

5. HAFTA: HAVAI HAT İLETKENLERİ

Havai Hat İletkenleri

Havai hat iletkenleri, santrallerde üretilen elektrik enerjisini tüketim bölgelerine taşıyan ve bu bölgelerde dağıtan hatlarda kullanılan iletkenlerdir. Enerjinin taşınması ve dağıtımında kayıpların en aza indirgenmesi için havai hatlarda kullanılacak iletkenler yüksek iletkenlik özelliğine sahip malzemelerden üretilmelidir. Diğer yandan, havai hat iletkenleri mekanik yüklere ve tabiat şartlarına karşı yeterince dayanıklı, aynı zamanda mümkün olduğunca hafif malzemelerden seçilmelidir. Hattın iletkenliği ile mekanik dayanımı, kullanılan iletkenin çapı ve yoğunluğu ile ilişkilidir. Gerek taşıdıkları akımdan gerekse de dış faktörlerden dolayı havai hat iletkenleri kolayca ısınır. Bu durumda hattın direnci artar ve direkler arasında gerili olan iletkenlerde sarkmalar görülür. Dolayısıyla iletim hatlarında kullanılan iletkenlerin ısı dayanımı da iyi olmalıdır.

Havai Hat İletkenleri

İletken olarak en yaygın malzeme bakır ve alüminyumdur veya çelik özlü alüminyum iletkenlerdir. Enerji iletim hatları, kar, buz, rüzgâr, yağmur, güneş vb. dış faktörlerden dolayı ekstra bir kuvvete maruz kalmaktadırlar. Bu nedenle, iletkenler bu gibi olumsuz etkilere dayanacak şekilde seçilmelidir. İletken seçiminde en çok enerji kaybı, optimal maliyet, gerilim düşümü, ısınma durumu ve korona kaybı dikkate alınmalıdır.

Havai Hat İletkenleri

Enerji iletim ve dağıtımında kullanılan, havai hat iletkenleri, som (içi dolu veya masif) tek tel veya örgülü çok telli olarak bakır veya alüminyumdan yapılır. Som telden yapılan iletkenler bir cins malzemedendir ve içi dolu bir tek tel halinde 10 mm^2 kesite kadar imal edilir. Bazı özel durumlarda kullanılmak üzere 16 mm^2 lik olanları da yapılmaktadır. Örgülü çok telli iletkenler ise aynı veya aynı cins metalden imal edilir. İnce tellerin spiral şekilde örülmesiyle meydana getirilen çıplak iletkenlerdir. Örgülü iletkenler, büyük kesitlerde montaj kolaylığı, esnek oluşu, kangal haline getirilebilmeleri ve taşınma kolaylığı sebebiyle tercih edilir.

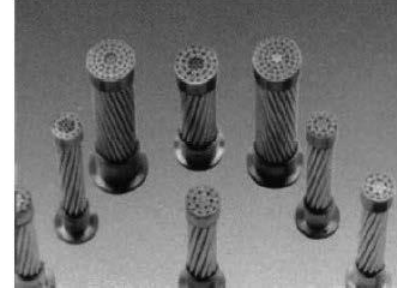
İletkenlerin Kullanılan Malzemeye Göre Sınıflandırılması

Bakır İletkenler: Havai hat iletkenlerinde aranan başlıca özellik, iletkenliğinin iyi ve çekme dayanımınının büyük olmasıdır. Bu özelliklere en uygun malzeme, çekme dayanımı soğuk çekilerek artırılmış olan yarı sert bakırdır. Soğuk çekme işlemi sırasında bakır iletkenin çekme dayanımı önemli ölçüde artmasına rağmen, iletkenliğinde çok az azalma meydana gelmektedir. Öte yandan bakır hem pahalı hem de ağır bir iletkenidir. Bu nedenle günümüzde havai hatlarda bakır iletkenler yerine daha ucuz ve hafif olan alüminyum iletkenler kullanılmaktadır.



Şekil 4.1: Bakır iletkenler.

Alüminyum İletkenler (AAC): Alüminyum iletkenler, bakıra göre daha ucuz ve hafif olduklarından dolayı enerji dağıtımında en yaygın kullanılan iletkenlerdir. Alüminyumun yoğunluğu, yaklaşık olarak bakırın % 30'u olduğundan daha hafif bir iletken malzemedir. Ağır iletkenler ağır direk yapılarının kullanılmasını gerektirdiğinden, iletkenlerin hafif olması havai hatlarda bir zorunluluktur. Buna ilave olarak, alüminyum iletkenlerin taşınması, işlenmesi ve montajı, ağır bakır iletkenlere göre daha kolaydır. AAC olarak da tanımlanan bu tür iletkenler, %99,7 elektrolitik olarak arıtılmış alüminyum külçelerden üretilmektedir. Çeşitli alimünyum iletken örnekleri Şekil 4.2' de görülmektedir.



Şekil 4.2: Tam Alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenler.

Tam Alüminyum Alaşımli İletkenler (AAAC): Bu iletkenler, yüksek mekanik dirence sahip ve alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenlere nazaran çok daha fazla korozyon direncine sahip olduğundan, enerji nakil ve dağıtım hatlarda kullanılmaktadır. Ağırlık ve gergi oranı yüksek olduğundan, diğer iletken tiplerine nazaran tercih edilirler. Alüminyumun yapısına çinko, nikel, silisyum ve demir katılarak oluşturulan alaşımlarla, öz iletkenliği % 2-3 oranında azaltılabilir. Bakır, gümüş veya magnezyum katılarak oluşturulan alüminyum alaşımları ile de öz iletkenliği % 5-10 oranında artırılabilir. Tam alüminyum alaşımli iletkenler aynı çaptaki çelik özlü alüminyum iletkenlerine göre daha iyi korozyon direncine ve daha yüksek elektrik iletkenliğine sahiptir.

Çelik Özlü Alüminyum İletkenler (ACSR, St-Al): ACSR olarak da bilinen bu iletkenler, % 6-40 oranında değişen çelik özler üzerine sarılmış alüminyum iletkenler ile yüksek çekme ve gerilme özelliklerine uygundur. Bu tür iletkenler, nehir geçişleri ve direk aralıkları uzun olan enerji nakil hatlarında kullanılmaktadır. Çelik özlü iletkenlerin en büyük özellikleri yüksek gerilme mukavemeti, düşük ağırlık, daha az sayıda mesnet ile daha fazla iletim hat mesafesinin sağlanmasıdır. Alüminyum iletkenin kopma gerilmesi 18 kg/mm^2 iken çelik alüminyum iletkeninki ise 30 kg/mm^2 'dir. Bu nedenle çelik alüminyum iletken, alüminyum iletkene göre 1,66 kat daha dayanıklıdır. Ayrıca çelik alüminyum iletkenin bakıra göre 2 kat daha hafif oluşu, nakliye ve montajda büyük kolaylık sağlar. Bu durum, orta ve yüksek gerilim enerji iletim hatlarında büyük avantajlar sağlamaktadır..

Enerji iletim hatlarında kullanılan çelik özlü alüminyum iletkenleri tanımlamak için *Amerikan Tel Ölçüleri* (American Wire Gauge, AWG) kullanılmaktadır. Ülkemizde enerji iletiminde 3AWG; 1/0AWG;3/0AWG; 266 MCM ve 477 MCM çelik özlü alüminyum (St-Al) iletkenler kullanılmaktadır. Kullanılan iletken sembollerinin herbirinin ayrı bir anlamı vardır. AWG adlandırmasında, AWG'nin ön kısmı 0000, 000, 00, 0, 1, 2, 3, ..., 40'a gösterilir. Her bir numara, belli bir çap, dolayısıyla da bir kesite karşılık gelir.

- 3 AWG = 3 AWG Swallow (Kırlangıç)
- 0 AWG = 1/0 AWG Raven (Kuzgun)
- 000 AWG = 3/0 AWG Pigeon (Güvercin)

İletkenlerin İmal Ediliş Şekline Göre Sınıflandırılması

Som (içi dolu) iletkenler: Bu tür iletkenler, yalnız bir cins malzemedен ve içi dolu tek bir tel halinde olmak üzere 10 mm² kesite kadar imal edilmektedirler. Som iletkenler iç tesisatta kullanılır.

Örgülü iletkenler: Havai hat iletkenleri örgülü olarak yapılırlar. Örgülü iletkenlerde teller ortak eksen etrafında bir veya birkaç katman oluşturacak biçimde sarmal olarak sarılır. Çok katmanlı örgülü iletkenlerde komşu katmanlar, dış katmanın sarılma yönü sağ yönde olacak şekilde birbirine zıt yönde sarılır. Örgülü iletkenlerde, çapları eşit olan ortada bir tel ve bu telin çevresindeki her bir katmanda bir önceki katmandakinden 6 fazla olmak üzere teller bulunur. Buna göre;

- 1 telli (som) iletken,
- $1+6=7$ telli, bir katmanlı,
- $1+6+12=19$ telli, iki katmanlı,
- $1+6+12+18=37$ telli, üç katmanlı
- $1+6+12+18+24=61$ telli, dört katmanlı

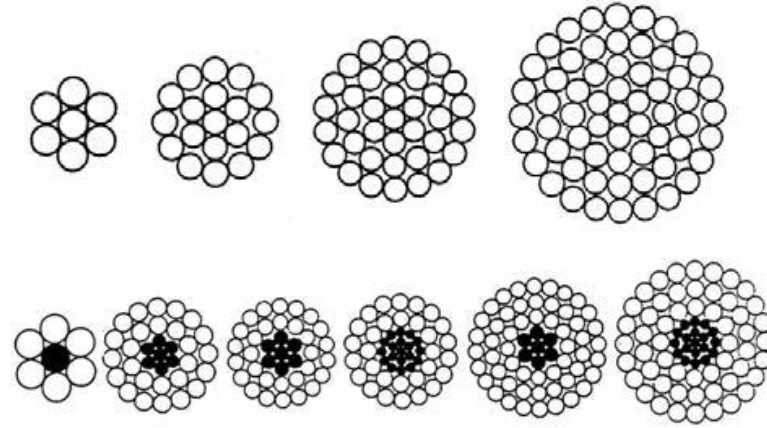
örgülü iletkenler imal edilir.

Çelik özlü alüminyum iletkenlerde ise, ortasında çapları eşit olan 1 telli veya 7 ve 19 telli örgülü galvanizli çelik teller, bunların çevresindeki her bir katmanda bir önceki katmandakinden 6 fazla olmak üzere, çapları eşit olan alüminyum teller bulunur. Örneğin,

- 18 Al/7 St: $6+12=18$ Al ve $1+6= 7$ St,
- 26 Al/7 St: $10+16=26$ Al ve $1+6= 7$ St,
- 42 Al/7 St: $8+14+20=42$ Al ve $1+6= 7$ St,
- 54 Al/19 St: $12+18+24=54$ Al ve $1+6+12= 19$ St

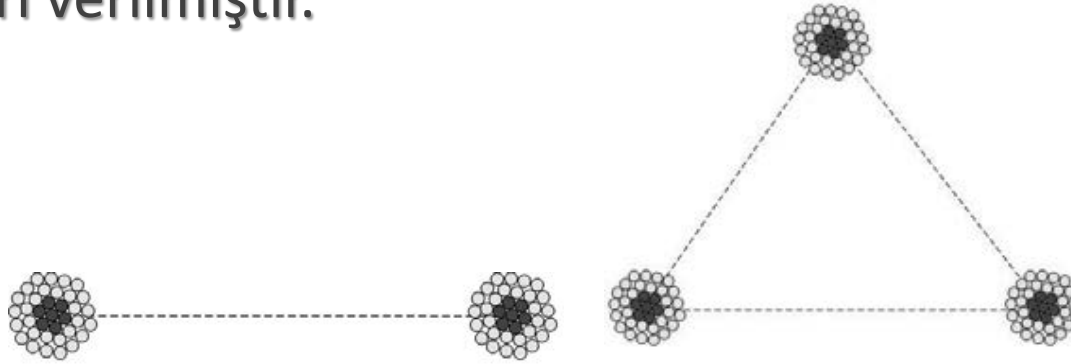
tellidir.

Çelik özlü alüminyum iletkenlerde direnç hesaplanırken çelik özün iletkenliği dikkate alınmaz ve yalnızca alüminyum iletkenin kesiti göz önüne alınır. Havai hatlarda kullanılan her kesitteki alüminyum iletkenlerle, kesiti 16mm² 'den büyük olan bakır iletkenler örgülü olarak yapılırlar. Yüksek gerilim hatlarında yalnızca örgülü iletkenler kullanılır. Havai hatlarda kullanılan örgülü iletkenlerin kesitleri, bakır iletkenler için 16 mm² , alüminyum iletkenler için 21 mm² ve çelik özlü alüminyum iletkenler için 21/4 mm² den küçük olamaz. Alçak gerilim hatlarda kesiti 10 mm² olan som veya örgülü bakır iletkenler kullanılabilir. Çeşitli çap ve kesitte alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenlerin damar ve örgü yapısı Şekil 4.3' de verilmiştir.



Şekil 4.3: Çeşitli çap ve kesitte alüminyum ve çelik özlü alüminyum iletkenler.

Demet iletkenler: Havai hatlarda gerilim büyüdükçe ve iletken çapı küçüldükçe elektrik alan şiddeti büyüyeceğinden, korona olayı yaşanır. 220 kV 'un üzerindeki gerilimlerde korona olayı önem kazandığından, önceleri iletken çapını büyütme amacı ile içi boş iletkenler kullanılmıştır. Daha sonra, her faz için bir yerine, çoklu demet iletken kullanılarak iletkenin çapının büyütülmesi yoluna gidilmiştir. Demet iletkenleri oluşturan bileşen iletkenler genellikle, merkezleri arasında 400 mm açıklık bulunacak şekilde ara tutucularla (spacer) birbirlerine bağlanır. Demet iletken kullanıldığında, hattın endüktif reaktansı azalacağından, hatta meydana gelen reaktif güç kayıplarında bir azalma gözlenecektir. Şekil 4.4'de ikili ve üçlü demet iletken örnekleri verilmiştir.



Şekil 4.4: İkili ve üçlü demet iletkenler.

Havai Hat İletkenlerinin Gerilim Değerlerine Göre Sınıflandırılması

Alçak Gerilim İletkenleri (1 V – 1000 V): Alçak gerilim (AG) iletkenleri, elektrik enerjisinin şehir, kasaba veya köy gibi yerleşim yerlerinde abonelere dağıtılması ve sokak aydınlatılması için kullanılan iletkenlerdir. Ekonomik ve hafif olmaları nedeniyle, AG'de Alpek kablolar olarak bilinen askı telli, demet biçimli alüminyum iletkenli havai hat kabloları ve alüminyum örgülü iletkenler kullanılır. İngilizce çiçek isimleri ile anılan Rose, Lily, Iris, Pansy, Poppy, Aster, Phlox ve Oxlip sembolü ile verilen iletkenler alçak gerilimde kullanılan alüminyum iletkenlerdir.

Orta Gerilim İletkenleri (1-35 kV): Köy ve kasaba hatları ile şehir içindeki orta gerilim (OG) hatlarında, çelik özlü alüminyum iletkenler kullanılmaktadır. Ülkemizde, 34,5 kV iletim ve dağıtım hatlarında, 3 AWG (Swallow) , 1/0 AWG (Raven), 3/0 AWG (Pigeon), 266,8 MCM (Partridge) ve 477 MCM (Hawk) iletkenleri kullanılmaktadır. 477 MCM (Hawk) tipi yüksek gerilim iletkenleri vadi ve nehir atlamalarındaki çok geniş aralıklarda kullanılmaktadır.

Yüksek Gerilim İletkenleri (36 – 154 kV): 154 kV iletim hatları, Tablo 4.3 verilen standart 477 MCM (Hawk), 795 MCM (Drake), 954 MCM (Cardinal) ve 1272 MCM (Pheasant) çelik özlü (ACSR) alüminyum iletkenler, tek veya çift devre direkler kullanılarak tesis edilir. 154 kV hatlarda genellikle her fazda bir iletken bulunur. Çok yüksek talep bölgelerinde iletim hatlarının taşıma kapasitesini artırmak için 154 kV ikili demet (bundle) Cardinal iletkenli çift devre stratejik kısa hatlar tesis edilir.

Havai hatların güzergâhının temin edilemediği yoğun yerleşim bölgelerinde standart olarak 154 kV , 630 mm² veya 1000 mm² kesitli XLPE bakır iletkenli yeraltı kablosu tesis edilir. XLPE bakır kabloların özellikleri yeraltı kabloları bölümünde verilmiştir.

Çok Yüksek Gerilim İletkenleri (154 kV 'tan Yukarısı): 380 kV iletim hatlarında, standart 954 MCM (Cardinal) ve 1272 MCM (Pheasant) her bir fazda iki veya üçlü demet halinde çelik özlü alüminyum iletkenler kullanılır.

Havai hatların güzergâhının temin edilemediği yoğun yerleşim bölgelerinde standart olarak 380 kV 2000 mm² kesitli XLPE bakır iletkenli yeraltı kablosu tesis edilir.

Havai Hat İletken Seçiminde Kriterler

İletkenlik: Enerjinin taşınmasına ekonomik olarak bakıldığında elektrik enerjisinin iletim ve dağıtımında en çok bakır ve alüminyumdan yapılan iletkenler kullanılır. İletim hatlarındaki aktif güç kaybını en alt seviyede tutmak için iletken olarak iletkenliği iyi olan malzemeler seçilmelidir. Bakır gümüşten sonra en yüksek iletkenliğe sahip malzemedir. Ancak, bakır iletkenler, ağır ve pahalı olmasından dolayı havai hatlarda yaygın olarak kullanılmaz. Bunun yerine, daha hafif ve ucuz olduğundan, galvanizlenmiş çelik tel ile tam alüminyum veya alüminyum alaşımı olan alüminyum iletkenler, havai hatlarda çok kullanılır. Çelik özlü alüminyum iletkenlerde, çelik tel mekanik dayanımı artırmak bakımından önemlidir. Esas iletkenlik görevini alüminyum damarlar yerine getirir.

İletkenin Çapı: Havai hatlarda kullanılan iletken malzemelerin iletkenlik özellikleri dikkate alınarak iletken çapı seçilmelidir. Alüminyum iletkenler bakır iletkenlere göre daha az iletkenlik gösterdiğinden çapları daha büyük olur.

Örneğin, alüminyum iletkenin bakır iletkenle aynı iletkenliğe sahip olması için, çapı bakır iletkenin çapının 1,3 katı olması gerekmektedir. Ancak, iletkenlerin çaplarının büyük olması, daha fazla yüklenmeye maruz kalması demektir. İletken çapı büyüdüğünde, üzerindeki buz ve rüzgâr yükü artarak iletkenin mekanik dayanımının azalmasına neden olur. İletkenlerin seçilmesinde bu durum göz önünde bulundurulmalıdır.

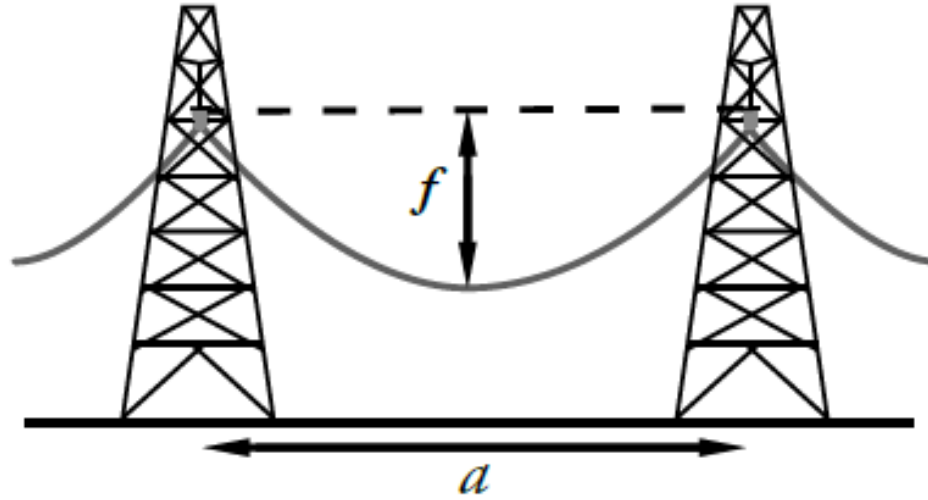
Özgül Ağırlık: Enerji iletim hatlarında, iletkenin özgül ağırlığı dikkate alınarak mekanik dayanım hesabı yapılır. İletken seçiminde, iletkenin özgül ağırlığının az olması istenir. Özgül ağırlığın az olması, durdurucu direğe gelen çekme kuvvetini azaltır. Bakır iletkenin özgül ağırlığı 8,9 g/cm³ iken alüminyumun özgül ağırlığı ise 2,7 g/cm³'tür. Alüminyum özgül ağırlığının bakıra kıyasla 3-4 kat daha küçük olması, alüminyum iletkenleri enerji iletiminde daha çok tercih edilir hale getirmiştir. Ayrıca, iletkenin özgül ağırlığının küçük olmasıyla, direk ve havai hat donanım malzemelerinde ekonomi sağlanır.

Isı Dayanımı: Enerji iletiminde kullanılan iletkenlerin ısı dayanımı iyi olmalıdır. İletkenlerin ısı, gerek iletkenin içinden geçen akımdan dolayı, gerekse dış faktörlerden dolayı artar. Özellikle, iletkenler yaz aylarında hava sıcaklığının artması dolayısıyla daha da ısınır. İletkenin ısı artışı, iletkenin boyunun uzamasına ve dolayısı ile sarkmasına neden olur. İletkendeki sarkma (sehim) hesaplarında, havanın sıcaklığından dolayı ısı artışı mutlaka dikkate alınması gereken bir durumdur. Alüminyum iletkenler havadaki hafif bir rüzgârla bile soğuyabilir. Ancak rüzgâr olmadığı ve hava sıcaklığı fazla olduğu zaman iletkendeki uzama çok fazla olur.

Mekanik Dayanım: Havai hatlarda kullanılan iletkenler, rüzgâr, buz, kar, sıcak ve soğuk hava şartları gibi dış tesirlerin etkisinde kalır. Bu dış tesirler, iletkenlerin ve direklerin kendi ağırlıklarına ilave olarak ekstra bir kuvvete maruz kalmasına neden olmaktadır. Bu ilave kuvvetler, iletkenin kopmasına yol açabilir. Kopan iletken başka bir hat üzerine düşebilir. Bütün bu durumların önlenmesi için iletkenlerin mekanik kopma dayanıklılığının yüksek olması gereklidir. Bakır iletkenlerin mekanik dayanımı alüminyum iletkenlerden daha yüksektir. Alüminyum iletkenlerin mekanik dayanımı, örgülü alüminyum tellerin iç kısmında ve orta yerde bulunan galvanizli çelik teller kullanılarak artırılmaktadır. Alüminyum iletkenin kopma gerilmesi 18 kg/mm² iken çelik alüminyum iletkeninki ise 30 kg/mm² 'dir. Bu nedenle çelik alüminyum iletken mekanik açıdan, alüminyum iletkene göre 1,66 kat daha dayanıklıdır.

Koronaya Karşı Dayanıklılık: Korona gerilimine etki eden birçok faktör vardır. Hatlarda kullanılan iletkenlerin yarıçapı, iletkenler arası geometrik ortalama uzaklık, havanın sıcaklık, nem, basınç, sis, yağmur, buzlanma, kar ve rüzgar gibi değişik şartları korona olayını etkiler, belirtilerinin ve etkilerinin artmasına neden olur. Korona olayı ısı, ses ve kimyasal reaksiyonlar şeklinde kendini gösteren bir enerji kaybıdır. Enerji nakil hatlarında korona olayı sonucu meydana gelen kayıpları azaltmak için iletkenlerin yüzeyleri oldukça düzgün ve parlak bir sırla kaplanır. Korona özellikle çok yüksek gerilimlerde daha önem kazanır. Bu gerilim düzeylerinde korona etkisini azaltmak için demet iletkenler kullanılır.

Sehim: Yüksek gerilim enerji nakil hatlarında, iki direk arasında gerili bulunan iletkenin, kendi ağırlığı, üzerinde biriken kar veya buz yükleri sebebiyle sarkmasına *sehim* denir. Şekil 4.5' de gösterilen havai iletim hattında, iletken uçlarının bağlı olduğu iki izolatör arasındaki varsayılan doğru çizgi ile iletkenin en çok sarktığı yer arasındaki uzaklık «sehim» olarak alınır.



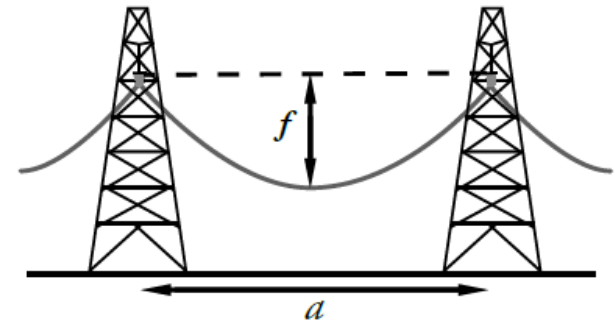
Şekil 4.5: Havai hatlarda sehim.

Havai hat iletkenleri, durdurucu direkler arasına, iletkenin çekme ve gerilme kuvveti, ağırlığı, rüzgâr yükü, buz yükü, iklim şartları ve direkler arası uzaklık dikkate alınarak çekilir. Sehim, havai hat direklerinin geçeceği yerin arazi şekli ve iklim koşullarına göre ayrılmış, bölgelerin durumlarına göre hazırlanmış olan cetvellerden veya formüllerden yararlanılarak bulunur.

Sehim,

$$f = \frac{Ga^2}{8T}$$

eşitliğinden hesaplanır. Burada; G iletkenin kg/dm^3 cinsinden yoğunluğunu, a iki direk arasındaki m cinsinden uzaklığı ve T ise kg/cm^2 cinsinden gerilmeyi göstermektedir. İletkenin iki tarafında bulunan direkler aynı yükseklikte ise iletkendeki en büyük sehim, direkler arası uzaklığın tam ortasındadır. Farklı yükseklikteki direkler arasına gerili iletkenin en büyük sehimini ise daha düşük seviyede bulunan direğe yakındır.



Şekil 4.5: Havai hatlarda sehim.]

Yüksek Gerilim Hatlarında Enerji Kaybına Göre İletken Kesit Hesabı ve İletken Seçimi

Yüksek gerilim hatlarında enerji kaybına göre iletkenin kesiti aşağıdaki bağıntı ile kolaylıkla hesaplanabilir.

$$S = \frac{LP}{KeV^2 \cos^2 \phi}$$

Burada, S iletkenin kesitini (mm^2), L hattın uzunluğunu (m), P iletilecek gücü (W), K enerji nakil hattında kullanılacak malzemenin iletkenliğini ($\text{m}/\Omega \cdot \text{mm}^2$), e enerji kaybı yüzdesini, V fazlar arası gerilimi (V), $\cos\phi$ ise güç faktörünü göstermektedir.

KAYNAKLAR

[1] Doç. Dr. Süleyman Demir (ed.), *Elektrik Enerjisi İletimi ve Dağıtımı* (Eskiřehir: Anadolu Üniversitesi, Açıköğretim Fakültesi,2013)