

topraklama sisteminin tasarımı, yapımı ve ölçümü

Yazan:

p. g. laurent

Çeviren:

kental bahırcıoğlu

UDK: 621.316.991

ÖZET

Standardlaştırmaya yönelik bu çalışmada yazar, yalıtıklık arızasındaki akım ve gerilimlerin hesabı için bir yöntem getirmiştir. İncelemede homojen ve homojen olmayan arazilerdeki topraklama elektrotlarının tasarımı ile elektrotlar arasındaki kuplaj etkileri kısaca anlatılmış ve topraklama elektrotlarındaki teknolojik gelişmelerle elektrotların empedansı üzerindeki pratik veriler verilmiştir. Ayrıca insan vücudundan akan akım üzerinde durulmakta ve yazı topraklama elektrotlarının ölçümü ile son bulmaktadır.

SUMMARY

The article which is written with a view to achieve standardization in grounding system design describes a basic method for calculating currents and voltages during and insulation failure. The design procedure for earth electrodes both in homogeneous and in inhomogeneous media is outlined and the problem of interlinking of electrodes is dealt with. Practical data on the impedance of electrodes is given and improvements in electrode technology are discussed. The article deals with the problem of electric current flowing through the human body and ends with the methods of measurements on the earth electrodes.

1. TOPRAKLAMANIN KONUSU ve SINIFLANDIRMA

Sistem ve elektrik tesislerinde topraklama, hem sistemin toprak arızasındaki işleyişini etkilemek, hem de arıza noktasının yakınındaki kişilerin güvenliğine katkıda bulunmak için yapılır.

Bazan birinci duruma işletme (servis) topraklaması, ikincisine de güvenlik (koruyucu) topraklaması dendiği olur.

Birinci bölüme özellikle nötr iletkenleri yada uçlarının topraklanması girer. Böylece sistemin

P.G.Laurent, EdF.
Kemal Bakırcıoğlu, TEK.

Révue Générale De L'Electricité
Temmuz-Ağustos 1972, Cilt 81, No.7-8, s.453-467 ve
Eylül 1972, Cilt 81, No. 9, s. 563-572.

bir noktasında olacak kısa devrede; akacak akımın, sağlam faz gerilimlerinin ve korumaların işlevinin saptanması kolaylaşır.

İkinci bölüme, sisteme bağlı tesislerdeki metal gövdelerin topraklanması girer. Bu topraklama ile yalıtıklık arızalarından (gövde kaçıklarından) doğan akımların toprağa akıtılması kolaylaştırılarak arızalı gövdenin toprağa yada komşu gövdelere göre geriliminin yükselmesi önlenir. Ayrıca kesici ve sigortanın çalışmasıyla gerilim yerel olarak temizlenir.

Kişilerin ölümüne yolaçan kazaların çoğunluğu yalıtıklık arızası sonucu gövde gerilimlerinin yükselmesinden doğmaktadır. Tehlike arıza süresince kişinin yerel durumu ve hareketleriyle belirlenmektedir. Kazalardan kaçınmak için aygıtların yalıtıklığına gösterilecek özenden başka güvenlik için en etkili yöntem, arızanın süresini otomatik hızlı koruyucularla en aza indirmektir. Bu önlem, uygulandığı sistemlerde çoğunlukla yeterli olmakta ve gerilim farklarının tehlikeli değerlere ulaşması önlenmektedir.

İki topraklama türü arasındaki ayrılık mutlak bir kavram değildir. Çoğunlukla bir merkezde aynı topraklama hem nötr uçları hem de metalik gövdelerin topraklamasını sağlar ve arıza akımı güvenli topraklaması üzerinden toprağa akıp işletme topraklaması üzerinden sisteme döner. Bu akımın düzeyi iki topraklamanın direnci tarafından belirlenir.

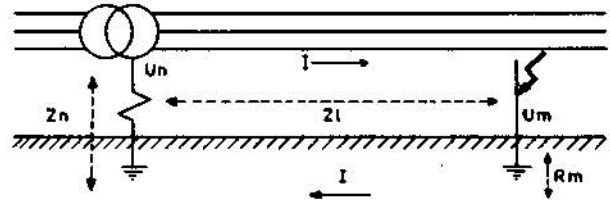
2. YALITKANLIK ARIZASINDA AKIM ve GERİLİMLERİN BULUNMASI

2.1. Tek Faz Toprak Arızası

Arıza öncesinde faz toprak arasında var olan gerilimi U ile gösterelim. Arıza akımı I geriliminin sistem ve topraktan oluşan halkanın empedansına oranıdır. Bu empedans kısa devrenin olduğu iki nokta arasındaki görünen empedanstır. Nötrün tek noktada topraklandığı basit durumda görünen empedans aşağıdaki üç ögenin toplamından oluşur (Şekil 1):

- Arıza ile nötr noktası arasındaki ZL hat empedansı
- Arıza akımının toprağa üzerinden aktığı Rm yerel topraklama direnci
- Akımın üzerinden tekrar sisteme döndüğu Zj, nötr topraklama empedansı.

I arıza akımı, U_n gövde gerilimi ve U_m nötr noktası gerilimi aşağıdaki gibi yazılabilir:



Şekil 1. Faz toprak arızasının gösterimi.

$$I = \frac{U}{R_m + Z_L + Z_n} ; U_m = \frac{U \cdot R_m}{R_m + Z_L + Z_n} ;$$

$$U_n = \frac{U \cdot Z_n}{R_m + Z_L + Z_n}$$

Üç fazlı sistemde $Z_L + Z_n$ toplamı sistemin arıza noktasından görünen pozitif, negatif ve sıfır dizi empedanslarının ortalamasıdır.

Aşağıda çok sayıdaki gerçek durumu yansıtan üç sınır durumu incelenecektir.

2.1.1. Hat empedansı topraklama empedanslarının yanında çok küçüktür

Yukarıda bulduğumuz bağıntılar aşağıdaki biçimi alır:

$$I = \frac{U}{R_m + Z_n} ; U_m = \frac{U \cdot R_m}{R_m + Z_n} ; U_n = \frac{U \cdot Z_n}{R_m + Z_n}$$

Arıza öncesinde varolan gerilim gövde ve nötr arasında empedansları oranında paylaşılır. Burada da iki sınır durumu vardır.

2.1.1.1. Gövdelerin topraklama empedansı daha etkindir

$$I = \frac{U}{R_m} ; U_m = U ; U_n = U \cdot \frac{Z_n}{R_m}$$

- Arıza akımı gövdelerin topraklama direnciyle ters orantılıdır.
- Gövde pratik olarak faz gerilimine yükselir.
- Nötr noktasındaki gerilim yükselmesi düşüktür ve nötrün topraklama empedansı ile orantılıdır.

Bu durum çoğunlukla nötrü doğrudan topraklı şebekelerde toprak direnci büyük kısa devrelerde görülür. Bu durumda gövde gerilimlerinin tehlikeli değerlere ulaşmasını önlemek olanaksızdır ve güvenliğin sağlanmasındaki ilk koşul arıza akımıyla hızlı koruyucuların duyarlılığı arasında yapılacak bir koordinasyondur. Çalışma akımı I_p olan bir koruma için bu koşul ancak U/I_p den küçük dirençli arızalarda gerçekleştirilebilir.

2.1.1.2. Nötr topraklama empedansı daha etkindir

$$I = \frac{U}{Z_n} ; U_m = U \cdot \frac{Z_L}{Z_n} ; U_n = U$$

- Arıza akımı pratik olarak gövde topraklamasının direncinden bağımsızdır.
- Nötr noktasının gerilimi pratik olarak faz gerilimine yükselir ve buna bağlı olarak da sağlam fazların gerilimi faz arası gerilime ulaşır.
- Gövde gerilimi topraklama direnciyle orantılıdır.

Bu durum çoğunlukla nötrü büyük bir empedans üzerinden topraklı yada tamamen yalıtılmış (bu du-

rumda akım sisteme toprak ve sağlam fazlar arasındaki kapasitanslar üzerinden döner) sistemlerde görülür. Bu durumda gövde gerilimlerinin tehlikeli değerlere ulaşması önenebilir. Arızanın en kısa zamanda giderilmesi istenir. Çünkü ikinci bir arızada sağlam fazların toprağa olan gerilimleri faz arası gerilimlere yükselir ve aygıtlar için tehlike yaratır. Bu durumun da kesinlikle önlenmesi gerekir.

2.1.2. Hat empedansı topraklama empedanslarından daha etkindir

$$I = \frac{U}{Z_L} ; U_m = U \cdot \frac{R_m}{Z_L} ; U_n = U \cdot \frac{Z_n}{Z_L}$$

Bu durum nötr ve gövde topraklaması dirençleri düşük sistemlerdeki dirençsiz faz toprak arızalarında görülür.

- Gerilimin büyük bir bölümü kaynak ve hatta yutulur.
- Akım arızanın kaynaktan elektriksel uzaklığıyla ters orantılıdır.
- Gövde ve nötr noktasındaki gerilim yükselmesi çok düşüktür.

2.1.3. Ara durumlar

Gerçek arızalar yukarıda anlatılan üç durum arasında yer alır, fakat çoğu kez birine yada diğerine yaklaştığı görülür. Önce yukarıda tanımları yapılan empedanslar hesaplanmalı, sonra da; korumalarla arıza akımları arasındaki koordinasyon sağlanmalıdır.

2.2. İki Faz Toprak Arızaları

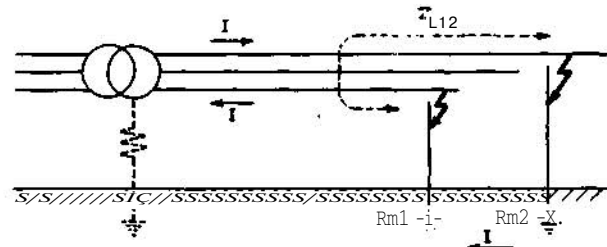
2.2.1. Arızalar aynı gövdededir

Güvenlik yönünden bu tür arızalar tek faz toprak arızalarına göre daha az tehlikelidir. Çünkü, hem toprağa akan akım tek faz toprak arızasındakinden daha az, hem de fazlar arası kısa devre akımının koruyucu aygıtları çalıştırma olasılığı daha fazladır.

2.2.2. Arızalar ayrı gövdelerdedir

2.2.2.1. Şebekenin üç fazının bağımsız olduğu düşünülebilir

Bu durumda her topraklama elektrotundan akan akım pratik olarak tek faz toprak arızalarındaki değerindedir. Bu koşullara nötrü doğrudan topraklı sistemlerde raslanır.



Şekil 2. Nötrü büyük bir empedans üzerinden topraklı sistemde farklı fazlardaki iki toprak arızası durumu.

2.2.2.2. Sistemin nötrü ya yalıtılmış yada büyük bir empedans üzerinden topraklanmıştır

Nötr ve toprak arasındaki bağıın etkisini yok sayabilir ve arızalı fazlar arasındaki arıza öncesi gerilimin iki gövdenin topraklamalarıyla gövdeleri birbirine bağlayan devre arasında empedanslarıyla orantılı olarak bölüşüldüğünü düşünebiliriz (Şekil 2).

Eğer hat empedansları küçükse, gerilimin büyük bir bölümü iki gövdenin topraklamaları arasında bölüşülür. Gövde topraklama dirençleri büyük eşitsizlik gösteriyorsa, büyük dirençli topraklamanın gerilimi faz arası gerilime ulaşabilir.

2.2.2.3. Ara durumlar

Gerçek ise çoğunlukla yukardaki üç durumun arasındadır. Gövdelerden birinin gerilimi faz toprak gerilimini aşabilir. Ancak hızlı korumaların kullanıldığı sistemlerde aynı zaman aralığında iki arıza olasılığı çok az olduğundan bunun topraklama devrelerinin hesabında göz önüne alınması pek bir yarar sağlamaz.

3. TOPRAKLAMA ELEKTROTLARININ HESABI ÜZERİNE

3.1. Akımların Toprak İçindeki Dağılımı

Toprak; üç boyutlu ve türdeş (homogen) olmayan bir ortamdır. Toprak özgül direncinin yüzey ve derinliğine değişmesi kesin değerlerin saptanmasını güçleştirmekte, bu yüzden de akımların dağılımı tam doğru hesaplanamamaktadır. Bu koşullar bizi yalın (basit) hesaplamalarla yetinmeye zorlamakta ve bu hesaplamaların yaklaşıklıkla değişkenlerin değerlerindeki belirsizlikle orantılı olmaktadır.

Genel olarak topraklama elektrotu üzerinden toprağa akan alternatif akım sisteme tekrar dönerken devre empedansını en aza indiren yolları arar. Akım, topraklama elektrotu etrafında kendisine açık her yönde yayılmaya başlar sonra akım ağları eğilir ve kendisini taşıyan hat boyunca alta yayınık bir bölgede toplanır. Bu dağılıma iki zıt etkenin sonucudur. Akım ağlarının seyrekleşmesi gerilim düşümünü azaltır. Ancak akım ağları kendisini taşıyan iletkenlere ne kadar yaklaşırsa; iletken ve ağlardan oluşan halkanın endüktansı da o kadar azalır. Akım ağlarının seyrekliği öyle bir değere ulaşır ki bu iki etki aralarında dengelenmiştir. Akımlar toprağın özgül direnci arttıkça derine gitme eğilimindedir, tersine frekans artarsa akım toprağın yüzeyine doğru yığılır. Tanım olarak 50 Hz'de toprak içindeki dönüş akımının ağ örtüsü belirli bir derinliğe yerleştirilmiş tekyönlü uzanan iletkene benzetilebilir. Derinlik toprağın özgül direncine bağlı olarak mil başına birkaç yüz metredir. Devrenin empedansı akım taşıyan hattın pozitif ve sıfır bileşen empedanslarının ölçümünden çıkarılabilir.

50 Hz'de akım ağlarının nüfuz ettiği büyük derinlik, ağların elektrot etrafında radyal olarak ya-

yıldıği bölgenin elektrotun fiziksel boyutları yanında büyük olan bir uzaklığa kadar uzandığını kanıtlar. Bu yüzden elektrotun empedansı genellikle akım dönüşü sonsuz uzaklıktan ve her yönden oluyormuş gibi hesaplanır.

Yeter genellikteki bir yöntem ise, topraklama elektrotu empedansının pratikte direncine indirgenmesidir. Kapasitif ve indüktif etkiler yalnız çok sarp alınlı akım dalgalarında görülür. Etki biraz uzun gömülü iletkenlerde indüktif, özgül direnci çok yüksek kayalıklarda ise kapasitif niteliklidir.

3.2. Elektrotu Belirleyen Elektriksel Büyüklükler

Topraklama elektrotundan akan I akımı elektrotla uzaktaki toprak arasında bir U gerilimi doğurur. U/I oranı topraklama elektrotunun R direncini verir.

Bu direnç; U gerilimi ve korumaların işlevinin bağlı olduğu toprağa akan akımın bulunmasında bir yardımcı öğedir. Aynı anda dokunulabilecek kadar fiziksel olarak birbirine yakın noktalar arasındaki gerilimler güvenlik yönünden sorun yaratır. Metalik bir bağlantı üzerinden (bir telefon hattı, AG şebekesi, yalıtılmış metalik kanal, vb.) uzaktaki toprağın gerilimi tesis içine yada tesis içindeki gerilim uzağa taşınırsa; U gerilimi güvenlik konusunda doğrudan rol alır.

Elektrotun etrafındaki toprağın gerilimi azar azar $U = RI$ değerinden sıfıra kadar düşer. Elektrot merkezinin X kadar uzağındaki gerilimi (U_x) ve buna karşılık olan yerel gradyeni ($dü/dx$) kolayca tanımlayabiliriz:

Gerilim gradyeni topraktaki adım gerilimini belirler. Topraklama elektrotlarının hemen yakınında adım gerilimleri en büyük değerdedir. Adım gerilimleri kişi için her zaman en büyük tehlike değildir. Bu gerilimler özellikle dört ayaklı büyük hayvanlar için tehlike yaratır. Ancak vücudun iki noktadan temasında; örneğin birincisi elektrotların bağlı olduğu yapı (gerilimi U), ikincisi elektrottan X uzaklıktaki toprak (gerilimi U_x) durumunda tehlike $U - U_x$ gerilimiyle orantılı olacaktır. Bu gerilim farkı olasılığı az da olsa U toplam geriliminin önemli bir bölümüne ulaşabilir. Bu yüzden elektrotun boyutları tehlike konusunda belirleyici bir rol oynar.

3.3. Homojen Bir Toprak Yüzeyine Yerleştirilmiş Yarıküre Elektrot Durumu

Bu basit durum burada referans amacıyla incelenmiştir. Akım ağları tüm yönlerde radyal olarak yayılır. Eşgerilimli yüzeyler aynı merkezli (konsantrik) yarıkürelerdir ve bunların toprak üzerindeki izdüşümleri daireseldir (Şekil 3).

Yarıküre elektrotun yarıçapı $r(m)$, dışardaki bir noktanın merkeze uzaklığı $x(m)$, toprağın özgül direnci $p(ohm\cdot m)$ ve akan akım $I(A)$ olsun.

X noktasındaki akım yoğunluğu ve gerilim gradyeni aşağıdaki gibidir:

$$J_x = \frac{I}{2\pi x^2} \quad (A/m^2) ;$$

$$e_x = \frac{\rho I}{2\pi x^2} \quad (V/m)$$

Görüldüğü gibi akım yoğunluğu ve gerilim gradyeni elektrot merkezine olan uzaklığın karesiyle ters orantılı değişiyor.

Sonsuzdan başlayarak x noktasına kadar gradyenin integrali alınırsa x noktasının gerilimi bulunur:

$$U_x = \frac{\rho I}{2\pi x} = 0,16 \rho I/x$$

Gerilim merkeze olan uzaklıkla ters orantılıdır ve elektrotun yarıçapına bağlı değildir.

I akımının akmasıyla elektrotun yükseleceği gerilim;

$$U = - \int_{\infty}^r e_x dx = 0,16 \rho I/r \text{ dir}$$

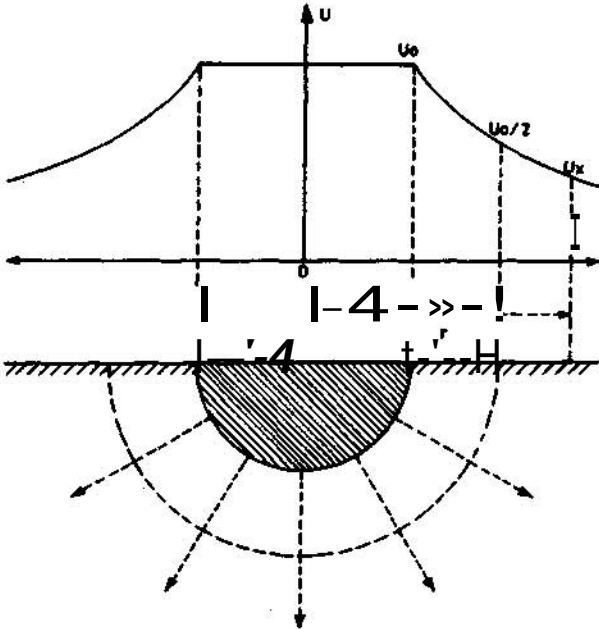
Akının elektrot yüzeyinden başlayarak sonsuza kadar akmasına karşı koyan direnç de;

$$R = \frac{\rho}{2\pi r} = 0,16 \rho/r \text{ dir.}$$

Direnç ayrıca özgül direncin yarıküre elektrotun toprak içindeki P çevresine oranıdır;

$$R = \rho/P \text{ yada } RP/p = 1$$

Bu direncin r/x bölümü x uzaklığının ötesindeki akımın akışına ve 1 - r/x bölümü ise elektrotla x uzaklığı arasındaki akımın akışına karşılıktır. Burada belirtilmesi gereken diğer bir önemli nokta; toplam gerilimin yarısının elektrot yüzeyi ile merkezden çap uzaklıktaki çember arasında tüketilmesidir.



Şekil 3. Homojen arazide yarıküre topraklama elektrotu.

3.4. Homojen Topraktaki Her Tür Elektrota Uygulanabilecek Genel Kavramlar

Genel anlamda; topraklama elektrotundaki gerilim düşümünü bir yana bırakırsak, elektrotun en dış yüzü eşgerilimlidir ve topraktaki ilk eşgerilimli yüzeyler de elektrot yüzeyi biçimindedir. Elektrottan uzaklaşıldıkça düzensizlikler azalır ve eşgerilimli yüzeyler yavaş yavaş aynı merkezli yarıküreler biçimini alır. Elektrot merkezinden x uzaklıktaki toprağın gerilimi de giderek

$$U_x = 0,16 \rho I/x \text{ değerine yaklaşır.}$$

Bu gerilim elektrotun biçim ve boyutlarına bağlı değildir.

Bu yaklaşım elektrot direncinin bulunmasına yetmez. Ancak şu hatırlatmada bulunulabilir: Eğer elektrot bir yarıküre çerçeve içine sokulursa elektrotun direnci karşılığı olduğu yarıküre elektrotun direncinden daha büyük olacaktır.

Yine de daha küçük, eşdeğer bir yarıküre elektrot daima bulunabilir. Öyle ki yarıçapı r_e ve çevresi P_e olan eşdeğer yarıkürenin p/P_e direnci sözü edilen elektrotun direncine eşit olsun. Elektrottan akan akımların biraz uzaktaki etkileriyle ilgilenebiliyorsa; hesaplarda elektrotların kendileri yerine yarıküre eşdeğerlerinin alınması kolaylık sağlar.

Ayrıca elektrotun biçimi ne olursa olsun direnci aşağıdaki genel yasalara uyar:

3.4.1. Verilen boyut ve biçimdeki bir elektrotun direnci toprağın özgül direnciyle doğru orantılıdır

Gerçekten toprağın özgül direncinin azalıp çoğalması akım ağlarının dağılımını etkilemez, ancak belirli bir akımdaki yerel gerilim düşümleri özgül dirençle orantılı değişir.

3.4.2. Benzer elektrotların direnci doğrusal boyutlarla ters orantılı değişir

Akımın geçiş kesitleri doğrusal boyutların karesiyle, akım yolunun uzunlukları doğrusal boyutlarla orantılı değişir. Gömülme derinlikleri doğrusal boyutlarla orantılıysa dirençler arasında mükemmel bir orantılılık (homoteti) vardır.

3.4.3. Elektrot biçim yönünden yatay bir düzleme göre simetriksej elektrotun sonsuz derinliğe gömüldüğündeki direnci yarıgömülü durumdaki (elektrotun yarısı toprak içinde yarısı dışında) direncinin yarısına eşittir

Gerçekten sonsuz derinlikteki gömülme akım ağlarının içinden aktığı yarıgömülü durumdaki hacme tümüyle simetrik bir hacim daha katar.

Burada; gömülü elektrotu toprak yüzeyine birleştiren bağlantının topraktan yalıtıldığı varsayılmıştır. Yoksa bu bağlantı akımın akmasına yardımcı olur ve elektrotun parçası gibi düşünülmesini gerektirirdi.

3.4.4. Çok uzun biçimli elektrotların direnci hemen hemen uzunlukla ters orantılı değişir ve diğer yan boyutlara çok az bağlıdır

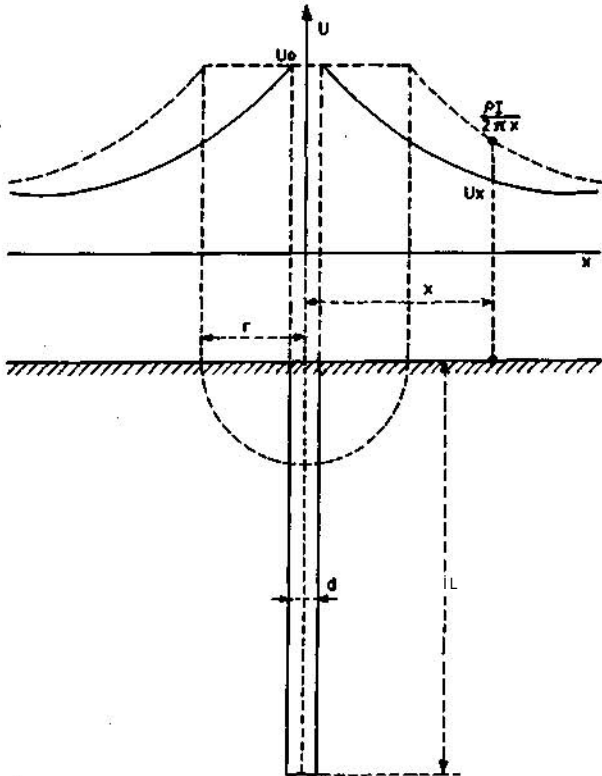
Bu nitelik 3.5 bölümünde verilecek olan bağlantıların bir sonucudur. Elektrotun doğrusal boyutları hemen hemen aynı oranda artırılarak toprağın daha büyük özgül direncinin etkisi giderilebilir. Bu elektrotlar özellikle çok dirençli araziler için uygundur.

3.5. Düşey Yerleşik Uzun Bir Silindirik Elektrot "Durumu"

Bu durum, tüm küçük çaplı ve büyük uzunluktaki gömülü iletkenlerden oluşan topraklamalar için temel olabilir:

Çapı $d(m)$ ve uzunluğu $L(m)$ olan bir düşey çubuğun tepesi, $\rho(\text{ohm-m})$ özgül dirençli homojen arazinin yüzeyi ile aynı düzlemde olsun (Şekil 4). Elektrot direncinin yaklaşık değeri şöyle olacaktır:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln 3 L/d = 0,366 \frac{\rho}{L} - \log 3L/d$$



Şekil 4. Aynı dirence sahip yarıküre elektrot ve düşey silindirik elektrot.

L yada d değeri iki kat artırıldığında logaritmik terim 0,3 kadar artar yada azalır. Uzunluk çapın 100 katıysa, logaritmik terimdeki değişme çok küçüktür. Bu durumda direnç çaptan bağımsız olarak uzunlukla ters orantılı değişir.
 $L = 200 d$ için;

$$R = \rho/L \text{ yada } RL/\rho = 1 \text{ olur.}$$

Toprağın özgül direncindeki belirsizlikleri düşürsek L/d oranının 50 ila 1000 arasındaki değerleri için bu yasa pratikte çok yararlı olabilir. RL/ρ oranının daha gerçek değerleri aşağıya çıkarılmıştır:

$$L/d = 50, 100, 150, 200, 300, 500, 1000$$

$$- \wedge = 0,80, 0,91, 0,97, 1,02, 1,08, 1,16, 1,27$$

Bu yüzden RL/ρ terimi değişken olmaktan uzaktır ve alışılmış uzunluktaki çubuklar için bir dolaşındır. İlerde bu terimin büyük uzunluktaki gömülü iletkenler için değişik değerler aldığını göreceğiz. Düşey çubuklar durumunda çubukların çap karşısında göreceği bir değişmezliği vardır.

RL teriminin tersi çubuğun metre başına olan konduktansdır (G/L) ve $1/\rho$ değerindedir.

Yine bir çubuk elektrotun direncinin, toprak yüzeyindeki çevresi çubuk uzunluğuna yada yarıçapı bu uzunluğun altıda birine eşit olan bir yarıküre elektrotun direnciyle aynı düzeyde olduğunu göreceğiz.

Elektrotun RI gerilimi, toprağın özgül direncinin uzunluğunun metresinden akan akım ile çarpımına ($\rho I/L$) yakındır.

İletkenin yüzeyinin yakınında; eşgerilimli yüzeyler göze çarpacak biçimde aynı merkezli (konsantrik) silindirlerdir. Uzunluğunun metresinden akan akım $i(A/m)$ ise; eksenin x kadar uzağındaki akım yoğunluğu ve gerilim gradyanı aşağıdaki gibidir:

$$J_x = \frac{i}{2\pi x} \text{ (A/m}^2\text{)},$$

$$G_x = \rho \frac{i}{2\pi x} \text{ (V/m)}$$

Elektrot yüzeyinin x kadar uzağındaki gerilim düşümü gradyanın integrali alınarak bulunabilir:

$$U - U_x = 0,366 \pi \log \frac{2x}{d} \text{ (V)}$$

Çok fazla kötümser olunmadan i , I/L 'ye eşit alınırsa, yapılacak hata oldukça düşüktür. Bu durumda şöyle yazabiliriz:

$$\frac{U - U_x}{U} = \frac{\log 2x/d - \log L/d}{\log 3L/d - \log L/d}$$

Bu formüller pratik olarak, akım ağlarının akışının silindirik bir dağılımı olduğu sürece yani çubuk uzunluğunun dörtte birine kadar olan uzak-

lıklar için geçerlidir. $x/L = 0,2$ ve $L = 200 d$ için (örneğin 5 m uzunlukta ve 2,5 cm yarıçaplı bir çubuktan 1 m uzaklıktaki nokta için) elektrotla x noktası arasındaki gerilim düşümü toplam gerilimin 2/3 değerindedir.

3.6. Topraklama Elektrotunun Direncinin Bulunması

3.6.1. İnce gömülü levha

Yarıçapı r ve gömülme derinliği h olan bir dairesel levhanın (Şekil 5) yaklaşık direncini şöyle yazabiliriz:

$$R = \frac{\rho}{8r} \left(1 + \frac{r}{2,5h+r} \right)$$

Çevreyi P ile gösterirsek formül aşağıdaki biçimi alır:

$$R = \frac{0,8\rho}{P} \left(1 + \frac{P}{16h+P} \right)$$

Bu ikinci formül, kare yada uzunluğu genişliğinin iki katından fazla olmayan dikdörtgen levhaların yaklaşık direncinin bulunmasında da kullanılabilir. Çok dar (ince uzun) levhalarda gerçek direnç formülle bulunan değerden biraz fazladır.

Yüze çok yakın bir levha durumunda formül aşağıdaki biçimi alır:

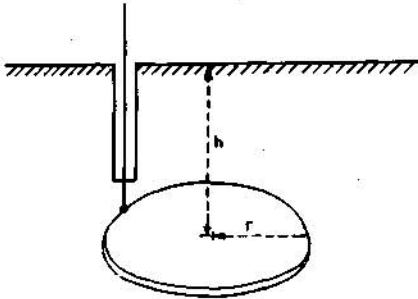
$$R = \frac{1,6\rho}{P} \quad \text{yada} \quad \frac{RP}{\rho} = 1,6$$

Gömülme derinliği çevrenin dörtte birinden fazlaysa;

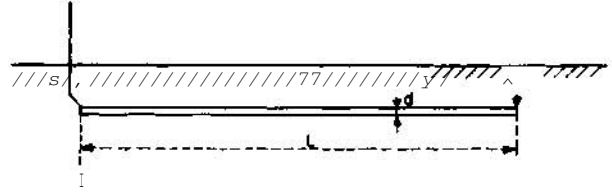
$$R = \frac{0,8\rho}{P} \quad \text{yada} \quad \frac{RP}{\rho} = 0,8 \quad \text{alınabilir.}$$

Eşdeğer yarıküre elektrotun çevresi levhanın çevresinin birincide 0,6 , ikincide de 1,25 katına eşittir.

Eğer h derinliği çevrenin dörtte birine ulaşmazsa toprakla elektrot arasındaki yalıtılmamış düşey bağlantı parçasının etkisi yok sayılabilir. Eğer derinlik daha büyük yada toprak içindeki bağlantı biraz uzunca ise; akımın bağlantı üzerinden toprak içine yayılması daha da belirginleşir.



Şekil 5. Toprakla teması olmayan bağlantıya sahip gömülü levha.



Şekil 6- Yatay kanala gömülü düz doğru iletken.

3.6.2. Düşey çubuk

Bu durumu 3.5. bölümünde görmüştük. Uzunluğu 1 ile birkaç 10 metre arasındaki alışılmış çubuklar için aşağıdaki yaklaşımı yapabiliriz:

$$R = \frac{\rho}{L} \quad \text{yada} \quad \frac{RL}{\rho} = 1$$

Çubuğun metresinden akan 1 A elektrotu p voltluk bir gerilime yükseltir.

Uzunlukla çap arasındaki oran 200 olduğunda; bu formülün pratikte tam doğru sonuç verdiğini daha önce görmüştük (örneğin uzunluğu 3 m ve çapı 1,5 cm lik bir çubuk). Uzunluğun her iki katında RL/p değeri 0,11 kadar artar, çapın iki katlarında ise aynı miktar azalır.

Bu durumda eşdeğer yarıküre elektrotun çevresi çubuk uzunluğu kadardır.

3.6.3. Yatay gömülü iletken

3.6.3.1. Düz doğru iletken

Uzunluğu L , çapı d olan bir düz iletken h kadar bir derinliğe gömülürse, topraklama direnci aşağıdaki gibi olur (Şekil 6):

$$R = 0,366 \frac{\rho}{L} \log \left(\frac{91}{16dh} \right)$$

Uzunluğu 50 m ve çapı 1 cm olan bir iletken 1 m derinliğe gömülürse direnci yaklaşık $2p/L$ değerindedir. 10 ile 100 m arasındaki uzunluklar için aşağıdaki yaklaşımda bulunabiliriz:

$$R = \frac{2P}{L} \quad \text{yada} \quad \frac{RL}{\rho} = 2$$

Diğer bir deyişle $i(A/m)$ akımı iletkeni $2p(V)$ gerilimine yükseltir. Uzunluğun her iki katında RL/p değeri 0,22 kadar artmakta çapın her iki katında ise 0,11 kadar azalmaktadır.

Bir şerit iletken, çapı şerit genişliğinin üçte ikisine yakın bir silindirik iletken gibi düşümlenebilir.

İletkeni, kanalın dibine zikzaklı yerleştirerek gömülü uzunluğunun artırılabilirliğini düşümlenmelidir. Bunun yalnız iletkenin eşdeğer genişliği üzerinde bir etkisi vardır ve direnci çok az düşürür.

3.6.3.2. Halka iletken

Kanalın yolu düz doğru yerine daire biçiminde olursa verilen uzunlukta gömülmüş bir iletkenin direnci pek artmaz. RL/p değerindeki sapma normal

durumlarda yalnız 0,10 düzeyindedir.

Kareye yakın yada boyu enini iki kat aşmayan dik-dörtgen biçimli halkalar pratik olarak birbirinin aynıdır. Daha fazla olan uzatmalarda direnç biraz artar.

İletken uzunluğu hesaplanırken hafif yılankavilikler (dolambaçlılıklar) gözönüne alınmaz.

Küçük boyutlu yada çapı 1 m dolayında olan halka iletkenlerin direncinin aynı çevreli dolu bir levhanın direncinden (bölüm 3[^].6.1.) yaklaşık % 25 daha büyük olduğu düşünülebilir.

3.6.3.3. Yıldız biçiminde yayılan kollar

Yıldız merkezinin yakınına çok sayıda iletkenin yığılması onların etkililiğini (*efficacit *) azaltır. Bu yüzden iletkenler gruplandırılırken 3 yada 4 ten fazlasının aynı noktaya yönelmesinden kaçınılmalıdır.

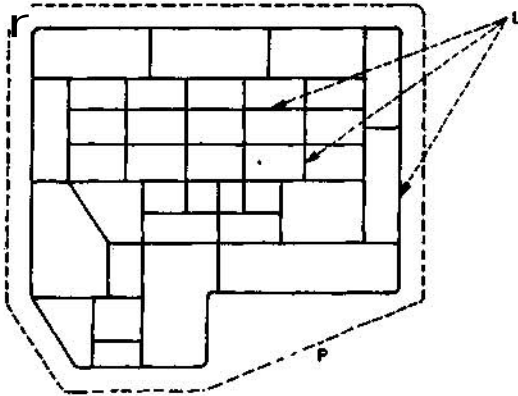
Düz bir iletkendeki RL/p değeri, iletken uzunluğu eşit kollara bölünüp yıldız oluşturulduğunda aşağıdaki gibi artar:

Uzunluk 3 kçpla. bölünmüşse % 13, 4 kola bölünmüşse X 30, 6 kola bölünmüşse % 80 artar.

Dört kolun üzerindeki bölünmelerde etkililik yitmesi hissedilir biçimdedir. Uzunluk 4 yerine 6 kola bölünürse, gömülü uzunluğun % 50 artırılması iletkenlikte % 16-20 dolayında bir artış sağlar. Halbuki aynı gömülü uzunluktaki artış 4 kollu da yapılsa iletkenlikteki artış % 40 ı bulur.

3.6.4. İletkenleri yatay gömülü ağ şebeke

İletkenleri gömülü bir şebekenin toprak direnci bulunurken, iletkenler düzgün bir toprak örtüsüyle kapatılmışsa şebekenin çevresi, bazı girintiler yok sayılarak P alınabilir (Şekil 7). Bu durumda toprak direnci iki bileşenden oluşur. Birinci bileşen aynı çevreye sahip dolu bir levhanın direncine (3.6.1.) eşdeğerdir. İkinci bileşen ρ_f yoğunluğunun bir işlevidir, yani gömülü iletkenlerin toplam L uzunluğuna bağlıdır. Bu ikinci bileşen birincisine göre oldukça düşüktür ve ilet-



Şekil 7. Gömülü topraklama iletkenlerinden oluşan ağ şebeke P = Ağ şebekenin çevresi L = Gömülü iletkenlerin toplam uzunluğu.

kenler ile toprak tabakası arasındaki gerilim düşümünü gösterir.

Eğer ağ şebekenin boyu eninin iki katını fazla aşmıyorsa; direncin hesaplanmasında aşağıdaki bağıntı kullanılabilir:

$$R = 1,6 \cdot f + 0,6 \cdot \frac{D}{j}$$

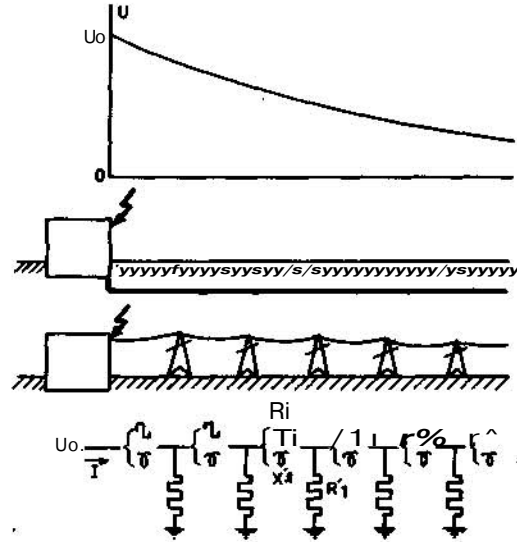
Bu bağıntının $R=2p/P$ olarak basitleştirilmesi çoğunlukla yeter bir yaklaşımı verir. Bu direnç aynı çevreli yarıküre elektrotun direncinin iki katıdır.

3.6.5. El ktrotlardaki gerilim düşümlerinin yok sayılmadığı durumlar

Çok uzun bir kanala yerleştirilmiş topraklama elektrotunun toprakla ilişkisi ya tüm uzunluğu boyunca (kabloların metal kılıfları, yalıtılmamış yada iyi yalıtılmamış metal kanallar) yada bazı noktalarda (hatların koruma tellerinin bazı direklerde topraklanması) olur. Böyle bir iletkenin üzerindeki her nokta Z_1 boyuna empedans (ohm-m) ve $1/R_t$ enine kondüktans (bu kondüktans R_t (ohm-m) toprağa akış direncinin karşılığıdır) ile belirlenir. Çok fazla yanlılık yapılmadan; tüm iletken boyunca Z_1 ve R_t değerlerinin kabaca değişmediği varsayılabilir. Bu durumda; uzunluk sonsuz ise iletkenin toprağa göre empedansı $1/Z_1 \cdot R_t$ ile gösterilebilir.

İletkenin kesit ve niteliğine bağlı olarak aşağıda; Z_1 empedansın saf bir direnç yada saf bir indüktans biçimindeki iki uç durumu incelenecektir. Ara durumlar bu iki uç durumdan hareket edilerek bulunabilir.

a) Eğer Z_1 , R_1 gibi bir dirence indirgenirse; $L_0 = \rho_f / R_t / R_1$ gibi bir uzunluk ile $R_0 = \rho_f / R_1$. R_t



Şekil 8. Çok uzun bir hat üzerinden akımın akışının gösterimi R_t : İletkenin boyuna empedansı $1/R_t$ - İletkenin enine kondüktansı.

gibi bir direnç hesaplanabilir. L_0 , boyuna direnç ($R_L \cdot L$) ve enine direnç (R_e/L) değerlerinin birbirine eşit olduğu uzunluktur. Uzunluk sonsuz ise R_0 , kanalın gösterdiği dirençtir ve L_0 uzunluğundaki boyuna yada enine dirence eşittir.

L uzunluğundaki kanalın eşdeğer direnci ve başlangıç ucuna U gerilimi verildiğinde çıkış ucunda görülen U_1 gerilimi Çizelge 1'de verilmiştir.

L/L_0	R/R_0	U_1/U_0
0,25	4	0,97
0,50	2	0,90
1	1,3	0,65
2	1	0,27
4	1	0,04
∞	1	0

Çizelge 1.

L_0 değerinden küçük uzunluklarda boyuna gerilim düşümleri yok sayılabilir. Bu durumda iletken alışılmış bir topraklama elektrotu gibi düşünülüp 3.6.3.1. bölümündeki formüller kullanılır. L_0 değerinin üzerindeki uzunluklarda iletken sonsuz uzunluktaki iletkenin durumundan biraz farklıdır. Artık direnç tümüyle uzunluğun etkisinde değildir ve uygulanan gerilimin büyük bölümü iletken üzerinde tüketilir.

b) Boyuna empedans (Z_1) yalnız X_j endük tansından oluşuyorsa; uzunluk için $L_0 = \sqrt{Rt/X_1}$ direnç için de $RQ = XQ = \sqrt{Rt \cdot X_1}$ alınır. Kaynak tarafından görülen kanalın bileşke empedansı paralel bağlı R direnci ve X endüktansı ile tanımlanabilir. Sonsuz uzunlukta direnç ve endüktans birbirine eşittir ve bileşke empedans $\sqrt{2} R_0$ yada $\sqrt{2X}$ olur. Bunlara ilişkin değerler Çizelge 2'de verilmiştir.

L/L_0	R/R_0	X/X_0	U_1/U_0
0,25	4	64	1
0,50	2	16	0,99
1	1,2	2,5	0,77
2	1,2	1,4	0,27
4	1,4	1,4	0,04
∞	1,4	1,4	0

Çizelge 2.

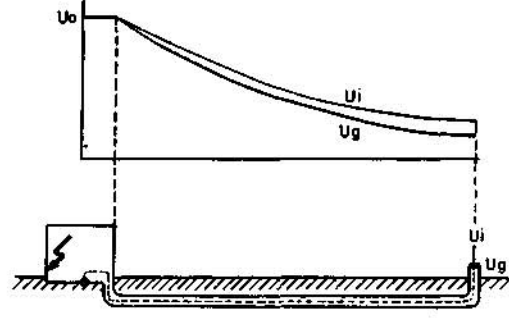
Buradaki sonuçlar önceki duruma göre biraz farklılık gösterir.

Ancak yine de X_1 boyuna endüktansı, uzaklığın ve iletken ile akım taşıyan hatlar arasındaki açının bir işlevidir. Enine kondüktans ($1/Rt$) ise iyi bilinmeyen ve kanalın uzunluğuna karşı duyarlı bir özgül direncin işlevi durumundadır. Bu değeri kesin olarak belirlemek olanaksız, ancak kaba bir tahmin yapılabilir.

Manyetik olmayan uzun bir kanal için;
 $X_x = 0,001$ ohm/m (50 Hz'de) ve $R_e = 3 \rho$ ohm.m kabul edersek (bölüm 3.6.3.1.); $L_0 = 55/\sqrt{\rho}$ m ve $R_0 = X_0 = 0,0055/\sqrt{\rho}$ ohm olur. Özgül direnç $\rho = 100$ ve 1000 ohm-m olduğunda; $L_0 = 550$ ve 1730 m, $X_0 = 0,55$ ve $1,73$ ohm olur.

3.6.5.1. Kılıflı kabloların durumu: iç iletkenlerin gerilimleri

Akımı toprağa akıtan kanal bir elektrik kablosunun kılıfı ise, kılıfın boyuna reaktansından ge-



Şekil 9. Bir kablo üzerinden arıza akımının indüktif gerilim düşümleri ağır bastığında iç iletkenlerin gerilimi (U^i) ve kılıfın yada hemen yakınındaki toprağın gerilimi (U_g).

len indüktif gerilim düşümleri içerdeki iletkenlere yansır. Çünkü buna yol açan manyetik alan kılıfı olduğu kadar iletkenleri de kapsar.

Eğer bu iletkenler tesisin başlangıç noktasındaki kılıfın gerilim düzeyinde ve kılıfın diğer ucu yalıtılmış ise, iletkenler üzerindeki endüktif kaynaklı gerilim değişimleri kılıfın üzerindeki gerilim gibidir, iletkenler ve kılıf arasındaki gerilim değişmesine kılıfın direnci üzerinde kümülatif olarak toplanan gerilim düşümleri yol açıyor. Kılıfın kesit ve niteliği bu gerilim düşümlerini önemsiz tutacak biçimdeyse iletkenlerin gerilimi kılıfın ve hemen yakındaki toprağın gerilimine belirli bir düzeyde kendiliğinden (oto-adaptasyon) uyar (Şekil 9).

3.7. Birbirine Yakın ve Paralel Bağlı Elektrotların Direnci

Tek tek her topraklama elektrotundan akan akımın ağırları toprağın bir bölümünü kapsar ve diğer elektrotlardan çıkan akım ağırlarının yayılma alanını sınırlar. Aralarında herhangi bir kuplaj etkisinin olmadığı tek tek elektrotlar durumuna göre her elektrotun ve paralel bütünlüğün direnci biraz artar. İlerde 5. bölümde birbirine bağlı olan yada olmayan elektrotlar arasındaki kuplaj etkisi daha genel olarak incelenecektir.

a) Üç yarıküre elektrotu düşünelim. Bunların yarıçapları r_1, r_2, r_3 , merkezlerinin birbirinden uzaklıkları D_{12}, D_{13}, D_{23} her elektrottan akan akım I_1, I_2, I_3 ve içinde buldukları toprak ρ özgül dirençli ve homojen olsun (Şekil 10). 3.4. bölümündeki formülü kullanarak aşağıdaki üç gerilim bağıntısını yazabiliriz:

$$U_1 = \frac{\rho}{2\pi r} \left(\frac{I_1}{r_1} + \frac{I_2}{D_{12}} + \frac{I_3}{D_{13}} \right)$$

$$U_2 = \frac{\rho}{2\pi r} \left(\frac{I_2}{r_2} + \frac{I_1}{D_{12}} + \frac{I_3}{D_{23}} \right)$$

$$U_3 = \frac{\rho}{2\pi r} \left(\frac{I_3}{r_3} + \frac{I_1}{D_{13}} + \frac{I_2}{D_{23}} \right)$$

Toplam akımın I 'ya eşit ve üç gerilimin aynı U değerinde olduğunu yazarsak, bu bağıntılardan

U/I global direncini ve akımların elektrotlar arasındaki paylaşıllığını çıkarabiliriz.

Aynı r yarıçaplı üç elektrot eşkenar üçgenin tepelerine yerleştirilirse; hesaplama daha da basitleşir ve aşağıdaki biçimi alır:

$$R = \frac{1}{3} \cdot \frac{\rho}{2\pi r} \left(1 + \frac{2r}{D}\right)$$

Elektrot sayısı iki ve aralarındaki uzaklık D ise direnç;

$$R = \frac{1}{2} \cdot \frac{\rho}{2\pi r} \left(1 + \frac{r}{D}\right) \text{ olur.}$$

Bir karenin köşelerine dört elektrot yerleştirilirse direnç;

$$R = \frac{1}{4} \cdot \frac{\rho}{2\pi r} \left(1 + \frac{2,707 r}{D}\right)$$

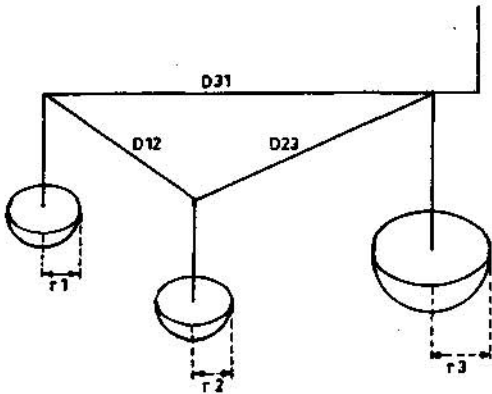
Paralel elektrot sayısının belirli bir toprak bölümünde daha da artırılması bunların alanlarının karşılıklı sıkışmalarına yol açar. Öyle ki; belirli yığılmadan sonra toprak doymuş gibi düşünülebilir ve yeni elektrotların eklenmesiyle direnç de hemen hemen hiç azalmaz.

b) Başka biçimlerdeki elektrotlar bunların yarıküresel eşdeğerleri bulunarak incelenebilir. Daha karmaşık elektrotlar bölmelere ayrılarak küçük elektrotlar biçimine dönüştürülebilir. Ancak böyle durumların elektrolitik kaplardaki modeller üzerinde incelenmesi çok daha kolaydır.

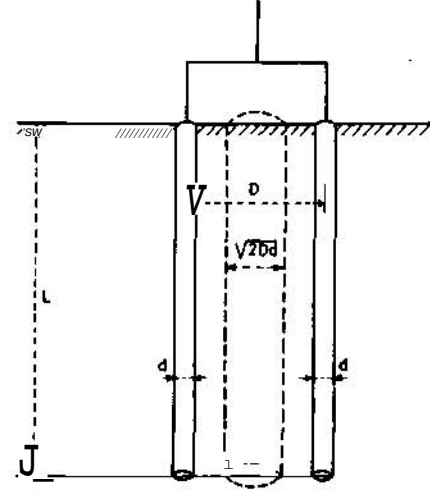
c) tki aynı çubuk uzunlukları kadar bir aralıkla yerleştirilirse direnci, çok uzun bir aralıkla yerleştirilmiş duruma göre % 15 daha fazladır. Çubuklar arasındaki uzaklık boylarına göre küçükse iki çubuk; çapı $\frac{1}{2} D$ olan tek bir çubuk gibi düşünülebilir (Şekil 11). Bu durumda büyüme çarpanı (tek çubukluya göre):

$$1 + \frac{\log 3L/2D}{\log 3L/d} \text{ olur.}$$

Gömülü düz doğru bir iletken paralel iki çubuğa dönüştürülebilir. Bu durumda çubukların uzunluğu iletkenin uzunluğunun yarısına, aralarındaki uzak-



Şekil 10. Paralel üç yarıküre elektrottan oluşan bir topraklama.



Şekil 11. Birbirine yakın paralel iki çubuktan yada aynı dirençli tek çubuktan oluşan topraklama.

lık da iletkenin gömülme derinliğine eşit alınır. Sonuçta; akım ağlarının havaya sızmasını önleyen toprak yüzeyi, bu yüzeyin hemen altına yerleştirilmiş bir hayali sistem (imaj) rolünü üstlenir. Gömülü iletken iki çubuğa dönüştürülürken önce gerçek sisteme hayali sistem eklenir, daha sonra iki sistem bütünü ortadan geçen dik bir düzlemlenemesine kesilir.

d) Bir yüzeyin benzer elektrotlar yada gömülü iletkenlerden oluşan bir ağ şebeke ile örtülmesi durumunda; akım ağlarının açılması merkezde kenarlara oranla daha fazla engellenir. Elektrotlar yada aynı uzunluktaki iletkenler aynı akımı taşımazlar. 3.8.1.1. bölümündeki bir örnekle açıklanan bu etki; elektrot sayısı arttıkça kendini daha çok gösterir.

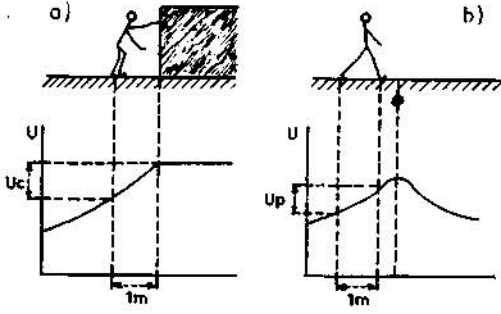
3.8. Elektrotların Yada Topraklanan Yapıların Etrafındaki Yerel Gerilimlerin Bulunması

3.8.1. Elden ele yada elden ayaklara olan temas gerilimleri

3.2. bölümünde belirtildiği gibi kişiler için en tehlikeli temaslar; tesisattaki gövdelerin geriliminin yükseldiği sırada elden ayaklara yada elden ele olan temaslardır. Bu temaslar, gövdelere bağlı iletken bir yapı ile toprak yada toprak gerilimindeki diğer bir yapı arasında olur.

Toprak irtibatları (ankraj) birbirinden uzak olan yapıları temas uzaklığına kadar yaklaştıran yatay sapmaların etkisi yok sayılırsa; tehlikenin topraklı yapı ile metre kadar uzaklıktaki toprağın arasındaki gerilimin işlevi olduğu kabul edilebilir. Bu gerilim gövde ile uzaktaki toprak arasındaki toplam gerilimin bir parçasıdır.

a) Küçük boyutlu topraklama elektrotlarında bu oran (yada parça) önemlidir. Örneğin yarıküre bir elektrotta toplam gerilimin yarısı elektrot yüzeyinin yarıçap kadar uzağında tüketilir (bölüm 3.3).



Şekil 12. a) Üzerinden akım akan bir yapının yakınındaki U toprak gerilimi ve U_o dokunma gerilimi
b) Üzerinden akım akan bir gömülü iletkenin yakınındaki U toprak gerilimi ve U_o dokunma gerilimi.

Çubuk elektrotların 1 m uzağında tüketilen gerilim toplam gerilimin yarısı yada dörtte üçüne ulaşabilir (bölüm 3.5). Yapıların yatay uzatmaları göz önüne alınır; elektrot toplam geriliminin büyük bir bölümünün insan vücudu üzerinde olabileceği düşünülmelidir.

b) Büyük yüzeyli topraklama elektrotları durumunda; toprağa irtibatlanmış yapılar ile 1 m kadar uzağında olan toprak arasındaki gerilim çoğunlukla toplam gerilimin küçük bir bölümüdür (Şekil 12). Burada değerlendirilmelere temel olabilecek bazı bilgiler verilecektir:

- Düz doğru yada halka biçimindeki bir iletken p(ohm-m) özgül dirençli toprağa yatay yerleştirilir ve iletkenin metresinden i amperlik bir akım geçerse; iletkene düşey bir gövde ile bir metre uzağındaki toprak arasındaki gerilim yaklaşık 0,5 pi(V) olur. Diğer bir deyişle; 3.6.3 bölümündeki yaklaştırma kabul edilir ve toprağın homojen olduğu varsayılırsa; bu gerilim toplam gerilimin dörtte birine yakın olur.
- Herhangi bir boyuttaki dairesel iletken homojen toprağa az bir derinlikte gömülürse; halkanın ortasındaki toprak geriliminin p.i olduğu kolaylıkla hesaplanabilir. Bu ise toplam gerilimin yarısıdır. Dairesel biçimden çok fazla uzaklaşmadıkça kare ve diğer halka biçimlerinde de merkezdeki gerilim aynı kabul edilebilir.
- iletkenleri gömülü bir ağ şebekede (bölüm 3.6.4); iletkene düşey bir gövde ile 1 m uzağındaki toprak arasındaki gerilim yaklaşık 0,5 pi dir. Burada i ağ bölgesindeki (bölüm 3.7) iletkenin 1 metresinden geçen akımdır. Herhangi bir gövde ile ağ merkezi arasındaki gerilim ise pi dolayındadır. Topraklama sisteminin merkezine doğru i akımı biraz artar. Topraklama şebekesindeki göz sayısı çok fazlaysa akım daha da artar. Kareye yakın bir toprak parçasında düz gün yerleştirilmiş 50-100 göz varsa; metre başına akan akım ve toplam akımın toplam gömülü uzunluğa bölünmesiyle bulunan ortalama akım arasındaki oran, merkezde 0,7'den kenarlarda 1,4'e kadar değişir. Çok düzensiz ağ şebekelerinde bu basit ifadelerle göre olan sapmaları kabaca hesaplamak kolaydır ve sapmalar da her zaman yeterince makul sınırlardadır.

- Altını çizerek belirtmek gerekir ki; bir ağ şebekesinin direnci özellikle ağır çevresine bağlıysa ve bu bakımdan ağ gözlerinin artırılması fazla birşey kazandırmıyorsa; tesisin içinde ve çevrenin hemen yakınındaki yerel gerilim farklarını gömülü iletkenlerin birim uzunluğundan akan akım belirler. Topraklanacak çeşitli aygıt ve yapıları birbirine birleştirmek gerekliliğinin ötesinde gömülü devrelerin açılımını artırmada yararlı olabilir.

3.8.2. Toprakta adım gerilimleri ve gerilim gradyanları

Üzerinden I akımı geçen bir topraklama elektrotunun yakınında yürüyen bir insan için adım geriliminin ulaşabileceği en yüksek değeri ile toprak geriliminin yerel gradyanı çoğunlukla birbirine karıştırılır (Şekil 12).

a) Topraklama elektrotunun boyutları düşünülen bölgeye olan D uzaklığı yanında küçükse bu bölgedeki gerilim gradyanı yalnız D uzaklığı ve I akımına bağlıdır (Bölüm 3.3). Özgül direnci p(ohm.m) olan homojen bir arazide gerilim gradyanı şöyledir:

$$G_D = 0,16 \frac{\rho I}{D^2} \text{ (V/m)}$$

Örneğin özgül direnci 500 ohm.m olan bir arazide topraklama elektrotundan 5000 A'lık bir akım akarsa; elektrotun 50 m uzağındaki toprağın gerilim gradyanı 160 V/m olur.

b) Büyük açıklımlı topraklamalar genellikle yatay olarak gömülmüş iletkenlerden oluşur ve bu durumda bir iletkenin yakınındaki gradyan temel olarak metresinden akan i akımına bağlıdır.

Bu gradyan iletkenin düşeyinde sıfırdır ve h gömülme derinliğindeki bir uzaklıkta bir uçtan diğer uca maksimum değer alır. Bu maksimum değer aşağıdaki gibidir:

$$G_h = 0,16 \pi i/h \text{ (V/m)}$$

Gradyen ağın sonuncu gözünün hemen yakınında bu değerden başlar ve sonra ağın içinde yavaş yavaş azalır.

Örneğin özgül direnci 100 ohm.m ve boyutu 100 m x 100 m olan bir arazide 1 m derinliğe toplam 2000 m uzunluğunda iletkenler gömülmüş olsun. İletkenlerden toprağa akan akım 10000 A olduğunda gradyan; ortalama gömülü iletkenin yakınında 80 V/m, çevredeki iletkenin yakınında 110 V/m (bölüm 3.8.1) olacak ve merkezden 100 m uzaklıkta 16 V/m'ye düşecektir.

3.8.3. Toprakta uzaktaki bölgelere aktarılan gerilimler

Üzerinden büyük bir akım akan elektrotun uzağındaki bölgelerde gerilimin kendiliğinden yükselmesi önemli olabilir. 3.3 bölümünde gördüğümüz gibi homojen arazideki radyal akış durumunda; arıza noktasından D kadar uzaktaki bölge aşağıdaki gerilime yükselecektir:

$$V_d = 0,16 \pi I/D$$

Özgül direnci 500 ohm.m olan bir arazide topraklama elektrotundan akan akım 10000 A ise; elektrotun 500 m uzağındaki bölgenin gerilimi 1000 V'a yükselir. Gerçekte arazi nadiren homojendir ve akışın radyal olma niteliği belirli bir uzaklıkta kaybolur. Ancak yine de yukarıdaki formül gerilim yükselmelerinin düzeyini verir.

Deneyler göstermiştir ki arıza merkezinden uzakta topraktan geçen akımlar çoğunlukla farkedilemeyecek değerlerdedir. Bunun nedeni yerel gradyanların genellikle düşük olmasıdır. Yüksek özgül dirençli özellikle toprağın homojen olmadığı bölgelerde akan akımlar çok yüksek değerlerde ise; bu sorunlara dikkati çekmek yararlı olabilir.

4. HOMOJEN ORTAMDA TOPRAKLAMA ELEKTROTLARININ HESAPLANMASI

4.1. Toprak Alt Katmanı ile Yüzeysel Tabakanın özgül dirençlerinin Farklı Olması Durumu

Yüzeysel tabakanın kalınlığını H, özgül direncini P_1 ve toprak alt katmanının özgül direncini P_2 ile göstereceğiz.

4.1.1. Yüzeysel tabakanın kalınlığının yanında boyutları küçük topraklama elektrotu durumu

P_1 özgül dirençli homojen bir arazi durumuna göre; düşük derinlikte daha iletken bir toprak alt katmanının bulunması, elektrottan çıkan akım ağlarının eğilerek aşağıya doğru çekilmesini sağlar. Daha dirençli bir toprak alt katmanı durumunda ise; akım ağlarının derine yayılması güçleşir ve yüzeye doğru itilirler (Şekil 13).

Yüzeysel tabakanın H kalınlığının yanında oldukça küçük değerlerde r yarıçaplı bir yarıküreye benzetilebilen bir topraklama elektrotunun direnci aşağıdaki formülden bulunabilir:

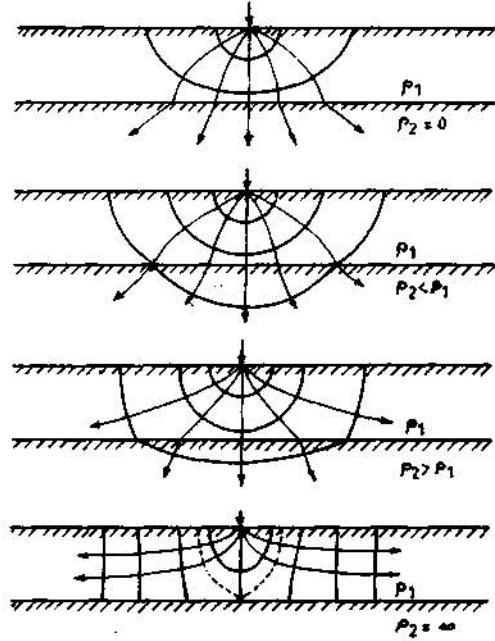
$$R = \frac{\rho_1}{2\pi r} + 0,366 \frac{\rho_1}{H} \log \frac{\rho_1 + \rho_2}{2 \rho_1}$$

r = H/2 için P_1 özgül dirençli homojen bir araziye göre dirençteki artışı gösteren K çarpanı P_2/P_1 'in işlevi olarak aşağıya çıkarılmıştır.

$P_2/P_1 = 0$	0,1	1	10	100	1000	
K =	0,65	0,70	1	1,85	2,95	4,1

Görülüyor ki küçük topraklama elektrotlarında direnç, derindeki toprak alt katmanının özgül direncindeki büyük değişmelere karşı oldukça az duyarlıdır. Elektrotun hemen yakınındaki gerilim gradyanları bu değişmelere karşı daha da az duyarlıdır.

Buna karşılık yüzeysel tabakanın kalınlığına eşit yada daha fazla olan uzaklıklardaki toprağın gerilimi toprak alt katmanının özgül direncinden çok fazla etkilenir. Eğer toprak alt katmanı çok iletken ise akım ağlarının büyük bir bölümü gecik-



Şekil 13. Toprak alt katmanının farklı özgül direnç değerleri için homojen olmayan bir arazide nokta elektrotun etrafındaki elektrik alanı.

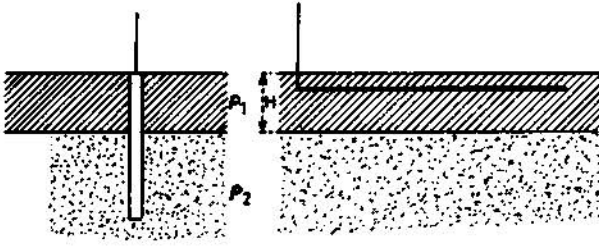
meksizin yüzeysel tabakayı terkeder. Bu durumda elektrotun etrafındaki gerilim hızla azalır ve $U_x = P_2 I/2\pi r x$ değerine yaklaşır. Bu değer ise yalnız toprak alt katmanının özgül direncinin bir işlevi durumundadır. Çok dirençli bir toprak alt katmanı durumunda gerilim bu değere ($U_x = P_2 I/2\pi r x$) çok büyük uzaklıklarda ulaşma eğilimindedir ve akım ağları yüzeysel tabakada çok daha uzun süre kalır. Yüzeysel tabaka bir yayıcı, dağıtıcı rol oynar. Direncin P_2 ile yavaş değişiminin de nedeni budur. $(P_2/P_1)H$ düzeyindeki bir uzaklıkta akımın yarısı yüzeysel tabaka, yarısı da toprak alt katmanı içinde dolaşır. Yukarıdaki formülün ikinci teriminde; $(P_2/P_1)H$ düzeyindeki bir uzaklığa kadar yüzeysel tabakadaki akım ağlarının bu yarı yatay dağılışı gözönüne alınmıştır.

Çok büyük özgül dirençli toprak alt katmanları durumunda akımların bu biçimdeki akışıyla elektrotların etrafındaki gerilimin değişme eğrisi homojen arazide olduğundan çok daha düzdür (P_2 özgül direncinin elektrottan uzaklaştıkça giderek P_1 'in yerini alması gibi).

4.1.2. Yüzeysel tabakanın kalınlığının yanında boyutları büyük topraklama elektrotu durumu

4.1.2.1. Düşey çubuk

-Toprak alt katmanı yüzeysel tabakadan daha iletken ise homojen olmayan arazilerde uzunluğu büyük düşey çubukların kullanılması doğru bir yoldur. Bu durumda çubuğun L-H kadar bir uzunluğu P_2 düşük özgül dirençli bu toprak alt katmanı ile doğrudan temasta olacaktır (Şekil 14).



Şekil 14. Toprak alt katmanı az dirençli homojen olmayan bir arazide uzun düşey çubuk yada yatay gömülü iletken durumu.

Direnç ve elektrotun hemen yakınındaki gerilim gradyanları, P2 özgül dirençli homojen bir arazide olduğu gibi yeter bir yaklaşıklıkla hesaplanabilir. Ancak çubuğun p1 özgül dirençli toprağın içindeki H uzunluğunu P2/P1 oranında küçültmek gerekir.

Direncin yaklaşık değeri 3.6.2. bölümündeki basitleştirme kabul edilerek aşağıdaki bağıntıdan bulunabilir:

$$R = \frac{P2}{(L-H) + H\rho_2/\rho_1}$$

4.1.2.2. Yatay gömülü iletken

a) Önce toprak alt katmanının H kalınlığındaki yüzeysel tabakadan daha az dirençli olduğu ve iletkenin yüzeysel tabaka içine gömüldüğü varsayılacaktır (Şekil 14). Eğer bu kalınlık iletkenin L uzunluğu yanında küçükse, direnç 3.6.3.1. bölümünde gösterildiği gibi P2 özgül direncinden yola çıkılarak hesaplanabilir. Bu durumda dirence tamamlayıcı bir terim daha eklenir. Bu terim akımın yüzeysel tabakadan geçişinde gösterilen dirence karşılıktır. Akım ağlarının yüzeysel tabaka içinde izlediği yolun ortalama uzunluğu H düzeyinde ise; gerilim düşümü 3.5. bölümünde verilen formüle göre yaklaşık

$$0,366(p_1 - P_2') \log \frac{2H}{-y}$$

kadar artacaktır ve direncin düzeltme terimi

$$0,366 \frac{P_1 - P_2}{L} \log \frac{2H}{d}$$

düzeyinde olacaktır.

b) Çok dirençli bir toprak alt katmanı durumunda yüzeysel tabaka 4.1.1. bölümünde anlatılan durumdaki gibi akım ağlarını anlamasına yayar ve iletken, P1 cinsinden tümleyici terimler aracılığı ile biraz ya Pa özgül dirençli homojen toprak üzerine konmuş genişliği HP2/P1 olan bir bant gibi yada çapı bu genişliğe yakın ve bu toprak içine yarı gömülmüş bir silindir gibi işlev görür.

Diğer yandan akım ağlarının yatay olarak daha kolay dağılması şu sonucu getiriyor: Kesiksiz iletkenin toprak direnci aynı yol üzerinde art arda dizilmiş küçük elektrotların vereceği dirençten çok farklı değildir.

4.1.2.3. Arazinin gömülü iletkenlerden oluşan bir ağ şebeke ile kaplanması

Yüzeysel tabakanın kalınlığı çok küçükse 3.6.4. bölümünde verilen yaklaşık formül; toprak alt katmanının P2 özgül direnci birinci terimde (bu terim dolu bir levhanın direncine karşılıktır) ve yüzeysel tabakanın P1 özgül direncini tümleyici terimde (bu terim de yüzeydeki toprak ile gömülü iletkenler arasındaki ortalama gerilim düşümüne karşılıktır) belirtmek koşuluyla korunabilir:

$$R = 1,6 \frac{P_2}{P} + 0,6 \frac{\rho_1}{L}$$

İkinci terimin görece önemi toprak alt katmanının yüzeyden daha iletken olduğu durumda artar, tersi durumda azalır. Ayrıca dikkat edilecektir ki tesisin merkezinde gömülü iletkenlerin görece etkililiği ikinci durumda azalır.

Yüzeysel tabakanın H kalınlığı önemli düzeydeyse (yine de tesisin boyutlarının yanında oldukça küçüktür); toprak alt katmanının iletken yada dirençli durumlarının ayrı ayrı ele alınması gerekir.

a) Toprak alt katmanı çok iletken olduğunda; yukardaki formüle, tesisin alanı üzerinde duran H yüksekliğindeki ve p1 özgül dirençli bir silindir toprak kitlesinin direncine karşılık olan bir terimin eklenmesiyle yetinilebilir. Tesisin kapladığı alanı S ile gösterirsek formül şöyle olur:

$$R = 1,6 \frac{\rho_2}{P} + 0,6 \frac{\rho_1}{L} + \rho_1 \frac{H}{S}$$

b) Toprak alt katmanı çok dirençli ise yüzeysel tabaka önceki örneklerde olduğu gibi dağıtıcı rolünü aynen oynar. Öyle ki direncin net değişme hızı P2/P1 oranının değişme hızından daha azdır, örgünlük (ağ şebekede gözlerin sıklığı) düzeyinin direnç üzerindeki etkisi homojen bir arazi durumundakinden daha azdır ve bu bakımdan toprağın her iletken ögesi arazinin daha geniş bir yüzeyini doymaya götürür. Tesisin içinde ve kenarlarındaki yerel gerilim farkları temel olarak P1 özgül direncine bağlıdır.

4.2. Diğer Homojen Olmayan Arazi Durumları

4.2.1. Dirençli bir toprak içinde iletken bir arazi parçasının yada adacığının bulunması

Topraklama elektrotları yerleştirilirken çoğunlukla çevredeki toprağın P2 özgül direncinden çok daha düşük p1 özgül dirençli toprağın bulunduğu yerler aranır. Bu düşük özgül dirençli bölge ya bir küvet yada uzun bir karık biçiminde görünür.

Bir akımın akmasından doğan gerilim düşümü bu durumda iki terimden oluşur. Birinci terim p1, ikinci terim de P2 özgül dirençli ortamdan geçişe karşılıktır.

Eğer birinci ortamdaki topraklama elektrotlarının açılımı, birinci terim ikincinin yanında küçük kalacak kadar büyükse; iki ortamı birbirinden ayıran yüzeyin geniş bir alan için eşgerilimli olduğu düşünülebilir. Diğer bir deyişle bu yüzey P2 özgül dirençli homojen ortama daldırılmış iletken bir yüzeyin eşdeğeri gibidir. Bir kuvvet durumunda bu yüzey bir yarıküreye yada yüzeydeki bir levhaya kolayca indirgenir ve 3.3. yada 3.6.1. bölümlerinde verilen yaklaşık formüller uygulanabilir.

iletken ortam dar bir karık biçiminde ve elektrotlar bu karığın L uzunluğunu kaplıyorsa; iletken ortamın çevre ortam karşısında L uzunluğunda yatay bir silindir elektrot gibi (bölüm 3.6.3.1) davrandığı düşünülebilir. Elektrotların kapladığı uzunluğu artıran karık uzunluğu gerçekte akımın akışına çok az katkıda bulunur. Çünkü karığın kesiti oldukça küçüktür ve bu özgül direncin düşüklüğünden gelen etkiyi azaltır.

Direnç, birinci ortamdan geçişe karşılık olan tümleyici terimi eklemek gerekir. Bu terim p! özgül dirençli sonsuz ortamdaki elektrotların direncinin bir bölümüne (çoğunlukla bire yakın) eşit alınabilir. Bu terimle yalnız direnç yönünden ilgileniliyorsa, terimi birin çok küçük bir bölümüne indirmek için gerekli elektrot sayısını belirlemek yeterli olacaktır. Ancak elektrotların yakınındaki gradyenler ve yerel gerilim farkları elektrotların toplam açılımı ile ters orantılıdır (bölüm 3.8.1).

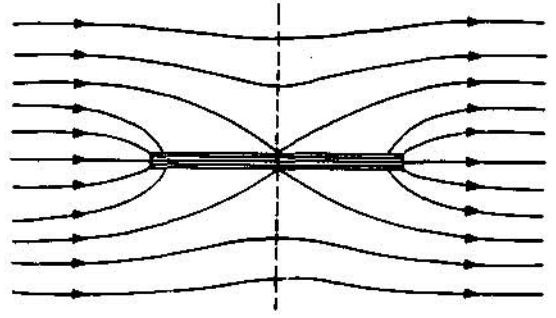
4.2.2. Yakındaki metal kanalların etkisi
tçinden akımların aktığı toprağa gömülmüş metal bir kanal, akım ağlarını yolunun akımın dağılma noktasına en yakın bir bölümünde akaçlar ve çok uzaktaki bölümünde toprağa yeniden geri yerir.

Kanal tarafından akaçlanan akım, ya akımın kanalın birinci bölümünden girip ikinci bölümünden çıktığı direnç tarafından yada kanalın içindeki boyuna gerilim düşümleri tarafından sınırlandırılabilir. Bu iki bölüm, çevreleyen toprak karşısında üzerinden ters yönde akımlar akan iki topraklama elektrotu gibi davranır. Çok kısa kanallarda birincinin etkisi ağır basar, ikincisi çok uzun kanallarda önemli olabilir.

a) Kanalın yokluğunda elektriksel alanın uniform olduğu bir bölgede alanın kuvvet çizgilerine paralel dirençsiz bir kanal durumu düşünülebilir. Burada alan metrekare başına i Amperlik bir akım yoğunluğuna karşılıktır. Eğer akım temel olarak akaçlama ve boşaltma direnci tarafından sınırlandırılırsa; kanalın ortasında kanal tarafından akaçlanan akım, kanalın yokluğunda kanalı çevreleyen dairesel kesitli bir silindirin içinde dolaşan akıma benzetilebilir. Bu silindirin yarıçapı kanal uzunluğunun beşte biri düzeyindedir (Şekil 15).

$$I \approx 1r(-j)^2 i = 0,13 L^2 i$$

L uzunluğunun karesi girer, çünkü uzunluğun büyük olması hem akaçlamayı kolaylaştırır, hem de akaçlama altında gerçekleşen ortalama gerilimi artırır.



Şekil 15. Uniform bir alan içinde boyuna kuvvet çizgilerine paralel duran küçük bir çubuk.

Kanalın kendi direnci silindir ve iletkenin dirençleri ile karşılaştırılırsa ne ölçüde bir rol oynadığı görülebilir. Birincisi ikincisinden çok büyükse önceki hesaplama geçerlidir. Tersine eğer kanalın direnci çok küçükse iletkenin varlığı, iletken ve toprak içindeki gerilimlerin bölüşümünü ve akım yoğunluklarını ancak zayıf biçimde etkileyebilir. Bunlar özgül dirençlerle basitçe ters orantılıdır.

b) Diğer bir sınır durumu; d çaplı yalıtılmamış ve sonsuz uzunluktaki bir kanal durumudur. I akımının toprağa aktığı noktanın D kadar uzağından geçen ve yatay olarak gömülmüş sonsuz iletkenlikteki bir kanalı düşünelim:

Kanala en yakın noktadan giren akımın yüzeyel yoğunluğu Ollendorf'un bir formülüne göre şöyledir:

$$i = \frac{0,3 I}{D \log(8D/d)}$$

Kanal tarafından akaçlanan toplam akımın D uzaklığı ve d çapı ile yavaş değiştiğini söyleyebiliriz.

5. YAKIN TOPRAKLAMA ELEKTROTLARI ARASINDAKİ KUPLAJ ETKİSİ

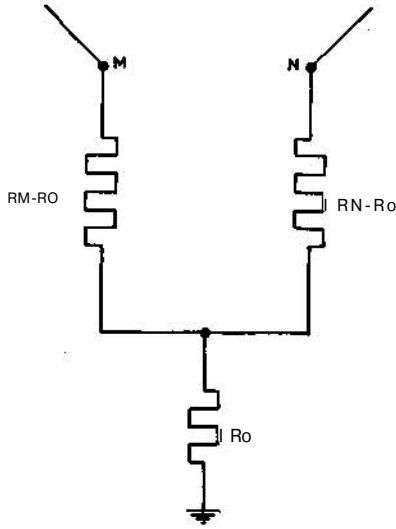
Bir elektrottan akan akımın diğer elektrotu hangi gerilime yükselteceğinin yada farklı iki elektrot paralel bağlandığında hangi global direncin elde edileceğinin çoğunlukla bilinmesi gerekir. Bu tür hesaplar elektrotlar arasında yada daha genelde toprağın herhangi bir noktası ile bir elektrot arasındaki kuplaj kavramlarını berabere getirir.

Bir N noktası ile bir M elektrotu arasındaki kuplaj çarpanı; M elektrotundan akan akımın N noktasında yükselttiği gerilimin elektrotun gerilimine oranı olarak tanımlanır:

$$S_i(M) = \frac{V_N(M)}{V_M(M)} = \frac{V_N(M)}{V_M(M)}$$

Parantezler içindeki endis, akımı toprağa akıtan elektrotu gösteriyor.

Elektrotu N noktasında alırsak; bu defa akımı toprağa akıtan N elektrotu olduğundan M ile N ara-



Şekil 16. Rff ve Rp/ dirençli birbirine yakın elektrotlar arasındaki kuplaj.

sındaki kuplaj çarpanı yine aynı biçimde yazılabilir:

$$K_{M(N)} = U_{M(N)} / U_{N(N)} = U_{M(N)} / R_N I_N$$

Bu bağlantı çarpanları % ve % toprak dirençlerinin bir RQ ortak bölüme sahip oldukları düşünülerek açıklanabilir. Öyle ki IJJ akımının etkisindeki M noktasının gerilim yükselmesine N noktası $U_{M(N)} = R_O / R_M$ oranında, IJJ akımının etkisindeki N noktasının gerilim yükselmesine M noktası $K_{M(N)} = R_O / R_N$ oranında katkıda bulunur.

Bu durumda iki topraklama elektrotu yıldız bağlı üç dirençli bir şema ile gösterilebilir (Şekil 16).

İki topraklama elektrotunun paralel bağlı olduğundaki global direncin bağlı olmadığından büyük olduğunu 3.7. bölümünde görmüştük. Bu durum iki kısmi akımın RQ kolunda üst üste bindikleri düşünülerek açıklanabilir. Ro direncinin varlığı iki elektrot arasındaki karşılıklı etkiyi açıklamaya yetiyor. Direnç artırma çarpanı şöyledir:

$$\frac{1 - \frac{4}{R_M \cdot R_N}}{1 - 2 R_O / (R_M + R_N)}$$

% = % ise, çarpan $1 + R_O / R_M$ olur.

N elektrotu düşük etnpedanslı bir iletken ile uzaktaki toprağın geriliminde tutulu iken üzerinden IJJ akımı akan M topraklama elektrotunun yükseleceği gerilimi kolaylıkla bulabiliriz. Bu durumda M elektrotunun direnci $R_O / \%$ kadar azalır. Çünkü Ro ve % - RQ kolları paralel bağlıdır ve N elektrotu, $I(j) = R_O \cdot I_M / (C_N - R_O)$ gibi bir akımı acaçlar.

5.1. Yarıküre Topraklama Elektrotları Durumu

Yarıçapları r_m ve r_n olan yarıküre iki elektrotun (M ve N) aralarındaki uzaklık D ise yıldızın kollarını oluşturan üç direncin değerleri homojen

arazide şöyledir:

$$R_O = \frac{\rho}{2\pi D}$$

$$R_M - R_O = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_m} - \frac{1}{D} \right)$$

$$R_N - R_O = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_n} - \frac{1}{D} \right)$$

Bu durumda kuplaj çarpanları:

$$K_{N(M)} = \frac{r_m}{5} \text{ ve } K_{M(N)} = \frac{r_n}{D}$$

Aynı bağıntılar yarıküre eşdeğerlerine dönüştürülebilen herhangi biçimdeki iki topraklama elektrotlarına uygulanabilir. Örneğin çapı d ve L uzunluğu aralarındaki D açıklığına göre büyük olan birbirlerinin aynı düzey iki çubuk durumunda kuplaj çarpanı (bölüm 3.7) şöyle olacaktır:

$$K = \frac{\log 3L/2D}{\log 3L/2d}$$

Yine örneğin şu sonuç çıkarılabilir; bir edilgin (pasif) elektrotun yükseleceği geriliminin üzerinden akım akan topraklama elektrotunun geriliminin % 10'unu aşmaması isteniyorsa; edilgin elektrot, etkin elektrottan etkin elektrotun eşdeğer yarıküresinin yarıçapının en az on katı kadar uzağa konmalıdır.

Etkin yarıküre elektrotların ikiden fazla olduğu durumlarda (gerçi 3.7b bölümünde görüldüğü gibi bu durum daha basite indirgenebilir); 3.7. bölümünde üç elektrot için verilen yöntem esas alınarak bilgisayar hesaplamalarından yararlanılabilir.

Son olarak şuna değinebiliriz; toprak alt katmanı yüzeysel tabakadan daha iletkenise; yakın elektrotlar arasındaki kuplaj etkisi azalma, toprak alt katmanı daha dirençli ise bu etki artma eğilimindedir. Bu durum, 4.1.2. bölümündeki sonuçlarla uyum içindedir.

5.2. İletkenleri Gömülü Bir Ağ Şebekenin Çevresindeki Elektrot

Homojen arazide iletkenleri gömülü bir ağ şebekeden I akımının akması iletkenleri $2pl/P$ düzeyindeki bir gerilime yükseltir. Burada P tesisin çevre uzunluğunu gösteriyor. Aynı akım ağın merkezini (bölüm 3.8.1) yukardakinden yalnızca yaklaşık pl/L kadar küçük bir gerilime yükseltir. Burada da L gömülü iletkenlerin toplam uzunluğunu gösteriyor. Bu durumda ağ şebeke ile elektrot arasındaki en küçük kuplaj çarpanı $1 - P/2L$ düzeyindedir ve çok sayıdaki ağ gözlerinden oluşan bir şebekede bu değer çoğunlukla bire yakındır.

Düşük yada orta değerdeki bir kuplaj için elektrot, ağ şebekenin kenarlarının dışına ve uygun bir uzaklığa yerleştirilmelidir. Bu durumda 5.1. bölümündeki bağıntıları toprak homojen olduğu sürece uygulayabiliriz. Eğer toprak homojen değilse 4.1.2.3. bölümünde verilen belirtmelerden yararlanılır.

6. PRATİK VERİLER, BELİRLİ BİÇİM ve BOYUTLARDAKİ BİR TOPRAKLAMA ELEKTROTUNUN EMPEDANSINI ETKİLEYEN ETMENLER

6.1. Toprağın özgül direnci

Herşey eşit olduğunda bir topraklama elektrotunun direnci, toprak homojen olduğu sürece toprağın özgül direnciyle orantılıdır (bölüm 3.4.1). Öte yandan bazı homojensizliklerin elektrot direncine olan etkisi 4.bölümde incelenmiştir.

6.1.1. Toprakta derinlik ve genişlik

Arazinin yüz ve derinlik yönünden niceliği ki özgül direnç üzerinde önemli rol oynar, arazide aranan niteliklere bağlıdır (bölüm 3.2).

Topraklama elektrotunun hemen yakınındaki gerilim gradyanlarıyla ilgileniliyorsa; elektrotların gömülü olduğu katmanda elektrotun yakınındaki toprağın özgül direncinin bilinmesi yeterlidir.

Topraklama elektrotunun toplam direnciyle ilgileniliyorsa; elektrotun boyutlarının çok az bir katkı derinliğindeki toprak alt katmanının özgül direncinin bilinmesi gerekir.

Son olarak eğer elektrotun yeterince uzağındaki bir bölgede toprağın ulaştığı gerilim ile ilgileniliyorsa; bu özellikle toprak alt katmanının çok dirençli olduğu durumlarda önem kazanan bir sorundur, büyük bir bölgede önemli bir derinliğe kadar toprağın özgül dirençlerinin gözönüne alınması gerekebilir.

6.1.2. Doğal toprakların özgül direnç değerleri

Toprakların iletkenliği temel olarak nem oranına bağlıdır. Mevsim koşullarının yüzeysel katmanların özgül direnci üzerindeki etkisi ortalama 1-2 m düzeyindeki bir derinliğe kadar duyulur. Bir metre derinlikteki toprakta nemli kış ile kuru yaz arasındaki değişime 1'e 3 (bazen daha fazla) düze-

çizelge 3.

Toprağın Niteliği	Özgül direnç (ohm·m)
Bataklık	birkaç - 30
Balçık, mil	20 - 100
Hümüs	10 - 150
Nemli turbo	5-100
Plastik (şekil verilebilen) kil	50
Marnlar ve sıkışık killer	100 - 200
Jurassik marnlar	30-40
Killi kumlar	50 - 500
Silisli kumlar	200 - 3000
Çıplak taşlı toprak	1500 - 3000
Çimle kaplı taşların bulunduğu toprak	300 - 500
Gevrek kalkerler	100 - 300
Sıkışık kalkerler	1000 - 5000
Çatlak kalkerler	500 - 1000
Şistler	50 - 300
Mikaşistler	800
Granitler ve bozulmaya başlamış kumtaşları	1500 - 10000
Granitler ve çok bozulmuş kumtaşları	100 - 600

yinde olabilir. Bu etki küçük elektrotlarda büyüklere oranla daha fazla duyulur.

Don, yüzeysel toprak tabakasının özgül direncini birkaç bin ohm.m'y'e kadar çıkarabilir.

Toprağın tanecikliliği, toprağın nem tutuculuğunu yada elektrotlarla olan temasını etkileyerek önemli rol oynar.

"Konut yada büro olarak kullanılan binalarda topraklama tesisatlarının kurulmasına ilişkin pratik klavuz" adlı UTE'nin 1967 yılı ve 15-120 nolu yayınında yüzlerce kaynaktan alınan çeşitli toprakların özgül dirençlerine ilişkin çizelgeyi (Çizelge 3) buraya alıyoruz.

Aşağıdaki çizelgede özgül direnç değerlerinin kaba ortalaması verilmiştir:

Toprağın Niteliği	Özgül direncin Ortalama Değeri (ohm.m olarak)
Ekilebilir biter azaziler, nemli sıkıştırılmış dolma topraklar	50
Ekilebilir verimsiz azaziler, çakıllı kum, kaba dolma topraklar	500
Çıplak taşlı topraklar, kuru kum, su geçirmez kayalar	3000

Akarsuların özgül direnci şehirlerden geçen büyük nehirlerde birkaç on ohm.m'ye kadar düşmesine karşın granit nitelikli azazilerden geçen nehirlerde birkaç yüz ohm.m'ye çıkıyor. Yeraltı akarsuları tarafından yıklanan yassı çakıl taşlarının bulunduğu tabakalarda özgül direnç birkaç bin ohm.m'ye kadar çıkabilir.

Bölgede bazı ölçmeler yapılarak daha doğru değerlendirilmelerde bulunulabilir. Belirli biçim ve boyutlardaki topraklama elektrotlarının direncinin ölçümü toprağın özgül direnci üzerinde en iyi ve güvenilir bilgi kaynağıdır.

6.1.3. Doğal toprakların iyileştirilmesi

Topraklama elektrotlarının yakınındaki toprağın doğal özgül direncine etki yapılarak topraklama elektrotlarının direnci düşürülebilir.

Bir iletken, hendek yada çukura gömülü ise; toprağın ilk katlarının özgül direnci düşürülebilir ve hendek yada çukur toprakla doldurularak temasın niteliği iyileştirilebilir. Bunun için iletkenin hemen civarı tanecikli ve özgül direnci düşük bir malzeme ile örneğin, hümüslü toprak, ezilmiş ağaç kömürü vb. ile doldurulur.

Elektrotların yakınındaki toprağın özgül direnci nem tutucu ve elektrikte çözümlenebilen (elektrolit) tuzların katılmasıyla da düşürülebilir. Çoğunlukla tuzlar toprağın yüzeyine yada az derinlikteki hendeklerin içine yerleştirilir. Bu durumda tuzların toprağın daha derinliklerine nüfuz ettirilmesi işi yağmura bırakılmış olur. Mutfak

tuzu gibi çabuk eriyen malzemelerde; yoğunluğun hızla azalma ve bir uzaklıktan sonra etkisiz olma tehlikesi vardır. Bu durumda tuzlama işinin sık sık, örneğin mevsimde bir kez yenilenmesi gerekir. Kireç sülfat gibi yavaş eriyen malzemelerin toprak içine nüfuzu daha yavaştır, ancak etkileri uzun sürelidir. Donma niteliğine sahip bazı elektrotlarla çözümlenen maddelerin (elektrolit) toprağa enjekte edilmesi önerilebilir. Bunların etkinlik süreleri oldukça uzundur. Yine de tüm bu malzemelerin kullanımı toprağın geçirgenliği ile sınırlıdır.

Toprağın iyileştirilmesi işlerinin maliyeti ele alınan toprağın hacmi ile orantılıdır. Öyle ki bunun topraklama direncine etkisi küçük topraklama elektrotlarında yalnız doğrusal boyutların bir işlevi durumundadır. Uzatılmış biçimdeki elektrotların (bölüm 3.4.4) eşdeğer çapının artırılmasının direnç üzerindeki etkisi azdır. Basitçe başka elektrotların ilavesine oranla bunun yararı, kullanılan malzemelerin fiyatına ve topraklamaların yapılışına bağlıdır. Özellikle 4.2.1. bölümünde verilen değerlendirmeler yada arazi içinde ve benzer topraklamalar üzerinde elde edilen sonuçlar daha iyi bilgiler verebilir.

6.1.4. Betonun yada yapay sıva ve kaplamaların özgül direnci

Beton çok gözenekli bir ortamdır. Kuru durumda özgül direnci büyük olmasına karşın yaş durumda çok küçük değerlere düşer. Toprak içine gömüldüğünde çevredeki arazinin nemine bağlı olarak belirli bir nem düzeyine sahip olur. Öyle ki gömülü metal yapı ile doğal toprak arasında bulunan orta kalınlıktaki bir betonun, toprak direncini metalin doğrudan toprakla olan temasındaki dirence göre fazla değiştirmeyeceği kabul edilir. Bu durum daha çok betonarme direkler için geçerlidir.

Ayrıca sıvaların özgül direnci insanların güvenliği üzerinde önemli rol oynar. Çünkü bu sıvalar vücut üzerinden toprağa akan akımın devresinin bir bölümünü oluşturur. Bu yüzden özgül direncin çok büyük olması arzu edilir (bölüm 8.2).

Kuru bir beton tabakası alçak gerilimleri önlemek için yeterlidir. Ancak birkaç santim kalınlığındaki beton birkaç bin voltlik gerilimle delinebilir ve o zaman beton etkinliğini yitirir. Beton ıslaksa bu gerilim çok daha düşüktür.

Nemli ve kuru durumlar için çok sayıdaki toprak ve yapay sıvalar üzerinde Goerges Badier'in yaptığı ölçmelerin sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir (3).

6.2. Akan Akımın Karakteristiklerinin Etkisi

6.2.1. Frekansın etkisi:

Yıldırım akımları durumu

3.6.5. bölümünde belirtelin çok uzun iletkenler durumunun dışında topraklama elektrotları genel olarak sistem frekansına karşı pratikte saf bir direnç gibi davranır.

Çok daha yüksek frekansların bulunduğu yıldırım

Sıvanın yada Toprağın Cinsi	Kuru Durumda	Nemli Durumda
10-15 cm dolayında kırılmış-taşlarla (balast) kaplı toprak	∞ Yalıtkan	3000 - 5000
İçerdeki beton	3000 - 10000	210-250
Metalle güçlendirilmiş çimento (5cm'lik demir)	∞	14000 (nemli) 100-150 (ıslak)
Çimentolanmış toprak	172 000	5000 (nemli)
Metal tozları ile kirlili (yağlı) çimento	500 - 600	100 - 150
Tuğla	5000	500

Not: Ölçmeler elektronik voltmetre ile yapılmıştır.

Çizelge 4. Bazı tahta döşeme ve yapay topraklar üzerinde yapıları özgül direnç ölçmelerinin sonuçları (ohm-m²/m olarak).

akımlarında ise durum farklıdır. Dalganın alın süresinde iletkenin eşdeğer empedansını belirleyen karakteristik uzunluk toprağın özgül direncinin kareköküyle değişir ve birkaç on metreye kadar düşebilir (bölüm 3.6.5). Dalganın kuyruk bölümünde doğan indüktif etkiler çok daha önemlidir.

Yıldız kollu düzenleme elektrotlarının indüktansını azaltır. Kol sayısının artırılmasının indüktans üzerine etkisi direnç üzerine olandan daha fazladır.

Düşük gerilimlerde yıldırım akımları büyük boyutlardaysa bunlar daha da önem kazanır. Yıldız biçiminde 2, 3 yada 4 kollu elektrotlar özel nitelikli bazı tesisatlar için yararlı olabilir.

Bazı ayırıcı ve kesici manevralarında aynı şekilde sarp alınlı (alın kısmının yükselme hızı çok fazla) dalgalar üreyebilir, toprak devreleri üzerine yansiyabilir.

6.2.2. Akan akımın şiddetinin etkisi

İkincil etkiler yoksa, toprak direnci pratikte akımın şiddetinden bağımsızdır ve düşük akımlarda yapılan ölçmeler büyük akımlar için de geçerliliğini korur.

Gerilimin akıma olan oranında yapılacak önemli değişikliklerin yararlı etkileri olabilir. Bunlar bir yandan; akımın uzun süre akmasıyla toprağın ısınmasına ilişkin, diğer yandan yüksek gerilim gradyanları etkisiyle elektrotların yüzeyinden başlayarak toprağa yayılan arkların ve kıvılcımların görünmesine ilişkin etkilerdir.

Birinci olarak toprakla elektrot arasındaki temas orta düzeydeyken, belirli bir gerilimden sonra küçük kıvılcımlar iki ortamı birbirinden ayıran yalıtkan ince tabakaları atlamaya, aşmaya başlar. Kötü temaslar nedeniyle alçak gerilimde yapılan ölçmelerde bulunan yüksek direnç daha sonra kuramsal değerine doğru yaklaşır. Kötü temasların

kaçınılmaz olduğu küçük boyutlu elektrotlarda bu etki daha çok görülebilir.

İkinci olarak çok büyük akımlar için elektrotun hemen yakınındaki gerilimin gradyeni arkın oluşumu ile birlikte toprak ile elektrot arasında atlamaya yol açacak değeri aşmayı başarabilir.

Bu ark elektrotun bir noktasında başlar ve bazı dallanmalarla toprak içine yayılır. Bu nitelikteki arklar elektrottan başlayarak çeşitli yönlerde aynı anda yayılabilir.

Bu tür arklarda gerilim düşümü bir yana bırakılırsa arkların, elektrotların görünür boyutlarını artırma-gibi bir etkisi vardır. Bu da sonuçta direncin düşmesine yol açar.

Etki küçük elektrotlarda duyulabilir. Ancak bir yıldırım deşarjının alın süresi gözönüne alınırsa arkların toprak içinde çok yavaş yol aldığı görülür. Bu tür arkların özellikle 50 Hz'li akımlarda fazla sürmemesine dikkat edilmelidir. Çünkü bunlar elektrotları çok çabuk tahrip eder. Çok güvenilmez olmayan bazı deney sonuçlarına göre; 100 ohm.m özgül dirençli arazide toprağı delecek kritik gradyene yaklaşık 60 A/m'lik akımlarda ulaşılabilir.

6.2.3. Akımın toprağı ısıtmasının etkileri

Toprağın ısınması, beraberinde kurumayı getirmezse toprağın iletkenliğini artırır. Bir toprak tabakasının özgül direnci birkaç derece ile 20 - 25°C arasında 2'ye 1 oranında azalır. 20 ve 80°C'ler arasında da aynı oranda bir azalma olur.

Elektrotun Üzerinden uzun süreli bir akımın akması elektrotun direncini azaltır. Dirençteki azalma elektrotun yakınındaki toprak katlarının toplam dirence olan katkısına bağlıdır. Bu yalnız küçük boyutlu elektrotlarda önemlidir.

Sıcaklık elektrotun hemen yakınında en yüksektir. Sıcaklık 100°C'a ulaştıkça durum kritikleşir. Çünkü bu anda elektrotun etrafındaki su hızla buharlaşmaya başlar ve elektrot çok dirençli kuru bir tabaka ile temasa kalır. Elektrot üzerinden akım akıtma yeteneğini yitirir ve sistemin faz toprak gerilimine yükselir. Bu anda durum tehlikelidir.

a) Şebeke, çalışma değeri ilk arıza akımını aşmayan hızlı korumalar ile donatılmışsa; kurumanın tekrar kapamadan önce olması istenmez, d çaplı iletkenin p özgül dirençli bir toprağı gömülü olduğunu düşünelim. T tekrar kapama zamanının işlevi olarak iletkenin metresinden geçen i sınır akımı yaklaşık olarak;

$$i = \frac{50000 d}{\sqrt{\rho T}} \text{ dir.}$$

d = 0,01 m, p = 100 ohm-m ve T = 1 saniye için i = 50 A/m dir.

b) Koşullar öyle olur ki yalıtkanlık arızaları sistemde belirsiz bir süre kalabilir. Bu durumda yaklaşık 200 V'tan sonra bazı bölgelerde kuruma tehlikesi belirir. Gerilimin alt sınırında kuruma için gerekli süre birkaç günü bulabilir. Bu durum işletme koşullarının toleranslı olduğu nö-

rü topraksız sistemlerde hat direklerinin toprak dirençlerinde yeter sıklıkta bir sınırlamayı getirir. Sistem gerilimi elektrot etrafında oluşan ince yalıtkan tabakaları delmeye yetiyorsa; durum kritikleşir. Çünkü bu durumda kuruma yayılır ve toprak çok yüksek sıcaklıklara ulaşır, kızılmaya kadar gidebilir.

Ancak bu gibi durumlara normal sistemlerde pek raslanmaz.

7. TEKNOLOJİ

7.1. Topraklamanın istenen ve Fiilî (de facto) tki ögesi

Topraklamada öğeler istenen ve fiilî olarak iki bölümde toplanabilir. İstenen öğeler özel olarak toprak akımlarının akışına ayrılmıştır. Fiilî öğeler toprağı gömülmüş metal yapılardır. Kanallar, temeller, beton demirleri vb. sayabiliriz.

İstenen öğeler çoğunlukla yatay kanallara gömülü iletkenler, düşey çubuklar yada dolu levhalardır. Yapıları elektrotlara bağlamak için kullanılan toprağı gömülü iletkenlerin yalıtkan olmayan bölümleri de topraklamanın bir parçası gibi davranır.

7.2. Elektrot Tipinin Seçimi

Elektriksel koşullardan, teknik ve toprak niteliğinin önemli rol oynadığı ekonomik düşüncelerden ötürü çoğunlukla bir tip elektrot seçmek zorunda kalınır.

Topraklama levhaları (bölüm 3.6.1); toprağın oldukça düşük özgül dirençli olduğu, çukur kazma işinin çok pahalı olmadığı ve direnci biraz yüksek küçük boyutlu bir elektrot (örneğin çok sayıdaki noktada topraklanmış bir alçak gerilim şebekesinin nötr iletkeni durumunda) kullanmakla yetinildiği durumlarda kullanılır.

Çapı 15 mm düzeyindeki çubukları çakmak için mekanik (çekiç, balyoz gibi) araçlardan yararlanılırsa, çubukların kullanımı daha ekonomik olur (bölüm 3.6.2). Bu arada birçok çubuk paralel bağlanarak kullanılabilir. Gerekirse çubuklar uygun biçimde birleştirilerek onlarca metre derinliğe inilebilir. Bu yöntem toprak katlarının yüzeysel tabakalardan daha iletken olduğu durumlarda yararlıdır.

Kanallar başka nedenlerden gerekiyorsa (örneğin yapıların temelleri için) yatay kanallara iletkenlerin yerleştirilmesi çok ekonomiktir. Ayrıca bu, sert kayalık toprak alt katmanının ince bir taşıma toprakla örtülü olduğu durumda en çok salık verilen bir yöntemdir. Kullanılan arazinin çevresini saran gömülü halka, gömülü iletkenin uzunluğuna eşit en düşük direnci veren çözümdür (bölüm 3.6.3.2). Son olarak, yoğunlaşık (konsantre) elektrotlar istenen direnci elde etmeye yetmiyorsa; küçük boyutlu yapılarda yıldız kollu elektrotların kullanılması uygun olur (bölüm 3.6.3.3). Bunlar yıldırım akımlarına tek iletkenin gösterdiği empedanstan daha düşük bir başlangıç empedansı ile karşı koyarlar.

iletkenleri gömülü ağ şebekeler (bölüm 3.6.4) doğal olarak daha çok geniş alanlı harici elektrik tesislerinde kullanılır. Bu tesislerde topraklanması gereken çok sayıda ve çeşitte aygıt, konstrüksiyon ve mesnet vardır. Tüm bu nesnelere birbirine bağlayan topraklama iletkenlerinin gömülü olması ve bunlara temellerin demir bölümlerinin eklenmesi, toprağı doyurmaya yetecek yoğun bir şebeke oluşturur. Yüzeysel toprağın özgüldirenci toprak alt katmanına göre çok yüksek olmadıkça, tesise düşey çubuk ve boru gibi başka öğelerin ilave edilmesi pek bir şey-kazandırmaz.

7.3. Topraklama öğeleri ve iletkenlerinin Niteliği ve Minimum Boyutları

Topraklama sisteminde kullanılan toprağı gömülü iletken öğeler normal olarak galvanizli çelik, bakır kaplı çelik yada yalnız bakırdan yapılırlar.

Yumuşak metaller ancak toprakta korozyona karşı yukardaki metaller gibi direnç gösterdiği kanıtlanmışsa kullanılır.

Konutlar için UTE 15-120 ve VDE 01 41/2.64'nin verdiği gömülü öğelerin minimum boyutları aşağıya çıkarılmıştır.

- Kanala Gömülü İletkenler:
 - . 3 mm kalınlığında ve 100 mm²'lik galvanizlenmiş kolay' işlenebilir çelik şerit yada 95 mm²'lik galvanizli çelik kablo.
 - . 2 mm kalınlığında ve 28 mm²'lik bakır şeritler, 28 mm²'lik kablo yada dolu iletken.
 - . Örgülü bakır kabloların kullanılması öğütlenir.
- Düşey Çubuklar:
 - . 25 mm'lik galvanizli çelik boru yada 60 mm kenarlı galvanizli yumuşak çelikten yapılmış profil.
 - . 15 mm çapında, bakır tabaka ile kaplı çelik çubuk (VDE'de 2,5 mm).
 - . 15 mm çapında bakır çubuk.
- Levhalar:
 - . 3 mm kalınlığında çelik levha.
 - . 2 mm kalınlığında bakır levha.

Bu minimum boyutlar normal mekanik yada kimyasal bozulma tehlikelerini karşılamaya yöneliktir. Korozyon tehlikesinin çok fazla olduğu durumlarda bu boyutlar yeterli olmayabilir.

Topraklama iletkenlerinin kesitleri toprak dışında; mekanik yada kimyasal bozulma tehlikesinin bulunduğu her yerde yukardaki minimum değerlere uymak zorundadır. Bundan başka bakır iletkenlerin minimum kesiti 16 mm²'dir.

Toprak iletkenlerinin kesiti taşınması gereken akımlar ve bu akımların geçiş süreleri ile uygunluk içinde olmalıdır. Çizelge 5'teki değerleri klavuz olarak kabul edebiliriz. Bu değerler, 1 sn sonra ulaşılan 200°C'lik bir sıcaklığa karşılıktır.

Akmasına 1 saniye müsaade edilen akım (A)

Kesit (mm ²)	Çelik (67 A/mm ²)	Alüminyum (105 A/mm ²)	Bakır (160 A/mm ²)
16			2 500
25		2 700	4 000
35		3 700	5 500
50	3 300	5 300	8 000
70	4 700	7 400	11 500
100	6 700	10 500	16 000
200	13 500	21 000	32 000

çizelge 5.

7.4. Topraklamanın Yapımı

Topraklama elektrotlarının etrafındaki toprakla teması iyi olmalıdır. İnce tanecikli toprak temasta olduğu kadar nem tutuculukta da üstünlük sağlar. Toprak iyi değilse elektrot verimli bir toprak, ağaç kömürü vb. (bölüm 6.1.3) bir yastığın içine yerleştirilir ve etrafındaki toprak sıkıştırılır. Bu yöntemle teması iyileştirmek yararlı olabilir.

Kanalların derinliği olanak varsa 0,5-1 m arasında olmalıdır. Uzun bir kanalda iletkenin zikzag yerleştirilmesi direnci pek azaltmaz (bölüm 3.6.2).

Levhalar yada diğer küçük açılımlı topraklama elektrotlarının yerleştirildiği çukurlar direnç üzerindeki mevsimsel etkileri azaltmak için daha derin olmalıdır (bölüm 6.1.2). Dolu levhalar çoğunlukla 1x0,5 m boyutundadır ve düşey yerleştirilmeleri tercih edilir. Olanak varsa levha, büyük kenarı en az 1 m derinlikte olacak biçimde yerleştirilmelidir. İşlenmiş (deploy) metalden yapılma levhalar yatay yerleştirilebilir.

Çubuklar toprak içine, daha büyük bir uzunlukta nüfuz etmeleri istenirse eğik olarak çakılabilir.

Yıldız kollu topraklama sistemlerinde kol sayısının dördü aşmasının, çok yüksek frekanslı akımlar yada yıldırım akımlarının boşaltılmasının büyük özen gerektirdiği özgün tesislerin dışında genellikle bir yararı yoktur (bölüm 3.6.3.3).

Topraklama sistemi paralel iki çubuk yada levhadan oluşuyorsa, aralarındaki uzaklığın en az gömülme derinliğine eşit olması arzu edilir. Paralel elektrot sayısı ikiden fazlaysa; komşu elektrotlar arasında ayrılacak uzaklık elektrot sayısı ile biraz artar (bölüm 3.7).

7.5. Topraklama iletkenlerinin ve Toplayıcılarının Yapımı

Elektrotlar ve toprak iletkenleri arasındaki bağlantıların iletkenliği güvenilir ve uzun süreli olmalıdır.

Toprağı gömülü yada hava değişikliğine açık yerleştirilmiş farklı metaller arasındaki bağlantılar da uygun bir kaplama ile korunmalıdır.

Kesiciler, elektrik sigortası yada aletsiz sökülebilen birleştirmelerin toprak iletkenleri yada toplayıcılarının yolu üzerinde bulunmasından ka-

çinilmalıdır.

Toprak iletkenlerinin bazı noktalarında ve özellikle bunların toprağa girdiği bölgelerde; kesit artırımı, koruyucu kaplama vb. koruyucu önlemler gerekebilir.

Topraklanacak gövde ve yapıların topraklama toplayıcılarının yolu üzerine sokulmaması öğütlenir. Çünkü bazı koşullarda bunlar topraklama toplayıcılarının kesiksizliğini tehlikeye sokabilir. Gövde ve yapılar, bu kesiksizliğe zarar verilmeden toplayıcıya doğrudan bağlanmalıdır.

Çelik konstrüksiyonlar üzerinde taşıdıkları öğelerin topraklaması için, topraklama ve elektriksel kesiksizliğin iyi sağlanması koşuluyla daima kullanılabilir.

Beton demirleri de kesitin yeterli olması ve kesiksizliğinin sağlanması koşuluyla toprak iletkenleri gibi kullanılabilir.

7.6. Elektrotlarla Gömülü Metal Yapılar Arasındaki İlişkiler

Topraklama elektrotu, yakınına gömülmüş metalik kanalların yada büyük boyutlu diğer metalik yapıların topraklamasına bağlanırsa; elektrotun etrafındaki gerilim gradyenleri ve toprak direnci azalır. Buna karşılık kanalların yada diğer yapıların topraklama sistemindeki gerilim yükselmesine katkısı artırılmış olur.

Ancak bu sonuncu etki yalnız, kanal konumundan ötürü topraklama ile sıkı bir kuplaj içinde değilse görülür. Böyle bir kuplaj durumunda (bölüm 5) kanal üzerindeki gerilimler doğrudan bağlantıdan ötürü az artar. Doğrudan bağlantı; kanal ve topraklama arasındaki bölgedeki gerilim gradyenlerini düşürür ve yüksek gerilimlerde kanala ark biçiminde akımların sızmasını önler.

Topraklamalar ile gömülü kanallar, metal kılıflı elektrik kabloları yada elektrikli olmayan oluklar (*conduit*) arasında yapılacak bağlantılar kimi zaman özel durum, kimi zaman da genel düzenlemelerde birer sorundur. Eğer kanal yakınındaki topraklamanın gerilim yükselmelerinden etkin biçimde korunacaksa, aralarındaki her metalik bağlantıyı kaldırmak yetmez. Ayrıca toprakla olan kuplajı düşük bir değere indirmek gerekir. Çıplak kanallarda bu, toprak içinde kanal ve topraklamayı birbirinden ayırarak yapılamaz (4.2.2). Kanalin yalıtımına gidilecekse bu iki biçimde olur. Ya kanalın topraklamaya yakın bölümünü daha uzaktaki bölümlerinden ayıran yalıtkan kesmeler yada yalıtkan kaplamalar kullanılır. Ancak bu durumda yeterli bir ayırmayı sağlamak için yalıtkan kesmelerin oldukça uzun olması yada kaplamanın kanal ile yakındaki toprak arasında görülebilecek gerilimlere dayandığının incelenmesi gerekir.

7.7. Yakın Topraklamalar Arasındaki İlişkiler

Bir tesiste çeşitli topraklamaların birbirine bağlanması, daha düşük bir ortalama direnç elde edilmesini sağlar. Ayrıca bu, tesisin bölmeleri arasındaki yerel gerilim farklarını azaltır. Bu aynı zamanda aralarındaki kuplajı bilmeyi gerektirmeden farklı bölmelerin işleyişini en basit

biçimde önceden görebilmemizi sağlayan bir yöntemdir. Bu kuplajlar kötü tanımlanmış yada kötü denetlenmiş olabilir. Örneğin bir tesiste çalışmaların ardından dikkatsizlik sonucu bağımsız iki topraklama sisteminin birbirine birleştirilerek bırakılma'sı gibi.

Bir tesiste güvenlikten kuşku duyuluyorsa çeşitli topraklamaların birbirine bağlanması yararlı olabilir. Ancak bu durumda istenmeyen gerilimlerin tesisin dışına yayılması gibi sakıncalı durumlarla karşılaşılır.

Bu durum özellikle dağıtım merkezinden uzakta müşterileri besleyen trafoların alçak gerilim nötr noktalarının topraklamasında görülür. Yüksek gerilim merkezindeki gövdelerin yalıtkanlık arızalarında alçak gerilim nötrü topraklamasının gövdelerin topraklamasına bağlı olması, müşterilere bazı koşullarda çok büyük değerlere ulaşabilecek gerilimler aktarır. Durum incelemesinin topraklamaların birbirine bağlanmasının tehlikesiz olduğunu gösterdiği durumun dışında, topraklamaların birbirinden ayrılması tercih edilir. Bu durum incelemesi arıza akımları ve toprak dirençleri gözönüne alınarak yapılır.

Topraklama devrelerinin birbirinden ayrılmasının sonuçsuz kalmaması için bazı önlemlerin alınması gerekir. Örneğin ayrı topraklamalar, toprakla olan kuplajın düşük bir değerde sınırlandırılması için birbirinden yeterince uzaklaştırılmalıdır (bölüm 5). Ayrıca gövdelerin topraklamasından farklı bir topraklamaya bağlı iletkenler yada aygıtlar, en az topraklama devreleri arasında görülebilecek bir gerilim değeri için gövde topraklamalarına karşı yalıtılmalıdır.

7.8. Çeşitli Güvenlik önlemleri:

Eşgerilimli Bağlantılar ve Yalıtma

Gerilimli bir nesneyle olan temas tehlikesi iki biçimde ortadan kalkar. Birincisi bu nesne, aynı anda dokunulabilecek diğer nesnelere aynı gerilimdedir. İkincisi bu nesne diğerlerinden ya yeterli bir yalıtımla yada vücuttan geçen akımı tehlikesiz bir değerde sınırlayabilecek direnci gösteren bir sıva (yada kaplama) ile ayrılmıştır.

Toprağa akımın akmasıyla doğan gerilimler konusunda alınan güvenlik önlemlerinde iki farklı ilkededen yararlanılabilir: Eşgerilimlilik ve yalıtma.

Aynı anda dokunulabilecek ortam ve nesnelere arasında yapılan eşgerilimli bağlantıların üstünlüğü genel olarak basit, ucuz ve güvenilir olarak gerçekleştirilebilmeleridir. Öte yandan bir tesiste tüm iletken öğeli gövdelerin birbirine bağlanması güvenlik konusunun sınırlarını aşar.

Eşgerilimli bağlantıların yalnızca "doğrudan olmayan temaslar" alanındaki güvenliğe katkıda bulunduğu unutulmamalıdır. Doğrudan olmayan temas, kazara gerilimi yükselmiş bir gövde aracılığı ile olan temastır. "Doğrudan temas" ise sistemin kötü yalıtılmış yada çıplak bir iletkeniyle olan temastır. Birbirine yakın tüm nesnelere düzenli olarak topraklanması "doğrudan temas" tehlikesini artırır. Çünkü bu durumda nesnelere beklenmedik yalıtılma şansları kaybolur. Halbuki aynı andaki temasta bu şans bir koruma sağlayabilir. Fransa'da alçak gerilimli konut tesislerinde elektrikle çar-

pılıp ölme olaylarının büyük çoğunluğunun nedeni doğrudan temaslardır.

Doğrudan temaslara karşı tek etkili önlem yalıtma-
dır. Yalıtma çeşitli biçimlerde olabilir: Kanallar üzerinde yalıtkan kesikler yapılması bazı aygıtların çift yalıtılması, manevra (açma-kapama) yapılacak aygıtların önüne yalıtkan tabure yada halı, kilim gibi benzeri örtü konması, yalıtkan eldiven ve ayakkabı tabanlarının kullanılması, yalıtkan kılıflı aletler kullanılması, vb. Doğrudan temaslara yerel koşullara bağlı bir incelemeyi gerektirir. Yetersiz bir yalıtma işe yaramaz bir güvenlik sağlar.

7.9. Bir Elektrik Tesisinin Sınırlarını Oluşturan Yada Aşan Metal Yapılar

Güvenlik konusunda, bir elektrik tesisinin içi-
nin yada dışının düşünülmesi gibi iki zıt yön bulunabilir. Bu durumda çeşitli tehlikeler ciddi biçimde ele alınmalıdır.

7.9.1. Elektrik tesislerini çevreleyen çitler

Bir tel çit ile sınırlanan elektrik tesisinin çevresindeki eşgerimlilik yalıtkanlık arızası durumunda, çitin iletken öğeleri toprak devrelerine bağlı olduğundan yararlı olabilir. Ancak bu bağlantılar yokken çitle olan dokunma gerilimleri çok büyük değerlere çıkma eğilimindedir. Çitin hemen yakınında halkın geçme ve özellikle durma, bekleme olasılığı büyükse çitin, gövdelerin topraklaşmasına bağlanmaması ve topraklama devrelerinin çitin en az iki metre dışına gömülmesi tercih edilir. Bu durumda yine çit ile toprak devreleri arasındaki kuplajlar önemli düzeydedir.

Çit ister bir konstrüksiyonla gövde topraklaşma-
na bağlansın, isterse gövde topraklaşma ile arasındaki kuplaj etkisinden ötürü gerilimi yükselsin, çitin yakınındaki gerilim gradyanlarıyla uğraşmak, özellikle arıza akımları çok yüksek, tesisin boyutları küçük, toprak çok dirençli ve çitin çevresi insanların çok gelip geçtiği bir yer ise yararlı olabilir. Çit ile yakındaki bir ev arasında çeşitli dotnestik kullanımlar için metal tel çekmek çok tehlikelidir. Ayrıca metal kanalların evlerin çok yakınına gömülmesinden kaçınılmalıdır. Çok sık durulan yerlerin altına elektrik alanını bölüşen elektrotların gömülmesi çok seyrek kullanılan bir yöntemdir. En etkili, çoğunlukla da yeterli güvenlik önlemleri toprak arızalarının hızla temizlenmesi ve çok seyrek olmasının sağlanmasıdır.

7.9.2. Giriş kapıları

Bir elektrik tesisinin giriş kapısında geçme, durma ve dokunma olasılıkları çitin geri kalan bölümlerine göre çok daha fazladır. Bu nedenle metal kapıların gövde topraklamalarına bağlanması tercih edilir. Ancak böyle bir bağlantı konstrüksiyondan yada iyi bir yalıtımı sağlamanın güç olmasından ötürü tesadüfen var olabilir. Öyle ki bu tür bağlantıların yokluğu pek düşünülemez. Eğer tehlike büyükse; kapı eşiğinin önüne ya elektrik alanını dağıtmak için elektrotlar gömülmesi yada büyük özgüldirençli bir kaplama yapılmalı,

örneğin çakıl taşı dökülmelidir.

7.9.3. Çekülden yada düşeyden sapmalar

Bir çit yada başka bir metal yapı kopma tehlikesi olan elektrik hattına göre düşey durumda değilse; kopuk telin, düşme sırasında çit yada yapı tarafından tutulma tehlikesi vardır. Öyle ki kopuk telin başka noktalardan daha iletken durumdaki toprakla teması olmaz. Bu durumda hat korumalarının çalışmasını sağlayacak yeterli akım akışı, çit yada yapı topraklanarak güvence altına alınabilir.

7.9.4. Demiryolu rayları

Bir demiryolu elektrik tesisinin içine kadar giriyorsa (ki bu elektrik tesisindeki gövdeler toprak arızalarında önemli gerilimlere yükselebilir) tesisin ister içinde ister dışında olsun raylar ile toprak yada yakınındaki nesnelere arasında gerilim farkları doğabilir. Raylar gövde topraklaşmasına bağlanırsa tesis içindeki gerilim farkları ortadan kaldırılabilir yada en az düşürülebilir.

Elektrik tesisinin içinde bulunmasından kaçınılan gerilim farklarının tesisin dışına çıkma tehlikesi daima vardır ve bunun üzerinde önemle durulmalıdır. Eğer raylar toprakla doğrudan temastaysa raylar topraklaşmanın bir uzantısı gibi düşünülerek toplam akımın ne kadarının üzerinden geçtiği hesaplanabilir (3.7). Orta uzunluklar için bu pay rayların uzunluğu ile bu uzunluk artı tesis çevresi arasındaki oran düzeyinde olacaktır. Rayla yakındaki toprak arasında doğan dokunma gerilimi rayın metresinden akan akımla yüzeydeki toprağın özgül direncinin çarpımının yarısı kadardır.

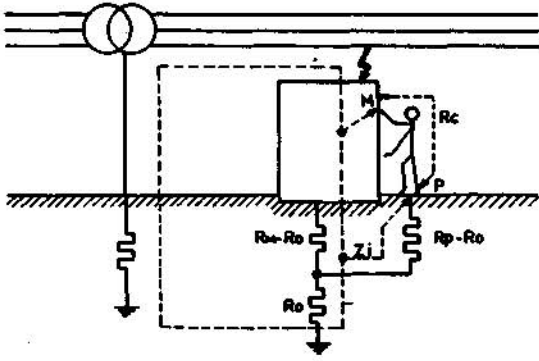
Eğer raylar balastlar üzerindeyse, rayların akımın akışına katkısı oldukça azdır. Ancak balast üzerindeki durmalarda balastın gösterdiği direnç güvenliğe etkin biçimde yardımcı olur.

Eğer raylar çok uzunsa; demiryolu uzun bir kanal gibi de alınmalıdır. Bu durumda artık boyuna gerilim düşümleri ihmal edilemez. Yerel gerilimler de genellikle orta düzeydedir.

Durum incelemesinde önemli bir tehlikenin varlığına raslanırsa; bir güvenlik önlemi olarak demiryolunun tesisin içindeki bölümü dışındakinden ayrılabilir. Bu ayırma rayın belirli bir uzunluğu yalıtılarak yapılır.

8. İNSAN VÜCUDUNDAN GEÇEN AKIMLAR ÜZERİNE BİLGİLER

Bir insan, vücudunun iki bölümü ile farklı gerilimlerdeki ortam yada nesnelere dokunursa (örneğin M gerilimli gövde ile toprak); toprağın dokunma yüzeyi küçük bir P elektrotuna benzetilebilir ve dokunmadan önce var olan M ve P arasındaki gerilim bir elektromotor kuvveti rolünü oynar (Şekil 17). Vücuttan geçen akım bu elektromotor kuvvetinin M ve P arasındaki empedansa bölümüne eşittir. M ve P arasındaki empedans paralel iki koldan oluşur. Birinci kolda vücut empedansı ikinci kolda da gövde ve topraklama sistem empedansı vardır. Diğer deyişle M ve P arasına bir gerilim



Şekil 17. İnsanın arızalı bir gövde ile olan temasında Z_{\pm} iç empedansı ve R_c dış direnci.

uygulandığında geçecek akıma karşı koyan empedans vücut karşısında elektromotor kuvveti ile birlikte bulunan bir iç empedans gibi işlev görür. Bu empedansı yol açtığı gerilim düşümü vücuttan geçen akıma bağlı olarak çok büyük bir değişiklik gösterir.

Bu iç empedans bir R_i direnci ile benzetilir ve vücut direnci R_c , dokunma öncesinde varolan gerilim U_0 ile gösterilirse; vücuttan geçen akım (I_c) ve vücudun doğrudan dayanmak durumunda olduğu gerilim (U_c) aşağıdaki gibi olur:

$$I_c = \frac{U_0}{R_i + R_c}$$

$$U_c = \frac{e \cdot R_c}{R_i + R_c}$$

Şekil 17, bu kavramların M gövde topraklaması ile P elektrotu arasındaki ilişkileri gösteriyor. Belirli bir gövde gerilimi için U_0 gerilimi R_c , ve $R_i - R_o$ kolları arasındaki orana bağlıdır. Z_i iç empedansı seri iki koldan oluşur. Birinci kol $R_p - R_o$, ikinci kol da $R_m - R_o$ üe paralel bağlı R_o ve sistemin nötr üzerinden dönüş empedansıdır.

Kaynak tarafındaki iç direncin vücut direncinin yanında çok küçük yada çok büyük olmasına göre iki sınır durumu tanımlanabilir.

R_c 'nin yanında R_i iç direnci çok küçükse, dokunma öncesinde varolan gerilimin hemen hemen tamamı vücut üzerinde olacak ve çekilen akım yalnız vücut direncine bağlı olacaktır.

Eğer R_i , R_c 'nin yanında çok büyükse (ki bu durum akım yolunun çok dirençli bir ortamdan geçişine karşılıktır) vücudun dayanmak durumunda kalacağı gerilim dokunma öncesi varolan gerilimin ancak küçük bir bölümü olacaktır. Çekilen akım ise önceki durumdakinden çok daha küçük ve pratik olarak vücut direncinden bağımsız olacaktır.

8.1. Vücut Direnci

İnsan vücudunun direnci, farklı gerilimdeki iki nesne yada ortamla temasta bulunan bölümlerin yüzeyine ve niteliğine bağlıdır. Direnç ayrıca kişinin yapısına, derinin durumuna, bütünlüğüne,

kalınlığına, nemine ve uygulanan gerilimin büyüklüğüne bağlıdır.

İç dokular vücudun iki ucu arasında hemen hemen birkaç yüz ohm'luk bir direnç gösterir. Ancak derinin gösterdiği direnç bin ohm'a ulaşır. Deri çok kuru ve dokunma yüzeyi küçükse bu değer onbin ohm'a çıkabilir. Belirli bir değer üzerinde gerilimler deride yerel delinmelere yol açarak bu koruyucu etkinin büyük bir bölümünü ortadan kaldırabilir. Bu duruma 220 V'un üzerindeki gerilimlerde çok sık raslanır.

Vücut direncine kabul edilebilir bir değer biçilmesi oldukça güçtür ve değer çoğunlukla klasik biçimde yönetmeliklerle belirlenir. 1000 ohm'luk değer nemli ortamlarda raslanan çok kötü koşulları yeterince temsil eder. 5000 ohm'luk değer ise daha çok daha az kritik olan alçak gerilim sistemlerinde düşünülebilir.

8.2. Vücut Dışındaki Devrenin Empedansı

Vücudun, elektrikle iyi bağlantılı metal nesnelere, gerilim kaynağı ve belirli gerilimdeki diğer bir nokta ile tam teması durumunda; vücudun kendi direncine eklenecek hemen hemen hiçbir empedans yoktur.

Vücutta giren akımın ayaklardan ayakkabı tabanları üzerinden aktığı durumda toprak üzerinde duran iki ayak, küçük bir topraklama elektrotuna benzetilebilir. Eğer toprağın özgül direnci ρ ise bu elektrotun direnci 2ρ olacaktır; yani 100 ohm.m özgül dirençli bir arazide 200 ohm. Çarpılma tehlikesinin büyük olduğu yerlerde yalıtkan tabanların kullanılması yararlı olur.

Önceki bölümlerde verilen 3 ve 4 nolu çizimlere dayanarak doğal ve yapay toprakları kolayca üç bölümde toplayabiliriz:

- Bu gruptaki toprakların direnci vücut direncinin yanında çok küçüktür ve ona seri girer, öyle ki vücut dokunma anında gerilimin hemen hemen tümüne dayanmak durumunda kalır (çiğnenip sıkıştırılmış toprak; nemli beton, nemli döşemelikler, vb.).
- Bu gruptakiler ise kullanılan gerilimler için yalıtkan, öyle ki gerilimin çok küçük bölümü vücut üzerindedir (kuru ağaç, yalıtkan kaplamalar, vb.).
- Direncin ilave edilen toprak yada kaplama tarafından artırıldığı ve şebekenin büyük olduğu ara durumlarda; uygulanan gerilimlerin ve delinme tehlikelerinin gözönüne alınması gerekir. Vücut tarafından çekilen akım önsel olarak daima ihmal edilebilir (kuru, taşlı topraklar, kuru beton, vb.).

8.3. Vücuttan Geçen Akımlarda Tehlike Sınırı

Tehlike temel olarak vücuttan geçen akımın değerine, geçiş süresine ve geçtiği organların yapısına bağlıdır. Değişkenler çok fazladır ve iyi tanımlanmış tehlike sınırları vermek olanaksızdır.

Hatırlanacağı gibi vücudun duyarlılık sınırı mA düzeyindedir. Kasılma başlangıcı 10-15 mA dolayındadır ve 1 saniye süreli 100 mA'in üzerindeki akımlarda kalp kasılmalarına raslanabilir. Ejfer akım kısa sürede kesilmezse 10 mA düzeyinde Sağlanmış olan güvenlik genellikle ortadan kalkar. Ancak birinci bölümde gördüğümüz gibi kazalar genellikle, çok sayıdaki raslantının birleşmesini gerektirir. Arızaların hızla temizlenmesi pratikte ayrıca bu birleşme olasılığını en aza indirmeye yarayan etkili bir yöntemdir.

9. TOPRAKLAMA ELEKTROTLARINDA ÖLÇMELER

9.1. Bir Topraklama Elektrotu Direncinin Ölçümü

9.1.1. Yardımcı topraklama elektrotlarıyla ölçme

Direnci ölçülecek topraklama elektrotu M, yardımcı elektrotlar A ve B olsun (Şekil 18). Yardımcı elektrotlardan biri akımın dönüşü, diğeri referans bir gerilim vermesi için konuyor. Yardımcı elektrotların dirençlerinin kullanılan ölçü aygıtlarının duyarlılığı ile orantılı olması yeterlidir ve istisnai durumların dışında küçük çubuklar bu işi görür. Tatmin edici bir doğruluğun elde edilmesi için A ve B elektrotları M topraklamasından yeterince uzağa konmalıdır. Ancak bazen ölçmelerin doğruluk ve kullanılabilirliği arasında bir orta yolla yetinilmek durumunda kalınabilir.

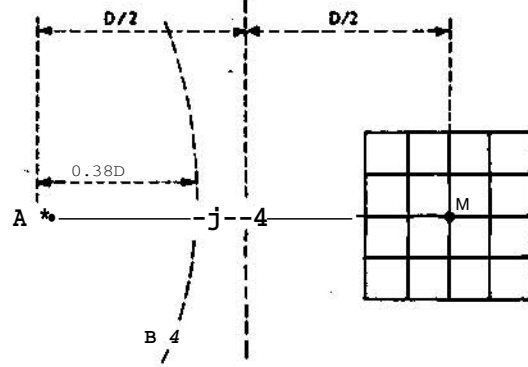
Küçük boyutlu levha ve çubuk elektrotların direncinin ölçümünde akımın A dönüş elektrotu için on metrelik bir uzaklık uygun olabilir. Kareye yakın bir araziye kaplayan topraklama elektrotu durumunda A elektrotunun, kenar uzunluğun en az üç yada dört katı uzağa konması arzu edilir. Düz kanaldeki bir iletken durumunda ise A elektrotunun iletkenin uzantısına konması tercih edilir. İletkenin ucuna olan uzaklığı en az iletken uzunluğunun üçte birine yada yarısına eşit olmalıdır. Güçlük çıkıyorsa bu uzaklık 100 m ile sınırlandırılabilir.

Bu belirtmeler yüzeysel tabakaları toprak alt katmanından çok daha iletken olan arazilerde yanlıtıcı olabilir. Bu durumda uzaklıkların, direnç ölçmelerinin yanlış olmaması için çok daha artırılması gerekir (bölüm 4.1.2).

Gerilim elektrotunun (B) yerini seçmek için önce A noktasından ve M merkezinden eşit uzaklıktaki noktalarda gerilimin M'den A'ya bir akımın akmasıyla etkilenmediğini belirtmek yerinde olur. Bu durum A ve M elektrotlarından eşit ve ters akımların akmasından ileri geliyor. Bir elektrotun uzağındaki gerilimi bulmaya yarayan formül 3.4. bölümünde verilmiştir.

A elektrotu M'ye ne kadar yakın ve M ile ne kadar bağlantılı ise hata o kadar büyük olur. Beşinci bölümdeki şekle bakarsak, gerçekte M'nin toplam direncinin yalnız RJJ-RO kolunun ölçüleceğini görürüz.

5.1. bölümündekine benzer basit bir hesapla; M ve B arasındaki gerilimin M'den A'ya akan akıma ora-



Şekil 18. Bir elektrotun direncinin ölçümü için yardımcı elektrotların yerleştirilişi.

nının doğrudan RJJ direncini verdiği gösterilebilir. Bu arada B elektrotu eşgerilimli bir hat üzerindedir ve bu hat A ve M merkezlerini birleştiren hattı M merkezinden başlayarak $-0,5 + A, 25 = 0,62$ oranında keser (Şekil 18).

Bu belirtmeler arazinin homojen ve elektrotların iyi yerleştirilmiş olduğu durumlarda geçerlidir. Yardımcı elektrotların yanından geçen gömülü metal kanallar ve iletken fayların varlığı bazı güçlüklerle yol açabilir. Bu durumda yardımcı elektrotların yerlerini değiştirerek çok sayıda ölçme yapmak yararlı olur. Küçük boyutlu elektrotların direnç ölçümü yaz sonunda yapılmalıdır.

Ölçmeler için voltmetre ve ampermetre ile bir akım kaynağı yada doğrudan U/I oranını veren bir telürohmmetre kullanılabilir. Gerilim elektrotunun direnci gerilim ölçme devresinin iç direnci yanında çok küçük olmalıdır ve akım elektrotunun direnci telürohmmetre akımını çok küçük bir değere düşürmemelidir.

Doğru akımdaki ölçmelerin geçerli olabilmesi için uygulanan gerilimin elektrolitik kaynaklı gerilim farklarının yaratacağı hataları etkisizleştirebilecek büyüklükte olması gerekir.

9.1.2. Ölçü iletkenleri arasındaki indüktif kuplaj

Geniş alanlı topraklamaların direnci ölçülürken yardımcı elektrotlar daha uzağa yerleştirilir. Ayrıca bu elektrotlar çoğunlukla düşük dirençlidir. Bu iki nedenden ötürü, alternatif akım kullanılırken MB telinde AM enjeksiyon devresi tarafından indüklenen gerilim, bu bağlantılar birbirinden uygun biçimde ayrılmamışsa yok sayılamayabilir.

Büyük merkezlerin topraklamalarında enjeksiyon için, uzaktaki bir merkezden alçak gerilimden beslenen devre dışı ve topraklanmış bir hattı kullanılabilir. Bu düzenlemeden tam yarar sağlayabilmek için çok uzakta bir gerilim elektrotunun bulunması ve bu amaçla ikinci bir elektrik ve telefon hattının kullanılması iyidir. Ancak bu durumda indüktif kuplajlardan kaçınılması güçleşebilir.

Bay Lecourt Fransız Elektrik Kurumu'nda (TEK gibi bir kuruluş) akım enjeksiyonu ve gerilim ölçümü

için aynı hattın iki iletkenini kullanan güzel bir yöntem ve iletkenlerin kuplajından gelen indüksiyon gerilimini tümüyle kompanze eden basit bir düzenek geliştirmiştir.

9.1.3. Üç elektrik yöntemi ile ölçme

Bu yöntemde (Şekil 19) yardımcı elektrotlardan biri için toprakta özel bir nokta bulunması zorunluluğu yoktur. Yöntemin doğruluğu ancak, yardımcı elektrotların direnci ölçülecek elektrotun direncinin çok fazla üzerinde değilse iyidir. Bu yüzden kullanım alanı oldukça sınırlıdır.

M ve A, M ve B, daha sonra A ve B arasında akımın akmasına gösterilen dirençler herhangi bir aygıtla ölçülebilir. Elektrotlar arasında kuplaj olayı yoksa $R_M + R_A \gg R_M + R_B$ ve $R_A \gg R_B$ dirençleri elde edilir. Buradan R_M bulunabilir:

$$R_M = \frac{1}{2} \left[(R_M + R_A) + (R_M + R_B) - (R_A + R_B) \right]$$

Ancak görülüyor ki eğer $R_M > R_A$ yada R_S 'nin çok küçük bir bölümü ise; hata önemli olabiliyor.

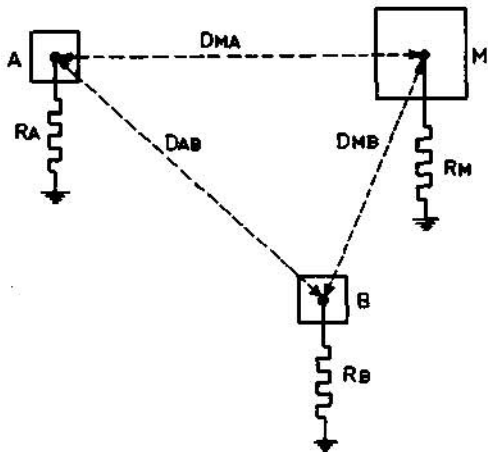
Eğer elektrotlar arası kuplajlar önemli düzeylerdeyse; bu formül bir yaklaşımla ancak R_M 'i verebilir. Elektrot merkezleri arasındaki uzaklıkları D ile gösterirsek; 5.1 bölümünde verilen formüllere düzeltici bir terim eklenecektir:

$$\frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{D_{MA}} + \frac{1}{D_{MB}} - \frac{1}{D_{AB}} \right)$$

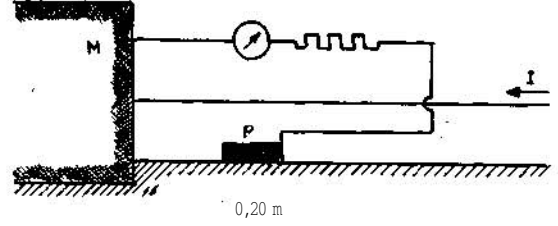
Buradaki p , direnç değerlerinden ve elektrot boyutlarından kabaca çıkarılabilir.

9.2. Elektrotlar Yada Diğer Yapılar Arasında Toprakla Olan Kuplajın Ölçümü

M etkin ve N edilgin elektrotları arasındaki kuplaj çarpanını (bölüm 5) bulmak için M elektrotun-



Şekil 19. Üç elektrot yöntemi ile direnç ölçümü.



Şekil 20. M ve P arasında vücut tarafından çekilecek akımın bulunma yöntemi.

dan bir akım geçirilir ve $\%$, UN gerilimleri ayrı ayrı ölçülür. Çarpan $\%/UM$ 'ye eşittir.

Akımın dönüşünü sağlayan elektrot, akımın M etrafında ve özellikle N'nin bulunduğu bölgede normal yayılması için M ve N elektrotlarından yeterince uzağa konmalıdır.

Yıldızın üç kolunun da değerlerini bulmak zorunda kalabiliriz; Kollardan biri M ve N elektrotlarının ortak R_0 toprak direncini, diğerleri de $R_M \sim R_0$ ve $R_R \sim R_0$ dirençlerini simgeliyor.

Daha önce belirtilen ölçmeler R_M ve R_0 dirençlerini veriyordu. A ve B'nin rollerini değiştirerek R_j ve yeniden R_Q direncini ölçebiliriz. Sonunda bir denetleme ölçmesi yapmak çoğunlukla yararlıdır. Bu ölçmede M ve N arasında bir akım geçirilerek $R_M + R_N - 2R_Q$ direnci bulunur.

Telührometre kullanılmak istenirse; bu ölçmelerin bazıları, akım ve gerilim devreleri bağımsız olan bir aygıtın kullanılmasını gerektirir.

9.3. Personel için Tehlike Yaratan Gerilimlerin Doğrudan Ölçülmesi

Eğer düşünülen tehlike iyi iletken iki ortam yada nesnelere olan temasa ilişkinse, topraklama üzerinden bir akım akarken bu ortamlar yada nesnelere arasındaki gerilimin ölçülmesi yeterlidir. Daha sonra bu gerilim basit bir orantıyla gerçek arıza akımı değerine dönüştürülebilir.

Ortamlardan en az biriyle olan temas örneğin toprakla, çekilen akımın şebekeye dönüş devresine (8.2) yok sayılmayacak bir direnç sokuyorsa; ölçülen gerilim, bu dirençle voltmetre direnci arasındaki orana bağlıdır. Bu gerilimin doğrudan vücut içindeki akımın giriş ve çıkış uçları arasında oluşan gerilime benzetilebilmesi için; bir yandan ölçü aygıtının iç direnci vücut direncinin, diğer yandan ölçü devresindeki temasın niteliği bu ortam ile vücut arasındaki temasın niteliğinin benzeri olması gerekir.

Bunun için örneğin direnci 5000 ohm olan bir ölçü devresi kullanılabilir ve toprak ile ayaklar arasındaki temas, toprak üzerine yerleştirilmiş yaklaşık 20 cm kenarlı metal bir taban ile temsil edilebilir (Şekil 20).

Bu ölçme, ölçme devresi direncinin iki değeri ile yapılabilir. Örneğin değerlerden biri olabildiğince yüksek, diğeri ise bin ohm düzeyinde alınır ve bunlardan vücudun tüm direnci için çekilecek akım bulunur.