

Alüminyum kablo mu yoksa Bakır kablo mu?

Türk Prysmian Kablo ve Sistemleri A.Ş.

Can SAĞKOL

**Haktan İş Merkezi No:39 Kat:2 Setüstü-
Kabataş-İstanbul**

Tel: + 90 212 393 7755

e-posta: can.sagkol@prysmiangroup.com

Gelişen teknolojinin etkisiyle, yatırımcılar maliyetlerini azaltmak amacıyla mevcut ürünlere denk özelliklerde olan farklı ürün arayışı içerisinde. Kablo sektörü için bu arayış özellikle kablo üretiminde hammadde olarak kullanılan alüminyum ve bakır kıyaslamasında öne çıkmaktadır.

Alüminyum(Al) ve Bakır(Cu) hakkında

Alüminyum gümüşümsü bir renge sahip, yumuşak ve hafif bir metaldir. Yer kürenin yaklaşık %8 oranında alüminyumdan meydana geldiği tahmin edilmektedir. Doğada serbest olarak çok nadir bulunur. Üretim süreci çok karmaşıktır ve yüksek miktarda enerji gerektirir. Elektroliz sonucu %99,5 saflık seviyesinde alüminyum elde edilir. Alüminyumun içerisinde yer alan yabancı maddeler metalin dayanıklılığını azaltacağından, bunun önüne geçmek ve %99,9 oranında saf alüminyum elde etmek için elektrolitik saflaştırma metodu uygulanır.

Özellikler	Birim	Alüminyum (Al)	Bakır (Cu)
Özgül Ağırlık	g/cm ³	2,70	8,96
Ergime sıcaklığı	°C	660.32	1084.62
Isıl iletkenlik	W/(m·K)	237	401
Isı genişleme katsayısı (25°C)	µm/(m·K)	23.1	16.5
Elastisite Modülü	kN/mm ²	70	120
+20 °C'de direnç ısı değişim katsayısı	1/ °C	0,0040	0,0039
+20 °C'de iletkenlik	IACS %	61...62	97...100
+20 °C' de özgül direnç	nΩ·m	26,50	16,78
Çekme Gerilmesi (sert...tavlı)	kg/mm ²	180...80	450...240
Kopma uzaması (sert...tavlı)	%	2...35	1...35

~ Temel Özellikler Tablosu ~

Bakır ise kırmızı bir renge sahip, doğada serbest veya bileşik olarak bulunan bir metaldir. Yapısının yumuşak olması ve kolay işlenebilmesi sebebiyle eski çağlardan bu yana dünyada en çok kullanılan metaller arasındadır. Yer kürede %0,01 oranında olmasına karşın, madencilik firmalarının öncelikle tercih ettiği maden türüdür.

Teknik değerlendirme

Alüminyum ve bakırın teknik özelliklerini kısaca iki ana başlık altında toplayabiliriz.

- Fiziksel özellikler
- Elektriksel performans

Bu iki ana başlığı değerlendirmeye alırken unutmamamız gereken en önemli nokta, bu özelliklerin birbirleri ile etkileşim içerisinde olduğudur. Her iki metali fiziksel olarak kıyasladığımızda, öne çıkan en önemli nokta **ağırlıklarıdır**. Çünkü **alüminyumun özgül ağırlığı, bakırın özgül ağırlığından daha düşüktür**. Bu sebeple, kullanılması planlanan iletkenlerin fiziksel özellikleri ağırlık ve boyut olarak önem kazanır.

$$\gamma_{cu} = 8,96 \text{ g/cm}^3 \quad \gamma_{al} = 2,70 \text{ g/cm}^3$$

~Özgül Ağırlık~

Özgül ağırlığı düşük olan alüminyum bakıra göre yaklaşık olarak **yarı yarıya daha hafiftir**. Ancak iletkenlik özellikleri ele alındığında, **bakırın iletkenliğinin alüminyuma göre çok daha iyi olması** ya da **alüminyumun direncinin bakıra göre daha yüksek olması**, aynı sistem için gerekli olan alüminyum iletkenin **fiziksel yapısının %15-25 oranında daha fazla olması** anlamına gelmektedir.

Kablo kesit hesabında kullanılan gerilim düşümü formülünden faydalanarak, bu iki metalin iletkenlik özellikleri karşılaştırıldığında;

$$R = p \cdot l / S$$

$$p_{AL} = 0,02650 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$p_{CU} = 0,01678 \Omega \text{ mm}^2/\text{m}$$

$$RAL = RCU \quad (R = U/I)$$

$$SAL / SCU = 1,5792 \approx 1,6$$

~Kablo Kesiti Hesabı~

Aynı sistemde kullanılabilen **alüminyum iletkenli kablo kesitinin, bakır iletkenli kablo kesitinin yaklaşık olarak 1,6 katı olması gerekmektedir**. Öte yandan, elektriksel performans olarak direnç yapısı ile birlikte, **dielektrik özellikleri, empedans karakteristiği, kısa devre dayanımı** gibi özelliklere bakıldığında, fiziksel performans olarak ise, **sıcaklık artışına olan tepkisi, yangın dayanıklılığı ve mekanik dayanımı** gibi konuların ele alınması gerekmektedir.

Kısa devre anında, bakır iletkenler alüminyum iletkenlere göre mekanik mukavemetini daha iyi korurlar. Alüminyum kullanılması, rijit iletkenlerde çekme ve bükülmelere, esnek iletkenlerde ise bükme, gevşeme veya sıkıştırma gibi olaylara sebebiyet verebilir.

Malzeme	Yorulma mukavemeti (N / mm ²)	Döngü sayısı x 106
Al	tavlanmış	20
	yarı sert	45
Cu	tavlanmış	62
	yarı sert	115

~ Mekaniksel Yorulma Testi Tablosu ~

Alüminyum iletkenler titreşim, çatlama ve kırılmalara bakır iletkenler kadar dayanıklı değildir. Mekaniksel yorulma, tekrarlanan yüklemeye ve boşaltma streslerine maruz kalındığında ortaya çıkar ve mikroskobik çatlaklara sebep olabilir. Bu çatlaklar, zamanla kritik boyuta ulaşabilir ve büyük kopmalara yol açabilirler.

Termal iletkenliklerini incelediğimizde ise, **akım altında oluşan ısı, bakır iletken tarafından çok daha hızlı dağıtılır.** Bu durum, örneğin herhangi bir motorun aşırı akım çekmesi sırasında oluşan ısının transferinde önemli bir özelliktir. İletkenin **daha küçük çaplı olarak seçilmesi**, ısının yüzeye **daha kısa bir yoldan hızlı olarak** aktarılmasını sağlar.

$$\text{Ergime sıcaklığı (Cu)} = 1084,62 \text{ } ^\circ\text{C} / 1357,77 \text{ } ^\circ\text{K}$$

$$\text{Ergime sıcaklığı (Al)} = 660,32 \text{ } ^\circ\text{C} / 933,47 \text{ } ^\circ\text{K}$$

~Ergime Sıcaklığı~

Bakır elementi, **yüksek ergime sıcaklığı** sayesinde termo-aktif süreçlerde meydana gelen mekaniksel kuvvetlere (genleşme, büzüşme vb.) **mekanik özelliklerini kaybetmeden dayanabilir.**

İletken malzemelerin seçiminde önemli etkenlerden birisi de bağlantı ve eklerdir. Elektriksel bağlantıları etkileyen dört ana mekanizma vardır. Bunlar:

- Oksitlenme
- Galvanik etki
- Soğuk akış / Sünme
- Termal genleşme

Oksitlenme: Bağlantı noktasında metal-metal temasının azalmasına veya temas direncinin artmasına sebep olan oksit, sülfid veya inorganik filmlerden meydana gelir. **Bu etki temas yüzeyinin ısınmasına ve bağlantı noktasındaki sıcaklığın artmasına neden olarak arızalanmaya sebep olabilir.** Alüminyumun aksine, bakır bağlantılar nadiren aşırı ısınır ve yüzey hazırlığı ya da oksit önleyici bileşiklerin kullanılması gerekmez.

Galvanik etki: Alüminyum ve bakır birbirleri ile temasa geçtiklerinde alüminyum, **elektrolitik etki** ile yapısal özelliğini fiziksel olarak kaybedebilir. Temas yüzeyinin azalması veya korozyon gibi sebeplerle, bağlantı noktası hem mekaniksel hem de elektriksel olarak bozulur. Bu nedenle, kontak contaları, bimetal sonlandırma

veya özel teçhizat kullanımı gibi ekipman ve aksesuarlar ile birlikte kullanılan **alüminyum iletken bir dizi ekleme tekniğine ihtiyaç duymaktadır.**

Soğuk akış / Sünme: İyi bir bağlantı yapısı oluşturabilmek ve iletkenlerin yüksek temas sağlaması için basınç uygulanır. Bu işlem, metalin **"akmasına"** yani deforme olmasına neden olabilir. Bu etki daha çok alüminyum iletkenlerde görülür iken, daha sert bir yapıya sahip bakır iletken için etkisi önemli olmayacak kadar **azdır.** İletken stres altında iken, stresin seviyesi, süresi ve sıcaklığına bağlı olarak oluşan plastik deformasyonuna **"sünme"** denir. Hem soğuk akış hem de sünme, temas basıncında azalmaya, artan ek direncine ve dolayısıyla aşırı ısınmaya yol açar. **Alüminyum, bakırdan daha fazla, daha hızlı ve daha düşük sıcaklıklarda sünür.**

Termal genleşme: Yük altında ısınmakta olan bakır-bakır, pirinç-bakır veya kablo pabucu ile yapılan bağlantı noktalarında gevşeme gözlenmezken, alüminyum iletkenlerde termal genleşmedeki **yüksek farklar zaman içerisinde gevşemeye sebep olabilir.** Temas direncinin artması, aşırı ısınmayı ve ark potansiyelinin artmasını, dolayısıyla yangın riskini artırır. **Bakır ile yapılan ek bağlantıları, alüminyum ek bağlantılara göre daha güçlü, korozyona daha fazla dayanıklı, soğuk akışa ve termal etkilere daha az duyarlı oldukları için daha güvenilir ve uzun ömürlüdür.**

Montaj Yapısı ve Maliyet

Kablolar ister alüminyum ister bakır olsun, montaj sırasında dönüş noktalarında art arda bükülmelere veya çekme kuvvetlerine maruz kalırlar. Bu bükülmeler, iletkenin fiziksel olarak zorlanmasına sebep olmaktadır. Bununla başa çıkmak için, iletkenin esnek bir yapıya sahip olması gereklidir. Uluslararası **TS EN 60228** üretim standartına göre hazırlanmış olan kablolar dört sınıfa ayrılır.

- Sınıf 1: Katı iletkenler
- Sınıf 2. Örgülü iletkenler
- Sınıf 5: Bükülgen iletkenler
- Sınıf 6: Bükülgenliği Sınıf 5'den daha fazla iletkenler.

1. ve 2. sınıf iletken üretimi için hem alüminyum hem de bakır malzemenin kullanılmasına izin verilir iken, 5. ve 6. sınıf iletken üretimi için **sadece bakır kullanılmasına izin verilir.** Bunun sebebi ise, bakırın esnek yapıya uygun olmasıdır. Aynı standart, alüminyum iletkenlerde yeterli mukavemetin sağlanması amacıyla minimum boyut olarak, **10 mm² ve üzerindeki** kesitlerde üretilmesine izin vermektedir.

TS EN 60228 ve TS EN 50565-1 standartlarında izin verilen bükme yarıçapları, kablo çapının **2 katı** ile **15 katı** arasında değişkenlik gösterebilir. Ancak aynı akım taşıma kapasitesindeki kablolar için, alüminyum kablo daha büyük kesitli olacağından, **daha geniş bir bükme açısı** ile döşenmesi kaçınılmaz olacaktır. Enerji tasarrufu ve CO₂ emisyonu yönünden ele aldığımızda, **elektrik ve ısıyı en iyi ileten metaller arasında, bakır öne çıkmaktadır**. Bakırın öz direncinin düşük olması, kullanıldığı cihaz ve ünitelerde **enerji performansının iyileştirilmesinde** önemli ölçüde rol oynarken, enerji tasarrufu sağlayarak üretilen **CO₂ gazı emisyonunun azalmasına** da katkıda bulunur. Kurulum, işletme ve bakım maliyetleri değerlendirildiğinde, alüminyumun yatırım maliyeti her ne kadar bakıra göre daha uygun olsa da bu metallerin bakım masrafları, kurulum ekipmanları, imalat masrafları ve kurulum işçiliği gibi konular toplam maliyete dahil edildiğinde, alüminyumun sağlamış olduğu maliyet avantajı ortadan kalkmış gibi olmaktadır.

Alüminyum ve Bakır kablo karşılaştırma örneği

OG ALÜMİNYUM - BAKIR KABLO TEKNİK KARŞILAŞTIRMA			
İletken		Bakır	Alüminyum
İletken Kesidi	mm ²	240	400
Kablo Tipi		2XSX 1X240/25	A2XSX 1X400/35
Gerilim	Uo/U	18/30	18/30
Kablo Katmanları		CU/XLPE/CWS/PVC	ALU/XLPE/CWS/PVC
Geometrik Parametreler			
İletken çapı (yaklaşık)	mm	18.1	23
Kablo çapı (yaklaşık)	mm	42	49
Kablo ağırlığı (yaklaşık)	kg/km	3403	2688
Minimum bükme yarıçapı	mm	630	735
Maksimum izin verilen çekme kuvveti (iletkenin çekme başlığı)	N	12000	12000
Sevk makarası boyut (Sevk 1000m)	m	2.2	2.6
Elektriksel Parametreler			
DC direnci 20°	ohm/km	0.0754	0.0778
AC direnci 90°	ohm/km	0.0977	0.1014
Kapasite	mF/km	0.236	0.285
Reaktansı	ohm/km	0.111	0.105
Kayıplar			
İletken (her faz için)	W/m	24.19	25.19
Ekran	W/m	0.909	1.27
Toplam (3 faz için)	W/m	75.3	79.38
İletken maksimum kısa devre akımları	kA/1sn	34.3	37.6
Akım Taşıma Kapasitesi *	A	497	498
İletilen Güç	MVA	25.8	25.9

*Toprak öz direnci 1.2km/W, Toprak Sıcaklığı 20C, Topraklama her iki uçtan Solid olarak, Direk olarak toprağa gömülü, Döşeme derinliği 1m ve yükleme faktörü 1 dir.

İlgili karşılaştırma tablosu örneğinde, aynı akım taşıma kapasitesine sahip olan alüminyum ve bakır kablonun, yazımızda da bahsettiğimiz teknik değerlerinin birbirleri ile karşılaştırılması görülmektedir. Bu tabloya göre alüminyum iletken kullanılması durumunda;

Kablo toplam çapı **%17 artmakta**,
İletken çapı **%27 artmakta**,
Bükme yarıçapı **%17 artmakta**,
Sevk makara boyutu **%8 artmakta**,
İletkenlik direnci **%3,8 artmakta**,
İletken kayıpları **%4,1 artmakta**,
Ekran kayıpları **%40 artmaktadır**.

Bu sebeple, alüminyum kablonun bakır kabloyla kıyaslaması yapılırken sadece satın alma maliyeti değil, teknik şartların işletmenin yapısına uygunluğu ve işletme maliyetlerine olan ya da olabilecek etkisinin de göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Referanslar:

- <https://electric-in-home.com/tr/you-can-conduct-a-copper-wire-advantages-and-disadvantages-of-aluminum-wiring/>
- <http://www.nkfu.com/aluminyumun-eldesi/>
- <https://malzemebilimi.net/aluminyum-nasil-uretilir.html>
- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Bakir>
- <https://tr.wikipedia.org/wiki/Aluminyum>
- <https://help.leonardo-energy.org/hc/en-us>
- Poloujadoff M, Mipo JC, Nurdin M (1995) Some economical comparisons between aluminum and copper squirrel cages. IEEE Trans Energy Convers. 10 No. 3: 415-418
- <https://www.copper.org/>
- <http://www.aluminum.org/>
- Aluminum - The other Conductor (Eaton - 2006) - ref IA08703001E/Z4488
- <https://www.makaleler.com/bakir-nedir-nerelerde-kullanilir>
- James P. Moran (1975) Selection and Installation of Insulated Aluminum Cable. IEEE Transactions on Industry Applications Volume: IA-11, Issue: 5