkenle temsil edilerek yeter haseasiyetle hesaplanabilir.

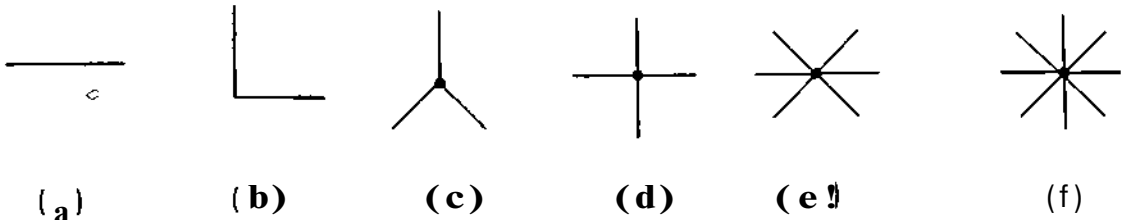
7.3. Topraklama levhaları:

Levha şeklindeki elektrodların topraklama direnci ancak amprik! formüllerle ve yeterli bir hassasiyetle hesaplanmaktadır. Toprak yüzeyinde a yarıçaplı düzlemsel, dairesel bir elektrodun topraklama direncinin

$$R = \frac{\rho}{4a} \quad (21)$$

olduğu gösterilebilir. Elektrod toprağa gömülürse topraklama direnci düşer ve sonsuz derine gömülmesi halinde topraklama direnci R/2'ye eşit olur.

Herhangi şekildeki bir düzlemsel elektrodun topraklama direnci bunun dairesel eşdeğeri gözönüne alınarak (21) denkleminde hesaplanabilir. Eşdeğer dairesel elektrodun bulunmasında her iki elektrodun aynı alan haiz olduğu düşünülmelidir. Bu peklide hesaplanan topraklama



Şekil 12. Çeşitli topraklama şekilleri.

direnci gerçek değerden daha büyük olur, çünkü (21) denklemi elektrodun toprak yüzeyinde oknası haline tekabül etmektedir.

7.4. Çubuk, iletken şerit ve levha topraklama elektrodlarının karşılaştırılması :

Tablo 3, bu üç tip topraklama elektrodunun topraklama direnci ve ekonomik bakımdan karşılaştırılmasını vermektedir. Çubuk elektrodun boyutları pratikte en çok kullanılan değerlere tekabül etmektedir. Karşılaştırmada, elektrodların aynı temas yüzeyine haiz oldukları gözönünde tutulmuştur.

veya bir kısmın belirmesi için E ve C elektrodları arasındaki uzaklığın en az bunların direnç bölgelerinin çakışmayacağı kadar, çok büyük olması gerekir. P sonda elektrodu E'den uzaklaştıkça toprak direncinin daha büyük bir kısmı ölçmeye dahil edilmiş, olur. Eğrinin yatay kısmı topraklama direncinin büyük çoğunluğunun ölçmeye girdiğini gösterir. E ve C elektrodları yakınlıklarında direncin fazla değişim göstermesi ölçmelerin bu elektrodların direnç bölgelerinde yapılması sonucudur.

Pratikteki ölçmelerde direnç eğrisi daima pozitif eğim verdiği için (Şekil 14), topraklama di-

Tablo 3.
Çubuk, iletken şerit ve levha elektrodlarının karşılaştırılması :

	Elektrod tipi		
	Çubuk	betken (derinlik m)	Levha
Toplam temas yüzeyi (cm ²)	2360	2360	2360
Uzunluk L (m),	L ₁ = 3	L = 3	a = 23,1
Çap d ve yarıçap a (cm)	d = 2,5	d = 2,5	
Topraklama direnci (Ω)	32,8	30,9	108,0
Tesis durumu :	Tesis kolay	Fazlaca kazı gerektirir	Fazlaca kazı gerektirir

Yukardaki tablonun tetkikinden, levha elektrodunun çubuk elektroda göre hem topraklama direnci, hem de 1ccs masrafı bakımından hiç uygun olmadığı açıkça görülmektedir. Çubuk ve iletken elektrodlar yaklaşık topraklama direnci vermelerine karşılık, kazı masrafının oymayı ve tesisinin kolaylığı bakımından çubuk elektrod üstünlük arz etmektedir. Bu nedenle topraklamada, özel haller dışında daima çubuk elektrodlar tercih edilir.

8. TOPRAKLAMA DİRENCİNİN ÖLÇÜLMESİ

Topraklama direncinin ölçülmesinde başlıca zorluk sadece bir ölçü terminalinin (topraklama elektrodu) bulunmasıdır. Topraklama direnci ölçmelerinde en çok tercih edilen metod «potansiyel düşümü ölçme» metodudur (Şekil 13).

Bu metotta, E topraklama elektrodu ile bundan yeterli uzaklığa çakılan C ölçü elektrodundan I akımı geçirilirken elektrodlar arasında ve EC doğrultusu üzerinde toprakta P noktasının V_p potansiyeli bir sonda yardımı ile ölçülür ve R₁ = V_p/I hesaplanır, ölçme çeşitli P noktalarında tekrarlanarak Şekil 13b'de gösterilen eğri çizilir. Bu eğrinin yatay kısmının belirttiği direnç E elektrodunun topraklama direnci olarak alınır.

Bu şekilde bulunan topraklama direnci gerçek değerden farklıdır. Bahis konusu eğride ya-

rencinin eğriden yeterli doğrulukta bulunması zorlaşır. Bu durumda bilhassa büyük bir transformator merkezinde ölçme yapılırken C elektrodunun çok uzağa çakılmasının mümkün olmaması sonucu belirebilir. Bu durumlarda E topraklama elektrodunun, genellikle yapıldığı gibi, yarı küresel eşdeğeri dikkate alınarak topraklama direncinin gerçek değeri aşağıda ispatlanan % 61,8 kadesinden bulunabilir (Şekil 14).

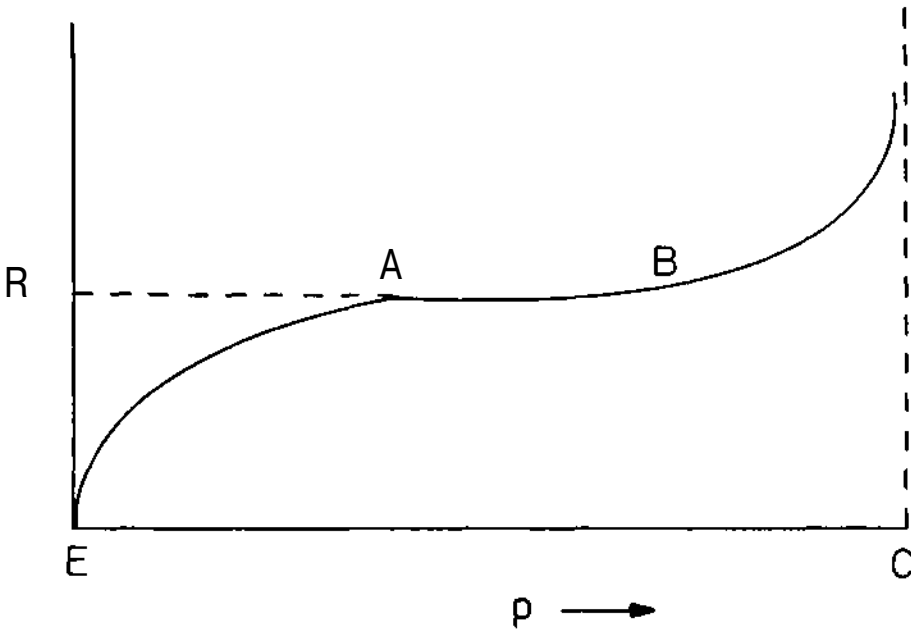
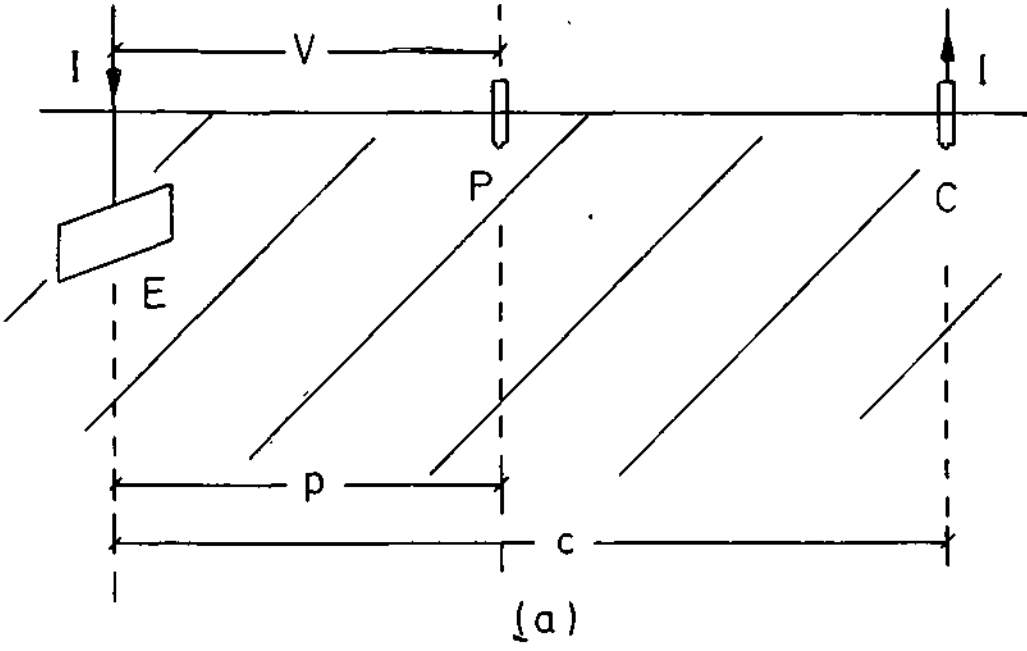
Eşdeğer yarı küresel elektrod yarıçapı a, C ölçü elektrodunun küre merkezine uzaklığı c ve sonda elektrodunun küre merkezine uzaklığı p olsun. E elektrodu ve P noktasının potansiyelleri, süperpozisyonla

$$V = \frac{I_p}{2\pi a} + \frac{I_p}{2\pi c} - \frac{I_p}{2\pi p} \quad (22)$$

$$V_p = \frac{I_p}{2\pi} \left(\frac{1}{p} - \frac{1}{c-p} \right) \quad (23)$$

bulunur, ölçülen potansiyel farkı V = V[^] - V_p ve R direnci

$$V = \frac{I_p}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{c} + \frac{1}{p} - \frac{1}{c-p} \right) \quad (24)$$



Şekil 13. Potansiyel ölçme metodu ile topraklama direncinin bulunması.

$$R = \frac{V}{I} = \frac{\rho}{2 \cdot a} \left[1 - a \left(\frac{1}{c} + \frac{1}{p} - \frac{1}{c-p} \right) \right] \quad (25)$$

$$\frac{1}{c} + \frac{1}{p} - \frac{1}{c-p} = 0$$

veya

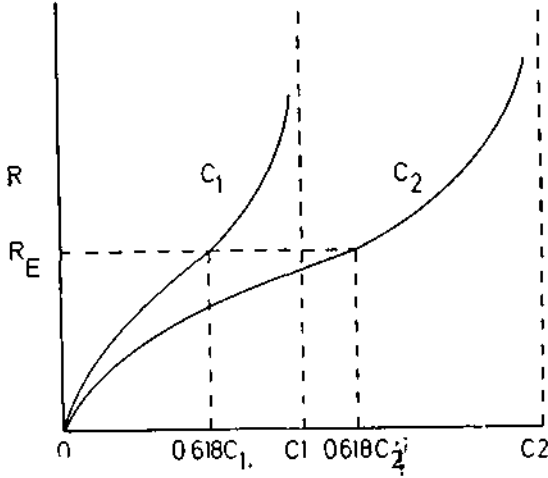
$$p^2 + pc - c^2 = 0$$

olmalıdır. Buradan $p = 0,618c$ olur, yani sonda elektrodu, toprak elektrodundan % 61,8c uzağa

olur. Direncin gerçek değere $\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot a}$ eşit olması için

çakılarak Ölçme yapılmalıdır. Pratikte bu kaide kullanılarak direnç ölçülmesi halinde karşılaşılan bazı zorluklar şunlar olabilir :

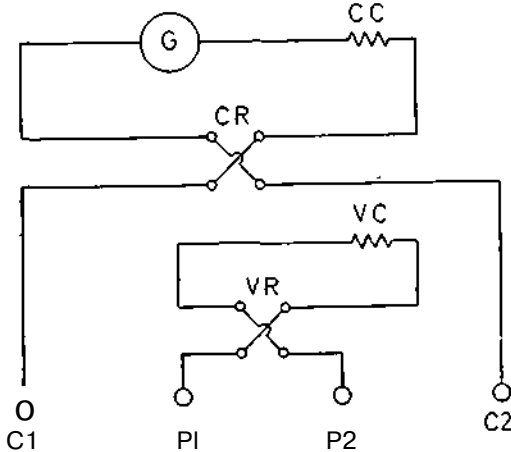
a. Toprak spesifik direncinin homojen dağılımlı olmayışı hatalı sonuçlar verebilir, çünkü ölçme yalnızca topraklama elektrodu etrafındaki bir kısım toprak bölgesinde yapılmaktadır, ölçmenin diğer bölgelerde tekrarlanması ile "daha doğru değerler bulunabilir.



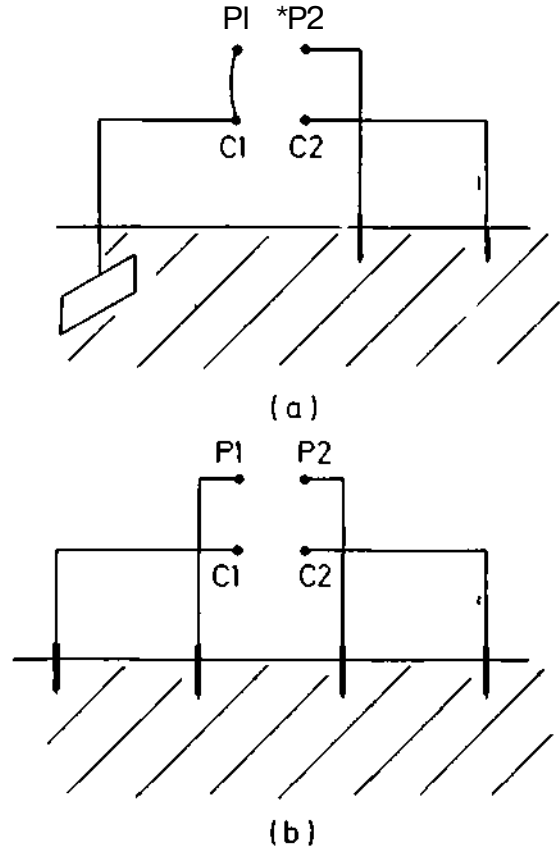
Şekil 14. 61,8 kaidesi yardımı ile topraklama direncinin bulunması.

b. Büyük bir transformatör merkezinde olduğu gibi topraklama şebekesi boyutları büyükse, topraklama şebekesini temsil eden eşdeğer yarı kürenin merkezinin (topraklama merkezinin) hassas olarak bulunması zordur.

Toprak ölçmelerinde kullanılan ölçü aletleri genellikle 4 uçlu yapılır ve C₁, C₂ ve P₁, P₂ harfleri ile işaretlenir. Bu aletlerle direnç veya spesifik direnç ölçülebilir (Şekil 15 ve 16).



Şekil 15. Toprak direnci ölçme aleti şeması.



Şekil 16. ölçme bağlantı şekilleri :
(a) Topraklama direnci ölçülmesi;
(b) Toprak spesifik direnci.

9. ADIM VE TEMAS GERİLİMLERİ

Büyük bir transformatör merkezinde olduğu gibi geniş, bir topraklama şebekesinden büyük bir arıza akımı akması halinde toprak yüzeyinde beliren potansiyel dağılımı toprakta yürüyen bir insanın vücudundan, ölmesi için yeterli bir akımın geçmesine sebep olabilir. Bununla beraber, böyle bir kazanın meydana gelmesi için uygun olmayan bir çok durumların aynı anda belirmesi gerekir. Bunlar :

- Arıza akımının büyük değerli olması,
- Arızanın kısa sürede giderilememesi,
- Arıza akımının toprakta uygunsuz dağılımı,
- Arıza esnasında bir insanın en uygun olmayan yerde lastik ayakkabı veya eldivensiz bulunmasıdır.

Kazaları önleme bakımından topraklama sistemi çeşitli şekillerde tasarlanabilir. Amerikan Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsünce (AIEE) görevlendirilen bir komitenin çalışmasında insan vücudunun elektrik akımına tahammülünün akım şiddetinin ve akım süresinin

fonksiyonu olduğu gözönünde tutulmuştur. Akım süresinin tayininde devre kesicilerinin normal çalıştığı ve arızayı ayarlanan sürelerde giderdiği kabul edilir. Kesicilerin bazen normal işlememesi ve arızayı belirtilen sürelerde giderememesi mümkündür. Ancak böyle bir durum, diğer müsaait olmayan şartlarla aynı zamana çok zayıf ihtimalle tesadüf etmesi düşünülerek dikkate alınmaz. Bununla beraber arıza süresinin tayininde istenirse ya esas koruma sisteminin veya bunun çalışmaması halinde devreye giren yedek koruma sisteminin arızayı giderme süreleri dikkate alınabilir.

9.1. Emniyetli vücut akımı:

insan vücudundan düşük frekanslı yeterli şiddet ve sürede akım akması halinde ölüm «ventriküler fibrilasyon» denilen tıbbi bir olay sonucu meydana gelir. Bu olayda kalp adalelerinde değişimler olmakta, suni teneffüs yetersiz kalmakta, kalbin eski haline dönmesi ancak özel cihazlarla kalbe karşıt elektrik şoku tatbiki ile sağlanmaktadır.

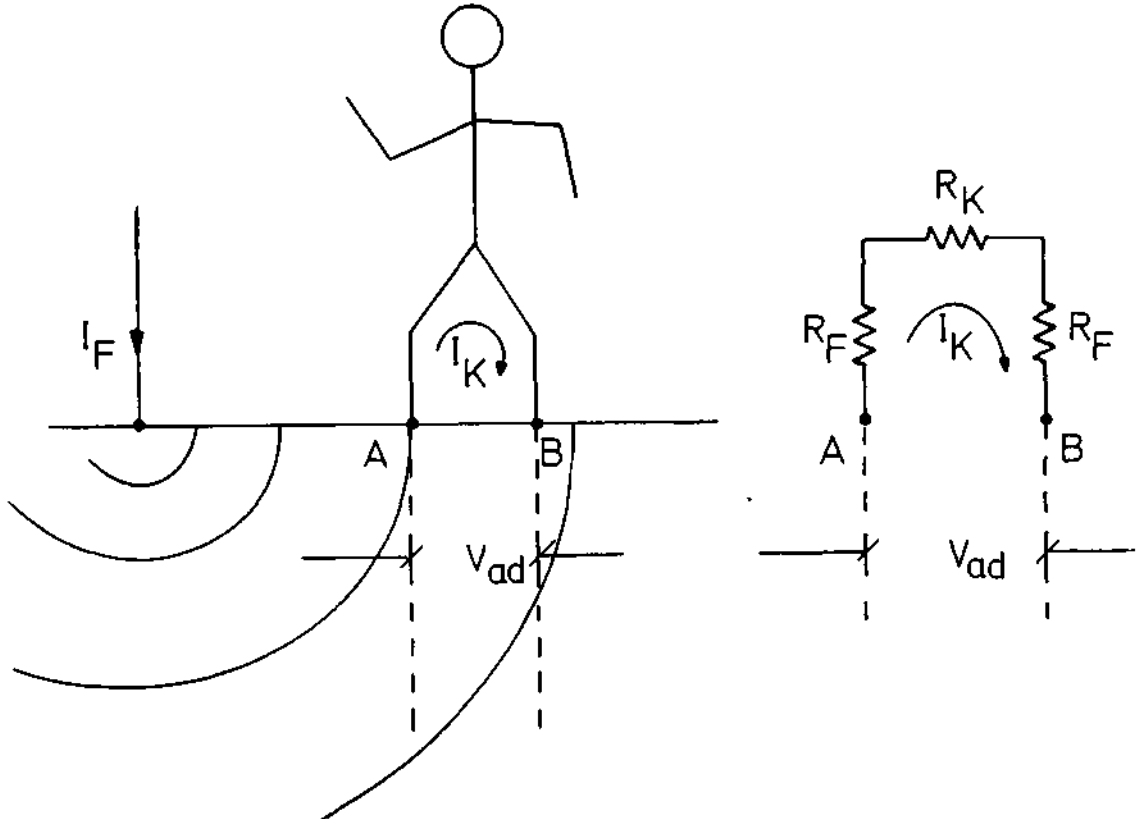
Colombia Üniversitesi'nde yapılan çok sayıda deney sonucu insanların % 99,5'inin emniyetle dayanabilecekleri şebeke frekansı maksimum efektif akım (A),

$$I = \frac{0,165}{t}, \quad 0,03 \leq t \leq 3 \text{ san.} \quad (26)$$

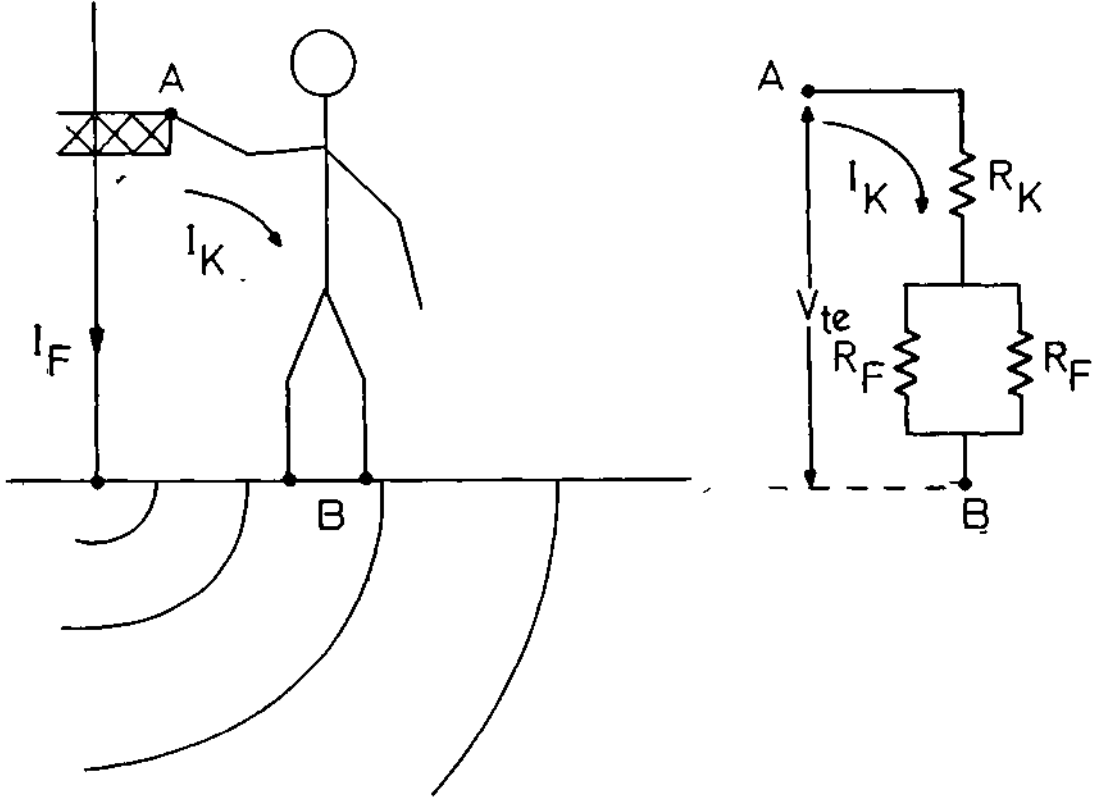
bağıntısı ile bulunabilir. (1 ve 0,1 sn. süreler için akımlar 165 mA ve 520 oA olur. Son zamanlarda (26) denkleminde 0,165 katsayısı yerine 0,116 alınması tavsiye edilmiştir). Koruma sistemi tekrar kapama yapıyorsa arıza süresinin tayininde bu husus düşünülmesi, meselâ açma zamanının iki katı alınmalıdır. Yukarıdaki denklemlerle bulunan emniyetli vücut akımı, İnsan vücudunun en önemli bölgesi olan göğüs kısmı içindir. Ayak ve el kısımları daha büyük değerli akımlara dayanabilirler. Ancak, emniyet yönünden yukarıdaki denklemlerle verilen emniyet akımının el ve ayak kısımları için de geçerli olduğu kabul edilmelidir.

9.2. Emniyetli adım ve temas gerilimi :

Adım gerilimi topraktan arıza akımının akması sırasında toprakla temasta olan bir insanın adımları arasında beliren potansiyel farktır. Şekil 17 adım gerilimini ve hesaplamalar için eşdeğer devreyi göstermektedir. İnsan vücudundan akan I_K akımının hesabında aşağıdaki kabuller yapılır:



Şekil 17. Adım gerilimi ve eşdeğer devre.



Şekil 18. Temas gerilimi ve eşdeğer devre.

a. I_K akımı AB noktalarındaki açık devre gerilimini etkilemez (gerçekte I_K akımı mA ve arıza akımı I_F kA mertebesinde olduğundan bu kabul doğrudur).

b. Daha emniyetli sonuç yönünden derinin v 'si alınır.

Temas gerilimi bir insanın topraklanmış bir cihaz gövdesi, yapısı, v.s.'ye elle dokunması halinde el ve ayak temas noktaları arasında beliren potansiyel farkıdır. Şekil 18 temas gerilimini ve eşdeğer devresini göstermektedir.

insanlar üzerinde yapılan çok sayıda ölçmeler sonucu ortalama vücut direncinin $R_K \ll 1000 \Omega$ alınabileceği bulunmuştur, insan ayağı ile toprak arası temas direncinin (R_F) her bir ayağı 8 cm yarıçapında düzlemsel dairesel bir levha şeklinde düğünülerek yapılabilir. Ayak direnci

$$R_F = \frac{\rho_s}{4a} = 3\rho_s \quad (27)$$

olur, ρ_s (ft/m) temas bölgesi toprak spesifik direncidir. Maksimum adım ve temas gerilimleri, vücut akımı I_K için (26) denklemi dikkate alınarak

$$V_{ad} = (R_K + 2R_F) I_K = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (28^*)$$

$$V_{te} = (R_K + \frac{R_F}{2}) I_K = \frac{165 + 0,25\rho_s}{\sqrt{t}} \quad (29)$$

bulunur. Gerçek adım ve temas gerilimlerini emniyetle hesap edebilmek için bir adım ve bir kol mesafesi 1 metre alınır.

9.3. Transfer temas gerilimi :

EHe dokunulan iletken cisim bulunulan bölgeden daha uzakta topraklanmış ise bu takdirde İnsan vücudu boyunca beliren gerilime «transfer temas gerilimi» denir ve temas gerilimine göre daha tehlikeli sonuçlar doğurabilir (Şekil 19). Bu gibi ihtimaller bir transformatör merkezinin topraklanmasının tasarımında dikkate alınmalıdır. Benzer tehlikeli durum, dlreküstü elle kumandalı kesicilerin kapatılmasında meydana gelebilir.

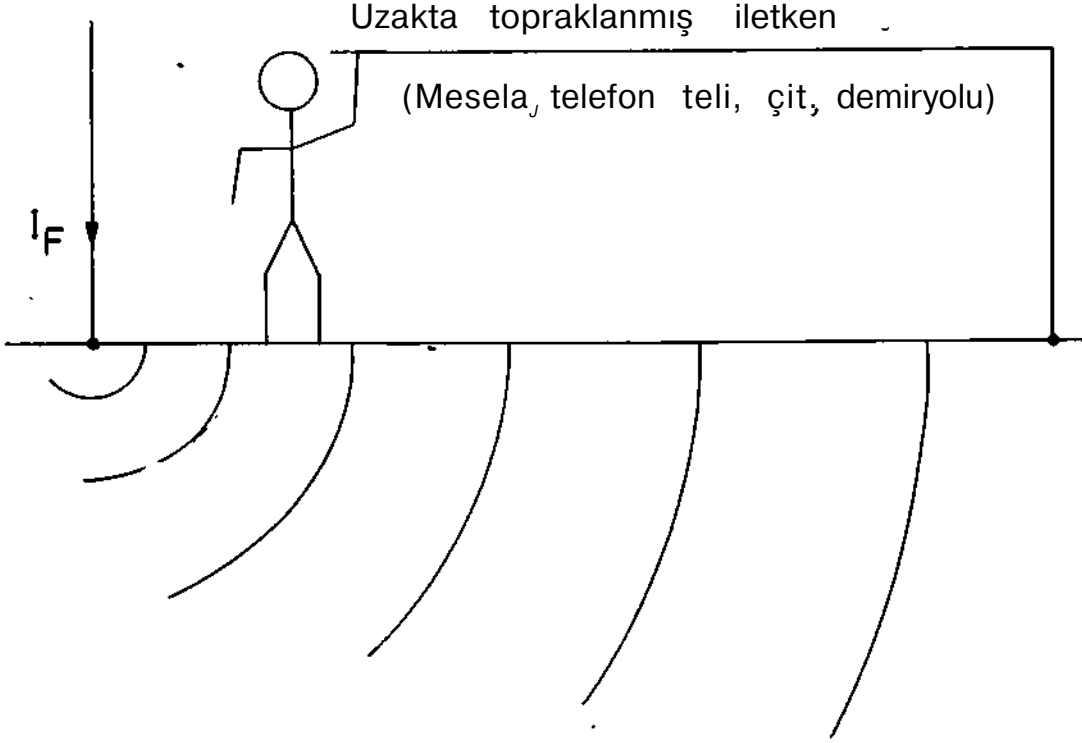
10. YÜKSEK GERİLİM TRANSFORMATÖR MERKEZLERİNİN TOPRAKLANMASI :

10.1. Topraklama ağı :

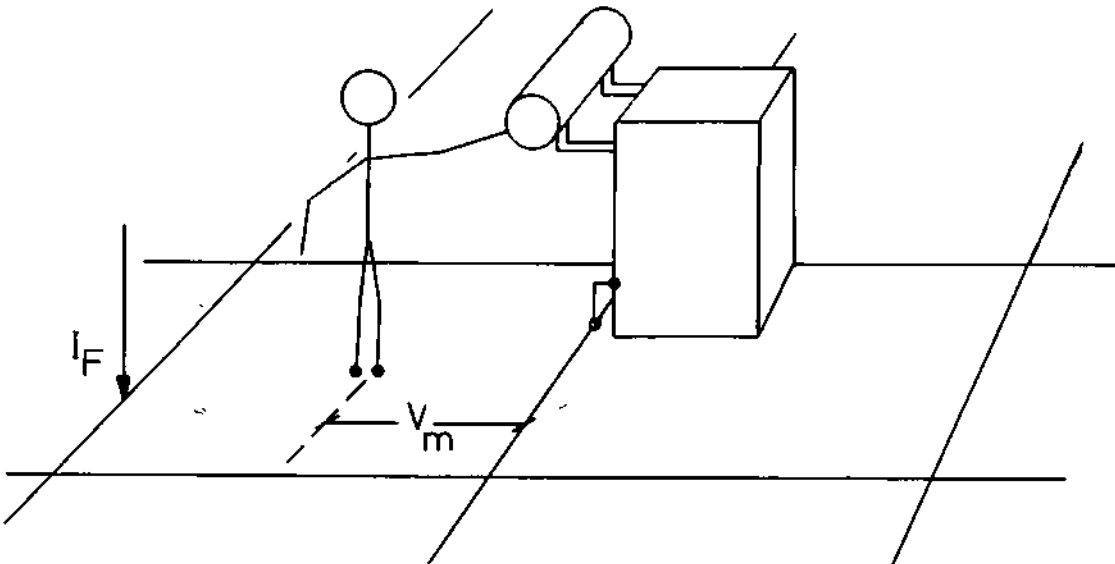
Çok yüksek gerilimli transformatör merkezlerinde bir arıza halinde topraktan akan arıza akım-

lan çok büyük olduğundan arıza akımının toprakta tehlikeli potansiyel dağılımı doğurmaya-
cak şekilde dağıtılması gerekir. Bu maksatla ve aynı zamanda transformatör merkezinde bir çok noktaların toprağa bağlantısını sağlamak bakımından transformatör merkezinin zemininde gömülü iletkenlerden oluşan bir topraklama ağı (şebekesi) yapılır. Yeterli uzunlukta iletken kullanıldığı takdirde zemin boyunca uygun arıza po-

tansiyel dağılımı sağlanabilir. Potansiyel dağılımının hesaplanması oldukça zor ve detaylı analizleri gerektirir. Bununla beraber AIEE komitesi pratik maksatlar için yeterli yaklaşık şöyle bir hesap şekil tavsiye etmektedir: Karesel bir topraklama ağı halinde bir karenin orta noktası ile topraklama ağına topraklanmış herhangi bir cihaz gövdesi arasında beliren potansiyel farkı (Şekil 20).



Şekil 19. Transfer temas gerilimi.



Şekil 20. Ağ gerilimi.

$$V_m = K \frac{\rho I_F}{L}$$

formülü ile hesaplanabilir; L topraklama ağındaki toplam iletken uzunluğu I, toplam arıza akını ρ , toprak spesifik direnci ve $K \ll 1,25$ olan bir geometrik faktördür. V_m 'nin maksimum temas geriliminden denklem (29), küçük olması şartından, toplam topraklama iletken uzunluğu

$$L = \frac{KI_F \bar{y}it}{165 + 0,25 \rho_s} \quad (31)$$

bulunur. Bu denklem topraklama ağı için lüzumlu iletken uzunluğu hakkında bir önlük verir. Bu şekilde hesaplanan iletken uzunluğu ekseriya gerekenden fazla olmakla beraber emniyet bakımından iletken uzunluğu daha da artırılabilir.

Topraklama iletkeni uzunluğu hesabında beliren zorluklardan birisi, arıza akümü I_F 'nin önceden bilinmemesidir, çünkü arıza akımının doğru olarak hesaplanmasında önemli etkisi olan transformatör merkezinin toplam topraklama direnci (R_s) topraklama sistemi tasarım edilmeden bilinmez. Bunun için önce; a alanı transformatör merkezinin alanına eşit bir düzlemsel - dairesel levhanın yarıçapı olmak üzere, $R_s = \rho/4a$ bağıntısından bir ön hesaplama ve buradan yaklaşık olarak I_F ve L hesaplanır. R_s için daha doğru değer

$$R_s = \frac{fi}{4a} + \frac{P}{L} \quad (32)$$

ile hesaplanır; birinci terim zeminin yekpare levha ile topraklandığını, ikinci terim ise topraklama levhasının yekpare olmadığını dikkate almaktadır. Hesaplar tekrarlanarak I_p ve L için yeni değerler bulunabilir, R_s 'nin I_F 'yi fazlaca etkilemediği bilinmelidir. Topraklama ağı iletkenlerinin

seçiminde akım taşıma kapasitesi de dikkate alınmalıdır.

10.2. Zeminin kaya parçalan ile kaplanması:

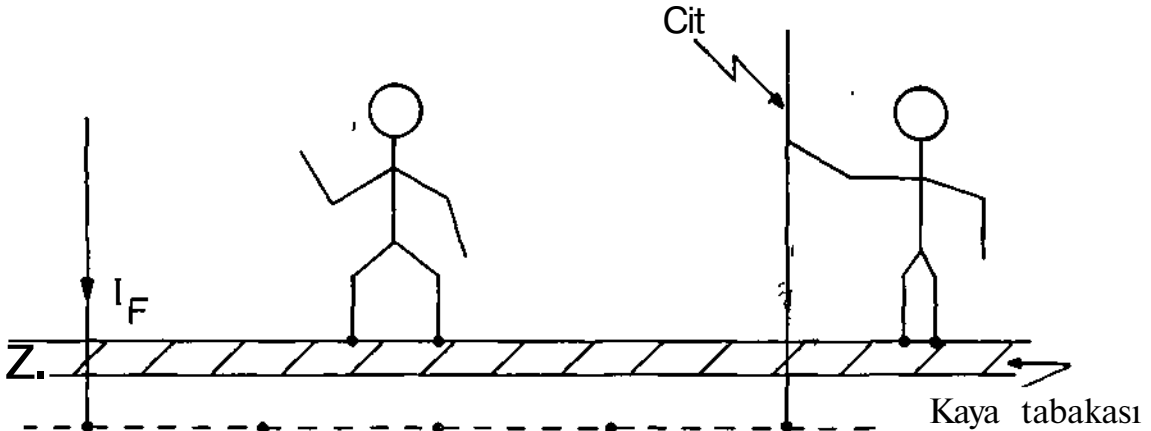
Arıza akımının çok büyük değerlerde olması ve uygun bir dağılım sağlanamaması halinde, zeminin takriben 10 cm. kalınlıkta kaya parçaları ile kaplanması faydalı olur. Bu takdirde zeminin spesifik direnci ($\rho = 500$ n/m) dolayısıyla zemin - ayak temas direnci bir hayli artacağından arızî esnasında insan vücudundan geçebilecek akım azaltılmış olur (Şekil 21). (31) denklemi göz-önüne alındığında, ρ_s 'nin 100'den 5000 n/m'ye artırılması halinde toplam topraklama iletkenliğinde azalma oranı:

$$\frac{165 + 0,25 \sqrt{100}}{165 + 0,25 \sqrt{5000}} = 0,91 \text{ den}$$

fazla olmamakla beraber zeminin kaya tabakası kaplanması ile transformatör merkezini çevreleyen madeni çit gibi muhtemel tehlikeli mahalde kaza tehlikesi azaltılmış olur. Bu maksatla ve dışardaki insanların emniyetini sağlama bakımından kaya tabakasının çit dışına en az 1' metre uzaklığa kadar kaplanması faydalıdır. Zeminin kaya tabakası ile kaplanmasının toplam topraklama direncini (R_s) hemen hiç etkilemeyeceği hatırlanmalıdır.

10.3. Çubuk elektrodlarla ilâve topraklama :

Düşük topraklama direnci sağlamak ve akım dağılımını toprak derinliğine kaydırmak için transformatör merkezinde topraklama ağına ilâveten çok sayıda uzun çubuk elektrodlarla topraklama yapılır. Çubuk elektrod sayısı akım taşıma kapasitesine göre hesaplanır. Çubuk elektrodlarla topraklama, yazın toprağın kuruması



Şekil 21. Zeminin kaya parçalan ile kaplanması

ve kıgın yüzeyin donması halinde topraklama ağının topraklama direncinin artması kargısında emin ve düşük bir topraklama direnci sağlamı*? olur. Transformatör merkezinin toplam topraklama direncinin tamamı hesabı zor ve karışıktır. Topraklama direncinin yaklaşık hesabı için çubuk elektrodlar topraklama ağına paralel kabul edilerek yapılır. Bu yolla hesaplanan direnç, gerçek topraklama direncinden daha büyük olmaktadır.

11. ORTA GERİLİM DAĞITIM SİSTEMLERİNİN TOPRAKLANMASI

Bir kullanıcının elektrik tesisatına bağlı elektriksel bir cihazda beliretoilecek bir arıza sonucu, elektriksel çarpımayı önlemek için dokunulabilir madeni kısımlarının topraklanması gerekir. Topraklama uygun tarzda yapılmışsa tehlike doğurabilecek bir arıza akımı, arızalı cihazın devre dışı kalmasını sağlayacak koruma tedbirlerini çalıştıracak kaza ve yangın riski azaltılmış olur. Aşağıda alçak ve orta gerilim dağıtım sistemlerinde kullanılan topraklama sistemleri incelenmiştir.

11.1. Basit topraklama sistemi :

Basit topraklama sistemi İbir alçak gerilim hava hattı sistemi için Şekil 22'de gösterilmiştir. (Kablo sisteminin topraklı zırhının bulunuşu ve daha az tehlike arzemesi nedeniyle burada incelenmemiştir). Müşterinin cihazındaki bir arıza sonucu arıza akımı topraklama elektrodu, toprak devresi ve transformatör alçak gerilim nötr topraklaması yolunu takiben transformatör sayısından geçerek devresini tamamlar. Bu topraklama sisteminin kullanılması, tesis kapasitesi veya toprak spesifik direncinin yüksek olması halinde şu sebeplerden dolayı zorluk arzeder :

Tehlikeli bir arıza halinde arıza akımı müşteri tesisinin sigortasını çabukça attırmaya yetecek kadar büyük olmalıdır. İngiltere'de bir toprak arızası halinde cihaz gövdesinin potansiyelinin 40 V'den fazla olmaması ve arıza akımının sigorta nominal akımının üç katı olması istenir. Bu normal bir sigorta için takriben 10 saniyelik bir açma zamanına tekabül eder (Şekil 23). Bu şart altında muhtelif sigorta nominal akımları için tekabül eden minimum toprak devresi dirençleri Tablo 4'de verilmiştir.

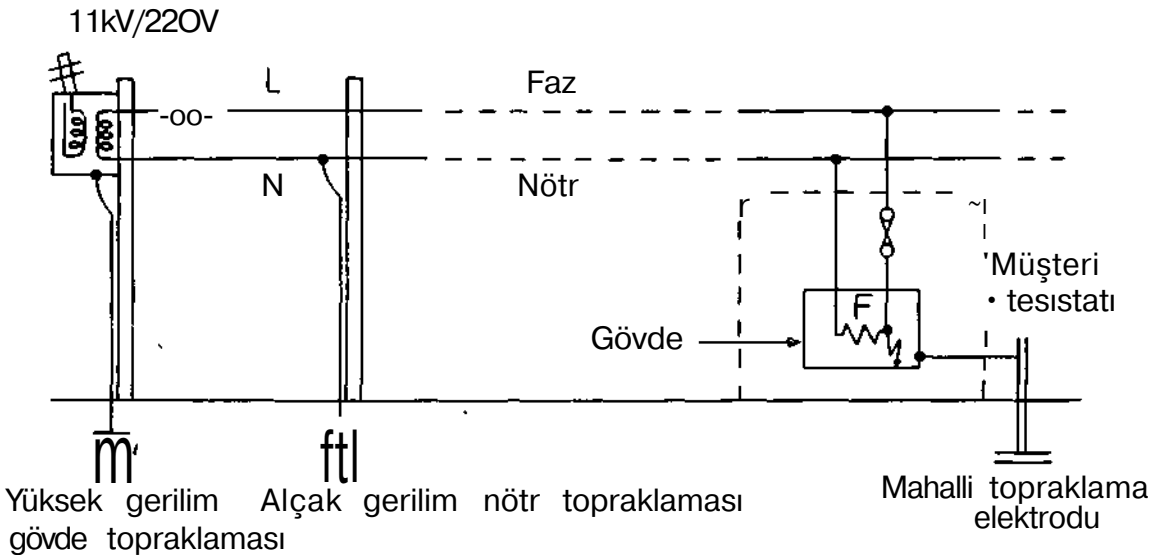
Tablo 1.

Müsaade edilebilir toprak devresi direnci :	Sigorta nominal akımı I_n (A)	Toprak devresi direnci = $220/3 \times I_n$ (n)
	10	7,33
	30	2,45
	60	1,22
	100	0,73

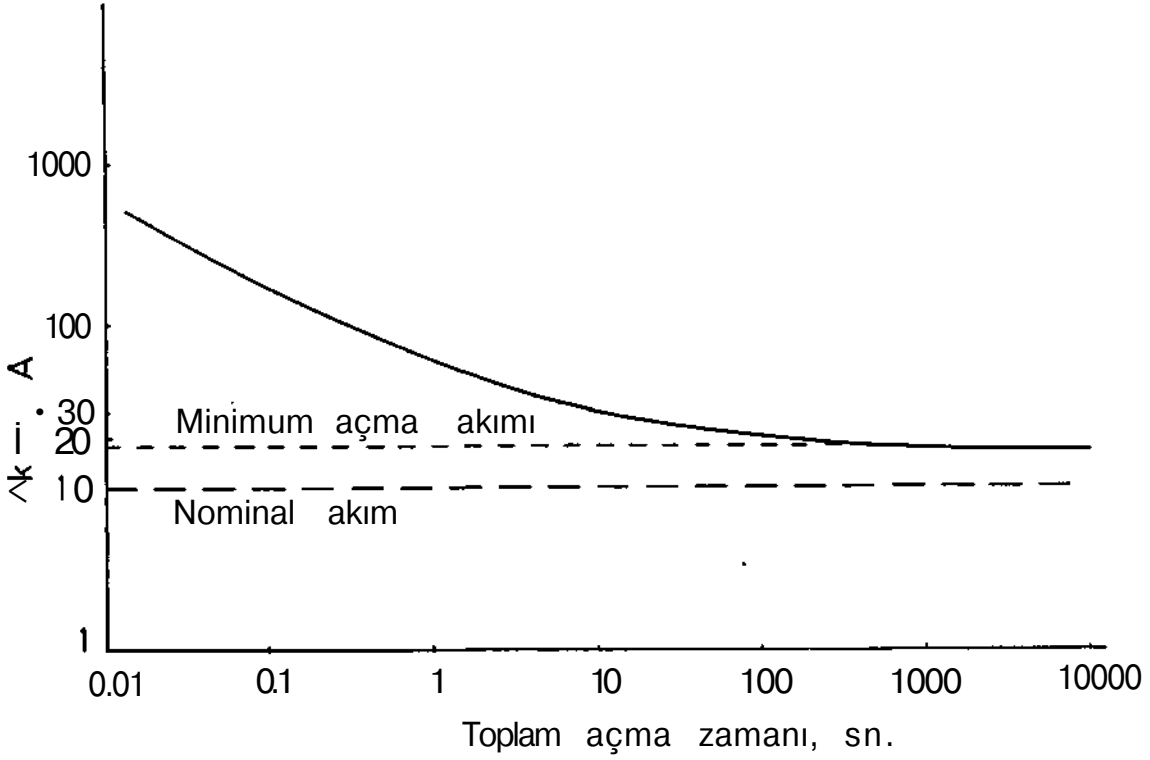
Yukardaki tabloda verilen düşük topraklama direnç değerlerinin en iyi toprak şartlarında bile sağlanması zor ve hatta imkânsız gibidir. Su şebekesine yapılan bağlantılarla düşük dirençli topraklamalar sağlamak kabildir. Son zamanlarda birçok ülkelerde plâstik su borularının kullanılmaya başlanması topraklama problemini menfi yönde etkilemeye başlamıştır.

11.2. Toprak teli :

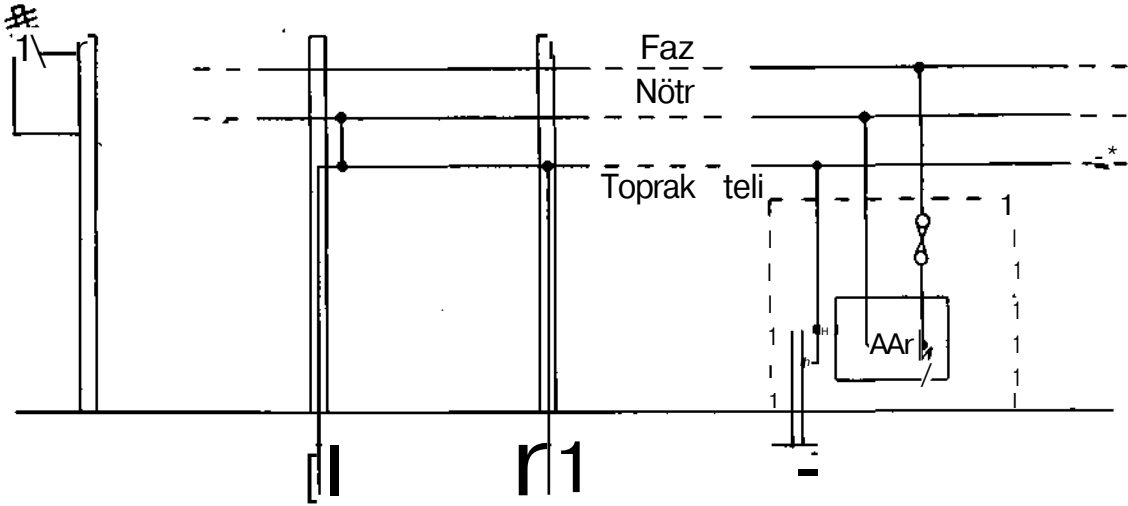
Bu sistemde bir arıza halinde arıza akımına düşük dirençli bir yol sağlama bakımından faz ve nötr iletkenlerine ilâveten üçüncü bir topraklama teli çekilir (Şekil 24). Herhangi bir sebeple topraklama telinde bir kopma olması halinde kaza riskini azaltmak için müşterinin tesisatında mahalli topraklamanın yapılması yine lüzumludur. Nitekim, toprak telindeki bir kopma bir arıza anına kadar farkedilmeyebilir. Bu İhtima



Şekil 22. Basit bir topraklama sistemi.



Şekil 23. Tipik Ur sigorta karakteristiği



Şekil 24. Toprak telli topraklama sistemi.

11 alztmak için de toprak teli güzergâh boyunca mümkün olduğu kadar çok noktada topraklanır. Bu metod elektriksel eşdeğer bakımından kablo sistemine benzer. Bu tür topraklama sisteminin başlıca mahzuru oldukça pahalı olduğudur.

11.3. Koruyucu röleli topraklama:

Şekil 25'de görüldüğü gibi, bu tür topraklama sisteminde bir arıza esnasında kaçak gerilim etkisi ile çalışan bir devre kesici devreyi açmaktadır.

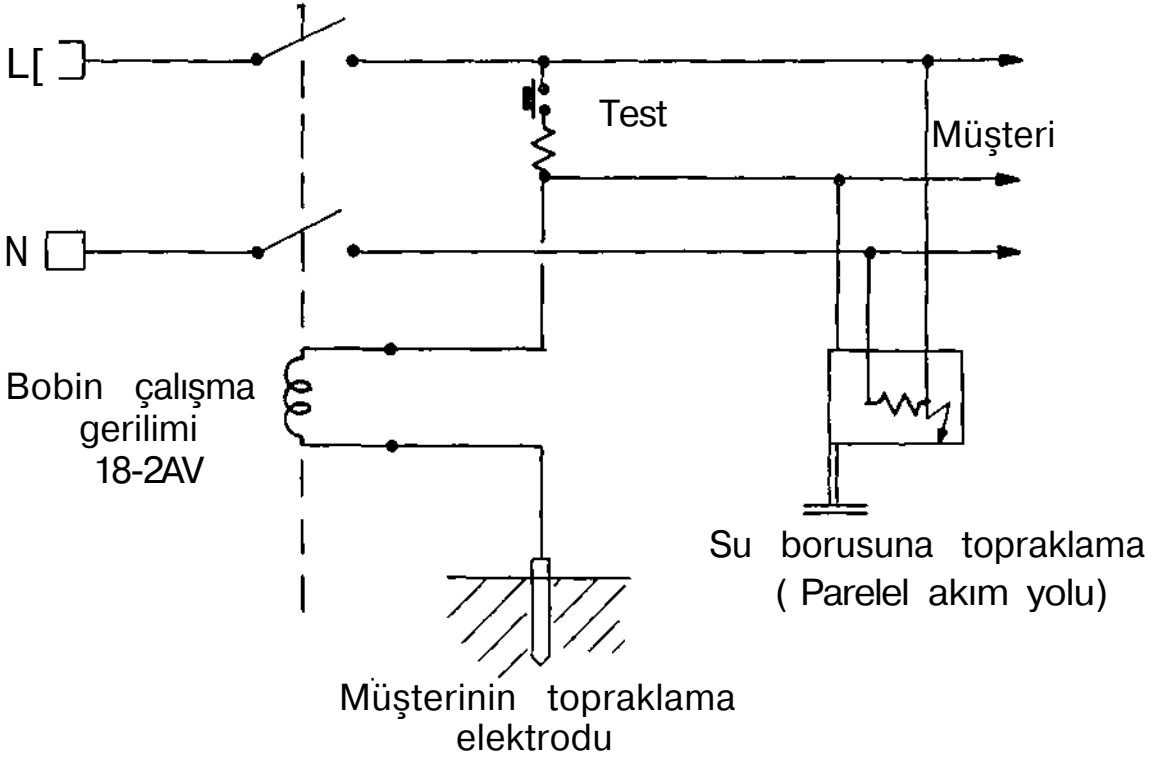
Arıza akımı etkisi ile çalışan devre kesiciler de mevcut olup kaçak gerilim etkisi ile çalışan kesicilere göre daha avantajlıdır. Devre kesici müşterinin tesisatına bağlanmaktadır. Bu kesicilerin faydalanması hassas olmalı ve devreyi süratle açmaları, mahzuru ise pahalı olduğudur.

11.4. Nötrleme:

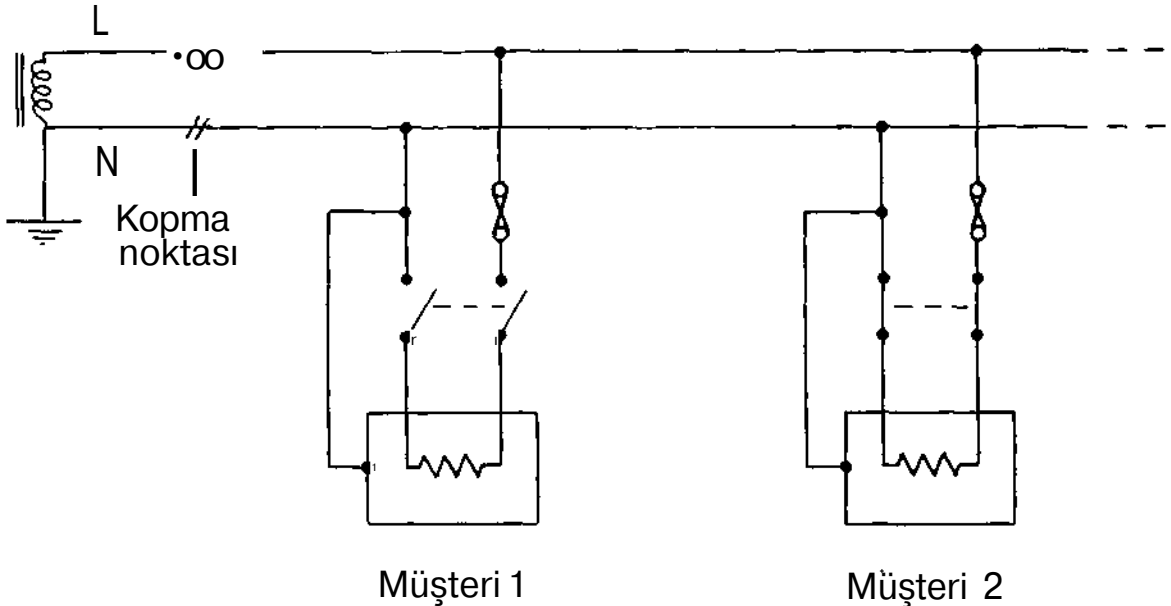
Düğünülebilir bir topraklama sistemi de müşterinin tesisatındaki cihazların gövdelerinin nötre

bağlanmasıdır (Şekil 26). Çok ucuz olan bu sistemde bir arıza halinde arıza akımı nötr iletken üzerinden devresini tamamlar. Bu metod, nötr iletkeninde ibir kopma veya kötü temas direnci gibi ihtimaliler olmasaydı en ideal topraklama metodu olacaktı. Ancak, kopma ve kötü temas;

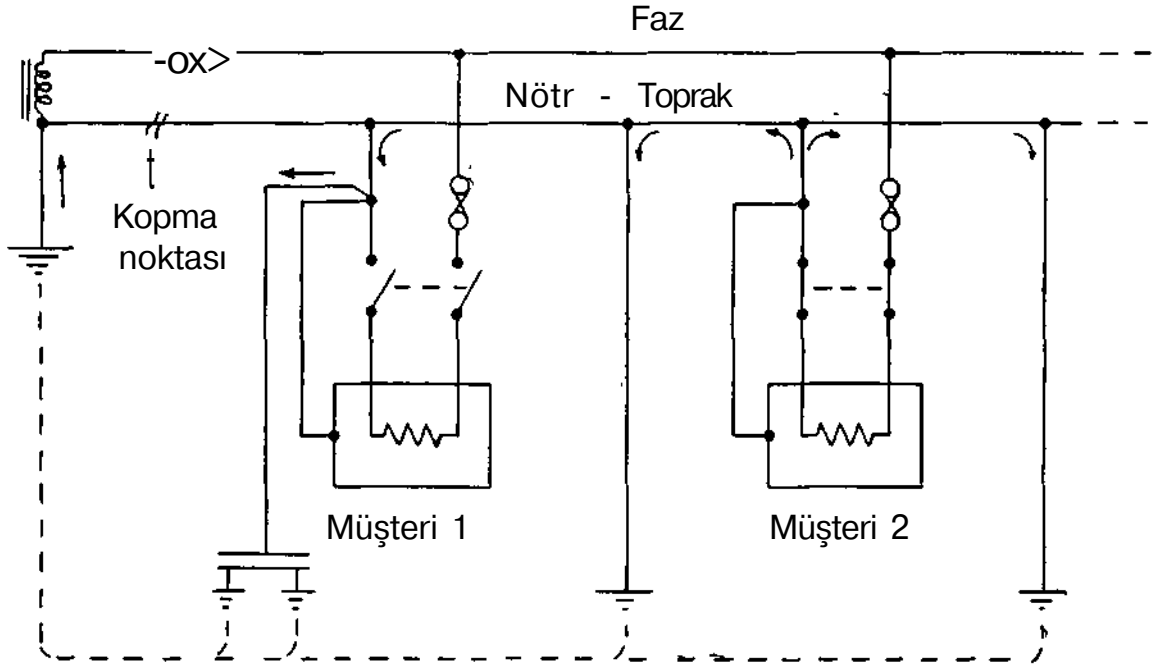
nötrün çalınması ve korozyon gibi hallerde dalma bahis konusudur. Nötrde bir kopma halinde nötrlenmiş bütün cihaz gövdelerinin faz potansiyeline yükseleceği ve çalışanlar için büyük bir tehlike arzedeceği açıktır. Bu nedenle bu tür topraklamanın yapıması bir çok ülkelerde yasaklanmıştır.



Şekil 25. Anza gerilimi etkisiyle çalışan devre kesici.



Şekil 26. Nötrieme.



Şekil 27. Koruyucu çoklu topraklama sistemi

11.5. Koruyucu çoklu topraklama :

Nötrleme sisteminin mahzuru, nötr iletkeninin güzergah boyunca mümkün olduğu kadar çok noktada topraklanması ile giderilebilir. Buna koruyucu çoklu topraklama denilmektedir (Şekil 27), Nötr iletkeninde bir kopma halinde anıza ve normal akın dönüğünü topraktan yapabilir. Böyle bir sistemde nötr iletkeninin kesiti küçük seçilmemelidir. Nötr iletkeninin herhangi bir noktada topraklama direnci 10Ω 'dan büyük olmamalıdır. Bu tür topraklama yapılmadan telekomünikasyon sistemine muhtemel etkisi bakımından PTT ile istişjare edilmelidir.

Koruyucu çoklu topraklama sistemi oldukça tercih edilmekte ve kablo sisteminde de kullanılmaktadır. Bu halde, faz ve nötr iletkenlerinin bir kılıf içinde yapıldığı eski 4 iletkenli kablo yerine daha ucuz ve sadece faz iletkenlerini madeni bir kılıfla kugatan yeni tip 3 iletkenli kablo kullanılmaktadır. Topraklı madeni

kılıf aynı zamanda nötr vazifesini de görmektedir.

12. KAYNAKLAR :

1. Tagg, G. F.: «Earth Resistances» (NeVmes 1964).
2. Tagg, G. F.: «Resistance of Large Earth-Electrode Systems», Prac. LEE, 1972, Vol. 119, S. 269-272.
3. AIEE Committee report, «Voltage Gradients through the Ground under Fault Conditions», Trans AIEE, Vol. 77 m, 1959, S. 669-692.
4. Fordham Cooper, W.: «Electrical Safety in Industry», IEE Reviews, "Vol. 117, August 1970.
5. Mather, F.: «Earthing Low-and Medium-Voltage Distribution Systems and Equipment» Proc. IEE, 1958, Vol. 105 A, S. 97-106.