

elektrik merkezlerinin topraklamasında genel ilkeler

Yazan:

p. g. laurent

Çeviren:

kemal bakırcıoğlu

UDK: 621.316.995

ÖZET

Yazının konuları şöyle verilebilir (özetlenebilir): Topraklama elektrotlarının homojen ve homojen olmayan ortamlardaki davranışı. İşletme ve güvenlik topraklaması kavramları. Elektrotların biçim yönünden incelenmesi. Toprağın elektriksel nitelikleri. Çoklu elektrotlar. Elektrotlar arasındaki kuplaj. Bazı özel sorunların gözden geçirilmesi. İnsan vücudundan akan elektrik akımının yarattığı sorunlar. Adım ve dokunma gerilimi kavramları. Elektrotun etrafındaki toprağın ısınması.

SUMMARY

The objects of the article can be given (or summaried) as follov/s: The behaviour of earth electrodes in homogenous and non-homogenous medium. Notions related to the system and protective earthing. Investigations of electrodes according to their forms. Electrical characteristics of the soil. Multiple electrodes. Interaction between the electrodes. Review of some particulare probleme. The problems arising from the electric current flowing through the human body. Notions related to step and touch voltages. The temperature rise in the soil around the electrodes.

1. GENEL OLARAK TOPRAKLAMA ELEKTROTLARININ İŞLEYİŞİ VE SINIFLANDIRILMASI

1.1. Topraklama Elektrotları Sorunu

Elektrik tesislerinin topraklanması arıza anlarında sistemin işleyişi, personel ve halkın güvenliği yönünden önemli bir rol oynar. Elektroteknik alanında çok az sözü edilen topraklamanın büyük bir bölümü günümüze kadar görgü ve deneylerle bırakılmıştır.

Bu konuda çok ilginç ve somut incelemelerin yapılmasına karşın, hala "birkaç desimetrelık bir çubuğu toprağa daldırırsanız, topraklamayı gerçekleştirmiş ve hiçbir tehlikeli gerilimle karşılaşmamış olursunuz" yönündeki düşüncelere raslanıyor. Bu ilkel kanıdan ötürü her yıl yüzlerce

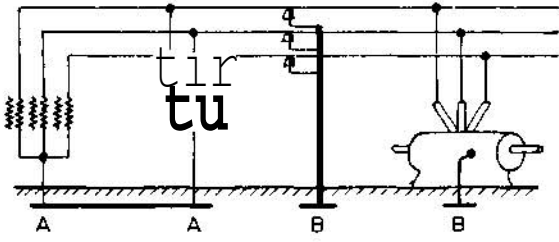
insan yaşamını yitiriyor. Bir yandan her türlü durum için aynı tip topraklama çubuğu kullanılmakta ve bunların etkinlik oranlarının toprağın yapısına bağlı olarak l'e 100 oranında değiştiiği bilinmiyor; diğer yandan topraklama devreleri için büyük paralar harcanırken, yalnız temellerin yada farklı yapılar arasına konan gömülü bağlantıların toprakla en iyi bağlantıyı gerçekleştirebilecekleri düşünülüyor. Buna ek olarak topraklama elektrotlarının denetlenmesi de çoğunlukla doğru ölçme koşulları gözönüne alınmadan yapıyor.

Çoğunlukla karmaşık bir niteliği olan topraklama sorunlarının tekrardan incelenmesi yararlı olacaktır. Böylece toprağın orta değerde bir iletkenliğinin olduğu (bir hektarlık iyi bir toprak blokunun iletkenliği 1 mm² kesitli bir bakır tellin iletkenliği düzeyindedir), çok az homojen olduğu ve niteliklerinin daima iyi bilinemediği görülecektir. Toprağa gömülü iletken ve elektrotlar karmaşık biçimli olduklarından bunların ölçü ve incelemelere doğrudan katılması güçleşmektedir. Ayrıca halkın güvenliği açısından değme olasılıklarına ilişkin sorular bağıntılarda kolayca yer alamamaktadır. Ekonomik güçlükler nedeniyle özel

P.G. Laurent, EdF.

K. Bakırcıoğlu, TEK.

"Les bases gènèrales de la technique des mises à la terre dans les installations électriques", Bulletin de la Société Française des Électriciens, Haziran 1951.



Şekil 1. Servis topraklaması (A) ve güvenlik topraklaması (B).

likle kötü nitelikli arazilerde iyi bir topraklamayı gerçekleştirmek çoğunlukla güç olmaktadır.

Bu yazıda topraklama elektrotlarının işleyişi ve saptanmasında gözönüne alınması gereken bilgilerin elden geldiğince basit bir biçimde verilmesine çalışılmıştır.

Birinci bölümde genel olarak tesislerin topraklanmasının çeşitli yönleri anlatılmaktadır. İkinci bölümde toprağın niteliklerine ilişkin bazı veriler verilmiştir. Üçüncü bölümde en yaygın kullanılan topraklama elektrotlarının biçimleri gözden geçirilmektedir. Dördüncü bölümde daha özel olarak çok öğeli elektrotlar incelenmekte ve topraklamalar arası bağlantıların yararı üzerinde durulmaktadır. Beşinci bölümde; büyük merkezlerin topraklamasına ve insan vücudundan geçen akımlara özgü sorunlar incelenmektedir. Altıncı ve son bölümde ise topraklama elektrotları ısınma hesabı üzerine bazı bilgiler verilmektedir.

Bizim asıl amacımız temel ilkeleri vermektir. Çünkü bu konuda tam açıklık ve belirlilik getirmek için modeller üzerinde ayrıntılı araştırmalar yapmaya çalışmak boşuna ve yanıltıcıdır.

Yazıda daha karmaşık denklemler ya yalnız referans yada bilgilenme amacıyla verilmiştir ve bunların açıklaması çok basit durumların dışında yapılmamıştır. Bu denklemlerden çoğu DWIGHT'ın 'Electrical Engineering' dergisinin Aralık 1946 sayısında çıkan incelemesinden alınmıştır (2).

Son olarak burada topraklama elektrotlarının, yükselme hızı çok yüksek dalgalar altındaki davranışını da incelemeyeceğiz. Çünkü bu özel bir inceleme konusudur.

1.2. Topraklama Elektrotlarının Sınıflandırılması

Elektrik tesislerinin topraklanmasında çeşitli amaçlar güdülür. Bunlar; malzemenin korunması, işletme kalitesinin artırılması ve personelin güvenliğidir. Bu amaçlar yalnız başına topraklamanın yöntemini saptamaya yetmez ve çoğunlukla çok farklı görüşlerin yada zorunlulukların birleştiği ortalama düzeydeki bir mükemmellikle yetinilir. Bu konularda mutlak mükemmelliğe erişmek olanaksızdır. Çünkü elektrik öylesine yaygın kullanılmaktadır ki, yapısı gereği elektriğin kendisi malzemenin hasar görmesi, hizmetin durması ve kazaların kaynağı olarak kalacaktır. Kullanımındaki ilkeyi ortadan kaldırmadan bunlardan tümüyle kaçınmak olanaksızdır. Ancak, üstesinden gelinecek güçlükler ve verilen hizmetler yönünden makul sınırlar içinde kalınabilir.

Daha ilerde görülecektir ki belirli topraklama yöntemleri elektrik sistemlerinde daha iyi bir işletme ve daha fazla bir güvenliğin sağlanmasına yardımcı oluyorlar. Ancak herşeyden önce iki tip topraklama arasında ayrımın yapılması gerekir: İşletme yada sistem topraklaması ve koruyucu yada güvenlik topraklaması.

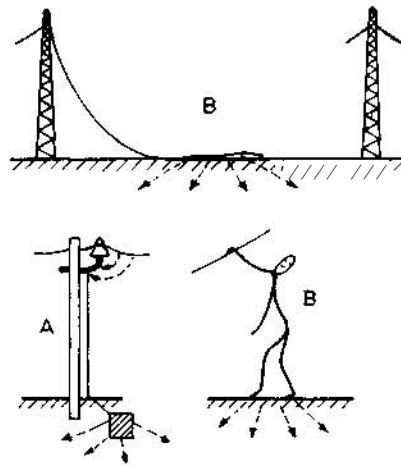
İşletme topraklaması sistem bütünüdür bir parçasıdır ve iletkenler ile toprak arasındaki sürekli yada geçici, doğrudan yada uygun empedanslar üzerinden yapılan bağlantılarla gerçekleştirilir. Aygıtlar yada hatlarda doğacak toprak arızalarında sistemin düzenli işleyişini sağlamak için kullanılır.

Koruyucu topraklama, işletmeden çok tüketiciye yöneliktir ve sistemin iletkenlerine bağlanmaz. Bu topraklama iletkenleriyle beklenmedik temaları olabilen (örneğin bir aygıttaki kaçak gibi) ve bir süre gerilim kazanmış olarak işletilmesi tehlikeli olan aygıtlara bağlanır.

İşletme topraklaması örneğin nötr uçların ve iletkenlerin yada gerilim sınırlayıcılarının topraklamalarıdır. Koruyucu topraklama ise gövdelerin ve aygıtların üzerinde bulunduğu altlıklarda yada direklerde yapılan topraklamalardır (Şekil 1).

Aynı topraklama elektrotu hem koruyucu topraklamanın hem de işletme topraklamasının işlevlerini aynı zamanda yerine getirebilir. Öte yandan üzerinden bir arıza akımı akan koruyucu topraklama elektrotunun empedansı; elektrik sistemlerinde işletme topraklaması için kullanılan elektrot empedanslarıyla aynı işlevi görür. Bu iki tür topraklamayı her zaman birbirinden kesin çizgilerle ayırmak olanaksızdır.

Toprak arızaları bazan öyle noktalarda olur ki, bu noktaların güvenlik topraklaması özellikle yapılmamıştır (örneğin bir tel kopup yere düşüyor yada bir kişi gerilimli çıplak iletkenle temasta ve yere basıyor). Bu durumda bir temas direncinin olması raslantıya kalmıştır ve güvenlik topraklamasında önemli bir rolü olan bu direncin değerinin önceden saptanması çok güçtür (Şekil 2).



Şekil 2. Güvenlik topraklaması (A) ve kazara olan topraklama (B).

1.3. Yüksek Gerilim Sistemlerinde Topraklamaların İşlevleri

Nötrü yalıtılmış yada nötrü doğrudan topraklı yüksek gerilim sistemlerindeki farklı işletme biçimlerinin göreceli kullanım alanları üzerine burada bir tartışmaya girmek söz konusu değil. Ancak malzemenin korunması, servisin sürekliliği ve personelin güvenliği gibi topraklamanın üç amacına hangi topraklama sisteminin daha uygun olduğunu belirtmek yararlı olacaktır.

Nötrü yalıtılmış yada bir Petersen bobini üzerinden topraklanmış yüksek gerilim sistemlerinde, topraklamanın yokluğu; toprak arıza akımlarını sınırlandırdığı ve termik, elektrodinamik etkileri azalttığı için malzemenin korunmasına açıkça yardımcı olur. Arıza akımlarının düşüklüğü toprağa olan arkların kendiliğinden sönmelerini kolaylaştırır ve sistemin sürekliliğine katkıda bulunur. Ayrıca koruyucu topraklamanın üzerinden arıza akımlarının geçmesiyle doğan gerilimler azaldığından personelin güvenliğine de yardımcı olunmuş olur.

Buna karşılık nötrü yalıtılmış yada söndürücü bobinler (örneğin Petersen bobini) üzerinden topraklanmış sistemlerde malzeme gerilim yükselmelerinden ötürü yüksek dielektrik zorlanmalarla karşılaşılır ve arıza akımlarının büyüklüğünden dolayı bir süre toprağa olan akımların sürmesine göz yumulur. Eğer bu sırada koruyucu topraklamanın yada temasların belirli bir direnci varsa; bu akımlar ciddi ve tehlikeli kazalara yol açacaktır.

Nötrü doğrudan topraklı yüksek gerilim sistemlerinde; toprak arıza akımlarının büyük olmalarına karşın, bir yandan aşırı gerilimler düşürüldüğü diğer yandan da aşırı akımlarla çalışan korumalar yardımıyla arızanın sistemde kalma süresi sınırlandırıldığı için malzeme korunmuş olur. Arızalı bölmeler seçicilikle devre dışı bırakıldıklarından servis kalitesi de iyileşir. Arızaların çok hızlı temizlenmesiyle personelin güvenliğine de katkıda bulunulmuş olur.

Buna karşılık, nötrü doğrudan topraklı sistemler çok hızlı tekrar kapama sistemleriyle birleştirilmedikçe geçici arızalarda arızanın kendiliğinden sönmeye gibi bir yarar sağlanamaz. Diğer yandan, koruyucu topraklamanın yada temasın direnci, arıza akımını korumaların duyarlılık sınırlarının altına düşürecek kadar büyükse arızalı bölmelerin otomatik olarak temizlenmesi tehlikeye girer.

Bu karşılaştırma özeti çok farklı iki yönteme açıklık getirmeyi amaçlamaktadır. Bunlardan koruyucu topraklama bazan arıza akımlarının yarattığı toprağa olan gerilimleri tehlikesiz değerlere düşürmekte hazan da arızalı bölmelerin hızla temizlenmesine yardımcı olmaktadır.

Tehlikeli gerilim sınırınının 125 V olduğunu kabul edelim ve bir kişinin aynı anda topraklama elektrotuna bağlı bir yapı ile yakınındaki toprağa dokunduğunu varsayalım. Bu kişi toplam elektrot geriliminin yarısıyla karşılaşacaktır. Ayrıca sistemin nötrünün yalıtılmış olduğunu ve arızada toprağa akan kapasitif akımın 10 A değerinde olduğunu düşünelim. Topraklama direnci 25 Ohm'u geçiyor ve korumaların duyarlılığı yada personele verilen yönergelerde arızanın hızlı temizlenmesi 10 Amperin üzerindeki arıza akımlarında isteni-

yorsa tehlikeli bir durum doğacaktır.

Şimdi nötrü topraklı 15 kV'luk bir sistemde arıza akımının 1000 Amper: aştığı ve toprak korumalarının duyarlılık sınırınının 50 Amper olduğunu varsayalım. Yerel (lokal) gerilimin tehlikeli olmayan 125 V değerine düşürülebilmesi için 0,25 Ohm' luk bir topraklama direncinin elde edilmesi gerekir. Bu ise gerçekleştirilemeyecek kadar küçük bir değerdir. Bu durumda güvenliğin sağlanabilmesi için arıza hızla temizlenmeli ve arıza akımının 50 Amperi aşabilmesi için de topraklama direnci 173 Ohm'u geçmemelidir.

Yeterli bir güvenliğin elde edilmesi, yalnız topraklamanın değil, topraklama ile koruma sistemleri arasındaki eşgüdümün (koordinasyonun) sağlanmasına yönelik de bir sorundur.

Sistemde iyi bir topraklamanın gerçekleştirilmesi ne kadar güçse; ilke olarak, rölelerin duyarlılığının da o kadar fazla olması gerekir. Bu konuda bazan ciddi teknik güçlüklerle karşılaşılabilir.

Arıza merkezinde gerilimlerin tehlikeli olmayan değerlerde sınırlandırılmasının (özellikle nötrü topraklı yüksek gerilim sistemlerinde) koruyucu topraklamadan her zaman istenemeyeceğini burada belirtmekte yarar vardır.

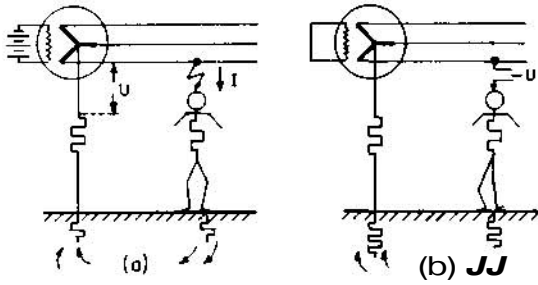
Bu sistemlerde personelin güvenliği hemen hemen istisnasız arızaların çok hızlı temizlenmesiyle sağlanmaya çalışılır. Böylece; bir kişinin tam arıza anında, arızanın olduğu yerde ve tehlikeli durumda bulunma olasılığı en küçük bir değere düşürülmeye çalışılır. Burada koruyucu topraklamanın rolü yalnızca üzerinden yeter büyüklükte bir akımı geçirerek korumanın çok hızlı çalışmasını sağlamaktır. Pratik bize bu biçimde sağlanan güvenliğin yeterli ve iyi olduğunu gösteriyor. Personel kazalarına nötrü topraklı ve uygun korumalarla donatılmış yüksek gerilim merkezlerinde hemen hemen hiç raslanmamakta ve kazaların çok az bir bölümü de nötrü yalıtılmış ve toprak arıza akımlarının büyüklüğü nedeniyle bu akımların uzun süre akabildiği sistemlerde görülmektedir.

1.4. Alçak Gerilim Sistemlerinde Topraklamaların İşlevleri

Biz burada yalnız daha önce yeterince tartışılmış olan alçak gerilim sistemlerindeki güvenlik ve topraklama arasındaki ilişkileri de alacağız.

Alçak gerilimde tüm dağıtım şebekelerinin nötrleri ilke olarak iyi yada kötü topraklanır. Bu topraklama, her koşulda nötrün çok düşük bir gerilimde ve faz iletkenlerinin anma gerilimlerine yakın değerlerde tutulması amacıyla yapılır ve iletkenlerle doğrudan olan temasların tehlikesini sistem işleyişini bozmadan azaltır. Çoğunlukla alçak gerilim sistemlerinin nötrlerinin topraklaması yeterli düzeyde değildir. Bu yüzden faz toprak arızalarında sağlam faz iletkenleri faz arası gerilime yükselebilir.

Kaynak ile gövde arasında bir bağlantı olduğu sürece nötr iletkeni ile arızalı aygıtın gövdesinde aynı anda çok düşük bir gerilimin sağlanması olanaksızdır. Bu nedenle gerçek bir kısa devre oluşturabilmek için gövde ve nötr topraklama direncilerinin yeterince küçük olması gerekir. Öte yan-



Şekil 3. Topraktan akan akımlara Thévenin kuramının uygulanması.

- a) Gerçek devre
b) Eşdeğer devre

dan gerçek çalışma koşullarında bozulmuş gereçlerin otomatik olarak hemen devreden çıkarılması (yüksek gerilimde olduğu gibi) düşünülemez. Sigorta telini eritebilecek düzeydeki arızalar da genellikle çok azdır. Fransa'da tesisatların büyük çoğunluğunda koruma olarak yalnızca sigortalar kullanılmaktadır. Daha yetkin (mükemmel) diğer koruma sistemleri ya çok pahalı yada çok karmaşık buldukları için kullanılmamaktadır.

İsviçre'de kullanılan bir yöntemde tüm müşteri aygıtlarının gövdeleri düzenli biçimde koruyucu topraklamasına bağlanıyor. Bu yöntem gövdeleri nõt topraklamasına bağlamaktan daha iyidir. Böylece gövdelerle olan temaslara karşı koruma eksiksizce sağlanmış olur ve iletkenlerle olan doğrudan temaları önlemek için de iletkenler iyice yalıtılır. Bu yöntem çok iyi sonuçlar vermiştir. Ancak tüm müşterilerin iyi bir topraklamasının olması gerekir. Bu da biraz pahalıdır.

Görülüyor ki alçak gerilim sistemlerinin topraklanması güç bir sorundur. Yine de kamu dağıtım sistemlerinde nötrün topraklanması, yüksek gerilimle karışma tehlikesinden ötürü hala arzu ediliyor. Ancak bu durum özel sistemlerde, özellikle sistemin toprağa olan yalıtımının sürekli sağlanabildiği durumlarda gerekmez. Böylece her basit arıza yada her bir iletkenle olan doğrudan temasın anında işareti alınır ve ikinci bir arızanın doğmasına zaman bırakılmadan arıza temizlenir. Basit arıza bir başka yönden de zararsızdır. Çünkü böyle bir arızada doğan kaçak yada kapasitif akım çok küçüktür.

1.5. Akımların Toprak İçinde Dağılımı

Her topraklama elektrotunu ayrı ayrı ele almadan önce, elektrotları içine yerleştirildiği karmaşık devreden ayırarak inceleyebilmek için arıza noktasında topraktan akan akım nedeniyle ardarda karşılaşılan öğelere topluca bakmak gerekir.

Hemen hatırlayalım ki bir iletkenin toprakla temasından doğacak akım, en genel durumda Thévenin kuramına göre iletkenle toprak arasında arıza öncesinde varolan gerilime eşit (sistemin faz toprak gerilimi) tek fazlı bir emk'nin üreteceği akıma eşit olacaktır (Şekil 3).

İletkenden toprağa bir akımın akabilmesi için kuşkusuz sistemde bir dönüş yolunun (kapalı devrenin) olması gerekir. Bu dönüş yolu ya bu amaçla düzenlenen bir yada birkaç nötr noktası üze-

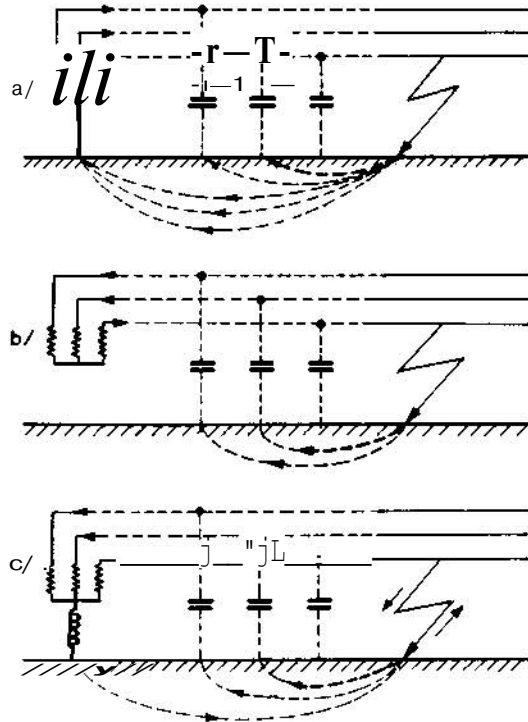
rinden yada sistemin sağlam fazları ile toprak arasında oluşan kondansatörler üzerinden gerçekleşir. Toprağa akan akımı sınırlayan dönüş yolunun empedansma, topraklama elektrotunun giriş empedansı ile şebekenin boyuna empedansları eklenir.

Çoğunlukla akım devrede birçok paralel dönüş kolunu kullanır. Ancak dönüş akımların yoğunluğu bütün kollarda aynı değildir. Topraklamada bu olgudan Petersen bobinleri ile nasıl yararlanılabileceği sorusu akla gelebilir. Akım Petersen bobinlerini hatların kapasitansma akort edilmiş bir endüktif devre olarak görür. Böylece hat kondansatörleri ile Petersen bobini çok büyük empedanslı bir tıkaç olarak akımı çok küçük bir değerde sınırlar (Şekil A).

Ayrıca toprağa akan akımın sistemin normal kaynaklarından değil de bir yıldırım düşmesinden besleniş durumunun da incelenmesi gerekir. Akımın yüklü buluta dönüşü kara yüzeyi ile bulut arasında dağılmış kondansatörler aracılığıyla gerçekleşir (Şekil 5).

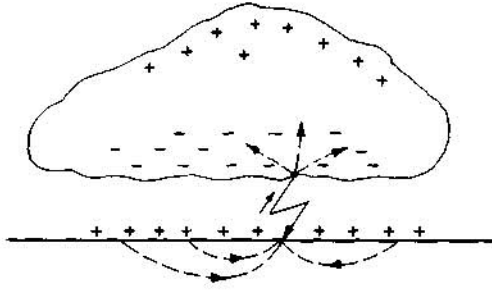
Topraklama elektrotu üzerinden toprağa akan akım önce elektrotun etrafında yayılır. Daha sonra her akım çizgisi ya dönüş yolu üzerindeki topraklama elektrotuna yada kapanışını sağlayan kondansatörlerin bulunduğu bölgeye yönelir.

İlke olarak böyle bir akımın yayılma bölgesi tüm gezeğe uzanır. Ancak uygulamada akım yoğunlukları ve gerilim gradyanları belirli bölgelerin dışında çok zayıftır.



Şekil 4. Bir toprak arıza akımının dönüş yolu.

- a) Nötrü topraklı sistem
b) Nötrü yalıtılmış sistem
c) Söndürme yada Petersen bobinli sistem



Şekil 5. yıldırım akımlarının kapanış yolu.

Genel bir kural ve çok önemli bir basitleştirme olarak; akımın giriş ve çıkışındaki topraklama elektrotlarının birbirlerini etkilememesi için elektrotlar arası açıklık yeterince büyük olmalıdır. Topraklama elektrotundan akan akım, elektrotun boyutlarıyla karşılaştırılabilir bir uzaklığa kadar her yönde düzensizce yayılır. Eğer dönüş elektrotu sonsuza kadar düzgün biçimde yayılmışsa giriş elektrotunun empedansı tüm yönlerde aynıdır. Yolun ikinci evresinde akım, giriş ve çıkış bölgeleri arasındaki toprak içerisinde yoğunluğu azalmış olarak akar. Sonuncu evrede akım, tekrar yoğunlaşmış olarak topraklama elektrotu üzerinden sisteme döner (Şekil 6).

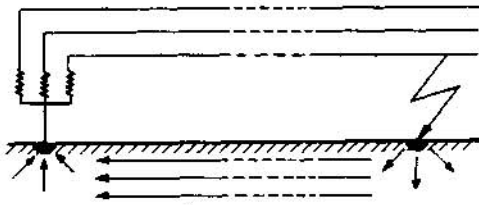
Şurası açıktır ki, giriş ve çıkış, akış ve açaklama terimlerinin basit birer referans anlamı vardır ve iki topraklama elektrotu yayılma zamanı ihmal edilebilen düşük frekanslı olaylarda tümüyle simetrik olarak çalışır.

Bu düşünceler bizi topraklama elektrotunda özgül empedans kavramına götürür. Bu empedans tüm yönlerde ve sonsuzda gerçekleşen ve akımın dönüş devresinden bağımsız olan bir empedanstır.

Giriş ve çıkış bölgeleri arasında topraktan geçen akım ortalama birkaç yüz metre derinlikten taşıyıcı hatları takip eder. Bu dönüş yolunun direnç ve reaktansı toprağın yapısına bağlıdır ve Ohm/km'nin çok küçük bir bölümü düzeyindedir.

Bu empedans üzerinde çok fazla dumak gereksiz. Çünkü bunlar taşıyıcı hatların sıfır dizi bileşen empedanslarının hesabında gözönüne alınıyor. Toprak içindeki dönüş akımları hatları izlerken karşılarına yeterince iletken başka yollar çıkarsa (örneğin metal kanal ve kablo kılıfları) akımın az yada çok bazı sapmalar yaptığı görülür.

Bu yüzden komşu elektrotlarla olan bağlantılar elektriksel sürekliliği iyi sağlanamazsa bazı terslikler çıkabilir.



Şekil 6. Bir arıza akımının toprak içinde izlediği yol.

2. TOPRAĞIN ELEKTRİKSEL NİTELİKLERİ

2.1. Toprağın Özgüldirencine Sıcaklığın, Nemin, Taneciklerin Etkisi

Toprak, özgüldirenci ile topraklama elektrotlarının çalışmasını etkiler. Toprağın özgüldirenci aşağıdaki nitelikleri gösterir.

1. Özgüldirenci kayaların yapısına ve nem yüzdesine bağlı olarak bir bölgeden diğerine çok büyük değişiklikler gösterir. Pratikte karşılaşılan en uç değerler 1 ile 1000 yada daha fazla oranlar arasındadır.
2. Belirli bir bölgedeki toprak hem yatayına hem de derinliğine çok az homojendir.
3. Toprağın yüzeysel katlarının özgüldirenci mevsimlere göre çok büyük değişiklikler (örneğin kuraklık ve donlar da artar, nemli olduğunda azalır) gösterir. Bu olay daha çok 1 yada 2 metrelik derinliklerde görülür. 1 metre derinliğe gömülü orta boyutlu elektrotlarda direncin değişme düzeyinin en az 1'e 2 oranında ve nadiren 1'e 5 yada daha fazla olduğunun bilinmesi yararlı olacaktır.
4. Yapım gerçekleştirilmeden önce yüzeyde ve çok az derinlikteki toprağın özgüldirenci iyi bilinmez. Elektrotlar yerleştirildikten sonra ancak toprağın niteliği üzerinde ilk veriler elde edilebilir.

Ohm cinsinden bir özgüldirenci sayısal olarak kenarı 1 metre olan 1 m³ toprağın direncine eşittir.

Yağlı, killi, marnlı topraklarda ve nemli tebeşirli kumlarda özgüldirenci birkaç on Ohm düzeyindedir. Bu değer çok sıkışık killi topraklarda 100 yada 200 Ohm.m'ye çıkabilir.

Zayıf bir çimenle kaplı taşlı topraklarda özgüldirenci çoğunlukla 300 ile 400 Ohm arasında.

Silisli kumlar: nemli iken 200-500 Ohm.m, kuru iken 1000 Ohm.m dolaylarındadır.

Erimiş tuzlardan yoksun, nemli turbo yataklar: bazı dağlık bölgelerde 150-300 Ohm.m'ye kadar çıkar.

Kalkerli kayalar: yeraltı sularını emmiş olanlarda birkaç on Ohm.m; kurularda 1000-3000 Ohm.m dolaylarındadır.

Eski kayalar (granit, gnays, şist, baralt, vb.): kaya ne kadar sıkı ve eski ise özgüldirenci de o kadar büyüktür. Çok sağlam ve kuru granitlerde bu değer 10 000 Ohm.m'ye kadar çıkar. Ancak çoğunlukla 1000 ile 5000 Ohm.m değerleri arasındadır. Çok bozulmuş ve kille karışmış kayalarda bu değer 100 Ohm.m'ye kadar düşer.

Nehir sularının özgüldirenci yer ve mevsimlere bağlı olarak değişir. Paris'te Sen nehri için 16 Ohm.m, Saint Gaudens'te Garonne için 40 Ohm.m, Ren için 20-40 Ohm.m, Rhône için 30-60 Ohm.m, Dordogne için 80-300 Ohm.m, Le Gave'de Pan için 5-80 Ohm.m'dir. Görülüyor ki nehir sularının özgüldirenci iyi bir toprağınki ile aynı düzeyde.

Kuru beton ve balastlar (demiryollarında traverslerin altına sıkıştırılan kırık taşlar) çok iyi yalıtıcıdır. Buna karşılık toprağa gömülmüş betonun özgül direnci 100 Ohm.m'yi geçmez. Gömülü bir beton parçasının özgül direncini yakınındaki toprağın özgül direncine eşit alırsak çok büyük bir yanlışlık yapmış olmayız.

Toprağın iletkenliği temel olarak elektrolitik niteliklidir. Kuru ortamda çok zayıftır. Ancak, sabit bir sıcaklıkta nemle orantılı artar ve belirli bir nem oranında da sıcaklıkla orantılı artar.

İngiltere'de hafif çürük topraklar üzerinde gerçekleştirilmiş deneylerin sonuçları aşağıda iki ayrı çizelgede verilmiştir [9]:

Sıcaklık (°C)	Özgül direnç (Ohm.m)	Nem Oranı (%)	Özgül direnç (Ohm-m)
-15	3300	0	10 ⁷ den fazla
- 5	790	2,5	1500
0(buz)	300	5	430
0(su)	138	10	185
+ 10	99	15	105
+20	75	20	63
		30	42

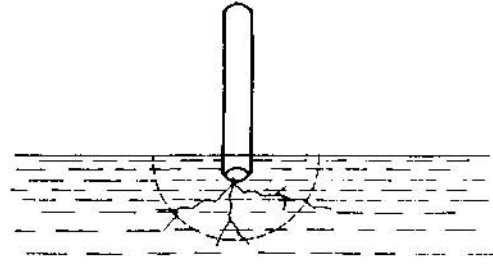
Toprağın bileşimindeki diğer bir önemli öge olan taneciklenme; toprağın gözeneklilik ile nem tutuculuğunu ve aynı zamanda elektrotlarla olan temasının niteliğini etkiler. İri tanecikli toprakların (çakıllı kum, çakıltaşı, vb.) topraklama elektrotlarının yerleştirilmesinde kullanılması iyi değildir. Bu sorun çoğunlukla elektrot yüzeyini belirli bir kalınlıktaki ince ve yağlı toprakla yada daha iletken bir malzeme ile sararak çözülür.

2.2. Topraklama Elektrotu Direncinin Akan Akımla Değişmesi

Genel kural olarak, topraklama elektrotlarının direnci üzerinden geçen akıma çok az bağlıdır. Taşınabilir kullanışlı araçlarla yapılan ölçmeler (ki oldukça düşük akımları kullanır) çoğunlukla yeterli düzeydedir. Çok daha güvenilir değerler almak için ölçmeyi büyük akımlar ile yapmak gerekir. Elektrotun direnci, oldukça karmaşık ve çok sayıdaki etken nedeniyle üzerinden geçen akım arttıkça azalma eğilimindedir.

Bu azalmanın birinci nedeni; geçen akımın etkisiyle elektrotların yakınındaki toprağın ısınması olabilir. Daha ilerde de göreceğimiz gibi ısınma toprağın özgül direncini azaltır.

Aynı doğrultuda rol oynayan ikinci bir etken; elektrot metali ile hemen yakınındaki toprak arasındaki temasın bazan iyi olmamasıdır. Örneğin toprağın sıkıştırılması sırasında bu yüzeyler arasında ince bir hava tabakası kalabilir. Bu tabaka düşük akımların geçişinde büyük bir direnç gösterir. Ancak elektrotta çok büyük bir gerilimin doğmasına yol açan arklarda bu direnç kolaylıkla aşılar. Bu tür kötü temaslar bağlantı noktalarında doğabilir.



Şekil 7. Suya daldırılmış küçük bir elektrottan (çok iyi yalıtılmış tel parçası) büyük bir akımın akması ve eşdeğer yarıküre elektrot .

Çok yüksek akımlarda başka bir olayla da karşılaşılır: Toprağın, örneğin killi toprağın delinme gradyeni 200 kV/m düzeyindedir [10]. Buradan şu sonuç çıkarılabilir, elektrotun eşdeğer boyutlarını artıran ve gradyenleri bu sınır değerine çıkaran içsel deşarjlar olmadan elektrotun yakınındaki toprakta daha büyük bir gradyenin doğması olanaksızdır.

Bu olay; suya hafifçe daldırılmış çok küçük boyutlu bir elektrotta yüksek bir gerilim uygulanarak açıklığa kavuşturulmuştur. Elektrot üzerinde dallara ayrılmış kıvılcımların doğuşu kolayca görülebilir. Bu dalların uzunluğu uygulanan gerilimle orantılı artar (Şekil 7). Buradan şu sonuç çıkarılabilir. Elektrotun ilk boyutları ne kadar küçük olursa olsun, direnç belirli bir değeri (gerilim arttıkça bu değer düşer) aşamaz. Gerilimle (U) direnç (R) arasındaki yaklaşık bağıntı

$$R = \frac{K}{U} \text{ dur.}$$

K katsayısı 100 Ohm.m'lik bir özgül direnç için 3000 Ohm.kV düzeyindedir.

Bu sonuç, daha ilerde yarıküre elektrotlar için verilecek formüllerden yola çıkılarak daha kolay çıkarılabilir: Üzerinden akım geçen bir yarıkürenin çıkışındaki gradyenin, uygulanan gerilimin merkeze olan uzaklığa oranına eşit olduğu görülecektir. Bu koşullarda, gradyenin 200 kV/m ile sınırlandırılmasının anlamı şudur: Topraktaki içsel deşarjlar elektrotun boyutlarını (eğer daha önceden bunları aşmamışsa) yarıçapı uygulanan gerilimin (kV) 200'e bölünmesiyle bulunan iletken bir yarıkürenin boyutlarına getirecektir.

Aşağıdaki çizelgede 100 Ohm.m özgül dirençli bir arazide çeşitli sistem gerilimleri için elektrotta faz toprak geriliminin uygulanmasıyla elektrotun ulaşacağı minimum r_m yarıçapı, bundan çıkarılacak maksimum R_U direnci ve bunlara karşılık olan I arıza akımı verilmiştir:

U (kV)	r _m (m)	R _U (Ohm)	I _A (KA)
15	0,043	350	250
60	0,17	87	1000
150	0,43	35	2500
220	0,63	23	5600

İkinci sütündeki değerler hat direklerinin alışılmış topraklama elektrotu boyutlarıyla karşılaştırıldığında, iyi toprakta ve endüstriyel gerilimlerde toprağın delinmesinin çok az raslanır bir olay olduğu görülür. Çok büyük akımların geçtiği yıldırım boşalmalarında bu olaya daha sık raslanır.

Kötü arazilerde toprağın sınır gradyenleri üzerine elimizde fazla veri yok, ancak arklı geçişler kuşkusuz daha sık olmaktadır.

2.3. Toprağın Kapasitansınm Etkisi

Homojen iletken bir ortamda elektrotun üzerinden geçen akımın yol açtığı eşgerilim yüzeylerinin, homojen yalıtkan bir ortamda aynı elektrotun yarattığı elektrostatik alanın eşgerilim yüzeyleriyle aynı olduğu kolaylıkla görülebilir (Şekil 8).

Örneğin bir küre elektrotta, eşgerilim yüzeyleri her iki durum için eş merkezli kürelerdir.

Buradan homojen iletken bir ortamda herhangi bir elektrotun direnci ile homojen dielektrik bir ortamdaki aynı elektrotun kapasitansı arasında çok basit bir bağıntının olduğu görülür.

Bu bağıntı herhangi bir basit durumdan hareket edilerek kolaylıkla çıkarılabilir. Örneğin birbirinden L kadar ayrılmış paralel iki S yüzeyi ile sınırlı bir ortamı düşünelim. Bu yüzeyler arasında elektrostatik alan doğar ve bir akım akar.

İletken ortamın özgül direnci (Ohm.m) ve yalıtkan ortamın baştaki dielektrik sabiti K ise, birinci durumdaki direnç ile ikinci durumdaki kapasitans aşağıdaki bağıntılardan kolayca bulunabilir.

$$R = \frac{\rho L}{S} \text{ (Ohm)}, \quad C = \frac{KS}{4\pi L} \text{ (m)}$$

1pF in 9000 m'yi gösterdiği düşünülürse;

$$CR = \frac{K P}{36000 \text{ ir}} \text{ (Ohm-}\mu\text{F)}$$

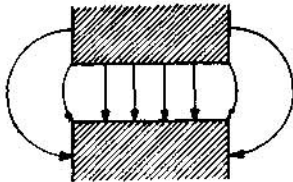
yada yaklaşık,

$$CR = \frac{KP}{100000} \text{ (Ohm-yF)}$$

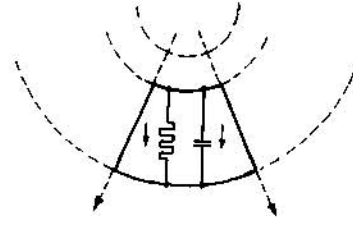
bulunur.

Bu incelemeler bize topraklama elektrotlarının direnç hesabı ile iletkenlerin kapasitans hesabının birleştirilebileceğini gösteriyor. Buradan başka bir önemli sonuçta çıkarılabilir.

Bir vücut ne tam bir iletken ne de tam bir yalıtandır. Her maddenin aynı anda belirli bir özgül direnci ve bir K dielektrik sabitesine sahip



Şekil 8. Akımın iki elektrot arasında akması.



Şekil 9. Küçük bir toprak elemanının direnci ve kapasitansı.

olduğu düşünülebilir. Öyle ki, eşgerilimli iki yüzeyden oluşan her küçük hacim bir direnç ile bir kondansatörün paralel birleşimi olarak düşünülebilir (Şekil 9).

Çok iletken bir maddede, direnç çok düşüktür ve ögenin kondansatörünü tümüyle kısa devre eder. Çok yalıtkan bir maddede de aksine kondansatörün etkisi ağır basar.

Her iki durumda, $CR = Kp/100000$ çarpımı, kondansatör ögesinin dolma yada boşalma zaman sabitini (mikro saniye olarak) gösterir. Buradan hemen aşağıdaki kuralı çıkarabiliriz.

Bir malzemenin $Kp/100000$ sabiti uygulanan gerilimlerin değişme süresinin yanında çok küçük ise, malzeme bu gerilim değişmeleri karşısında yarı saf bir direnç gibi davranır. Kondansatörün dolması gerilimlerin oluşmasını önlemez. Buna karşılık $Kp/100000$ zaman sabiti gerilimlerin değişme süresine göre büyük olan bir malzeme düşük kayıplı bir kondansatör gibi davranır.

Alternatif akımda frekansın belirli bir değerine kadar kondansatörün pek fazla bir etkisi yoktur. Pratikte ise bu değer oldukça yüksektir.

Az nemli ve çok kuru topraklar için ortalama dielektrik sabitelerini 10 ve A kabul edebiliriz. 100 Ohm.m'lik özgül direnç için birinci toprağın dolma yada boşalma zaman sabiti yalnız 0,01psn, ikinci toprağın 10000 Ohm.m'lik özgül direnci için zaman sabiti 0,4 psn'dir. Hemen tüm elektrik olaylarında toprağın yarı saf bir direnç gibi davrandığı kanıtlanabilir. Özgül direncinin çok büyük, frekansların çok yüksek (yada çok büyük yükselme hızlı şok dalgalarının) olduğu durumlarda kondansatör etkin rol oynamaya başlar.

3. TOPRAKLAMA ELEKTROTLARININ BİÇİM YÖNÜNDEN İNCELENMESİ

3.1. Topraklama Elektrotlarının Hesabındaki Belirsizlik

Toprağın özgül direnci ve mevsimlik değişmeler üzerindeki belirsizlikler, arazinin homojen olmayışı ve temasların iyi yada kötü oluşu, pratikte topraklama elektrotlarının hesaplanmasını güçleştiriyor. Eğer özgül direnç hakkında bir bilgi varsa en çok elektrotların dirençlerinin büyüklüğü ve yakınındaki gerilim gradyenlerinin düzeyi önceden saptanabilir; yada tersi, direnç ve gradyenlerin belirli sınırlar içinde tutulması

istenirse elektrotların boyutları belirlenebilir.

Biraz sonra vereceğimiz kuramsal formüllerin görünür belirliliği bizi yanıltmasın. Bu formüller karşılaştırılabilir oldukları ve neyin yada hangi etkenin görece etkisi üzerinde belirtmeler verebildikleri sürece ilginçtir. Yoksa bunlardan çıkarılacak sayısal sonuçlarda kesinlik istemek anlamsızdır. Bu formülleri abaklara başvurmaksızın basitleştirmenin ve bunlardan bazı kaba ilkeler çıkarmanın bir sakıncası yoktur ve bunlar uygulama için yeterlidir.

Bu bölümde vermeye çalıştığımız temel amaç budur.

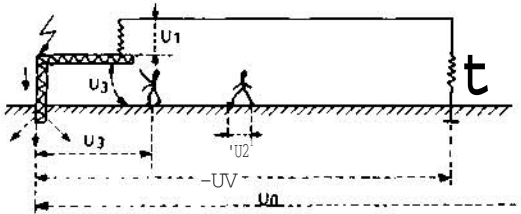
3.2. Direnç, Yerel Gerilim ve Gradyenler

Topraklama elektrotunun R direnci elektrotun davranışını tümüyle belirlemeye yetmez. Bu direnç yalnız üzerinden bir I akımının geçmesiyle elektrotun çok uzaktaki toprağa göre yükseleceği $U_0 = RI$ gerilimini tanımlamaya yarar. Ancak bu U_0 gerilimi, sonsuzdan başlayarak elektrotta uzanan herhangi bir yol üzerinde karşılaşılan tüm küçük (elemanter) gerilim artışlarının bir toplamıdır. Pratikte bu yol üzerinde somut iki nokta arasında görülen gerilimi almak daha yararlıdır ve bu iki noktanın sonsuz ile elektrot olması gerekmez. Bir elektrotu tümüyle karakterize edebilmek için, ilke olarak elektrotu çevreleyen tüm arazideki gerilimin dağılımının doğal ve yapay homojensizliklerinin bilinmesi gerekir.

Bir merkezin topraklaması üzerinden akan akım merkezdeki gövdeleri belirli bir gerilime yükseltir. Bu gerilim merkezdeki gövdeler ile diğer bir devre arasında ters yönde bir atlama tehlikesi yaratacak mı? Bu, devreyi taşıyan izolatörün alt ve üst uçları arasında görünen gerilime bağlıdır. Oradan geçen için tehlike, ayakları arasındaki (75 cm kadar açıklıklı) yada gövdeleri birleştiren bir yapı üzerinde dururken ayakları ile eli arasındaki gerilimin işlevi olacaktır (Şekil 10).

Bu durum uygulamasını bitmiş tesislerin topraklamalarının denetimi sırasında bulur. Bir topraklama elektrotunun malzeme ve personel yönünden yaratabileceği tehlikeyi incelemek için, elektrotun üzerinden bir akım geçirmek ve sonra merkezde elde uygun bir voltmetre ile dolaşarak birbirine yakın noktalar arasındaki gerilimleri ölçmek (örneğin izolatör uçları, sık geçişler, komşu gövdeler, vb.) en iyi yöntemdir. Bu yöntemle elde edilecek veriler uzaktaki bir referans noktaya göre gövde gerilimlerinin ölçümüyle bulunacak verilerden daha somut ve gerçeğe uygundur.

Diğer bir ilginç nokta Şekil 10'da görüldüğü gibi, fiziksel olarak birbirine yakın noktalar



Şekil 10. Bir akımın toprak içinde akmasıyla doğacak gerilimler.

elektriksel olarak birbirinden çok farklı uzaklıkta olabilirler.

Ayaklar arasındaki temasta görülen U_2 gerilimi genellikle toprak yüzeyindeki gerilimin yerel gradyene bağlıdır. Buna karşılık el ve ayaklar arasındaki temasta görülen U_3 gerilimi, oldukça uzun ve karmaşık bir yol üzerindeki gradyenlerin entegrali ile bulunur. Çünkü dokunulan yapı bazan dokunma bölgesinden çok uzakta topraklanmış olabilir.

Belirli bir derinliğe gömülmüş ve yalıtkan bir bağlantı ile toprağa bağlanmış bir elektrotu düşünelim. Derinlik arttıkça, yüzeydeki gerilim gradyenlerinin zayıflayacağı ve böylece adım gerilimlerinin azalacağı açıktır. Ancak yakındaki toprağın mutlak gerilimi azalırken, topraklama elektrotuna bağlı yapılar ile toprak arasındaki gerilim belirli bir düzeyde artacak ve böylece dokunma anındaki tehlike de büyüyecektir. Bu yüzden topraklama elektrotunun gömülmesi ile kişiler her tür tehlikeye karşı korunmuş olmaz.

Şimdi de üzerinden akım geçen gövdeler ile sağlam bir devre arasında ters yöndeki atlama tehlikesini düşünelim, tik aşamada bu devrenin ortalama geriliminin nasıl bulunacağı sorusuyla karşılaşırız. Birçok durumda bu gerilim ya çok uzaktaki bir topraklama elektrotu yada hattın kondansatörleri tarafından belirlenir. Bu durumda devre uzaktaki toprağın gerilimini merkeze taşır. Bu gerilim, gövdelerin topraklama direncine karşılık olan $U_0 = RI$ toplam gerilimidir ve gövdeleri bu devreden ayıran izolatörlerin uçları arasında V gerilimi olarak görünür.

Tersine devrenin topraklaması merkezin etki alanında gerçekleştirilmişse bu, toplam gerilimin bir parçası olacak ve az yada çok gövdelerin geriliminin yükselmesine katkıda bulunacaktır. Eğer elektrot gövdelerin topraklaması ile ortak sınırdan bu gerilim sıfır olacaktır. Buna karşılık bu son durumda, gövdelerin RI gerilimi devre tarafından uzaktaki bölgelere dek yayılacak ve izolatörlerin uçlarında tekrar görülecektir. Ara durumda RI gerilimi, gövdelerin ve devrenin topraklama kuplajlarının oransal işlevi olarak merkez ve uzaktaki izolatörler arasında paylaşılacaktır. Bu yöndeki kuplaj kavramına daha ilerde yine değinilecektir.

Topraklama elektrotunun kalitesi üzerinde karar verilirken daha çok yerel düşünceler rol oynar ve genel bir etüdün gerekliliği gözden kaçmaz. Bu konuda toplam R direnci, elektrotun x uzağındaki U_x gerilimi ve G_x gradyeni unutulmaması gereken basit öğelerdir.

3.3. Genel Notlar

a. Homojen bir toprakta belirli bir topraklama elektrotunu düşünelim ve toprağın özgül direncinin iki katına çıktığını varsayalım. Akım ağlarının yolunda bir değişiklik olmaz, tüm gerilim düşümleri iki katına çıkar.

Verilen biçim ve boyutlardaki bir topraklama elektrotunun direnci toprağın özgül direnciyle orantılıdır.

b. Şimdi biçim ve toprak özgül direncinde bir değişiklik olmaksızın ilgili elektrotun tüm boyut-

larının 1'e 2 oranında artırıldığını varsayalım. Eşgerilimli yüzeylerin alanı A kat ve iki eşgerilimli yüzey arasındaki akım yolu 2 kat artacaktır. Bu durumda elektrotun direnci ikiye bölünür (Şekil 11).

Belirli bir biçimdeki topraklama elektrotunun homojen topraktaki direnci doğrusal boyutlarıyla ters orantılı değişir.

c. Elektrot boyutlarıyla eşgerilimli yüzeylerin birlikte genişlemesinin bir sonucu da, çok büyük boyutlu topraklama elektrotları direncinin toprağın uzaktaki katlarında çok önemli bir etkisinin olmasıdır.

Bu gerçekten böyledir. Çünkü uzaktaki toprak katlarına karşılık olan dirence (ki bu çok büyük boyutlu elektrotların direncidir) küçük boyutlu elektrotlar durumunda ara toprak katlarının direnci eklenir. Ara toprak katlarının direnci daha büyüktür ve birincinin önemini görece olarak azaltır.

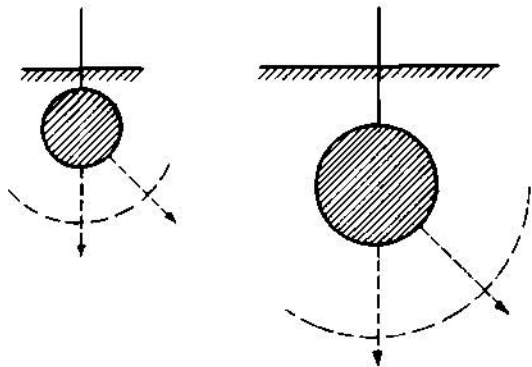
Bir topraklama çubuğu yada levhasının geriliminin yaklaşık yarısı elektrotun bir adım uzağında tüketilir. Diğer yandan büyük bir merkezin topraklama sistemindeki gerilim yükselmesi yüzlerce metre uzağa önemli biçimde yansır.

d. tik iki yasadın çıkarılacak sonuç şudur: Belirli bir direncin elde edilmesi, özgül direnci 100 kat büyük bir toprakta 1 milyon kat daha büyük hacimdeki işleri gerektirir. Daha ilerde de göreceğimiz gibi şansımıza bu sonuçtan kaçınma olanağımız var. Çünkü çok uzatılmış elektrotlarda küçük boyutların dirence etkisi yalnız logaritmik terimler aracılığı ile olur ve bunlar da çok yavaş değişen terimlerdir.

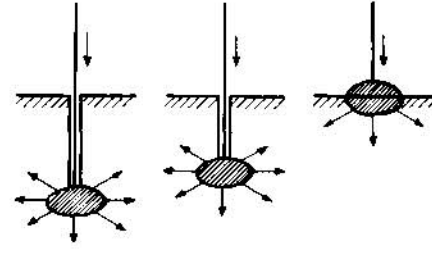
Çok uzatılmış biçimdeki topraklama elektrotlarının direnci küçük boyutlara (örneğin çap) çok az bağlıdır ve hemen hemen büyük boyutlarla (örneğin uzunluk) ters orantılı değişir.

Bu tür elektrotlarda toprak özgül direnci 100 kat artarsa aynı direnci elde etmek için gerekli işin hacmi yaklaşık 100 kat artar.

e. Uzun biçimli elektrotlarda metal daha kolay işlenir ve topraklama işleri arzî ne kadar dirençli ise o kadar pahalıya mal olur. Ancak yine de; toprak ne kadar kötü iletken ise çok uzatılmış topraklama elektrotlarını kullanmak o kadar kârlıdır.



Şekil 11. Elektrotun boyutlarına bağlı olarak direncin değişmesi.



Şekil 12. Gömülme derinliğinin etkisi.

f. Şimdi elektrotun gömülü derinliğinin etkisini inceleyelim. Elektrotla toprak yüzeyi arasındaki bağlantının yalıtılmış olduğunu varsayıyoruz.

Elektrot simetrikse; yarısı toprak yüzeyinde iken elektrottan geçen akım yayılma alanı olarak; sonsuz bir derinliğe gömüldüğündeki yayılma bölgesinin yarısından yararlanır (Şekil 12).

Yalıtılan bağlantılı bir elektrotun direnci sonsuz derinlik ve yarı gömülme (yarısı toprak içinde yarısı da dışında) için bir ile iki kat arasında değişir.

Ara derinlikler için başka hesaplamalar yapmadan bu iki sınır değeri arasında yapılacak bir tahmin gerçeğe yeterince yakın olur.

3.4. Homojen Bir Arazide Yarıküre Elektrot

Homojen arazide en basit elektrot toprak yüzeyi ile düzlemlenmiş bir yarıküre elektrotudur. Akımın dağılım çizgileri elektrotun yarıçaplarının uzunlarıdır ve eşgerilimli yüzeylerayı merkezli yarıkürelerdir (Şekil 13).

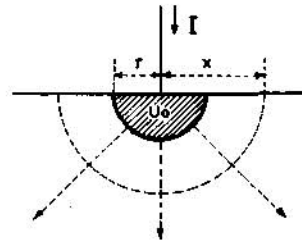
Elektrot merkezinden X ve X + dX u'aklıktaki eşgerilimli iki yüzey arasında I akımı $2\pi rX^2$ 'lik bir kesitten akar. Bu durumda dirence karşılık olan öge $\rho dX/2\pi rX^2$, bu ögedeki geri/im düşümü $\rho dX/2\pi rX^2$ ve yerel gradyen $G_x = \rho/2\pi rX^2$ olur.

Bunların entegralleri alınarak R direnci ve elektrot yüzeyindeki U_0 gerilimi kolaylıkla bulunabilir. Bunun için merkezden X uzaklıktaki gerilim U_x olsun (Şekil 14), bu durumda

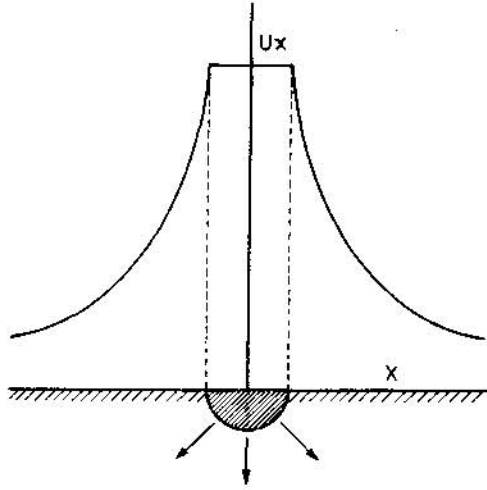
$$R = \frac{\rho}{2\pi rR} = \rho \frac{r/2}{\pi r^2}, \quad U_0 = \frac{\rho I}{2\pi rR}$$

$$U_x = \frac{\rho I}{2\pi r} = U_0 \cdot \frac{r}{X} = r G_x$$

bulunur.



Şekil 13. Homojen arazide yarıküre topraklama elektrotu.



Şekil 14. Bir yarıküre topraklama elektrotunun etrafındaki gerilim.

Buradan şu sonuçları çıkarabiliriz:

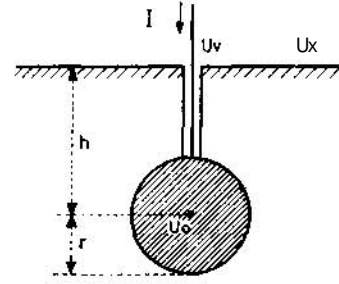
1. Bir yarıküre elektrottan akan akıma toprağın gösterdiği direnç; kesiti elektrotun çap kesiti ve uzunluğu elektrot yarıçapının yarısı olan bir silindir arazi parçasının direncine eşittir.
2. Direnç, arazinin özgül direnci ile doğru elektrotun yarıçapı ile ters orantılı değişir.
3. Geçen belirli bir akım için dışardaki bir noktanın gradyeni ve mutlak gerilimi sözü edilen noktanın elektrot merkezine olan uzaklığına bağlıdır; elektrot boyutlarıyla bir ilgisi yoktur.
4. Gerilim elektrot merkezine olan uzaklıkla, gradyen ise aynı uzaklığın karesiyle ters orantılı değişir.
5. Toplam gerilimin yarısı elektrot çevresinin yarıçap uzağında yitirilir.

Yarıküre elektrotlar pratikte hiç kullanılmaz. Çünkü tıknaz biçimiyle metalin kötü kullanılmasına yol açar. Böyle bir elektrotun çok geniş bir arazide kullanılması tercih edilebilir.

Burada şu noktayı belirtmekte yarar var: Bir elektrotun biçimi ne kadar düzensiz olursa olsun, elektrotun uzağındaki eşgerilimli yüzeyler daima yarıküre biçimine doğru yaklaşır. Elektrotun boyutlarından az büyük bir uzaklıktaki noktanın mutlak gerilim ve gradyeni, ne elektrotun biçimine ne de boyutlarına bağlıdır. Bunlar daha ilerde vereceğimiz uzaklık ve akan akım değişkenli formlerde belirtilmiştir.

Diğer yandan herhangi bir elektrotu eşdeğer bir yarıküre elektrotla dönüştürme olanağı vardır. Bu durumda elektrot yarıküreyle karşılaştırıldığında aynı dirence ve aynı akan akımın yol açtığı aynı gerilime sahiptir.

Bu eşdeğer yarıküre elektrotun yarıçapı, gerçek elektrotun üç boyutu arasındaki bir değerde olacağı açıktır, ilerde göreceğimiz gibi, bir düşey çubuk, yarıçapı çubuk uzunluğunun altıda biri olan bir yarıküre elektrot; bir levha, yarıçapı levhanın yarıçapının (plaka yüzeyi bir daireye indirgenerek) % 65'i olan bir yarıküre elektrotla eşdeğerdir. Açıkça görülüyor ki herhangi bir



Şekil 15. Gömülmüş küre elektrot.

elektrotun direnci aynı çevreye sahip her yarıküre elektrotun direncinden daha büyüktür.

Yukarıda belirtilen basit kurallar yarıküre olmayan tüm elektrotlar için de geçerlidir. Biçimlerin düzensizliği o kadar fazla gözde büyütülmeme- li. Çünkü bu düzensizliklerin yol açtığı yerel etkiler biraz uzakta hemen zayıflar.

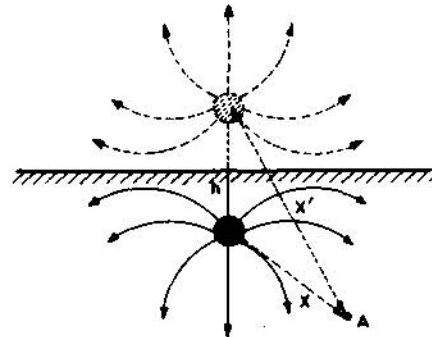
3.5. Yalıtkan Bağlantı İle Toprağa Gömülü Küresel Topraklama Elektrotu

Çok büyük bir derinliğe gömülmüş r yarıçaplı bir küre elektrotun, X kadar uzağında akımın geçtiği yüzey $4\pi X^2$ dir. Bu değer yarıküre elektrot durumundakinden iki kat daha büyüktür. Bu durumda direnç, gradyen ve gerilim değerleri yarıküre elektrot değerlerinin yarısı kadardır:

$$U_x = \frac{\rho I}{4\pi X} \quad , \quad G_x = \frac{\rho I}{4\pi X^2}$$

$$U_0 = \frac{\rho I}{4\pi r} \quad , \quad R = \frac{\rho}{4\pi r}$$

Elektrot merkezinin h gömülü derinliği sonlu ve yarıçapa göre büyükse (Şekil 15) toprak yüzeyinin yol açtığı homojensizlik, toprak ve elektrot sistemine kendi zahiri (bu yüzeye göre) sistemleri eklenerek ve aynı I akımı zahiri elektrottan geçirilerek ortadan kaldırılabilir. Bu simetri incelemesinden toprakta alanın değişmediği kolayca görülebilir. Öte yandan elektrotlardan her birinin alanı öbür elektrotun varlığıyla fazla bir değişikliğe uğramaz. Elektrotların boyutlarının oldukça küçük olduğu varsayılmıştır. Sonuç olarak bölgenin bütünündeki elektrik alanı pratikte iki elektrotun bireysel etkilerinin basit



Şekil 16. Bir elektrotun toprağa göre imgesinin (imajının) bulunması.

bir toplamından oluşur (Şekil 16).

iki elektrotun merkezinden X ve X' uzaklıkta olan bir noktanın gerilimi kolaylıkla çıkarılabilir:

$$U_x = \frac{\rho I}{4\pi X} + \frac{\rho I}{4\pi X'}$$

Noktayı elektrotlardan birinin yüzünde alırsak, elektrotların noktaya olan uzaklıkları r ve 2h olur. Bu durumda gerilim ve direnç aşağıdaki biçimi alır:

$$U_0 = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r} + \frac{1}{2h} \right), \quad R = \frac{\rho}{4\pi r} \left(1 + \frac{r}{2h} \right)$$

Direnç bu durumda sonsuz bir derinliğe gömülme oranla r/2h kadar artmıştır. Görülüyor ki çapa eşit bir derinliğe gömülmede dirençteki artış yalnız Z 25 dir. Yarısı toprak yüzeyine çıkmış elektrotlarda (kürenin yarısı dışarda yarısı toprak içinde) bu artış % 100 e ulaşabilir. Bu durumda yukardaki formülün uygulaması kalmaz.

Kürenin düşey eksenine X kadar uzaklıkta ve toprak yüzeyinde olan bir noktanın gerilim ve gradyeni şöyledir (Şekil 17):

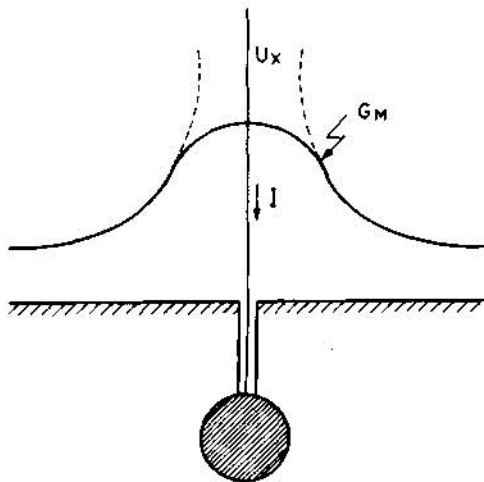
$$U_x = \frac{\rho I}{4\pi} \cdot \frac{2}{\sqrt{X^2 + h^2}}$$

$$G_x = \frac{\rho I}{4\pi} \cdot \frac{2X}{(X^2 + h^2)^{3/2}}$$

Özellikle kürenin düşey ekseninde bu değerler:

$$U_v = \frac{\rho I}{2\pi h} > G_v = 0, \quad U_0 - U_v = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{2h} \right)$$

Merkezin düşeyindeki gerilim, gömülme derinliği ne kadar fazlaysa o kadar düşük oluyor. Buna karşılık; toprağın bu bölgesiyle elektrota bağlı metal yapılar arasındaki gerilim farkı gömülme derinliğiyle biraz artıyor. Elektrotun gömülmesiyle, o elektrota bağlı yapılarla olacak temaslara



Şekil 17. Gömülmüş bir küre elektrotun etrafındaki gerilim.

karşı kimse korunmuş olmaz.

Elektrot merkezinin düşey ekseninde gerilimin gradyeni sıfırdır. Bu gradyen gömülme derinliğinin 0,7 katına eşit uzaklıktaki (merkez düşeyinden) bir noktada en üst değere ulaşır.

$$G_m = \frac{\rho I}{2\pi r(1,6h)^2}$$

Bu ifadeyi toprak yüzeyindeki bir yarıküre elektrotun etrafındaki gradyen ile karşılaştırdığımızda; gömülme derinliği h olan az yada çok küresel bir elektrotun (yalıtkan bağlantılı) maksimum gradyeninin yüzeydeki elektrotun merkezden 1,6h kadar uzağındaki bölgenin gradyenine indirgenmiş olduğunu görürüz.

3.6. Levha Biçimindeki Elektrot

Yatay yada düşey gömülü bir levhanın yarıçapı r, gömülme derinliği h (toprak yüzeyinden elektrot merkezine olan düşey uzaklık) olsun. Elektrotun toprak yüzeyine olan bağlantısı toprağa göre yalıtılmış bir iletkenle yapılırsa; elektrotun yaklaşık direnci aşağıdaki gibi olur (Şekil 18):

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

Bu tümüyle ampirik formülün verdiği sonuçlar kuranın verdikleriyle çok az farklılık gösterir. Uygulamada;

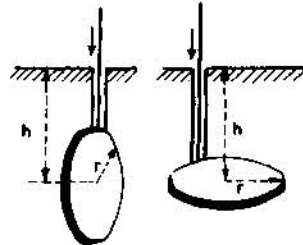
$$\text{sonsuz derinlik için } R = \frac{\rho}{8r} \text{ ve}$$

$$\text{sıfır derinlik için } R = \frac{\rho}{4r}$$

olduğunu hatırlamak ve uygun bir orantı katsayısını tahmin ederek uygulamak yeterlidir.

Bunları küresel elektrotun değerleriyle karşılaştırdığımızda şu sonucu çıkarabiliriz: Bir levha elektrotunun direnci, yarıçapı levha yarıçapından 1,5 kat küçük olan bir küre elektrotunun direnci kadardır.

Levhanın et kalınlığının direnç üzerinde fazla bir etkisi yoktur. Diğer yandan daha ilerde de görüleceği gibi levha biçimli bir elektrotun aynı çevreye sahip basit bir halka (et kalınlığı olan) elektrota göre etkinliği çok fazla değildir. Bir kare levha elektrot, yarıçapı kare kenarının 0,6 katı olan bir dairesel levha elektrota eşdeğerdir. Kenarları 1 m olan bir kare levha elektrotun 1 m derinlikte gömülü iken



Şekil 18. Levha biçimindeki elektrot.

gösterdiği direnç $0,25 p$ dur ve bu değer $4 m$ uzunluğundaki çubuk elektrotun direncine yakındır.

3.7. Halka Biçimindeki Elektrot

d çaplı bir iletken yapılmış yarıçapı r olan bir dairesel halka yatay biçimde h kadar derinliğe gömülürse; bu elektrotun göstereceği direnç (DWIGHT'a göre) şöyledir:

$$R = 0,366 \frac{P}{2\pi r} \left(\log \frac{16r}{d} + \log \frac{4r}{h} \right)$$

İkinci terim yaklaşıktır ve çok büyük h değerlerinde kullanılmaz. Bu terim sonsuz derinlikte sıfıra; sıfır derinlikte de $1'e$ doğru yaklaşır.

Örnek olarak $1 cm$ çaplı iletken yapılmış $50 cm$ yarıçaplı bir halka elektrotun $1 m$ derinlikte gösterdiği direncin $0,374p$ olduğu söylenebilir. Aynı çevreli içi dolu bir diskin göstereceği direnç halkalı olanın yalnızca % 23'üdür.

π çaplı bir levha aynı çevreli bir halkaya göre çok fazla etkin değildir.

Epey bir derinliğe gömülmüş küçük boyutlu bir halkanın yakınındaki toprakta gerilim dağılımı aynı çevreli levha yada eşdeğer küre ile hemen aynıdır. Tersine eğer dolu bir elektrot yerine çapı gömülme derinliğinin yanında büyük olan bir halka elektrottan söz ediliyorsa iletkenin yakınındaki toprağın gerilimi için düz bir gömülü iletkenin formülleri aynen kullanılabilir.

Az yada sıfır derinliğe gömülü bir halka elektrotun merkezindeki gerilim; birim uzunluğundan geçen akım i ise aşağıdaki biçimi alır:

$$U_c = P \cdot i$$

Az bir derinliğe gömülmüş dairesel bir halkanın $1 m$ uzunluğundan geçen akım 1 Amper ve arazi homojen ise, halkanın merkezindeki gerilim sayısal olarak arazinin özgül direncine eşittir.

3.8. Homojen Bir Arazide Düşey Çubuk

a. Doğru parçası biçimindeki iletkenlerin hesabına toplu bir bakış.

Az yada çok doğru parçası biçimindeki topraklama elektrotlarının karakteristikleri, bunların çok küçük parçalara bölündüğü ve ilk yaklaşırma olarak akımın aralarında eşit biçimde paylaşıldığı varsayılarak yeter basitlikte hesaplanabilir. Ayrıca toprak yüzeyinden gelen kesiklik, sistem kendi zahiri sistemi üzerine eklenerek, daha önce gömülü kürelerde yaptığımız gibi giderilebilir.

Belirli bir noktanın gerilimi bulunurken, tüm küçük parçaların belirli küçük kürelerden oluşan bir teşbih dizisi gibi düşünülerek bu noktaya olan etkileri toplanır. Elektrotun akım ve direnç bağıntılarına geçerken referans noktasını parçalardan birinin yüzeyine getirmek yeterlidir.

Daha ilerde göreceğimiz çoklu elektrotların hesaplama yöntemiyle bu yöntem aynıdır. Yaklaşırmalar, bir yandan iletkenin akımın düzgün dağılmasına, diğer yandan bir silindirik parçasının küreye benzetilmesi varsayımına dayanmaktadır.

Bazıları (Dwight gibi) sorunu daha ayrıntılı incelemişlerdir. Ancak elemanter formüller üzerinde yapılan yaklaşırmalar pratikte yeterlidir.

b. Uzunluğu L çapı d olan bir düşey topraklama çubuğunun yeter doğrulukta direnci aşağıdaki gibi yazılabilir (Şekil 19):

$$R = 0,366 - \xi - \log - \wedge -$$

$I = Li$ gibi bir akımın akması çubuğu U_c gibi bir gerilime yükseltir:

$$U_c = 0,366 p \frac{I}{L} \log \frac{3L}{d} = 0,366 p i \log \frac{3L}{d}$$

Basitleştirilmiş formül logaritmik terimde 3 yerine 4 katsayısını verecekti. Bu 4 katsayısı bir çok yazar tarafından kullanılmıştır. Bundan doğan hata çoğunlukla önemsizdir ve biz kendimiz gerilim ve gradyanların hesabı için bağıntının kaba biçimini koruduk. Bu konuya daha ilerde tekrar döneceğiz.

Oldukça ilginç bir büyüklük çubuğun metre başına RL direncidir. Bu direnç aynı zamanda çubuğun 1 metresinden geçen akım 1 Amper olduğunda çubuğun yükseldiği U_c/i gerilimine eşittir:

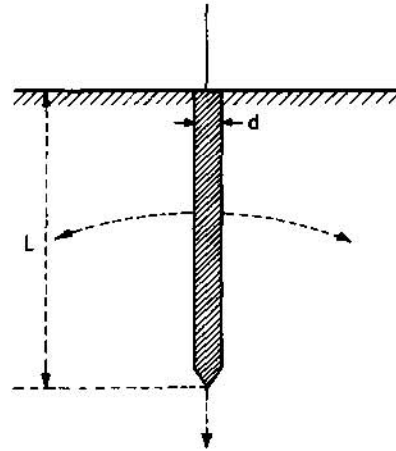
$$RL = \frac{U_c}{i} = 0,366 p \log \frac{3L}{d}$$

Çubuğun metre başına direnci uzunlukla biraz artar. Bu yüzden uzun çubuklar kısıtlara oranla daha az kullanılır. Ayrıca çubuğun çapı artırıldığında direnç fazla azalmaz. Bu nedenle kesitin artırılması da pek bir yarar sağlamaz.

Bağıntıdaki logaritmik terimin alışılmış L ve d büyüklükleri için çok yavaş değiştiğini belirtmek gerekir. Bu terim pratikte daima 2 ile 3 arasında kalmaktadır. Uzunluk yada çap iki katına çıkarılırsa bu terim yalnız $0,3$ kadar yani % 10 ile 15 arasında değişmektedir.

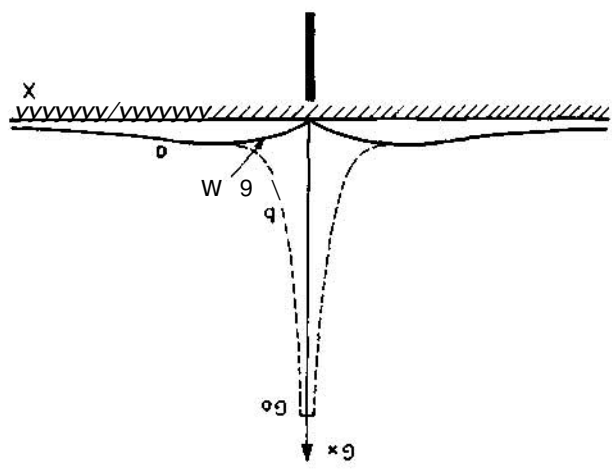
Bundan aşağıdaki basit kuralları çıkarabiliriz:

Çubuğun metre başına direnci yada 1 metresinden 1 Amper geçtiğinde çubukta doğan gerilim çubuğun boyutlarına hiç bağlı değildir ve hemen hemen



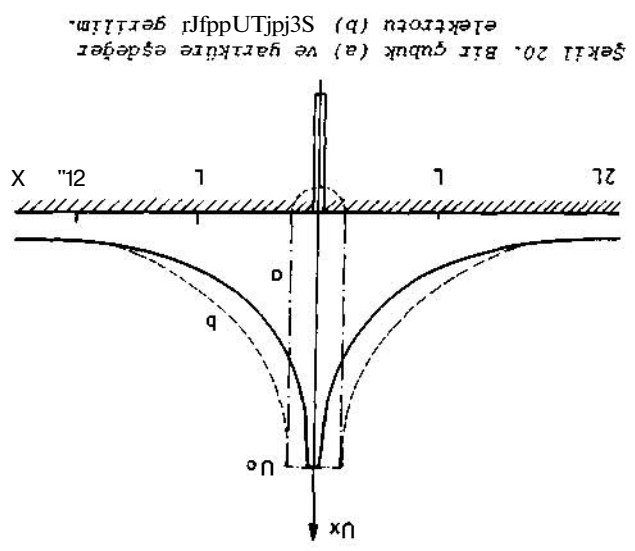
Şekil 19. Homojen arazide düşey çubuk.

Şekil 20. Bir gubuk (a) ve yarıkküre eşdeğer elektrik devresi (b) için gerilim ve akım dağılımları. (a) gubuk devresi, (b) yarıkküre eşdeğer devresi.



Şekil 20. Bir gubuk (a) ve yarıkküre eşdeğer elektrik devresi (b) için gerilim ve akım dağılımları. (a) gubuk devresi, (b) yarıkküre eşdeğer devresi.

Şekil 20. Bir gubuk (a) ve yarıkküre eşdeğer elektrik devresi (b) için gerilim ve akım dağılımları. (a) gubuk devresi, (b) yarıkküre eşdeğer devresi.



Şekil 20. Bir gubuk (a) ve yarıkküre eşdeğer elektrik devresi (b) için gerilim ve akım dağılımları.

$$G_x = \frac{2\pi X L}{\rho L} = \frac{2\pi X}{\rho}$$

$$U_x = 0,366 \rho \log \left[\frac{L}{x} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{x}\right)^2} \right]$$

Bu formüller X uzaklıklarının L uzunluklarının yanında büyük yada küçük olmalarına göre basitleştirilebilir.

$$G_x = \frac{2\pi X \sqrt{L^2 + X^2}}{\rho}$$

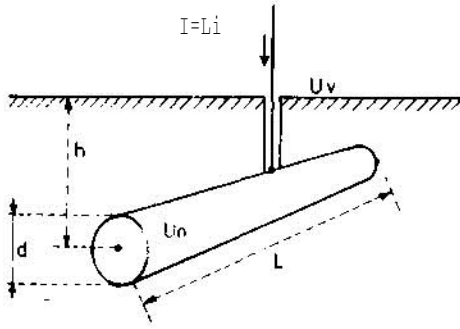
Diğer yandan gubukun x kadar uzandığı için

$$U_x = 0,366 \rho \log \left[\frac{L}{x} + \sqrt{1 + \left(\frac{L}{x}\right)^2} \right]$$

Bu formüller X uzaklıklarının L uzunluklarının yanında büyük yada küçük olmalarına göre basitleştirilebilir.

(m)	R (Ohm)	$\rho \cdot m \cdot \sqrt{A/m}$	H
1	0,73 ρ	0,5 ρ	0,73 ρ
2	0,24 ρ	0,9 ρ	0,73 ρ
8	0,09 ρ	1,0 ρ	0,73 ρ
16	0,04 ρ	1,1 ρ	0,73 ρ
11	> 0,0 ρ	1,2 ρ	0,73 ρ

Şekil 20. Bir gubuk (a) ve yarıkküre eşdeğer elektrik devresi (b) için gerilim ve akım dağılımları.



Şekil 22. Yatay gömülü düz doğru iletken.

3.9. Homojen Bir Arazide Tepesi Gömülü Düşey Çubuk

Çubuğun tepesinin toprağa gömülü olması toprağın yüzeyindeki gradyen ve gerilimleri azaltır. Aynı çıplak kullanım uzunluğu için h derinliğine kadar gömülme ile tepesi toprak yüzeyinde bulunan iletken çubuktan 3h yada 4h kadar uzaktaki çevrede bulunan maksimum gradyendeki azalma hemen hemen aynıdır.

Belirli bir çıplak uzunluk için çubuğun tepesinin gömülmesi çubuğun direncini pratik olarak etkilemez.

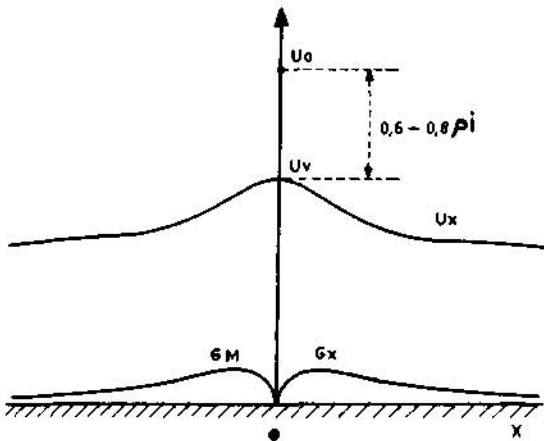
3.10. Yatay Olarak Gömülmüş Doğru Parçası Biçimindeki İletken

a. Çapı d, uzunluğu L olan doğru parçası biçimindeki bir iletken h gibi bir derinliğe gömülürse; direnci aşağıdaki gibi olur (Şekil 22):

$$R = 0,366 \cdot \frac{L}{d} \cdot (\log \frac{L}{d} + \log \frac{L}{h})$$

Bağıntının ikinci logaritmik terimi orta gömülme derinlikleri için geçerlidir, sonsuz derinlikte sıfır olur. Yarı gömülme derinliklerinde (h=r) ikinci terim birinciye eşitlenir.

Benzer koşullarda $I = L \cdot i$ gibi bir akımın akması



Şekil 23. Yatay gömülü bir iletkenin yakınındaki gradyen ve gerilim.

elektrotu belirli bir gerilime yükseltir:

$$U = 0,366 \pi i \left(\log \frac{L}{d} + \log \frac{3L}{8h} \right)$$

RL direnci iletkenin metresinden geçen 1 Amperin yol açtığı gerilime eşittir ve genel olarak yatay iletkenlerdeki değeri düşey çubuktakilerine göre biraz fazladır. Çünkü çubuğa göre iletkenlerde alışılmış uzunluk daha büyük, çaplar daha küçük ve derinlikler daha düşüktür.

Çapı 1 cm ve gömülme derinliği 1 m yada 25 cm olan bir iletkenin boyuna RL direnci ile metresinden 1 Amper geçtiğinde iletkenin yükseldiği gerilim aynı değerdedir.

L(m)	RL(Ohm-m yada V/A/ro)	h = 1 m	h = 0,25 m
10	1,37 p	1,59 p	
20	1,59 p	1,81 p	
50	1,89 p	2,11 p	
100	2,11 p	2,33 p	

Burada şunu hatırlamak yeterlidir: Yatay olarak gömülmüş doğru parçası biçimindeki iletkenlerin metre başına direnci 1,5 ile 2p Ohm/m düzeyindedir ve metresinden akan 1A elektrotu yaklaşık 1,5 ile 2pV'a yükseltir.

b. Metresinden 1 Amper akan iletkenle, iletkenin düşey düzlemine X uzaklıktaki (L uzunluğuna göre küçüktür) bir toprak noktası arasındaki gerilim farkı şöyledir (Şekil 23):

$$U_o - U_x = 0,366 \pi i \log \frac{x^2 + h^2}{d \cdot h}$$

Toprakta maksimum gradyen iletkenin düşeyinden gömülme derinliğine eşit uzaklıktaki bir noktada görülür:

$$G_m = 0,16 \cdot \frac{i}{h}$$

Bu formüller pratik durumlara uygulandığında şu genel ilkeler ortaya çıkıyor.

Gömülü iletkenle yakınındaki toprak arasındaki gerilim farkı, metresinden akan akımın toprak özgül direnci ile çarpımının % 60 ile % 80'i düzeyindedir. Bu fark gömülme derinliği ile hafifçe artar.

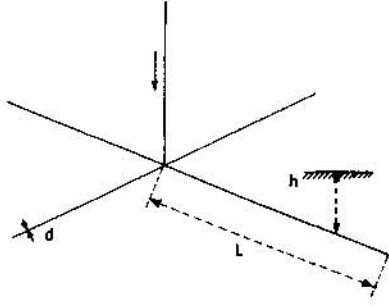
Gömülme derinliği arttıkça toprak üzerindeki gerilim gradyeni azalır. Adım düzeyindeki derinliklerde maksimum adım gerilimi, metresinden akan akımın özgül direnç ile çarpımının % 10 ile % 15'i kadardır.

3.11. Yıldız Biçimindeki Kollardan Oluşan /Topraklama Elektrotu

Aşağıda Dwight tarafından verilen formüller kullanılabilir. Burada her kolun uzunluğu L, çapı d ve gömülme derinliği h ile gösterilmiştir (Şekil 24).

180° lik iki kol:

$$R = 0,366 \cdot \frac{L}{d} \cdot (\log \frac{4L}{d} + \log \frac{L}{h} - 0,25)$$



Şekil 24. Yıldız biçiminde kolları olan topraklama elektrotu.

90° lik iki kol:

$$R = 0,366 - f - (\log \frac{4L}{d} + \log f - 0,103 + 0,19 \frac{h}{L})$$

Üç kollu yıldız:

$$R = 0,366 - f - (\log \frac{4L}{d} + \log f + 0,465 - 0,18 \frac{h}{L})$$

Dört kollu yıldız:

$$R = 0,366 - f - (\log \frac{4L}{d} + \log f + 1,265 - 0,93 \frac{h}{L})$$

Altı kollu yıldız:

$$R = 0,366 - f - (\log \frac{4L}{d} + \log f + 2,98 - 1,36 \frac{h}{L})$$

Bu formüller yalnız orta gömülme derinlikleri için uygundur. Sıfır derinlikte ikinci logaritmik terim l'e eşittir. Sonsuz derinlikte direnç, sıfır derinlikteki değer yarısına düşer.

Bu formüller şu gerçeği ortaya koyuyor: Kolların sayısı arttıkça kolların etkinliği azalır.

Her kolun uzunluğu 10 m, çapı 1 cm ve gömülme derinliği 1 m olduğunda farklı sayıdaki kollar için bulunan dirençler aşağıya çıkarılmıştır:

Kolların Sayısı	Direnç (Ohm)	Uzunluk Artışı (%)	İletkenlikteki Kazanç (%)
1	0,137 p	—	—
2	0,082 p	100	68
3	0,062 p	50	32
4	0,053 p	33	17
6	0,046 p	50	15
Halka r= 10 m	0,034 p	4,7	35
Levha r= 10 m	0,023 p	—	48

Daha uzun kollu yıldız elektrotlar da kullanılsaydı kazanç biraz fazla olacaktı o kadar. Çok kollu yıldız elektrotun tek iletkenli elektrota göre üstünlüğü düşük bir endüktansa sahip olması ve böylece çok sarp alınlı (alında yükselme hızı büyük olan dalga) şok akımlarının akmasını kolaylaştırmasıdır. Bununla beraber kolların sayısının üç yada dördü aşması gereksizdir.

3.12. Yalıtkan Olmayan Bağlantıların Etkisi

Topraklanacak yapıları elektrotlara birleştiren gömülü çıplak bağlantılar elektrotların uzantıla-

rı gibi işlev görür. Genellikle bağlantı iletkenlerinin çapı küçüktür, ancak toprakla temas iyise önemi azalır. Buna karşılık bağlantıların bulunduğu arazide yüzeyel katların olası kuraklığının gözönüne alınması gerekir.

Çıplak bağlantıların direnç üzerindeki etkisi, elektrotları ile karşılaştırıldığında bağlantıların uzunluğuna bağlı olarak ikincil yada birincil önemdedir.

Homojen bir arazide 1,5 m derinliğe gömülmüş 1 m²'lik bir levhayı düşünelim. Bu levha toprak yüzeyine çıplak bir düşey iletkenle bağlansın. Levhanın yalnız başına direnci 0,25 p ve bağlantının yalnız başına direnci, bir çubuk gibi düşünülürse 0,70p dolayındadır, yani daha büyük. Ayrıca levha bağlantı üzerinden akımın dağılmasını güçleştirecektir. Sözün kısası bağlantının varlığı toplam direnci fazla değiştirmez.

Şimdi 3 m uzunluğundaki dört çubuğun kenarları 6 m olan bir karenin köşelerine yerleştirildiğini ve bunların çapraz birleştirildiğini düşünelim. Yalnız dört çubuğun direnci 0,10p ve bağlantıların direnci de 0,10p düzeyindedir. Toplam direnç ise 0,08p dolayında olacaktır. Arazi homojen ve yüzeydeki toprak katlarının kuruluşu etkili değilse, çubukların yerleştirilmesi direncin büyüklük düzeyini yalnız bağlantıların olması durumuna göre, fazla değiştirmez.

Daha ilerde göreceğimiz gibi; çok geniş merkezlerde topraklanacak yapılar arasındaki bağlantılar yalnız başlarına bu yapılar için çok iyi birer topraklama elektrotu oluşturur.

3.13. Dairesel Kesitli Olmayan İletkenlerin Kullanılması

Topraklama iletkenlerinde dairese kesit aynı kesitte çevresi en küçük olandır. Bu nedenle akımın geçişine en az kolaylık gösteren de dairese kesittir.

Boyu uzun ve eni (W) ince bir bant, çapı W/2 olan bir silindirik iletkenine hemen hemen eşdeğerdir.

Ancak uzun bir elektrotun direnci çapına çok az bağlıdır. Bu nedenle kesiti dairese olmayan iletkenlerden umulan kazanç genellikle yanıltıcıdır.

Örneğin 1 cm çaplı yuvarlak iletkenle eni 4 cm ve kalınlığı 0,2 cm olan bir bantı karşılaştıralım. Bunlar hemen hemen aynı kesittedir. Bant, 2 cm çaplı bir iletkenine eşdeğerdir, yani birincisinin iki katına. Ancak aynı 10 m'lik gömülü uzunlukta dirençler yalnız % 6 fark eder. Daha büyük gömülü uzunluklarda bu fark daha da küçülür ve önemsizleşir.

Bu yüzden mekanik yönden daha sağlam olan dairese kesitli iletkenlerden uzaklaşmak tümüyle yarsızdır.

3.14. Homojen Olmayan Toprak Alt Katmanı Üzerindeki Topraklama Elektrotu

Burada yalnız basit durum incelenecektir. Bu durumda toprak, özgül direnci p₁, kalınlığı H olan bir yatay yüzeyel tabaka ile P₂ özgül dirençli ve homojen olmayan bir toprak alt katmanından oluşuyor.

Derindeki toprağın özgül direncinin saptanış yöntemlerine girmeden önce kısa ve öz biçimde toprağın homojen olmayan yapısının elektrotların direnci ve bunların yakınındaki gradyenleri nasıl etkilediğini belirtmeye çalışalım.

3.14.1. Homojen olmayan toprak alt katmanı üzerindeki bir küçük elektrotun direnci

Topraklama elektrotu r yarıçaplı bir yarıküre elektrotu benziyor ve r yarıçapı yüzeyel toprak katının H kalınlığının yanında küçükse, direnci yaklaşık olarak şöyledir:

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

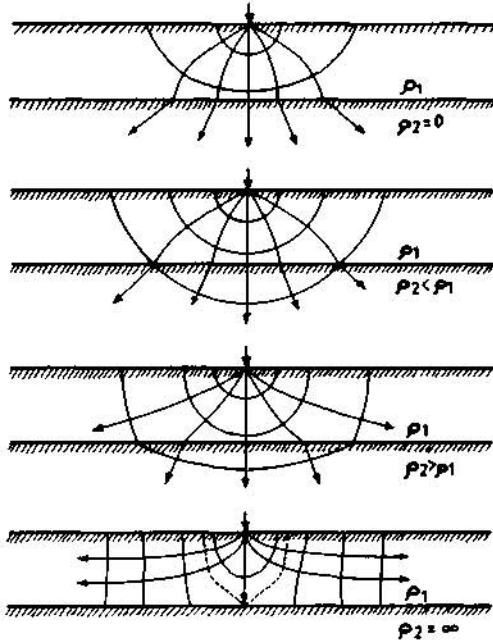
Birinci terim ρ_1 özgül dirençli homojen ortamdaki yarıküre elektrotun direncine karşılıktır, ikinci terim, r yarıçapından bağımsız olarak (yeterki küçük olsun) direnci ya artırıcı ($\rho_2 > \rho_1$) ya da azaltıcı ($\rho_2 < \rho_1$) yönde etkiler. Sonsuz dirençli bir toprak alt katmanında bu terim sonsuza uzanır.

Örneğin elektrotun yarıçapı yüzeyel katın H kalınlığının yarısına eşitse direnç, ρ_2/ρ_1 oranının işlevi olarak aşağıdaki değerleri alır:

$\rho_2/\rho_1 \dots$	0	0,1	1	10	100	1000
R	0,65	0,7	1	1,85	3,1	4,1

Şekil 25, nokta elektrotta akımın akışını farklı ρ_1/ρ_2 değerleri için veriyor.

ρ_1 özgül dirençli homojen arazide, küçük elektrotların çok yakınındaki bölgelerde gerilim gradyen-



Şekil 25. Değişik toprak alt katmanı özgül dirençleri için homojen olmayan bir arazide noktasal elektrotun etrafındaki alan.

leri pratik olarak aynıdır. Toprak alt katmanının etkisi elektrottan uzaklaştıkça daha çok duyulur. Toprak alt katmanı yüzeyden daha iletkense gradyenler azalma, tersi durumda da artma eğilimindedir. Gradyenler birbirine birinci durumda hızlı, ikinci durumda da yavaş yaklaşırlar.

3.14.2. Toprak alt katmanının yüzeyden daha iletken olması durumu

Yukarıda verilen formül küçük boyutlu elektrotların direncinin hesaplanmasına uygundur. Karmaşık hesaplara girmeden, daha kompleks elektrotların davranışı üzerinde belirli bir yaklaşımda bulunulabilir.

Örneğin uzun bir çubuk elektrotun H uzunluğu ρ_1 özgül dirençli toprakta, L - H uzunluğu da ρ_2 özgül dirençli bir toprak alt katmanında bulunuyorsa; dirençli tabaka içindeki H uzunluğu ρ_2/ρ_1 oranında düşürülerek toprağın tümü ρ_2 özgül dirençli ve homojen kabul edilebilir.

Eğer elektrot H kalınlığına göre büyük boyutlu bir yüzeyel levhayla eşdeğerlendirilebiliyorsa; levhanın ρ_2 özgül dirençli toprak alt katmanı üzerine doğrudan yerleştirildiği varsayılır ve direncine; uzunluğu H, kesiti levha yüzeyine eşit ve ρ_1 özgül dirençli bir silindir toprağın direnci eklenir.

Yukarıda da belirtildiği gibi elektrot, iletkenliği yüzeydekenden fazla olan bir toprak alt katmanı üzerine yerleştirilirse; elektrotun civarındaki gerilim ve gradyenler çok hızlı biçimde (yüzeyel tabakanın kalınlığı düzeyindeki bir uzaklıkta) birbirine kavuşur.

3.14.3. Toprak alt katmanının yüzeyden daha dirençli olması durumu

Toprak alt katmanının ρ_2 özgül direnci çok büyükse akım ağlarının derine doğru yayılması güçleşir ve ρ_2 ne kadar büyükse yüzeyel olarak o kadar uzağa gider. Sonuç olarak ρ_1 özgül dirençli homojen bir arazi durumuyla karşılaştırıldığında görülüyor ki, dirençte bir artma ve elektrot civarındaki gerilim gradyenlerinde daha az hızlı bir azalma oluyor.

Toprak alt katmanının tümüyle yalıtkan olduğu durum basit sınır durumudur ve yukarıdaki formülde direnç sonsuz değere ulaşır. Bu durumda akımın sonsuza kadar akmasını sağlamak için sonsuz değerli bir gerilim gerekir. Çünkü akım toprağın derinliğine başka türlü yayılamaz.

Ancak küçük yarıçaplı (r) bir elektrotla X uzaklıktaki bir nokta arasındaki gerilim farkı daima tanımlanabilir:

$$U_0 - U_x = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{X} \right) + 0,366 \rho_1 I \log \frac{1 + \sqrt{1 + X^2/H^2}}{1 + \sqrt{1 + r^2/H^2}}$$

Öte yandan en basit elektrot artık bir yarıküre değil, yüksekliği H, çapı d ve iletken tabakanın tümünü kat eden düşey bir silindirdir (Şekil 26). Bu durumda akım ağları yatay düzlemde radyal olarak yayılır ve eşgerilimli yüzeyler elektrotla

aynı merkezli silindirler biçimindedir. $I = H i$ akımının elektrotun X uzağında $2\pi H X$ yüzey kesitinden geçerken yarattığı gradyen:

$$G_x = - \frac{\rho I}{2\pi H X} = - \frac{\rho i}{2\pi X} \text{ dir.}$$

Herhangi X ve X' noktaları arasındaki gerilim farkı gradyenin entegrali alınarak bulunur.

$$U_x - U_{x'} = 0,366 \rho i \log \frac{x'}{x}$$

Bu noktalardan biri elektrot yüzeyinde alınırsa fark gerilimi:

$$U_0 - U_x = 0,366 \rho i \log \frac{\rho y}{x} \text{ olur.}$$

Böylece homojen arazide bir çubuğun yakınındaki gerilim ve gradyen bağıntılarını tekrar bulmuş olduk. Bu bekleniyordu, çünkü bu durumda da akım çizgileri derine inmeden radyal olarak yayılıyor.

X uzaklığının her 10 katında $U_0 - U_x$ gerilim düşümü $0,366 \rho i$ kadar büyüyor.

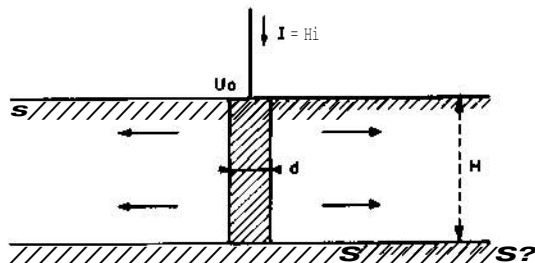
Bu basit formüller, herhangi bir biçimdeki elektrotta uygulanabilir. Yeter ki elektrot H uzunluğundaki eşdeğer bir silindire dönüştürülebilsin ve X noktası yüzeyin düzensizliklerinden etkilenmemesi için yeterince uzakta seçilmiş olsun.

Ayrıca bu formüller; toprak alt katmanının sonsuz dirençli olmadığı normal durum ve orta uzaklıklar (elektrota olan) için de uygulanabilir. Daha büyük uzaklıklarda akımın azalmasını gözönüne almak gerekir. Çünkü toplam akımın büyük bölümü giderek yüzeysel tabakayı terkeder ve derine doğru yayılır.

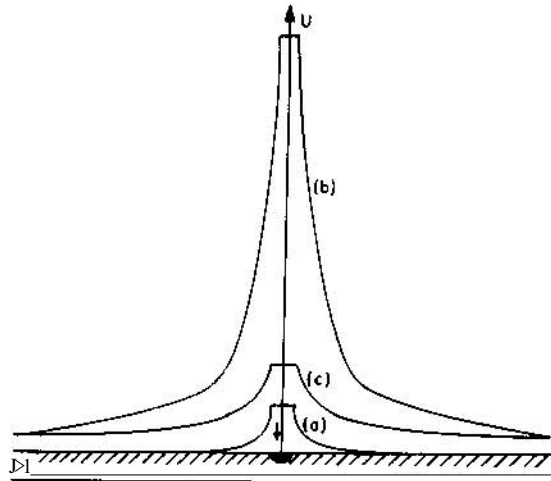
Akımın yüzeysel tabaka içinde izlediği ortalama yol yani akımın yarısının bu tabakayı terkettiği nokta ile elektrot arasındaki uzaklık kolayca tanımlanabilir. Küçük bir elektrot durumunda bu uzaklık yaklaşık olarak şöyledir:

$$X = \frac{\rho_2}{\rho_1} H$$

Yüzeysel tabakadan 10 kat daha dirençli bir toprak alt katmanı durumunda; yüzeysel tabakadaki akımların ortalama yolu; bu yastık kalınlığının on katı kadardır. Yüzeysel tabakada bu uzaklıktan akan akım toplam akımın yarısından fazla değildir. Bu tabakadaki gradyen, toprak alt katmanının sonsuz di-



Şekil 26. Yalıtımlı toprak alt katmanlı arazide silindirik elektrot.



$\gg 2=9\rho_1$

Şekil 27. r yarıçaplı bir topraklama elektrotunun etrafındaki gerilim:

- a) ρ_1 özgül dirençli homojen ortamda $\rho_2 = 9\rho_1$ özgül dirençli homojen ortamda
- c) $\rho_2 = 9\rho_1$ özgül dirençli toprak alt katmanı üzerinde kalınlığı $2r$ ve özgül direnci ρ_1 olan bir tabakada

rençli olduğunda bulunan gradyenin yarısına yada toprak alt katmanı ile aynı ρ_2 özgül dirençli homojen bir arazinin karşılığı olan gradyenin yarısına eşittir (Şekil 27).

Daha büyük uzaklıklarda; yüzeysel tabakanın akımın akışına katkısı giderek azalır. Bu durumda gerilim ve gradyenleri, araziye homojen ve ρ_2 özgül dirençli kabul ederek hesaplayabiliriz.

Topraklama elektrotunun boyutları yüzeysel iletken tabakanın kalınlığının yanında çok büyükse; tabaka kalınlığının direnç üzerinde etkisi yoktur. Tabaka yalnız, elektrotun çok yakınındaki gerilim ve gradyenleri biraz azaltır.

4. ÇOKLU TOPRAKLAMA ELEKTROTLARI

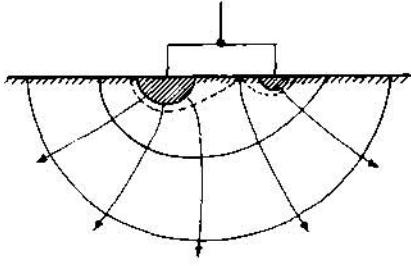
4.1. Homojen Toprakta Paralel Topraklama Elektrotları

4.1.1. Genel düşünceler

Topraklama elektrotlarının çok sayıda olması, kısmi elektrot akımlarının toprakta yayılmasını güçleştirir. Böylece elektrotların tek başına gösterdiği direnç artar (Şekil 28).

Akımların toprak içinde yayılmasının güçleşmesi merkezdeki elektrotlarda çevredekilere göre daha fazladır ve bu yüzden akım çevre elektrotlarına doğru yönelme eğilimindedir.

Elektrot sayısı az ve aralarındaki uzaklıklar boyutlarına göre büyükse bu etkiler önemsizdir. Ancak elektrot sayısı fazla yada birbirlerine yakınsa bu etkiler önem kazanır.



Şekil 28. Paralel iki elektrot arasında toprağın paylaşılması.

Boyutları verilmiş bir arazi parçasına belirli bir sayıdan sonra yeni elektrotların eklenmesinin pratikte direnç üzerinde fazla bir yararı olmaz.

Buna karşılık, yine de bu sınırın ötesinde elektrot sayısının artırılması, bunların herbirinin üzerinden geçecek akımları azaltır ve böylece yerel gerilim ve gradyenleri düşürür.

Elektrottan uzaklaşıldığında gradyen hızla düşer. Elektrotun çok yakınındaki gerilim ve gradyenler yalnız o elektrottan akan akıma bağlıdır ve daha uzaktaki elektrotlardan çok az etkilenir.

Sonuç olarak, üzerinden $i(A/m)$ akımı akan gömülü iletken tek başına ise; toprak ile iletken arasındaki gerilim ve maksimum gradyen hemen hemen aynıdır. Sözü edilen iletkenin bağlı olduğu gömülü devreler çok karmaşıksa iletkenle toprak arasındaki gerilim $0,60-0,80p_i$ ve maksimum gradyen $0,10-0,15p_i$ arasında değişir.

4.1.2. Hesaplama yöntemlerine toplu bir bakış

Çoklu elektrotların hesaplanmasında daha çok küre ve yarıküre topraklama elektrotları üzerine yapılan iki gözlem esas alınır.

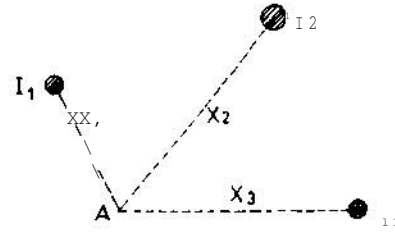
Önce elektrotların biçimindeki düzensizliklerden gelen etkilerin elektrottan uzaklaşıldıkça azaldığını hatırlayalım. Toprakta elektrotun X kadar uzağına aktarılan gerilim elektrottan akan akım I ise aşağıdaki gibidir:

$$U_x = \frac{\rho I}{2\pi T X}$$

Sonra; uzaklıkların yanında boyutları küçük olan elektrotların varlığı arazide yalnız zayıf homojensizlikler yaratır ve bu nedenle her bir elektrotun elektriksel alanı azalır. Homojen bir ortamda üzerlerinden I_1, I_2, \dots akımları geçen elektrotlardan X_1, X_2, \dots kadar uzaklıklarda bulunan bir noktanın bileşke gerilimi; her bir elektrotun yalnız başına bu noktada üreteceği gerilimlerin toplamına eşittir (Şekil 29):

$$U = \frac{\rho I_1}{2\pi X_1} + \frac{\rho I_2}{2\pi X_2} + \dots$$

Elektrotların ne biçimlerinin ne de boyutlarının rol aldığı bu formül, sözü edilen noktadan uzaktaki elektrotların tüm etkisini gözönüne almak için yeterlidir. Bu nokta elektrotlardan birine



Şekil 29. A noktasının elektrotlara göre durumu.

çok yakınsa; formüldeki bu elektrotta ait terim önceki bölümlerde verilen ve daha doğru olan bağıntılardan bulunmalıdır, diğer terimler aynı kalır.

Bu yöntem bize, çoklu yada karmaşık elektrotlar için yeter doğrulukta bir yaklaşım veriyor. Çubuk ve diğer düz doğru iletkenlerin hesaplanmasında da bu yöntemi hatırlamalıyız.

Yanıtlanması gereken soru; paralel elektrotlarda toplam akımın nasıl paylaşıldığıdır. Hesaplama şöyle yapılabilir: Önce elektrotlardan geçen akımlar için gelişigüzel I_1, I_2 , değerleri seçilir ve her elektrot yüzeyindeki bileşke gerilimleri bulunur, daha sonra bu gerilimler eşitlenerek I_1, I_2 , akımları hesaplanır. Ancak elektrot sayısı biraz fazla olursa bu hesaplama güçleşir.

Genelde; akımın elektrotlar arasında dirençleriyle ters orantılı paylaşıldığı varsayılırsa; global direnç üzerinde kabul edilebilir bir hata yapılmış olur. Yerel gradyenlerin hesabında daha doğru sonuçlar alabilmek için merkezdeki elektrotların zararına çevredeki elektrotların payını biraz artırmak yada gömülü bir iletken durumunda birim uzunluktan akan akımı sınır değerlerine doğru artırmak gerekir. Arazinin yapısı üzerindeki pratik veriler yeter doğrulukta değilse bu tür kararlamaına düzeltmelerin yapılması sa-kıncasızdır.

4.1.3. Ara bağlantısı olmayan iki elektrot

Örnek olarak çok basit durumu yani A ve B topraklama elektrotlarının birbirinden yeterince uzaklıkta olduklarını düşünelim. Bu durumda elektrotlar yarıçapları r_a, r_b ve aralarındaki açıklık D olan iki eşdeğer yarıküreye benzetilebilir. Referans noktasını sırayla A ve B üzerinde alarak aşağıdaki bağıntıları yazabiliriz (Şekil 30):

$$U_o = \frac{\rho}{2\pi T} \left(\frac{I_a}{r_a} + \frac{I_b}{D} \right)$$

$$U_o = \frac{\rho}{2\pi T} \left(\frac{I_a}{r_a} + \frac{I_b}{r_b} \right)$$

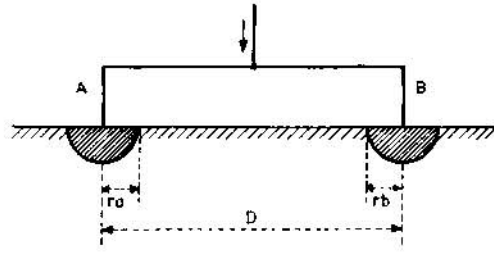
$$I = I_a + I_b$$

Bu bağıntılardan kolaylıkla I_a ve I_b akımlarını, sonradan da U_o/I global direncini bulabiliriz:

Özel durum olarak bu iki elektrot birbirinin ayrımsa;

$$I_a = I_b = \frac{I}{2} \text{ ve}$$

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



Şekil 30. Paralel iki yarıküre elektrot durumu.

Elektrotların birbirine yaklaşması durumunda direncin artma katsayısı r/D dir.

Komşu topraklama elektrotlarının birbirine bağlanması bölümünde (4.4) bu hesaplama tekrar doneceğiz.

4.1.4. Düzgün çokgenler oluşturan düşey çubuklar durumu

Elektrotların tek tek dirençlerindeki artma oranı aşağıya çıkarılmıştır:

Dirençlerin Artma Oranı	Çubuk Sayısı	Çubuklar Arası Uzaklığın Çubuk Uzunluğuna Oranı
% 15	2	1
"	3	2
"	6	4
% 50	6	1
"	13	2
"	40	4
% 100	10	1
"	28	2
"	100	4

Ara değerleri abaklara gerek duymadan bu çizelgeden yeter doğrulukta kolayca bulabiliriz. Çubukların dışındaki diğer elektrotlar için 4 m uzunluğundaki bir çubuğun kenarları 1 m olan bir levhaya yada yarıçapı 0,65 m olan bir yarıküreye eşdeğer olduğunu hatırlamak yeterlidir.

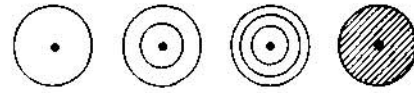
Diğer yandan 1 hektar alanı kaplayan levhanın direnci R ise, bu alana düzgün biçimde yayılmış 3 m uzunluğundaki 30 çubuğun direnci $3R$, 56 çubuğun direnci $2R$ ve 100 çubuğun direnci $1,5R$ dir. Görülüyor ki toplam uzunluğu 300 m olan çubuklarla arazi hemen hemen doymuştur.

Bu hesaplamalarda çubukların birbirlerine gömülü olmayan bağlantılarla birleştirildiği varsayılmıştır. Birçok ülkede küçük çaplı çubuklar toprağa havali çekiçlerle çakılarak delme ve kazı işleri en aza indirilebilmektedir.

Bağlantılar toprağa gömülse bunların uzunluğu çubuklarının çok aşacağından çubukların bir bölümünün kullanılmasına gerek kalmadan arazi doymaya girebilir.

4.1.5. Yatay halkalar ve şebeke gözleri oluşturan iletkenler

Çapı 80 m olan bir araziye 1 cm çaplı iletken



Şekil 31. Aynı merkezli halkalar ve dolu plaka.

oluşan aynı merkezli 1,2 yada 3 lü halkalar düzgünce yerleştirildiğinde doğacak iletkenlik ve yerel gradyenleri karşılaştıracaktır (Şekil 31).

Çevredeki halkadan merkezdeki halkaya doğru; metresinden akan akımla orantılı halkaların yakınındaki gradyenler tek tek çıkarılmıştır:

Halka Sayısı	Gömülü Uzunluk (%)	İletkenlik (%)	Yerel Gradyenler (%)
1	100	100	100
2	150	123	70
3	200	135	56
Dolu Plaka	-	148	-

Görülüyor ki iki halkalı bir elektrot, direnç yönünden araziye doyurmaya hemen hemen yetiyor.

Diğer yandan gömülü uzunlukların ortması gradyenler yönünden bu uzunluklarla orantılı bir kazanç sağlıyor. Birim uzunluktan akan akımların çevrede merkezden daha büyük olduğu gösterilebilir. Ancak bu durum fazla abartılmamalıdır. Üç halkalı durumda; düzgün bir bölüşüm % 50'lik bir uniform gradyen verir. Çevredeki halkanın en üst gradyeni ise % 56 dolayındadır. Görülüyor ki ikisi arasındaki fark öyle çok fazla değildir.

Belirli bir direncin elde edilmesi seyrek yerleştirilmiş çubuklardan çok kesiksiz iletkenlerin uzunluğuna bağlıdır. Ancak birim uzunluktaki maliyetler farklı olacağından her durum için bir ekonomiklik incelemesinin yapılması gerekir.

Gömülü iletkenlerinin uzunluğu çok büyük değerlere ulaşan büyük merkezlerdeki topraklama sistemleri durumu 5. bölümün başında incelenecektir.

4.2. Homojen Olmayan Bir Toprak Alt Katmanı üzerindeki Çoklu Topraklama Elektrotları

a. Arazinin yüzeysel tabakasına yerleştirilmiş birbirine yakın elektrotlarda toprak alt katmanı yüzeyden daha iletkense birbirlerinin alanlarını bozucu yöndeki etkileri azdır. Akım ağlarının birbirini bozucu yönde etkilemesi özellikle daha iletken olan toprak alt katmanı içindeki akım yolunda görülür. Bunun da direnç üzerindeki etkisi azdır.

Yine de eğer elektrotlar toprak alt katmanında derine iniyorsa; yüzeysel tabaka yok sayılabilir. Bu durumda bozulma hemen hemen homojen toprağınki ile aynıdır.

b. Diğer yandan toprak alt katmanı yüzeyden daha dirençli ise; akımın derine yayılması güçleşir ve bunun etkileri elektrotun çok uzaklarında da görülür.

Toprak alt katmanının tam bir yalıtkan olduğu uç durumunda; herhangi iki nokta arasındaki gerilim

farkı elektrotların tek tek etkilerinin toplanmasıyla bulunur.

$$U - U' = 0,366 \rho_1 \left(i_1 \log \frac{x_1}{r} + i_2 \log \frac{x_2}{r} + \dots \right)$$

Burada x_1, x_2, \dots ve x_j, x_j, \dots iki noktanın elektrotlara olan uzaklıklarını, i_j, I_2, \dots ise iletken tabakanın birim uzunluğundan akan akımları gösteriyor.

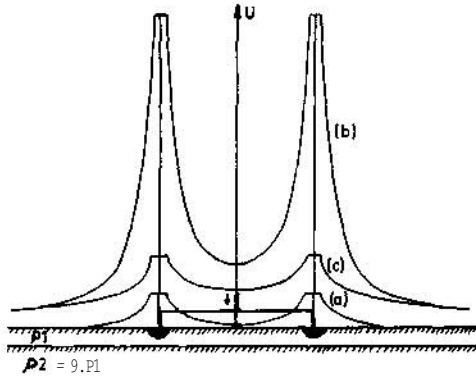
Toplam akımın paralel elektrotlar arasındaki dağılımını bulmak için farklı iki elektrot yüzeyinde iki referans noktası alınır ve bunlara karşılık olan denklemlerin sol tarafları sıfıra eşitlenir.

Bu denklem toprak alt katmanı özgül direncinin sonsuz olmadığı durumlara da uygulanabilir, yalnız elektrotlar birbirinden çok fazla uzakta olmasın. Bu durumda yerel gerilim farkları tüm arazide, toprak alt katmanının özgül direncinin yüksek olduğu durumdakinden daha düşüktür. Bu yerel gerilim farkları daha çok yüzeyin özgül direncine bağlıdır. Öte yandan topraklama elektrotlarının kapladığı alanın global gerilimi de daha çok toprak alt katmanının özgül direncine bağlıdır (Şekil 32).

Granit nitelikli toprak katmanının bulunduğu bölgeden geçen ve birkaç yüz metre aralıklarla topraklanmış kırsal bir AG şebekesinde nötr iletkeninden akan akımın beslenen bölgenin tümünü şebeke gerilimine yakın bir gerilime yükselttiği görülmüştür.

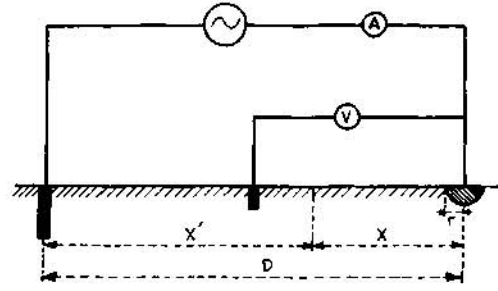
4.3. Dönüş Akımını Taşıyan Topraklama Elektrotlarının Birbirine Yakınlığının Etkisi; Bunun Elektrot Dirençlerinin Ölçümüne Uygulanması

Şimdiye kadar çoklu elektrotların yakınındaki toprak geriliminin hesaplanması için verilen genel formüller (homojen topraklı yada toprak alt katmanının yalıtkan olduğu durumlar için); elektrotlardan bir yada birkaçının akımın dönüş yol-



Şekil 32. Yarıçapı r ve aralarındaki uzaklık $20r$ olan paralel iki elektrotun etrafındaki gerilimler:

- ρ_1 özgül direnci i homojen ortamda
- $P_2 = 9\rho_1$ özgül dirençli homojen ortamda
- $P_2 = 9\rho_1$ özgül dirençli toprak alt katmanı üzerinde, kalınlığı $2r$ ve özgül direnci ρ_1 olan bir tabakada



Şekil 33. Bir topraklama elektrotunun direncinin ölçülmesi.

lan olarak rol aldığı durumlara da uygulanabilir. Yalnız elektrotlardan akan akımların işaretini değiştirmek gerekir.

Araları fazla açık olmayan dönüş akımı elektrotları durumuna daha çok, topraklama dirençlerinin ölçümünde; yardımcı elektrotların uzaklığının incelenen toprağın boyutları yanında büyük değilen raslanır. Ölçümde bundan doğacak hata büyük olabilir.

Homojen arazide dönüş akımı elektrotunun, direnci ölçülecek elektrottan D kadar uzakta olduğunu düşünelim (Şekil 33). İki topraklama elektrotunun X ve X' kadar uzağındaki bir noktanın gerilimi, elektrotların biçimindeki düzensizliklerin etkisi bu noktaya kadar ulaşmadığı varsayılırsa şöyle olacaktır:

$$ü = \frac{\rho I}{2\pi r X} - \frac{\rho I}{2\pi X'} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{X'} \right)$$

$X = X'$ olduğunda gerilim sıfırdır. Gerilimin ölçülebilmesi için, elektrotların boyutları ne olursa olsun iki elektrotun merkezinden eşit uzaklıktaki bir noktaya ek bir gerilim elektrotunun yerleştirilmesi gerekir.

Ölçümü yapılacak elektrotun, yarıçapı r olan bir yarıküre elektrota eşdeğer olduğunu varsayalım. Elektrotun gerilimini yukarıdaki bağıntıdan, referans noktasını elektrot yüzeyinde alarak çıkarabiliriz:

$$U_0 = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{D} \right)$$

Gerilim elektrotunun sıfır gerilimli bir noktaya bağlandığını varsaydıysak; ölçümün göstereceği bu U_0 gerilimidir. Buradan topraklama elektrotunun direncini çıkarabiliriz:

$$R' = \frac{\rho}{2\pi r} \left(1 - \frac{r}{D} \right)$$

Halbuki dönüş elektrotu sonsuz uzaklıkta olduğunda; elektrot direncinin kuramsal değeri şöyleydi:

$$R = \frac{\rho}{2\pi r}$$

Bu durumda; dönüş elektrotunun yakınlığından gelen görece hata r/D dir. Dönüş elektrotunun topraklama elektrotlarına olan uzaklığı, ölçümü yapılan toprağın eşdeğer yarıçapının on katıysa;

hata % 10, dört katıysa % 25 olacaktır. Çok yüksek bir doğruluk istenmiyorsa; levha yada orta uzunluktaki çubuk elektrotlarının direncini ölçmek için uzaklığın 10 ile 30 metre arasında alınması yeterlidir.

Diğer yandan 200 x 200 m boyutundaki bir merkezde (ki bu yarıçapı 75 m olan bir yarıküreye eşdeğerdir); hatanın 7.25'i aşmaması için dönüş akımı elektrotunun, merkezden en az 300 m uzağa yerleştirilmesi gerekir.

Gerilim elektrotu hiçbir zaman sıfır gerilimli bir noktaya tam olarak yerleştirilemeyeceğinden bu durumdan doğacak hata da yukardakinin üzerine eklenir. Ayrıca hesaplamalarda toprak homojen kabul edilmiştir. Eğer değilse, özellikle gömülü kanalların yardımcı elektrotların yakınından geçtiği durumlarda çok büyük hatalarla karşılaşılabilir.

Toprak alt katmanının çok dirençli olduğu arazilerde akımın etkileri daha da uzağa yayılır. Bu durumda ölçmenin doğru olabilmesi için elektrotların birbirinden daha çok ayrılması gerekir.

Yine belirtelim, direncin değerinin doğru olması platonik bir ilgiden kaynaklanıyor. Güvenlik yönünden önemli olan; birinin dururken topraklama elektrotlarına bağlı yapılara dokunduğunda yani farklı noktalar arasında tehlikeli bir gerilimin olup olmamasıdır.

4.4. Birbirine Yakın Elektrotlar Arasındaki Kuplaj Etkisi

B gibi bir arazi parçasıyla buna yakın ve üzerinden akım geçtiğinde gerilimi U_0 a yükselen bir topraklama elektrotunu düşünelim. B toprak parçasının kendisi de U_0 in bir bölümüne eşit olan bir U gerilimine yükselecektir. U/U_0 oranına B nin A ile olan "kuplaj katsayısı" denir.

B biriminin küçük ve A elektrotunun r_a yarıçaplı yarıküreye eşdeğerinin merkezinden D kadar uzakta olduğu durumda B nin A ile olan kuplaj katsayısı homojen arazide şöyledir:

$$k_{ba} = \frac{r_a}{D}$$

B de bir topraklama elektrotuysa (Şekil 30) benzer biçimde A nin B ile olan bir kuplaj katsayısı tanımlanabilir. Katsayı B nin geriliminin bir bölümüne eşit olacaktır. Çünkü B üzerinden akan akım A yi de bir gerilime yükseltecektir. Eğer B elektrotu $r^$ yarıçaplı bir yarıküreye eşdeğerse A um B ile olan kuplaj katsayısı,

$$k_{ab} = \frac{r_b}{D} \text{ olacaktır.}$$

Sonunda elektrotların, A yada B elektrotlarından biri edilgin (yada akımı üzerinden akıtan diğer elektrotla paralel) iken aldıkları gerilimlerinin oranı yani yeni K katsayısı ile uğraşmak gerekebilir.

Paralel iki elektrotun toplam direncinin nasıl hesaplanacağı 4.1 bölümünde anlaşılmıştı. Yeni K katsayısı buradan kolaylıkla çıkarılabilir. Ayrıca A ve B için bu değer aynı olduğuna kanıtlanabilir.

Sorunun daha genelde ele alınması yararlı olacaktır. Bunun için A ve B gibi iki topraklama elektrotu ile bir dönüş akımı elektrotundan (burada uzaktaki bir topraktan oluşuyor) oluşan üç terminali edilgin (pasif) bir sistemi düşünelim. Böyle bir sistemin terminalleri arasındaki ilişkiler, ne kadar karmaşık olursa olsun yalnız iç değişkenlerle eksiksiz tanımlanabilir. Örneğin bunun için bir Y devresinin üç terminalini oluşturmuş R_a , R_b ve R_0 dirençlerini düşünelim (Şekil 34).

$R_0 + R_a$ yokken A dan akan akıma gösterilen toplam direnç,

$R_0 + R_b$ yokken B den akan akıma gösterilen toplam direnç,

R_0 ise bu dirençlerin ortak parçasıdır ve terminallerden birinden akım akarken diğerinde doğan gerilimi belirler.

Eğer topraklama elektrotları yerine yarıküreye eşdeğerlerini düşünürsek;

$$R_0 + R_a = \frac{\rho}{2\pi r_a}$$

$$R_0 + R_b = \frac{\rho}{2\pi r_b} \text{ ve}$$

$$R_0 = \frac{\rho}{2\pi D} \text{ olur.}$$

Yukarıda tanımlanan kuplaj katsayılarını dirençlerin işlevi olarak en genel biçimiyle şöyle verebiliriz:

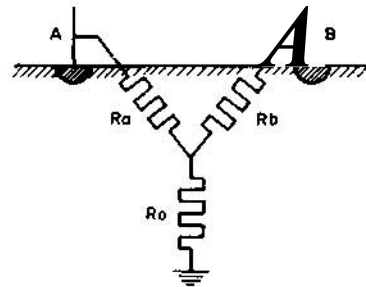
$$k_{ba} = \frac{R_0}{R_0 + R_a}$$

$$k_{ab} = \frac{R_0}{R_0 + R_b}$$

$$K = \frac{R_0}{R_0 + \frac{R_a R_b}{R_a + R_b}}$$

Bu üç katsayının birbiriyle olan bağıntısı da şöyledir:

$$K = \frac{k_{Da} + k_{ab} - 2V_a^k}{1 - k_{ab}}$$



Şekil 34. Birbirine bağlı iki topraklama elektrotunun eşdeğer şeması.

Eğer k_a ve k_b kuplaj katsayıları küçük yani elektrotlara olan uzaklık eşdeğer yarıküre elektrotlarının çaplarına göre büyükse bağıntı aşağıdaki biçimi alır:

$$K = k_{ba} + k_{ab} = \frac{r_a + r_b}{D}$$

Bu bağıntılardan homojen araziler için geçerli olan ilkeleri hemen çıkarabiliriz:

Bir edilgin elektrotun geriliminin etkin (aktif) elektrotun geriliminin % 10 undan az olması için; iki elektrot arasındaki açıklığın en az etkin elektrotun yarıçapının on katı olması gerekir. Eğer bir edilgin elektrotun geriliminin, etkin elektrotla paralel olduğunda doğan gerilimin % 10 undan az olması isteniyorsa; elektrotlar arasındaki açıklık elektrotların eşdeğer yarıçaplarının toplamının en az on katı olmalıdır.

Yüzeysel tabakadan daha iletken bir toprak alt katmanı kuplaj etkisini azaltır, daha dirençli toprak alt katmanı ise bu etkiyi artırır.

Topraklama elektrotlarından birinin boyutları çok büyükse, düşük kuplaj değerleri elde etmek pratik olarak olanaksızdır. Bu nokta, daha ilerdeki büyük merkezlerde topraklama düzenlemeleri bölümünde yine ele alınacaktır.

4.5. Topraklamaların Birbirine Bağlanması ve Yararları ve Sınırlamalar

Bir tesiste tüm güvenlik topraklamalarının birbirine bağlanması daima arzu edilir. Minimum maliyette en düşük direnci veren bir topraklamanın elde edilmesinin en iyi yöntemi budur. Ayrıca bu, tesis içindeki gerilim farklarının en aza indirilmesini sağlayan da bir yöntemdir.

Topraklamaların birbirine bağlanması en az inceleme ve düşünmeyi gerektirdiği için en kolay çözümdür. Daha önce de belirttiğimiz gibi topraklamaların etkin biçimde birbirinden ayrılması oldukça güçtür. Karmaşık tesislerde büyük gerilim farklarının doğmasına yol açan olaylara karşı hazırlıklı olunması çoğunlukla zordur. Çünkü bu tesislerde farklı ekipler eldeki bir yerleşme planına göre çalışmadığından toprak alt katmanı iletken kanallar tarafından çapraz biçimde kesilir.

Benzer düşünceler sistem (yada işletme) topraklamaları için de geçerli olmasına karşın, tesisin sınırlarını oluşturan alçak yada yüksek gerilimli devrelerin nötrü noktaları için verilecek yanıt yine de yeterince açık değildir.

a. Merkezi terkeden bir yüksek gerilim devresinin bulunduğu durum: Hattaki her toprak arızası bir akımın akmasına yolaçar. Bu akımın hiç değilse bir bölümü yerel nötr noktası üzerinden tekrar sisteme döner ve nötrün gerilimini yükseltir. Eğer güvenlik topraklaması nötr topraklanmış gibi kullanılıyorsa merkezin topraklanmış tüm gövde ve yapıları bu gerilime yükselir. Ulaşılmayacak bir noktaya yerleştirilmiş ayrı bir nötrü topraklaması ilke olarak personel için doğacak terslikleri önler (Şekil 35a ve c).

Ancak buna şu yönden itiraz edilebilir. Yüksek

gerilimli şebekelerin nötrünün topraklandığı merkezler genellikle büyük merkezlerdir. Bu merkezlerde gövdelerin topraklaması aşırı gerilim gradyanlarına yol açmadan üzerinden çok büyük akımları geçirecek biçimde iyi yapılıp ve topraklamaların birbirinden etkin biçimde ayrılmasını sağlamak oldukça güç bir iştir. Yazının başında da görmüştük; bu sistemlerde güvenlik birincil olarak çok hızlı çalışan devre kesicileriyle sağlanır ve topraktaki gerilimlerin sınırlandırılması-na gidilmez.

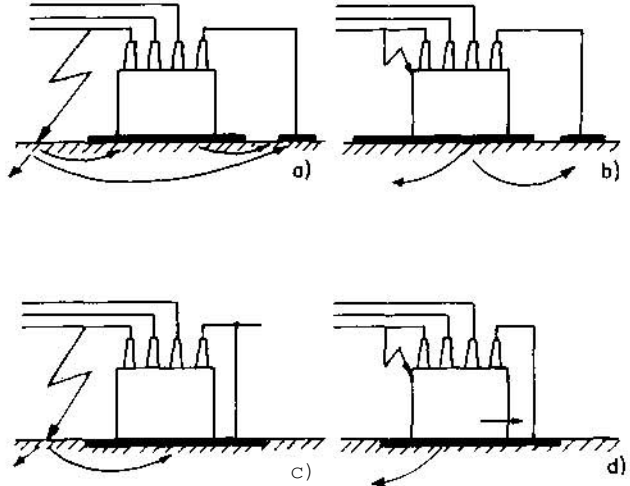
Öte yandan arıza hatta değil tesisin içindeyse; topraklamaların ayrılmış olması gövde topraklamalarını arıza akımının tümünü üzerlerinden geçirmeye zorlar. Halbuki topraklamalar arası bağlantı; devresini yerel nötr noktası üzerinden tamamlayan akımın bir bölümüne metalik bir yol sağlar (Şekil 35b ve d). Bu durumda; toprağın dar bir alanı içinde topraktan toprağa çok büyük akımların dolaşması çeşitli tehlikelere yol açabilir.

Yüksek gerilimde nötr noktası topraklamalarının birbirinden ayrılması ancak istisnai durumlarda düşünülebilir.

Bu durumda gömülü kablolar ve kanalların yolu ile elektrotların konumlarının derinliğine incelenmesi gerekir.

b. Merkezin dışına uzanan alçak gerilimli devrelerin nötrü noktaları durumunda sorun tesisdeki malzeme ve personelin korunması değildir. Sorun uzaktaki müşterileri gövde topraklamasında doğacak beklenmedik gerilim yükselmelerine karşı korumaktır. Örneğin bu topraklamaya bağlı alçak gerilim havai hatlarının gerilimleri, yerel gerilimi çok farklı bölgelere yayması gibi.

Alçak gerilimde nötr topraklamalarının genellikle çok iyi olduğu ve gövde topraklamalarından çok küçük arıza akımlarının aktığı düşüncesiyle bu ayırmaya karşı çıkılabilir. Yine merkezde gövde-



Şekil 35. a) Topraklamalar ayrı , arıza hatta
b) Topraklamalar ayrı , arıza merkezde
c) Topraklamalar birleştirilmiş , arıza hatta
d) Topraklamalar birleştirilmiş , arıza merkezde

lerle yapılar arasında doğan gerilimlerin (ki bunlardan alçak gerilimli devrenin korunması gerekir) yüksek olması personel için tehlike yaratacak atlamalara yol açabilir. Nesnelere arasında güçlü bir bağlantıyı gerçekleştiren bu atlamaların önüne geçilmesi gerekir.

Tüm bu tartışmalar her özel durum için önyargısız biçimde değerlendirilmelidir. Yine de bazı küçük alt merkezlerde (substation) zayıf topraklamaların bulunabileceği gözden uzak tutulmamalıdır. Oralarda alçak gerilimli topraklamanın ayrılması çoğunlukla savunulan bir olgudur.

5. BAZI ÖZEL SORUNLARIN GÖZDEN GEÇİRİLMESİ

5.1. Büyük Merkezlerde Toprak Direnci ve Gerilim Gradyenleri

Büyük merkezlerde gövdeler, yapılar, mesnetler, çelik kafesler vb., arasındaki zorunlu bağlantıların gerçekleştirilmesi için gömülmesi gereken iletkenlerin uzunluğu öylesine büyüktür ki, toprağın pratik olarak doyduğu ve direnç yönünden dolu bir levhaya eşdeğer olduğu düşünülebilir.

5.1.1. Homojen bir arazi durumu

Ortalama yarıçapı r ve gömülü iletkenlerinin uzunluğu L olan bir alt merkez homojen bir araziye kurulmuşsa, bu merkezin direnci aşağıdaki bağlantıyla yaklaşık olarak bulunabilir (Şekil 36):

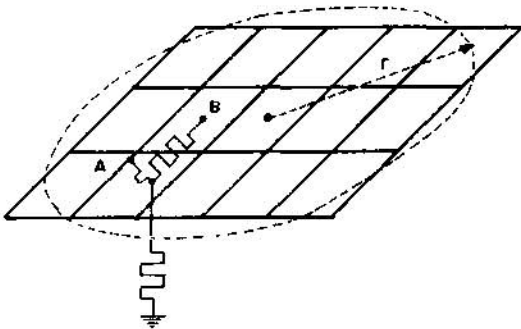
$$R = 4r + \frac{\rho}{L}$$

Yada daha basit olarak

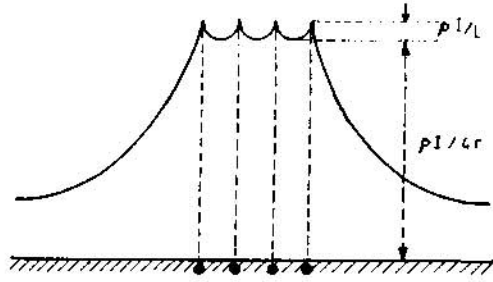
$$R = \frac{2P}{\text{çevre}} \text{ dir.}$$

Homojen arazideki büyük bir merkezin topraklama devrelerinin direnci tonrığı özgül direncinin tesisin yarı çevresine oranından çok az farklıdır.

Birinci direnç (R) bağlantısının ilk terim r yarıçaplı yüzeysel bir levhanın direncine eşdeğerdir. Genellikle çok daha küçük olan ikinci terim



Şekil 36. Büyük bir merkezin topraklama devrelerinin (A) plaka eşdeğeri ve B noktasına yerleştirilmiş küçük bir elektrotla ilişkisi.



Şekil 37. Büyük bir merkezin topraklama devrelerinin yakınındaki gerilim.

levhaya göre gerçek topraktan sapmayı gösterir. Buna karşılık olan $\rho I/L$ gerilimi iletkenin metresinden akan ortalama akımla orantılıdır ve gömülü iletkenlerle az yada çok düzgün ağların bulunduğu merkezi alan arasındaki gerilim düşümünü gösterir (Şekil 37).

Bu durumda ağ örgüsünün ortasındaki toprak ile topraklama devrelerine bağlı yapılar arasındaki gerilim farkı ρI düzeyinde olacaktır.

Gömülü iletkenlerin yakınında adım gerilimi yaklaşık 0,10 ile 0,15 ρI dolayındadır. Bu değer çevreye doğru biraz artar, merkeze doğru da biraz azalır.

Ağ örgüsünün boyutlarını gözönüne almayan bu kaba bağlantılardan büyüklüklerin düzeyi dışında bir şey istenemez. Ancak bağlantıların verdiği yaklaşıklık da yararsız değildir.

Özgüldirenci 200 Ohm.m olan bir araziye kurulmuş 250 x 150 m boyutundaki bir merkezi düşünelim. Ayrıca bu merkezde gömülü iletkenlerin uzunluğu 4000 m ve arıza anında toprağa akan akım 4000 A'dır.

Bu durumda topraklama devrelerinin direnci,

$$R = \frac{200}{250 + 150} = 0,5 \text{ Ohm düzeyinde olacaktır.}$$

Arıza anında akan 4000 A'lık akım merkezin topraklama devrelerini uzaktaki toprağa göre yaklaşık 2000 V'a yükseltecektir.

Gömülü uzunluğun bir işlevi olan direnç parçası yaklaşık,

$$\frac{\rho}{L} = \frac{200}{4000} = 0,05 \text{ Ohm olacaktır.}$$

Merkezdeki yerel gerilim farkları yaklaşık olarak

$$V_i = \frac{\rho I}{L} = 200 \text{ V'a ulaşabilecektir.}$$

Gömülü iletkenlerin yakınındaki adım gradyanları da yaklaşık

$$0,15 \rho I = 30 \text{ V olacaktır.}$$

Kaba olmasına karşın bu hesaplama bize topraklama devreleriyle kaplı bir alanda doğacak toprak arızalarında görülebilecek gerilimler yönünden çok büyük merkezlerin genelde ne kadar elverişli olduğunu gösteriyor (adım gerilimi oldukça düşük).

5.1.2. Toprak alt katmanının yüzeyden daha iletken olması durumu

Toprak alt katmanı özgül direncinin (P2) topraklama devrelerinin gömülü olduğu yüzeyel tabakanın özgül direncinden (p1) daha küçük olduğunu varsayalım.

Direnç bağıntısında levha etkisine karşılık olan terime P2 ve iletkenlerin yakınındaki yerel gerilim düşümlerine karşılık olan terime de P1 sokulmalıdır. 0 zaman bağıntı aşağıdaki biçimi alır:

$$R = \frac{P_2}{A_r} + \frac{P_1}{L}$$

Önceki sayısal örnekte; eğer yazın toprağın kuruluğu p1 i 200 den 1000 Ohm.m ye yükseltirse, ikinci terim 0,05 den 0,25 Ohm'a çıkacak ve toplam direnç ancak 0,67 den 0,87 Ohm'a yükselecektir.

Geniş bir alanı kaplayan merkezlerin topraklamalarında genel olarak mevsimlik değişimler azdır.

Toprağın kurumasıyla yüzeydeki gradyanlar dirençten daha fazla artar. Ancak ayaklarla temas durumundaki toprağın çok büyük bir özgül dirence sahip olması personel için kendiliğinden bir koruma sağlar.

Dirençli tabakanın kalınlığını gözönüne almadığı için yukardaki formülün ilkel biçimi eleştirilebilir. Bu formülde kalınlığın en çok ağ örgüleri boyutunun yaklaşık yarısı olduğu kabaca varsayılmıştır. Ancak 20 000 m²lik bir merkezde; 1000 Ohm.m özgül dirençli toprağın kalınlığı 10 m artırılsa bundan gelecek direncin 0,5 Ohm kadar olacağı kolaylıkla görülebilir. Ayrıca toprağın farklı derinliklerindeki özgül direnç ölçmelerinde de bağıntı özel durumlara kolayca uydurulabilir. Bağıntı yalnızca bir klavuz olarak verilmiştir ve her özel durum için minimum bir sonuç alınması gereksinimini karşılar.

Benzer düşünceler göstermiştir ki; toprak alt katmanı yüzeyden daha iletken olsa bile, büyük merkezlerin topraklama devrelerine derin topraklama çukurlarının ilave edilmesi genellikle yararlıdır. Eğer merkezin kendi topraklama devrelerinin sağladığından daha fazla bir etkinliğin olması istenirse topraklama çukurlarının toplam uzunluğunun çok büyük olması gerekir.

Yine de bu sonuçlar yalnız büyük merkezlere uygulanabilir ve bunların dar bir alana yerleştirilmiş altmerkezlere uygulanabileceğini düşünmek yanlıştır.

5.1.3. Toprak alt katmanının çok dirençli olması durumu

Toprak alt katmanının özgül direnci (P2) yüzeyel tabakanın özgül direncine (p1) göre çok büyükse; levha etkisine karşılık olan p1/4r terimi çok büyüktür. Buna karşılık gömülü iletkenlerin yakınındaki yerel gerilim düşümlerine karşılık olan P1/L terimi görece olarak daha çok ihmal edilebilir değere düşer.

Yine de bu yere] gerilim düşümleri hemen hemen arazinin homojen ve P2 özgül dirençli olduğundaki değerlerle aynıdır. Bu durumda direnç yalnız p2 özgül direncine bağlıdır.

Bu gibi durumlarda derin kuyu açma yada delme işlemlerine girişmek yararsızdır. Merkezi kaplayan toprağı doyurmak için gömülü bağlantılar yeterli büyüklükte ve dirençteki önemli bir azalma ancak ve ancak topraklama devrelerinin kapladığı bölgenin yüzeyel boyutlarının fazlaca artırılmasıyla elde edilebilir.

Yaklaşık kare biçiminde ve toprak alt katmanı özgül direnci 1000 Ohm.m olan bir merkezin direnci kapladığı alan 10 000 m² ise 4 Ohm, alan 20 000 m² ise 3 Ohm dolayında olacaktır.

5.2. Büyük Merkezlerin Topraklama Elektrotları Arasındaki Kuplajlar

Büyük bir merkezde topraklama şebekesinin direncinin 2p2/P düzeyinde olduğunu gördük. Burada P tesisin çevresini, p2 de toprak alt katmanının özgül direncini gösteriyor. Öte yandan bu direncin topraklama devreleriyle ağ örgüsü merkezinin arasındaki gerilim düşümüne karşılık olan bölümü p1/L dir. Burada da L gömülü iletkenlerin toplam uzunluğunu, p1 yüzeyel tabakanın özgül direncini gösteriyor.

Sonuç olarak ağ örgüsünün ortasına yerleştirilmiş bağımsız küçük bir B topraklama elektrotunun A gövde topraklamasına göre kuplaj etkisi şöyledir (Şekil 36):

$$f_{BA}^* = 1 - \frac{p_1/L}{2p_2/P}$$

Toprak homojense bu etki;

$$k_{BA} = \frac{P}{-JC} \text{ olur.}$$

Küçük B elektrotunun A ile paralel olması, A topraklamasının direncini fazla değiştirmez. Bu kat sayı ayrıca, elektrotlardan birinin etkin elektrottan ayrı yada ona bağlı oluşuna göre üzerine aldığı gerilimlerin oranını gösterir.

Yarıçevresi 400 m, gömülü iletkenlerinin uzunluğu 4000 m ve arazisi homojen olan bir merkezde kuplaj katsayısı % 90 dolayındadır. Elektrotların birbirinden ayrılması etkin olmayan elektrot üzerindeki gerilimi yalnız % 10 düşürür.

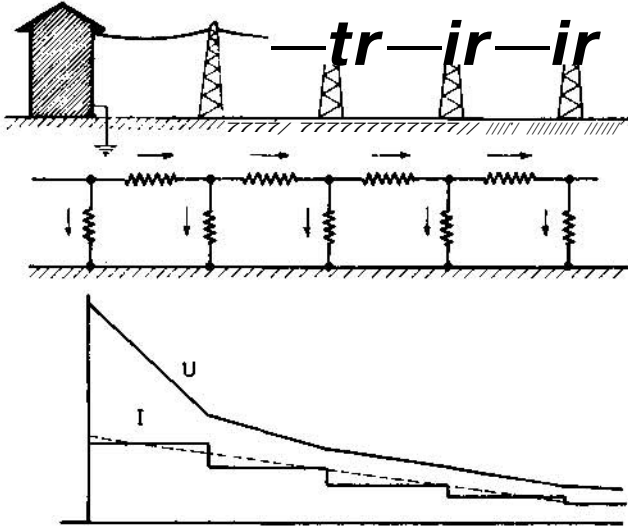
Toprak alt katmanının yüzeyel tabakadan daha iletken olduğu durumda; kuplaj katsayısı azalır, ancak önemini korumaya devam eder.

Yukardaki hesaplamalar kaba bir değer verir, ancak pratikte doğruluğu kanıtlanmıştır. Çok büyük alana yayılmış merkezlerin topraklamaları arasındaki kuplaj etkisi çoğunlukla Z 50 ile % 100 arasındadır.

Kuplaj etkilerini azaltmak için, elektrotların topraklama devrelerinin kapladığı alanın dışına çıkarılması gerekir.

5.3. Hatların Toprak Tellerinden Toprak Akımlarının Akması

Birçok noktada topraklanmış toprak teli, belirli bir boyuna empedans (Z1) ve enine kondüktansa (I/R2) sahip bir iletken gibi davranır. Eğer toprak teli yeterince uzunsa hesaplar şunu gösteriyor.* Tel kaynak karşısında uzunluğundan bağımsız



Şekil 38. Bir toprak telinden toprak akımının akışı.

eşdeğer bir empedansa sahiptir.

$$z = \sqrt{Z_1 \cdot R_2}$$

Genellikle hatlarda kullanılan 70 mm²lik çelik toprak telinin boyuna empedansı kilometre başına 4 Ohm'dur. Bu toprak telinin her kilometresinde herbiri 30 Ohm'luk üç topraklama bağlantısının yapıldığını düşünelim. Telin kilometresinin enine direnci (R₂) 10 Ohm olacak ve kaynaktan bakıldığında telin 6,3 Ohm'luk bir empedansın olduğu görülecektir. Bu empedans hafifçe endüktiftir ve eğer toprak teli merkezin çelik yapısına bağlanırsa; merkezin kendi topraklama direnciyle paralel olarak çalışır.

Bir merkezde hatlar merkezin çelik konstrüksiyonuna bağlı toprak iletkenleri ile donatılırsa; hatların kondüktansları aritmetik olarak toplanabilir.

Yukardaki hesaplamada bulunan toprak telinin eşdeğer empedansı 1500 m'lik telin boyuna empedansı kadardır. Buradan şu sonuç çıkarılabilir; akımlar çok dirençli toprak tellerinde uzağa gitmiyor ve hızla toprağa akıyorlar (Şekil 38).

5.4. Toprak Akımlarının Gömülü Kablolar Üzerinden Boşalması

Büyük kesitli bir kablunun kılıfı (zırhı) merkezin gövde topraklamasına bağlanmış ve kablo merkezin topraklama alanını terkediyorsa, bu kılıf mükemmel bir topraklama elektrotu gibi davranır ve toprağa akan akımların önemli bir bölümünü üzerinden geçirir.

Böyle bir akım yolunun merkezden görülen empedansının bulunmasında (hattın boyuna empedansı ve enine kondüktansı bulunarak) toprak telinin hesabındaki gibi bir yol izlenebilir. Bu hesaplama yöntemi çok sağlıklıdır, çünkü ne boyuna empedans (ki bu gömülü kablodan hatlara olan uzaklığın bir işlevidir) ne de enine direnç (bu da toprağın özgül direncine, temasların niteliğine ve kılıfın yararlı eşdeğer uzunluğuna bağlıdır) doğru biliniyor. Yine de büyüklük düzeyi yeterli ol-

duğundan boyuna empedans için 0,5 Ohm/km, enine direnç için de ρ Ohm.m yani 0,004D Ohm.km alınabilir. Boyuna direnç kılıfın kesitinden ve toprağın özgül direncinden kolayca bulunabilir.

Böylece kılıfın kesicine ve toprağın niteliğine bağlı olarak bulunan bileşke empedans genellikle bir Ohm'un altında yada birkaç Ohm dolayındadır. Arızaların sistemde kalış süresi çoğunlukla öylesine kısadır ki arıza akımının kurşunu ısıtması gibi bir sorun olamaz. Kritik durumlarda belirli bir uzunluktan sonra kılıf birleştirme kutularına bağlı çıplak bir bakır iletkenle ikinci bir dönüş yolu sağlanarak pekiştirilebilir.

Eğer kablo yeterince uzunsa kılıf üzerindeki gerilim, boyuna gerilim düşümleri sonucunda merkezden başlayarak uzaktaki toprak gerilimine ulaşmaya kadar yavaş yavaş azalır. Endüktif gerilim düşümleri de kılıfla manyetik kuplajı mükemmel olan kablo iç iletkenlerine tümüyle yansır. Sonuç olarak eğer iç iletkenlerin bir ucu merkezin gövde topraklamasına bağlıysa ki kablunun öbür ucu yerel gerilime yakın bir gerilime ulaşacaktır, boyuna ohmik gerilim düşümleri endüktif düşümlerin yanında yok sayılabilir.

Kablo iç iletkenleri geriliminin geçtiği arazi- nin yerel gerilimlerine kendiliğinden uyması özellikle telefon kabloları için ilginçtir. Uygun yöntemlerle kılıf direnci reaktansa göre düşük tutulmalıdır.

Kablo kılıfları bir yana, merkezi terkedilen tüm metal kanallar da toprak akımlarının boşalmasına yardımcı olur. Özellikle metal kanalların sürekliliğinin sağlanamaması kazaların ve tehlikelerin doğmasına yol açabilir. Yine de bu kanallar düzgün yerleştirilmişse yararlı olur. Üzerinde fazla durulmadan yalnız şu söylenebilir: Genellikle akımları iletken bağlantıları artırarak yönlendirmek, uzaklık yada engellerle (*barrier*) ki bunların yalıtkanlık değeri çoğunlukla kuskulu ve yetersizdir, akımların yolunu denetlemeye çalışmaktan daha kolay ve güvenilirdir.

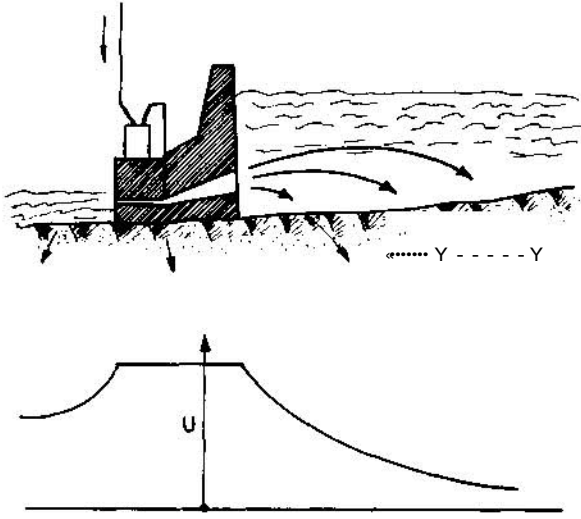
5.5. Geniş Bir Su Tabakası Üzerinden Toprak Akımlarının Boşalması

Çok dirençli arazilerde kalınlığı büyük ve iletkenliği iyi olan faylar ile yerüstü yada yeraltındaki geniş su tabakaları, toprak akımları için boşalma yada akaçlama (*drenaj*) kanalları rolünü oynar.

Granit arazi üzerine kurulmuş barajların salt merkezlerinin durumu özellikle ilgi çekicidir. Bunlar çoğunlukla yükseltici merkezlerdir ve topraklama elektrotları çok büyük akımları üzerlerinden boşaltmak durumundadır. Bu tür arazilerde iyi bir topraklama sisteminin gerçekleştirilmesi çok güçtür.

Diğer yandan salt merkezinin ve santralın topraklama devrelerinin, hazne (*reservoir*) suyu ile olan teması baraj gövdesinden geçen metal k kanallardan ötürü çok iyidir. Çünkü bunların iletkenliği betonun nemliliğinden dolayı fazladır.

Bu suyun özgül direnci en kötü koşullarda bile 100 ile 200 Ohm.m'yi nadiren aşar ve komşu kayaların özgül direncinden çok daha düşüktür. Belirli bir noktaya kadar baraj suyu bir iletken kanal



Şekil 39. Toprak akımının barajdaki hazne suyu üzerinden akması yada boşalması.

gibi işlev görerek arıza akımlarının bir bölümünün yolunu değiştirir ve sonra onları toprak içinde dağıtır (Şekil 39).

Böyle bir iletkenin boyuna çok büyük bir direncinin olduğu doğrudur. Örneğin 1 hektar kesitli suyun direnci 1 mm² lik bakır telin direnciyle aynı düzeydedir. Bu yüzden akım fazla uzağa gidemez. Ancak hesaplar gösteriyor ki büyük hacimli bir hazne suyunun barajdan bakıldığında görülen direnci ölçülü yani yalnız birkaç Ohm değerindedir.

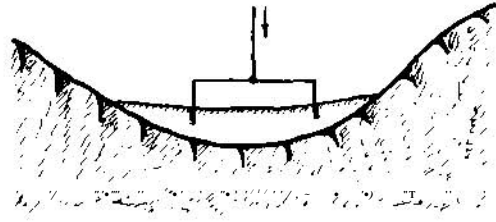
Bodior'in Valentine merkezinde sığ bir kanalda yaptığı ölçmelerin sonucunda hazne suyunun toprak akımı ile boşaltma kapasitesinin, santralin gövde topraklamalarına bağlı çek büyük uzunlukta bakır iletkenlerin bu suyun içine gömülerek iyileştirilebileceği görülmüştür. Çünkü bu yöntemle boyuna direnci çok küçük bir değere düşürülür. Çok kötü arazilerde bile bu yöntemle toprak direnci bir Ohm'ın altındaki değerlerde sınırlandırılabilir. Yine de akımların su yüzeyindeki gerilim gradyanlarını sık dolaşan bölgelerde aşırı değerlere yükseltmediğinin denetlenmesi gerekir.

5.6. Çok Dirençli Bir Bölgede İletken Toprağa Sahip Sınırlı Bir Alanın Olması

Bazan öyle olur ki çok dirençli bir bölgede elektrotun yerleştirilebileceği yalıtılmış, iyi iletken toprakları içeren bir çukur yada oyuk bir yer bulunabilir.

Böyle bir çukura yerleştirilecek topraklama elektrotunun değerini fazla abartmamak gerekir. Çünkü elektrotun direnci iki terimden oluşuyor. Birinci terim iletken toprağın uçları arasındaki, ikinci terim de dirençli ortamdaki gerilim düşümüne karşılıktır (Şekil 40).

Birinci terim üzerinde birşey yapılabilir, ancak ikinci terim üzerinde değil. Çünkü ikinci terim iyi iletken küçük adanın boyutlarından bağımsızdır.



Şekil 40. Dirençli bir gövde içinde iletken toprak parçası.

İletken bölgenin ortalama yarıçapı r olsun. Bu bölge, biçim olarak levha ile yarıküre arası bir elektrotla benzetilirse, ikinci terim $p/5r$ düzeyindeki bir dirence dönüşür. Bu da iletken küçük bir adacık kullanılarak elde edilebilecek minimum direnci gösterir.

Eğer kayanın özgül direnci 2000 Ohm ve iletken bölgenin ortalama yarıçapı 20 m ise, topraklama elektrotunun direnci 20 Ohm'ın altına düşmez.

Geride elektrotların boyutlandırılması kalıyor, öyle ki iletken arazideki gerilim düşümü çok fazla olmasın. Örneğin bu araziden geçiş için 5 Ohm ayrılır ve toprağın özgül direnci 100 Ohm kabul edilirse; toprağa yaklaşık ya 20 m'lik düşey çubuklar yada 40 m'lik yatay iletkenler gömülmesi gerekir.

5.7. Biraz İletken Fayların Etkisi

Kayalık toprakta elektrotların direncini düşürmek için bazan iletken fayların bulunmasına bel bağlanabilir. Ancak fayın kalınlığının zayıf olduğu yada büyük bir uzaklığa uzanmadığı durumlarda fayların önemini abartmak yanlışlık olur.

Yüzeysel tabakaların toprak alt katmanından daha iletken olduğu durumlar için söylenenler faylara da uygulanır. Faylar yayıcı gibi davranır ve arazinin daha küçük boyutlu topraklama elektrotlarıyla ele alınmasını sağlar. Ancak makul gerilim düşümleri içerisinde akımın büyük uzaklıklara taşınmasında faylara fazla bel bağlanamaz.

5.8. İletken Tuzlar, Kok Yada Odun Kömürü Kullanılarak Topraklama Elektrotlarının İyileştirilmesi

Elektrotların etrafındaki toprağın iletkenliği, yerel olarak deniz tuzu yada sodyum karbonat gibi elektrolitlerin enjekte edilmesiyle iyileştirilebilir. Önce tuz toprağa yayılırken elektrotun direnci düşer, sonra durur. Su, tuzları elektrottan uzaklaştırdıkça direnç tekrar artmaya başlar.

Bu işlemin etkinlik süresi toprağın geçirgenliğine bağlıdır. Çoğu durumlarda süre on seneyi bulur yada aşar. Diğer yandan toprak çok geçirgen yada yeraltı suyunun akışı büyük ise bu süre hemen hemen sıfırdır.

Yine de tuzun yayılmasını geciktirmek için bazı yöntemler, örneğin elektrolit olarak bazı erimeyen çökeller kullanılır (Bu yöntemi Ducrot 1944'te denemiştir, daha sonra Sanick ele almıştır).

Toprağa tuz salmanın direnç üzerinde önemli bir etkisinin olabilmesi için ele alınan toprağın

alanının elektrotların temel boyutlarına göre büyük olması gerekir. Dirençteki azalma, küçük boyutlu çubuk yada levha elektrotlarda oldukça büyüktür. Ancak bu yöntem büyük merkezlerin top-raklamalarının iyileştirilmesinde pek bir yarar sağlamaz.

Deniz tuzu elektrotların aşınmasını hızlandırır. Ancak elektrotlar bakır yada yumuşak çelikten yapılmışsa bu aşınma tehlikeli boyutlara ulaşmaz. Yine de yumuşak çelikten yapılan elektrotlar kal-kerli arazilerde tuzla birlikte kullanılmamalıdır.

Toprağı iyileştirmenin diğer bir yolu da elektrot-ların etrafını kok yada odun kömüründen oluşan bir tabaka ile örtmektir. Bunlar elektrotları da-ha az korozyona uğratar.

Yine de bu iletken katmanların elektrotların en büyük boyutunu genel olarak fazla artırmadığının ve böylece bunların direnç üzerindeki etkisinin çoğunlukla orta değerde olduğunun belirtilmesi gerekir. Ayrıca bu katmanlar çubuk elektrotlar durumunda kazıların çapının artırılmasını gerektirir. Bu yüzden küçük kesitli çubukların sayı-sının artırılması daha ucuz bir yol olabilir. Di-ğer yandan bunlar İngiltere'de yapılan testlere göre, direncin mevsimlik değişmelerini azalttığı gibi toprağın tehlikeli ısınmasına yol açmadan elektrotların taşıyabileceği akımı artırır.

5.9. tki Temas Noktası Arasında insan Vücudunun Çektiği Akım

Elektriğin insanı öldürme tehlikesi çok sayıda-ki etmene bağlıdır. Bunlar arasında vücuttan geçen akımın değeri, kalma süresi ve organizma içinde izlediği yol sayılabilir.

Vücutta akımın geçmesine duyarlı olan bölgeleri şöyle aralayabiliriz: Kalp atışları durabilir yada düzensizleşebilir. Solunum hareketlerini düzenleyen sinir düğümü. Eller; kaş kasılması nedeniyle alternatif akım taşıyan gerilimli iletkenin bırakılması zorlaşır. Kasılma genel olarak 10 ile 15 mA arasında başlar. Bir saniye yada daha büyük temas sürelerinde kalbin kasılma sınırı 50 mA'nin üzerindedir. Solunumun durmasına yol açan sinir düğümünden geçen akımların değeri üzerinde fazla bir bilgimiz yok.

Sözün kısası en tehlikeli temaslar baştan ayakla-ra ve elden ayaklara olan temaslardır. Ayaktan ayağa olan temaslara daha az tehlikelidir. Ancak bunların yol açtığı gerilim düşümleri temaları daha tehlikeli temaslara dönüştürebilir.

Öte yandan bir akımın tehlike kavramını temasın olasılığı kavramından ayırmak olanaksızdır. Yazı-nın başında da belirtildiği gerçekten hatların gerilimi, kamu için ciddi bir tehlike yaratılma-dan binlerce volta çıkarılabilir. Yeter ki bun-lar çok sık geçilmeyen bölgelerde bulunsun, izo-latörlerdeki arıza seyrek olsun ve tehlikenin sınırlanması için arızalar yeterince hızlı biçimde (örneğin bir saniyenin altında) temizlensinler. Tehlike süresince tehlikeli nesneye dokunma ola-sılığının çok zayıf olması dışında güvenliğin sağlanmadığı durum sayısı oldukça fazladır.

Yine de karşılaştırmalara bir baz olması için 50 mA'yi, aşılması gereken tehlikeli bir değer

olarak kabul ediyoruz. Bu durumda güvenlik yal-nız gerilimlerin sınırlandırılmasıyla sağlanıyor.

Önceki bölümlerde verilen formül ve kurallar, vü-cudun temas ettiği A ve B noktaları arasındaki U geriliminin hesaplanmasına izin verir. Şimdi söz konusu olan, vücuttan geçen akımın bulunma-sıdır.

Bu amaçla 1.5. bölümünde olduğu gibi Théve'nin kuramını uygulayacağız (Şekil 3).

A ve B temas noktaları arasında vücuttan geçen akım, önceden var olan U geriliminin, A ve B nok-taları arasında görülen dışsal şebeke empedansı üzerine vücutun kapatarak oluşturduğu devreden akmasına yol açtığı akıma eşittir.

Eğer AB'den görülen dışsal şebekenin bu empedansı vücutun R_c direncinin yanında küçükse, vücut di-rencinin çekeceği akım U/R_c ye eşit olacaktır.

Diğer uç durumunda, yani vücutun dışındaki şebeke empedansının vücut direncinden büyük olduğu du-rumda; çekilen akımı dışsal şebeke empedansı üze-rindeki gerilim düşümü belirler.

Gerilimli iletkenle doğrudan temas yada arıza akımının toprak yolunun bir bölümü yada tamamı-nın vücut tarafından basitçe köprülenmesi (şönt-lenmesi) durumlarına göre iki koşul ayrı ayrı ele alınabilir.

5.9.1. Gerilimli bir iletkenle doğrudan temas

Bu durumda önceden var olan gerilim genellikle basit şebeke gerilimidir. Kazaya uğrayanın eliyle ayakları arasında görülen dışsal şebeke empe-dansı; seri olarak toprak üzerinde duran ayakka-bıların oluşturduğu küçük topraklama elektro-tunun empedansı, nötr noktasının konumuna bağlı olarak (Şekil 4) şebekenin dönüş devresinin em-pedansı ve devrenin boyuna empedansından oluşur.

Bu sonuncu terimler, nötrü yalıtılmış alçak ge-rilim şebekelerinin dışında, vücutun dirençleriyle karşılaştırıldığında daima küçüktür. Diğer yandan ayakların oluşturduğu topraklama elektro-tunun direnci, eğer ayaklar az iletken bir top-rak üzerinde duruyorsa önemli değerlere ulaşabi-lir.

Vücut direnci iyi tanımlanmış bir öge değildir, içsel dokular kabaca özgüldirenci 4-6 Ohm olan bir elektrolite benzetilebilir. Bu dokular deri çeperi tarafından korunur. Deri çeperi akımın nü-fuzuna kuru durumda bir santimetre karesinde bir kaç bin Ohm'luk bir dirençle karşı koyar. Ancak yaş durumda direnç çok daha düşüktür ve deri çeperi bu durumda uygulanan gerilimin değerine kar-şı oldukça duyarlıdır. Ayrıca deri yara ve yara izleri nedeniyle kesiklikler gösterirse birkaç yüz voltluk gerilimlerde delinebilir.

Sözün kısası el ile ayakkabı tabanları arasında ölçülen direnç çoğu zaman 3000 Ohm'un altındadır. Ancak deri tümüyle koruyucu gücünü yitirdiği ve ayakkabıların çok iyi iletken olduğu durumlarda bu direnç 1000 Ohm'un altına düşebilir. Burada yine biz kendimizi bir tip değer olarak, örneğin 3000 Ohm seçerek sınırlamamız gerekir. 0 kadar çok değişken ve belirsiz etmen vardır ki; bu kı-sa yazıda bunların tümünü yakından incelemeye

çalışmak olanaksız ve biraz da boşuna bir çabadır.

Ayakların oluşturduğu direnç, bunları birbirine yakın iki küçük levha elektrotta benzeterek hesaplanabilir. Özgüldirenci p olan bir arazide tam basmış her ayağın 2,5p, iki paralel ayağın 1,5p düzeyinde bir direnci olacaktır.

U gerilimli bir iletkenle olan doğrudan temasta; el ile toprak üzerinde duran iki ayak arasındaki vücut tarafından çekilen akım, yukardaki varsayımlara göre şöyle olacaktır:

$$i = \frac{U}{3000 + 1,5p} \text{ A}$$

Özgüldirenci 1000 Ohm-m'y^e kadar olan arazilerde; vücut direnci hemen hemen yalnız başına üzerinden akan akımı belirler.

Özgüldirenci 10 000 Ohm-m yada daha fazla olan arazilerde vücut, toplam gerilimin küçük bir bölümünün etkisinde kalır. Bu durum, gerilimli bir nesne ile temas tehlikesinin önemli olduğu ortamlarda; ağaç, çok kuru beton, balast (kırmı taş), bitüm vb. gibi yalıtıcı kaplamaların kullanılmasının yararını ortaya koyuyor.

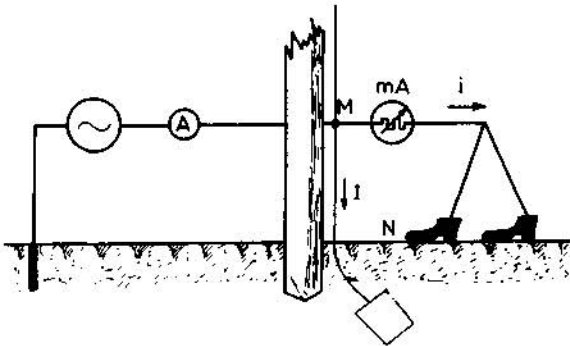
5.9.2. Arıza akımı yolunun vücut tarafından köprülenmesi

Şimdi, bir arıza akımının toprağa akış yolunun vücut tarafından basitçe köprülenmesi durumunu inceleyeceğiz (Şekil 10).

Eğer köprülenme yürüme sırasında ayaktan ayağa olmuşsa, bu durumda ayaklardan biri yere tam olarak (düz olarak) basmamaktadır ve toprağın bir ayaktan diğer ayağa empedansı 6p dolayında olacaktır. Önceden varolan gerilim U ise çekilen akımın yaklaşık değeri:

$$i = \frac{U}{3000 + 6p} \text{ A olacaktır.}$$

Tersine eğer köprüleme toprak üzerinde duran ayaklar ve bir toprak elektrotuna bağlı nesneye dokunan el arasındaysa; paydada iki ayak arasındaki 1,5p luk toprağa giriş direncine seri olarak ele kadar olan dönüş yolu direnci sokulur. Bu dönüş yolu paralel iki koldan oluşabilir: Birisi, topraklama elektrotu ile dokunulan nesne arasındaki bağlantı. Öbürü, şebekenin dönüş devreleri ile nesne arasında kazara olan (accidental) bağlantılarda. Çoğu durumda bu ek ikinci terim (dönüş yolu direnci) ihmal edilebilir. Bu durum-



Şekil 41. M ve N arasında vücut tarafından çekilen akımın ölçülmesi.

da vücudun çektiği akım yaklaşık;

$$i = \frac{U}{3000 + 1,5p} \text{ A dir.}$$

Görülebileceği ki her durumda; ü ve p değerlerinin ölçümüne geçmeden çekilen (köprülenen) akımı doğrudan belirleyebilmek için kişiyi bir voltmetre yerine koymak yeterlidir. Şöyle ki; voltmetrenin iç direnci vücut direncine yakın değere ayarlanacak ve ayağın yerine geçen ayakkabılar üzerinden toprak ile temas yaptırılacak, daha sonra toprak elektrotundan bir I arıza akımı akıtılarak voltmetreden geçen i akımı okunacaktır (Şekil 41). İşte bu i akımı vücuttan geçecek olan akımdır.

5.9.3. Örnekler

1- Özgüldirenci 100 Ohm olan bir arazide üzerinden 5 A'lık bir akım geçen çubuk elektrotun uzunluğu 1 m olsun. Biri çubuğun tepesinde dokunduğunda üzerinden ne kadar akım geçeceğini bulalım.

Çubuğun uzaktaki toprağa göre gerilimi 400 Volt, tepesi ile adım uzaklıktaki toprak arasında bulunan gerilim 300 Volt, toprak üzerinde duran iki ayağın direnci 150 Ohm ve çubukla seri durumdaki iki ayağı kapsayan devrenin direnci yaklaşık 200 Ohm dolayında olacaktır. El ile ayakkabılar arasındaki 3000 Ohm'luk bir direnç de bunlara eklenirse vücuttan çekilen akım aşağıdaki gibi olur:

$$i = \frac{300}{3000 + 200} = 0,094 \text{ A}$$

Eğer koşullar uygun değilse temas öldürücü olabilir.

2- Yatay olarak gömülmüş bir iletken özgüldirenci 200 Ohm olan bir arazide metresinden 1 A geçirirse; ayaktan ayağa yada yakındaki toprak ile iletkenine bağlı bir yapı arasında çekilen akım ne kadar olur:

İletkenin yakınında ayaktan ayağa maksimum gerilim 0,10 ile 0,15 pi yani 20 ile 30 V olacaktır. Bu durumda ayaktan ayağa çekilen akımın maksimum değeri

$$i = \frac{30}{3000 + 1200} = 0,007 \text{ A'dir.}$$

Bu değer tümüyle zararsızdır.

El ile ayaklar arasındaki gerilim ise 0,6-0,8 pi yani 120-160 Volta ulaşabilecektir. Bu durumda çekilen akım yaklaşık olarak;

$$i = \frac{120 \text{ ile } 160}{3000 + 150} = 0,038 \text{ ile } 0,050 \text{ A}$$

arasındadır.

Temas bazan tehlikeli olabilir.

Uygulamada karşılaşılan durumlar genel kurallar verilemeyecek kadar çok değişkenlik gösterir.

En basit yöntem, 3.2. bölümünde belirtildiği gibi, topraklama elektrotundan bir akım akıtılarak tesisin aynı anda dokunulabilecek noktaları arasındaki gerilimleri denetlemektir. Bu durumda tehlikeli görülen bölgelerin yerel olarak iyileştirmesine gidilebilir.

6. ELEKTROTLARIN ETRAFINDAKİ TOPRAĞIN ISINMASI

6.1. Genel Bir Bakış

Yazının başında toprağın elektrolitik nitelikte olan iletkenliğinin toprağın nemle orantılı arttığını görmüştük. Suyu tümüyle çekilmiş toprak hemen hemen mükemmel bir yalıtıcıdır. Belirli bir nem oranında toprağın iletkenliği sıcaklıkla da artar: Bir topraklama elektrotunun direnci, üzerinden geçen akımın etkisiyle toprak ısındıkça düşmeye başlar.

Ancak toprağın ısınması aynı zamanda suyun buharlaşmasına yol açar. Suyun kaynama noktasına ulaşmadıkça bu etki az hissedilir. Elektrotun hemen yakınındaki tabaka 100°C'a yükseldiğinde, bu tabaka hızla suyunu yitirir ve direnci çok yüksek bir değere yükselir. Yerel gradyenler dallanmış arkların oluşmasına yol açar (Bölüm 2.2.). Bu arklar da kurutma işlevini gerilim ne kadar yüksekse o kadar uzağa yayar. Bu durumda elektrotun akımı boşaltma kapasitesi çok küçük bir değere düşer.

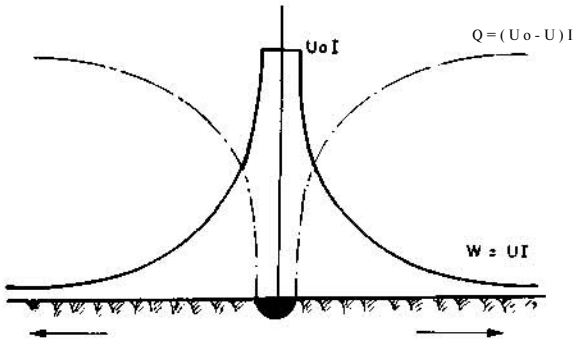
Bu yüzden elektrotun yakınında sıcaklığın hiçbir zaman 100°C'a ulaşmaması istenir.

6.2. Sürekli Çalışmada Isınma

Elektrot üzerinden boşalan güç, bir elektrik enerjisi akısı biçiminde elektrotu terkeder. Ancak bu enerji toprağın art arda gelen katmanlarının direnci içinde tedrici biçimde ısıya dönüşerek değer yitirir. Eğer toprak homojen ise elektrik ve ısı akıları aynı eşgerilim yüzeyleriyle yan yana akar. Elektrot yüzeyinden itibaren tedrici olarak biri azalırken öbürü artar (Şekil 42).

Sürekli gerilim ve sıcaklık rejimlerinde; toprakta elektrik ve ısı enerjilerinin toplandığı hiçbir bölüm olmayabilir. Bu durumda enerjinin toplam akısı tüm yol boyunca değişmez ve sonucunda gerilim ve ısınma gradyenlerinin birbirine bağımlılığı artar. Bu da gerilimlerin bölüşümü bildiğinde ısınmaların bölüşümünün hesaplanmasını kolaylaştırır. Toprağın ısı (termik) iletkenliğini K (metreküp ve derece başına Watt olarak), elektrotun gerilimi U_0 ve istenen noktanın gerilimini U ile gösterirsek, herhangi biçimdeki elektrotta uygulanacak olan basit bağıntıyı aşağıdaki gibi yazabiliriz:

$$\dots \int \cdot (U_0 - \frac{U}{2})$$



Şekil 42. Isı ve elektrik enerjisi akılarının dağılımı.

Elektrot yüzeyindeki ısınma, ki pratik olarak en ilginç olanı şöyledir:

$$0 = \frac{U^2}{2kp}$$

Toprağın doğal sıcaklığı 20°C ve ısı iletkenliği 1,2 W/°C (kenarları 1 m olan bir küpten geçerken) (RÜDENBERG) kabul edilirse, 80°C'lık ısınma sınırı için elektrot üzerindeki gerilim;

$$U_0 = 14 \sqrt{p} \text{ V olmalıdır.}$$

Sürekli rejimde toprağın ısınması elektrotta uygulanan gerilimle sıkı ilişkilidir. Herhangi bir elektrotta, elektrotun yakınındaki toprağın suyu kaynama sıcaklığına ulaşmaksızın sürekli uygulanabilecek maksimum gerilim $14 \sqrt{p}$ düzeyindedir. Yani özgül direnç 50 Ohm m olduğunda 100 V, 200 Ohm m olduğunda da 200 V olacaktır.

Düşey çubuklar durumunda (ki burada gerilim toprağın özgül direnci ile çubuğun metresinden akan akımın çarpımına eşittir) elektrottan akan akımın sınırı $14/p$ (A/m); yani $p=50$ Ohm m için 2 A/m ve $p=200$ Ohm m için 1 A/m olacaktır.

Görülüyor ki sürekli rejimde bir elektrot ancak düşük akımlar geçirebilir. Bereket versin ki toprağın ısınmasının zaman değişmezi (sabit) genellikle çok uzundur ve bazan birkaç günü bulabilir. Bu durum pratikte yukardaki sınırların sık sık aşılmasına olanak sağlar.

Açıktır ki bu hesaplama yalnız yaklaşık bir değer verir. Kötu iletken arazilerde ısı iletkenliğinin daha düşük olduğu düşünülebilir. Bu da onları daha elverişsiz duruma sokar.

Topraklama elektrotlarında kuruma (toprağın suyunun çekilmesi) için gerilim sınırı pratikte çoğunlukla 100 ile 200 V arasındadır. Bu durum alçak gerilim sistemlerinde, ısınma olayının görülemeyiş nedenini açıklar. Çünkü bu şebekelerin nötr gerilimi; bir faz üzerinden toprağa olan atlamalarda 127 V'u aşamaz. Arıza ıkmı, nötr topraklamasından daha iyi olan bir güvenlik topraklaması üzerinden aktığında; 220-380 V'luk şebekelerde bu olgunun daha sık görülme tehlikesi vardır. Bu durumda güvenlik topraklamasının gerilimi faz toprak geriliminin büyük bir bölümüne ulaşır.

Topraklama elektrotlarının etrafındaki toprağın ısınması, özellikle yeterince duyarlı toprak korumalarından yoksun orta gerilim şebekelerinde arızalı izolatörden bir önceki pilonun ayakta görülebilir. Bir defa yakınındaki toprak kuruyorsa pilon hattın gerilimine yükselmiş olarak kalır ve teması öldürücü olur.

Toprağın ısınması basınç altında buhar cepleri yaratabilir. Bu da bazı kayaların eriyip kaynaşmasına yada eriyip cam haline gelmesine yol açar.

6.3. Geçici Bir Akımın Akmasıyla Isınma

Akımın akma süresi çok uzun olmadıkça elektrotlar daha büyük akımlara dayanabilir.

Elektrotun çıkışındaki akım yoğunluğunu 6_0 (A/m olarak) ve toprağın özgül (spesifik) ısısını

C(0,4 cal/cm³/°C yada 1 700 000 J/m³/°C düzeyindedir) ile gösterirsek; akımın t saniye geçmesiyle doğacak 0° ısınmayı veren bağıntıyı şöyle yazabiliriz:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{C_0}{\rho t}} \text{ A/m}^2$$

Burada ısının, çıktığı ortamda yoğunlaşmış biçimde kaldığı varsayılmıştır.

Toprağın, elektrot yüzeyinin metrekaresinden 6₀ Amperlik bir akışa, G°C'lık bir ısınmayı aşmaksızın dayanabileceği süre:

$$t = \frac{C_0}{\rho} \text{ saniyedir.}$$

80° C'lık kritik ısınma için akım yoğunluğu aşağıdaki gibidir:

$$i_0 = \frac{12\,000}{\sqrt{\rho t}} \text{ A/m}^2$$

Özgüldirenç $\rho = 100 \text{ Ohm m}$ olduğunda akım yoğunluğu, 1 s için 0,12 A/cm² ve 1 dk için 0,015 A/cm² olacaktır (80°C'lık kritik ısınmada).

Çapı d metre olan çubuk durumunda kritik ısınma için (80°C) çubuğun metresinden akacak akım $i = TT \ 6_0$ bağıntısından bulunabilir:

$$i = \frac{37\,000 \ d}{\sqrt{\rho t}} \text{ A/n1}$$

Böylece 3 cm çaplı bir çubuk, özgüldirenç 100 Ohm m olan bir toprakta 1 dk süreyle 15 A/m² dayanabilir. 1500 V'luk bir gerilim uygulanmasına karşılık olan bu akım, çubuğun sürekli rejimde üzerinden geçirebileceği akımın yaklaşık 10 katıdır.

100 Ohm m özgüldirençli toprakta 60°C'lık ısınma sınırı için 50 ve 100 mm²lik gömülü iletkenlerin çeşitli sürelerde taşıyabilecekleri akımlar ve bunlara karşılık olan gerilimler şöyledir:

i (A/m)	U ₀ (V)	50 mm ² t (sn)	100 mm ² t (sn)
2	400	215	430
5	1000	35	70
10	2000	8,5	17
20	4000	2,1	4,3
50	10000	0,35	0,7

Açıktır ki bu hesaplar kabaca ve yalnız büyük-
lüklerin düzeyini verir.

6.4. Toprağın Isınma Hızı

Biraz uzun süreler için tüm ısının doğduğu yerde yoğunlaşmış biçimde kaldığı artık kabul edilemez. Bu ısının, ısı enerji akışı tarafından (ki bu sıcaklık gradyanları doğdukça yavaş yavaş oluşur) boşaltıldığı unutulmamalıdır.

Toprağın çeşitli noktalarındaki sıcaklıkların oluşma yasası üstel değildir. Öyle ki olgunun

zaman değişmezini uygunca tanımlamak bile olanaksızdır. Yine de ısınma, başlangıçtaki doğrusal yasayı aralıksız izlerse elektrot yüzeyinin doyma sıcaklığına ulaşacağı T zamanını önceki bağıntılardan çıkarabiliriz:

$$T = 200 \left(\frac{U_0}{\rho \delta_0} \right)^2 = 200 \left(\frac{U_0}{G_0} \right)^2 \text{ saat}$$

Bir küre yada yarıküre elektrot için $T = 200 \ r^2$ dir. U₀'ın p ile çubuğun metresinden akan TT d 6₀ akımının çarpımından az farklı olduğu bir düşey çubuk durumunda ise $T = 2000 \ d^2$ dir. Bu zaman 30 cm yarıçaplı bir yarıkürede yirmi saat, 3 cm çaplı bir çubukta da yalnız iki saattir.

Doğrusal biçimli bir elektrotun direncinin çapına bağımlılığı azdır. Ancak elektrotun hemen yakınındaki toprağın ısınma hızının bu çapa bağımlılığı çok fazladır. Ne varki bu tür elektrotlarda yüksek sıcaklıkların toplandığı tabakanın ince olması, elektrotla komşu bölgelerin nemini kılcalık yardımıyla akaçlamasına olanak sağlar. Nemin akaçlanması ile elektrot etrafındaki toprağın kuru-
ruması ve sonucunda direncinin artması geciktirilmiş olur.

KAYNAKLAR

- [1] J Taylor, Capacité d'écoulement des prises de terre, Journal IEE, Ekim 1935.
- [2] Dwight, Calcul des résistances des prises de terre, Elect. Engineering, Aralık 1936.
- [3] Fawcsett, Grimmit, Shoter ve Taylor, Considerations pratiques sur la mise à la terre, Journal IEE, Ekim 1940.
- [4] Rudenberg, Considérations fondamentales sur la circulation des courants dans le sol, Elect. Engineering, Ocak 1945.
- [5] Bullard, La mise à la terre des réseaux, Elect. Engineering, Nisan 1945.
- [6] J Berger, Compartement des prises de terre sous courrant de choc de très forte intensité, Bulletin ASE, 20, Nisan 1946 ve CIGRE 1946, rapor no. 215.
- [7] Petrocokino, L'état actuel de la technique des mises à la terre, RGE, Mayıs 1947.
- [8] Bodier, La sécurité des personnes et la question des mises à la terre dans les réseaux, Bull. Soc. Franç. Electr., Ekim 1947 ve Mayıs 1948.
- [9] Ryder, Problèmes des mises à la terre, Journal IEE, Nisan 1948.
- [10] Norinder ve Petropoulos, Caractéristiques des électrodes pointues, CIGRE, 1948, rapor no.310.
- [11] Petrocokino, De'la prise de terre localisée au réseaux étendu, RGE, Şubat ve Mart 1950.