

22063

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ENERJİ İLETİM HATLARINDA
YORULMA OLAYLARI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elek.Müh. Nihat İNANÇ

Tezin Teslim Tarihi	: 24 Ocak 1992
Tezin Kabul Tarihi	: 17 Şubat 1992
Danışman	: Prof. Dr. Nesrin TARKAN
Üye	: Prof. Dr. Muzaffer ÖZKAYA
Üye	: Doç. Dr. Adnan KAYPMAS

ŞUBAT 1992

ÖNSÖZ

Tez çalışmamı yöneten, değerli fikirleri ile çalışmama yardımcı olan Sayın Prof. Dr. Nesrin TARKAN 'a, araştırmam süresince yardımlarını esirgemeyen Türk Kablo, Rabak, T.S.E., T.E.K. Kuzey Batı Anadolu Adapazarı Şebeke Müdürlüğü yetkililerine teşekkürlerimi bir borç bilirim.



İÇİNDEKİLER

ÖZET	VI
SUMMARY	VII
BÖLÜM 1. GİRİŞ	1
BÖLÜM 2. YORULMA OLAYI	5
2.1. Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler	13
2.1.1. Metalurjik Faktörlerin Yorulma Ömrüne Etkisi	13
2.1.2. Sıcaklığın Yorulma Ömrüne Etkisi	14
2.1.3. Korozyonun Yorulma Ömrüne Etkisi	15
2.1.4. Yüzey Şartlarının Yorulma Ömrüne Etkisi	17
2.1.5. Kümülatif Hasarın Yorulma Ömrüne Etkisi	17
2.1.6. Zorlanma Alanının Yorulma Ömrüne Etkisi	17
2.1.7. Frekansın Yorulma Ömrüne Etkisi	18
2.1.8. Çatlak İlerleme Hızının Yorulma Ömrüne Etkisi	18
2.2. Yorulma Deneyi	18
2.3. Akma Koşulları	20
2.3.1. Basit Çekme Etkisinde Akma	21
2.3.2. Çok Eksenli Gerilme Etkisinde Akma Koşulları	21
2.3.2.1. Tresca Akma Koşulu (Maksimum Kayma Gerilmesi)	22
2.3.2.2. Mises Akma Koşulu	23
2.4. Enerji İletim Hatlarında Kullanılan Malzemelerin Yorulması	25
2.4.1. Çelik Tellerin Yorulması	26
2.4.2. Bakır ve Bakır Alaşımları	28
2.4.3. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları ...	29
2.4.4. Beton	30
2.4.5. Porselen	31
2.4.6. Cam	32
BÖLÜM 3. ENERJİ İLETİM HATLARI	33
3.1. İletim Malzemeleri	33
3.2. İletkenlerin Genel Özellikleri	33
3.3. İletkenlerin Yapılış Şekilleri	34

3.3.1. Masif Tel iletkenler	34
3.3.2. Masif Örgülü Tel iletkenler	34
3.3.3. Ortası Boş Örgülü iletkenler	35
3.3.4. Demet iletkenler	35
3.4. iletkenlerin Yapıldığı Malzemeler	35
3.4.1. Bakır	35
3.4.2. Bronz	37
3.4.3. Alüminyum	37
3.4.4. Aldrey	39
3.4.5. Çelik	40
3.4.6. Çelik-Alüminyum	40
3.4.7. Bakır Kaplı Çelik (Mannot Metali)....	42
3.5. iletken Malzemenin Seçiminde Gözönünde Tutulması Gereken Kriterler	43
3.5.1. iletkenlik veya Geçirgenlik	43
3.5.2. Koronaya Dayanıklılık	43
3.5.3. iletken Çapı	44
3.5.4. Özgül Ağırlık	44
3.5.5. Şehim	45
3.5.6. Termik Dayanıklılık	45
3.5.7. Mekanik Dayanıklılık	45
3.5.8. Titreşim Eğilimi	46

BÖLÜM 4. ENERJİ İLETİM HATLARINI ETKİLEYEN KUVVETLER 49

4.1. Dinamik Kuvvetler	49
4.2. Statik Kuvvetler	49
4.2.1. Dış Etkenler (Atmosferik)	49
4.2.1.1. Ek Rüzgâr Yüğü	50
4.2.1.2. Ek Buz Yüğü	52
4.2.1.3. Ek Buz ve Ek Rüzgâr Yüğü'nün Birlikte Olması Hali	55
4.2.1.4. Maximum Cer Gerilmeleri	57
4.2.1.5. Hat'ın Geçtiği Bölgenin Özelliği	57
4.2.1.6. Sıcaklık Değişimi	57
4.2.1.6.1. Isıl Özellikler	57
4.2.1.6.2. Termik Dayanıklılık	59
4.2.1.6.3. Isı Derecelerinin Değişmesi	60
4.2.1.7. Değişik Haller Denklemi	65
4.2.1.8. Kritik Sıcaklık	67
4.2.1.9. Kısa Devre Akımlarının Etkileri	68
4.2.2. iç Etkenler	72
4.2.2.1. Malzemenin Yapı Hatalarının iletkene Etkisi	72
4.2.2.2. Aşırı Yüklenmenin iletkene Etkisi	73

BÖLÜM 5. ENERJİ İLETİM HATLARINDA YORULMA OLAYININ MEYDANA GELDİĞİ YERLER 76

5.1. Direkler	76
5.1.1. Demir Direkler	77
5.1.2. Beton Direkler	77
5.1.3. Ağaç Direkler	78
5.2. Hırdavatlar	78
5.3. İzolatörler	78
5.4. iletkenler	81

BÖLÜM 6. YORULMA ETKİSİ ALTINDA İLETKENİN DAYANMA YÜKÜNÜN BELİRLENMESİ	82
6.1. Kabul Edilebilir Çekme Kuvveti Sınırının Belirlenmesi	82
6.2. Maksimum Ek Yükün Bulunması	86
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR	91
EK A	94
EK B	95
EK C	96
ÖZGEÇMİŞ	97

ÖZET

"Enerji iletim Hatlarında Yorulma Olayları" adı altında hazırlanan bu tez çalışması, elektrik enerjisinin hava hatlarıyla iletimi esnasında yorulmadan kaynaklanan arızalar ve bu arızaların giderilmesi ile ilgilidir.

Malzemenin ömrünü etkileyen temel etkenlerden olan "Yorulma Olayı", metalurjik açıdan yorumlanarak, yorulma ömrünü etkileyen faktörler açıklanmıştır.

Enerji iletim hatlarının temel elemanı olan iletkenler incelenmiş ve bu malzemelerin seçiminde gözönünde tutulması gereken unsurlara değinilmiştir.

Tezde üzerinde en çok durulan konu, enerji iletim hatlarını etkileyen kuvvetler olmuştur. Özellikle sıcaklık değişiminin ve gerilmenin yorulmaya etkisi genişçe işlenmiştir. Bu konudaki deney sonuçları ekte verilmiştir.

Ayrıca, enerji iletim hatlarında yorulma olayına maruz kalan kısımların yapısı incelenmiş ve Türkiye şartlarında alüminyum-çelik iletkenler için, yorulma etkisi altında iletkenin dayanma yükü belirlenmiştir.

Giriş bölümünde T.E.K. K.B.A. Şebeke Müdürlüğünden elde edilen istatistikler verilmiştir.

Ek'te ise Rabak tarafından yapılan yorulma deneyine ait sonuçlar verilmiştir.

SUMMARY

FATIGUE PHENOMENON ON ELECTRIC POWER TRANSMISSION LINES

As titled "Fatigue Phenomenon on Electric Power Transmission Lines" in this thesis, the fatigue phenomenon with its metallurgical explanation its causes, results, the places it occurs and some measures helping reducing the fatigue life are investigated in detail.

In power transmission, overhead lines are generally preferred over underground lines, especially from costal considerations. However, there is an important problem commonly encountered with overhead lines: fatigue.

The faults due to the fatigue on power transmission lines may occur on poles, insulators, hardwares and conductors. Therefore the "fatigue" phenomenon must be investigated from the metallurgical viewpoint.

Fracture, because of repeated rather than unidirectional or static loading, is known as fatigue and is the commonest cause of service failures. Such fractures can occur at stress levels well below the tensile strength, even in normally ductile low strength materials. Since it was first recognized more than a century ago, fatigue has been intensively investigated in order to understand the phenomenon and guard against its occurrence. These studies indicate that it is convenient to subdivide the over-all fatigue process into three main stages; crack initiation, including a consideration of the effects of cyclic loading on bulk properties, crack propagation to critical size, and unstable rupture of the remaining section.

It is now recognized that fatigue occurs as the result of plastic deformation, both in the initiation and propagation of cracks. Up to the terminal fracture fatigue is a form of ductile (stable) rupture, although often of an extremely localized nature. Because fatigue failure involves the cumulative effect of small-scale events taking place over perhaps millions of cycles, it is extremely difficult to make an a priori prediction of the fatigue lifetime. However, certain aspects of fatigue such as low cycle fatigue (failure in less than 1000 cycles) and fatigue crack propagation can be treated quantitatively on a semiempirical basis.

The fatigue of power transmission lines is in close relation especially to the environment and temperature.

The fatigue properties of a metal can be greatly influenced by the nature of the environment, especially in long time tests at low stresses and at low frequencies. Normal air has a deleterious effect on fatigue properties. The principal adverse components of air are moisture and oxygen. The additional presence of moisture further reduces the fatigue life by a factor of three. For lead, as with copper, oxygen alone has been found to have an adverse effect. Moisture decreases the fatigue strength of copper, aluminum, magnesium, and iron by 5 to 15 %.

Investigators have generally agreed that the main effect of a normal atmosphere on fatigue is on the propagation of cracks rather than in their initiation. This seems to be a reasonable interpretation, for the initially present oxide films will not be greatly altered by testing at low pressure. The principal effect of the environment will be in its reaction to the clean metal exposed at the tip of a fatigue crack. Cracks that would have been of a nonpropagating variety in vacuum, propagate in the presence of oxygen or moisture and thereby the fatigue resistance is lessened.

In environments that are more corrosive than air and that substantially reduce the resistance of the surface layers to fatigue crack initiation, both initiation as well as propagation may be affected.

Thermal fatigue refers to cracking or fracture due to stresses induced by thermal cycling rather than load cycling. It can be a serious problem; for example, thermal-stress fatigue, the predominant cause of failure of military jet aircraft engines, has occurred in a form of low cycle fatigue in steam powerplant components operated on an intermittent basis. A temperature change can lead to the development of stress if external constraints are present to prevent free expansion or contraction or if nonlinear thermal gradients develop.

However, the other factors having effect on the fatigue lifetime are also important.

Fundamentals of power transmission lines base on conductor materials.

A conductor of electricity is any substance or material which will afford continuous passage to an electric current when subjected to a difference of electric potential. The greater the density of current for a given potential difference, the more efficient the conductor is said to be. Virtually all substances in

solid or liquid state possess the property of electric conductivity in some degree, but certain substances are relatively efficient conductors, while others are almost totally devoid of this property. The metals, for example are the best conductors, while many other substances, such as metal oxides and salts, minerals, and fibrous materials, are relatively poor conductors, but their conductivity is beneficially affected by the absorption of moisture. Some of the less efficient conducting materials, such as carbon and certain metal alloys, as well as the efficient conductors such as copper and aluminum have very useful applications in the electrical arts.

Certain other substances possess so little conductivity that they are classed as nonconductors, a better term being insulators or dielectrics. In general, all materials which are used commercially for conducting electricity for any purpose are classed as conductors.

Electric circuits in general possess four fundamental electrical properties, consisting of resistance, inductance, capacitance, and leakance. That portion of a circuit which is represented by its conductors will also possess these four properties, but only two of them are related to the properties of the conductor considered by itself. Capacitance and leakance depend in part upon the external dimensions of the conductors and their distances from one another and from other conducting bodies and in part upon the dielectric properties of the materials employed for insulating purposes. The inductance is a function of the magnetic field established by the current in a conductor, but this field as a whole is divisible into two parts, one being wholly external to the conductor and the other being wholly within the conductor; only the latter portion can be regarded as corresponding to the magnetic properties of the conductor material. The resistance is strictly a property of the conductor itself. Both the resistance and the internal inductance of conductors change in effective values when the current changes with great rapidity, as in the case of high-frequency alternating currents; this is termed the "skin effect."

In certain cases, conductors are subjected to various mechanical stresses. Consequently their weight, tensile strength, and elastic properties require consideration in all applications of this character. Conductor materials as a class are affected by changes in temperature and by the conditions of mechanical stress to which they are subjected in service. They are also affected by the nature of the mechanical working and the heat-treatment which they receive in the course of manufacture or fabrication into finished products.

The type of material from which conductors are made is highly important as well as the manufacturing way.

The material used in overhead lines conductors is desired to have mechanical endurance beside electrical conductivity. The materials satisfying these conditions are copper, bronze, aluminium, steel cored aluminium, cadmium copper, copper-clad steel and steel. The mechanical and the electrical properties should be considered together.

Besides, in selecting the conductor material some other dominant factors such as conductivity, conductor diameter, weight of conductor (specific gravity), sag, corona, propensity to vibration and thermal endurance.

In order for the power transmission be economical transmission must be made on highly voltage. However, in this case the corona problem arises, and it should be taken into account.

The increasing use of aluminum conductors in extra-high voltage transmission lines, both ac and dc, and the presence of corona even at transmission voltages not regarded as "extra-high," point to a need of understanding the phenomenon. Corona occurs when the potential of the conductor is raised so that the dielectric strength of the surrounding air is exceeded. The air becomes ionized and bluish illuminated gaseous tufts or streamers appear around the conductor, being more pronounced where there are irregularities of the conductor surface. The discharge is accompanied by the odor of ozone, and there may be a hissing sound.

The effects of corona discharge from a bare conductor power line may interfere with radio and TV reception, or adjacent carrier and signal circuits.

Bundled conductors are frequently used to effect lower voltage stress on the air insulation, which is one of the reasons why bundled conductors are much used in extra-high voltage lines, 300 kV and up.

On the other hand the overhead line must be capable of operating in safety and must have high thermal endurance.

As a final point, vibrations occurring on the overhead conductors and the earth wires should be considered. These vibrations are of four types:

i) Swinging of the conductors caused by changes in wind pressure. This is harmless provided that sufficient clearance is left between conductors to prevent flashover. Larger clearances will be required on long spans such as river crossings.

ii) Dancing of the conductors caused by irregular coatings of sleet in wind. Parts of the conductor are temporarily changed from round to oval section and the wind causes varying amounts of aerodynamic lift throughout the conductor length. The conductors may dance vartically or horizontally with an amplitude great enough to cause them to touch each other. The use of bundle conductors increases the tendency to dance because of torsional oscillations of the bundle and the use of rigid spacers.

iii) Jumping of the conductors caused by the sudden shedding of ice loads. The worst jumping occurs when ice melts from the centre span of a section after it has fallen from the other spans. Serious jumping also takes place when ice slips down the conductor towards midspan. Attempts have been made to inhibit conductor jumping by fitting special insulator assemblies at the suspension points and by increasing the mass per unit length of line at midspan. It has not been possible, however, to achieve a sufficient reduction in jump height to prevent the conductors from clashing.

iv) High frequency vibrations caused by the formation of eddies on the leeward side of a conductor. The frequency of the oscillations is of the order of 5 to 100 Hz and their amplitude is about 1.3 centimetres. These vibrations may cause failure of the conductor at the supporting clamps due to metal fatigue. This is less likely when the conductor clamps have been carefully designed or when the conductor has been reinforced for a few metres on either side of the clamp. A more effective method, however, is to prevent the oscillations from reaching the clamps by suspending a Stockbridge damper from each conductor near each point of entry into a clamp.

Power transmission lines are subject to some different kinds of forces. These forces can be classified as dynamic and static forces in general.

Static forces acting upon transmission lines can appear due to internal or external factors. Among the external factors "temperature change" deserves to be pointed out especially.

Within the temperature ranges of ordinary service there is no appreciable change in the properties of conductor materials, except in electrical resistance and physical dimensions. The change in resistance with change in temperature is sufficient to require consideration in many engineering calculations. The change in physical dimensions with change in temperature is also important in certain cases, such as in overhead spans and in large units of apparatus or equipment.

The variation of conductor voltage with the temperature or conductor weight is calculated through state equations. "The critical temperature" can be found from these equations.

Moreover, the effects of short-circuit currents causing dynamical and thermic strains should be investigated.

As well known, the resistance vary with the temperature. This variation characteristic and the corresponding temperature coefficients could be calculated. Besides, the direct current resistance value and its variation with temperature can be found, as well as the alternative current resistance. The factors having effect on the resistance such as skin, proximity, spriality and so on, are also considered.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Üretilen elektrik enerjisi yeraltı kabloları veya havai hatlar ile iletilerek tüketime sunulur. Elektrik enerjisinin iletimi genellikle yeraltı kablolarına nazaran daha ekonomik olan havai hatlar ile yapılmaktadır.

Ancak elektrik enerjisinin havai hatlar ile iletilmesinde bazı problemlerle karşılaşılmalıdır. Bunlardan en önemlisi enerji iletim hatlarının atmosferik şartlardan olumsuz yönde oldukça etkilenmeleridir. Bölgenin aşırı rüzgârlı ve buzlu olması sonucu hat elemanlarının maruz kaldıkları kuvvetlerin artmasından dolayı zamanla arızalar oluşmaktadır. Hatta bölgenin nemli ya da kü-kürtlü olması iletkenlerin ömrünü olumsuz yönde etkilemektedir.

Enerji iletim hatları, maruz kaldıkları etkiler sonucu yorulmaya uğrarlar. Yorulma olayı; elektriki olabileceği gibi mekaniki de olabilir. Zamanla bu yorulma sınırı aşıldığında artık "yorulma kırılması" kaçınılmaz olur. Yorulma olayına iletkenlerde rastlanabileceği gibi direklerde, izolatörlerde ve hırdavatlarda da rastlanabilir.

Bundan dolayı enerji iletim hatlarının tasarlanmasında oldukça hassas davranılmalıdır. Aksi halde iletim hattının ömrü kısalır. Etkin olan faktörler gözönüne alınarak tesis kurulmalıdır.

Ayrıca, enerji iletim hattı kurulurken, yapısı düzgün ve dayanıklılığı yüksek malzemelerin seçilmesine özen gösterilmelidir. Özellikle aşırı yüklenme sonucu iletkenin göstereceği davranış incelenmelidir. Bu, belki ilk aşamada maliyette bir artışa sebep olabilir fakat uzun vadede düşünüldüğünde, gerçekte ekonomik yönden bir kazanç sağlayacaktır.

Bilindiği gibi enerji iletim hatlarının ömrü bulundukları bölgelerin özelliğine bağlıdır. Enerji iletim hattının ömrünün uzun olabilmesi için, iletim hattının kurulacağı bölgenin özelliklerinin iyi tesbit edilmesi gerekir. Hatta tesis kurulmadan önce, bölgede geçici tesisler kurularak, bölgenin tesise olan etkisini tesbit etmek için mutlaka bir deney süreci geçirilmelidir. Örneğin, tesisin yapılacağı bölgeye birkaç direk dikilip, bunlar arasına izolatörler aracılığıyla iletkenler asılarak bu elemanların maruz kaldıkları buz ve rüzgâr kuvvetleri gibi yükler tesbit edilebilir.

Yapılan istatistikler sonucu Türkiye'de enerji iletim hatlarında meydana gelen arızaların büyük çoğunluğunun dış etkenler sonucu oluştuğu görülmüştür. Bu konuda elde edilen bazı veriler şöyle sıralanabilir;

380 kV. Keban-Kayseri Enerji iletim Hattında; direklerde ve koruma tellerinde yaklaşık 8 cm. çapında, iletkenlerde ise 23 cm. çapında buzlanma görülmüştür. Aşırı buzlanma ve kuvvetli rüzgâr nedeniyle bölgedeki direkler yıkılmıştır [1].

154 kV. Brş. N-Bozüyük Enerji iletim Hattında; iletkenler üzerinde kristalize olmayan buz kalınlığının 25 cm. civarında olduğu ölçülmüş, 50 cm 'lik bir buz parçası tartılarak 4 kg 'lık buz yükü tesbit edilmiştir. Bölgedeki direkler bu buzlanma ve rüzgâr sonucu yıkılmıştır [2].

380 kV. Gökçekaya-İstanbul Enerji iletim Hattında; koruma telinin koparak fazlar arasına düşmesi ve rüzgârın tesiri ile fazlara yaklaşılarak hattı açtığı veya koruma telinin buz yükü tesiri ile sarkarak faz aralarına girmesi ve rüzgârın tesiri ile de fazlara yaklaşılarak hattı açtığı tesbit edilmiştir. Arıza sonucu bölgedeki direkler yıkılmıştır [3].

380 kV. Gökçekaya-Ümraniye Enerji iletim Hattında; koruma tellerini direklere bağlayan izolatörlerin şarjlı havalarda parçalanarak koruma tellerinin direk konsolları üzerine düştüğü gözlenmiştir. Aynı hat'ta kuvvetli rüzgâr sonucu bazı direkler devrilmiştir [4].

380 kV. Ankara-İstanbul ve Gökçekaya-İstanbul Enerji iletim Hattında; izolatörlerden bir kısmı kopmuştur. Hasarlı izolatörler incelendiğinde, hepsinin ark etkisiyle yalıtkan kısımlarının eriyerek koptuğu görülmüştür. Hasarın oluş şekli hakkında danışman firma Coe-menwealth'ın görüşü; "Kırılan izolatörlerin, kırılmadan önce mekaniki ya da elektriki hatası olabileceği, bu gibi hataların imalat sırasında veya yüklerken ve tesisatı kurarken kötü kaldırmadan dolayı olabileceği" şeklindedir [5].

154 kV. Adapazarı-Kartal Enerji iletim Hattında; direklerin yıkılmasına sebep olan etken ise hırdavatlardan kaynaklanmıştır. Çift gergi boyunduruklarının bazılarında arızadan sonra yapılan kontrolde kopukluklar görülmüştür. Buz yükünün binmesi ile bu yükü taşımayan hırdavat malzemeleri kopmuş ve direk yıkılmalarına sebep olmuştur [6].

380 kV. Osmana-Sincan Enerji iletim Hattında oluşan arızalara ise "Kara Leylek" in sebep olduğu anlaşılmıştır [7].

Enerji iletim hatlarında olabilecek arızaların öncelikle iletkenlerde olması daha sonra sırasıyla izolatörlerde, konsollarda, en sonda ise direklerde olması istenir. Oysa Türkiye’de oluşan arızaların çoğunluğu öncelikle direklerin yıkılması olarak kendisini göstermektedir. Bu ise istenmeyen bir durumdur. Bunun sebebi ise, enerji iletim hattının geçtiği bölgenin özelliklerinin iyi araştırılmamasıdır. Bölgenin coğrafi konumu dikkate alınmadan çekilen hat, atmosferik zorlanmalardan çabuk etkilenererek arızaya sebep olmaktadır.

Enerji iletim hatlarının maruz kaldıkları gerek dış gerek iç etkenler sonucu, "yorulma ömrünün nasıl değiştiği" hakkında herhangi bir çalışma yapılmamıştır. Bu eksiklik özellikle "Elektriki Yorulma" konusunda daha da belirgindir.

Pratikte "Yorulma" olayının önüne geçilememesine rağmen alınacak hassas tedbirler ile bu olayın enerji iletim hattına etkisi minimuma düşürülebilir.

BÖLÜM 2

YORULMA OLAYI

Bir çok makina parçaları ve yapı elemanları kullanılma esnasında tekrarlanan gerilmeler ve titreşimler altında çalışmaktadırlar. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, gerilmeler parçanın statik dayanımından küçük olmalarına rağmen, belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayına neden olurlar. "YORULMA" adı verilen bu olay ilk defa 1850-1860 yılları arasında Wöhler tarafından incelenmiş ve teknoloji ilerledikçe mühendislik uygulamalarında daha fazla önem kazanmıştır. Otomotiv ve uçak endüstrisindeki parçalar ile kompresör, pompa, türbin gibi makinelerin parçalarında görülen mekanik hasarların yaklaşık % 90'ı yorulma sonucunda olmaktadır.

Yorulma olayına, parçaya sadece dışarıdan uygulanan mekanik kuvvetler değil, ısı genleşme ve büzülmelelerinden doğan ısısal gerilmeler de neden olabilmektedir.

Yorulma olayında çatlama genellikle yüzeydeki bir pürüzde, bir çentikte, bir çizikte, bir kılcal çatlakta veya ani kesit değişimlerinin olduğu yerde başlar. Çatlak teşekkülü için genellikle şu üç ana faktör gereklidir:

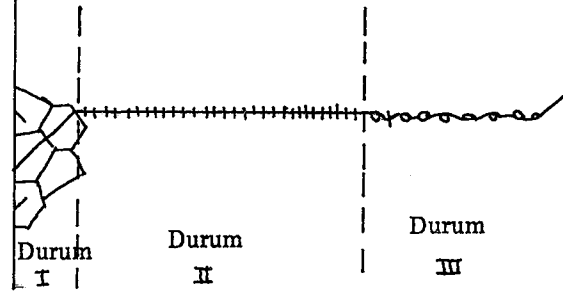
- a) Yeteri derecede yüksek bir maximum çekme gerilmesi,
- b) Uygulanan gerilmenin oldukça geniş değişimi veya dalgalanması,
- c) Uygulanan gerilmenin yeteri kadar büyük tekrarlanma sayısı [8].

Yorulma olayında iki soru cevaplandırılmalıdır: Birincisi, statik kopma gerilimi altında çatlağın nasıl meydana geldiği, ikincisi ise çatlağın makroskobik ebada kadar ne şekilde büyüdüğüdür. Ewing ve Humfrey'e göre, muayyen tekrar sayısından sonra meydana gelen kayma bantları, çatlak teşekkülüne yol açmaktadır. Yüzeyde görülen bu kayma bantları zamanla, numune yüzeyinden içeriye nüfuz etmektedir. İlk önce bir kristal içerisinde meydana gelen çatlak ilerleyerek diğer kristalleri etkisi altına almaktadır. Yorulma olayında meydana gelen kayma bantları aynı kristallografik düzlem ve doğrultular üzerinde meydana gelmektedir. Kayma bantları deneyin başlangıcında meydana gelmekte ve deney süresince artmaktadır. Hafif bir elektrolitik parlatma, yüzeydeki kayma bantlarını kaldırarak kalıcı kayma bantlarını ortaya çıkarmaktadır. Çatlak, bu kalıcı kayma bantlarında meydana gelmektedir. Adı geçen bantlar ise, numune ömrünün % 5'inden sonra görülmektedir.

Yorulma olayında yüzeyde görülen en önemli değişiklik, kayma bantlarının hareketine bağlı olarak ortaya çıkan "ekstrüzyon" ve "intrüzyon" adı verilen çıkıntı ve girintilerin meydana gelmesidir [9, 10].

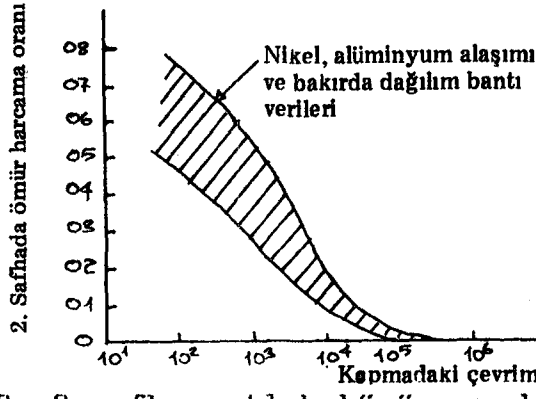
Şekil 2-1 bir düzlemde yorulma kopması gelişimini sematik olarak temsil etmektedir. Bir çatlak, serbest bir yüzeyde başlar ve son kopmayı meydana getirene değin farklı safhalarda ilerler. Çatlak başlaması ve çatlak büyümesinin ilk safhaları tane büyüklüğüne bağlı olan bir mikro ölçekte çatlak ilerlemesi ve deformasyonla ilişkilidir. Çatlak yüzeyini çoğu zaman kaplayan çatlak büyümesinin 2. safhası genelde uygulanan maksimum çekme gerilmesine normaldir (düzleme diktir). Çatlak yolu, malzemenin homojen olmamasından ciddi bir şekilde etkilenmez ve çatlak büyümesi malzemenin değişmez özellikleri ile kontrol edilir. Sonuç olarak ; bölgesel çatlak ucu

deformasyonu malzemenin hata yapısı, statik kırılma modlarına bağlı olduğunda bu olay kararsızlık haline varana kadar çatlak ilerlemesini direk olarak kuvvetlendirir. Bu 3. safha basit çekme çatlak büyümesinde malzemenin sünek yırtılması olayıdır.

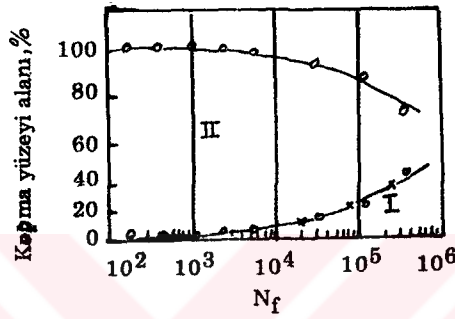


Şekil 2-1 Numune kesiti boyunca yorulma çatlak ilerlemesi

Kırılma yüzeyinin oranları 1.safha çatlak büyümesinin 3.safhası tarafından meydana getirilir ve malzeme, uygulanan gerilme-genleme seviyesiyle değişir. Düşük çevrimde; yüksek gerilme yorulmasında 2.safha, yüksek çevrimde; düşük gerilme yorulmasında ise 1. safha önemli rolleri üstlenir. Safhalardaki ömür harcaması bakımından 1.safha düşük gerilme seviyelerinde en önemli rolü oynar. Şekil 2-2, 1.safha ve 2.safhanın yorulma ömrü ile hangi oranlarda değiştiğini gösterirken, Şekil 2-3 her iki safha tarafından oluşturulan kırılma yüzeyi oranlarını göstermektedir. 3.safha çevrime göre devamlı hızlı bir işlemdir fakat özellikle sünekliği düşük malzemeler için, yüksek genleme seviyelerinde kırılma yüzeyinin önemli bir kısmını teşkil eder. Çatlak başlangıcındaki ömür harcaması oranı yüksek genleme yorulması rejiminde oldukça düşüktür ve birçok metal ve alaşımları için düşük gerilme yorulmasında çok küçük olabilmektedir [11].



Şekil 2-2 2.safha çatlak büyüme modelinde ömür harcama oranı



Şekil 2-3 1. ve 2. safha karılmaları tarafından oluşturulan nisbi kırılma yüzeyi alanları.

Son zamanlarda yorulmanın, hem çatlak oluşumu hem de çatlağın ilerlemesinde plastik deformasyondan dolayı meydana geldiği anlaşılmıştır. Son derece bölgesel bir tabiatta olmasına rağmen son kopmaya kadar yorulma sünek (kararlı) bir kopma şeklindedir. Muhtemelen milyonlarca çevrimde oluşan küçük ölçekli olayların toplam etkisi yorulma ile ilişkili olduğu için yorulma ömrü hakkında bir ön tahmin yapmak son derece güçtür. Bununla birlikte düşük çevrimli yorulma(kırılma 1000 çevrim altında olur) ve yorulma çatlak ilerlemesi gibi belirgin yorulmalar yarı deneysel temelde kantitatif olarak elde edilebilir [12].

Bu ana faktörlerin yanında çok sayıda yan faktörler de sayılabilir; örneğin yüzey kalitesi, korozyon, sıcaklık, aşırı yükleme, kalıcı iç gerilmeler, bileşik

gerilmeler, gerilme konsantrasyonu, frekans, mikroyapı gibi.

Yukarıda sayılan faktörler gözönünde bulundurulacak olursa, metalik parçanın yorulma direncini ve yorulma ömrünü arttırmak için, etkili faktörleri en zararsız halde bulunduracak çok iyi bir dizayna gerek vardır. Ancak küçük bir yorulma deneyi numunesi üzerinde yapılan deney sonuçlarını karmaşık bir parça veya konstrüksiyon dizaynında kullanmak oldukça güçtür.

Faktörlerin çok sayıda olmaları ve karmaşık etki-lerde bulunmaları, uzun yıllar yorulma deneyi ile ilgili standartların hazırlanamamasına neden olmuştur. Değişik araştırmacı ve araştırma merkezleri özel cihazlar ve özel numuneler kullanarak konuyla ilgili çalışmalarını sürdürmüşlerdir. Son yıllarda bazı ülkelerde hazırlanan standartlar da yine belirli koşullar için sınırlandırılmıştır.

Yorulma kırılması gevrek türde olduğundan nerede ve ne zaman oluşacağını önceden kestirmek olanaksızdır. Geçmişte birçok kazalara neden olduğundan üzerinde yoğun çalışmalar yapılmış ve halen de yapılmaktadır.

Yorulma olayının nasıl oluştuğu tam olarak açıklanamamış olmakla beraber bu konuda bilinenler aşağıda özetlenmiştir:

Yorulmaya genellikle iç yapıda mevcut kusurlar civarında oluşan yerel gerilme yığılmaları neden olur. Bundan dolayı yorulma olayı iç yapıya çok bağlıdır. iç yapıda bulunan çatlak, çentik, boşluk, sert parçacık ve ani kesit değişimleri civarındaki gerilmeler ortalama gerilmeden daha büyüktür. Bu gerilmeler etkisinde yerel plastik şekil değiştirme meydana gelir. Diğer taraftan başlangıçta hiçbir bozukluk içermeyen yüzeyi parlatılmış

üniform kesitli bir metalde elastik sınır altında da dislokasyonlar yerel olarak hareket ederek kayma bantları oluştururlar. Bu bantlar da yüzeyde çıkıntılar ve çöktürmelerin doğmasına, dolayısıyla gerilme yığılmalarına neden olurlar. Bütün bu hallerde tekrarlı zorlamalar etkisinde oluşan tersinir olmayan plastik şekil değiştirme sonucu malzeme pekleşir, gevrekliği artar ve sonunda mikro çatlaklar doğar. Bu mikro çatlaklar zamanla yayılarak ani yorulma kırılması meydana getirir. Yorulma çatlakları genellikle yüzeyde başlar ve içeriye doğru yayılır [13, 14, 15, 16].

Mühendislikte, dizayn ve değerlendirme açısından düşünülecek olursa iki tip yorulma verisi elde edilebilmektedir. Dayanma verisi genelde S-N veya ϵ -N eğrileri formunda, çatlak büyüme verileri ise genelde da/dN 'ın ΔK eğrisine karşı olduğu bir şekildedir. Dayanım eğrileri hala yorulmaya karşı temel dizaynı teşkil eder fakat pratikteki kısıtlamaları da günden güne artmaktadır. Dayanım eğrileri, düzlemsel numunelerden sabit frekanstan çıkarılan verilerden veya yapısal malzemelerden elde edilen verilerden elde edilirler. Kopma olana kadar gerilme-genleme uygulamasına maruz bırakılan numunede hata (kopma) N_f olarak isimlendirilir. N_f 'yi etkileyen faktörler konusunda, özellikle çatlak ilerlemesi ve büyümesi hususunda yeterli bilgiye rastlamak mümkün olamamaktadır. Bunların yanında çevreden kaynaklanan ve sürünme olayı ile beraber N_f 'nin değişmesine yolaçan olaylar geniş olarak incelenmiştir. Ancak N_f 'nin sadece sürünme ve korozyon yorulması gibi olaylardan etkilenmediği, malzeme bünyesindeki atomsal ve çizgi kusurlarının da N_f 'yi etkilediği belirtilmiştir. Ancak bu kusur ve atom hareketlerinin N_f 'yi ne derecede etkilediği konusunda detaylı verilere rastlanamamıştır.

Genlemenin (uzamanın) $\Delta\epsilon$ - N_f dayanma eğrileri için elastik ve plastik dağılımları iki bileşen için güç

kanunu ifadesini temsil eder. Bundan dolayı yorulma için Basquin ve Coffin-Manson kanunları ortaya çıkarılmıştır.

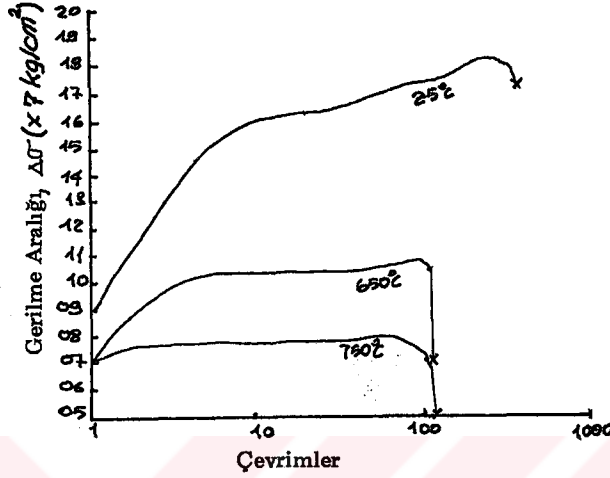
$$\Delta \epsilon_e \cdot N_f^{\alpha'} = C_1 \quad (2.1)$$

$$\Delta \epsilon_p \cdot N_f^{\alpha} = C \quad (2.2)$$

Burada α , α' , C , C_1 malzeme sabitleridir. Kopma için yarı çevrimle temsil edilen bir çekme testi olduğunu farzederek C_1 ve C sabitleri çekmede kırılma kopması (σ_f) ve süneklik (ϵ_f) ile alakalı olabilmektedir. Yüksek sıcaklıklarda birçok metal ve alaşım için $\alpha=0.6$, $\alpha'=0.1$ civarlarındadır.

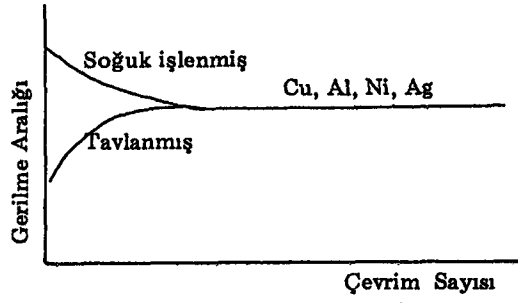
İster sabit olarak uygulanan gerilme veya aynı şekilde uygulanan genleme testi için çevrimli bir gerilme-genleme eğrisinin kararlı hal gerilme ve kararlı hal genlemeye göre ifade edilebilmesine rağmen gerilme veya genleme aralığının çevrimlerle beraber değiştiği önemli olabilmektedir. Şekil 2-4, değişik sıcaklıklarda Nb (niyobyum) ile stabilize edilen (kararlı kılınan) 20 Cr - 25 Ni paslanmaz çeliği için verilen bir genleme aralığında çevrim için gerilme aralığındaki değişimi göstermektedir. 25°C' de kopmaya kadar çok az bir miktarda sertleşme olmasına rağmen her üç eğri de gerilme doyması seviyesine kadar başlangıçta hızlı bir sertleşme periyodu gösterirler. Çevrimli bir gerilme-genleme eğrisi çizildiğinde, bu eğri kararlı hal durumunu temsil eden yarı ömür gerilme aralığıdır. Kopmadan hemen önceki gerilmedeki son düşme malzemede bulunan makro çatlaklardan kaynaklanır. Başlangıçtaki sertleşme periyodu kararlı dislokasyon alt yapısının meydana gelmesi ile ve mikro yapı ile alakalıdır. Böyle bir yapı oluşur oluşmaz kopmanın meydana gelmesi açısından çatlak ilerlemesi genelde o kadar hızlıdır ki genleme ile çevrimli numunenin tüm ömrü çatlak büyümesine kadar devam eder. Başlangıçtaki sertleşme bölgesi yine kararlı hal dislokasyon alt yapısının olduğu

başlangıç sürünme rejiminin de bir sonucudur. Yüksek sıcaklıklarda daha az sertleşme olduğunu söylemeye gerek yoktur.

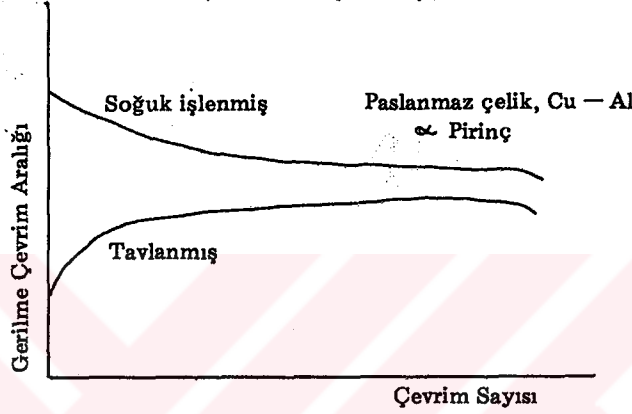


Şekil 2-4 Nb ile stabilize edilmiş 20 Cr-25 Ni paslanmaz çeliği için çevrimle gerçek gerilme aralığı $\Delta\sigma$ 'nın değişmesi ($\Delta\epsilon_p=0.04$)

Alaşımlara çevrim uygulandığında genelde her zaman sertleşmezler. Yüksek mukavemetli veya ön gerilimli malzemeler yumuşarlar. Şekil 2-5 yüksek yığılma hatası enerjisi ve kolay bir şekilde dislokasyon alt tanesi oluşturan malzemelerdeki çevrim sertleşmesi ve yumuşama davranışını şematik olarak temsil etmektedir. Verilen bir alaşım için başlangıçta ister sert ister yumuşak olsun belirli bir genleme seviyesinde çevrim sırasında eşsiz bir kararlı hal gerilmesi ortaya çıkar. Düzlemsel kaymaya sahip metal ve alaşımları kararlı gerilme davranışına sahip değildirler ve böylece bu metallerin tabiatına bağlı olarak değişken bir çevrim gerilme-genleme ilişkisine sahiptirler (Şekil 2-6). Düzlemsel kaymaya sahip malzemeler, yüksek sıcaklıklarda yaygın olarak kullanılan malzemelerden paslanmaz çelikler ve nikel esaslı süper alaşımları içerirler [11].



Şekil 2-5 Dalgalı kayma ile metallerin deforme olmasının sertleşme ve yumuşama davranışları.



Şekil 2-6 Düzlemsel kayma ile deformasyona uğrayan metallerin sertleşme ve yumuşama davranışları.

2.1. Yorulma Ömrünü Etkileyen Faktörler

2.1.1. Metalurjik Faktörlerin Yorulma Ömrüne Etkisi

Metalurjik faktörler; döküm şekli, sıcak ve soğuk şekil verme usulleri, katı hal reaksiyonları, fazların dağılımı v.b. gibi malzemenin ısı ve mekaniksel tarihçesini ihtiva eden özelliklerdir. Gerek ısı ve gerekse mekaniksel işlemler, metal ve alaşımların iç gerilmelerin dağılımı, kristal yapısı, dislokasyonların hareketi v.b. üzerine etki ederek mekanik özelliklerde değişmelere sebep olmaktadır.

Diğer mekanik özellikler gibi, bir malzemenin yorulma mukavemeti de inklüzyonlar, kristal boyutu,

anizotropi, mikro gerilimler v.b.'nin durumuna bağlı olarak değişmektedir.

Yorulma çatlaklarının başlamasında inklüzyonların tipi, şekli ve büyüklüklerinin rolü vardır. Yapılan alışmalar, oksit inklüzyonların yorulmayı hızlandırıcı yönde etki ettikleri ve bu tip inklüzyonların büyüklüklerinin artmasıyla yorulma çatlaklarının başlama ihtimalinin arttığını göstermiştir.

Isıl işlemler, haddeleme ve ekstrüzyon işlemleri sonucunda metallerin tane boyut ve şekli değişmektedir. Tane boyutunun küçülmesi, yorulma mukavemetini arttırmaktadır. Kimyasal bileşimin yorulma mukavemetine etkisi, ısıl işlem ve mikro-yapının etkisinden azdır. Genellikle bütün ısıl işlemler yorulma mukavemetine etki ederler.

Döküm şekli de yorulma mukavemetine etki etmektedir; şöyle ki, vakumda yapılan ergitme, havada yapılan ergitmeye nazaran alaşımın yorulma mukavemetini arttırmaktadır. Her türlü soğuk şekil değişimi, metal ve alaşımların yorulma mukavemetini arttırır [9, 10].

2.1.2. Sıcaklığın Yorulma Ömrüne Etkisi

Yorulma kırılması, ergime sıcaklığının altındaki bütün sıcaklıklarda meydana gelebilir. Kırık yüzeyleri, sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir.

Sıcaklığın düşmesi, yorulma mukavemetini arttırmaktadır. Buna karşılık yüksek sıcaklıklarda yorulma mukavemeti azalmakta ve (S-N) eğrisinde bulunan dönüm noktası görülmemektedir. Sadece az karbonlu yumuşak çeliklerde, dolayısıyla çekme mukavemetinde meydana gelen artışa paralel olarak, yorulma mukavemetinde de artma görülmektedir [9, 10].

Yüksek sıcaklıklarda oda sıcaklığına göre metal ve alaşımlarının dayanma ömürleri (yorulma ömürleri) düşmektedir. Örneğin % 0.5 molibden içeren bir çelikte 25°C'deki dayanma ömrü 10^5 çevrim ise 500°C'de dayanma ömrü 10^4 çevrimden biraz fazla olmaktadır. Buna karşılık toplam genleme aralığı yüksek sıcaklıklarda oda sıcaklığına göre artmaktadır [11].

Termal yorulma; yük çevriminden ziyade termal çevrim tarafından tahrik edilen gerilmelere bağlı çatlama veya kırılmadır. Bu yorulma çok ciddi problemlere yol açabilir. Serbest genleşmeyi, büzülmeyi veya lineer olmayan termal gradyenlerin gelişimini önlemek için bir dış etken varsa sıcaklık değişimi gerilmenin artmasına yol açabilmektedir [12].

2.1.3. Korozyonun Yorulma Ömrüne Etkisi

Korozyon ve periyodik yüklemenin ortak etkilerinin metalde meydana getirdiği hasara, korozyonlu yorulma denir. Orijin itibarıyla normal yorulma kırılmasına benzeyen korozyonlu yorulma kırılmasında malzeme yüzeyi, malzeme cinsi ve korozif ortama bağlı olarak, rengini değiştirir; çatlaklar girintili çıkıntılı veya kademeli bir görünüş arzeder.

Yapılan araştırmalar korozif ortamın yorulma ömrünü düşürdüğünü göstermiştir [9, 10].

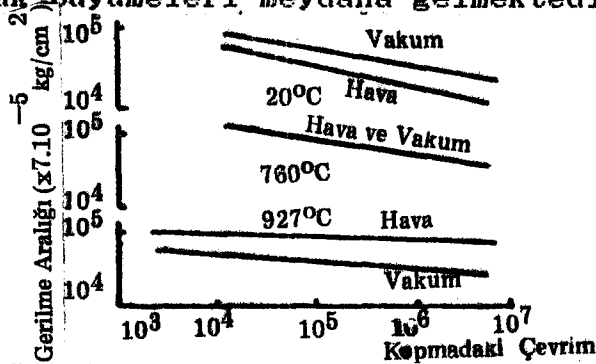
Bir metalin yorulma özellikleri, özellikle düşük gerilmelerde uzun süreli testlerde ve düşük frekanslarda çevre tabiatından önemli ölçüde etkilenir. Normal atmosferin yorulma özelliklerine yıkıcı bir etkisi vardır. Atmosferin en temel bileşenleri nem ve oksijendir. Nem miktarının normalin biraz üzerine çıkması yorulma ömrünü üç kat düşürür. Kurşun ve bakırda olduğu gibi oksijenin yorulma ömrüne ters bir etkisi vardır. Nem; bakırın,

alüminyumun, magnezyumun ve demirin yorulma mukavemetini % 5'den % 15'e kadar düşürür.

Araştırmacılar, normal atmosferin yorulmada, çatlağın başlamasından ziyade esas olarak çatlak ilerlemesini etkilediği üzerinde fikir birliğine varmışlardır. Bu olay, düşük basınçla test ile başlangıçta mevcut oksit filmlerinin önemli derecede değişmeyeceği hakkında makul bir varsayım ortaya çıkarmaktadır. Çevrenin asıl etkisi yorulma çatlağının ucunda temiz metal yüzeyi ile reaksiyonu sonucu oluşmaktadır. Vakumlu atmosferde ilerleyemeyen çatlaklar oksijen ve nem ortamında ilerlerler ve böylece yorulma direnci düşer.

Atmosferden daha korozif çevre şartlarında yorulma çatlak başlangıcı için yüzey tabakasının direnci düşer. Hem çatlak başlangıcı hem de çatlak ilerleme safhaları daha fazla etkilenir [12].

Korozyon, yorulma ömrünü ve hızını etkileyen oldukça önemli bir faktördür. Yüksek sıcaklıklarda atmosfer şartlarındaki yorulma ile vakumdaki yorulma ömrü arasında büyük farklar vardır. Vakumdaki yorulma ömrü, atmosfer şartlarındaki yorulma ömründen çok daha yüksektir. Şekil 2-7 tek kristal bir süper alaşım için atmosferde ve vakumdaki yorulma ömrü verilerini vermektedir. Oda sıcaklığında normal atmosferde dayanma düşüktür. Çünkü bir takım çatlak büyümeleri meydana gelmektedir [11].



Şekil 2-7 Tek kristal bir süper alaşımın yorulma ömrüne vakum hava ve sıcaklığın etkisi.

2.1.4. Yüzey Şartlarının Yorulma Ömrüne Etkisi

Yorulma kırılmaları serbest bir yüzeyden başlayarak ilerler. Bu nedenle yüzey şartları, yorulma mukavemetine büyük ölçüde etki etmektedir. Yüzey durumu yorulma üzerine üç şekilde etki eder: yüzeydeki kalıcı gerilmeler, yüzeydeki pürüzlülük ve malzeme yüzeyine uygulanan işlemlerle yüzey özelliğinin değişmesi [9, 10]

2.1.5. Kümülatif Hasarın Yorulma Ömrüne Etkisi

Pratikte, mühendislik malzemeleri, değişen yüklemeler altında çalışırlar. Belirli koşullarda yorulma ömrü N olan bir malzeme, aynı koşullar altında n defa periyodik yüklemeye tabi tutulduğu taktirde meydana gelen hasar n/N oranıyla tarif edilmektedir. Bu suretle koşullar aynı tutulsa dahi, farklı yükleme sayılarına maruz kalan malzemelerde oluşan hasar da değişik olmaktadır. Kırılma bu hasarların toplam etkisi ile meydana gelir [9, 10].

2.1.6. Zorlanma Alanının Yorulma Ömrüne Etkisi

Plastik alandaki yorulma olayı, maximum basma ile maximum çekme arasındaki zorlanmanın mutlak değeri ile ifade edilen "zorlanma alanı" yardımıyla incelenmektedir.

Yüksek zorlanmalı periyodik yüklemede malzeme özellikleri değişir. Malzeme sertleşir veya yumuşar. Zorlanma yumuşaması veya zorlanma sertleşmesinin, maximum zorlanmanın minimum zorlanmaya oranına bağlı olduğu bulunmuştur. Johnson, Lable ve Abdel-Aziz'in çalışmaları, zorlanma oranı (-1) iken sertleşme, (0.5) iken yumuşama olduğunu göstermektedir. Ancak malzeme özelliklerindeki bu değişimler, yorulma ömrünün ilk % 10'unda meydana gelmektedir [9, 10].

2.1.7. Frekansın Yorulma Ömrüne Etkisi

Mühendislik malzemelerinin tatbikatta maruz kaldıkları yorulma şartlarında yükleme frekansı, geniş limitler içerisinde değişebilmektedir. Yorulma kırılması, bu limitler içerisinde herhangi bir frekansta meydana gelebilir. Frekans artışı yorulma ömrünü arttırır [9, 10].

2.1.8. Çatlak İlerleme Hızının Yorulma Ömrüne Etkisi

Gerilim alanı ile birlikte, minimum gerilimin maksimum gerilime oranının da çatlak ilerlemesi üzerine etkili olduğu tesbit edilmiştir. Ancak bu iki etki her malzeme için geçerli bir genel denklem ile ifade edilememiştir. Yapılan araştırmalar korozyonun ve sıcaklığın çatlak ilerleme hızını arttırdıklarını göstermiştir [9, 10].

2.2. Yorulma Deneyi

Yorulma deneyi ile bir malzemenin belirli bir tekrar sayısı için güvenle dayanabileceği gerilme sınırı saptanır. Çalışma esnasında bir parçaya gelecek gerilme değişik tür ve şiddette olabilir. Ancak yorulma deneylerinde, malzemelerin tekrarlanan dinamik zorlamalar karşısında göstereceği direnç hakkında kantitatif bilgiler edinebilmek için, uygulamada en sık rastlanan belirli gerilme türleri ele alınmıştır. Bu tür gerilmelerin düzgün periyotlarla uygulanması halinde elde edilen sonuçlar kriter kabul edilerek teknik yorumlar yapılabilmektedir.

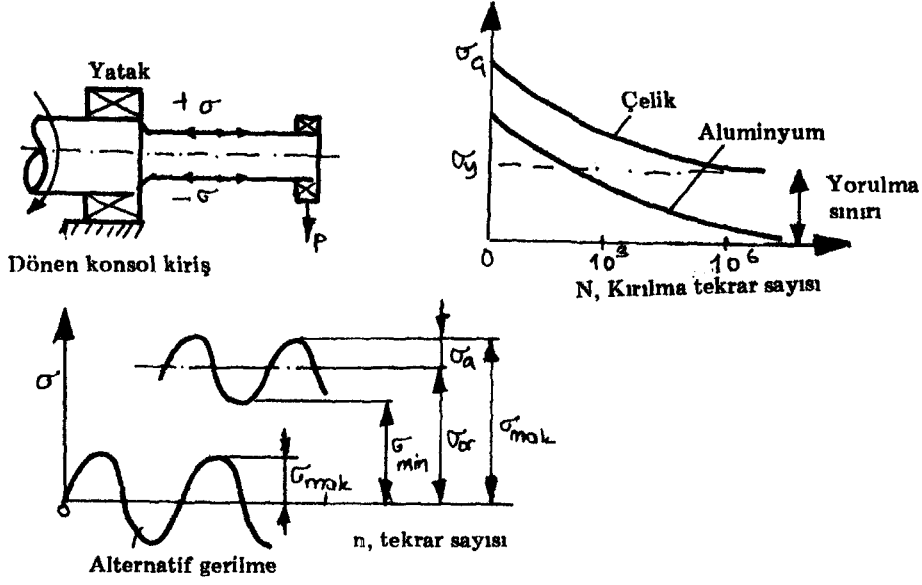
Deney için hazırlanan numunelere belirli büyüklükte tekrarlı gerilme uygulanır ve bu gerilme genlikleri ile bunlara karşı gelen N kırılma tekrar sayıları bir eğri halinde çizilir. Şekil 2-8' de görülen bu yorulma eğrilerine (S-N) veya "Wöhler eğrileri" denir.

En basit alternatif gerilme Şekil 2-8'de görüldüğü gibi dönen bir konsol kiriş yardımı ile sağlanır. Konsol kirişin üzerinde eksene paralel bir lif üstte iken maximum çekmeye, altta iken maximum basınca maruz kalır, dolayısıyla bir devirde bir defa maximum, bir defa da minimumdan geçen gerilmenin değişimi bir sinüsoidal eğri şeklinde olur. Kirişe uygulanan P yükünden σ_m maximum gerilmesi hesaplanır, bunun etkisinde kırılmanın olduğu N tekrar sayısı ölçülür. Bu şekilde nokta nokta S-N eğrisi elde edilir.

Yorulma eğrilerinin genel şekli Şekil 2-8 ' de görülmektedir. Gerilme genliği σ çekme mukavemetinden başlayarak sürekli olarak N kırılma tekrar sayısı ile azalır. Bu S-N yorulma eğrisinin en karakteristik bölgesi 10^3 ile 10^6 tekrar sayıları arasında bulunur. Bu bölgede N yorulma ömrü σ gerilme genliğine kuvvetle bağlıdır ve bu bağıntı,

$$\sigma^a \cdot N = k \quad (2.3)$$

şeklindedir. Burada k sabiti malzeme türüne ve deney koşullarına bağlıdır. a üssü 8 ile 15 arasında değişir. Demirli alaşımların (özellikle çelikler) yorulma eğrisi bir asimptota sahiptir, 10^6 tekrar sayısından sonra eğri yatay hale gelir. Bu asimptotik değere "yorulma sınırı" veya "sürekli mukavemet" denir. Demirli alaşımların alternatif halde yorulma sınırı çekme mukavemetinin yarısı kadardır. Bu alaşımlarda yorulmanın oluşturduğu gerilme genliği 10^3 ile 10^6 tekrar sayıları arasında çekme mukavemetinden başlayarak bunun yarı değerine kadar düşer. Demirsiz alaşımların (alüminyum alaşımları gibi) yorulma eğrilerinde sürekli azalma görülür, asimptotları yoktur.



Şekil 2-8 Yorulma deneyi ve yorulma eğrileri

Bu tür malzemeler için belirli bir ömür seçilir ve bu genellikle 10^6 tekrar sayısına karşı gelir. Bu tekrar sayısına karşı gelen gerilme de yorulma eğrisinden elde edilir ve bu gerilmeye "yorulma mukavemeti" denir. Demirli olmayan metallerde alternatif halde yorulma mukavemeti çekme mukavemetinin $1/3$ 'ü kadardır [8, 13, 14].

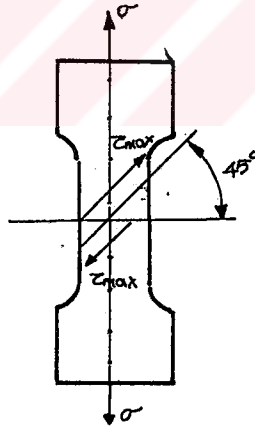
2.3. Akma Koşulları

Akma mukavemeti veya sınırı bir malzemenin plastik şekil değiştirmeye karşı direncini belirler. Akma sınırından sonra iç yapıda kaymalar, dolayısıyla kalıcı etkiler oluşur. Bu nedenle uygulamada boyut hesapları için kritik gerilme olarak akma mukavemeti seçilir. Basit çekme deneyi ile saptanan σ_a akma mukavemeti uygun bir emniyet katsayısına bölünerek emniyet gerilmesi elde edilir. Yük taşıyıcı elemanlarda gerilmelerin hiç bir zaman akma sınırına ulaşmasına izin verilmez. Ancak çok eksenli gerilme etkisinde kaymalar genellikle kısıtlandığı için akma oldukça karışık bir hal alır. Bu durumda akmanın başlaması için gerilme bileşenlerinin belirli bir

koşulu sağlaması gerekir. Bugüne kadar bu konuda değişik koşullar önerilmiştir. Bunların arasında gerçeğe en iyi uyan Tresca ve Mises Koşulları oldukça yaygın olarak kullanılırlar. Bu koşullar aşağıda kısaca ele alınacaktır.

2.3.1. Basit Çekme Etkisinde Akma

Akma olayı ancak kayma gerilmesi etkisinde oluşabilir. Bir cisme basit çekme uygulandığı zaman çekme doğrultusu ile 45° açı yapan düzlemler boyunca maksimum kayma gerilmeleri etkir. Bu maksimum kayma gerilmesi çekme gerilmesinin yarısına eşittir. Maksimum kayma gerilmesi kritik bir değere erişince kayma, dolayısıyla akma başlar. Yüzeyi parlatılmış bir yumuşak çelik numunesi üzerinde akma süresinde görülen eğik kayma çizgileri (Lüders çizgileri) bu olay için açık bir kanıttır (Şekil 2-9). Basit çekme halinde akma mukavemeti σ_a ise kaymaların başladığı kayma gerilmesi $\tau_a = \sigma_a/2$ olur.



Şekil 2-9 Yumuşak bir çelikte kayma çizgilerinin oluşumu.

2.3.2. Çok Eksenli Gerilme Etkisinde Akma Koşulları

Çok eksenli gerilme etkisinde akma olayı daha karışık bir hale gelir. Gerilme bileşenlerinin her birinin

kaymaları etkilemesi beklenir. Bu durumda akmanın başlaması için uygulanan gerilme bileşenlerinin belirli koşulları sağlaması gerekir. Bu koşulları saptamak amacı ile yapılan çalışmalar sonucu değişik öneriler ileri sürülmüştür. Akmada ana etken kayma gerilmeleridir, dolayısı ile bu konuda en başarılı sayılan Tresca ve Mises akma koşulları bu gerçeğe dayanır.

2.3.2.1. Tresca Akma Koşulu (Maksimum kayma gerilmesi)

Bu koşula göre bir malzemede akmanın başlaması için uygulanan gerilmelerin oluşturduğu maksimum kayma gerilmesi bileşeninin basit çekme halindeki τ_A akma kayma gerilmesine eşit olması gerekir. τ_A da σ_A akma sınırının yarısına eşittir. Uygulanan asal gerilmeler büyüklük sırasına göre σ_1 , σ_2 ve σ_3 ise maksimum kayma gerilmesi τ_m ,

$$\tau_m = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \quad (2.4)$$

olur. Akmanın oluşması için,

$$\tau_m = \tau_A = \sigma_A / 2 = (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 \quad (2.5)$$

buradan,

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_A \quad (2.6)$$

elde edilir.

Uygulamada çoğu zaman iki eksenli gerilme (düzlem gerilme) haline rastlanır. Asıl gerilmeler artı olduğu takdirde üçüncü asal gerilme $\sigma_3=0$ olur. Bu durumda akma koşulunun $\sigma_1=\sigma_A$ olacağı açıkça görülür. Ancak bazen hatalı olarak $\sigma_1-\sigma_2=\sigma_A$ bağıntısının kullanıldığı gözlenmektedir. Bu koşul uygulanılırken her üç asal gerilmenin bağlı büyüklüklerine ve işaretlerine dikkat edilmesi

gerekir.

2.3.2.2. Mises Akma Koşulu

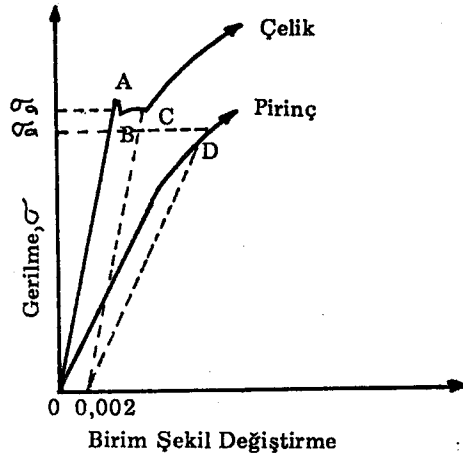
Mises akma koşuluna göre akmanın başlaması için uygulanan asal gerilmelerin farklarının karelerinin toplamının basit çökme halindeki σ_A akma sınırının karesinin iki katına eşit olması gerekir. Buna göre;

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2 \cdot \sigma_A^2 \quad (2.7)$$

olur. Asal gerilmelerinin farkları bulundukları düzleme etkileyen maksimum kayma gerilmelerini verir. Tresca koşulu yalnız bunlardan en büyüğünü gözönüne aldığı halde Mises koşulunda her üçü de etkilidir. Diğer bir deyimle Tresca koşulunda en büyük ve en küçük asal gerilmenin de katkısı vardır. Metaller üzerinde yapılan yoğun deneyler genellikle Mises koşulunun deneysel sonuçlara daha iyi uyduğunu göstermiştir. Bununla beraber basit çekme halinde her iki koşulda aynı sonucu verir. Tresca koşulunun daha basit olması ve daha güvenilir yönde sonuç vermesi nedeni ile uygulamada daha sık kullanılır [14].

Akma Mukavemeti

Bazı metalik malzemelerde (özellikle az ve orta karbonlu çeliklerde) orantı sınırı bitip, plastik şekil değişimi, başlamadan önce, değişik bir akma olayı ile karşılaşılır. Şekil 2-10 'da A noktasına gelince gerilme sabit kalmasına rağmen numunede uzama görülür ve bu olay BC arasında devam eder. Bu tip akma olayı, malzemedeki dislokasyonların kilitlenmesi ve çoğalması ile açıklanmaktadır. A noktasındaki gerilmeye üst akma gerilmesi, B noktasındaki gerilmeye de alt akma gerilmesi adı verilir.



Şekil 2-10 Çelik ve pirince ait gerilme-%uzama eğrileri.

Akma mukavemeti ($\sigma_{m,a}$); akma yükünün (F_{akma}) orijinal kesit alana bölünmesiyle bulunur.

$$\sigma_{m,a} = (F_{akma} / A_o) \quad (2.8)$$

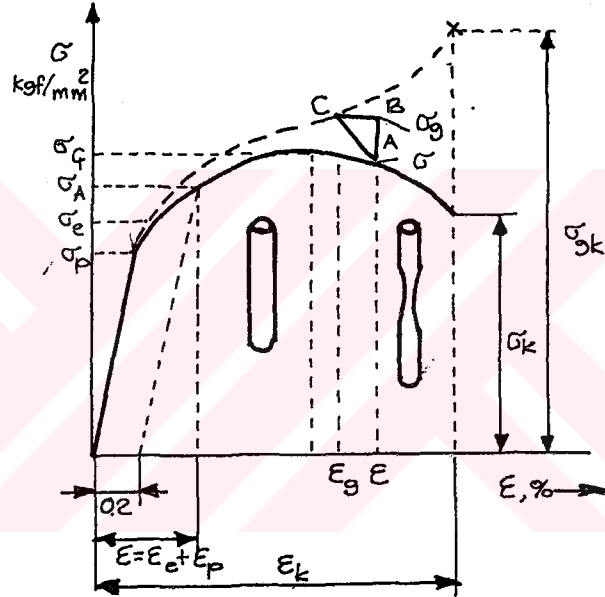
Akma olayı, bütün malzemelerde Şekil 2-10'da gerilme- birim şekil değiştirme diyagramı görülen çelikte olduğu gibi bariz değildir. Mühendislik maksatları için kullanılabilir, elastik sınır ise akma sınırı olarak bilinir. Bu nedenle bariz şekilde akma göstermeyen malzemelerde de akma sınırının bilinmesi gerekir. Bu durumda akma mukavemeti, mühendislik çekme diyagramı üzerinden belirli bir kalıcı uzamaya ($e = \% 0.01$ den $\% 0.2$ ye kadar) karşılık gelen gerilme olarak tanımlanır ve

$$\sigma_{m,a} = F (e = \% 0.2) / A_o \quad (2.9)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu nedenle bariz akma göstermeyen malzemelerin çekme diyagramında belirli bir kalıcı birim şekil değiştirme oranından (örneğin $e = \% 0.2$) elastik doğruya bir paralel çizildiğinde, eğriyi kestiği noktaya (D noktası) karşılık gelen gerilme akma mukavemeti olarak alınır[17].

Plastik bölgenin başlangıcı olarak akma sınırı alınır. σ_A akma sınırı veya akma mukavemeti % 0.2 plastik şekil değiştirme oluşturan gerilmedir. Bu tanımdan yararlanılarak akma sınırını bulmak için sürekli yükleme ile elde edilen $(\sigma-\epsilon)$ diyagramının şekil değiştirme ekseninde % 0.2 noktası işaretlenir ve bu noktadan diyagramın doğrusal kısmına paralel çizilir. Bu paralelin eğriyi kestiği noktaya karşı gelen gerilme akma sınırıdır. Bu durum Şekil 2-11'de gösterilmiştir [14].



Şekil 2-11 Gerilme-Şekil değiştirme eğrisi.

2.4. Enerji iletim Hatlarında Kullanılan Malzemelerin Yorulması

Korumasız veya yetersiz olarak korunmuş bir hava hattı iletkeni belirli şartlar altında rüzgârdan kaynaklanan titreşimlere uğrayabilir (sınırlılık veya askı noktalarında gelişecek halatın bir kolundaki yorulma başarısızlıkları olan bir uzama gibi). Benzer başarısızlıklar bağlantı yerlerinde veya yakınında ve diğer süreksizliklerde gözlenmiştir. Aynı zamanda zararın, destek yapılarında ve hırdavatlarda da oluşabileceği belirlenmiştir.

Yorulma başarısızlıklarının sıkı muayenesi çatlakların halatın kollarının tekrar tekrar birbirlerine karşı sürtündüğü yıpranmış bölgelerde başladığını göstermiştir. Mikrografik çalışmalar göstermiştir ki, halatın bir kolunun yüzey tabakasının düzeni aşınma ile şiddetle bozulur. Çatlaklar, düzeni bozulmuş tabakalar içinde görülür ve (iletkenlerde var olan titreşim kuvvetleri altında) aşınmış bölgeden aşağı düzenli metal içine girebilir, etkileyebilir.

Aşınma olayının açıklaması aşağıdaki gibidir: Bükülen iletkenin destek noktalarında, iletkende bitişik halat kolları arasında veya halat kolları ve bitişik elemanlar arasında küçük bir miktar hareket meydana gelir. Mikroskobik seviyede, metal yüzeyleri arasındaki temas bir yüzey teması değildir. Fakat aksine pürüzler (çok küçük çıkıntılar) arasında bir temastır. Pürüzler arasındaki gizli temas pürüzler arasında mikroskobik kaynak yerlerinde meydana gelir. Ancak uzaktaki halat kolları arasındaki hareket bu kaynakları veya kaynaklarla bitişik metalleri kırar. Halat kolları yüzeyleri arasında hareketler olduğu, bir çok defa tekrar ettiği zaman, birçok kaynak yeri yapılır ve kırılır, ve düzensiz bir tabaka halat kolu yüzeyinde oluşur. Aşınma ile üretilen döküntü, aşınmış alan çevresine ince bir toz serpilmiş gibi görülebilir. Çatlaklar kolayca anlaşılamayan kuvvetler tarafından düzensiz yüzey tabakalarında merhale merhale açılır [18].

2.4.1. Çelik Tellerin Yorulma Dayanımları

Çelik tellere uygulanmasına müsaade edilebilir zorlanmaların seviyesini belirlemek için çekme dayanımı, eğme sayısı, burma sayısı gibi alışılmış mekanik-teknolojik deney sonuçlarının yanında, yorulma dayanımlarının da verilmesi gereklidir. Yapılan deneyler çelik tellerde yorulma dayanımının çekme dayanımına olan oranının aynı

malzeme için normal deney parçası boyutlarında bulunan orana göre, genel olarak daha düşük olduğunu göstermiştir. Örneğin eğme yorulma dayanımının çekme dayanımına oranı düzgün yüzeyli silindirik parçalarda ,

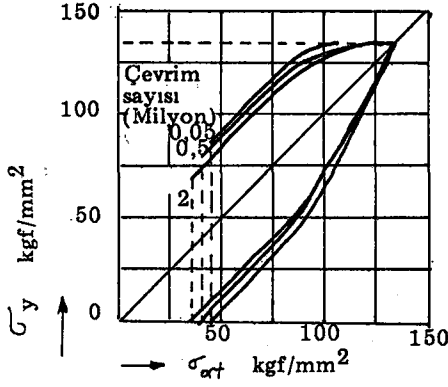
$$\sigma_{ed} : \sigma_K = (0,40 \dots 0,60) : 1 \quad (2.10)$$

olmasına karşın, tellerde sadece;

$$\sigma_{ed} : \sigma_K = (0,25 \dots 0,35) : 1 \quad (2.11)$$

düzeyindedir. Çeşitli yöntemlerle üretilmiş ve dayanımları 75...260 kg.f/mm² arasında değişen çelik tellerde saptanan yukarıdaki oranlar için ortalama değer olarak 0.29 bulunmuştur.

Çelik tellerin yorulma dayanımları üretim ve malzeme ile ilgili çok sayıda faktöre bağlıdır. Tel çekme sırasındaki toplam kesit küçülmesi, çekme kademeleri sayısı, kalıp malzemesi, çekme hızı ve çekme sıcaklığının etkileri yanında patent tavlı görmüş tellerde bu tavlın uygulama yöntemi de önemlidir. Aynı çelikte kurşun'da yapılan tav, havada yapılan tavidan daha yüksek çekme ve yorulma dayanımları sağlamaktadır. Karbon miktarının ve tel çekmedeki kesit küçülmesinin artması ile çekme ve yorulma dayanımları genellikle yükselir. Çekme sonrası yapılacak bir menevişleme ısıl işleminin yorulma dayanımına olumlu etkisi vardır. Çeliğin karbon miktarına bağlı olarak % 60 dolaylarındaki kesit küçülmesi için menevişleme sıcaklığı 150 - 300 °C arasında seçilir. Kesit küçülmesinin daha büyük olması halinde ise menevişleme ile ancak az veya orta karbonlu çeliklerin yorulma dayanımında iyileşme sağlanabilir.



Şekil 2-12: 135 kgf/mm² çekme dayanımına sahip bir çelik telin yorulma dayanımı diyagramı, tel kesiti % 49.5 daraltılarak 0.7 mm çapa çekilmiştir. Kimyasal bileşimi: % 0.6 C; % 0.22 Si; % 0.72 Mn.

Kuvvetli yüzey dekarbürizasyonu teller ve bu tellerden üretilen mamullerin yorulma dayanımını olumsuz etkiler. Çekilmiş çelik tellere parlatma, taşlama ve bilya püskürtme gibi yüzey işlemlerinin uygulanması halinde yorulma dayanımlarını % 30 dolayında arttırmak mümkün olmaktadır. Kalıp çizikleri veya korozyon izleri gibi yüzey hataları ise yorulma dayanımını düşürürler.

Yüzey koruma tabakaları kaplamanın cinsine ve kaplama yöntemine bağlı olarak yorulma dayanımını artırıcı veya azaltıcı yönde etki ederler. Korozyonu engelleyen bu kaplamalar korozif ortamda sürekli yorulma dayanımını ise her ortamda yükseltirler [19, 20].

2.4.2. Bakır ve Bakır Alaşımları

Saf bakır yumuşak, plastik işlenebilme özelliği yüksek ve korozyona dayanıklıdır. Yüksek ısı iletkenliği nedeni ile ısıtma ve soğutma sistemleri üretiminde, yüksek elektriksel iletkenliği nedeni ile de iletken tel üretiminde çok kullanılan bir malzemedir. Alaşımlandırma ile mukavemeti çok arttırılabilir.

Bakır alaşımları genellikle pirinçler ve bronzlar olmak üzere ikiye ayrılır:

a) Pirinçler: Bakır çinko alaşımı olan pirinçler yüksek mukavemetli, güzel görünüşlü, korozyona dayanıklılık ve kolay işlenebilme özelliğine sahip olmaları nedeni ile endüstride çok kullanılırlar. Bakırın rengi kırmızı olup, korozyona iyi dayanır ve pahalıdır. İçine katılan çinko-nun oranı arttıkça renk kırmızıdan sarıya döner, korozyon mukavemeti azalır ve maliyeti düşer. En yüksek mukavemetli pirinç % 40 Zn, en sünek pirinç % 30 Zn içerir. Pirinçlere % 1 Sn katılarak korozyon mukavemeti önemli derecede arttırılır.

b) Bronzlar: Bronz dar anlamda bakır-kalay alaşımıdır. Bakır-kalay alaşımı (tunç) olan bronzlar yüksek mukavemet ve yüksek korozyona dayanıklılık nedeni ile endüstride özel uygulama alanları vardır. Kalay oranı arttıkça mukavemet ve korozyona dayanıklılık artar, bununla beraber gevrekleşir ve fiyatı yükselir, dolayısıyla bu oran %12'yi geçmez [14, 20].

2.4.3. Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları

Arı alüminyum yumuşak, işlenmesi kolay ve korozyona dayanıklı, ısı ve elektriksel iletkenliği yüksektir. Alaşımlandırma ile mukavemeti önemli derecede arttırılır. Özgül ağırlığı düşük olduğundan (2.7 gr/cm^3) uçak ve benzeri hafif yapılar için çok elverişlidir. Arı alüminyum büyük açıklıklı enerji hatlarında iletken tel olarak kullanılır.

Alüminyuma bakır, magnezyum, kükürt, nikel ve mangan gibi çeşitli alaşım elemanları katılarak belirli amaçlar için değişik türde alaşımlar üretilir.

Alüminyuma eloksallenen elektrokimyasal işlem uygulayarak korozyona dayanıklılığı daha da arttırılır [14, 20].

% 0.4 Demir ve % 0.25 Silisyum içeren alüminyum, 20-840 dev./dk. frekans sınırları arasında yorulmaya tabi tutularak şu sonuçlar elde edilmiştir:

1. Frekans artışı dolayısıyla yorulma ömrünün arttığı görülmüştür.
2. Yorulma ömrü ile frekansın logaritmaları arasında doğrusal bir değişimin mevcut olduğu bulunmuştur.
3. Zorlanma alanının artışı, yorulma ömrünü azaltmaktadır.
4. Frekansın değişmesi halinde, hasar dağılımının doğrusal olarak değiştiği görülmüştür.
5. Frekans ve zorlanma alanının birlikte değişmesi durumlarında, hasar dağılımı doğrusal olarak değişmektedir.
6. Yorulma olayı esnasında sertleşme, ömür tamamlanmadan meydana gelmekte ve çatlak civarında sertleşme maximuma yükselmektedir.
7. Yorulma esnasında meydana gelen çatlağın ilerleme hızı, zorlanma alanının artışıyla artmakta, frekans artışıyla ise azalmaktadır [9].

2.4.4. Beton

En çok kullanılan mühendislik malzemelerinden biri olup mineral agregaları (kum-çakıl) su ve çimento ile karıştırılıp plastik işlenebilir bir kütle haline getirilerek üretilir. Beton kalıba döküldükten ve yerleştirildikten sonra su ile çimento arasındaki etkileşmeler sonucu bağlar doğar ve sertleşme olur. Böylece sürekli çimento hamuru ile birbirlerine bağlanmış mineral agregalarından meydana gelen bir kütle elde edilir. En çok kullanılan bağlayıcı madde Portland çimentosu'dur. Agreganın (kum, çakıl) betondan çok daha kuvvetli olduğunu varsayarsak, betonun özelliklerini çimento kaymağının özellikleri meydana getirir diyebiliriz. Dolayısıyla, düşük su/çimento oranı ile yapılan beton yüksek oranla yapılan dan daha kuvvetlidir. Düşük su oranı halinde çok daha

fazla "sulanmış" çimento ve kum ile çakıl daneleri arasında daha az "fazla su" bulunur. Betonun kuvveti ile su/çimento oranı arasındaki endirekt bağıntı birçok mühendis tarafından dahi tamamıyla değerlendirilememiştir. Fazla su/az çimento kullanılırsa betonun kırılması (yorulması) daha çabuk olur yani yorulma ömrü kısalır [13, 14, 21].

2.4.5. Porselen

Porselen, bir tür seramik olup seramiklerin "pişmiş kil ürünleri" sınıfına dahildir. Seramikler metal ve metal olmayan elemanlardan oluşan inorganik bileşiklerdir. Bunlar çoğunlukla doğada kayaların dış etkilerle parçalanması sonucu meydana gelen kil, kaolen ve benzeri maddeleri yüksek sıcaklıkta pişirerek elde edilirler.

En önemli kil türü kaolen'dir. Kaolenin içinde alümina, silis ve az miktarda su bulunur. Isıtılınca önce su buharlaşır, 900°C'den sonra ergime başlar ve 1300-1500 °C arasında tamamen camlaşır. Soğutulunca sert, beyaz ve yarı saydam bir seramik kütle elde edilir. Porselen bu yöntemle üretilir.

Seramikler genellikle çok sert ve gevreklerdir. Basınç mukavemetleri çok yüksek olmakla beraber çekme mukavemetleri çok düşüktür. Kaymaya karşı direnci çok yüksektir, plastik şekil değiştirmesiz kırılırlar.

Seramikler genellikle yalıtkan veya dielektrik malzemelerdir. Elektrik iletmezler. Fakat elektrik alanına tepki gösterirler. Ayrıca bazıları manyetik, piezoelektrik ve yarıiletkenlik özelliklerine sahiptir. Bu nedenle elektronik endüstrisinde geniş ölçüde kullanılırlar [13, 14, 21].

2.4.6. Cam

Cam da porselen gibi bir seramik çeşidi olup, genel anlamda ergimiş haldeki amorf yapısını koruyarak katılaşan inorganik cisim olarak tanımlanabilir. Silikatlar en çok cam üretiminde kullanılır. Çok sert ve gevrek olan camın saydam oluşu en yararlı özelliği sayılır. Basınç mukavemeti çok yüksek, fakat çekme mukavemeti çok düşüktür. Bu da yorulma ömrünü düşürür.

Yukarıda da değinildiği gibi porselen ve cam aslında seramiktirler. Diğer malzemelerde olduğu gibi, seramik malzemenin özellikleri de iç yapılarına bağlıdır. Bu özellikler arasında önemli bir tanesi, valans ve iyon bağlarının sebep olduğu hareketsiz elektronlar nedeniyle meydana gelen düşük elektrik iletkenliğidir. İzolatör olarak seramik malzeme çok fazla kullanıldığından dolayı dielektrik özellikleri önemlidir. Bu özellikler kristal yapısı ile sıkıca bağlıdır. Aynı şekilde, seramiklerin manyetik özellikleri katyon düzeni ve bunların valansaltı elektronlarına bağlıdır.

Seramik malzemeler izolatör olarak kullanıldıklarında değişik potansiyeldeki iletkenleri izole ederler. İzolatör olarak alınan malzeme yüksek gerilim altında izolatörlüğünü kaybeder. Genellikle bu kayıp yüzeyde olur. Yüzey kısa devresini önlemek için izolatör yüzeyleri akım yönünde uzayacak şekilde yapılır.

Ayrıca, iç boşluk ve çatlaklarda kısa devreye yardımcı olduğundan, genellikle izolatör yüzeyleri sırlanarak rutubet alması önlenir ve çatlaklar kapatılır. İzolatörlerin içten akım geçirmesi (hacim bozukluğu) çok yüksek gerilim farklarında olur. Çok kuvvetli bir elektrik alanı izolatördeki dipolleri koparır ve alan kuvveti dipol kuvvetini aştığı zaman izolatör akım geçirir [13, 14, 21].

BÖLÜM 3

ENERJİ İLETİM HATLARI

3.1. İletim Malzemeleri

Bir iletken gerilim farkına bağlı olarak elektrik akımının sürekli geçişinin meydana geldiği herhangi bir madde yahut malzemedir. Daha büyük akımda daha büyük gerilim farkı oluştuğunda iletken daha etkindir denilir. Katı ya da sıvı haldeki tüm maddeler belirli derecelerde elektrik iletkenlik özelliklerine sahiptirler. Fakat belirli maddeler diğerlerine nazaran daha etkin iletkenlerdir. Metaller diğer maddelere nazaran iyi iletkenlerdir, metal oksitler, tuzlar, mineraller ve fiber malzemeler zayıf iletkenlerdir fakat onların iletkenliği nemin absorbe olmasıyla yararlı bir şekilde kullanılabilir. Karbon ve bazı metal alaşımları gibi, düşük iletim özelliğine sahip malzemeler; bakır ve alüminyum gibi elektrik işlerinde faydalı uygulamalara sahiptirler.

Diğer bazı maddeler yalıtkanlar olarak sınıflandırılırlar. Yalıtkan ya da Dielektrik adı verilen bu malzemeler elektrik iletmezler. Genelde, bütün malzemeler iletkenlik durumları gözönüne alınarak sınıflandırılırlar [22].

3.2. İletkenlerin Genel Özellikleri

Genelde elektrik devreleri dört ana elektriki özelliğe sahiptirler: direnç, endüktans, kapasitans ve kaçak. Devrenin durumu bu dört özelliğe göre bir boyut kazanır. Fakat bunlardan ikisi iletkenin özelliklerine

bağılıdır. Kapasitans ve kaçak; iletkenlerin dış boyutlarına, iletken cismin bir noktadan diğer noktaya uzaklığına, yalıtma amacı için kullanılan malzemelerin dielektrik özelliklerine bağlıdır. Endüktans, bir iletkende akım vasıtasıyla oluşan magnetik alanın bir fonksiyonudur. Direnç iletkenin kendinden olan bir özelliğidir. Hem direncin hem de iletkenlerin iç endüktansının, akımın yüksek hızlarda değişim durumlarında, efektif değeri değişir. Yüksek frekanslı alternatif akımlarda bu durum "skin efekt" olarak adlandırılır.

Bazı durumlarda, iletkenler çeşitli mekanik gerilmelere maruz kalırlar. Ağırlık, gerilme kuvvetliliği, elastik özellikler bu duruma ait bazı uygulamalardır. iletken malzemeler maruz kaldıkları mekanik gerilme şartlarıyla ve sıcaklıktaki değişimlerle değişik özellikler gösterirler. Ayrıca mekanik çalışma şartları ve atölye işletmelerindeki ısı işlemleri, iletkenliğe etkirler [22].

3.3. iletkenlerin Yapılış Şekilleri

3.3.1. Masif Tel iletkenler

Genellikle sadece bir metalden ve maximum 16 mm² kesitte yapılırlar [23].

3.3.2. Masif Örgülü Tel iletkenler

Bu teller bir yada iki metalden imal edilen ince tellerin örölmesi ile elde edilen çıplak kablolardır. Tek telli iletkenlerin kesitleri büyüdükçe ortaya çıkan montaj ve skin efekti problemlerinden dolayı örgülü tel kullanılır [23].

3.3.3. Ortası Boş Örgülü İletkenler

Yüksek gerilimde korona kayıplarını azaltmak için tel çapını suni olarak büyültmek maksadıyla imal edilen iletkenlerdir. Genellikle tek metalden yapırlar [23].

3.3.4. Demet İletkenler

Çok yüksek gerilimli enerji iletim hatlarında korona kayıplarını azaltmanın yanısıra doğal (tabii) dayanıklılığı arttırmak için, her bir faz iletkeni için aralarında belirli bir mesafe bulunacak şekilde iki veya daha fazla telden yapılan demetlerdir. Bu teller genellikle çelik-alüminyum veya bakırdan örgülü teller olup kesitlerinin toplamı, faz iletkeninin kesitine eşit olarak alınır [23].

3.4. İletkenlerin Yapıldığı Malzemeler

Hava hattı iletkenlerinde kullanılan malzemelerden elektriksel bakımdan iletkenlik yanında, gerekli mekanik dayanıklılığa da sahip olmaları istenir. Bu şartlara uygun malzeme bakır, bronz, alüminyum, çelik-alüminyum, kadmiyumlu bakır, bakır kaplı çelik veya bir dereceye kadar çelik olabilir. İletken olarak kullanılacak malzemenin elektriksel ve mekaniksel özellikleri birlikte göz önünde tutulmak zorunda olduğundan, bu malzemeler arasında kesin mukayese yapmak zordur [24].

3.4.1. Bakır

Hava hatlarında fazla kullanım alanına sahip olan bakır en büyük elektriksel geçirgenliğe sahiptir. Bunun yanısıra kopma mukavemeti de oldukça yüksektir. Bakırın elektriksel geçirgenliği saflık derecesine bağlı olup, içinde en küçük oranda yabancı madde bulunması geçirgenlik derecesini çok düşürür. Bundan dolayı hava hatlarında

saf elektrolit bakır kullanılır.

Hava hatlarında kullanılacak bakırın elektrik geçirgenliği aynı zamanda işleme şekline de bağlıdır. Yüksek geçirgenlik yanında kopmaya karşı dayanıklı olması için bakır soğuk haddeden geçirilmiş olmalıdır. Bu işlem bakırın elektriksel geçirgenliğini % 2-3 azaltırsa da kopma mukavemetini % 30-40 arttırır.

Bakırın direnç ısı katsayısının geçirgenlik ile doğru orantılı bir şekilde değiştiği anlaşılmıştır. Bu nedenle, kopma mukavemetini arttırmak üzere soğuk haddeden geçirilmiş bakırın iletkenlik derecesi azalırken, buna bağlı olarak direnç ısı katsayısı da azalacaktır.

Sert bakırın kopma mukavemeti minimum 40 kg/mm² olmalıdır. Elektrolitik bakırın spesifik omik direnci 20 °C'de maximum 0.01784 ohm.mm²/m ve 1 mm² kesit ile 1 m boy için 1"lik sıcaklık derecesi artışında bu dirençteki çoğalma 0.000063 ohm'dan fazla olmamalıdır.

Bakır tellerin normal hava şartlarında zamanla yüzeylerinde bir oksit tabakası oluşur. Çıplak tellerden çok daha mükemmel bir şekilde ısı iletimini sağlar. Fabrika ve yüksek fırınlardan çıkan gazlar ise bakır iletkenlerin mukavemetini azaltır. Böyle fabrikaların bulunduğu yerlerden geçen iletkenlere kimyevi koruyucu bir madde sürülmelidir. Soğuk çalışma durumu iletkenliği azaltır. Mesela, 1.02 cm çapında sert olarak gerilmiş bakırın gerilme direnci 354 MN/m² ve 0.163 cm çapında 456 MN/m² dir. Bakır normal atmosfer içinde çürümez ve yaygın olarak kullanılır.

Bakır'ın yoğunluk ve ağırlığı: saf bakır 20°C'de 8.83 g/cm³ yahut 0°C'de 8.90 g/cm³ yoğunluğa sahiptir. Yüksek iletkenlik özelliğine sahip bakır örnekleri genellikle 8.87'den 8.91'e, bazen 8.83'ten 8.94'e kadar

değişik değer alabilir. Sıkı dövülmüş bakır tavlanmış bakırdan % 0.02 daha az yoğunluğa sahiptir [22, 23, 24, 25, 26, 27].

3.4.2. Bronz

Bronz bakırın çinko ve silisyumla bir alaşımı olup, bakıra oranla oldukça yüksek bir kopma mukavemetine sahiptir. Fakat bronzun elektriksel geçirgenliği daha azdır. Bundan dolayı bronz, bakırın mekanik mukavemetinin yeterli olmadığı, fakat bronzun noksan elektriksel geçirgenliğinin bir mahzur sayılmayacağı çok büyük direkler arası mesafelerde kullanılma bakımından çok uygun bir iletken malzemedir. Sert bir metal sayılan bronzdan yapılmış teller, eğilme zorlamalarından çabuk etkilenecekleri için, bunların montajı özen ister. Bundan dolayı bu teller, ancak vadi ve nehirlerin atlanmasında kullanılır. Bronz, karışıma girdiği metalin adını da alarak isimlendirilir. Kadmiyumlu bronz gibi [23, 24, 25, 26, 27].

3.4.3. Alüminyum

Hava hatlarında en çok kullanılan iletken malzemelerden birisi olan alüminyumun geçirgenliği eşdeğer bakıra göre % 61 civarındadır. Fakat alüminyum çok hafif olduğundan, eşit dirence sahip bir alüminyum iletkenin ağırlığı bakırının yarısı kadardır. Buna karşılık, alüminyumun kopma mukavemetinin çok düşük olması nedeniyle eşit dirence sahip alüminyum iletkenin kesitinin daha da büyük olmasına rağmen, alüminyumun kopma mukavemeti bakırının 2/3' ü civarındadır. Bu özelliklerinden dolayı, alüminyum iletkenler daha ziyade kısa direkler arası mesafelerin kullanıldığı alçak gerilimli dağıtım sistemleri için uygun olabilir. Alüminyumun fiatı, ilave direkler kullanılarak direkler arası mesafelerin kısaltılmasına imkan verecek derecede ucuz ise, alüminyum iletkenler büyük akımların taşınacağı sistemlerde de

kullanılabilir. İletken olarak kullanılacak alüminyumun saf olması şarttır. Alüminyum karışımlarında demir, silisyum, çinko ve bakır gibi metallerin yüzde olarak toplam oranı % 0.5'den fazla olmamalıdır. Tamamen saf olan alüminyum da çok yumuşak olduğu için iletken olarak kullanılmaya elverişli değildir. Alüminyuma katılan metaller, alüminyumun mukavemetini arttırır.

Alüminyumun özgül omik direnci $0.0294 \text{ ohm.mm}^2/\text{m}$ olduğundan aynı akım ısı kayıplarını muhafaza edebilmek için alüminyum telin kesiti, bakır kesitinden yaklaşık olarak % 65 oranında büyük olması gerekir. Ayrıca alüminyumun özgül ağırlığı $0.0027 \text{ kg/mm}^2.\text{m}$ olduğu halde bakırın $0.0089 \text{ kg/mm}^2.\text{m}$ 'dir. Enerji iletim hatları için masif tel yerine örgülü alüminyum tel kullanılması uygundur. Çünkü kalın alüminyum tellerin yeterli bir homojenlikte imali mümkün değildir.

Alüminyum yaklaşık olarak bakırın yoğunluğunun üçte biri bir yoğunluğa sahip olup, bakırdan daha ucuz ve $154-200 \text{ MN/m}^2$ arasında bir gerilme direncine sahiptir. Alüminyumun iletkenliği bakırın iletkenliğinin yaklaşık 0.6 katıdır.

Alüminyum büyük çaplı olarak yapılır. Bununla beraber iletken yüzeyindeki elektrik şiddeti azalır. Sonuçta korona sebebiyle güç kaybı eşit bir bakır hattından daha aşağıdır. Normal atmosferde alüminyum yüzeyinde görülen ince bir oksit tabakası yüksek korozyon direnci verir.

Alüminyum örgülü tellerin kopma mukavemeti 19 kg/mm^2 olduğundan, bunların en kötü şartlarda 8 kg/mm^2 lik bir gerilme ile çekilmiş olmaları gerekir. Bu nedenle alüminyum iletkenlerin asıldığı direkler daha az zorlanır. Diğer taraftan mekanik mukavemetin az ve ısı uzama katsayısının büyük oluşu iletkenlerin sehiminin büyük

olmasına neden olur.

Alüminyumun mahzurlarından biri erime noktasının düşük oluşudur. Hat'ta oluşan arklar alüminyum tellerin yanmasına sebep olabilir. Hat montajında alüminyum tellerin çizilmemesi, sedelenmemesi gerekir. Alüminyum tellerin hafif ve sehimlerinin daha büyük oluşu faz iletkenleri arasındaki mesafelerin büyümesine ve dolayısıyla hattın endüksiyonunun artmasına sebep olur. Bu da istenmeyen bir durumdur. Bakır tellerde olduğu gibi alüminyum tellerin üzerinde ince bir oksit tabakası oluşur. Bu tabaka bakırdakinin aksine, yalıtıcıdır.

Alüminyumun alkali sıvılara karşı dayanıklılığı azdır. Kimya fabrikalarının bulunduğu yerlerde koruyucu tedbirler alınmadan alüminyum hatların geçirilmesi mahzurludur. Ayrıca alüminyum hatların bakıra nazaran daha az buz tuttuğu gözlenmiştir [23, 24, 25, 26, 27, 28].

3.4.4. Aldrey

% 98.7 saf alüminyum, % 0.5 magnezyum, % 0.5 silisyum ve % 0.3 demirden oluşmuştur. Bu maddelerin karışımıyla tamamen homojen bir yapı oluşur.

Örgülü aldrey tellerinin kopma mukavemeti 31-33 kg/mm² yani saf alüminyum'a göre % 66 daha fazladır. İletkenliğindeki izafi azalma ise % 14' tür. Aldrey, mekanik emniyetine önem verilen enerji iletim hatlarında alüminyum yerine kullanılır.

Bakıra göre kopma mukavemeti 3/4 civarındadır. Geçirgenliği ise eşdeğer bakıra göre ancak yarısı kadardır. Dolayısıyla bakıra göre daha büyük direkler arası mesafelerde kullanılabilir [23, 24, 25, 26, 27].

3.4.5. Çelik

Küçük ihtiyaçları karşılamak üzere kurulan bir kısım taşıma hatlarında, seçilen gerilime göre kullanılması icabeden ekonomik iletken kesiti mekanik bakımdan uygun görülemeyecek derecede ince bulunabilir. Böyle bir halde galvanizli çelikten yapılan iletkenler kullanılması mümkündür.

Çelik iletkenlerin alternatif akım dirençleri doğru akım dirençlerinden oldukça büyüktür. iç reaktanslar da büyük olup, dış reaktanlardan daha büyük bir değere çıkabilir. Alternatif akımda magnetik davranışı iyi değildir.

iletkenliği az olmasından dolayı iletim hatlarında pek tercih edilmeyen çelik, ancak sehimi çok küçük tutulmak istenen büyük menzillerin sözkonusu olduğu yerlerde, hattın belirli bir kesimi için kullanılır. Çelik, faz iletkenleri için elverişsiz olmasına rağmen toprak teli olarak çokça kullanılır. Paslanmaya karşı galvanize edilmesi gerekir. Çeliğin yapısına başka maddeler ilave edilerek mukavemeti arttırılabilir [23, 24, 25, 26, 27].

3.4.6. Çelik-Alüminyum

Çelik göbekli alüminyum iletkenlerde galvanizli çelik damarlardan kurulmuş bir veya birkaç kattan ibaret bir kılıf vardır. Çelik göbek iletkenin gerilme mukavemetini, alüminyum kılıf ise elektriksel geçirgenliğini sağlar. Bu tip iletkenler direk yüksekliğini arttırmadan, bakır iletkenlerdekine göre daha uzun direkler arası mesafelerin kullanılmasını temin etmek için düşünülmüştür. Çelik-Alüminyum iletkenin ağırlığı eşdeğer bakır iletken ağırlığının yaklaşık olarak 3/4'ü kadar olup, kopma mukavemeti bakıra göre 1-1.5 kat daha büyüktür.

Çelik-alüminyum iletkenler yüksek gerilimli uzun taşıma hatlarında sadece bakırın yerini almakla kalmayıp, bazı hallerde (örneğin korona kayıpları gündeme geldiğinde) elektriksel bakımdan bakıra tercih edilirler.

Çelik-alüminyum iletkenlerin doğru akım dirençleri hesaplanırken, çelik göbek ihmal edilerek sadece alüminyum kesit dikkate alınır. Bu iletkenlerin alternatif akım dirençleri alçak akım yoğunluklarında doğru akım direncine eşittir. Yüksek akım yoğunluklarında alternatif akım direnci doğru akım direncinden çok büyük olabilir.

Çelik-alüminyum iletkenlerde mukavemeti 120 kg/mm^2 olan çelik seçilmektedir. Alüminyumun mukavemeti ise 19 kg/mm^2 'dir. Alüminyum tellerin bir ya da daha fazla tabakalı ve aynı yönde olmak üzere bükülmüş çelik-alüminyum kabloların alternatif akım direnci doğru akım direncinden % 25 daha fazladır. Alüminyum tellerin büküm boyu ne kadar küçük olursa kayıplar o kadar artar. Bunu önlemek için alüminyum tabakalar zıt yönde örülür. Türkiye'de genellikle Kanada standardına göre (CSA C 49-1965) yapılmaktadır [28].

Genellikle bu çeşit iletkenler, eşit boylu ve dirençli bir bakır iletkeninden daha ucuzdur. Çelik çekirdekli alüminyum, bakırdan hem % 50 daha kuvvetli ve bakırdan % 20 daha hafiftir.

Örneğin, emniyet faktörü 2, -5.5°C 'de 0.0953 cm radyal kalınlıkta bir buz yükü ve görünen alanda 383 N/m^2 lik bir rüzgâr yükü bulunan havada 50°C 'de yaklaşık 4.3 m bir sehime sahip olacak, 0.966 cm^2 kesitli bakırın halat boyu 183 m olacaktır. Yukarıdaki şartlar altında bir eşdeğer çelik çekirdekli alüminyum iletkende sehim yaklaşık 2.2 m 'dir.

Şayet çelik çekirdekli alüminyum iletken kullanılırsa zemin ile mesafe azaltılmadan ya 2.2 m daha kısa ya da taşıyıcı direkler daha uzun aralıklarla dikililebilirler. Direk boyunu azaltmadan iletken boyunu uzatma daha ekonomik bir çözümdür.

Örneğimizdeki hat için ihtiyaç duyulan eşit yükseklikli direkler kullanılır, yer ile mesafe azaltılmadan çelik çekirdekli alüminyum ile iletken 252 m'ye çıkarılabilir.

Böylece direklerin sayısı % 27 civarında azalır. Bununla birlikte önerilen çözüm daha ekonomiktir. Çünkü, kullanılacak izolatörlerin sayısı ve askı sayısı azalacaktır ve çalışma esnasında hat daha emniyetli yapılacaktır. Yüksek gerilim hava hatlarının çalışma esnasında arıza yapmasının sebebi genellikle askılarda meydana gelen arızalardır.

Örneğin, izolatör arızaları, pislik atlamaları vs. gibi. Korona kayıpları çelik çekirdekli alüminyum hat için bakırınkinden daha azdır. Çünkü çelik çekirdekli alüminyum iletkenin çapı eşdeğer bakır iletkenin çapından daha büyüktür.

Çelik çekirdekli alüminyum iletkenler her gerilimli hava hattı için çok yaygın olarak kullanılırlar [23, 24, 25, 26, 27, 28].

3.4.7. Bakır Kaplı Çelik (Mannot Metali)

Çelik göbek üzerine bakır kılıf geçirilerek elde edilir. Bakır iletkenliği, çelik de kopma mukavemetini sağlar. Damarları bu şekilde yapılmış olan masif örgülü iletkenler de kullanılmaktadır. Çok geniş direk aralıkları kullanılarak uzak yerlere enerji vermede kullanılan taşıma hatları için uygundur. Irmak geçişleri gibi.

Bakır kaplı çeliğin ısı uzama katsayısı bakır ve bronzdan daha küçüktür. Bundan dolayı yüksek ortam sıcaklığında mannot metalli hatların seçimi bakıra oranla daha küçüktür. Elastikiyet sınırı sert bakırdan oldukça yüksektir, dolayısıyla kopmaya karşı emniyet daha fazladır. Özgül ağırlığı ise bakır-çelik karışımına bağlı olup % 10 daha düşüktür [23, 24, 25, 26, 27].

3.5. İletken Malzemenin Seçiminde Gözönünde Tutulması Gereken Kriterler

3.5.1. İletkenlik veya Geçirgenlik

Hava hatlarında iletken olarak kullanılacak malzemelerin öncelikle yüksek elektriksel iletkenliğe sahip olması istenir. Bu bakımdan bakır diğerlerinden daha üstündür [23, 24].

3.5.2. Koronaya Dayanıklılık

Enerji iletiminin ekonomik olabilmesi için, iletimin yüksek gerilim ile olması istenir. Kullanılacak gerilim bazı hallerde koronaya sebep olabilecek derecede yüksek olabilir. Bu gibi hallerde iletken seçiminde geçirgenlik ve mekanik dayanıklılık yanında koronaya karşı dayanıklılığın da gözönünde tutulması gerekir. Yüksek gerilim altında bulunan hatların dış yüzeyindeki alan şiddeti havanın delinme mukavemetinden büyük olduğu takdirde teli çevreleyen hava tabakası iletkenlik kazanacağından "korona" denen ısıldama olayı oluşur. Havanın delinme mukavemetinin olduğu gerilime "kritik gerilim" denir. Bu gerilim telin çapına, tellerin birbirine olan uzaklığına, havanın basınç ve sıcaklık derecesine ve tel yüzeyinin durumuna bağlıdır [23, 24, 25].

3.5.3. İletken Çapı

İletkenlerin bakıra göre söylenen eşdeğer dirençleri ve eşdeğer çapları vardır. Bakıra göre daha az iletken olan malzemelerin eşdeğer çapları daha büyüktür. Hava hatlarının mekanik bakımdan zorlanmaları aynı zamanda iletkenlere gelen rüzgâr yükü ve iletkenlerin üzerinde toplanan buz yükü ile ilgili olup, bu tür yükler iletken çapına göre değişir. O halde zorlanmayı etkilediğinden, çap değişikliği iletken seçiminde gözönünde tutulmalıdır. Bakırın çapı 100 olarak ele alındığında aynı iletkenliği sağlayan alüminyum iletkenin çapı 127, alüminyumun 136'dır. Bu yüzden alüminyum ve çelik-alüminyum tellerin eşdeğer iletkenlikleri bakır tellere nazaran rüzgâr basıncı bakımından dezavantajlı bir durumdadırlar [23, 24].

3.5.4. Özgül Ağırlık

Hava hatlarında iletken malzemeyi mekanik bakımdan etkileyen önemli faktörlerden birisi iletken ağırlığıdır. Özgül ağırlığın küçük olması istenir. İletken malzemenin özgül ağırlığı, rüzgâr basıncı ve buz yükü gibi nedenlerle değişir. Bu durumda bileşke özgül ağırlıktan bahsedilir.

Teller asıldıkları direkleri ağırlıkları dolayısı ile düşey yönde bir zorlanmaya maruz bırakırlar. Çapı 100 ve özgül ağırlığı 100 olarak ele alınan bakır tel'e nazaran eşdeğer iletkenlikteki alüminyum tellerin metre başına ağırlığı 49, alüminyumun 53, çelik-alüminyumun 71'dir. Demek ki bu malzemeler ağırlık bakımından bakırdan daha avantajlıdır [23, 24].

3.5.5. Sehim

İki askı noktası arasına asılan veya gerilen bir iletken, kendi ağırlığı ve ilave yükler nedeniyle, gerilme kuvvetine bağlı olarak bir sarkma yapar. Bu sehim ilave yük durumuna ve ısı derecesine göre değiştiğinden, iletkenlerin zemine göre mesafeleri aynı kalmaz. Sehime göre direk yükseklikleri ve bir takım büyüklükler değişeceğinden, iletken seçiminde iletkenin yapacağı sehimin de önemi ortaya çıkar.

Saf alüminyum tellerin sehimini, eşdeğer iletkenlikteki bakır tellerin sehiminden % 23 kadar fazladır. Aldrey telinin sehimini bakırdan % 23, çelik-alüminyumun ise % 4 daha azdır. Bu mukayeselerde direk açıklığı sabit kabul edilmiştir [23, 24, 25, 26].

3.5.6. Termik Dayanıklılık

Üzerinden akım geçen bir iletken ısınır ve ısı derecesi yükselen bir iletkenin mekanik dayanıklılığı azalır. Her iletkenin mekanik dayanıklılığının ısı derecesi ile değişmesi aynı değildir. Bu şartlar altında kısa devre arızaları sonucu doğan büyük değerlerdeki kısa devre akımlarının geçtiği iletkenlerin mukavemetleri biraz azalır [23, 24].

3.5.7. Mekanik Dayanıklılık

Bir hava hattı iletkeni kopmadan emniyetle çalışmalıdır. Bu emniyeti sağlamak üzere, çeşitli iletken malzemelerin maximum hangi gerilimlerde çalıştırılacakları yönetmeliklerde bildirilmiştir [23, 24].

Tablo 3-1 Eşdeğer iletkenlikte çeşitli malzemelerden yapılmış iletkenlerin bakıra oranla mekanik mukavemetleri.

Malzemenin cinsi	Direk açıklığı (m)		
	100	300	500
Bakır	100	100	100
Bronz II	290	226	186
Bronz III	730	530	405
Alüminyum	87	100	107
Aldrey	206	175	163
Çelik-Al. 1:6	212	194	183
Çelik-Aldrey 1:6	360	270	250

3.5.8. Titreşim Eğilimi

Bir hava hattı iletkenine yandan bir rüzgâr estiği zaman iletken sadece yana doğru itilmekle kalmaz, birçok hallerde düşey olarak titreşim hareketi yapar. iletkenlerin titreşim eğilimi aynı değildir. Gerilmesi yüksek, çapı büyük ve ağırlığı küçük olan iletkenlerin daha büyük bir titreşim eğilimi bulunduğu görülmüştür. Titreşim hareketi mekanik zorlanmaları arttırdığından, iletken malzeme seçiminde malzemenin titreşim eğilimi önemlidir.

Titreşimlerin esas sebebi tel eksenine dik olarak esen rüzgâr olmakla birlikte bunun yanısıra tel eksen yönündeki rüzgâr kuvveti, düşey yöndeki hava ceryanları paralel teller arasındaki elektromagnetik kuvvet tesirleri, teller üzerindeki buz kılıfların düşmesi gibi durumlarda etkilidir. Ortası boş iletkenler titreşime en dayanıklı olanlardır. Tellerdeki titreşim, telin statik zorlanmasını azaltmak, damperler kullanmak, klemenslerdeki çentik tesirinin oluşmasına engel olmak, tesbit noktalarında telin kıvrılma yarıçapını büyültmekle önlenebilir [23, 24].

Hava iletkenleri ve toprak telinde meydana gelen titreşimler dört çeşittir:

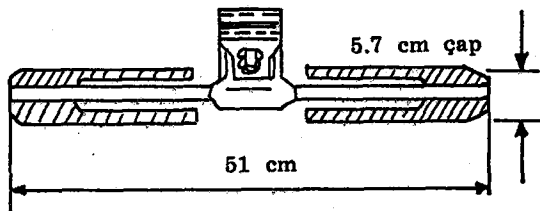
a) iletkenlerin sallanması rüzgâr basıncının değişmesi sebebiyledir. Ark'ı engellemek için, iletkenler arası açıklık yeterli derecede sağlanırsa bu durum zararsızdır. Nehir geçişi gibi uzun hatlarda büyük açıklıklara ihtiyaç duyulur.

b) iletkenleri kaplayan kar, rüzgâr esnasında iletkenlerin oynamalarına sebep olur. iletken parçaları geçici olarak yuvarlaktan oval kesite dönüşür ve rüzgâr sebebi ile hareket halinde olan havanın miktarı iletken boyunca değişir.

c) Buz yükünün ani olarak kalkması, iletkenlerin silkinmesine neden olur. Eğer, buz iletkenin ortasına doğru dökülürse, tehlikeli silkinme oluşur.

d) Bir iletkenin rüzgâr alan yanlarında oluşan anafordan dolayı yüksek frekans titreşimleri meydana gelir. Salınım frekansı 5-100 Hz. arasında olup, genlikleri yaklaşık olarak 1.3 cm'dir.

Bu titreşimler metal yorgunluğundan dolayı askı kelepçelerinde iletken zayıflamalarına sebep olur. Bunu önlemek için en uygun yol; bir bağlantının her iki tarafına herbir iletkeniden Stock Köprü Tampon bağlamaktır. Böylece salınım kelepçelere varmadan önlenabilir.



Şekil 3-1 Stock Köprü Tamponu

Tampon, elik kablo boyunca içi boş iki silindir ağırlıktan ibarettir. Cıvata ile, alüminyum kelepçe iletkene bağlanır. Ağırlıklar, genellikle galvanizlenmi demirden yapılmıştır ve tampon kablosu su geçirmez eğilebilir kılıf ile kapalıdır [25].



BÖLÜM 4

ENERJİ İLETİM HATLARINI ETKİLEYEN KUVVETLER

4.1. Dinamik Kuvvetler

Hat'ta etki eden dinamik kuvvetler, rüzgâr darbeleri, üzerindeki buz yükünün ani olarak düşmesi ve titreşimlerden meydana gelen zorlamalardır. Telin üzerine konmuş bulunan çok sayıda kuşun, birdenbire uçuşa kalkmaları da telin titreşerek dinamik bir zorlanmaya mazur kalmasına sebep olabilir [23, 24].

4.2. Statik Kuvvetler

İletim hattına etki eden kuvvetler dış ya da iç etkenler sonucu oluşabilir. Hat'ta etki eden statik kuvvetler şunlardır: iletken direklere çekilirken uygulanan gerilme kuvveti, hattın üzerinde oluşacak buz tabakalarının, rüzgârın hat'ta uyguladığı kuvvet ve nakilden geçen akımın termik tesirleri...

İletkenler pratikte fleksibl olduklarından, statik zorlanmaların esas nedeni çekme ve çekmeyi etkileyen kuvvetlerdir. Askı noktalarındaki kesme, bükme vs. gibi statik kuvvetler, çekme kuvvetinin yanında ihmal edilebilir [23, 24].

4.2.1. Dış Etkenler (Atmosferik)

İletim hatları kendi ağırlıklarının yanı sıra, bazı durumlarda bu ağırlığa katılan yüklerin (buz yükü, rüzgâr basıncı) etkisiyle mekanik bir zorlanmaya maruz kalırlar.

Yükte değişme olduğunda,

$$T_1 = T / W.S \quad (4.1)$$

denklemindeki W değeri değişir. Böylece, Thomas grafiğini çizimde, eğer buz ve rüzgâr kaldırılırsa ve W değeri buna bağlı olarak değiştirilirse, iletkenin gerginlik eğrisinin eğimi oldukça farklı olur. Yukarıdaki formülde,

T: gerginlik faktörü

W: çıplak iletkenin ağırlığı

S: iki direk arası açıklıktır.

Mekanik hesaplar en kötü şartlara göre yapılmalıdır [22].

4.2.1.1. Ek Rüzgâr Yüğü

Bir iletkeni zorlamakta olan çeki kuvvetini etkileyen nedenlerden biri de rüzgâr kuvvetidir. Rüzgâr kuvvetinden dolayı çeki kuvveti artar. iletkenlere gelen rüzgâr kuvveti hesaplanırken, rüzgârın iletken eksenine dik yönde ve yatay durumda estiğı kabul edilir. iletkenlere gelen rüzgâr yüğü,

$$W=C.Q.F \quad (kg) \quad (4.2)$$

formülünden hesaplanır. Burada,

W: iletkene gelen rüzgâr kuvveti (kg)

C: rüzgârın etkili olduğı yüzeyin sekline, boyutlarına ve yapısına, cinsine bağılı dinamik basınç katsayısı

Q: dinamik rüzgâr basıncı (kg/m²)

F: rüzgârın etkili olduğı yüzey (m²)

iletkenlerin rüzgâra maruz kalan yüzeyi olarak, iletkenin ekseninden geçen düşey bir düzlemde iletkenin

ara kesiti gözönüne alınır.

$$F=d.ar.10^{-3} \quad (m^2) \quad (4.3)$$

olup, burada;

d: iletken çapı (mm)

ar: rüzgâra maruz kalan iletken uzunluğu (m)

200 m' ye kadar olan direk açıklıklarında $ar=a$ (m)

200 m' den büyük olan direk açıklıklarında $ar=(80+0,6a)$

Rüzgârdan dolayı iletkenin 1 m'sine gelen rüzgâr yükü ise,

$$g_r=C.Q.d.10^{-3} \quad (4.4)$$

olarak alınır. Yönetmeliğe göre rüzgâr yükünün daha çok +5°C' de etkili olduğu varsayılır.

Tablo 4-1 iletken çapına bağlı dinamik rüzgâr basıncı katsayısı

iletken çapı (d)	C
12.5 mm'ye kadar	1.2
12.5 + 15.8 mm	1.1
15.8 mm'den büyük	1.0

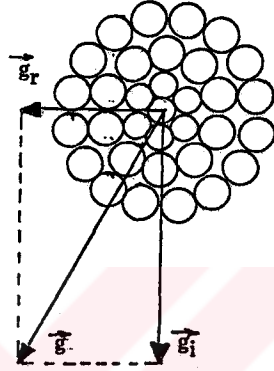
Tablo 4-2 Yüksekliğe bağlı dinamik rüzgâr basıncı

Arazi üzerindeki yükseklik (m)	Dinamik rüzgâr basıncı Q (kg/m ²)
0-15	44
15-40	53
40-100	68
100-150	86
150-200	95

Rüzgâr yükü iletken ağırlığı doğrultusunda olmayıp bu doğrultuya diktir. iletken ağırlığının ve rüzgâr yükünün iletken ekseninde etkili olduğu varsayılarak, rüzgârlı halde eşdeğer iletken ağırlığı,

$$g = (g_i^2 + g_r^2)^{0.5} \quad (\text{kg/m}) \quad (4.5)$$

değeri alınır.



Sekil 4-1 Ek Rüzgâr Yükünün Etkisi

Rüzgârlı haldeki eşdeğer iletken özgül ağırlığı,

$$\gamma = g / q = (g_i^2 + g_r^2)^{0.5} / q \quad (\text{kg/m.mm}^2) \quad (4.6)$$

olacaktır. Burada $q \text{ mm}^2$ olarak iletken kesitidir [23, 24, 29, 30].

4.2.1.2. Ek Buz Yükü

iletkenleri zorlayan ikinci bir faktör buz yüküdür. Buz çeşitli yapıda olabilir. Kristal, kristal kırığı, don, kristal buz, kar yükü gibi...

Buzlanmaya neden olan etkenler şöyle sıralanabilir

a) Sıcaklık derecesi: Buzlanmanın en çok -8°C ile 2°C arasında olduğu saptanmıştır. -10°C 'den itibaren havadaki nem miktarı çok düştüğünden buz oluşmamaktadır.

Yönetmelik buz oluşumunun -5°C olduğunu varsaymaktadır.

b) Nem: Buz oluşumu, havadaki nem miktarına oldukça bağlıdır. Buz yükünün oluşabilmesi için havadaki bağıl nem % 90 'dan düşük olmamalıdır.

c) Rüzgâr: Rüzgâr hızının arttığı miktarda, su buharı ve su tanecikleri iletken üzerine itilecektir. Buzlanma rüzgâr hızı ile artar. Daimi esen rüzgâr yönleri de önemlidir.

Hava hattının etkin rüzgâr doğrultusuna dik olması paralel olmasına nazaran iki misli buzlanma oluşturmaktadır.

d) Yükseklik: Buzlanmanın miktar ve oluş sayısı yükseklikle artar.

e) iletkenin Malzemesi: Bunların yanısıra iletkenin malzemesinin de buzun teşekkülüne etkisi vardır. Telin spesifik ısınma değeri ne kadar büyük ve termik iletkenliği ne kadar küçük olursa buz teşekkülü o kadar yavaş olur.

Her ülke kendi iklim koşullarında, hava hatlarının dayanım hesabında ek buz yükünün ne şekilde gözönüne alınacağını saptamıştır. Türkiye buz yükü ve ortam sıcaklığı dereceleri bakımından beş farklı bölgeye ayrılmış ve her bölgede buz yükünün hesabı için amprik bir formül saptanmıştır. Bu formül,

$$g_b = k \cdot \sqrt{d} \quad (\text{kg/m}) \quad (4.7)$$

şeklindedir. Burada,

g_b : metre başına düşen kg. olarak buz ağırlığı

k : bölgeye ilişkin bir katsayı

d : iletkenin çapı (mm)

Şu halde ek buz yükü iletkenin ağırlığı yönünde, yani düşey bir kuvvet olarak etkili olmaktadır. Buzlu haldeki iletken ağırlığı,

$$g = g_i + g_b \quad (\text{kg/m}) \quad (4.8)$$

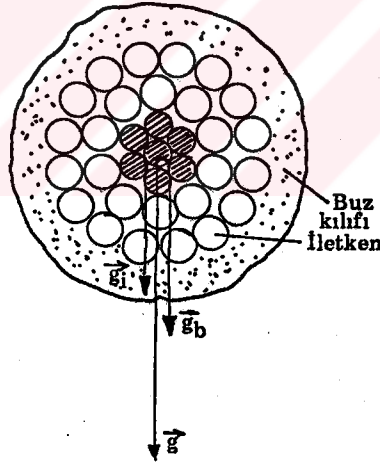
olacaktır. Burada,

g_i : iletkenin metre başına kg olarak ağırlığı

g_b : buz yükünün metre başına kg olarak ağırlığıdır.

Tablo 4-3 Bölgelere göre "k" buz yükü katsayısı ve ortam sıcaklık derecesi sınırları

Bölge	k	Ortam Sıcaklığı (°C)	
		Minimum	Maximum
I	0	-10	50
II	0.2	-15	45
III	0.3	-25	40
IV	0.5	-30	40
V	1.2	-30	40



Şekil 4-2 Ek Buz Yükünün Etkisi

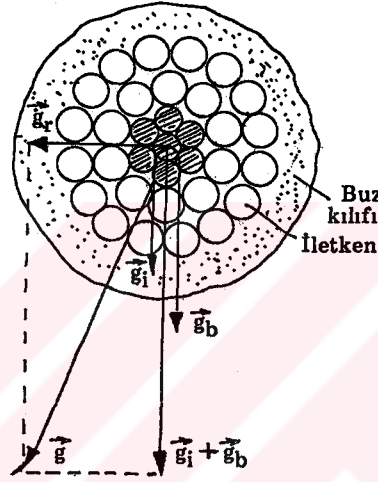
Buzlu haldeki iletken özgül ağırlığı ise,

$$\gamma = g / q = (g_i + g_b) / q \quad (\text{kg/m.mm}^2) \quad (4.9)$$

olacaktır. Burada q mm²cinsinden iletkenin kesitidir [23, 24, 29, 30].

4.2.1.3. Ek Buz ve Ek Rüzgâr Yükünün Birlikte Olması Hali

Genellikle buz yükü hesaplanırken rüzgâr olmadığı veya rüzgâr yükü tayin edilirken tellerin üzerinde kar ya da buz olmadığı kabul edilir. Bazı ülkelerde iki ek yükün birlikte olabilecekleri varsayılır. Türkiye'de ise, bu iki ek yükün birlikte olabileceği, ancak 380 kV ve daha yüksek gerilimli hatlar için varsayılmıştır.



Şekil 4-3 Ek buz ve ek rüzgâr yükünün birlikte olması hali.

Şekil 4-3 'de bu iki ek yükün birlikte olması hali gösterilmiştir. iletken ağırlığının, buz ve rüzgâr yükünün, iletken ekseninde etkili olduğu varsayılarak, buzla birlikte rüzgârlı haldeki eşdeğer iletken ağırlığı,

$$g = [(\vec{g}_i + \vec{g}_b)^2 + \vec{g}_r^2]^{0.5} \quad (\text{kg/m}) \quad (4.10)$$

değeri alınır.

Bu durumda eşdeğer iletken özgül ağırlığı,

$$\gamma = g/q \quad (\text{kg/m.mm}^2) \quad (4.11)$$

olacaktır.

Rüzgâr yükü ise,

$$g_r = C.Q.d_b.10^{-3} \quad (\text{kg/m}) \quad (4.12)$$

ifadesinden hesaplanır. Burada d_b mm olarak, buzlu haldeki çaptır.

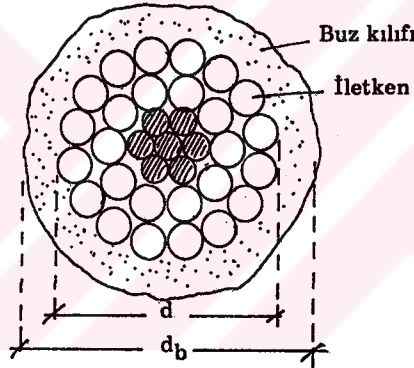
1 m'lik bir buz kılıfının ağırlığı,

$$g_b = \rho_b.(d_b^2 - d^2).10^{-3}.\pi/4 \quad (\text{kg/m}) \quad (4.13)$$

olarak hesaplanır. Bu formülde,

ρ_b : buz yoğunluğu (kg/dm^3)

d : iletkenin çapı (mm)



Şekil 4-4 Buzlu halde iletken çapı

Bölgelere göre buz yükü, (4.7)'den

$$g_b = k. \sqrt{d}$$

bağıntısıyla hesaplanır. Bu iki ifadenin eşitliğinden,

$$d_b = [d^2 + 1,273.k.\sqrt{d}.10^3/\rho_b]^{0.5} \quad (\text{mm}) \quad (4.14)$$

bulunur.

Buzlu haldeki iletken çapı, buzlu halde rüzgâr estiği varsayıldığında, rüzgâr kuvvetinin etkili olduğu alanı belirten dayanım hesabında ek buz yükü düşey, ek

rüzgâr yükü ise yatay kuvvet olarak gözönüne alınmaktadır [23, 24, 29, 30].

4.2.1.4. Maximum Cer Gerilmeleri

Rüzgâr, buz, rüzgâr+buz yüklerinin bazı kabullere dayanan ve üzerinde bulundukları teli zorlayan maximum gerçek yüklerden ziyade fiktif bir takım yükler olduğunu görmüştük. Bu durum tel malzemesi için izin verilebilen maximum zorlanma sınırının belirlenmesinde büyük bir özen gerektirir. İletken direklere çekilirken öyle bir cer gerilmesi seçilmelidir ki, en kötü durumda dahi malzemenin gerilmesi, kopma gerilmesinden aşağıda olsun. Kopma mukavemetinin izin verilen maximum cer gerilmesine oranı "emniyet katsayısı" nı gösterir. Açık havada bulunan enerji iletim hatları iklim şartlarından doğan dış kuvvetlerin devamlı etkisi altındadır [23, 24].

4.2.1.5. Hat'ın Geçtiği Bölgenin Özelliği

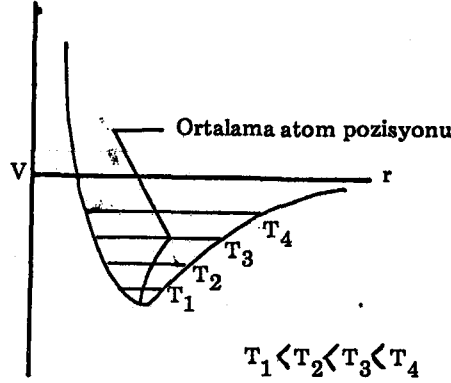
Enerji iletim hattının geçtiği yerlerde, gerek tabii gerek sun'î bazı faktörler, iletim hattının yorulmasında etkindirler. Deniz bulunan, nem oranı yüksek olan, kimyasal ürünler üreten fabrikaların olduğu yerlerden, hatta kükürt oranı yüksek olan bölgelerden geçen enerji iletim hatları olumsuz yönde etkilenirler.

4.2.1.6. Sıcaklık Değişimi

4.2.1.6.1. Isıl Özellikler

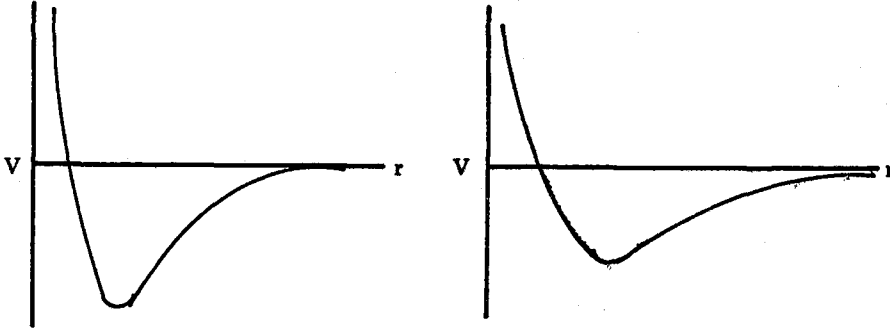
Bir katı, 0 °K'nin üzerinde herhangi bir sıcaklıkta iken atomlar termal enerjiye sahip olur ve denge pozisyonlarında titreşim gösterirler. Bu titreşimin genliği potansiyel enerji çukuru şekliyle ifade edilir. Atom, alt enerji seviyesinin biraz üzerinde termal enerjisine eşit olduğu enerji çukurunun belirli bir

yüksekliğinde ileri-geri titreşir. Bu olay birçok farklı sıcaklık için Şekil 4-5 'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4-5 Artan sıcaklıkla en yakın komşu mesafenin artışı.

Sıcaklık ne kadar yüksek olursa titreşim genliği o oranda büyür. Enerji çukurunun asimetrik tabiatından dolayı, atomun ortalama pozisyonu artan sıcaklık ile değişir. Atomlar, sıcaklık yükseldikçe uzağa hareket etmeğe yönelirler. Derin ve dar bir enerji çukuru için atomlar arası mesafenin değişimi küçüktür. Fakat daha az derin ve geniş enerji çukuru için atomlar arası bu değişim daha da asimetrik olur ve değişim nisbeten büyük olur. Bu olay " termal genleşme " olarak bilinir ve genellikle verilen bir sıcaklık artışı için makroskobik bir numunenin uzunluk artışının bir ölçüsü olan termal genleşme katsayısı olarak ifade edilir. Termal genleşme katsayısının birimi uzunluk/uzunluk.°C 'dir. Şekil 4-6 farklı şekillerdeki potansiyel enerji çukurlarıyla ilgili farklı özellikleri göstermektedir [31, 32, 33].



a)Yüksek ergime derecesi, b)Düşük ergime derecesi, düşük
yüksek elastik modül, düşük elastik modül, yüksek
yüksek termal genleşme katsayısı. termal genleşme katsayısı.
sayısı.

Sekil 4-6 Potansiyel enerji çukuru için fiziksel özelliklerin ilişkisinin gösterimi.

4.2.1.6.2. Termik Dayanıklılık

Üzerinden akım geçen bir iletken ısınır ve ısı derecesi yükselen bir iletkenin mekanik dayanıklılığı azalır. Her iletkenin mekanik dayanıklılığının ısı derecesi ile değişmesi, aynı değildir. Bu şartlar altında kısa devre arızaları sonucu doğan büyük değerlerdeki kısa devre akımlarının geçtiği iletkenlerin mukavemetleri biraz azalır. Schmitz tarafından dirençleri aynı olan muhtelif malzemeden iletkenlerin, kısa devre akımları dolayısıyla mukavemetlerinin ne kadar düştüğü aşağıdaki tabloda tesbit edilmiştir [23, 24].

Tablo 4-4 Eşdeğer dirençli iletkenlerin kısa devre akımları nedeniyle mukavemetlerindeki izafi azalmalar.

Akım Şiddeti (Amper)	Akım Müddeti (Saniye)	Eşdeğer dirençli iletkenin mukavemet azalması (%)		
		Bakır	Alüminyum	Aldrey
100	3.0	40	46	25
150	1.0	10	15	3
300	0.3	35	35	8

4.2.1.6.3. Isı Derecelerinin Değişmesi

iletken zorlanması ısı derecesi ile yakından ilgisi vardır. Yazın ısı derecesi yükselir ve bunun neticesinde iletken boyu uzayıp gerilmesi azalır. Kışın ısı derecesi düştüğü zaman, iletkenin boyu kısalıp gerilme artar. Isı derecesinin değişebileceği sınır değerleri iklim şartları ile verilmiştir [23, 24].

Normal sıcaklık değişimlerinde iletken malzemelerin özelliklerinde herhangi bir değişiklik gözlenmez. Fakat elektriki direnç ve fiziki boyutlar değişebilir. Sıcaklıkta değişimle dirençte oluşan değişim birçok mühendislik hesaplamasında gözönüne alınır. Bazı durumlarda sıcaklıktaki değişim sonucu fiziki yapıda oluşan değişim de önemlidir. Yüksek köprü açıklıkları vs. [22].

Sıcaklıktaki değişimin etkisi, iletken bütün gerilmelerden kurtarıldıktan sonra meydana geldiği gözönüne alınmalıdır. Böylece sıcaklıktan dolayı uzunluktaki değişim ve gerilmedeki değişimin sonucunda gerginlikteki değişim arasında çıkarılan karmaşık düzenler elimine edilir. Bu işlem, sanki iletken, sıcaklıkta yükselme meydana gelmeden önce, yere yatırılmış ve direk ayakları arası açıklık kaldırılmış gibidir.

$$\text{'(Sıcaklıktaki değişim) / Birim uzunluk} = \alpha \cdot t \quad (4.15)$$

Burada;

α : lineer genleşme (yayılma) katsayısı

t : sıcaklıktaki değişim'dir.

Bu yeni sıcaklıkta gerilmesiz yani bir P_1 uzunluğu verir. Bu, iki ani durumun ikincisinin eğrisinde bir noktadır. Tel'in uzunluk eğrisi elastik uzama olarak tanımlanır. Bu eğrideki noktalar elastisite modülünden hesaplanabilir veya iletkenin gerilme-uzama eğrisinden

okunur.

$$\text{Gerginlik/Birim uzunluk} = P / E \quad (4.16)$$

olup burada;

P: alana etkiyen gerginlik (kuvvet/cm²)

E: elastisite modülü

Elastik gerginlik eğrisi ile sonsuz-uzunluk eğrisinin kesişmesi bu iki ani durumun ve yeni sıcaklıkta gerilmenin çözümüdür. Sanki yere yatırılan aynı iletkenler, yeni sıcaklıkta uçları desteklere uzanana kadar kaldırılıp gerilmiş ve direkler arası mesafe eski durumuna getirilmiştir. Kesişme, iletkeni serbestçe asmak (sarkıtmak) için müsaade edilen yeterli gerginlik noktasıdır [22, 34].

a) Direncin Sıcaklık Katsayısı

100°C gibi çok yüksek sıcaklık değişimlerinde dirençteki değişim sıcaklık değişimiyle orantılıdır. Direnç, genelde standard sıcaklıkta 20°C (68°F) değerinde ifade edilir. Genellikle R_{11} , t_1 sıcaklığındaki dirençtir. α_{11} , t_1 sıcaklığındaki sıcaklık katsayısıdır ve diğer bir sıcaklıktaki (t_2) direnç aşağıdaki formüldeki gibi ifade edilebilir:

$$R_{12} = R_{11} \cdot [1 + \alpha_{11} \cdot (t_2 - t_1)] \quad (4.17)$$

Bu formül yüksek sıcaklık kademelerinde lineer görülmemektedir ki t 'nin çok yüksek güçlerinde kullanım için bir seri şekline dönüşür.

t_1 referans sıcaklığında bir değişiklik olduğunda katsayı da değişir. Direnç ve sıcaklık arasındaki lineer ilişkiyi yukarıda açıklamıştık. Herhangi bir t değişikliğinde lineer aralık içerisinde yeni katsayı;

$$\alpha_t = 1 / [(1/\alpha_{t_1}) + (t-t_1)] \quad (4.18)$$

olur.

α 'nın her iki durumundan, sıcaklığın mutlak sıfır olduğu çıkarılır.

Standart iletkenlik (veya % 100)'den daha az olan bakırın katsayısı desimal yüzde olarak ifade edilen gerçek iletkenlikle orantılıdır. Böylece eğer n yüzde iletkenlik (% 95) ise, sıcaklık katsayısı;

$$\alpha'_t = n \cdot \alpha_t \quad (4.19)$$

olacaktır. Burada,

α_t : tavllanmış standart bakırın katsayısıdır [22].

$$\alpha_1 = 1 / \{ [1/(n \cdot 0,00393)] + [t_1 - 20] \} \quad (4.20)$$

b) Doğru Akım Direncinin Sıcaklıkla Değişimi

0°C ile 120°C arasında iletkenin direnci sıcaklıkla lineer olarak artmaktadır. Şöyleki;

$$R_2 = R_1 [1 + \alpha_1 (T_2 - T_1)] \quad (4.21)$$

olup burada,

R_1 : T_1 'deki direnç değeri

R_2 : T_2 'deki direnç değeri

α_1 : sıcaklık direnç katsayısı'dır.

Denklem 4.17 'den görüldüğü gibi 20°C'de bilinen sıcaklık katsayısı, başka bir sıcaklıkta bilinen direnç değeri için kullanılamaz. Bu yüzden,

$$\alpha_x = 1 / \{ (T_x - 20) + (1 / \alpha_{20}) \} \quad (4.22)$$

olarak alınır. Burada,

α_x : $T_x^{\circ}\text{C}$ 'deki sıcaklık katsayısı

α_{20} : 20°C 'deki sıcaklık katsayısı'dır [18].

c) Alternatif Akım Direncinin Hesaplanması

Güç frekanslarında küçük iletkenler için, frekans önemsiz bir etkiye sahiptir ve doğru akım direnç değerleri kullanılır. Büyük iletkenler için, frekans sıcaklık etkisine ek olarak hesaplamalarda alınmalıdır. Bunu yapmak için öncelikle çalışma sıcaklığında doğru akım direnci saptanır, daha sonra skin-efekt etkisi saptanır, sonunda çalışma sıcaklığında alternatif akım direnci saptanır [22].

Skin efekt, iletkenin kendi yapısında olan bir özellik olarak kabul edilir. Şöyleki, bir iletkenin alternatif akım direnci dendiği zaman, doğru akım direnci (omaj olarak) artı akım yoğunluğunun skin efekt etkisinden dolayı dirençte meydana getirdiği artış olarak alınır. Skin efekt, silindirik bir iletkenin merkezine doğru akım yoğunluğunun azalmasına sebep olur.

Bir iletken telin merkezine yakın bir element etrafındaki magnetik kuvvet çizgileri, iletkenin kenarına yakın bir elementin maruz kaldığı magnetik kuvvet çizgilerinden daha fazladır. Bu yüzden endüklenen zıt elektromotor kuvvet merkezdeki elementte daha büyüktür. iletkenin merkezindeki bir elemente etki eden toplam elektromotor kuvvet, akım yoğunluğunun bağıl etkisinden dolayı azaltılmış olunur. Bütün küçük alüminyum iletkenler için, güç frekansında yük akımına bakılmaksızın alternatif akım direncin değeri doğru akım dirence oranı (R_{ac}/R_{dc}) yaklaşık 1'dir.

R_{ac}/R_{dc} oranının temel hesabı sarımlı teller ve som malzeme tüpleri için hesaplanmıştır ve bu değerler,

test veya hesap sonuçlarından çıkarılmış eğrilerden bulunabilir [18].

d) **Kuvvetli Çelik iletkenlerde Skin Efekt Etkisi (ACSR gibi vs):**

Çift alüminyum tabakalı (2,4,6 vs) ACSR iletkenler için Rac/Rac oranı tahmin edilebilir. Bu metotla, çelik iletkenlerde fazlaca bir akım kazancı sağlanmaz (ASTM standartlarında müsaade edildiğinden fazla). Tek alüminyum tabakalı (1,3,5 vs) ACSR iletkenlerde Rac/Rac oranı, bitişik tabakalardaki zıt sarımlardan dolayı, içte meydana gelen dengesiz mmf'den etkilenir. Bu tip iletkenlerde iç akı yük akımıyla değişir. Böylece Rac/Rac oranı akım ile değişecektir. Bu etki bir tabakalı iletkenlerde göz önüne alınır fakat 3 tabakalıda azalır ve 5 ve daha çok tabakalarda ihmal edilebilir.

Yukarıdaki kıyaslama % 75 yükte bir tabakalı ACSR'nin iç permiabilite etkisini gösterir. Halbuki iki tabakalıda hiçbir etkisi yoktur. iletkenlerin kopmasının önemli olmadığı ve küçük büyüklükler için bir tabakalı ACSR iletkenler elektriksel olarak çok az arzu edilirler ve genellikle yüksek gerilmelerin gerektiği yerlerde kullanılırlar.

Bir tabakalı ACSR iletkenlerde Rac/Rac oranı çeşitli yük akımlarından elde edilmiş sonuçlarla hazırlanmış tablolardan veya eğrilerden saptanır.

Üç tabakalı ACSR iletkenlerde Rac/Rac oranı benzer bir şekilde yük akımının değişmesinden etkilenir. Ancak "Doğrultma faktörü" olarak tanımlanan değer, (yük akımının değişmesiyle) Rac/Rac oranında meydana gelen değişmeye uygulanmasıyla, müsaade edilebilir.

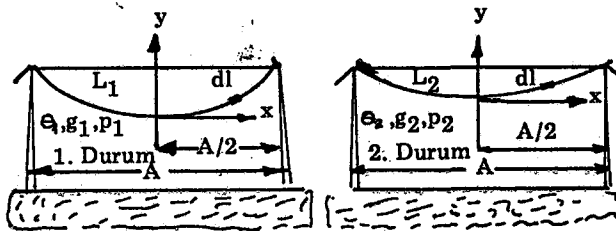
Çelik iletkenin tamamen veya kısmen iç merkezinden uzakta konumlandırıldığı kompleks dizaynlarda skin efekt oranının hesaplanması, basit konfigürasyonları hariç hemen hemen mümkün değildir. Sonuç olarak bu değerler test sonuçlarından elde edilmiş tablolardan alınır [18].

Isı derecesi değişikliğinin iletken zorlanmasını ne şekilde etkilediği "Değişik Haller Denklemi" yardımıyla hesaplanır.

4.2.1.7. Değişik Haller Denklemi

Bir hava hattı iletkeni ortamın ısı derecesine bağlı olarak durumunu değiştirir. iletken kışın kısalır ve sehim azalarak gerilme artar. Yazın ise iletken uzar, sehim artar ve gerilme azalır. Bir iletkenin sehim ve gerilmesi ortamın ısı derecesinin yanısıra iletken ağırlığının değişmesine yol açan rüzgâr ve buz yükü gibi nedenlerle de değişebilir.

iletkenin gerilmesinin, ısı derecesi veya iletken ağırlığının değişmesine bağlı olarak nasıl değişeceği değişik haller denklemleri yardımıyla bulunur. Bu denklemler iletkenin iki ayrı durumunda iletkene ait ısı ve gereken bilgiler verildiği taktirde, içlerinden her hangi birisinin 1 veya 2 durumundaki değerinin bulunmasını sağlar.



Sekil 4-7 Bir hava hattı iletkeninin iki farklı durumu

Şekil 4-7 ' de aynı hava hattı iletkeni için iki ayrı durum gösterilmiştir. 1. durumda iletkenin ısı derecesini θ_1 °C, iletkenin birim boyunun ağırlığını g_1 kg/m (özümlü ağırlık τ_1 kg/m.mm²) , ve iletkenin gerilme kuvvetini P_1 kg (gerilme σ_1 kg/mm²) ile, ikinci durumda aynı büyüklükleri sırasıyla θ_2 , g_2 (τ_2), ve P_2 (σ_2) ile gösterelim. 1 ve 2 durumlarındaki iletken uzunluklarını yazacak olursak;

$$L_1 = A [1 + (g_1 / P_1)^2 . (A^2 / 24)] \quad (4.23)$$

$$L_2 = A [1 + (g_2 / p_2)^2 . (A^2 / 24)] \quad (4.24)$$

(2) durumundan (1) durumuna geçen iletkende oluşan uzunluk farkı;

$$L_1 - L_2 = (A^3 / 24) [(g_1 / P_1)^2 - (g_2 / P_2)^2] \quad (4.25)$$

şeklinde olur. Durum değiştiren iletkende meydana gelen bu uzunluk farkının nedenleri;

- a) ısı derecesinin değişmesi
- b) gerilmenin değişmesidir.

Bunlardan birincisine "termik uzama", ikincisine esnek uzama" denir.

(2) durumundan (1) durumuna geçen iletkende ısıdan dolayı meydana gelen uzama,

$$\Delta_{termik} = L_2 . (\theta_1 - \theta_2) . \alpha \quad (4.26)$$

olup, burada α iletkenin ısı uzama katsayısıdır. Isı derecesinin yükselmesi ile oluşan uzama sehimin artıp gerilmenin azalmasına, ve bu da bir esnek uzunluk farkına neden olur. Ancak, burada gerilme azaldığından, bu esnek uzunluk farkının iletken boyu açısından bir uzama ifade

etmeyip bunun tersi bir kısalma anlamına geleceğine dikkat etmek gerekir. Esnek uzama,

$$\Delta l_{\text{esnek}} = L_2 \cdot (P_2 - P_1) / (q \cdot E) \quad (4.27)$$

şeklindedir. Burada E iletkenin elastiklik veya esneklik modülü ve $1/E$ 'de esneklik uzama katsayısıdır.

Böylece iletkenin ısıdan ve esneklikten dolayı meydana gelen uzamaların cebirsel toplamı,

$$\Delta l = L_2 (\theta_1 - \theta_2) \alpha - L_2 (P_2 - P_1) / (q \cdot E) \quad (4.28)$$

olup, bu uzama;

$$\Delta l = L_1 - L_2 \quad (4.29)$$

şeklinde bulunur. Aynı zamanda $L_2 = A$ ve $f = P = A^2 g / (8P)$ yazılıp düzenlenirse "Değişik Haller Denklemi" aşağıdaki gibi bulunur [23, 24]:

$$8f_1^2 / (3A^2) - A^2 g_1 / (8E q f_1) - \alpha \theta_1 = 8f_2^2 / (3A^2) - A^2 g_2 / (8E q f_2) - \alpha \theta_2 \quad (4.30)$$

4.2.1.8 Kritik Sıcaklık

Isı derecesi artan bir iletkenin gerilmesi azalır ve sehim büyür. Aynı zamanda sehim ilave yükten dolayı da artabilir. Aşırı yük altındaki sehime eşit sehim veren ısı derecesinin bilinmesinde fayda vardır. Buna "kritik sıcaklık" denir.

Kritik sıcaklık, değişik haller denklemleri yardımı ile kolayca bulunabilir. θ_k ile kritik sıcaklık'ı ve θ_{buz} ile buz yükünün teşekkül ettiği sıcaklık'ı gösterebiliriz. Denklem 4.30 'dan,

$$\begin{aligned} 8f_{\max}^2 / (3A^2) - A^2g / (8Eqf_{\max}) - \alpha\theta_k = \\ 8f_{\max}^2 / (3A^2) - A^2g_{buz} / (8Eqf_{\max}) - \alpha\theta_{buz} \end{aligned} \quad (4.31)$$

olup, buradan;

$$\theta_k = [A^2 / (8f_{\max}.E.\alpha)].[(g_{buz}-g) / q] + \theta_{buz} \quad (4.32)$$

bulunur. Bu denklem değişik şekillerde de yazılabilir [23, 24].

4.2.1.9. Kısa Devre Akımlarının Etkileri

Kısa devre akımlarının sistemde dinamik ve termik zorlanmalara sebep olduğu ve sistemin çeşitli kısımlarının bu zorlanmalara dayanabilecek şekilde yapılmış olması gerekir.

a) Mekanik Zorlanmaların Hesaplanması:

İçinden akım geçen paralel iki iletken arasında bir F kuvveti oluşur.

$$F = 2,04.I^2.10^{-8}.l/b \quad (\text{kg}) \quad (4.33)$$

Burada;

F: paralel iletkenler arasındaki kuvvet (kg)

l: paralel iletkenlerin uzunluğu (cm)

b: paralel iletkenler arasındaki aralık (cm)

I: paralel iletkenlerden geçen akım (A)

Paralel iletkenlerden geçen akım aynı yönde ise iletkenler birbirini iter, aksi halde ise iletkenler birbirini çeker.

iletkenlerden geçen akım alternatif akım ise, kuvvet sabit olmayıp, sabit bir kuvvet ile akıma göre iki kat frekanstaki sinüsoidal bir kuvvetten kurulu gibi

düşünülebilir. Böylesi bir durumda sistemde şebekenin frekansına ek olarak, bunun iki katı frekansında zorlanmalar olur. Sistemin tabii frekansının bu frekanslarla rezonans haline gelmemesine dikkat edilmelidir. Aksi halde zorlanmalar 2-3 kat daha büyük olabilir.

Yine yukarıdaki formüle göre, kısa devre güçleri eşit kalmak şartıyla düşük gerilimli sistemlerdeki mekanik zorlanmalar, yüksek gerilimli sistemlerdekine göre daha büyüktür.

Bu şekilde bulunan zorlanma kuvveti sisteme sabit bir kuvvet uyguladığı zaman doğrudur. Fakat, kuvvetin darbeleri veya periyodik etki ettiğini düşünürsek, yukarıdaki formülle bulunan sonucun her halde 1'den farklı bir çarpım faktörü ile düzeltilmesi gerekir. Bu husus frekans faktörü diyebileceğimiz " τ " gibi bir faktörle gözönünde tutulur. Frekans faktörü sistemin titreşim yapabilmesinden dolayı ortaya çıkan zorlanma ile yukarıdaki formüle göre hesaplanan zorlanma, veya sabit bir doğru akımın titreşim hareketi sönüldükten sonra oluşturduğu zorlanma arasındaki orandır. iletkene (bara lamalarına) ve izolatöre (bara ayaklarına) ait frekans faktörlerini τ_σ ve τ_f ile gösterirsek,

$$F_{lama} = \tau_\sigma . F \quad (4.34)$$

$$F_{izolator} = \tau_f . F \quad (4.35)$$

olur.

iletkenin kısa süreli elektrodinamik zorlanmalara dayanabilmesi için, bu zorlanmaların iletken malzemenin alt esneklik sınırının iki katını geçmemesi gerekir. Zorlanma σ ve alt esneklik sınır $\sigma_{0,2}$ ise,

$$\sigma_{lama} \leq 2 . \sigma_{0,2} \quad (4.36)$$

olmalıdır.

iletken ve izolatörlerin doğru akımda darbe etkisi ile zorlanmaları, darbe etkisi geçtikten sonraki titreşimsiz zorlanmaların iki katıdır. Dolayısıyla böyle bir halde, $\tau\sigma = 2$ ve $\tau f = 2$ 'dir.

Alternatif akım'da iletkenlere ait frekans faktörü $\sigma \leq 1$ 'dir. Hesaplarda $\tau=1$ alınır. iletken zorlanması hesaplandıktan sonra bulunan değer eğer yüksek çıkarsa sistemin tabii frekansı f_0 hesaplanıp,

$$\tau\sigma = f_0 / f \quad (4.37)$$

eşitliğine göre $\tau\sigma \leq 1$ olup-olmadığı kontrol edilir. Zorlanma büyük bulunmadığı taktirde, $\tau=1$ olarak bırakılıp bu hesaplar yapılmaz. Bundan sonra şu şekilde hareket edilir; iletken malzemenin üst esneklik sınırını $\sigma'0,2$ ile gösterelim. $0,8.\sigma'0,2 \geq \sigma$ ise, izolatör zorlanmasına ait maximum frekans faktörü,

$$\tau f = (\tau\sigma) = 0,8.\sigma'0,2 / \sigma \quad (4.38)$$

olabilir. $0,8.\sigma'0,2 \leq \sigma$ ama ise, $\tau f = (\tau\sigma) = 1$ 'dir.

Bara sisteminde bir ara izolatörün zorlanması,

$$F_{izolatör} = \tau f . F_{lama} \quad (4.39)$$

ve bir iletim izolatörünün zorlanması,

$$F_{izolatör} = \tau f . F_{lama} . 0,5 \quad (4.40)$$

ile bulunur [24].

b) Termik Zorlanmaların Hesaplanması

Kısa devre akımının devam süresi genellikle çok kısa (0.1 ila 5s) olduğundan, bu süre zarfında çevreye

ısı veriş i olmadığı ve kısa devre akımının meydana getirdiği bütün ısı nın iletken tarafından alındığı kabul edilir.

Kısa devre arızası, iletim sisteminin çeşitli kısımlarının termik bakımdan zorlanmasına yol açar. Bu zorlanma sadece kısa devre akımının büyüklüğüne bağlı olmayıp, aynı zamanda kısa devrenin devam süresine de bağlıdır. Termik zorlanma hem geçici kısa devre akımı, hem de sürekli kısa devre akımı ile meydana gelebilir.

Akım taşıyan bir iletkenin ısı derecesinin yükselmesi akım yoğunluğu ve zaman ile orantılı olup,

$$\mu = j^2 \cdot t \cdot \delta / T \quad (4.41)$$

formülü ile verilmiştir. Burada,

μ : ısı derecesi yükselmesi (hava hatlarında ortalama 300°C)

δ : iletkenin öz direnci (ohm.mm²/m)

T: spesifik ısı (Ws/°C.cm²)

j: akım yoğunluğu (A/mm²)

t: zaman (saniye)'dir.

Ayrıca;

$$j = I / q \quad (4.42)$$

ve

$$\delta / T = 1 / C \quad (\text{bakır için } 1/172) \quad (4.43)$$

olduğ undan,

$$\mu = I_a^2 \cdot t / (q^2 \cdot C) \quad (^\circ\text{C}) \quad (4.44)$$

şeklinde de yazılabilir.

izin verilen sürekli kısa devre akımının geçiş müddeti,

$$t = \mu \cdot q^2 \cdot C / I_a^2 \quad (\text{sn}) \quad (4.45)$$

şeklindedir. Burada $q \text{ mm}^2$ cinsinden iletken kesitidir.

Bu formüller kısa devre akımı sabit kaldığına ve kısa devre esnasında herhangi bir ısı kaybı olmadığına göre doğrudur.

Çok büyük geçici kısa devre akımları sözkonusu ise, akış süresinin çok kısa olmasına rağmen, bu akımlar da iletkenin ısı derecesinin yükselmesine sebep olur. Bu husus asıl kısa devre süresi t 'ye bir Δt zamanını ilave etmek suretiyle gözönünde tutulur. O halde sürekli ve geçici kısa devre akımlarının ortak etkisi altında meydana gelen ısı derecesi yükselmesi,

$$\mu = I_a^2 \cdot (t + \Delta t) / (q^2 \cdot C) \quad (4.46)$$

ile hesaplanır [24, 28].

4.2.2. İç Etkiler

4.2.2.1. Malzemenin Yapı Hatalarının iletken'e Etkisi

Malzemenin yapısında olabilecek herhangi bir hata (yüzeydeki bir pürüz, bir çentik, bir kılcal çatlak, bir çizik gibi...) malzemenin yorulmasını hızlandırır. Bu hatalar ilk aşamada önemsenmeyecek derecede küçük olsa bile, zamanla bu hatalar büyüyerek malzemede "yorulma kırılması"na sebep olabilecektir.

Bununla birlikte, malzemenin imalinde kullanılan diğer maddeler, nominal oranda alaşıma katılmazlarsa, malzeme ideal bir yapıya sahip olamayacaktır. Bu da malzemenin yorulma ömrünü etkileyecektir [13].

4.2.2.2. Aşırı Yüklenmenin İletken'e Etkisi

Bir hava hattı iletkeninde, iletken üzerinden geçen akım ve güneşten emilen ısı nedeniyle bir ısı enerjisi oluşur. Bu enerji radyasyon ve konveksiyon yoluyla etrafa yayılır. İletkenin ısı derecesi belirli bir değere ulaştığı zaman,

$$I^2 \cdot R = H_r + H_c - H_s \quad (4.47)$$

bağıntısı vardır. Bu formülde ;

I: akım (amper)

R: çalışma ısı derecesindeki efektif direnç (ohm/cm)

H_r: radyasyon kayıpları (W/cm)

H_c: konveksiyon kayıpları (W/cm)

H_s: solar radyasyon nedeniyle emilen ısı enerjisidir.

Stefan Boltzmann kanununa göre radyasyon kayıpları şöyledir,

$$H_r = 5,7 \cdot E \cdot \pi \cdot d \cdot \{[(\theta + t + 273)/1000]^4 - [(t + 273)/1000]^4\} \quad (W/cm) \quad (4.48)$$

Bu formülde,

E: iletkenin emisyon faktörü (siyah iletkenlerde 1, parlak çelik-alüminyum iletkenlerde 0.3, diğer parlak iletkenlerde 0.2)

d: iletkenin dış çapı (cm)

θ: ortamın üstündeki ısı derecesi yükselmesi (°C)

t: ortamın ısı derecesi (°C)

Konveksiyonda kaybolan enerji deneylerle tesbit edilmiş olup şu formülle hesaplanabilir;

a) Tabii Konveksiyon Halinde:

$$\text{Damarlı iletkenlerde:} \quad H_c = 12,8.d^{0.7}. \theta_1.23.10^{-4} \quad (4.49)$$

$$\text{Düzgün yüzeyli iletkenlerde:} \quad H_c = 19,5.d^{0.56}. \theta_1.19.10^{-4} \quad (4.50)$$

b) Cebri Konveksiyon Halinde:

$$\text{Damarlı iletkenlerde:} \quad H_c = 13,8.(V.d)^{0.45}. \theta.10^{-4} \quad (4.51)$$

$$\text{Düzgün yüzeyli iletkenlerde:} \quad H_c = 16.(V.d)^{0.46}. \theta.10^{-4} \quad (4.52)$$

Burada V hat'ta dik yönde rüzgarın cm/s cinsinden hızıdır. Cebri konveksiyon formülü ancak $V > 20$ cm/s olduğu zaman uygulanmalıdır.

Solar radyasyon nedeniyle emilen ısı,

$$H_s = \delta.S.d \quad (4.53)$$

formülü ile verilmiştir. Burada,

δ : solar radyasyon katsayısı (parlak yüzey için 0.6, siyah yüzey için 1.0)

S: solar radyasyon şiddeti (W/cm^2 olup 0.084-0.118 arası değişir.

d: iletken çapı (cm).

iletkenlerin akım kapasiteleri belirlenirken aşağıdaki faktörlerin gözönünde tutulması gerekir.

a) Maximum Isı Derecesi

Isı derecesi 100 °C nin üstüne çıktığı zaman, gerek bakır ve gerekse alüminyum tavlanamaya başlar. Bu nedenle, bu metallerin kullanıldığı yerlerde devamlı çalışma ısı derecesinin 75°C'nin üstüne çıkmaması gerekir. Kadmiyumlu bakır ile de bu ısı 75°C'ye kadar çıkabilir.

b) Ortam Isı Derecesi

Coğrafi bölgeye göre değişen bir büyüklüktür. Tropik ülkelerde 45°C, Türkiye'de 20-25°C 'dir.

c) Rüzgâr Hızı

En küçük bir hava hareketi iletkenleri oldukça soğutur. Hesaplamalarda 45 cm/s uygun bir değerdir.

d) Emisyon ve Solar Emme Katsayıları

Hava hattı iletkenleri kolaylıkla oksitlenir. Bu katsayıların 1'e eşit olduğu kabul edilir.

e) Solar Radyasyon

Coğrafi bölgeye göre değişen bu katsayının değeri Türkiye'de 1'dir. Şu halde damarlı bir iletkenin akım kapasitesi verilen limit değerlere göre bulunabilir. Örneğin ısı derecesi yükselmesi 25°C ortam ısı derecesinin üstünde 50°C ise, $E=\alpha=1$, $V=45\text{cm/s}$, $S=0.09$ sabitleri ile damarlı bir iletkenin akım kapasitesi,

$$I = \{[0.031+0.38/d^{0.55}].d/R\}^{0.5} \quad (4.54)$$

olarak bulunur [24].

BÖLÜM 5

ENERJİ İLETİM HATLARINDA YORULMA OLAYININ MEYDANA GELDİĞİ YERLER

Enerji iletim hatlarında yorulma olayı, "Elektriksel Yorulma" veya "Mekaniksel Yorulma" olarak kendini gösterir.

Elektriksel yorulma, aşırı yüklenme veya kısa devre sonucu özellikle iletkenlerin ve izolatörlerin zamanla yorulma kırılmasına uğraması olarak kendini gösterir.

Mekaniksel yorulma ise, gerek malzemenin yapısından gerekse dış etkenlerden kaynaklanan etkenler sonucu malzemenin yorulma kırılmasına uğraması olarak kendini gösterir.

5.1. Direkler

Direkler, iletkenlerin çekme kuvvetinden, rüzgâr kuvvetinden, iletkenin ağırlığından, direğin ağırlığından, izolatör ağırlığından, ek donanım ağırlığından (trafo postası, devre kesicisi vs.), montör ağırlığından ileri gelen kuvvetlerin etkisi altındadırlar.

Bunların yanı sıra, "temel mukavemeti" de gözönüne alınmalıdır. Çünkü direklerde oluşan arızalar, direğin kırılması, traverslerin kırılması şeklinde olduğu gibi direklerin yıkılması şeklinde de olabilmektedir [29].

5.1.1. Demir Direkler

Enerji iletim hatlarında geniş bir kullanım alanına sahiptirler. Ağaç direklerden uzun ömürlü olmaları, beton direklerden hafif olmaları, arızalarının pratik olarak giderilme imkanının bulunması başlıca tercih nedenlerindendir. Maliyetlerinin ve bakım masraflarının yüksek olması dezavantajları arasında sayılabilir.

Havadan ve sanayi bölgelerindeki zararlı gazlardan etkilenmesinler diye "boyalı" ve "galvenizli" olarak iki tipte yapılırlar.

Bu direkler, "Demir direkler" olarak anılmalarına rağmen, aslında "çelik kafesli direkler"dir [24, 28, 29].

5.1.2. Beton Direkler

Savurma ya da titreşim yöntemiyle elde edilirler. Savurma yöntemi, beton içindeki fazla suyun dışarı atılmasını ve çok sıkı, geçirimsiz bir beton elde edilmesini sağlamaktadır. Bu şekilde yapılan direklerin dış yüzü düzgün ve pürüzsüzdür. Titreşim yönteminde, benzer sonuçları elde etmek için kullanılır.

Bu direklerin imalinde çekme gerilmesi 7000 kg/cm^2 olan St 70 çelik kullanılır. Dolgu malzemesi olarak kırma taş veya kum çakıl kullanılır.

Çelik kafesli demir direklere göre % 50 daha az demir kullanılması, havadan ve sanayi bölgelerindeki zararlı gazlardan az etkilenmeleri beton direklerin üstünlükleri arasındadır [24, 29].

5.1.3. Ağaç Direkler

Ağaç direkler, ya iğne şeklinde yapraklı ağaçlardan (çam, köknar gibi), ya da geniş yapraklı ağaçlardan (meşe, kestane gibi) yapılırlar.

Haşare ve kötü hava şartları bu direklerin ömrünü kısaltır. Bu gibi olumsuzlukları önlemek ve ömürlerini uzatmak için, torna'da kabukları soyulan ağaç direk, ya "Kreozot" ile ya da "suda eritilerek kullanılan kimyasal maddeler (bakır-krom-arsenik veya bakır-krom-bor)" ile emprenge edilir.

Bu direkler, zorlanmanın az olduğu yerlerde tercih edilirler. Özellikle alçak gerilimde, direkler arası mesafelerin küçük olduğu yerlerde kullanılırlar.

En büyük dezavantajları kısa ömürlü olmalarıdır. Ağaç direklerin ömrü; ağacın cinsine, kullanıldığı bölgeye ve alınan koruma tedbirlerine bağlıdır [24, 28, 29].

5.2. Hırdavatlar

Enerji iletim hatlarında yorulma olayı bazen de hırdavatlarda olmaktadır. Özellikle, bağlantı parçalarında, civata, perçin ve kaynaklarda bu tür arızalara rastlamak mümkündür [29].

5.3. İzolatörler

Enerji iletim hatlarında izolatörler, "Mesnet", "Zincir" ve "Geçit" izolatör olarak kullanılırlar. Bu izolatörler genellikle porselen ya da camdan yapılırlar.

Şimdiki izolatörlerin çoğunluğu sırlanmış porselenden yapılır. Porselen, yüksek sıcaklıkta kilin camlaştırılması, zarifçe öğütülmüş feldispat ve silis'den

elde edilen bir seramik ürünüdür. izolatör sırası porselen yüzeyi yarıklarını doldurur, genellikle koyu kahverengidir. Fakat gri ve mavi gibi diğer renkler de kullanılır. İletim için kullanılan porselen izolatörler, diskler, postalar veya uzun çubuk cinsler olabilir.

Porselen izolatörler gerilim iletim hatlarında 115'den 765 kV'a kadar ve oldukça yüksek gerilimde kullanılırlar. Eğer düzgün üretilir ve uygulanırsa, yüksek güvenilirliğe sahiptirler.

Cam izolatörler iletim hatlarında önemli oranda kullanılır. Bunlar katılaştırılmış camdan yapılır ve çoğunlukla şeffaf, renksiz ve açık yeşildir. Bunların gerilim iletimi için sadece disk tipleri mevcuttur. Birçok cam disk dizayn edilir. Çünkü etekler, mekanik olarak iletken serbestliği olmaksızın zarar gördüğünde, kırılır.

Sentetik (seramik olmayan) izolatörler aslında yüksek gerilim iletim hatları için 1963'te "General Electric Company" tarafından yapılması için çalışma başlatılmış ve oldukça yakın zamanlarda birçok üretici tarafından üretilmiş ve aşırı kabul görmüştür.

Son yıllarda dizayn ve üretimdeki ilerlemeler, sentetik izolatörün sertlik-ağırlık oranının porselenden önemli derecede büyük olması ve özellikle EHV ve UHV iletim hatlarında düşen burç fiatlarından dolayı, sentetik izolatörler artan cazibeyle üretilmektedir.

Bu izolatörler genellikle uzun çubuk veya posta tipi olarak üretilmektedir.

Kirlenmiş şartlar altında performansları porseleninkinden önemli derecede iyi olabilir.

iletim hatlarında sentetik izolatörün kullanımı nisbeten yenidir ve çalışma altında özellikle kirletilmiş şartlar altında hangar malzemelerin yalıtımının davranışının ömrü hakkında birçok soru cevaplanamamıştır [22].

iyi tavllanmış cam izolatörler yüksek öz dirence ve dielektrik mukavemetine sahiptirler. Ayrıca şeffaf olmalarından dolayı, camdaki çatlakların tesbiti daha kolaydır. Fakat, cam ısı derecesindeki değişimlerden etkilenir. Cam, üzerinde nem barındırır, bu da pisliklerin toplanmasına neden olur ve kaçak akımlara yol açar. Ayrıca, döküldükten sonra soğumanın her tarafta eşit olmasından dolayı, iç gerilmeler meydana gelir. Bundan dolayı porselen, düzgün olmayan şekiller için cam'a tercih edilir. Cam izolatörler 25000 V hatta daha yüksek gerilimlerde kullanılırlar.

Tavllanmış cam izolatörlerin termik ve mekanik bakımdan sınırlarının düşük olmasına rağmen, sertleştirilmiş cam izolatörlerde böyle bir problem yoktur. Burada cam izolatör, yumuşama noktasına kadar ısıtıldıktan sonra aniden soğumaya tabi tutulur. Böylece iç kısım plastik durumunu korurken, önce dış tabakalar katılaşır. Soğuma devam ederken belirli bir zaman sonra iç kısımlar da sertleşir. Bu esnada sertleşmiş dış tabakalar buna karşı koymaya çalışırlar. Sonuçta, bir sıra çekme ve basma zorlanmaları oluşarak, iç tabakalar çekmeye ve dış tabakalar da basmaya zorlanır. Bu şartlar altında, yük yüzey basma zorlanmasını aşan bir değere yükselinceye kadar, çekme şeklindeki zorlanmadan dolayı bir arıza oluşmaz ve izolatörün taşıyabileceği yük camın kırıldığı bu zorlanmadan ibaret bulunur. Sertleştirilmiş camın kırılması için, tavlı camın kırıldığı yükün 5-6 katı yük gerekir.

Camın mukavemeti ve termik etkilere karşı dayanımı porselenden daha iyidir ve daha yüksek gerilme ve eğilme mukavemetine sahiptir.

Porselen; ısı derecesindeki değişikliklerden az etkilendiğinden, yüzey kaçak problemleri daha az olduğundan ve cama nazaran daha mukavim olduğundan dolayı izolatör yapımında daha yaygın olarak kullanılır.

Porselenin sırlanmasıyla şu avantajlar elde edilir

- a) Sır tabakası pisliklerin birikmesine ve bunun sonucu olarak kaçak akımların oluşmasına engel olur.
- b) Sır tabakasına porselenden daha düşük bir uzama kat sayısı verilerek, soğuma sonrası bu tabakanın basınç altında kalması sağlanabilir. Bu ise, izolatörün çatlamasına engel olur ve çekme gerilmesi ile darbe mukavemetini arttırır[23, 24, 25].

5.4. iletkenler

Faz iletkenleri olarak;

- a) Bakır
- b) Alüminyum

Koruma telleri olarak;

- a) Çelik galvenizli
- b) Çelik-bakır
- c) Çelik-alüminyum

iletkenler kullanılır. iletkenler hakkında geniş bilgi daha önceki bölümlerde verilmişti.

BÖLÜM 6
YORULMA ETKİSİ ALTINDA İLETKENİN DAYANMA YÜKÜNÜN
BELİRLENMESİ

a açıklığı, h kot farkı ve iletkende kabul edilebilir bir çekme kuvveti sınırı verilir. Belirli bir başlangıç çekme kuvveti için iletkenin akma ya da yorulma etkisi altında dayanabileceği ek yükün belirlenmesi gerekmektedir.

6.1. Kabul Edilebilir Çekme Kuvveti Sınırının Belirlenmesi:

Bu problem, buz ile yüklü bir iletken üzerinde kabul edilebilen sınır çekme kuvvetinin bilinmesini gerektirir.

Dünyada çoğunlukla kullanılan ve deneylerin doğruladığı uygulama, kabul edilebilir sınır çekme kuvveti: kopma yükünün; çelik-alüminyum kabloda % 60'ını, homojen alüminyum alaşımı ve alüminyum alaşımı-çelik iletkenlerde de % 70'ini almakla belirlenir. Elektrik Kuvvetli Akım Tesisleri Yönetmeliği % 70'i öngörmüştür.

Bu sınırların gerçekleşmesi söz konusudur. Bu sınırları belirten kriteri tanımlamak için kuşkusuz alüminyum ve alüminyum alaşımlarının elastik sınırına başvurmak gerekli olur.

Alüminyum alaşımı 23 kg/mm² mertebesinde bir elastiklik sınırına sahiptir.

Sertleştirilmiş alüminyumun ki ise 10 kg/mm^2 mertebesinde dir.

Homojen iletkenler için belirtilen sınır kendiliğinden, örneğin;

$$23 \cdot 0,7 = 16,1 \quad \text{kg/mm}^2$$

olarak gerçekleşir.

Sorun çelik-alüminyum iletkenlerin sınırlarının belirlenmesindedir.

r_1 : alüminyum iletkenin elastiklik sınırı (kg/mm^2)

q_1 : alüminyum iletkenin toplam kesiti (mm^2)

H_1 : q_1 kesitli alüminyum iletkenin toplam çekme kuvveti (kg)

E_1 : alüminyumun iletken üzerinde elastiklik katsayısı (kg/mm^2)

q_2 : çelik tellerin kesiti (mm^2)

H_2 : q_2 kesitli çelik tellerde toplam çekme kuvveti (kg)

E_2 : çelik bölümün elastiklik katsayısı (kg/mm^2)

q : iletkenin toplam kesiti (mm^2)

H : aranılan toplam çekme kuvveti (kg)

Bu durumda şu bağıntılar yazılabilir:

$$H_1 + H_2 = H \quad (6.1)$$

$$q_1 + q_2 = q \quad (6.2)$$

$$H_1/(E_1 \cdot q_1) = (H_2/E_2 \cdot q_2) = (H/E \cdot q) \quad (6.3)$$

İlk iki bağıntı açıktır. Üçüncü olarak yazılan bağıntılar da H çekme kuvvetinin altında alüminyumun uzamasının, çeliğine ve tüm iletkenin uzamasına eşit olduğunu ifade eder.

Bu bağıntıların tümü elastiklik modülü;

$$E = (E_1.q_1 + E_2.q_2) / q \quad (6.4)$$

nun belirlenmesini sağlar. Böylece H çekme kuvveti de H_1 ile H_2 arasında;

$$H_1 = E_1.q_1.H / E.q \quad (6.5)$$

$$H_2 = E_2.q_2.H / E.q \quad (6.6)$$

olarak dağılmış olur. $H_1 = r_1.q_1$ yerine konursa;

$$H = r_1.E.q / E_1 \quad (6.7)$$

bulunur.

Daha ilerde uygulamada göreceğimiz gibi bu hesap çok kötümser hal içindir. Çünkü alüminyumdan çelik üzerine, alüminyumun yorulma sonucu olası akması ve çeşitli gevşemelerinden doğan gerilme akmalarını hesaba katmaz.

Bu durumda ayrı olarak ;

- alüminyumun elastik uzamasına yorulma sonucu f gevşeme ya da akması ilave edilir,

- çeliğin elastik uzaması (akması geçerli zorlamalarda önemsiz olduğundan) göz önüne alınır.

Aynı şekilde;

$$f + H_1' / (E_1.q_1) = (H_2' / E_2.q_2) = (H / E'.q) \quad (6.8)$$

$$H_1' + H_2' = H \quad (6.9)$$

yazılarak üç bilinmeyen H_1' , H_2' ve E' çözülebilir.

$$H_1' = E_1.q_1.H.(1-f.E_2.q_2/H) / (E.q) \quad (6.10)$$

$$H_2' = E_2.q_2.H.(1+f.E_1.q_1/H) / (E.q) \quad (6.11)$$

$$E' = E / (1+f.E_1.q_1/H) \quad (6.12)$$

bulunur. Alüminyumun çekme kuvveti;

$$H_1' = r_1 . q_1 \quad (6.13)$$

bağıntısı ile bilinmektedir. Buna göre;

$$H = r_1.E.q_1 / E_1+f.E_2.q_2 \quad (6.14)$$

çıkar. Bu formül ikinci bir $f.E_2.q_2$ teriminin ilavesi ile ilk terimden ayrılmaktadır. Bu terim ise alüminyumdaki gevşemelere ilişkin çelik üzerindeki ek yükü ifade etmektedir.

SAYISAL UYGULAMA: a) 547,34 mm² Cardinal Çelik-Alüminyum iletkenin (TS Al/Ç: 485/63 mm²) $E_1=6000\text{kg/mm}^2$ $q_1=484,53$ mm², $E_2=18500$ kg/mm², $q_2=62,81$ mm², $r_1=10$ kg/mm² (Alüminyum için), $E=8300$ kg/mm² (Alüminyum-çelik)'dir. Eğer alüminyumda gevşeme göz önüne alınmazsa;

$$H = r_1.E.q / E_1 = 7571,53 \text{ kg}$$

bulunur. Bu da çelik-alüminyum için kabul edilen

$$H = 10000 \text{ kg}$$

çekme kuvvetinden küçüktür. Bu limite varmak için f gevşeme değeri sokulabilir.

$$(10000-7571,53) / (18500.62,81) = 21/10000$$

olur.

b) 280,84 mm² Hawk Çelik-Alüminyum iletkeninde (TS Al/Ç: 242/39 mm²), $q_1=241,65$ mm² ve $q_2=39,19$ mm² 'dir. Bu durumda;

$$H = r_1.E.q / E_1 = 3885 \text{ kg}$$

$$(10000-3885)/(18500.39,19) = 84,3/10000$$

olur. Bu değerlerle kopma gerilmesinin buzlu halde % 70'i aşılmamalıdır.

6.2. Maksimum Ek Yükün Bulunması:

Açıklık, maksimum kot farkı, ek yüksüz başlangıç çekme kuvveti, aşılmaması istenen maksimum çekme kuvveti verilir.

Elastiklik katsayısı sabit kabul edilirse problem çok basittir. E=sabit ile sıcaklık değişimi ile ilgili terim kaldırılarak değişik haller denklemi kullanılır:

$$H_2^2[H_2-H_1+g^2.a^2.E.q/(24.H_1^2)]=m^2.g^2.a^2.E.q/24 \quad (6.15)$$

denkleminde H_2 'nin değerlendirilmesi, üzerinde olabilecek kot farkından dolayı buzlu haldeki gerilmeyi göz önüne almak için bir pay ayırmak gerekir. Kot farklı bir açıklık üzerinde yüksekteki tespit noktasındaki çekme kuvvetinin;

$$H_2' = P_b = H_2 + g.(f_2+h) \quad (6.16)$$

bu formülden buzlu halde;

$$H_2' = H_2 + m.g.(f_2+h) \quad (6.17)$$

olduğunu bulmuştuk.

Örneğin $547,34 \text{ mm}^2$ Cardinal alüminyum-çelik iletken için 500 kg lık bir pay ayrılabilir. Buna göre kabul edilebilen yatay çekme kuvveti $547,34 \text{ mm}^2$ çelik için $10000-500 = 9500 \text{ kg}$ olacaktır. $280,84 \text{ mm}^2$ Hawk alüminyum-çelik iletken için de 300 kg lık bir pay ayrılabilir. Buna göre kabul edilebilen yatay çekme kuvveti $280,84 \text{ mm}^2$ çelik için $10000-300 = 9700 \text{ kg}$ olacaktır.

Böylece denkleme giren bütün parametreler bilinmektedir. Problemin çözümünü oluşturan m değerini de bu denklemden elde etmek kolaydır.

Bununla beraber alüminyumun gevşeme ve çekme kuvvetinin fonksiyonu olarak elastiklik katsayısının değişimleri hesaba katıldığı zaman ilkesi söylenmiş olan m 'nin hesabının geçerli olup olmadığı sorulabilir.

Bu durumda gerilme altındaki alüminyumun gevşemesinin çeliğin düzeltici f uzaması ile kompanse edilmesi ile;

$$H_0 = f.Ez.qz \quad (6.18)$$

olur. Bu durumda seçilmiş bir H_1 çekme kuvvetinden hareket ederek H_0 çekme kuvvetine ilişkin m_0 ek yükünü;

$$m_0 = [H_0^2/H_1^2 + 24.H_0^2.(H_0-H_1)/(g^2.a^2.Ez'.qz)]^{1/2} \quad (6.19)$$

olarak tanımlamak gerekir.

Bundan sonra H_0 ile kabul edilen m ek yükündeki H_2 çekme kuvveti arasında;

$$H_2^2[H_2-H_0+m_0^2.g^2.a^2.E.q/(24.H_0^2)]=m_2^2.g^2.a^2.E.q/24 \quad (6.20)$$

klasik değişik haller denklemi yazılır.

SAYISAL UYGULAMA: a) 547,34 mm² Cardinal çelik-alüminyum iletkenin a=400 m ve h=60 m kot farkında çekilmesi halinde -5 °C'de 2700 kg çekme kuvvetinden hareket edilerek mo ve kot farkını göz önüne alan H₂'deki m₂ değerleri aranıyor (E₂=18500kg/mm², E=8300 kg/mm², q₂=62,81 mm², g=1.82 kg/m).

$$H_o = f.E_2.q_2 = 21.18500.62,81/10000 = 2440,16 \text{ kg}$$

$$m_o = [H_o^2/H_1^2 + 24.H_o^2.(H_o-H_1)/(g^2.a^2.E_2'.q_2)]^{1/2} = 0.87$$

$$H_2^2[H_2-H_o+m_o^2.g^2.a^2.E.q/(24.H_o^2)]=m_2^2.g^2.a^2.E.q/24$$

$$H_2^2(H_2-2440,16+12752,3) = 10.10^{10}.m_2^2$$

$$m_2 = 4,228$$

$$m.g = 7,7 \text{ kg/m ve } (m-1).g = 5,87 \text{ kg/m ek yük gelir.}$$

b) Bu değerleri 280,84 mm² Hawk çelik-alüminyum iletkene uygularsak (q₂=39.19mm² , g=0.97kg/)

$$H_o = f.E_2.q_2 = 6111.87 \text{ kg}$$

$$m_o = [H_o^2/H_1^2 + 24.H_o^2.(H_o-H_1)/(g^2.a^2.E_2'.q_2)]^{1/2} = 5.75$$

$$H_2^2[H_2-H_o+m_o^2.g^2.a^2.E.q/(24.H_o^2)]=m_2^2.g^2.a^2.E.q/24$$

$$m_o^2.g^2.a^2.E.q / (24.H_o^2) = 12941.26$$

$$H_2^2(H_2-6111,87+12941,26) = 1,46.10^{10}.m_2^2$$

$$m_2 = 10.32$$

$$m.g = 10 \text{ kg/m ve } (m-1).g = 9 \text{ kg/m ek yük gelir.}$$

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Aşırı yüklenmeden dolayı enerji iletim hatlarında oluşan yorulma daha detaylı incelenebilir. Hatta iletimin doğru akım ya da alternatif akım ile olmasına bağlı olarak iletkenin yorulma ömrü değişir. Çünkü, alternatif akım iletkenin bütün yüzeyini kullanmaya çalışırken, doğru akım sadece dış yüzeyini kullanır.

Elektrik-Elektronik sanayiinde kullanılan çelik, alüminyum ve bakır gibi mühendislik malzemelerinde görülebilecek yorulma hasarı hem malzeme dayanım ömrünü kısaltır hemde mukavemet ve elektriksel özellikleri düşürür. Yüksek gerilim hatlarında kullanılan çelik direklerde birinci safhada termal çevrimlerin bir neticesi olarak yorulma olayı meydana gelebilir. Bu olayın çözümü hemen hemen imkansızdır. Çünkü iklim koşullarını kontrol altında tutmak mümkün değildir. Ortamın nemi de bu doğal koşullar sınıfına girer ve yorulma olayını hızlandırır. Tek çözüm yolu çelik konstrüksiyonunun kaplanmasıdır (boyama vs.). Çelik direklerde olduğu gibi, alüminyum ve bakır iletken tellerde de yorulma gözlenir ve önlenemez ise iletkenliği düşer. Yine yüksek gerilim hatlarında kullanılan bu iletken tellerde kış ve yaz iklim koşullarından ileri gelen termal genleşme ve büzülme uzun bir sürede yorulmaya yol açarlar ve direnci artırırlar. Bu olay iletken tellerde deformasyona yol açarak elektriksel direnci artırır. Bu olayın da önüne geçilmesi imkansızdır. Yalnız iletken teller (alüminyumda olduğu gibi) örgülü olarak hazırlanarak, yorulma bir nebze olsun giderilebilir.

Yorulmaya yol açan bir başka neden ise mühendislik malzemeleri yüzeylerinde bulunan süreksizlikler (çizik vs.)' dir. iletken tellerin mümkün olduğunca, düzgün bir yüzeye sahip olmaları gerekir. Ayrıca malzeme iç yapısında bulunan mikro boşluklar da çatlak başlangıç bölgeleri olduğundan yorulma ömrünü düşürürler. Bu hata da metalurjik faktörler kontrol edilerek (ergitme, döküm, elektroliz ve tel çekme) önlenabilir. Bir diğer sebep ise malzemedeki safsızlıktır. Örneğin bakır telde bulunan % 0.2 Oz miktarı elektrik iletkenliğini % 75' e kadar düşürebilir. Bu olay da metalurjik faktörler ile kontrol edilebilir.

Çekilmiş çelik tellere parlatma, taşlama ve bilya püskürtme gibi yüzey işlemlerinin uygulanması halinde yorulma dayanımları % 30 artar. Alaşımlandırma ile alüminyum ve bakırın mukavemeti artırılır. Ayrıca soğuk hadde ile bakırın kopma mukavemeti % 30-40 artırılabilir.

Eşitlik 6.14 incelendiğinde açıkça görülmektedir ki, alüminyumdaki gevşeme miktarı artarsa buna paralel olarak çelikteki ek yük miktarı da artmaktadır. Aynı eşitlikten çıkarılan bir sonuç da alüminyumun gevşeme miktarının minimumda tutulması gerekliliğidir. Gevşeme miktarı ne kadar düşük ise alüminyumun akma mukavemeti de bu değere bağlı olarak daha yüksek olacaktır.

Bütün bu şartların kontrolünün yapılmasına rağmen, eğer yorulmadan kaçınmak mümkün değilse yorulma kırılmasının gevrek olmamasına çalışmak gereklidir. Çünkü gevrek kırılmalarda felaketlere yol açabilecek kazalar meydana gelebilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] -----, 380 kV. Keban-Kayseri Enerji iletim Hattı Arıza Raporu, T.E.K. K.B.A. Şebeke Müdürlüğü, Adapazarı, 1978.
- [2] -----, 154 kV. Brş.N-Bozüyük Enerji iletim Hattı Arıza Raporu, T.E.K. K.B.A. Şebeke Müdürlüğü, Adapazarı, 1988.
- [3] -----, 380 kV. Gökçekaya-İstanbul Enerji iletim Hattı Arıza Raporu, T.E.K. K.B.A. Şebeke Müdürlüğü, Adapazarı, 1974.
- [4] -----, 380 kV. Gökçekaya-Umraniye Enerji iletim Hattı Arıza Raporu, T.E.K. K.B.A. Şebeke Müdürlüğü, Adapazarı, 1974.
- [5] -----, 380 kV. Ankara-İstanbul ve Gökçekaya-İstanbul Enerji iletim Hattı Arıza Raporu, T.E.K. K.B.A. Şebeke Müdürlüğü, Adapazarı, 1974.
- [6] -----, 154 kV. Adapazarı-Kartal Enerji iletim Hattı Arıza Raporu, T.E.K. K.B.A. Şebeke Müdürlüğü, Adapazarı, 1982.
- [7] -----, 380 kV. Sincan-Osmanca Enerji iletim Hattı Arıza Raporu, T.E.K. K.B.A. Şebeke Müdürlüğü, Adapazarı, 1987.
- [8] KAYALI, E.S., ENSARI, C., DIKEÇ, F., Metalik Malzemelerin Mekanik Deneyleri, İstanbul, 1983.
- [9] UÇIŞIK, H., Alüminyumda Plastik Yorulma Hasarının Birikimi Üzerinde Frekansın Etkisi, İ.T.Ü. Matbaası, 1972.
- [10] -----, Metals Handbook, Metals Handbook Committee, U.S.A., 8 th. Edition, Vol.1, 1975.
- [11] BRESSERS, J., Creep and Fatigue In High Temperature Alloys, Science Publishers Ltd., London, 1987.

- [12] TETELMAN, D.S., EVILY, Mc.A.J., Fractures of Structural Materials, John Willey and Sons Inc., New York, 1967
- [13] ONARAN, K., ERMAN, B., Malzemelerin Yapı ve Özellikleri, i.T.Ü. Matbaası, Cilt 3, 1978.
- [14] ONARAN, K., Malzeme Bilimi, istanbul, 1985.
- [15] GULEÇ, Ş., ARAN, A., Malzeme Bilgisi, TÜbitak, Gebze, Cilt 1, 1985.
- [16] NASH, W.A., Theory and Problems of Strength of Materials, New York, 1957.
- [17] KAYALI, E.S., ÇİMENÖĞLU, H., Malzemelerin Yapısı ve Mekanik Davranışları, istanbul, 1986.
- [18] -----, Aluminum Electrical Conductor Handbook, The Aluminum Association, New York, 1971.
- [19] GULEÇ, Ş., ARAN, A., Çelik ve Dökme Demirlerin Yorulma Dayanımı, TÜbitak, Gebze, 1983.
- [20] GUY, A.G., HREN, J.J., Elements of Physical Metallurgy, U.S.A., 1974.
- [21] SAFOĞLU, R.A., Malzeme Bilimine Giriş, istanbul, 1980.
- [22] FINK, G.D., & BEATY, H.W., Standard Handbook for Electrical Engineers, McGraw Hill, Twelfth Edition, 1987.
- [23] DİLEGE, M., Yüksek Gerilim Hava Hatlarının Mekanik Hesabı, i.T.Ü. Matbaası, Cilt 1, 1979.
- [24] DEMİRKUT, B., Elektrikle Enerji Taşınması, istanbul, 1971.
- [25] FREEMAN, P.J., Electric Power Transmission and Distribution, Harrap, 1974.
- [26] DEWEESE, F.C., Transmission Lines, McGraw Hill, 1945.
- [27] EATON, J.R., Electric Power Transmission Systems, U.S.A., 1972.
- [28] ALPERÖZ, N., Elektrik Enerjisi Dağıtımı, istanbul, 1987.
- [29] AYGEN, V., Enerji iletim Hatları, i.T.Ü. Matbaası, 1985.

- [30] CAYMAZ, M., Enerji iletim Hatları Sehim-Gerilme-Offset, izmir, 1984.
- [31] ASEHY, J., Introduction to Materials Science, McGraw Hill, Newyork, 1976.
- [32] -----, Electrical Engineering Handbook, Siemens, London, 1981.
- [33] ONARAN,K., ALTINTAŞ, S., Malzemelerin Yapı ve Özellikleri, i.T.U. Matbaası, Cilt 4, 1986.
- [34] BARNES, C.C., HACKING, J., Power Cables, London, 1966.



EK A : KARDİNAL İLETKENİNDE GERİLME UZAMA EĞRİSİ

YÜK (Kg)

Malzemeye oda sıcaklığında $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 'de çekme yükü uygulanmaktadır.

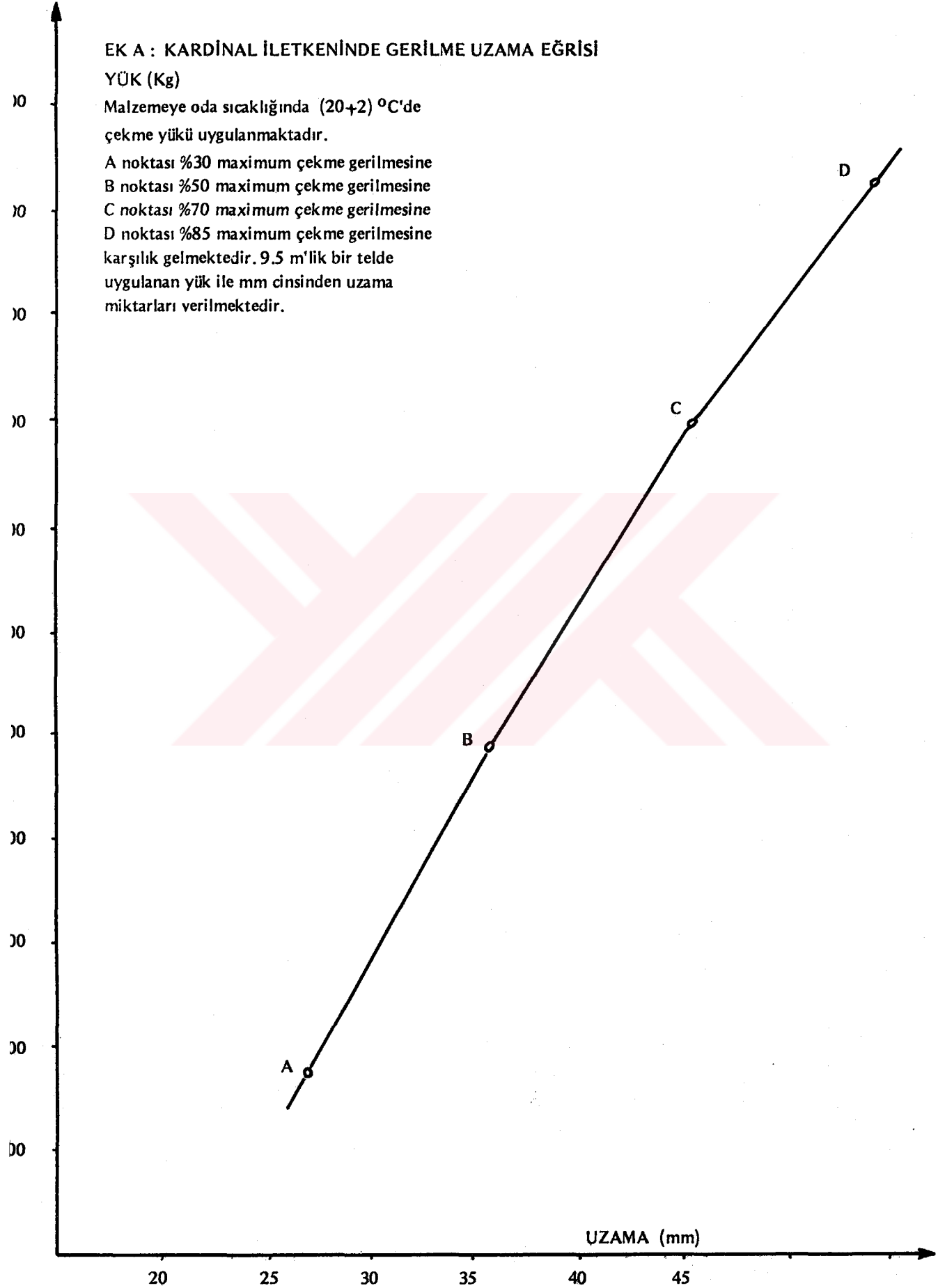
A noktası %30 maximum çekme gerilmesine

B noktası %50 maximum çekme gerilmesine

C noktası %70 maximum çekme gerilmesine

D noktası %85 maximum çekme gerilmesine

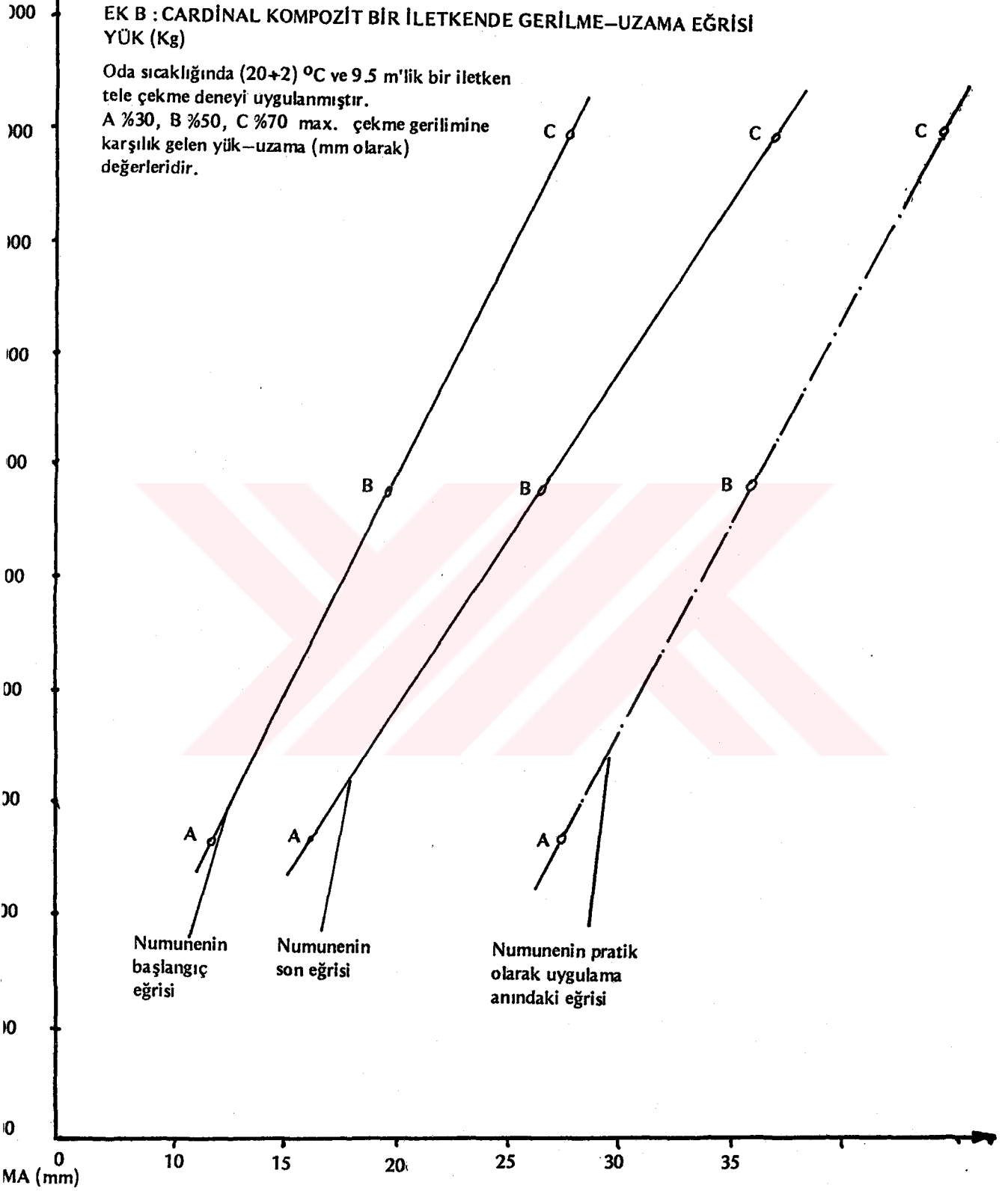
karşılık gelmektedir. 9.5 m'lik bir telde uygulanan yük ile mm cinsinden uzama miktarları verilmektedir.



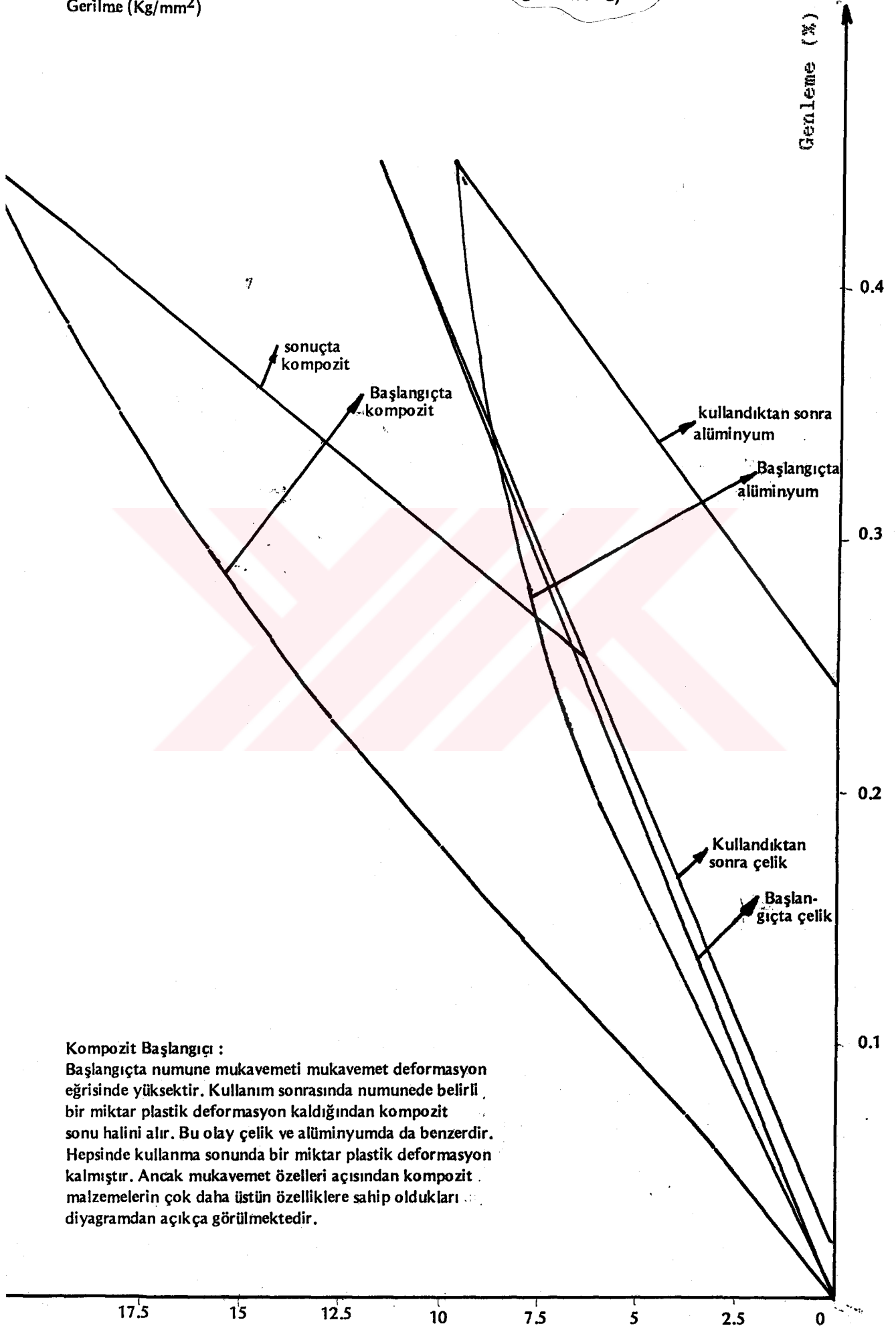
EK B : CARDİNAL KOMPOZİT BİR İLETKENDE GERİLME-UZAMA EĞRİSİ
YÜK (Kg)

Oda sıcaklığında (20+2) °C ve 9.5 m'lik bir iletken tele çekme deneyi uygulanmıştır.

A %30, B %50, C %70 max. çekme gerilimine karşılık gelen yük-uzama (mm olarak) değerleridir.



EK C : HAWK İLETKENDE GERİLME-UZAMA EĞRİSİ (Test sıcaklığı 21-24 °C)
Gerilme (Kg/mm²)



Kompozit Başlangıcı :

Başlangıçta numune mukavemeti mukavemet deformasyon eğrisinde yüksektir. Kullanım sonrasında numunede belirli bir miktar plastik deformasyon kaldığından kompozit sonu halini alır. Bu olay çelik ve alüminyumda da benzerdir. Hepsinde kullanma sonunda bir miktar plastik deformasyon kalmıştır. Ancak mukavemet özellikleri açısından kompozit malzemelerin çok daha üstün özelliklere sahip oldukları diyagramdan açıkça görülmektedir.

ÖZGEÇMİŞ

Nihat İNANÇ 1967 yılında Van'da doğdu. İlkokul öğrenimini Van'da tamamladıktan sonra 1984 yılında Van Endüstri Meslek Lisesi Elektrik Bölümünden mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. S.M.F. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'ne başladı. Buradan 1988 yılında ikinci olarak mezun oldu. Aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsünde Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

Halen İ.T.Ü. S.M.F.'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.