

**İLETİM HATLARININ OLUŞTURDUĞU ELEKTRİK VE
MAGNETİK ALANLARIN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

46526

Elek. Müh. Ayşe TÜTER

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 16 Ocak 1995

Tezin Savunulduğu Tarih : 2 Şubat 1995

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Nesrin TARKAN

Diğer Jüri Üyeleri : Y.Doç.Dr.Ayşen DEMİRÖREN
Y.Doç.Dr.Özcan KALENDERLİ

ŞUBAT 1995

ÖNSÖZ

Bu çalışmada, taşıma hatlarından kaynaklanan elektrik ve magnetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Bana bu konuyu tez çalışması olarak veren, bilgi ve tecrübeleriyle çalışmalarımı yönlendiren ve her türlü manevi desteği gösteren değerli Hocam Sayın Prof.Dr.Nesrin Tarkan'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek lisansa devam edebilmem için her türlü kolaylığı sağlayan Yapı ve Teknik Daire Başkanı Yük.Müh.Mimar Hamit Dinibütün ve İnşaat İşleri Şube Müdürü İnş.Müh.Bahri Bilaloğlu'na teşekkür ederim.

Yüksek lisansa başlamamda ve çalışmalarımda bana her türlü desteği veren değerli arkadaşım İnş. Müh. Hatice Gündüz'e teşekkür ederim.

Yaşantımın her anında olduğu gibi öğrenim hayatımda da her bakımdan desteklerini gördüğüm Anneme, Babama ve Kardeşlerime teşekkürü bir borç bilirim.

İstanbul, 1995

Ayşe TÜTER

İÇİNDEKİLER

NOTASYON LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ	1
BÖLÜM 2. GÜÇ İLETİMİ	2
BÖLÜM 3. İLETİM HATLARININ ENDÜKTANSI	4
3.1. Giriş	4
3.2. İki İletkenli Hatlar	5
3.2.1.İletken İçindeki Kaçak Akılar	6
3.2.2.İletken Dışındaki Kaçak Akılar	9
3.3. Çok İletkenli Sistemler	10
3.4. İletkenin Etkin Self Endüktansı	14
3.5. Çaprazlanmış Üç Fazlı Tek Devreli Hatların Pozitif Veya Negatif Sistem Endüktansı	16
3.6. Çaprazlanmış Üç Fazlı Tek Devreli Hatların Sıfır Sistem Endüktansı	18
3.7. Çok Damarlı Çelik Özlü İletkenli Hatlar	20
BÖLÜM 4. İLETİM HATLARININ KAPASİTESİ	22
4.1. Giriş	22
4.2. İki İletkenli Hatlar	25
4.3. Çok İletkenli Sistemler	27
4.4. Toprak Etkisi	30
4.5. Tek Devreli Üç Fazlı Hatlar	32
4.6. Çaprazlanmış Tek Devreli Üç Fazlı Hatların Nötre Göre Pozitif veya Negatif Sistem Kapasitesi	34
4.7. Çaprazlanmış Üç Fazlı Tek Devreli Hatların Nötre Göre Sıfır Sistem Kapasitesi	38

4.7.1. Toprak Hatsız	38
4.7.2. Toprak Hatlı	39
BÖLÜM 5. ALÇAK FREKANSLI ELEKTRİK VE MAGNETİK ALANLARIN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ	42
5.1. Elektrik ve Magnetik Alan	42
5.2. İnsanlarda Görülen Hastalıklar	44
5.2.1. Elektrik ve Magnetik Alanların İnsanların Büyümesi Üzerindeki Etkileri	45
5.2.2. Elektrik ve Magnetik Alanların Kansere Oluşumu Üzerindeki Etkileri	46
5.2.3. Elektrik ve Magnetik Alanların Üreme Üzerindeki Etkileri	50
5.2.4. Elektrik ve Magnetik Alanların Sinir Sistemi Üzerindeki Etkileri	51
BÖLÜM 6. ELEKTROMAGNETİK ALAN GÜVENLİK SINIRLARI HESABI	52
BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR	60
EK	62
ÖZGEÇMİŞ	65

NOTASYON LİSTESİ

ϕ (Wb)	:	Magnetik Akı (Weber)
N	:	Sarım sayısı
e.m.k.	:	Elektromotor kuvvet
L (H _x)	:	Endüktans (Henry)
I (A)	:	Akımın etkin değeri (Amper)
w (rad/s)	:	Açısal hız
L _i (H/m)	:	İç endüktans (Henry/metre)
L _d (H/m)	:	Dış endüktans
$\delta\phi$	:	Magnetik akının temel bileşeni
δI	:	Akımın temel bileşeni
B _x (Tesla)	:	x uzaklığında oluşan magnetik akı yoğunluğu
f (Hz)	:	Frekans
r (cm,m)	:	İletken yarıçapı
x (cm,m)	:	Akı çizgilerinin iletkenlerden olan uzaklığı
d "	:	İki iletken arasındaki açıklık
r _m "	:	Etkin yarıçap
I _a (A)	:	a iletkeninin akımı
I _b (A)	:	b iletkeninin akımı
I _c (A)	:	c iletkeninin akımı
I _n (A)	:	Nötr iletkeninden akan akım
R	:	Hayali dönüş iletkeni
ϕ_a'	:	a ve R'den oluşan devrenin magnetik akısı
ϕ_a''	:	I _b akımının a ve R devresinde oluşturduğu magnetik akı
ϕ_a	:	I _a , I _b , I _c ve I _n akımlarının oluşturduğu magnetik akı
ϕ_b	:	b iletkeninde oluşan akı
ϕ_c	:	c iletkeninde oluşan akı
ϕ_n	:	Nötr iletkenindeki akı
D _m (cm,m)	:	İletkenler arası geometrik uzaklık
D _e "	:	Dönüş iletkeninin toprak içindeki derinliği
g (Ω.m)	:	Toprağın özgül direnci

x_0 (Ω/m)	: Sıfır sistem endüktif reaktansı (ohm/metre)
x_1 "	: Pozitif sistem reaktansı
r_m , (cm,m):	Geometrik yarıçap
D	: Elektriksel akı yoğunluğu
D_n	: Yüzey elemanına dik yöndeki akı yoğunluğu
V (Volt)	: Potansiyel
E (V/m)	: Elektrik alan (Volt/metre)
ϵ_0 (F/m)	: Boşluğun dielektrik sabiti (Farad/metre)
ϵ_r	: Bağıl dielektrik sabiti
D_x	: x yarıçaplı silindirik yüzeye normal olan akı yoğunluğu vektörü
V_x (V)	: x uzaklığındaki potansiyel
V_y (V)	: y uzaklığındaki potansiyel
Q_1 (C)	: 1 iletkenindeki yük
Q_2 (C)	: 2 iletkenindeki yük
V_{ab} (V)	: a ve b iletkenleri arasındaki potansiyel farkı (gerilim)
V_a (V)	: a iletkeninin potansiyeli
V_b (V)	: b iletkeninin potansiyeli
C (F/m)	: İki iletken arasındaki kapasite
$V_{10'}$ (V)	: 1 iletkeninin toprağa göre potansiyelindeki artış
$V_{20'}$ (V)	: 2 iletkeninin toprağa göre potansiyelindeki artış
$V_{30'}$ (V)	: 3 iletkeninin toprağa göre potansiyelindeki artış
V_{10} (V)	: 1 iletkeninin toprağa göre potansiyeli
V_{20} (V)	: 2 iletkeninin toprağa göre potansiyeli
V_{30} (V)	: 3 iletkeninin toprağa göre potansiyeli
P (V/C)	: Orantı sabiti (Volt/Coulomb)
h (h)	: İki iletken arasındaki uzaklık
Q_a (C)	: a iletkeninin yükü
$Q_{a'}$ (C)	: a iletkeninin görüntü yükü
Q_b (C)	: b iletkeninin yükü
$Q_{b'}$ (C)	: b iletkeninin görüntü yükü
Q_c (C)	: c iletkeninin yükü
$Q_{c'}$ (C)	: c iletkeninin görüntü yükü
$V_{a'}, V_{b'}, V_{c'}$ (V)	: Görüntü iletkenlerinin potansiyelleri
V_L (V)	: Hatlararası gerilim
I_c (A)	: Şarj akımı
l (m)	: Hattın uzunluğu

V_{ao}, V_{bo}, V_{co} (V) : Sıfır sisteme uygulanan gerilimler
 C_o (C) : Nötre göre sıfır sistem kapasitesi
 Q_e (C) : Toprak hattında birim uzunluk başına düşen yük
NYS : New York Güç Hatları Danışma Komitesi
WHO : Dünya Sağlık Organizasyonu
 10^{-9} : nano (n)



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1. Güç sisteminin bir kısmı.

Şekil 3.1. Yalnız 1 iletkenindeki I akımını oluşturduğu magnetik akı çizgileri.

Şekil 3.2. İletken 1'in kesiti.

Şekil 3.3. Toprak hatlı, hayali dönüş iletkenli, tek devreli üç fazlı hatlar.

Şekil 3.4. Üç fazlı üç iletkenli sistem.

Şekil 3.5. Çaprazlanmış iletkenler

Şekil 3.6. Toprağa eşit dönüş iletkenli sıfır sistem akımı taşıyan üç iletkenli hat.

Şekil 3.7. 7 damarlı iletken kesiti.

Şekil 4.1. İki hat iletkeni arasındaki elektriksel alan.

Şekil 4.2. İki iletkenli hat.

Şekil 4.3. Sadece 4 iletkeniyle gösterilen çok iletkenli sistem.

Şekil 4.4. İletkenlerarası ve toprağa göre kapasiteler.

Şekil 4.5. Tek fazlı iki iletken arasında simetri düzlemine yerleştirilmiş eşpotansiyel yüzey.

Şekil 4.6. Görüntü yükleri ile tek devreli üç fazlı hat.

Şekil 4.7. Çaprazlanmış üç fazlı hat.

Şekil 5.1. 765 kV'luk hattan uzaklıkla elektrik alan şiddetinin değişimi.

ÖZET

Eletrik gücü iletimi ve kullanımı esnasında yayılan elektrik ve magnetik alanların biyolojik etkileri dünyada pekçok araştırmacı tarafından incelenmekte ve yakın bir gelecekte uluslararası güvenlik standartlarına ulaşılması hedeflenmektedir.

Elektromagnetik alanların olumsuz etkilerinin olabileceği bugün bütün dünyada tartışılırken, evlerde kullanılan elektrikli aletlerden ya da iletim hatlarından yayılan alanların düşük seviyede olması ve güç kullanımı arttıkça sağlık üzerindeki etkilerinin aynı oranda artmaması nedeniye herhangi bir risk oluşturmayacağını belirtenler de var.

Ancak genel olarak yapılan çalışmalarda biyolojik sistemlerin güç frekansındaki elektrik ve magnetik alanlara karşı duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada ise öncelikle kısa bir şekilde güç iletimine değinilmiş, daha sonra iletim hatlarının iki önemli parametresi olan endüktans ve kapasite üzerinde durulmuş son olara da elektrik ve magnetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca güvenlik açısından yerleşim bölgelerinin, okul veya parkların iletim hatlarından ne kadar uzakta bulunması gerektiğiyle ilgili bir bilgisayar çalışması yapılmıştır.

SUMMARY

EFFECTS OF ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS PRODUCED BY TRANSMISSION LINES ON HEALTH

Public interest has recently focused on the biological effects of exposure to electric and magnetic fields associated with electric power transmission and utilization.

In this study power transmission systems were considered and health effects of electric and magnetic fields were investigated.

By transmission, is normally implied, the bulk transfer of power by high voltage links between main load centres. Distribution on the other hand is mainly concerned with the conveyance of this power to consumers by means of lower voltage networks.

Transmission lines transmit electrical power from a sending-station (S) to a receiving-station (R) without supplying any consumers route: by contrast, a distribution line or distributor supplies consumers directly at short intervals along the line. Thus a distributor is subject to the legal requirement that power should be supplied at a voltage within $\pm 6\%$ of a declared voltage, whereas a transmission line is not subject to the restriction and its voltage can carry as much as 10 or even 15% due to variations in load. In practice the distinction between transmission and distribution is not so clear-cut as several large consumers are now being supplied at 132 kV and above, and single-phase loads are being taken from two phases of a 132 kV line. The transmission system is referred to collectively as the grid, the 275 and 400 kV systems being referred to as the super-grid. Although the present 400-420 kV network of some 7000 km length is expected to meet the main transmission requirements until about the end of the century, research continues at higher voltages.

The two ends of a transmission line can terminate at generating-stations, grid-switching stations or grid-supply points. The terminals of a modern generating station are now normally outdoor. Grid-switching stations have similar outdoor terminals but are not associated with a particular generating station. They comprise transformers for interconnecting the various voltage levels of the grid and circuit breakers for clearing faults and controlling the system.

The primary parameters of a transmission line are its series and shunt resistance, its series inductance (self and mutual) and its shunt capacitance. Inductance is due to the magnetic fields set up by the line currents and is a series inductance carrying a line current. Capacitance, and its charging current due to the electric field set up by the system voltage and appear as a shunt circuit across the system voltage.

The insulation of a line is seldom perfect and leakage currents flow over the surface of the insulators especially during foul weather. This leakage is simulated by a shunt resistance of high ohmic value across the system capacitance. Leakage causes a power loss which is a function of the system voltage. Corona causes a power loss from the system which, being dependent on the system voltage, is lumped together with the leakage effect. Normally leakage and corona effects are ignored since the effective shunt resistance is generally many times greater than the shunt capacitive reactance.

In the next chapter, effects of electric and magnetic fields on health were examined.

The action of human cells depends on the action of ions or charged particles. Calcium ions have a powerful influence on how a cell's membrane works, and on muscle contraction, egg fertilisation and cell division.

Magnetic fields can transfer energy to these ions, causing them to move faster. If a charged particle is exposed to a steady magnetic field, such as the earth's, it begins to adopt a circular motion at right angles to the applied field. If an oscillating magnetic field is applied parallel to the steady field, it can, if it is at the right frequency, transfer energy to the particle. The frequencies of alternating fields that cause resonance with the earth's own steady magnetic field, lie between 1 and 100 Hz.

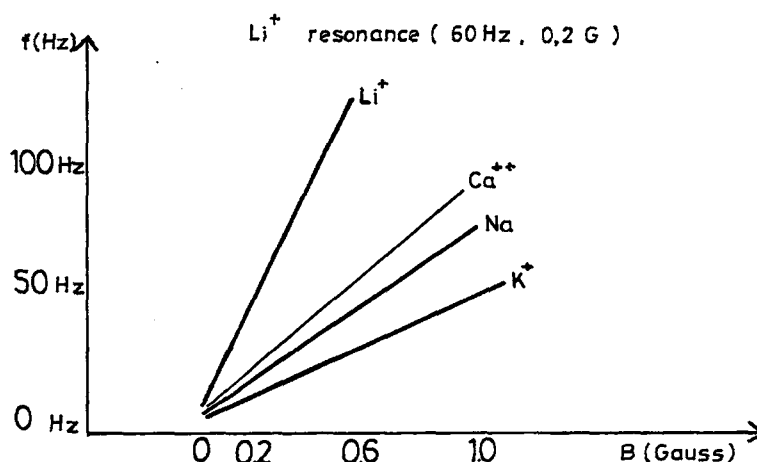


Fig.1. Steady Magnetic Field.

Whether these energised ions cause cancer has not been proved. Current opinion is that resonance does not initiate tumours, but may cause the conditions that promote them.

Table 1. Magnetic flux densities from 400 kV power transmission line.

Location	Magnetic flux density (μT)
● Maximum at ground level under 400 kV line	40
● 25 m from centreline of line	8
● Maximum at ground level above 400 kV underground cable	200
● At head height above underground cable	25
● 5 m lateral displacement from underground cable	10

Most of the reported findings of associations between the occurrence of a disease and electromagnetic fields are the results of epidemiologic studies and, therefore, depend on an understanding of the scientific principles involved. In brief, epidemiology is the study of how disease is distributed and how various factors determine this distribution. The ideal way to look at the risks and causes of human disease is to study human beings themselves.

The issue disappeared from the news until 1979 when Nancy Wertheimer, an epidemiologist at the University of Colorado, examined the relationship between childhood cancers and the proximity of transmission lines. She found that fields of 300 nT from power lines produced an abnormal number of childhood cancers. But critics dismissed these results because statistical error could not be ruled out.

Since that time, several other studies have explored associations between various measures of residential electric and magnetic fields exposures and cancer risk. A large number of studies have also examined cancer risk among adults with respect to occupational electromagnetic fields exposures. In the occupational studies, exposure has been assessed for the most part by the identification of persons who have worked in electrical occupations and industries. Among both children and adults, the focus has narrowed to brain cancer, leukaemia, and adult male breast cancer.

In brief, investigators are in agreement that the ascertainment of true relevant exposure in electric and magnetic fields studies is subject to considerable misclassification that could generate systematic underestimation of the relative risk.

Thus, it can be inferred that the relative risks linking electromagnetic fields to childhood cancers, if truly elevated, should in fact be much higher than the empirically derived relative risks, unless they have been biased upward by other methodologic shortcomings such as control selection bias. Electricity consumption increased exponentially in this century. If a rapidly increasing wide spread exposure were indeed strongly associated with childhood cancers, and if no strong countervailing trends in other risk factors were occurring, we should be witnessing an observable epidemic of childhood cancers. However, there is little, if any, evidence of such an epidemic of childhood cancer.

One of the most difficult and complicated areas of research is that of reproductive risks. Because all reproductive problems have multiple and frequently interrelated causes and putative causes.

One difficulty in predicting the effect that an environmental exposure, such as from electric and magnetic fields, may have on the developing embryo stems from the normally observed variation in the incidence of embryonic and fetal loss with the stage of gestation.

One approach in evaluating environmental hazards is to determine whether there is any correlation between the incidence of the disease or diseases in question and changes in exposure. Electric power generation and residential consumption of power during in this century have increased by nearly three orders of magnitude. It is obvious that a large proportion, probably approaching 100%, of the population is exposed to electric and magnetic fields from electric power transmission and consumption. However reliable data are not available for evaluating secular trends for all of the reproductive effects. The three outcomes that would be appropriate for a trend analysis are birth defects, spontaneous abortions, and stillbirths. Of these, data dealing with the occurrence of birth defects are the most accurate and, as noted earlier regarding the lack of an association between childhood cancer and electric power transmission, do not show any increasing secular trend.

There are some studies that report a mutagenic effect, but the predominance of the reports indicates that electric and magnetic fields are not mutagenic agents, as are some reproductive toxins.

It has been suggested that many of the studies are negative because there is not only a threshold for some of these effects, but a ceiling as well. Thus, the concept has been introduced that electric and magnetic fields effects may have a narrow window of opportunity to produce biologic effects, but this aspect has not been adequately explored.

The suggested reproductive risks of electric and magnetic fields are not supported by the totality of the basic science and human studies that pertain to

reproduction. However, the fact that a reproductive effect may not seem biologically plausible and that adequate documentation of an increased risk has not been demonstrated in human studies does not mean that these concerns should be summarily dismissed.

Changes in behavior may be the initial signs of nervous system problems, but performance, which is observable represents more than just the action of the nervous system. It is often not possible to find structural damage under conditions that produce profound behavioral changes. The scientific literature has been evaluated with regard to possible electromagnetic fields effects with measures of both behavioral interactions and central nervous system activities. Studies of electric and magnetic fields, and their possible effects on both behavior and magnetic fields, and their possible effects on both behavior and the nervous system, have been conducted under a range of conditions, but the data on the relationship between measured effects in these two domains are extremely limited.

Although the detectability of an electric or magnetic field by the subject is neither a necessary nor a sufficient condition for health effects, an analysis of such stimulus functions could help elucidate mechanisms of action. Most of the literature involving human subjects shows that electric fields can be detected, but the mechanism or mechanisms of detection remain to be established. The results of several animal studies addressing the issue of avoidance of electric field exposure appear to support the conclusion that such effects, to the extent that they have been demonstrated, are small and of minor importance.

Over the past two decades, several investigators have addressed the problem of magnetic field effects on general activity, with equivocal results. At the level of the laboratory primate and the human research subject, there is little or no indication that magnetic fields have any significant effect on general activity.

The ability of electric and/or magnetic fields to influence the nocturnal production of melatonin has been examined. Each of these exposures, under certain circumstances, has been shown to change the nighttime production and secretion of melatonin in mammals, including humans. The magnitudes of the changes varied among the studies and have not been defined in reference to exposure parameters, nor have dose-response relationships been found.

The behavior of human subjects, as indicated by mood, daily life activities, reaction time, memory, time content of melatonin in the pineal and also in the blood because the hormone is quickly released from the cells of the gland.

This review indicates that there is no convincing evidence to support the contention that exposures to extremely low frequency electric and magnetic fields generated by sources such as household appliances and power transmission lines, but insufficiency of the data must not mean that the subject is completely negligible.

Table 2. Range of daily time-weighted average exposures of power industry workers to 60 Hz electric fields and magnetic flux densities.

Occupation	Range of mean magnetic flux densities (μ T)
● Distribution linemen	0,03-4,57
● Apparatus electricians	0,77-18,48
● Transmission lineman	0,15-3,51
● Splicers	0,20-17,12
● Apparatus mechanics	0,03-5,17
● Generating stations assistant operators	0,18-1,72

Finally, a computer program, calculating the required distance of public facilities such as houses, schools, parks from the transmission lines due to the security limits of 200 nT magnetic field and 10 kV/m electric field that are accepted as security limits in several countries, was established in the study.

BÖLÜM 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Sanayileşmenin, ekonomik ve sosyal hayatın kısaca kalkınmanın en önemli unsurlarından biri olan elektrik enerjisinin; üretimi, iletimi ve kullanılması sırasında meydana gelen elektromagnetik alanların oluşturduğu iddia edilen biyolojik etkiler son günlerde yazılı ve sözlü basının da tesiriyle kamuoyunun ilgi odağı haline gelmiştir.

Elektromagnetik alan içinde bulunan bir kimseye çarpan dalgalar, alanın şiddetine, frekansına, insanın vücut ölçülerine ve organlarının elektriksel özelliklerine bağlı olarak dağılma, yutulma veya yansımaya uğrarlar. Elektromagnetik enerjinin biyolojik etkileri dikkate alınırken iki noktanın gözden kaçırılmaması gerekir. İlki elektromagnetik enerjinin kişisel ve toplumsal kullanımında ortaya çıkan relatif riskten elde edilecek kâr-zarar karşılaştırılmasının sonucunda kişilerin alabileceği tedbirler, ikincisi toplumun yapacağı girişimler ve özellikle de çevrenin elektromagnetik enerjiden kirlenmesine karşı tedbirler [1, 2].

Kullanılan teknolojik ürünlerin çoğu, faydaları zararlarından çok olduğu için kullanılmaya devam edilmektedir. Gerek iletim hatları gerekse iyonosferden yansıyan dalgalar veya televizyon-radyo yayınları ile çevrenin elektromagnetik enerji ağı ile kuşatılmış olması nedeniyle elektromagnetik alanların etkisinden kaçınabilmek mümkün değildir.

Konu hakkında yapılan önceki çalışmaların bazıları negatif, bazılarında da aynı sonuçları tekrar bulmak mümkün olmadığından son on yıl içinde yapılan çalışmalar nispeten daha güven vericidir.

Bu zamana kadar elektromagnetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkileri konusunda yapılan araştırmalardan elde edilen bulgular her ne kadar yeterli görülme de insan organizmasının bahsedilen bu alanlardan etkilenebileceği düşüncesi bu çalışmanın yapılmasına neden olmuştur.

BÖLÜM 2. ENERJİ İLETİMİ

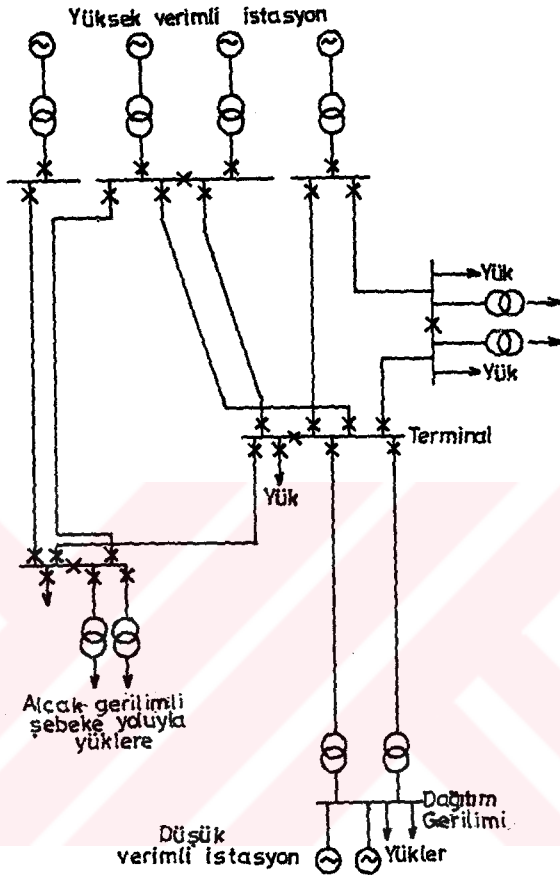
Genel anlamda iletim, gücün yüksek gerilim hatları vasıtasıyla ana yük merkezleri arasındaki transferi olarak tanımlanır. İletim hatları, gönderici merkezle alıcı merkez arasında herhangi bir tüketiciye dağıtım yapmadan gücü taşır. Bunun aksine dağıtım hatları veya dağıtıcı kaynaklar direkt olarak gücü hat boyunca kısa mesafelerdeki tüketicilere dağıtır. Bu nedenle dağıtım sistemleri için gerilim $\pm$ %6 oranında değişirken, iletim hatlarında bu sınırlama yükün durumuna göre %10 hatta %15'e kadar çıkabilir [3, 4, 5].

Enerji iletim hatları, havai hatlar, yeraltı kabloları veya her ikisinin karışımından oluşur.

Bir iletim hattının temel parametreleri hattın seri ve şönt dirençleri, seri indüktansı ve şönt kapasitesinden oluşur. Hat akımını taşıyan seri endüktans hattaki akımdan dolayı meydana gelen magnetik alan nedeniyle oluşur. Kapasite ise sistem gerilimi dolayısıyla oluşan elektriksel alana bağlı olarak meydana gelir ve sistem gerilimi karşısında şönt bir devre elemanı gibi görünür [6].

İletim hatları kısa ve uzun hatlar olarak sınıflandırılabilir. Kısa hatlar bütün şönt etkilerin ihmal edildiği hatlar olarak tanımlanır. Bu nedenle kısa hatlar seri bir eşdeğer devreyle basit bir şekilde sembolize edilebilir. Bu yaklaşım 80 km'ye kadar olan hatlar için kullanılır. Uzun hatların yaklaşık çözümünde ise bütün şönt etkilerin hat boyunca seçilmiş bir kaç noktada toplandığı kabulü yapılır. Örneğin şönt etkilerin hepsinin ortada kabul edildiği devreler nominal T (te) devresi, şönt etkilerin her iki uçta toplandığı devreler ise nominal π (pi) devresi olarak adlandırılır. Her iki devrenin de hemen hemen aynı toplam seri empedansa ve şönt admitansa sahip olduğunu vurgulamak için nominal sözcüğü kullanılır. Nominal devreler, uzun hatları hassas bir şekilde gösteren T ve π eşdeğer devreleriyle karıştırılmamalıdır [3, 6].

Şekil 2.1'de güç sisteminin bir bölümü şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Bir güç sisteminin bir bölümü.

BÖLÜM 3. İLETİM HATTININ ENDÜKTANSI

3.1. Giriş

Bir devreden geçen akım devrede magnetik bir akı meydana getirir. Bu akı sebebiyle bir elektromotor kuvvet oluşur. Oluşan bu kuvvet akı miktarıyla doğru orantılıdır. Magnetik akı genellikle devreyi meydana getiren iletkenler tarafından kuşatılan yüzey üzerindeki akı yoğunluğu integre edilerek hesaplanır. Eğer devre bobin şeklindeyse her sarım için ayrı ayrı hesaplanır ve bulunan değerler toplanarak toplam akı elde edilmiş olur. Yani ortalama olarak herbir sarımın akısı bulunur ve sarım sayısıyla çarpılırsa toplam akı bulunmuş olur. Bazı durumlarda ise iletkenlerden geçen akım devrenin bir bölümünde kaçak akı meydana getirir [3, 5].

Eğer ani oluşan akı ϕ wb (weber) ise ve bu devrenin bütün sarımlarına etkiyorsa, kaçak akı ϕN weber-sarım olur. Bu devrede oluşan elektromotor kuvvet (e.m.f.) $e = -d(\phi N)/dt$ volt olur. Genellikle bobindeki sarım sayısı sabitse bağıntı $e = -N (d\phi/dt)$ şeklini alır. Örneğin bir sarımdaki akının değişim oranı 1 weber-sarım/s ise ani elektromotor kuvvet 1 volt olur. İfadedeki (-) işareti akının oluşumuna neden olan etkiye ters yönde olduğunu göstermek içindir [3, 7].

Eğer ϕN , N sarımlı devredeki akımla doğru orantılı ise orantı sabiti L H (Henry) olmak üzere $\phi N = Li$ şeklinde bir ifade elde edilir. Örneğin devre 1 H'lik bir öz endüktansa sahipse devredeki 1 amperlik akım değişimi 1 weber-sarımlık kaçak akıya neden olur. Bu durumda devrenin kendi endüktansının oluşturduğu elektromotor kuvvet $e = -d(Li)/dt$ volt olur. Eğer L sabitse $e = -L(di)/dt$ şekline gelir [5, 8].

Devre ferromagnetik malzeme içerdiği zaman magnetik akı akımla doğru orantılı olmadığından $d((\phi N)/dt)$ olarak da yazmak mümkün olmayacaktır. Eğer I etkin değerli, f frekanslı mıknatıslama akımı sinüsoidal olarak değişiyorsa bu durumda magnetik akı da sinüsoidal olarak değişir ve ϕN kadar bir etkin değere

sahip olur. Bu şartlarda oluşan elektromotor kuvvet ise $E=jwLI=jw\phi N$ volt şeklindedir. Burada $w=2\pi f$ rad/s ve endüktans

$$L=\frac{\phi N}{I} \quad (3.1)$$

şeklinde ifade edilir.

Alanın dağılım şekli dikkate alınarak magnetik devre kuralı uygulanabilir. Şöyle ki, kapalı bir alanda oluşan H magnetik alan şiddetinin çizgisel integrali devredeki toplam akıma eşittir. Yani

$$\oint H_x dx = IN \quad (3.2)$$

ifadesi elde edilir.

Tek bir iletkenin etkin değeri I amper olan bir akım geçtiği kabul edilirse ve bu iletkenin etrafında x yarıçaplı bir yörünge alınırsa bu durumda $I=2\pi x H_x$ olur. Burada H_x , H magnetik alan şiddetinin x yarıçaplı yörüngeye teğet olduğu noktalardaki değerini gösterir [3].

$$H_x = \frac{I}{2\pi x} \quad (3.3)$$

3.2. İki iletkenli Hatlar

Burada herbir iletkenin oluşturduğu magnetik akının devre indüktansına etkisi ayrı ayrı incelenecektir. Tek fazlı hat iletkenleri eşit yarıçapa sahip olduklarından herbiri devre endüktansının yarısını oluşturur.

Şekil 3.1'de iletken 2'deki $-I$ akımı geçici olarak ihmal edildiğinde sadece iletken 1'deki I akımının oluşturduğu magnetik akı çizgileri gösterilmektedir. Fakat iletken 2'nin r yarıçapı ihmal edilemeyeceğinden iletkenin eksenini boyunca bir akım geçecektir. Bu durumda iletken 1'deki I akımının, 1 ve 2 iletkenlerinin oluşturduğu devrede meydana getirdiği magnetik akı (3.3) eşitliği kullanılarak;

$$\frac{\mu_o I}{2\pi} \int_0^d \frac{dx}{x} \quad (3.4)$$

şeklinde yazılır.

Şekil 3.1. Yalnız 1 iletkenindeki I akımının oluşturduğu magnetik akı çizgileri.

3.2.1. İletken İçindeki Kaçak Akılar

Belli bir kesitte akım yoğunluğunun sabit olduğu kabul edilebilir. Ancak bu kabul aşağıdaki ihmallere yapıldığında geçerlidir [3, 4, 6].

- a) Yüksek akımların geçtiği hat kesitlerinde farkedilir olmasına rağmen 50 Hz de deri etkisi
- b) Çelik özdeki mıknatıslanmaya bağlı olarak meydana gelen düzensizlik
- c) İletken 2'deki -I akımından dolayı oluşan magnetik alanın iletken 1'de meydana getirdiği akım dağılımının etkisi

İletken 1'deki magnetik akının oluşturduğu akı çizgilerinin iletkenin eksenini etrafında yoğunlaştığı kabul edilebilir ve bu akı çizgilerinin herbiri toplam iletken akımının sadece bir bölümü tarafından oluşturulur. Örneğin x yarıçaplı çizgi ($x < r$ olmak üzere)

$$I_x = I \left(\frac{x^2}{r^2} \right) \quad (3.5)$$

akımı tarafından oluşturulur.

İletken içindeki kaçak akılar dikkate alındığında tek fazlı hatların endüktansı tek sarım için $L=\phi/I$, N sarım için $L=N\phi/I$ şeklinde ifade edilir.

Akı ve akımın sırasıyla $\delta\phi$ wb/m' lik ve δI A değerindeki elemantel kısımları iletken içinde bir dağılım oluşturunorsa magnetik alan içinde depolanan enerji $1/2.(LI^2)$ J (Joule) kadardır. Bu durumda iç öz endüktans iki değişik şekilde yazılabilir [3].

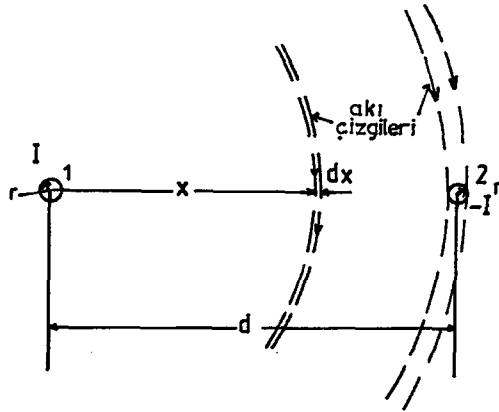
$$L_i = \frac{1}{I^2} \sum (\phi \delta I) \quad H/m \quad (3.6a)$$

$$L_i = \frac{1}{I^2} \sum (I_x \delta \phi_x) \quad H/m \quad (3.6b)$$

(3.6b) ifadesi magnetik akının $\delta\phi$ wb/m değerindeki elemanlara bölündüğü durumda kullanılır. Görüldüğü gibi herbir eleman kendisini oluşturan I_x akımıyla çarpılmıştır. İletken boyunca tüm elemanlar toplanmış, sonuç akımın karesine bölünmüştür. Aslında bu işlem bir sarımdaki toplam iletken akımı dikkate alınarak yapılmıştır. Dolayısıyla herbir $I_x \delta \phi_x$ 'in integrali alınarak toplam kaçak akı-akım bulunur. Tüm sarımdaki akıyı bulmak için sonuç I akımına bölünür. Endüktans için ise toplam kaçak akı akıma bölünür. Yani,

$$L = \frac{\int \text{Kaçak akı-akım}}{I^2} \quad (3.7)$$

ifadesi bulunur.



Şekil 3.2. İletken 1'in kesiti.

Şekil 3.2, Şekil 3.1'deki iletken çiftinden 1 nolu iletkenin kesitini göstermektedir. 1 nolu iletken d metre ($d \gg r$) uzaklıktaki dönüş iletkeni kesiti boyunca düzenli bir şekilde dağılmış I akımını taşır. Bu durumda x yarıçaplı ($x < r$) alanda oluşan magnetik akı yoğunluğu

$$B_x = \frac{\mu_o I_x}{2\pi x} \quad (\text{Tesla}) \quad (3.8)$$

şeklinde formüle edilir.

(3.5) nolu eşitlikten I_x bulunur ve (3.5) ifadesinde yerine konursa:

$$B_x = \frac{\mu_o I x}{2\pi r^2} \quad (\text{Tesla}) \quad (3.9)$$

eşitliği elde edilir.

Eğer akı x yarıçaplı, dx kalınlıklı ve 1 m uzunluğundaki halkalara bölünürse ve her bir parça $\delta\phi$ 'lik bir akı içeriyorsa:

$$\delta\phi = \frac{\mu_o I x dx}{2\pi r^2} \quad \text{wb} \quad (3.10)$$

olur.

x yarıçapındaki akım I_x ve iletkenin metre başına akısı $\delta\phi$ ise

$$I_x \delta\phi = \frac{\mu_o I^2 x^3}{2\pi r^4} dx \quad (3.11)$$

ifadesi metre başına kaçak akımlar cinsinden elde edilir.

Yani iletken 1'in kendi akımından dolayı oluşan dahili kaçak akıya bağlı olarak ve (3.6b) eşitliği kullanılarak

$$\begin{aligned} L_i &= \frac{\mu_o}{2\pi r^4} \int_0^r x^3 dx \\ &= \frac{\mu_o}{8\pi} = \frac{10^{-7}}{2} \quad \text{H/m} \end{aligned} \quad (3.12)$$

eşitliği bulunur.

3.2.2. İletken Dışındaki Kaçak Akılar

Şekil 3.1'de görüldüğü gibi x 'in, r ile $(d-r)$ aralığındaki değerleri için iletken 1'deki akımın tümü tarafından bir akı oluşturulur. $d-r < x < d+r$ olan bölgede oluşan akım 1'den 0'a düşer. r 'den d 'ye kadar olan bölgede akımın tümünden dolayı bir magnetik akı oluştuğu ve d 'den $(d+r)$ 'ye kadar hiç akım olmadığı kabulüyle, etkin harici endüktans (L_d), ihmal edilebilecek bir hatayla hesap edilebilir [3, 5].

1 nolu iletkenin x yarıçaplı, dx kalınlıklı ve 1 m. uzunluğundaki parçasında oluşan magnetik akı (3.3) eşitliğinden $(\mu_o I dx)/(2\pi x)$ şeklinde yazılabilir. Bu akımın $r < x < d$ için, tek sarımlı devredeki I akımı tarafından oluşturulduğu kabul edilirse ve (3.1) eşitliği de kullanılırsa;

$$L_d = \frac{\mu_o}{2\pi} \int_r^d \frac{dx}{x}$$

$$= \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{d}{r} \quad H/m \quad (3.13)$$

ifadesi bulunur.

$L_i + L_d$, iletken 1'deki akıma bağlı olarak meydana gelen toplam endüktansı verir. İletkenler eşit yarıçaplı kabul edildiğinden iletken 2'nin akımı $-I$ olup, tamamen diğerine benzer ve aynı fazda bir magnetomotor (m.m.f) kuvvet oluşturur. Burada μ_o sabit olarak kabul edildiğinden kaçak akılar ve dolayısıyla endüktanslar direkt olarak toplanabilir. Dolayısıyla tek fazlı bir devrenin her metresi için toplam endüktans $2 (L_i + L_d)$ olur. Bu ifadenin yarısı bir iletkenin endüktansını verir.

$$L_i + L_d = L = \frac{\mu_o}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{d}{r} \right) + \frac{1}{4} \right] \quad H/m \quad (3.14)$$

Bu eşitlikten aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

a) Bu eşitlik bir iletkenin metre başına endüktansını verir.

b) Bütün devrenin endüktansının hesaplanmasında kullanılır. Burada hem gidiş hem dönüş iletkeni söz konusu olduğundan kullanılan uzunluk devre uzunluğunun iki katıdır.

Dolayısıyla (3.14) eşitliğini tekrar yazmak gerekirse

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{d}{r_m} \quad H/m \quad (3.15)$$

elde edilir.

İfadede $r_m = r \cdot e^{-1/4}$ şeklinde tanımlanan yeni bir terim kullanıldı. r_m iletkenin geometrik yarıçapı olarak adlandırılır. (3.15) ve (3.13) eşitlikleri karşılaştırılırsa dahili kaçak akılar ihmal edilebildiğinden r_m iletkenin etkin yarıçapı olarak kabul edilebilir.

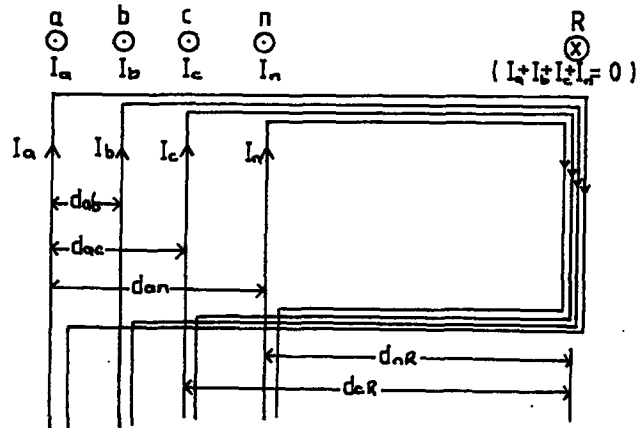
Eğer r_1 ve r_2 yarıçaplı ve d açıklıklı iki iletken varsa dış akı tarafından oluşturulan ortalama endüktans

$$\frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{d}{\sqrt{r_1 r_2}} \quad H/m$$

şeklindedir.

3.3. Çok İletkenli Sistemler

Çok iletkenli sistemler olarak üç fazlı tek devreli iletim hatları ele alınacaktır. Genellikle de ayrı olacak 3 veya 4 iletkenli sistemler incelenecektir [7].



Şekil 3.3. Toprak hatlı, hayali dönüş iletkenli, tek devreli üç fazlı hatlar.

Şekil 3.3 n nötr iletkenli, $I_a + I_b + I_c + I_n = 0$ olan havai hattı göstermektedir. Eğer R hayali bir dönüş iletkeni ise, dört akımdan her birinin I_a akımının a ve R'den, I_b akımının b ve R'den oluşan devrelerde dolaştığı gibi tek sarımlı bir devrede dolaştığı kabul edilebilir. R'deki akım her zaman sıfır olduğu için bu iletken hayali bir iletkenidir ve gerçek iletkenlere göre pozisyonu keyfi olarak seçilebilir. Bütün devreler tek sarımlı olduğu için herhangi bir devredeki kaçak akı devrede oluşan akıya eşittir [5, 7].

(3.1) ve (3.15) eşitlikleri kullanılarak a iletkenindeki I_a akımının a ve R'den oluşan devrede oluşturduğu akı

$$\phi'_a = \frac{\mu_o I_a}{2\pi} \ln \frac{d_{aR}}{r_m} \quad \text{wb/m} \quad (3.16)$$

şeklinde bulunur.

Tüm faz iletkenlerinin geometrik yarıçapı r_m , nötr iletkeninin yarıçapı ise r'_m ile gösterilir.

b iletkenindeki I_b akımının aynı devrede oluşturduğu akı ϕ''_a ile sembolize edilir. I_b akımı, merkezleri b iletkeni ekseninde bulunan, yarıçapı d_{ab} ile d_{bR} arasında sınırlı olan dairesel magnetik akı çizgileri oluşturur. Dolayısıyla

$$\phi''_a = \frac{\mu_o}{2\pi} I_b \ln \frac{d_{bR}}{d_{ab}} \quad \text{wb/m} \quad (3.17)$$

eşitliği bulunur.

(3.16) ve (3.17) eşitlikleriyle birlikte I_c ve I_n de hesaba katıldığında, a ve R devresindeki toplam akının etkin değeri,

$$\phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi} \left(I_a \ln \frac{d_{aR}}{r_m} + I_b \ln \frac{d_{bR}}{d_{ab}} + I_c \ln \frac{d_{cR}}{d_{ac}} + I_n \ln \frac{d_{nR}}{d_{an}} \right) \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} \phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi} & \left(I_a \ln \frac{1}{r_m} + I_b \ln \frac{1}{d_{ab}} + I_c \ln \frac{1}{d_{ac}} + I_n \ln \frac{1}{d_{an}} \right. \\ & \left. + I_a \ln d_{aR} + I_b \ln d_{bR} + I_c \ln d_{cR} + I_n \ln d_{nR} \right) \end{aligned} \quad (3.19)$$

olarak elde edilir.

(3.19) eşitliğinde son terimdeki I_n yerine $I_n = -(I_a + I_b + I_c)$ ifadesi konursa

$$\begin{aligned} \phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi} & \left(I_a \ln \frac{1}{r_m} + I_b \ln \frac{1}{d_{ab}} + I_c \ln \frac{1}{d_{ac}} + I_n \ln \frac{1}{d_{an}} \right. \\ & \left. + I_a \ln \frac{d_{aR}}{d_{nR}} + I_b \ln \frac{d_{bR}}{d_{nR}} + I_c \ln \frac{d_{cR}}{d_{nR}} \right) \end{aligned} \quad (3.20)$$

eşitliği bulunur.

Sembolik iletken olan R'nin fiziksel bir anlamı olmadığından rastgele bir pozisyona sahip olabilir. Eğer bu iletken gerçek iletkenlerden fazla uzaklaştırılırsa (3.20) eşitliğinin son üç terimi 0'a yaklaşır. Ayrıca R eğer sonsuzda alınırsa her dört iletkenin bu noktaya olan uzaklığı eşit kabul edilebilir. Bu durumda ϕ_a :

$$\phi_a \approx \frac{\mu_o}{2\pi} \left(I_a \ln \frac{1}{r_m} + I_b \ln \frac{1}{d_{ab}} + I_c \ln \frac{1}{d_{ac}} + I_n \ln \frac{1}{d_{an}} \right) \quad (3.21)$$

şeklinde tanımlanır.

Diğer iletkenlerdeki akıları bulmak için örneğin ϕ_b yazılmak istenirse a ile b, ϕ_c için a ile c yer değiştirir. Bu yolla ϕ_b , ϕ_c ve ϕ_d (3.21) eşitliğindeki gibi yazılabilir [3, 8].

$$\phi_b \approx \frac{\mu_o}{2\pi} \left(I_a \ln \frac{1}{d_{ba}} + I_b \ln \frac{1}{r_m} + I_c \ln \frac{1}{d_{bc}} + I_n \ln \frac{1}{d_{bn}} \right) \quad (3.22)$$

$$\phi_c \approx \frac{\mu_o}{2\pi} \left(I_a \ln \frac{1}{d_{ca}} + I_b \ln \frac{1}{d_{cb}} + I_c \ln \frac{1}{r_m} + I_n \ln \frac{1}{d_{cn}} \right) \quad (3.23)$$

$$\phi_n \approx \frac{\mu_o}{2\pi} \left(I_a \ln \frac{1}{d_{na}} + I_b \ln \frac{1}{d_{nb}} + I_c \ln \frac{1}{d_{nc}} + I_n \ln \frac{1}{r'_m} \right) \quad (3.24)$$

buradan matris formuna geçilirse:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_n \end{bmatrix} = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \begin{bmatrix} \frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{ab}} & \frac{1}{d_{ac}} & \frac{1}{d_{an}} \\ \frac{1}{d_{ba}} & \frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{bc}} & \frac{1}{d_{bn}} \\ \frac{1}{d_{ca}} & \frac{1}{d_{cb}} & \frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{cn}} \\ \frac{1}{d_{na}} & \frac{1}{d_{nb}} & \frac{1}{d_{nc}} & \frac{1}{r_{m'}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

ifadeye bakıldığında her bir iletken üzerinde oluşan akı, bu iletkendeki ve diğer iletkenlerdeki akımdan dolayı oluştuğu görülür. Ayrıca köşegendeki terimler bir öz endüktans etkisinin olduğunu gösterir.

ϕ_a , a ve R'den oluşan devredeki magnetik akıdır. Fakat R iletkeninin fiziksel bir anlamı olmadığından a-R devresinin self endüktansı a iletkeninin öz endüktansıdır ve L_{aa} ile gösterir. Benzer şekilde a-R ve b-R devreleri arasındaki ortak endüktans L_{ab} de a ve b iletkenleri arasındaki endüktanstır. İki devre arasındaki ortak endüktanslar karşılıklıdır. Örneğin $L_{ab}=L_{ba}$, $L_{ac}=L_{ca}$ gibi [8,9].

İki iletkenli bir iletim hattı etkin bir şekilde tek sarımlı bir devre olarak kabul edildiğinden (3.25) eşitliği, (3.1) eşitliği ve ortak endüktanslar da dikkate alınarak tekrar düzenlenirse:

$$\begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \\ \phi_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{an} \\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bn} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_{cc} & L_{cn} \\ L_{an} & L_{bn} & L_{cn} & L_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_n \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

şeklindeki matris elde edilir.

Genellikle nötr iletkeni üç fazlı hatları direkt yıldırım darbelerine karşı korumak için hatların üzerinde sürekli olarak bulunan bir toprak anteni görevi yapar. Nötr hattının endüktansının dikkate alınmasına gerek yoktur. Bunun nedeni hat iletkenlerinin pozitif ve negatif sistem akımlarıdır. Üç hattın akımlarının toplamı

sıfırdır. Aynı zamanda toprak hattı nötr akımı taşımaz. Yalnız üç iletkenli hattın magnetik akılarından dolayı oluşan endüksiyon bir akıma neden olur. Ancak bu çok küçük olduğundan ihmal edilebilir [5, 8].

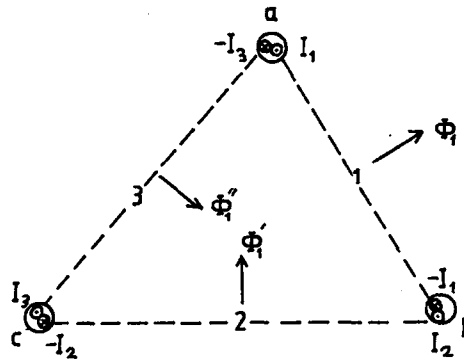
Pozitif veya negatif sistem endüktansı hesaplanırken toprak yüzeyi ihmal edilebilir. Şöyle ki toprak mükemmel bir iletken yüzey olsa bile -ki öyle değil- tek faz hattı için (3.15) eşitliğine ek olarak

$$-\frac{\mu_o}{2\pi} \ln \left(\frac{d'}{2h} \right)$$

terimini getirir. Ancak bu terim (3.15) eşitliğiyle karşılaştırıldığında çok küçük bir değer olduğu görülür. Burada d' iletken 1 ile iletken 2'nin görüntüsü arasındaki uzaklık, h iki iletkenin topraktan olan uzaklığıdır.

3.4. İletkenin Etkin Öz Endüktansı

Şekil 3.4'de üç fazlı üç iletkenli bir sistem gösterilmektedir. Herbir ab, bc ve ca iletken çiftlerinin sarımlı olduğu ve gidiş-dönüş devresi gibi davrandığı kabul edilebilir. Bu devrelerin herbiri üçgen bağlı yüke sırasıyla I_1 , I_2 ve I_3 akımlarını taşırlar. Yüğü besleyen hat akımları dengeli veya dengesiz olabilirler ve $I_a = I_1 - I_3$, $I_b = I_2 - I_1$, $I_c = I_3 - I_2$ şeklindedir [5, 7].



Şekil 3.4. Üç fazlı üç iletkenli sistem.

1.devrenin L_{11} öz endüktansı, a'daki 1 A değerindeki akımla b'deki -1 A değerindeki akımların o devrede oluşturduğu kaçak akıya eşittir. a iletkenindeki 1 A değerindeki akımın 1.devrede oluşturduğu kaçak akı $L_{aa}-L_{bb}$, b iletkenindeki -1 A değerindeki akımın 1.devrede oluşturduğu kaçak akı $L_{bb}-L_{ab}$ 'dir [5, 7].

Sonuç olarak, $L_{11}=L_{aa}+L_{bb}-2L_{ab}$ şeklindedir. Ayrıca (3.25) ve (3.26) eşitlikleri kullanılarak

$$L_{11} = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{d_{ab}}{r_m} \quad H/m \quad (3.27)$$

ifadesi elde edilir.

L_{13} ab ve ac devreleri arasındaki ortak endüktanstır. a iletkenindeki 1 A değerindeki akımın ac devresinde oluşturduğu kaçak akı $L_{aa}-L_{ac}$ 'ye, b iletkenindeki -1 A değerindeki akımın aynı devrede oluşturduğu kaçak akı da $L_{bc}-L_{ab}$ 'ye eşittir. Yani

$$L_{13} = L_{aa} + L_{bc} - L_{ab} - L_{ac} \quad (3.28)$$

ifadesine eşittir.

a iletkeninden geçen akım I_1 , b iletkenindeki akım $-I_1$ ve $I_1=1$ A. ise; 1,2 ve 3 devrelerinde oluşan akıların yönü Şekil 3.4'de gösterilmiştir. Başka akı yolu olmadığından $\phi_1=L_{11}$, $\phi_1'=L_{12}$, $\phi_1''=L_{13}$ ve $L_{11}=L_{12}+L_{13}$ şeklindedir.

I_1 , I_2 ve I_3 akımları, üç devrede gösterildiği gibi aktığında 1 nolu devrede oluşan akı $L_{11}I_1-L_{12}I_2-L_{13}I_3$ şeklindedir. L_{11} yerine $(L_{12}+L_{13})$ konularak 1 nolu devrede oluşan akı

$$L_{12}(I_1-I_2)+L_{13}(I_1-I_3)=-L_{12}I_2+L_{13}I_3 \quad (3.29)$$

olarak elde edilir.

Üç fazlı bir iletim hattında akımlar dengeli olsun veya olmasın $I_a+I_b+I_c=0$ 'dır. Dolayısıyla her bir faz iletkeninin öz endüktansı olduğu kabul edilebilir [3].

$$\begin{aligned}
&\text{a iletkeninin etkin öz endüktansı } L_{a'a}=L_{13} \\
&\text{b iletkeninin etkin öz endüktansı } L_{b'b}=L_{12} \\
&\text{c iletkeninin etkin öz endüktansı } L_{c'c}=L_{23}
\end{aligned} \tag{3.30}$$

(3.28) nolu eşitlikten

$$L_{a'a}=L_{13}=L_{aa}+L_{bc}-L_{ab}-L_{ac} \tag{3.31}$$

(3.25) ve (3.26) ifadelerindeki değerler kullanılarak:

$$L_{a'a}=\frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{d_{ab}.d_{ac}}{r_m.d_{bc}} H/m \tag{3.32}$$

$$L_{b'b}=\frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{d_{bc}.d_{ba}}{r_m.d_{ac}} H/m \tag{3.33}$$

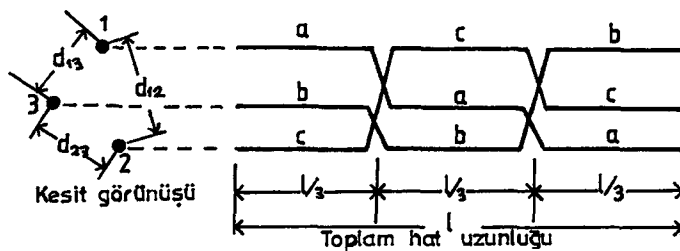
benzer şekilde

$$L_{c'c}=\frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{d_{bc}.d_{ac}}{r_m.d_{ab}} H/m \tag{3.34}$$

elde edilir.

3.5. Çarpazlanmış Üç Fazlı Tek Devreli Hatların Pozitif Veya Negatif Sistem Endüktansı

Eğer hat yeteri kadar uzunsa ve fazlar arası endüktansdaki dengesizlik çok büyükse hatlar çarpazlanabilir. Çarpazlama ile faz iletkenleri yerlerini değiştirmiş olur. Herbir faz iletkeni hattın 1/3'ü uzunluğunda yer değiştirerek 1, 2 ve 3 pozisyonlarının herbirinde yer alır. Bu durum Şekil 3.5'de gösterilmiştir [3, 5].



Şekil 3.5. Çarpazlanmış iletkenler

a faz iletkeni boyunca metre başına ortalama kaçak akı ϕ_a 'dır. (3.25) ifadesindeki d_{ab} , d_{bc} ve d_{ac} yerine d_{12} , d_{23} ve d_{13} yazılırsa

$$\begin{aligned}\phi_a &= \frac{\mu_o}{2\pi} \frac{1}{3} \left(I_a \ln \frac{1}{r_m} + I_b \ln \frac{1}{d_{13}} + I_c \ln \frac{1}{d_{12}} + \right. \\ &\quad \left. I_a \ln \frac{1}{r_m} + I_b \ln \frac{1}{d_{23}} + I_c \ln \frac{1}{d_{13}} + \right. \\ &\quad \left. I_a \ln \frac{1}{r_m} + I_b \ln \frac{1}{d_{12}} + I_c \ln \frac{1}{d_{23}} \right) \quad (3.35) \\ &= \frac{\mu_o}{2\pi} \left[I_a \ln \frac{1}{r_m} + (I_b + I_c) \ln \frac{1}{\sqrt[3]{(d_{12}d_{23}d_{13})}} \right]\end{aligned}$$

Sistemde toprak hatası olmadığı ve sadece pozitif ve negatif sistem akımları olduğunda $I_b + I_c = -I_a$ ve

$$\phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi} I_a \ln \frac{D_m}{r_m} \quad (3.36)$$

Burada $D_m = \sqrt[3]{(d_{12}d_{23}d_{13})}$ ve buna iletkenler arası geometrik uzaklık denir.

Sonuçta üç fazlı bir hattın faz iletkenlerinin herbirinin öz endüktansı fazların dönme yönünden bağımsızdır. Dolayısıyla pozitif ve negatif sistem akımları için aynıdır. Yani

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{D_m}{r_m} \quad H/m \quad (3.37)$$

D_m/r_m çok yüksek gerilimli hatlarda 300 ile 400 arasında olduğundan üç fazlı bir hattın üç iletkeninden herbirinin endüktansı 1,2 mH/km. civarındadır.

3.6. Çaprazlanmış Üç Fazlı Tek Devreli Hatların Sıfır Sistem Endüktansı

Sıfır sistem akımı $I_a = I_b = I_c = I_o$ 'dır. $3I_o$ dönüş akımının faz iletkenleri üzerindeki koruma hattından akmayıp, tamamının faz iletkenlerinin altında D_e derinliğindeki dönüş iletkenine eşit olan toprağa aktığı kabul edilebilir. $D_e \gg d_{ab}$, d_{bc} veya d_{ac} ve D_e her üç faz iletkeninin dönüş iletkenine eşit toprağa olan uzaklığını gösterir [3, 9].

$D_e \approx k \sqrt{\rho/f}$ ve burada ρ toprak özgül direnci olup çok değişken bir değere sahiptir. Toprağın yapısına göre ρ değerleri aşağıdaki gibidir.

Toprağın Yapısı	ρ ($\Omega.m$) büyüklüğü
Bataklık zemin	10-100
Kuru toprak	1000
Kaygantaş	10^7
Kum	10^9

f şebeke frekansıdır ve örneğin 50 Hz'lik frekansta

$$D_e \approx 93 \cdot \rho^{1/2} \text{ m.}$$

Şekil 3.5'de gösterilen çaprazlanmış pozisyonlardan ilki için; $d_{ab} = d_{13}$, $d_{ac} = d_{12}$ ve $d_{bc} = d_{23}$ olduğu zaman, kaçak akılar (3.25) nolu eşitlikten yararlanarak

$$\begin{bmatrix} \phi_{a'} \\ \phi_{b'} \\ \phi_{c'} \end{bmatrix} = \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \begin{bmatrix} \frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{13}} & \frac{1}{d_{12}} & \frac{1}{D_e} \\ \frac{1}{d_{13}} & \frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{23}} & \frac{1}{D_e} \\ \frac{1}{d_{12}} & \frac{1}{d_{23}} & \frac{1}{r_m} & \frac{1}{D_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_o \\ I_o \\ I_o \\ -3I_o \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

şeklinde yazılır.

2. çaprazlama pozisyonu için $d_{ab}=d_{23}$ olduğundan

$$\phi_a'' = \frac{\mu_o}{2\pi} I_o \left(\ln \frac{1}{r_m} + \ln \frac{1}{d_{23}} + \ln \frac{1}{d_{13}} - 3 \ln \frac{1}{D_e} \right) \quad (3.39)$$

3. pozisyonda

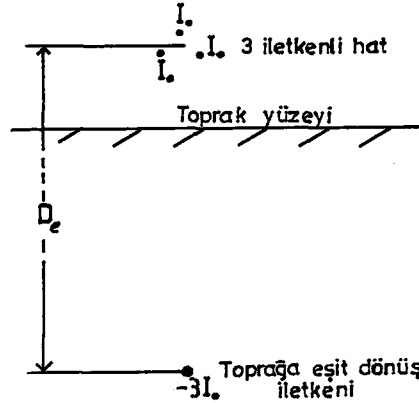
$$\phi_a''' = \frac{\mu_o}{2\pi} I_o \left(\ln \frac{1}{r_m} + \ln \frac{1}{d_{12}} + \ln \frac{1}{d_{23}} - 3 \ln \frac{1}{D_e} \right) \quad (3.40)$$

a faz iletkenindeki ortalama kaçak akılar

$$\frac{1}{3} (\phi_a' + \phi_a'' + \phi_a''') = \frac{1}{3} \frac{\mu_o I_o}{2\pi} \left(3 \ln \frac{D_e}{r_m} + 2 \ln \frac{D_e^3}{d_{12} d_{23} d_{13}} \right) \quad (3.41)$$

$$= \frac{1}{3} \frac{\mu_o}{2\pi} I_o \ln \frac{D_e^9}{r_m^3 D_m^6}$$

şeklindedir.



Şekil 3.6. Toprağa eşit dönüş iletkenli sıfır sistem akımı taşıyan üç iletkenli hat.

Sonuç olarak faz iletkenlerinden herbirinin sıfır sistem endüktif reaktansı

$$x_o = 2 \pi f \left(3 \frac{\mu_o}{2\pi} \ln \frac{D_e}{\sqrt[3]{r_m D_m^2}} \right) \Omega/m \quad (3.42)$$

Genellikle sıfır sistem reaktansı pozitif sistem reaktansı X_n 'in 2 ile 3,5 katı arasındadır. Tek devreli hatlar için

$$\ln \frac{D_e}{\sqrt[3]{r_m D_m^2}}$$

değeri (3.37) eşitliğindeki $\ln D_m/r_m$ değerinden çok farklı değildir. Toprak iletkeni olduğu durumdaki D_e değeri olmadığı durumdakine göre etkin bir şekilde azalır. Buna bağlı olarak faz iletkenlerindeki akımın meydana getirdiği magnetik alan da azalır. Örneğin toprak hattı varken X_0 , $2X_1$ değerinde iken toprak hattı yoksa $3,5X_1$ değerine çıkar. Çift devreli hatlar için X_0 , $3X_1$ değerinden $5,5X_1$ değerine yükselir [8, 9].

3.7. Çok Damarlı Çelik Özlü İletkenli Hatlar

Önceki bölümlerde hat iletkenlerinin magnetik olmayan homojen malzemeden ve tek damarlı olduğu kabulü yapılmıştı. Gerçekte bunlar homojen olmadığı gibi çoğunlukla da çelik öz içerirler. İletken hatlarda çok damarlı bakır veya çelik özlü alüminyum da kullanılır [5-7].

Herbir faz iletkeninin n adet damardan meydana geldiği ve herbir damarın da aynı akımı taşıdığı kabul edilir. Herbir damar için kaçak akı yazılır ve bir damarın ortalama indüktansı bulunur. Diğerleriyle paralel olduklarından (3.37) eşitliğiyle herbir faz iletkeninin ortalama endüktansı elde edilir.

Bu durumda geometrik uzaklık olan D_m , n damarlı bir faz iletkeninin n damarlı diğer faz iletkenlerine olan uzaklıklarının n^2 dereceden kök içinde çarpımlarına eşittir [3, 7, 8].

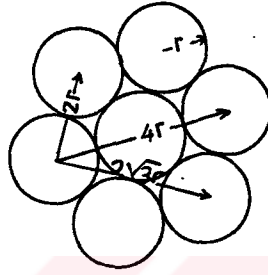
Geometrik uzaklık, $r.e^{-1/4}$ 'den uzun değildir, örneğin magnetik olmayan tek damar için $0,779r$ değerindedir. Her damar için geometrik yarıçap $r_m=0,779r$ olmak üzere n^2 dereceden kök içinde iletkendeki bir damardan diğer damarlara olan uzaklıklarının çarpımıdır.

Şekil 3.7'de 7 damarlı bakır veya alüminyum iletken kesiti gösterilmiştir.

$$r'_m = \sqrt[49]{[r_m \cdot (2r)^3 \cdot (2 \cdot \sqrt{3}r)^2 \cdot 4r]^6 [r_m \cdot (2r)^6]} \quad (3.43)$$

$$r'_m = r \sqrt[49]{2^{48} \cdot 3^6 \cdot 0,779^7} \quad (3.44)$$

$$r'_m = 2,177 r \quad (3.45)$$



Şekil 3.7. 7 telli iletken kesiti.

Örneğin bu iletkenin geometrik yarıçapı, tüm yarıçapın 0,7255 katıdır. Tel sayısı arttıkça oran 0,779'a yaklaşır. Örneğin 3 telli bir iletken bu oran 0,678'e, 169 telli bir iletken 0,777'ye yükselir.

Çelik özlü alüminyum kabloların endüktansı hesaplanırken teller bazen ihmal edilir. İlk olarak tellerin akım taşımadığı kabul edilir. Daha sonra tellerdeki akım için düzeltmeler yapılır. Bu tip hesaplamaların sonuçları standart tablolar şeklinde verilir.

BÖLÜM 4. İLETİM HATTLARININ KAPASİTESİ

4.1. Giriş

Aralarında yalıtkan olarak hava bulunan havai hat iletkenleri arasında bir kapasite oluşur. Öyleki bu kapasite nedeniyle yük olmadığı şartlarda bile hatta alternatif bir gerilim uygulandığında bir şarj akımı akar. Bu şarj akımı kaynak tarafında olup hat sonunda sifıra kadar düşer [3, 9].

Hattın yapısı faz başına iki iletkenli, çift devreli bir hat şeklinde olabilir. Bu 12 iletken bir veya iki toprak hattı demektir. Zaten toprak başlı başına komplike bir kapasite sistemi oluşturur. Buna ilâve olarak iletken çiftleri arasında ve iletkenlerle toprak arasında oluşan kapasiteler de dikkate alınmalıdır. Kapasitenin sabit durumdaki etkisinden daha çok nötre göre kapasitenin geçici şartlardaki etkisi önemlidir. Örneğin devre kesicilerin açılıp kapanması esnasında veya yıldırımdan dolayı meydana gelen yürüyen dalgaların olduğu durumlarda kapasitenin etkisi daha önemlidir.

Şekil 4.1'de eşit fakat karşıt yüklü iki uzun paralel iletken gösterilmiştir. Herbir akı çizgisi çifti belirli miktarda elektriksel akı taşıdığından alan için her noktada D elektriksel akı yoğunluğu vektörü belirlenebilir.

Bu noktada vektör için kullanılan işaret hakkında yorum yapılmalıdır. Çünkü ele alınacak pozisyona göre vektörün büyüklüğü ve yönü değişebilir.

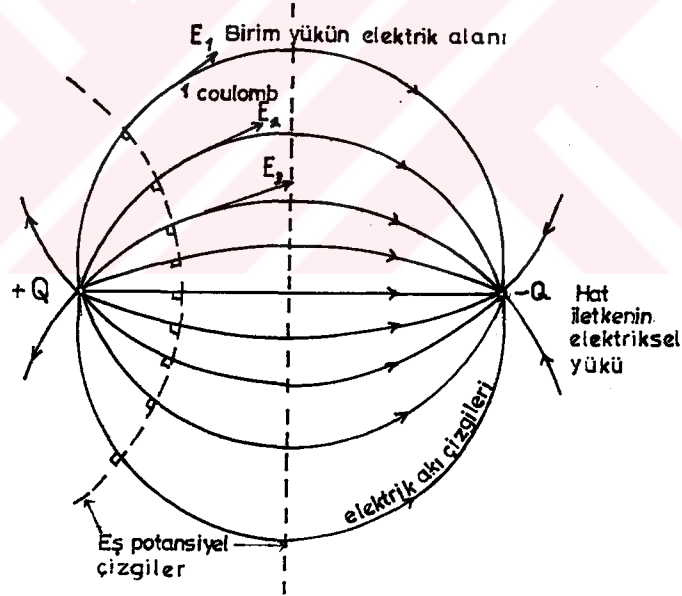
Alternatif gerilimle beslenen bir sistemde, yük, elektriksel akı yoğunluğu ve elektriksel alan sinüsoidal olarak değişir [3, 7].

Herhangi bir anda kapalı bir A yüzeyindeki toplam elektriksel akı, bu yüzey tarafından kuşatılan yüke eşittir. Yani D_n , " dA " yüzey elemanına normal olan akı yoğunluğu olduğuna göre

$$\int_A D_n \cdot dA = \sum Q \quad (4.1)$$

Burada $\sum Q$ yüzey tarafından kuşatılan toplam yükür.

Elektriksel alan içinde her noktanın sıfır potansiyeline göre skaler bir V potansiyeli vardır. Skaler büyüklük yöne göre değişmediğinden alanın her noktasında aynı değere sahiptir. İki nokta arasındaki potansiyel farkı, bir coulomb değerindeki pozitif bir yükün, elektriksel alana karşı bir noktadan daha pozitif yüklü başka bir noktaya doğru hareketi esnasında joule cinsinden yaptığı iş olarak tanımlanır. Sıfır potansiyeli rastgele bir şekilde örneğin sonsuzdaki bir potansiyel olarak seçilebilir. Güç iletim şebekelerinde, toprak mükemmel iletken olduğu için sıfır potansiyelli olarak kabul edilebilir. Hareketli yükün V/m cinsinden ölçülen elektriksel alan şiddetine karşı yaptığı iş, elektriksel alan şiddeti veya potansiyelin gradyanıdır. Yani; $E_x = -(\partial V / \partial x)$ şeklindedir. Burada ∂x bir uzaklık elemanını, baştaki eksi işareti ise, pozitif yüklü iletken olan uzaklığın gittikçe arttığını gösterir. Pozitif yük, pozitif yüklü iletken uzaklaştıkça bir kuvvet oluşturacağından, E pozitifken potansiyel azalır dolayısıyla $\partial V / \partial x$ negatif olur.



Şekil 4.1. İki hat iletkeni arasındaki elektriksel alan.

Şekil 4.1'den görüldüğü gibi E 'nin büyüklüğü ve yönü alan içinde noktadan noktaya değişir. $E_x = -(\partial V / \partial x)$ ifadesi integre edildiğinde $V = \int E dx$ elde edilir.

Şekil 4.1'de elektriksel alan içinde öyle çizgiler vardır ki bunlar üzerindeki herhangi bir anda potansiyeller aynıdır ve bu çizgilere eşpotansiyel çizgiler denir [3].

Alan içindeki herhangi bir noktada $D/E=\varepsilon$ ve $\varepsilon=\varepsilon_0.\varepsilon_r$ 'dir. ε_0 boşluğun dielektrik sabiti olup $1/36\pi \times 10^9 = 8.854 \times 10^{-12}$ F/m değerindedir. ε_r elektriksel alanın incelendiği ortamın boyutsuz bir özelliğidir ve bağıl dielektrik sabiti olarak adlandırılır. Vakum için $\varepsilon_r=1$ 'dir, normal sıcaklık ve basınçta hava içinde $\varepsilon_r \approx 1$ almak doğru sonuç verir.

Havada, r yarıçaplı, metre başına düzgün olarak yayılmış Q yüklü bir iletken ve bu iletkenle eşeksenli olan x yarıçaplı silindirik bir yüzey alınır, x 'deki akı yoğunluğu vektörü D_x yüzeye dik ve yüzey üzerinde sabittir. Dolayısıyla

$$D_x = \frac{Q}{2\pi x} \text{ C/m}^2 \quad (4.2)$$

$$E_x = \frac{Q}{2\pi \varepsilon_0 x} \text{ V/m} \quad (4.3)$$

$$= -\frac{\partial V}{\partial x}$$

Buradan

$$V = -\frac{Q}{2\pi \varepsilon_0} \ln x + K \quad (4.4)$$

Burada K integral sabitidir [3].

Eğer havada birden çok paralel iletken varsa bu iletkenlerdeki yüklerin yüzey boyunca düzgün olarak dağıldığı kabul edilirse; $Q_1, Q_2, \dots$ yüklerini taşıyan iletkenlerin eksenlerinden $x_1, x_2, \dots$ uzaklığında bir noktadaki potansiyel (4.4) eşitliğinden yararlanılarak bulunabilir.

$$V_x = -\frac{1}{2\pi \varepsilon_0} [Q_1 \ln x_1 + Q_2 \ln x_2 + \dots] + K \quad (4.5)$$

Benzer şekilde $y_1, y_2, \dots$ uzaklığında bir noktadaki potansiyel de

$$V_y = -\frac{1}{2\pi \varepsilon_0} [Q_1 \ln y_1 + Q_2 \ln y_2 + \dots] + K \quad (4.6)$$

olur. x ile y arasındaki potansiyel farkı yani gerilim

$$V_{xy} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[Q_1 \ln \frac{y_1}{x_1} + Q_2 \ln \frac{y_2}{x_2} + \dots \right] \quad (4.7)$$

ifadesi ile bulunur.

4.2. İki İletkenli Hatlar

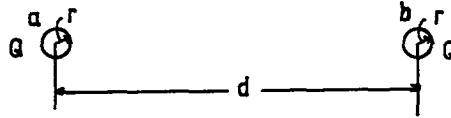
+Q ve -Q yükünü taşıyan iki iletken den x_1 ve x_2 uzaklığındaki alan içinde herhangi bir noktadaki potansiyel (4.5) eşitliğini kullanarak

$$V = -\frac{1}{2\pi\epsilon_0} (Q \ln x_1 - Q \ln x_2) = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{x_2}{x_1} \quad (4.8)$$

şeklinde yazılır.

Sonsuzda $x_1 = x_2$ ve $V = 0$ olduğundan $K = 0$ 'dır. x_1 ve x_2 iletkenlerin gerçek yarıçapından büyük olmalıdır, olmadığı durumda potansiyel sabit olur.

Oysaki (4.8) eşitliği potansiyelin değişken olduğunun ifadesidir. $x_1 = 0$ olduğu durumda eşitlikten potansiyelin sonsuz olduğu görülmektedir. Eş potansiyel çizgilerde $x_2/x_1 = \text{sabit}$ ve akı çizgileri eşpotansiyel çizgilere diktir. (4.8) ifadesi $x > r$ durumunda geçerli olduğundan iletkenler çok küçük yarıçaplı olarak alınamaz [5, 7].



Şekil 4.2. İki iletkenli hat.

Şekil 4.2'de herbiri r yarıçaplı ve birbirinden d uzaklıktaki a ve b iletkenleri gösterilmektedir. Eğer sadece a 'da Q yükü varsa ve b 'de yük yoksa ve b sonsuz incelikte ise eşpotansiyel çizgiler a eksenli silindirler şeklindedir. Sonlu yarıçaplı b iletkeni eşpotansiyeller arasında $2r$ genişliğinde bir bölge tanımladığından alanı bozar. Eğer b iletkeni alandan uzaklaştırılırsa veya sonsuz incelikte yapılırsa bu potansiyel b iletkeni eksenli silindrsel eşpotansiyel olarak alınabilir [3, 9].

İki nokta arasındaki potansiyel farkı, iki nokta arasında hareket eden bir birim yükün yaptığı işe eşit olduğundan, alan içinde iki nokta arasındaki yoldan bağımsızdır.

(4.3) eşitliği $+Q$ ve $-Q$ yükleri için $x=r$ 'den $x=d$ 'ye kadar ayrı ayrı integre edilip, bulunan sonuçlar toplandığında a ve b arasındaki göre potansiyel farkı V_{ab} elde edilmiş olur. Diğer bir yol da (4.8) eşitliğinde $x_1=r$ ve $x_2=d$ alınırsa birim uzunluk başına $+Q$ yükü için V_a potansiyeli $-Q$ yükü için de V_b potansiyeli bulunmuş olur.

$$V_a = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d}{r} \quad (4.9)$$

$$V_b = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{d} \quad (4.10)$$

ikisinin farkı alındığında

$$V_a - V_b = V_{ab} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d^2}{r^2} \quad (4.11)$$

$$V_{ab} = \frac{Q}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{d}{r} \quad (4.12)$$

İki iletken arasındaki metre başına kapasite,

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln d/r} \quad F/m \quad (4.13)$$

(4.13) eşitliği iletim hatlarına uygulanırken aşağıdaki kabuller yapılır.

a) d/r oranı arttıkça iletken yüzeyi boyunca olan yük, dağılımı düzgün olacağından, iletim hatlarının (4.13) eşitliğiyle kapasitesi hesaplanırken oluşacak hata da gittikçe küçülecektir. Yüksek gerilim iletim hatları için bu oran genellikle 300-400 arasında olduğundan oluşan hata ihmal edilebilir. Örneğin, başka bir iletkenin veya toprağın olmadığı iki iletkenli bir hat için (4.13) ifadesi

$$C = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln [d/2r + \sqrt{(d^2/4r^2 - 1)}]} \quad (4.14)$$

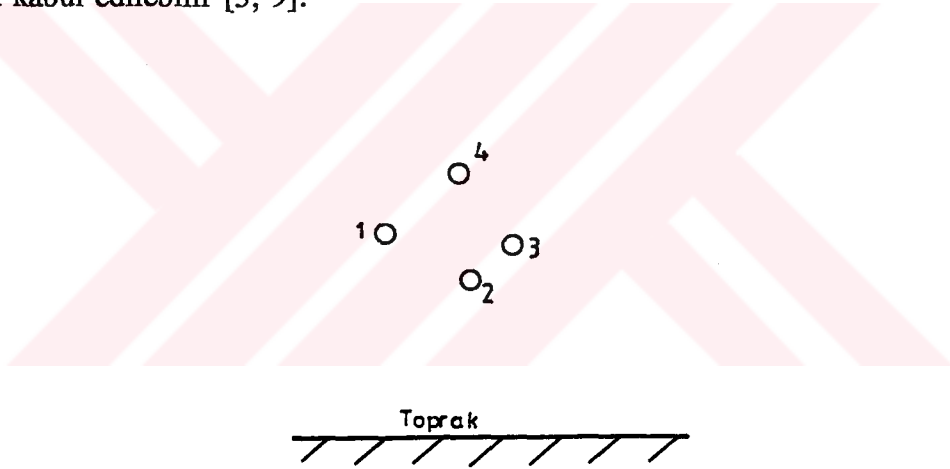
şeklini alır.

b) İntegralin bir sınırı olarak $(d-r)$ yerine iki iletkenin eksenleri arasındaki uzaklığı d kullanılır. Fakat bu ancak $d \gg r$ durumunda geçerlidir.

c) Çok telli bir iletkenin yarıçapı düzgün, silindirik bir iletkenin r yarıçapı yerine kullanılabilir iletkenin çok telli oluşuna bağlı olarak elektriksel alanın bozulması, sadece iletkenlerin birbirine çok yakın olduğu durumlarda sözkonusudur.

4.3. Çok İletkenli Sistemler

Şekil 4.3'de birbirine ve toprağa paralel durumdaki iletkenler gösterilmiştir. Toprağın ve eğer başlangıç olarak yüklü değilse iletkenlerin potansiyeli de sıfır olarak kabul edilebilir [3, 9].



Şekil 4.3. Sadece 4 iletkeniyle gösterilen çok iletkenli bir sistem.

Eğer Q_1 yükü topraktan 1 iletkenine taşınırsa tüm iletkenlerdeki potansiyel Q_1 ile orantılı olacaktır. Orantı sabiti p olarak alınırsa 1 iletkeninin toprağa göre potansiyeli $V'_{10} = P_{11}Q_1$ kadar yükselir. Diğer iletkenlerinki de aynı şekilde $V'_{20} = P_{21}Q_1$, $V'_{30} = P_{31}Q_1$ olarak yazılır. Orantı sabiti p 'nin boyutu Volt/Coulomb'dur.

Benzer şekilde eğer Q_2 yükü de 2 iletkenine götürülürse iletkenlerin toprağa göre potansiyellerindeki artış $V'_{10} = P_{12}Q_2$, $V'_{20} = P_{22}Q_2$ ile ifade edilir. Q_3 ve Q_4 yükleri için de aynı ifadeler oluşturulabilir. Buradan V_{10} , V_{20} , V_{30} ve V_{40} potansiyelleri

$$V_{10}=P_{11}Q_1 + P_{12}Q_2 + P_{13}Q_3 + P_{14}Q_4 \quad (4.15)$$

$$V_{20}=P_{21}Q_1 + P_{22}Q_2 + P_{23}Q_3 + P_{24}Q_4 \quad (4.16)$$

$$V_{30}=P_{31}Q_1 + P_{32}Q_2 + P_{33}Q_3 + P_{34}Q_4 \quad (4.17)$$

$$V_{40}=P_{41}Q_1 + P_{42}Q_2 + P_{43}Q_3 + P_{44}Q_4 \quad (4.18)$$

şeklinde elde edilir. Bu ifadeler matris formuna getirilebilir.

$$\begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ V_{30} \\ V_{40} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{14} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{24} \\ P_{31} & P_{32} & P_{33} & P_{34} \\ P_{41} & P_{42} & P_{43} & P_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

(4.19) ifadesindeki katsayılar matrisinin tersi alındığında elde edilen yeni matrisin boyutu kapasiteler boyutundadır. Bu matris

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ V_{30} \\ V_{40} \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

şeklindedir.

Yüklerin transferi nedeniyle elektriksel alanda depolanan enerji hareketli yüklerin yaptığı işin sırasından bağımsız olduğuna göre $P_{12}=P_{21}$ ve $c_{12}=c_{21}$ 'dir. Dolayısıyla (4.19) ve (4.20) matrisleri köşegene göre simetriktir [8, 9].

Üç iletkenli yani tek devreli, toprak iletkenli ve 3 fazlı hatlar için (4.20) matrisindeki ilk satır açık olarak yazılırsa:

$$Q_1=(c_{11}+c_{12}+c_{13}+c_{14})V_{10}-c_{12}(V_{10}-V_{20})-c_{13}(V_{10}-V_{30})-c_{14}(V_{10}-V_{40}) \quad (4.21)$$

$$Q_1=C_1V_{10}+C_{12}V_{12}+C_{13}V_{13}+C_{14}V_{14} \quad (4.22)$$

Burada

$$C_1 = (c_{11} + c_{12} + c_{13} + c_{14}) \quad (4.23)$$

ve

$$C_{12} = -c_{12} \quad (4.24)$$

Benzer şekilde

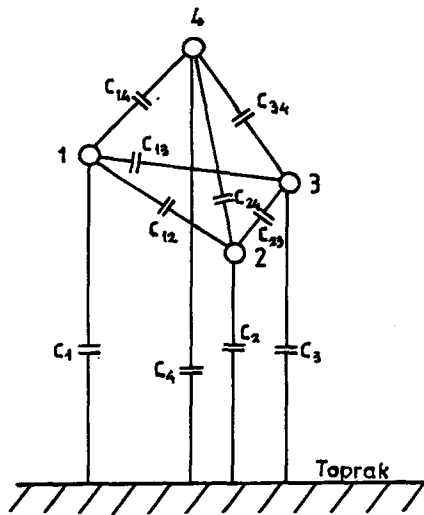
$$Q_2 = C_{12}V_{21} + C_2V_{20} + C_{23}V_{23} + C_{24}V_{24} \quad (4.25)$$

Burada

$$C_2 = (c_{21} + c_{22} + c_{23} + c_{24}) \quad (4.26)$$

Q_3 ve Q_4 eşitlikleri de Q_1 ve Q_2 gibi yazılır.

Bu eşitliklerle Şekil 4.4'deki kapasite sistemi ifade edilir.

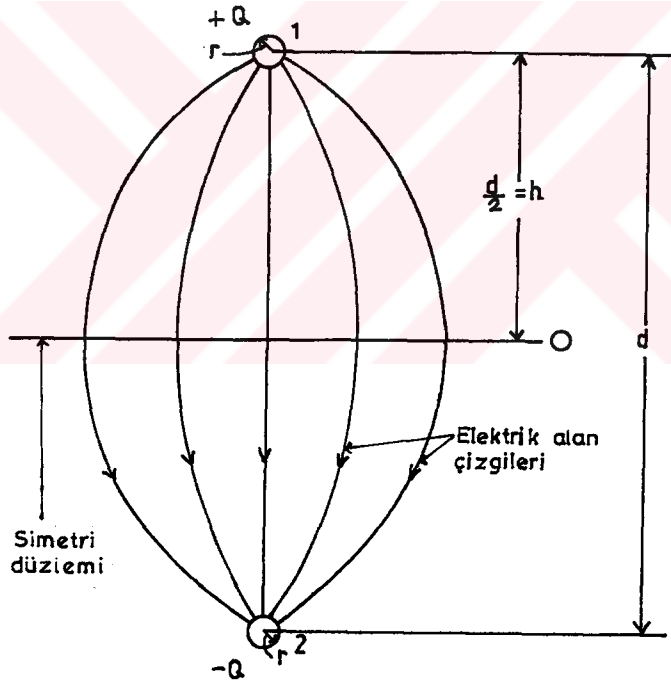


Şekil 4.4. İletkenler arası ve toprağa göre kapasiteler.

İletken 1'in yükü (4.22) eşitliğinden görüldüğü gibi 4 bileşenden oluşmuştur. 1.bileşen 1 iletkeniyle toprak arasındaki potansiyel farkının C_1 ile çarpılmasından, diğer üç bileşen ise iletkenler arası potansiyel farkı ile iletkenler arası kapasitelerin çarpımından oluşmuştur.

4.4. Toprak Etkisi

Şekil 4.5'de havada $\mp Q$ yüklerini taşıyan iki iletkenin tam ortasına iletkenlerin ekseninden geçen düzleme dik olacak şekilde iletken ince bir levha konulmuştur. Levha yerleştirilmeden önce sistemde eşpotansiyel bir durum söz konusu olduğundan iletken levhanın yerleştirilmesi elektriksel alanı bozmaz [3].



Şekil 4.5. Tek fazlı iki iletken arasında simetri düzlemine yerleştirilmiş eşpotansiyel yüzey.

(4.7) eşitliğini kullanarak 1 iletkeni ile iletken levha arasındaki potansiyel farkı V_{10}

$$V_{10} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(Q_1 \ln \frac{y_1}{x_1} + Q_2 \ln \frac{y_2}{x_2} \right) \quad (4.27)$$

y_1 ve y_2 iletken levha üzerindeki herhangi bir noktadan Q_1 ve Q_2 yükünü taşıyan iletkenlerin eksenlerine olan uzaklığı gösterir ve bunlar iletken yüzey üzerindeki her nokta için eşittir [7-9].

$$Q_1 = +Q \quad \text{ve} \quad Q_2 = -Q$$

olmak üzere x_1 , 1 iletkeninin ekseninden kendi yüküne olan uzaklık olup kendi yarıçapına eşit olacak şekildedir. x_2 , 1 iletkeninin ekseninden 2 iletkeninin eksenine olan uzaklıktır. Örneğin $x_2 = d$ ise

$$V_{10} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d}{r} \quad (4.28)$$

olur.

Hava yalıtkanlı bir iletken ile bundan h metre aşağıda bulunan mükemmel iletken yüzey arasındaki kapasite

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2h}{r}} \quad F/m \quad (4.29)$$

Şekil 4.5'deki kapasite, 1 iletkeniyle ortadaki iletken yüzey arasındaki kapasite ve ortadaki yüzeyle 2 iletkeni arasındaki kapasitenin seri bağlanmasından oluşur. Bu kapasitelerin herbiri $2\pi\epsilon_0/\ln(d/r)$ değerindedir.

Toprağın, iletim hattının elektriksel alanı üzerindeki etkisi için, iletkenin yüküne eşit fakat zıt işaretli yük taşıyan hayali bir iletken alınarak gerçek iletkenin topraktan olan uzaklığı kadar toprak içinde bir yere yerleştirilir [3, 7, 8].

$P_{11}Q_1$, Q_1 yüküne bağlı olarak 1 iletkeninin potansiyel değişimini verir. 1 iletkeni topraktan h_1 metre yüksekteyse hayali iletken de toprakta h_1 metre derindedir. Dolayısıyla (4.29) eşitliğinden

$$P_{11}Q_1 = \frac{Q_1}{\frac{2\pi\epsilon}{\ln 2h_1/r}} \quad (4.30)$$

ve

$$P_{11} = \frac{\ln(2h_1/r)}{2\pi\epsilon_0} \quad (4.31)$$

bulunur.

Benzer şekilde $P_{21}Q_1$, 1 iletkenindeki Q_1 yükünden dolayı 2 iletkeninde meydana gelen potansiyeldir. İletken topraktan d_{12} , hayali yük $-Q_1$ $d_{1'2}$ uzaklığındadır. (4.5) eşitliğinden:

$$P_{12}Q_1 = -\frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0} (\ln d_{12} - \ln d_{1'2}) = \frac{Q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{d_{1'2}}{d_{12}} \quad (4.32)$$

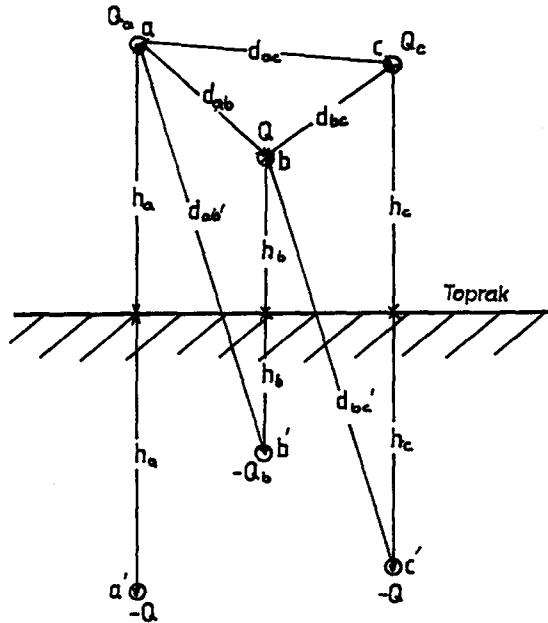
ve buradan

$$P_{21} = \frac{\ln(d_{1'2}/d_{12})}{2\pi\epsilon_0} \quad (4.33)$$

bulunur.

4.5. Tek Devreli Üç Fazlı Hatlar

Şekil 4.6 tek devreli, üç fazlı, toprak iletkeni olmayan bir hattı göstermektedir. Her a, b, c iletkenine karşılık eşit ve zıt işaretli yük taşıyan hayali bir iletken vardır. a faz iletkeni ile hayali a' iletkeni arasındaki mesafe a iletkeninin toprağa uzaklığının iki katıdır. Yani $d_{aa'}=2h_a$ şeklindedir [3, 9].



Şekil 4.6. Görüntü yükleri ile tek devreli üç fazlı hat.

Bütün faz iletkenleri eşit yarıçaplıdır. Simetri özelliğinden $d_{ab'}=d_{ba'}$ olarak yazılabilir. Toprağın potansiyelini sıfır kabul edersek a iletkeninin potansiyeli,

- (1) Q_a ve $Q_{a'}$ a ve a' deki
- (2) Q_b ve $Q_{b'}$ b ve b' deki
- (3) Q_c ve $Q_{c'}$ c ve c' deki

yükler olmak üzere (1) in etkisi (4.31) eşitliğinden görülebilir.

$$\frac{Q_a}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{2h_a}{r}$$

(2) nin etkisi

$$\frac{Q_b}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{d_{ab'}}{d_{ab}}$$

(3) in etkisi

$$\frac{Q_c}{2\pi\epsilon_o} \ln \frac{d_{ac'}}{d_{ac}}$$

şeklindedir.

Bu ifadelerden a faz iletkeninin toprağa göre potansiyeli:

$$V_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \left[Q_a \ln \frac{2h_a}{r} + Q_b \ln \frac{d_{ab'}}{d_{ab}} + Q_c \ln \frac{d_{ac'}}{d_{ac}} \right] \quad (4.34)$$

Benzer şekilde

$$V_b = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \left[Q_a \ln \frac{d_{ab'}}{d_{ab}} + Q_b \ln \frac{2h_b}{r} + Q_c \ln \frac{d_{bc'}}{d_{bc}} \right] \quad (4.35)$$

ve

$$V_c = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \left[Q_a \ln \frac{d_{ac'}}{d_{ac}} + Q_b \ln \frac{d_{bc'}}{d_{bc}} + Q_c \ln \frac{2h_c}{r} \right] \quad (4.36)$$

şeklinde yazılır. Matris haline getirildiğinde:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \\ V_{e=0} \end{bmatrix} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \ln \begin{bmatrix} \frac{2h_a}{r} & \frac{d_{ab'}}{d_{ab}} & \frac{d_{ac'}}{d_{ac}} & \frac{d_{ae'}}{d_{ae}} \\ \frac{d_{ab'}}{d_{ab}} & \frac{2h_b}{r} & \frac{d_{bc'}}{d_{bc}} & \frac{d_{be'}}{d_{be}} \\ \frac{d_{ac'}}{d_{ac}} & \frac{d_{bc'}}{d_{bc}} & \frac{2h_c}{r} & \frac{d_{ce'}}{d_{ce}} \\ \frac{d_{ae'}}{d_{ae}} & \frac{d_{be'}}{d_{be}} & \frac{d_{ce'}}{d_{ce}} & \frac{2h_e}{r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a \\ Q_b \\ Q_c \\ Q_e \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

eşitliği elde edilir.

$$[V]=[p].[Q] \quad (4.38)$$

ve

$$[Q]=[p]^{-1}.[V]=[c].[V] \quad (4.39)$$

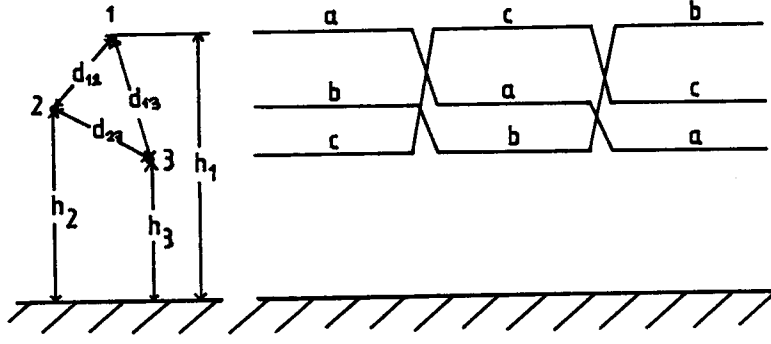
(4.37) eşitliğindeki matrisin tersi alınırsa (4.22)'deki eşitlikler elde edilir. Yani faz iletkenleri arasındaki ve faz iletkenleri ile toprak arasındaki kapasiteler bulunur.

İletken çiftleri arasındaki kapasite üçgen-yıldız dönüşümüyle nötre göre üç kapasite olarak yazılabilir. Nötr iletkeni topraklanmış veya toprak potansiyelinde ise bu kapasiteler her bir iletkenle toprak arasındaki kapasiteye eklenebilir. Sistemin kapasitesi (4.34) eşitliğindeki katsayılar matrisinin ters çevrilmesiyle bulunur ve nötre göre üç kapasiteye indirgenebilir [3, 8].

Sonraki incelemeler nötre göre olan kapasitelere göre yapılacaktır.

4.6. Çaprazlanmış Tek Devreli 3 Fazlı Hatların Nötre Göre Pozitif veya Negatif Sistem Kapasitesi

Pozitif veya negatif sistem kapasitesi genellikle hattın çaprazlandığı kabulüyle hesaplanır. Aynı zamanda toprak hattı etkileri de ihmal edilir. Örneğin 132 kV'luk bir hatta, toprak hattı nötre göre olan kapasiteyi %1 civarında azaltır. Eğer hat Şekil 4.7'de olduğu gibi çaprazlanırsa a, b, c iletkenleri 1, 2 ve 3 pozisyonlarını alır. Dönüşümün diğer iki pozisyonu da bunu izler [3].



Şekil 4.7. Çaprazlanmış üç fazlı hat.

Kolaylık olması bakımından a iletkenindeki birim uzunluk başına olan Q_a yükü üç çaprazlama pozisyonu için aynı kabul edilmiştir. Eğer hattın seri empedansından dolayı meydana gelen gerilim düşümü ihmal edilecek kadar küçük ve nötre göre faz gerilimi V_a her üç pozisyon için aynıysa bu kabul tam olarak doğru olmaz. Çünkü nötr ile fazlar arasındaki kapasiteler her pozisyon için farklı olduğundan birim uzunluk başına olan yük de farklı olmalıdır. Bununla birlikte Q_a yükünü sabit, V_a gerilimini değişken kabul etmek ve üç pozisyon için bulunan V_a değerlerinin ortalamasını almak işlemleri kolaylaştırır [3, 5].

İlk pozisyon için (4.35) eşitliğini kullanarak a iletkeninin nötre göre potansiyeli

$$V_{a'} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \left[Q_a \ln \frac{2h_1}{r} + Q_b \ln \frac{d_{12'}}{d_{12}} + Q_c \ln \frac{d_{13'}}{d_{13}} \right] \quad (4.40)$$

Diğer iki pozisyon için

$$V_{a''} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \left[Q_a \ln \frac{2h_2}{r} + Q_b \ln \frac{d_{23'}}{d_{23}} + Q_c \ln \frac{d_{12'}}{d_{12}} \right] \quad (4.41)$$

$$V_{a'''} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \left[Q_a \ln \frac{2h_3}{r} + Q_b \ln \frac{d_{13'}}{d_{13}} + Q_c \ln \frac{d_{23'}}{d_{23}} \right] \quad (4.42)$$

Ortalama değer ise

$$V_a = \frac{1}{3} (V_{a'} + V_{a''} + V_{a'''}) \quad (4.43)$$

Hatlara pozitif veya negatif sistem gerilimi uygulandığı için,

$$Q_a + Q_b + Q_c = 0 \quad (4.44)$$

olur. Dolayısıyla aşağıdaki ifade bulunur.

$$\begin{aligned} V_a &= \frac{1}{3} \frac{Q_a}{2\pi\epsilon_o} \left[\ln \frac{8h_1h_2h_3}{r^3} - \ln \frac{d_{12'}d_{13'}d_{23'}}{d_{12}d_{13}d_{23}} \right] \\ &= \frac{Q_a}{2\pi\epsilon_o} \ln \left[\frac{\sqrt[3]{(d_{12}d_{13}d_{23})}}{r} \cdot \frac{2 \cdot \sqrt[3]{(h_1h_2h_3)}}{\sqrt[3]{d_{12'}d_{13'}d_{23'}}} \right] \end{aligned} \quad (4.45)$$

Kısa bir hat için her faz iletkeninin nötre göre kapasitesi eşit kabul edilebilir veya eğer hat çaprazlanmışsa eşit alınabilir. Dolayısıyla

$$\frac{Q_a}{V_a} = C = \frac{2\pi\epsilon_o}{\ln \left[\frac{D_m}{r} \frac{2 \cdot \sqrt[3]{(h_1h_2h_3)}}{\sqrt[3]{(d_{12'}d_{13'}d_{23'})}} \right]} \quad F/m \quad (4.46)$$

D_m iletkenler arası geometrik uzaklığı verir ve

$$D_m = \sqrt[3]{(d_{12}d_{13}d_{23})} \quad (4.47)$$

şeklindedir.

Hattın topraktan olan yüksekliği ile iletkenler arası uzaklık oranlandığında

$$\frac{2 \cdot \sqrt[3]{(h_1h_2h_3)}}{\sqrt[3]{(d_{12'}d_{13'}d_{23'})}}$$

bulunur. Bu oranın değeri (yaklaşık bire eşittir).

Eğer toprağın etkisi ihmal edilirse nötre göre kapasite

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln(D_m/r)} \quad F/m \quad (4.48)$$

olur. $\ln D_m/r$ genellikle 2 ile 3 arasında olduğundan, bir kilometrelik havai hattın nötre göre kapasitesi 0,01 $1\mu F$ civarındadır.

Tipik tek devreli 3 fazlı 132 kV'luk hatta (4.46) eşitliğinin verdiği kapasite değeri (4.48) ifadesinin verdiği kapasite değerini %1 civarında geçer. Bundan dolayı pozitif veya negatif sistemler için (4.48) eşitliğini kullanmak genellikle yeterli olur. Dolayısıyla toprak etkisi de ihmal edilmiş olur [3, 9].

Yük çiftlerinin ve onların toprağa göre görüntülerinin kullanıldığı (4.8) ve (4.10) eşitlikleri yerine, eşit fakat karşıt yüklü sembolik iletkenler konulabilir. Bu sembolik iletkenler gerçek iletkenlerden istenen s uzaklığına konulabilir. Bu durumda (4.40), (4.41) ve (4.42) eşitlikleri

$$V_{a'} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[Q_a \ln \frac{s}{r} + Q_b \ln \frac{s}{d_{12}} + Q_c \ln \frac{s}{d_{13}} \right] \quad (4.49)$$

$$V_{a''} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[Q_a \ln \frac{s}{r} + Q_b \ln \frac{s}{d_{23}} + Q_c \ln \frac{s}{d_{12}} \right] \quad (4.50)$$

$$V_{a'''} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[Q_a \ln \frac{s}{r} + Q_b \ln \frac{s}{d_{13}} + Q_c \ln \frac{s}{d_{23}} \right] \quad (4.51)$$

şeklini alır.

$Q_a + Q_b + Q_c = 0$ olduğundan s içeren terimler ortadan kalkar ve

$$V_a = \frac{1}{3} (V_{a'} + V_{a''} + V_{a'''}) = \frac{Q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt[3]{(d_{12}d_{13}d_{23})}}{r} \quad (4.52)$$

(4.48) ifadesinin aynısı elde edilir.

Hattın seri empedansındaki gerilim düşümü ile hattın gerilimi U_h karşılaştırıldığında eğer gerilim düşümü çok küçükse, U_h hatlar arasındaki gerilim

gibi düşünülebilir. Dolayısıyla üç iletkenli hattın herbirinin gönderici ucundaki şarj akımı

$$I_c = j\omega C l \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad A. \quad (4.53)$$

l hattın metre cinsinden uzunluğudur. C ise (4.48) eşitliğinden bulunur.

4.7. Çaprazlanmış Üç Fazlı Tek Devreli Hattın Nötre Göre Sıfır Sistem Kapasitesi

4.7.1. Toprak Hatsız

Şekil 4.7'de sıfır sisteme sahip hatta gerilim uygulandığında $V_{ao} = V_{bo} = V_{co}$, dolayısıyla

$$Q_a = Q_b = Q_c = Q \quad (4.54)$$

ve

$$\begin{aligned} V_{ao} = \frac{1}{3} \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} & \left[\ln \frac{2h_1}{r} + \ln \frac{d_{12}'}{d_{12}} + \ln \frac{d_{13}'}{d_{13}} \right. \\ & + \ln \frac{2h_2}{r} + \ln \frac{d_{23}'}{d_{23}} + \ln \frac{d_{12}'}{d_{12}} + \ln \frac{2h_3}{r} \\ & \left. + \ln \frac{d_{13}'}{d_{13}} + \ln \frac{d_{23}'}{d_{23}} \right] \end{aligned} \quad (4.55)$$

$$V_{ao} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} \ln \left(\frac{2^3 \sqrt{(h_1 h_2 h_3)}}{r} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{d_{12} d_{13} d_{23}'}{d_{12} d_{13} d_{23}} \right)^2} \right) \quad (4.56)$$

olarak elde edilir.

Nötre göre sıfır sistem kapasitesi

$$C_o = 2\pi\epsilon_o \frac{1}{\ln \left(\frac{2^3 \sqrt{(h_1 \cdot h_2 \cdot h_3)}}{r} \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{d_{12} d_{13} d_{23}'}{d_{12} d_{13} d_{23}} \right)^2}} \right)} \quad F/m \quad (4.57)$$

h_1, h_2 ve $h_3 \gg d_{12}, d_{13}$ ve d_{23} olduğu zaman

$$\sqrt[3]{(8h_1 h_2 h_3 (d_{12} d_{13} d_{23}')^2)} \approx 8h_1 \cdot h_2 \cdot h_3 \quad (4.58)$$

Dolayısıyla

$$C_o \approx 2\pi\epsilon_o \frac{1}{\ln (8h_1 h_2 h_3 / r D_m^2)} \quad F/m \quad (4.59)$$

elde edilir.

4.7.2. Toprak Hattı

Direkt yıldırım darbelerini azaltmak için kullanılan faz iletkeni üzerindeki toprak hattı, sıfır sistem kapasitesini %10 civarında artırır. Bu nedenle pozitif sistemde olduğu gibi toprak hattının etkisi ihmal edilemez. Toprak hattı r_e yarıçaplı ve topraktan h_e yüksekliktedir. Şekil 4.7'de d_{1e} 1. pozisyonundaki iletken ile toprak hattı arasındaki uzaklık, $d_{1e'}$ ise 1'den hayali toprak hattına olan uzaklıktır [3, 8].

Toprak hattının etkisini görmek için toprak hattının birim uzunluğu başına düşen Q_e yükü, faz iletkenlerinin herbirinde bulunan Q yükü cinsinden ifade edilmelidir. Çaprazlamanın 1. pozisyonunda $d_{ab'} = d_{12'}$, $d_{ab} = d_{12}$ ve $h_a = h_1$ 'dir. $Q_a = Q_b = Q_c = Q$ ile (4.37) eşitliği

$$V_{a'} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} \left[\ln \frac{2h_1}{r} + \ln \frac{d_{12'}}{d_{12}} + \ln \frac{d_{13'}}{d_{13}} \right] + \frac{Q_e}{2\pi\epsilon_o} \cdot \ln \frac{d_{1e'}}{d_{1e}} \quad (4.60)$$

$$V_{e'} = 0 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} \left[\ln \frac{d_{1e'}}{d_{1e}} + \ln \frac{d_{2e'}}{d_{2e}} + \ln \frac{d_{3e'}}{d_{3e}} \right] + \frac{Q_e}{2\pi\epsilon_o} \cdot \ln \frac{2h_e}{r_e} \quad (4.61)$$

olarak yazılır. (4.61) eşitliğinden,

$$Q_e = \frac{-Q \cdot \ln(d_{1e'} \cdot d_{2e'} \cdot d_{3e'} / d_{1e} \cdot d_{2e} \cdot d_{3e})}{\ln(2h_e / r_e)} \quad (4.62)$$

elde edilir. (4.62) eşitliğiyle bulunan Q_e , (4.60) eşitliğinde yerine konursa:

$$V_{a'} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \frac{2h_1 d_{12}' d_{13}'}{r d_{12} d_{13}} - \frac{\ln \frac{d_{1e'}}{d_{1e}} \cdot \ln \frac{d_{1e} d_{2e} d_{3e'}}{d_{1e} d_{2e} d_{3e}}}{\ln \frac{2h_e}{r_e}} \right] \quad (4.63)$$

Benzer şekilde

$$V_{a''} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \frac{2h_2 d_{23}' d_{12}'}{r d_{23} d_{12}} - \frac{\ln \frac{d_{2e'}}{d_{2e}} \cdot \ln \frac{d_{1e} d_{2e} d_{3e'}}{d_{1e} d_{2e} d_{3e}}}{\ln \frac{2h_e}{r_e}} \right] \quad (4.64)$$

ve

$$V_{a'''} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \frac{2h_3 d_{13}' d_{23}'}{r d_{13} d_{23}} - \frac{\ln \frac{d_{3e'}}{d_{3e}} \cdot \ln \frac{d_{1e} d_{2e} d_{3e'}}{d_{1e} d_{2e} d_{3e}}}{\ln \frac{2h_e}{r_e}} \right] \quad (4.65)$$

$V_{a'}$, $V_{a''}$ ve $V_{a'''}$ eşitliklerinin ilk terimlerinde daha önceki yaklaşımla yani $\sqrt{(8h_1 h_2 h_3 (d_{12} d_{13} d_{23})^2)} \approx 8h_1 h_2 h_3$ ifadesini kullanarak

$$V_a = \frac{1}{3} (V_{a'} + V_{a''} + V_{a'''}) = \frac{Q}{2\pi\epsilon_0} \left[\ln \frac{8h_1 h_2 h_3}{r D_m^2} - \right] \quad (4.66)$$

$$\frac{1}{3 \ln(2h_e / r_e)} \left(\ln \frac{d_{1e} d_{2e} d_{3e'}}{d_{1e} d_{2e} d_{3e}} \right)^2 \Bigg]$$

ifadesi yazılır. Dolayısıyla

$$C_o = 2\pi\epsilon_o \frac{1}{\ln \frac{8h_1h_2h_3}{rD_m^2} - \frac{1}{3\ln \frac{2h_e}{r_e} \left(\ln \frac{d_{1e}d_{2e}d_{3e'}}{d_{1e}d_{2e}d_{3e}} \right)^2}} F/m \quad (4.67)$$

eşitliğiyle sıfır sistem kapasitesi bulunmuş olur.

BÖLÜM 5. ALÇAK FREKANSLI ELEKTRİK VE MAGNETİK ALANLARIN İNSAN SAĞLIĞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

5.1. Elektrik ve Magnetik Alan

İnsanlar doğal ve insan yapımı kaynaklı elektrik ve magnetik alanların dahili veya harici olarak etkisi altındadır. Dünyanın doğal magnetik alanının insan vücudunun normal fizyolojik fonksiyonları üzerinde bir etkisi olduğu bilinmektedir [10].

Elektrik enerjisi üretimi, dağıtımı ve tüketiminde olduğu gibi insan yapımı kaynaklar tarafından da elektrik ve magnetik alan oluşturulmaktadır. Fakat ne insan yapımı kaynakların ne de doğal kaynakların oluşturduğu magnetik ve elektrik alanlar gözle görülemez. Ancak varlığı radyo veya televizyon alıcısı gibi cihazlarla farkedilebilir.

Elektrik ve magnetik alanların oluşmasına neden olan elektrikli cihazların ve değişik kaynakların çalışma frekansları geniş bir aralığa yayılmıştır. Örneğin enerji hatlarının frekansı 50 ve 60 Hz civarındadır. Televizyon alıcılarının 15 kHz, orta dalga radyo frekansı bir milyon hertz ve FM radyolarınınki ise bundan 100 kat daha yüksektir [10].

İletim hatlarının elektrik alanı, iletim hattının toprağa göre gerilimi ile bağlantılıdır ve bu hatlarda çok yüksek gerilimler söz konusudur. Evlerdeki gerilim ise 110 veya 220 voltur.

İletim hatlarında magnetik alan amper cinsinden hattan geçen akımla ilişkilidir. Evlerdeki akım 15 veya 20 A ile sınırlıdır.

Tablo 5.1’de üretildiği kaynaklara göre verilen alan değerleri, elektrik ve magnetik alan arasındaki değer farklılıklarını belirgin bir şekilde göstermektedir. Endüstri ve laboratuvar şartlarında ise daha yüksek alanlar söz konusu olmaktadır [10].

Tablo 5.1. Günlük hayatta karşılaşılan şebeke frekansındaki elektrik ve magnetik alanlar.

Durum	Elektrik Alan	Magnetik Alan
	(V/m)	(mG)
• Ev tesisatı	1-10	1-5
• Elektrikli ev aletleri	30-300	5-3000
• Dağıtım hatları altındaki evler	10-60	1-10
• Yüksek gerilimli iletim hatları altında	100-7000	25-100

Elektrik ve magnetik alanın insan vücuduna etkisinin çok değişik şekilleri vardır. İnsan vücuduna etkiyen elektrik alan belli bir doğrulukla hesaplanabilir. İnsan vücudu, her dokusu farklı bir iletkenliğe sahip, komplike bir iletken dielektriktir. Böyle bir iletken ortam, orijinal alanı değiştirir ve dolayısıyla vücuttaki çeşitli faktörler tarafından alan önemli bir miktarda azalır. Aynı zamanda vücudun kendisi bir iletken gibi davranarak 10 ile 100 arasında değişen oranlarda vücut dışındaki alanı artırabilir. Sonuç olarak sadece dahili alanlar tahmini bir şekilde hesaplanabilir.

Alandaki bahsedilen azalmadan dolayı Tablo 5.1’de verilen değerler, vücuttaki ısı düzensizlikleri nedeniyle oluşan elektrik alan yanında ihmal edilecek değerlere kadar düşer. Vücut dokusunun 20 mikronluk bir hücresi 2 ohm-m’lik bir dirence sahiptir. Dolayısıyla ısı düzensizlikleri nedeniyle vücutta oluşan kaçınılmaz termal alanlar, 100 Hz.lik frekansta ve vücut ısısında 0,02 V/m civarındadır. Buradan, ısı değişiklikleriyle oluşan termal alana denk bir alan oluşturabilmek için harici alanın milyon V/m mertebesinde olması gerektiği anlaşılmaktadır [10].

Harici elektriksel alanın aksine magnetik alan insan vücudu tarafından engellenemez. Vücut hemen hemen hiç bir magnetik madde içermediğinden, harici magnetik etkiler azaltılmadan vücut tarafından özümserir. Vücutta oluşan dahili elektrik alan değişken magnetik alan nedeniyle oluşur. Tablo 5.1’de gösterilen magnetik alanların neden olduğu elektrik alanlar vücutta oluşan termal alanlardan çok daha küçüktür. Tablo 5.1’deki en yüksek magnetik alan değeri olan 3000 mG bile vücutta doğal olarak oluşan akım yoğunluğuyla kıyaslanabilecek bir akım yoğunluğuna neden olamaz [10].

5.2. İnsanlarda Görülen Hastalıklar

Elektrik ve magnetik alanlarla bir hastalığın oluşumu arasında herhangi bir ilişkinin söz konusu olup olmadığı konusundaki en önemli bulgular epidemiolojik çalışmalar sonucunda elde edilmiştir [10].

Epidemiolojik çalışmaların amacı, bağıl riski hesaplayarak, elektrik ve magnetik alan gibi belirli bir etkiye maruz kalma ile belirli bir hastalık veya diğer sağlık sorunları arasında bir bağıllığın olup olmadığını saptamaktır.

Bağıl risk, bir etkiye maruz kalan kişiler arasındaki hastalık riskinin, bu etkiye maruz kalmayan genellikle kontrol topluluğu olarak gösterilen kişiler arasındaki hastalık riskine oranıdır.

$$\text{Bağıl risk} = \frac{\text{Etkiye maruz kalan kişilerdeki risk}}{\text{Etkiye maruz kalmayan kişilerdeki risk}} \quad (5.1)$$

Eğer bağıl risk birden önemli derecede büyükse, çalışmanın gerçekleştirilmesinde veya düzenlenmesindeki bir bozukluktan ortaya çıkan bir ön yargı nedeniyle hastalık ile etki arasındaki ilişki yapay mı yoksa gerçek mi diye düşünülebilir. Örneğin, gözlemlenen bağıllık eğer uygun olarak toplanmayan verilerden ortaya çıkmışsa sahte bir bağıllık olabilir. Hatta gözlemlenen bağıllık gerçek olduğu zaman bile, bir etkiye maruz kalma sonucu mu hastalık ortaya çıkmıştır, yoksa hem bir etkiye maruz kalma hem de başka bir faktörün ortaya çıkması mı, yoksa sadece bu başka faktör mü hastalığın nedenidir? Böyle bir bağıllık diğer, sık olarak dikkate alınmayan faktörler yüzünden sahte bir bağıllık değildir fakat şartsız bir bağıllıktır. Elektrik veya magnetik alanlara maruz kalma sonucu artan kanser riski ile ilgili yayınlar ve bulgular özel bir durum olarak, bu durumaa göre tekrar gözden geçirilmelidir [10].

Elektrik ve magnetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkileriyle ilgili birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen elde edilen bulgular tatmin edici değildir.

Konuyla ilgili olarak 1984 ve 1987 yılları arasında yayınlanan birçok raporda biyolojik sistemlerin şebeke frekansındaki elektrik ve magnetik alanlara karşı duyarlı olduğu sonucuna varılmıştır [11].

Yayınlanan bu raporlardan biri olan New York Güç Hatları Danışma Komitesi'nin (NYS) raporunda elektrik ve magnetik alanlara maruz kalmadan kaynaklanan biyolojik etkilerin mümkün olacağı, ayrıca çocuk kanserlerindeki artışla

birlikte başka sağlık sorunlarına da yol açabileceğinin muhtemel olduğu sonucuna varılmıştır [12].

Konuyla ilgili iki rapor da Dünya Sağlık Organizasyonu (WHO) tarafından yayınlanmıştır. Bu raporların ilkinde elektrik alanının 10 kV/m'yi aştığı yerleşim ve işyeri sahalarında elektrik alanlarına maruz kalmanın sınırlandırılması gerektiği belirtilmiştir. Bu sınırlamaya 1 kV/m'den 10 kV/m'ya kadar alan şiddetleri için uyulması önerilmiştir [13].

İkinci WHO raporu zamanla değişen magnetik alanların insan üzerindeki etkileri konusunda mevcut verilerle ilgilidir. Raporda 50-60 Hz frekanslar için şu sonuçlara varılmıştır:

a) 5 mT'nin altındaki magnetik alanlara maruz kalan insanlarda önemli biyolojik etkiler görülmemiştir.

b) 5 mT'le 50 mT arasındaki alanlara kısa süreli maruz kalmalarda küçük geçici sağlık sorunlarına neden olabilen biyolojik etkiler görülmüştür. Fakat uzun süreli (birkaç saat, gün veya hafta) maruz kalmalarda sağlık sorunlarının neler olabileceği bilinmemektedir.

c) 50 mT'dan büyük alanlara maruz kalma, değişik sağlık sorunları meydana getiren çeşitli hücre uyarı seviyelerinin aşılmasına neden olur [14].

Bahsedilen NYS ve WHO raporlarının vardığı sonuç kullanılan verilerin güvenli veya güvensiz olan seviyelerini belirlemek için yetersiz olduğudur [11].

5.2.1. Elektrik ve Magnetik Alanların İnsanların Büyümesi Üzerindeki Etkileri

Elektrik ve magnetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkileri konusunda 1989 yılında Amerika'da düzenlenen bir panelde sunulan çalışmalarda alanların biyolojik etkilerinin özellikle hücreler ve dokular üzerinde olduğu belirtilmiştir. Dolayısıyla kanser, üreme sorunları ve hastalıkların oluşumu sistematik olarak büyüme kontrolündeki düzensizlikler nedeniyle meydana gelmektedir [10].

Çalışmaların hedefi, elektrik ve magnetik alanlardan etkilebilen hücreleri kontrol eden düzenleyici proseslerdeki bileşenlerin nicel ve nitel olarak belirlenmesidir. Buna göre yapılan araştırmalar iskelet dokuları da dahil memeli hayvanların doku ve hücrelerini geniş bir spektrumda inceleyerek sürdürülmekte olan deneysel

çalışmalardır. Biyokimyasal ve moleküler parametreler üzerindeki etkiler, hücre fonksiyonlarıyla ilgili olarak hücre şekli ve yapısı dikkate alınarak incelenmiştir [10].

Biyolojik etkiler hakkında ilk bilgiler, bakteriler ve daha küçük yapıdaki hücreler üzerinde yapılan araştırmalar sonucu elde edilmiştir. Bu ön çalışmalar elektrik ve magnetik alanların hücreler üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesinde faydalı olmuştur. Bununla birlikte bu bilgiler insana uygulanırken aradaki fark dikkate alınmalıdır. Çünkü bu organizmalar memelilere göre daha basit yapıya sahiptir [10].

Thomas S. Tenforde tarafından yapılan bir çalışmada elektrik ve magnetik alanların özellikle hücre zarında ve Ca^{+2} iyonu tarafından meydana getirilen işaret yolunda oluşturacağı değişiklikler incelenmiştir. Yine bu çalışmada birçok duruma göre elektromagnetik alan etkisi altındaki hücrelerin değişen fonksiyon özellikleri araştırılmıştır [15].

A.B.D. Teknoloji Değerlendirme Bürosunun (OTA) iletim hatlarının ürettiği elektrik ve magnetik alanların halk sağlığı üzerindeki etkileri konulu raporunda elektrik ve magnetik alanlar ile hücrenin etkileşiminin hücre zarında olduğunu ve elektromagnetik alanların vücudun elektrik düzeninde oluşturabileceği küçük bir işaret değiştirmesinin bile hücrenin çalışmasında kritik öneme sahip biyokimyasal değişiklikler için yeterli olduğunu belirtmektedir [1].

Ayrıca elektromagnetik alanlar normal büyüme işlemini yürüten hücrelere etki ederek özelliklerini bozmaktadır [1].

Yapılan bir başka çalışmada da, oluşturacağı risk dikkate alınarak, hergün kısa bir süre hastalar magnetik alana maruz bırakıldığında magnetik alanın hücre yapısına veya dokulara zarar vermediği gözlenmiştir. Fakat bu, uzun süre etki altında kaldığında aynı sonuçların alınacağını göstermez [11].

Özetle hücrenin ve zarın genel yapısında elektrik alanın etkileri [15, 16] numaralı çalışmalarda incelenmiş fakat kesin bir şey söyleyebilecek kadar ciddi sonuçlar elde edilememiştir.

5.2.2. Elektrik ve Magnetik Alanların Kanseri Oluşumu Üzerindeki Etkileri

Yüksek gerilimli sistemlerin avantajı ekonomikliği ve mühendislik motivasyonuna uygun oluşudur. Örneğin tek bir 765 kV'luk hattın inşaatı

maliyeti 30 adet 138 kV'luk hattın konstrüksiyon maliyetinin onda biridir. Aynı zamanda kilowat başına müsaade edilen kablo geçiş mesafesinin sadece 1/13'ünü kullanarak 30 adet 138 kV'luk hattın taşıdığı enerjiyi taşır. Ancak 765 kV.luk hattın oluşturduğu elektromagnetik alan 138 kV'luk hattın oluşturduğundan fazladır [17].

Douglas tarafından yapılan bir çalışmada 765 kV.luk bir hattın bir-iki yüz metre uzakta bulunan bir insan 2 kV/m'lik bir elektrik alana maruz kalırken, hattın altında bulunan bir insanın 10 kV/m'lik bir alana maruz kaldığı gözlenmiştir [18].

1977'de Minnesota ve Kuzey Dakota arasında düşünülen ± 400 kV'luk doğru gerilim hattının yapımı esnasında halkın muhalefeti yoğun olmuştur. 1978'de hat tamamlandıktan sonra çevrede oturanlar burun kanamaları, çocuk düşürmeleri, deri tahrişleri ve stres gibi sağlık problemlerinden şikayet etmişlerdir. Bu şikayetler sonucu Minnesota Çevresel Özellikler Kurulu'nun başlattığı araştırmalarda elektromagnetik alanların meydana getirdiği söylenen olumsuz etkilerle ilgili hiçbir kanıt bulunamamıştır [17].

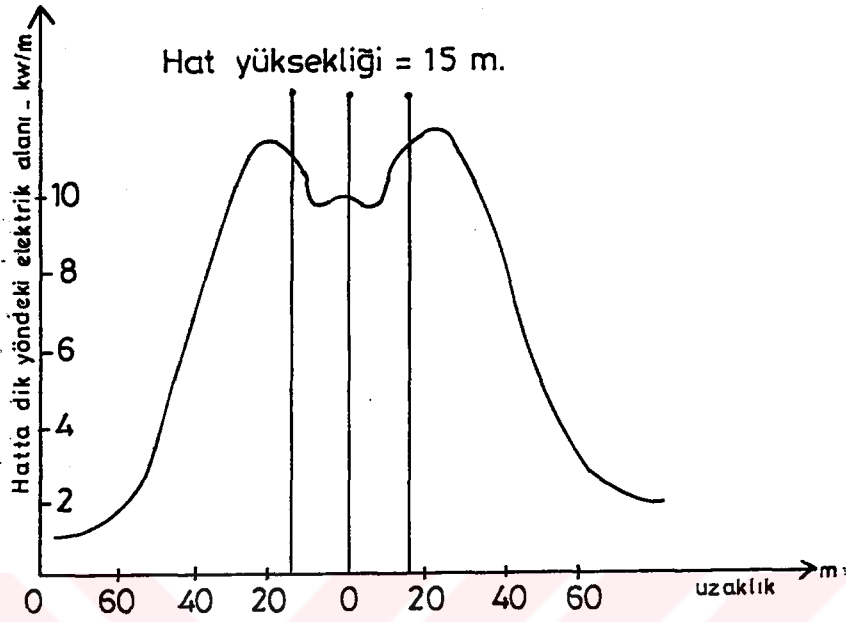
Bu konudaki ilk çalışmalar 1979'da Kolorado Üniversitesinde araştırma yapan Nancy Wertheimer tarafından başlatılmış ve aynı yıl yayınlanan Epidemioloji dergisinde Wertheimer ve Ed Leeper'in elektromagnetik alanların kanser riski üzerindeki etkileri konusunda yaptıkları araştırmalara yer verilmiştir. Bu araştırma raporunda güç hatları tarafından üretilen 300 nT seviyesindeki alanların çocuk kanserlerinde önemli bir şekilde etkili olduğu belirtilmiştir [19].

Bununla birlikte Brown Üniversitesi araştırmacılarından bir grup aynı konuyla ilgili yaptıkları araştırmada Wertheimer ve Leeper tarafından bulunan sonuçları destekleyici hiçbir veriye rastlamamışlardır [17].

H.Daniel Roth, Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü için Wertheimer ve Leeper'in çalışmalarını kritik ederek kanserin gizli sebeplerinden olan kirlilik, kalıtım ve diyet gibi sebeplerin çalışmaları esnasında dikkate alınmadığı sonucuna varmıştır [17].

Roth tarafından yapılan kritik sonucu, Brown Üniversitesindeki araştırmacılarda kanser oluşumunda etkili olabileceği belirtilen nedenleri gözardı ettiklerinden çalışmalarını geri çekmek zorunda kaldılar [17].

Şekil 5.1'de bir iletim hattı altında orta fazdan uzaklığa göre elektrik alan dağılımı gösterilmektedir [17].



Şekil 5.1. 765 kV'luk hattan uzaklıkla elektrik alan şiddetinin değişimi.

1980'de, Wertheimer ve Leeper tarafından yapılan çalışmaya benzer bir çalışma daha başlatıldı ve bunun sonucunda yüksek gerilim hatlarının meydana getirdiği elektromagnetik alanlarla hatlara yakın yerlerde yaşayan çocuklarda görülen kanser arasında zayıf bir ilişki olduğu belirtildi [17].

1987'de Denver'da David Savitz, yüksek gerilim hatlarının oluşturduğu elektromagnetik alanlarla çocuk kanserleri arasındaki ilişkinin derecesini belirlemek ve Wertheimer tarafından yapılan çalışmaları incelemek üzere yaptığı araştırmalarda yüksek magnetik alan etkisi altında kalan çocuklarda görülen kanserin, etki altında kalmayanlara göre 1,6 kez daha fazla olduğunu tesbit etmiştir [19].

1990 yılında, bu bulgular üzerinde yapılan iki yıllık çalışmadan sonra Amerikan Çevre Koruma Ajansı tasarı halinde yayınladığı raporunda magnetik alanların kanserojen etkisinin muhtemel olduğu ve bunların DDT ve formaldehit maddeleriyle aynı risk kategorilerinde yer aldığını belirtmiştir [19].

Ancak rapor Amerikan Hükümeti tarafından incelenmiş, verilerin yeterli olmadığı sonucuna varılmıştır [19].

İngiltere’de Ulusal Radyolojik Koruma Komitesi (NRPB) tarafından yaptırılan bir araştırmada çok düşük frekanslı alanların kanserojen etkilerinin kesin olduğunu gösteren bir veri olmadığı belirtilmiştir. Sonuçlar farklı olmasına karşın bu sonuçları destekleyen bazı zayıf bulgular da vardır. Bu bulgular beyin kanseri ihtimalinin lösemiden daha zayıf olduğunu göstermektedir [19].

Son olarak 1994 Nisan ayında beş yıllık bir ulusal çalışma başlatıldı. Çalışma minimum 1000 çocuk kanseri üzerinde yapılacak ve 2000 sağlıklı çocuktan elde edilecek sonuçlarla karşılaştırılacaktır. Her evdeki elektromagnetik alan bir dedektörle, çocuğun yastığı üzerinde, yatağının ortasında ve odasının ortasında olacak şekilde ölçülüp, geçici olarak 150 nT ve yukarısının tehlikeli olduğu kabul edilerek ölçümler minimum 48 saat tekrarlanacak. Fakat sonuçta elektromagnetik alanlarla kanser arasında kesin bir ilişki bulunursa ne yapılacak sorusu ortaya çıkıyor. İlk olarak İngiltere Ulusal Şebeke Şirketi maruz kalmanın yeni sınırlarının belirlenmesi gerektiğini, Ulusal Radyolojik Koruma Komitesi ise şebeke frekansındaki magnetik alan limitinin 200 nT civarında olması gerektiğini belirtmiştir. Bununla birlikte Ulusal Şebeke Şirketine göre elektrik direklerinin yerleşim yerlerinden uzak tutulması da gerekmektedir [19].

İsveç Ulusal Enerji Merkezi de yeni kurulacak okul ve oyun merkezleri gibi yerlerin 200 nT’yi geçen bölgelerden uzak yerlerde kurulmasının gerektiğini belirtmiştir [19].

Üç mesleki çalışma, elektromagnetik alanların etkisi altında kalmış insanlarda göğüs kanserinin nadiren oluştuğunu göstermesine rağmen bir telefon firmasının, hatlarda çalışan işçileri arasında yaptığı bir başka çalışmada göğüs kanseri bulgusuna rastlanmamıştır. Fakat merkezde çalışan işçilerde bir risk artışı görülmüştür. Nadiren rastlanan kanser vakaları dışında erkeklerde göğüs kanseri gibi bir kanser vakasına rastlanmamıştır [10].

Elektromagnetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkileri konusunda yapılan epidemiolojik çalışmalar sonucunda elektromagnetik alanlar kanser oluşumunda etkilidir şeklinde bir sonuç çıkmamıştır [10].

Elektromagnetik alanların kanser oluşumu üzerinde etkisi varsa kanser vakalarının bağıl riskten fazla olması gerekirdi. Ayrıca elektromagnetik alanların bütün yeryüzüne etkisi sözkonusu olmasına ve uygulama alanlarının da hızla artmasına rağmen kanser vakalarında önemli bir artış yoktur [10, 15, 16].

Fakat bu sonuçlar elektromagnetik alanların olumsuz etkilerinin gözardı edileceği anlamına gelmemelidir [10].

5.2.3. Elektrik ve Magnetik Alanların Üreme Üzerindeki Etkileri

Elektromagnetik alanların üreme üzerindeki etkileri incelenirken araştırmacıları en fazla uğraştıran konu üremeyle ilgili her problemin birçok nedeni olması ve bu nedenlerin genellikle birbiriyle ilişkili olmasıdır. Dolayısıyla çalışmalar rastlantı sonucu oluşan üreme problemleriyle elektromagnetik alan etkisiyle oluşan problemler arasındaki fark üzerinde yoğunlaşmıştır [10].

Örneğin elektromagnetik alan gibi çevresel etkilerin embriyonun gelişimi üzerinde meydana getireceği etkileri tahmin etmek önemli bir problem teşkil eder. Embriyonun büyük bir oranı hamileliğin başlangıç dönemlerinde kaybedilir. Bunların %50'si ilk üç haftada olur.

Dünyaya gelen bebeklerin %3 ve %6 arasındakilerde çeşitli sakatlıklar görülmektedir. Fakat bunların değişik sebepler sonucu olduğu bilinmektedir [10].

Embriyonun gelişimini etkileyen birçok faktör şu şekilde sıralanabilir:

- a) Embriyonik safhalar
- b) Başlangıç olayları
- c) Tür farkları

Elektromagnetik alanla türde bir değişme olur veya olmaz. Ancak etkinin oluşturacağı değişikliklerin organizmanın büyüklüğüyle ilişkili olduğu açıktır. Farklı türler arasında karşılaştırma yapıldığında doz-tepki ilişkisinin son derece önemli olduğu anlaşılmıştır [10].

Elektromagnetik alanların üreme üzerinde olumsuz etkileri olduğunu veya böyle bir potansiyele sahip olduğunu iddia etmek için konuyu tutarlı ve güvenilir nedenlere dayandırmak gerekir [15].

İnsan üremesine etkileri konusunda yapılan çalışmalarda elektrik ve magnetik alanları meydana getiren üç kaynak üzerinde durulmuştur. Bunlar;

- a) Televizyon ve bilgisayar ekranları
- b) Enerji hatları ve elektrikli aletler
- c) Tıbbi teşhislere ait cihazlar

Televizyon ve bilgisayar ekranlarının meydana getirdiği alanların üreme üzerindeki etkisi konusunda yapılan çalışmalar neticesinde herhangi bir zararlı etkilerinin olmadığı sonucuna varılmıştır [10].

Üreme problemleriyle ilgili olarak hayvanlar üzerinde birçok araştırma yapılmıştır. En fazla kullanılsa civciv embriyosu olmuştur. Çalışma mekanizması bakımından civciv embriyosu uygun olmakla birlikte insanlar üzerindeki muhtemel üreme etkilerinin tayininde daha güvenilir bulgular için çalışmaların memeliler üzerinde tekrarlanması gerekir. Civciv embriyoları üzerinde yaklaşık 15 deney yapılmış, ancak tutarlı veriler elde edilemediğinden alan etkilerinin üreme problemi oluşturduğuna dair bir sonuca varılamamıştır [10].

Bir başka çalışma da inekler üzerinde yapılmıştır. Bu çalışmada inekler dört ay gibi bir süre yüksek gerilim hatları altında bırakılmalarına rağmen üreme özelliklerinde hiç bir bozukluk görülmemiştir. Benzer bir araştırma da fareler üzerinde yapılmış, onlarda da herhangi bir üreme problemine rastlanmamıştır [10].

Bazı araştırmacılar elektromagnetik alanların mutajenik etkilerinin olduğundan söz etmesine rağmen çoğunluk, alanların bu tür etkilerinin olmadığı görüşünde birleşmektedir [10, 17].

5.2.4. Elektrik ve Magnetik Alanların Sinir Sistemi Üzerindeki Etkileri

Davranış değişiklikleri, sinir sistemi problemlerinin başlangıcına işaret olabilir. Davranışlar, sinir sistemi faaliyetlerine oranla gözlemlenebilir olduğundan elektromagnetik alanların etkisi konusunda daha fazla bilgi edinilmesini sağlar. Çoğu zaman büyük davranış değişiklikleri olmasına rağmen sinir sisteminde yapısal bir zarar tesbit etmek mümkün olmayabilir. Elektromagnetik alanların hem davranışlar hem de sinir sistemi üzerindeki etkileri belli koşullar altında incelenmiş fakat bu iki durum içinde veriler son derece sınırlı kalmıştır [10].

Elektrik alanın öğrenilmiş davranışlar üzerindeki etkileri, laboratuvar hayvanları üzerinde incelenmiştir. Ayrıca bu konuda yapılan kapsamlı literatür araştırmaları da gösterdi ki küçük istisnalar dışında elektrik alanın öğrenilmiş davranışlar üzerindeki etkisi çok azdır [10].

Elektrik alanın etkileri arasında en önemlisi beyin dokusunda bulunan kalsiyum iyonları üzerindeki olumsuz etkileridir. Yapılan yeni çalışmalar elektrik alanının kalsiyumlu dokular üzerindeki etkisinin özellikle alanın frekansına ve şiddetine bağlı olduğunu göstermiştir [1, 10].

Son yirmi yılda magnetik alanın etkileri konusunda yapılan birçok araştırmada magnetik alanın genel davranışlar üzerinde etkili olduğu vurgulanmıştır. Fakat laboratuvarlarda insanlar üzerinde yapılan incemeler magnetik alanların genel davranışlar üzerinde herhangi bir etkisi olduğuna dair bir sonuç vermemiştir [10].

Magnetik alanın sinir sistemi üzerinde etkili olduğunu gösteren birçok çalışma olmasına rağmen sonuçlar arasında çelişkiler görülmektedir [15].

Araştırmalar magnetik alanın, elektrik alandan daha etkili olduğunu göstermektedir. Şöyleki, ciddi bir magnetik etki altında kalan mekanizmalarda beyindeki dalgaları ölçen bir cihazın (EEG) bazı bileşenlerinde kısa süreli değişimler gözlenmiştir. Fakat insanlar üzerinde yapılan çalışmalarda önemli bir etki görülmemiştir [10].

Elektrik ve magnetik alanların ayrı ayrı olan etkilerinin incelenmesinden başka birlikte olmaları durumu için de çalışmalar yapılmış ancak yeterli sonuçlar elde edilememiştir [10].

Bu konuda hayvanlar üzerinde yapılan bir deneyde hayvanlar belli bir süre hem elektrik hem de magnetik alan etkisi altında bırakılmış fakat herhangi bir davranış bozukluğu görülmemiştir [10].

Fareler üzerinde yapılan bir başka araştırmada ise fareler önce ödüllendirilecek şekilde eğitilip daha sonra elektrik ve magnetik alanların etkisi altında bırakılmıştır. Bu alanların etkisi altında kalan farelerin etki altında kalmayanlara göre cevap verme oranlarında bir azalma görülmüştür [10].

Elektrik ve magnetik alanlar hayvanlar tarafından farkedilebildiğinden, hayvanlar üzerinde kısa süreler için hafif bir stres görülmüş olmasına rağmen aynı sonuç uzun süreler için geçerli olmamıştır [10].

İnsan davranışları üzerindeki etkisi ele alındığında ise, günlük yaşantı içindeki kompleks fonksiyonlar arasında çok da önemli bir etkisi olmadığı anlaşılmıştır [15].

BÖLÜM 6. ELEKTROMAGNETİK ALAN GÜVENLİK SINIRLARI HESABI

Bu bölümde bir enerji iletim hattının fazlararası gerilimini ve gücünü parametre olarak çevresindeki yerleşim bölgelerinin güvenli olarak iletim hattından ne kadar açıklıkta olması gerektiğinin hesabına ilişkin çalışma açıklanmıştır. Çalışma geliştirilen bir bilgisayar programı ile gerçekleştirilmiştir.

Programın algoritmasında çeşitli ülkelerde kullanılan magnetik alan sınırı 200 nT ve elektrik alan sınırı 10 kV/m temel alınmış ve hazırlanan programda önceki bölümlerde belirtildiği gibi magnetik alan

$$H = \frac{I}{2\pi x} \quad (\text{A/m}) \quad (6.1)$$

ve magnetik endüksiyon

$$B = \mu \frac{I}{2\pi x} \quad (\text{Tesla}) \quad (6.2)$$

eşitlikleri ile, elektrik alanı

$$E = \frac{Q}{4\pi \epsilon x^2} \quad (\text{V/m}) \quad (6.3)$$

eşitliği ile hesaplanmıştır. Bu eşitliklerde, I hattın geçen akımı, Q hattın yükünü ve x alan hesabı yapılacak noktanın hattın (hattın ekseninden) olan uzaklığını göstermektedir. (6.2) eşitliğindeki Q,

$$Q = C/U \quad (\text{Coulomb}) \quad (6.4)$$

bağıntısından hesaplanabilir. (6.4) eşitliğinde c Farad cinsinden hattın kapasitesini göstermektedir ve değeri

$$C \approx \frac{2\pi \epsilon l}{\ln(h_y/r)} \quad (6.5)$$

bağıntısından bulunur. Bu bağıntıda l hattın uzunluğu, r hattın yarıçapı ve h hattın yerden yüksekliğidir. Bu çalışmada l=1 m, r=0.02 m ve h=15 m alınmıştır.

(6.4) ve (6.5) eşitlikleri (6.3) eşitliğinde kullanılarak elektrik alan şiddeti için

$$E = \frac{l \cdot U}{2 \ln(h_y/r) x^2} \quad (6.6)$$

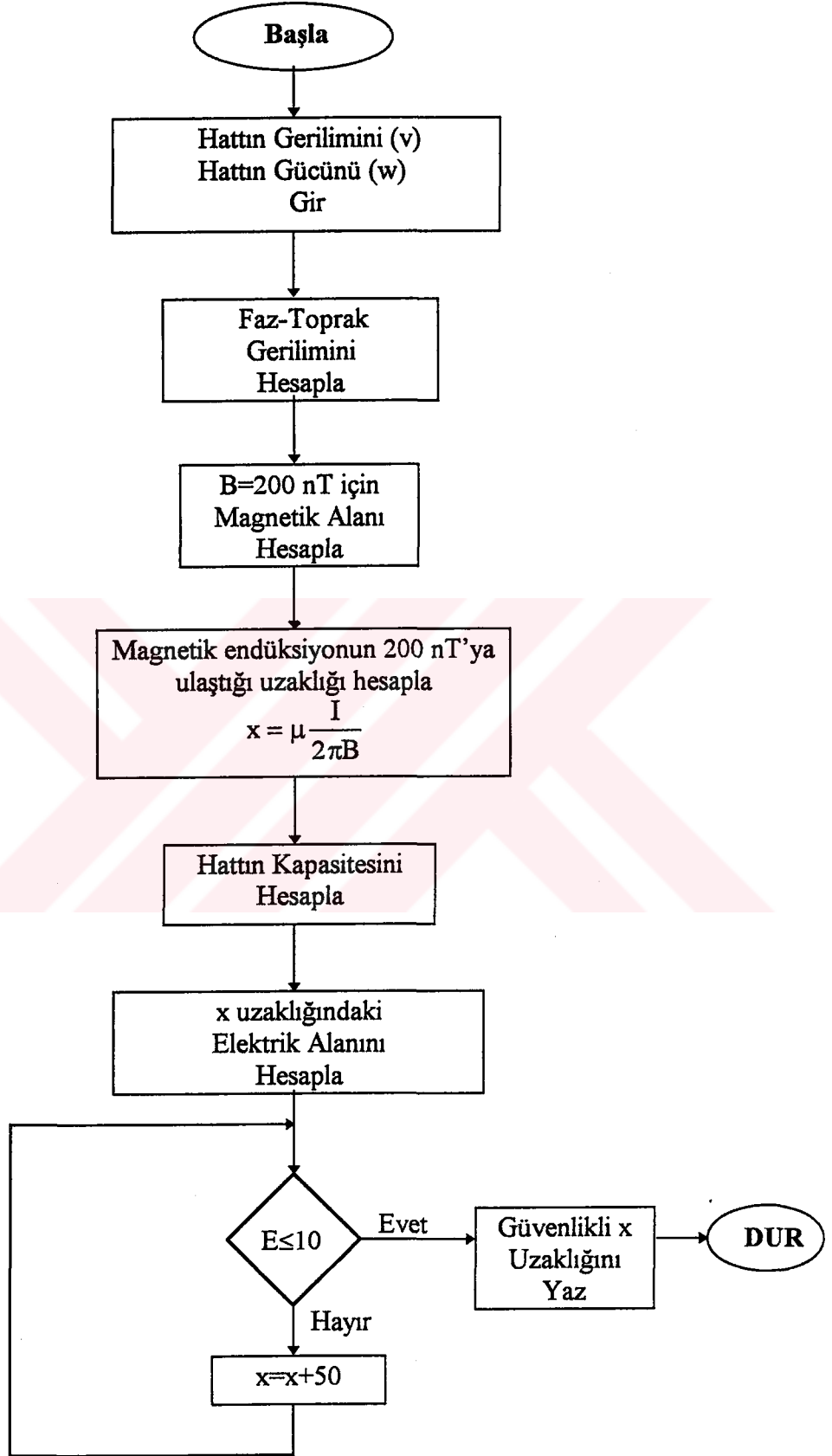
eşitliği yazılır.

Algoritma 1: Magnetik alan sınırı 200 nT ve elektrik alan sınırı 10 kV/m temel alınarak hazırlanan programın algoritmasıdır.

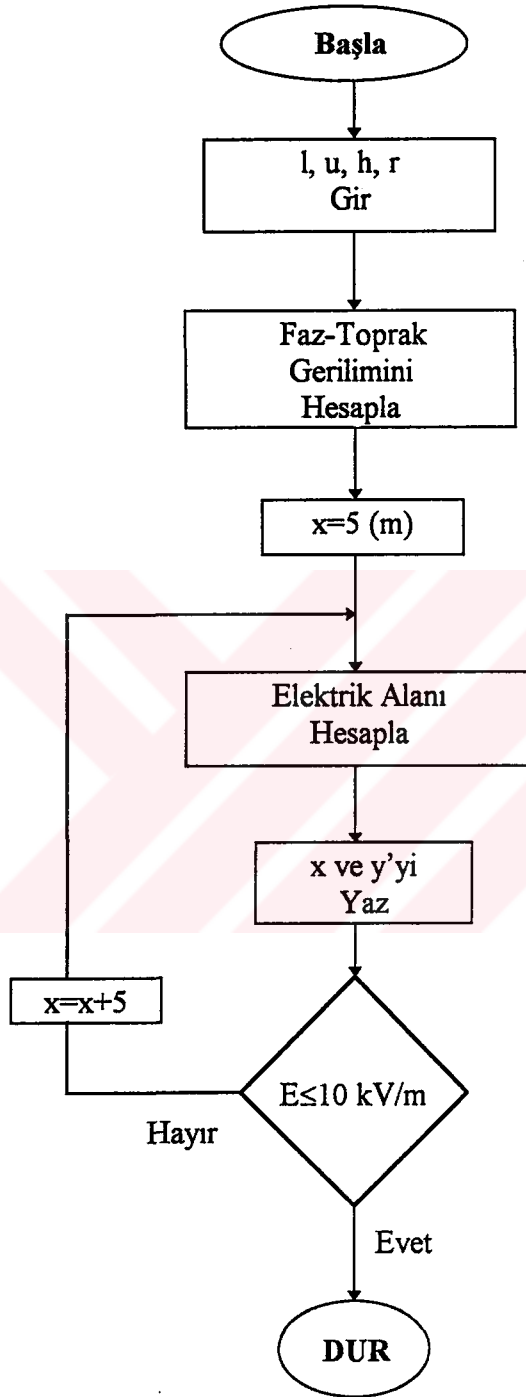
Algoritma 2: Elektrik alan şiddetinin uzaklıkla değişiminin algoritmasıdır.

Algoritma 3: Magnetik endüksiyonun uzaklıkla değişiminin algoritmasıdır. Bunlara ait programlar ekler bölümündedir.

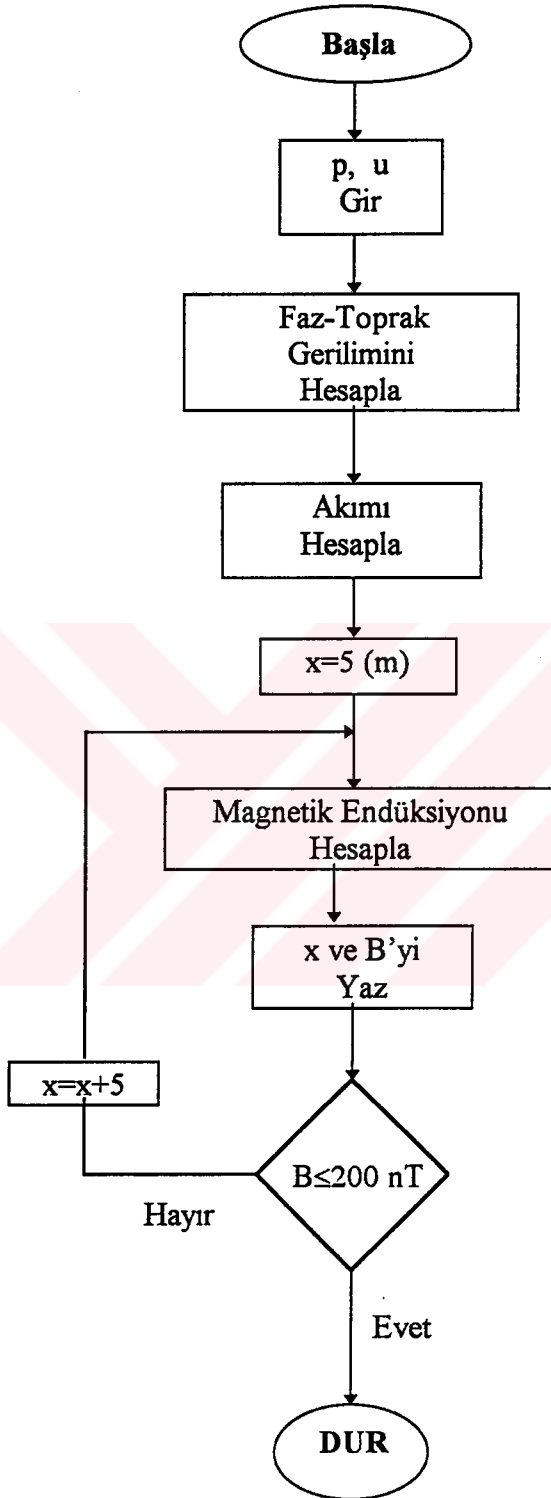




Algoritma 1. 200 nT ve 10 kV/m değerlerine göre güvenli x uzaklığının algoritması.



Algoritma 2. Elektrik Alan Şiddetinin Uzaklıkla Değişimi Algoritması.



Algoritma 3. Magnetik Endüksiyonun Uzaklıkla Değişimi Algoritması.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrik ve magnetik alanların insan sağlığı üzerindeki etkileri dünyanın pekçok ülkesinde birçok araştırmacı tarafından yıllardır incelenmektedir. Yapılan bu araştırmalar sonucunda elektromagnetik alanların etkilerine dair bulunan bulgular aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Son on yılda yapılan yoğun araştırmalar sonucu elektromagnetik alanların %100 kansere yol açan bir faktör olduğu ispatlanamamıştır. Ayrıca çocuklarda görülen lösemi ve diğer kanser oluşumlarında da etkili olduğuna dair yeterince tutarlı veri bulunamamıştır.

- Moleküler ve kimyasal bağları bozacak kadar kuvvetli olmadığı anlaşılan elektromagnetik alanların hücrelerin büyüme ve normal olarak çoğalmalarına etki yapıp yapmadığı ise hâlâ araştırılmaktadır.

- Yapılan araştırmalarda elektromagnetik alanların kusurlu doğumlara veya üreme problemlerine neden olduğuna dair yeterli bulgular elde edilememiştir.

- Elektromagnetik alanların sinir sistemi üzerinde de kesin etkileri olduğuna dair bir sonuç çıkarılamamıştır.

- Bazı araştırmalara göre elektromagnetik alanların hücre zarındaki kalsiyum akısını etkileyerek adele kasılmasına, yumurta kısırlaşmasına, hücre bölünmesine ve büyümesine etki yaparak kansere neden olduğu belirtilse de bunu tam olarak ispatlayacak herhangi bir kanıt bulunamamıştır.

- Elektromagnetik alanlar üzerinde yapılan epidemiksel ve biyolojik çalışmalar sonucunda elektromagnetik alanların insan vücudunun oluşturduğu termal alanlara oranla çok küçük olduğu neticesine varılmıştır.

- Elektromagnetik alanların belli sağlık problemlerine neden olduğuna dair kesin bulgular olmamasına rağmen kemik yapısında ve hormonlar üzerinde etkili olduğunu gösteren ciddi veriler vardır.

Daha önce de belirtildiği gibi epidemiksel çalışmalar özel olarak maruz kalmayan bireylerle maruz kalanlar üzerinde yapılan araştırmaları içerir.

Ancak elektrik ve magnetik alan maruziyetleri için anlamlı epidemiolojik çalışma yapmak oldukça zordur. Çünkü dünyanın her yerinde güç kullanımı söz konusu olduğundan 50 veya 60 Hz'lik alanlara maruz kalmamış bir bireyin bulunması hemen hemen mümkün değildir. Fakat bu demek değildir ki elektromagnetik alanların biyolojik etkilerinin araştırılmasına devam edilmeyecektir. Aksine elektromagnetik alanlar hakkında kesin ve istikrarlı bir sonuç çıkarabilmek için daha yoğun çalışmalara ihtiyaç vardır.

Bu çalışmalar, alan şiddetinin rolü, alana maruz kalma süresi ve sürekli maruz kalma durumundaki periyot dikkate alınarak yapılmalıdır. Belki de en önemlisi bütün bu çalışmalar sonucunda elektrik ve magnetik alanlar için uluslararası güvenlik standartlarının belirlenmesi olacaktır.

Yapılan araştırmalar sonucunda çeşitli ülkelerde güvenlik sınırı olarak magnetik alan için 200 nT, elektrik alan için de 10 kV/m belirlenmiştir.

Fakat belirtilen bu değerler tüm dünyanın kabul ettiği sınır değerler olmadığından konuya tam bir açıklık kazandırmak ve hedeflenen uluslararası güvenlik standartlarına ulaşılması bakımından yapılan araştırmaların tıp dünyası ile birlikte yürütülmesi gerekmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] ŞEKER, Selim, Taşıma Hatlarının İnsanlar Üzerindeki Biyolojik Etkileri ve Standartların İncelenmesi, Elektrik Enerjisi ve Teknolojileri Sempozyumu, İ.T.Ü. Sosyal Tesisleri Maçka Kampüsü, sayfa 48-51, 1994.
- [2] Office of Technology Assesment, Biological Effects of Power Frequency Electric and Magnetic Fields, U.S. Congress, Washington D.C., U.S.Goverment Office, 1989.
- [3] GUILLE, A.E., Electrical Power Systems, Volume I, Pergamon Press, Second Edition, London, 1977.
- [4] CARTER, G.W., The Electromagnetic Field in its Engineering Aspects, Logmans, London, 1967.
- [5] BUTTERWORTH, S., Electrical Characteristics of Overhead Lines, E.R.A., Report, 1954.
- [6] MORTLOCK, J.R., HUMPHREY DAVIES, M.W., Power System Analysis, Chapman and Hall, London, 1952.
- [7] PARTON, J.E., WRTGHT, A., Electric Stress Associated With Bundle Conductors, International Journal of Electrical Engineering Education, 3, p.357-367, 1965.
- [8] STEVENS, R.A., GERMAN, D.M., The Capacitance and Inductance of Overhead Lines , pp.71-81, 1964.
- [9] STEVENSON, W.D., Elements of Power System Analysis, McGraw-Hill, 2nd Edition, New York, 1962.

- [10] DAVIS, J.G., MILLS, W.A., "Health Effects of Low Frequency Electric and Magnetic Fields", Environmental Science and Technology, Vol.27, No.1, pp.44-48, 1993.
- [11] "Biological Effects of Power Frequency Electric and Magnetic Fields", IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, Vol.8, No.3, pp.46-47, September 1989.
- [12] "Biological Effects of Power Frequency Electric and Magnetic Fields", New York State Power Lines Science Advisory Panel, 1987.
- [13] "Environmental Health Criteria 35, Extremely Low Frequency (ELF) Fields", World Health Organization, Geneva, 1984.
- [14] "Environmental Health Criteria 69, Magnetic Fields", World Health Organization, Geneva, 1987.
- [15] TENFORDE, T.S., "Health Effects of Low Frequency Electric and Magnetic Fields", Environmental Science Technology, Vol.27, No.1, pp.56-58, 1993.
- [16] SAVITZ, D.A., "Health Effects of Low Frequency Electric and Magnetic Fields", Environmental Science Technology, Vol.27, No.1, pp.52-54, 1993.
- [17] DENNO, K., High Voltage Engineering in Power Systems, Boca Raton, p.367-376, CRC Press, 1992.
- [18] DOUGLAS, J., MALE, R., KAVET, R., NEWELL, G., PERHAC, R., SAGAN, L., Electromagnetic Fields and Human Health, EPRI J., p.14, July/August, 1984.
- [19] MACLAINE, D., "Fields of Doubt", Electrical Review, Vol.227, No.10, pp.28-30, May 1994.

EK-1

```
10 CLS
20 REM İletim Hattından olan Güvenlikli uzaklığı hesaplar!
30 INPUT " Hattın Gerilimi = ",V
40 INPUT " Hattın Gücü = " ,P
50 V=V*1000:P=P*1000000!
60 U=V/SQR(3)
70 PI=3.14156
80 MU=4*PI*10^(-7)
90 EPS=8.560001*10^(-12)
100 B=200*10^(-9)
110 HY=15
120 L=1
130 R=.02
140 F=50
150 W=2*PI*F
160 I=P/U
170 X=(MU*I)/(2*PI*B)
180 C=(2*PI*EPS*L)/LOG(HY/R)
190 Q=C/U
200 E=Q/(4*PI*EPS*X*X)
210 IF E < (10^4) THEN 260
220 LOCATE 20,10:PRINT" EMNİYET SINIRI AŞILDI "
230 INPUT " ",Z$
240 X=X+50
250 GOTO 200
260 PRINT" MİNİMUM UZAKLIK " ,X," DEĞERİNDEN BÜYÜK UZAKLIK
SEÇİLMELİ "
270 END
```

Hattın Gerilimi: 380
Hattın Gücü: 800

Minimum Uzaklık 3646.423 Büyük Uzaklık Seçilmeli

EK-2

```
10 CLS
20 REM Elektrik Alanınuzaklıkla değişimi
30 INPUT " Hattın Yarıçapı = " ,R
40 INPUT " Hattın Gerilimi = " ,V
50 INPUT " Hattın Yerden Yüksekliği = " ,HY
60 INPUT " Hattın Uzunluğu = " ,L
70 U=V/SQR(3)
80 X=5
90 E=(L*U)/(2*LOG((HY/R))*X*X)
100 PRINT X,E
110 IF E <= (10^4) THEN 140
120 X=X+5
130 GOTO 90
140 END
```

EK-3

```
10 CLS
20 REM Magnetik Endüksiyonun uzaklıkla değişimi
30 INPUT "MW cinsinden Hattın Gücü= ",P
40 INPUT "KV Hattın Gerilimi= ",V
50 P=P*1000000!:V=V*1000
60 PI=3.14156
70 U=V/SQR(3)
80 X=5
90 MU=4*PI*10^(-7)
100 I=P/U
110 B=(MU*I)/(2*PI*X)
130 PRINT "x="X,"b="B
150 IF B<= 200*(10^(-9)) THEN 180
160 X=X+5
170 GOTO 110
180 END
```

ÖZGEÇMİŞ

Ayşe Tüter, 1965 yılında Erzincan-Kemah'da doğdu. 1982 yılında Erenköy Kız Lisesinden mezun oldu. Aynı yıl girdiği İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümünden 1987 yılında mezun oldu. 1987'de İ.T.Ü. Rektörlüğü Yapı ve Teknik Daire Başkanlığına mühendis olarak girmiş olup, halen aynı görevi sürdürmektedir.

