

BAKIR LAMALARDA BAĞLANTI YÜZEYLERİNİN ELEKTRİKSEL TEMAS DİRENCİ ÜZERİNDEKİ OLUMSUZ ETKİLERİ VE BUNLARIN AZALTILMASINA YÖNELİK ÇÖZÜM YOLLARININ ARAŞTIRILMASI

Selçuk Harput, A.Gamze Onuk
Sarkuysan Elektrolitik Bakır Sanayii ve Ticaret A.Ş., Çayırova/Gebze
E-mail: [rede@sarkuysan.com](mailto:redede@sarkuysan.com)

ÖZET

Bilindiği gibi enerji üretimi, doğal kaynakların zorlanması ve çevreye zarar verilmesi pahasına geliştirilmiş olan yöntemlerle gerçekleştirilmektedir. Üretilen enerjinin verimli kullanılması ve kayıpların azaltılması, çevreye duyarlı teknolojilerin geliştirilmesi ve daha verimli enerji üretimi kadar önemlidir. Enerji kayıplarına yol açan etkenlerin içindeki önemli parametrelerden biri de, iletkenlerin temas noktalarındaki elektriksel direnç değerleridir. Örneğin endüstriyel sistemlerde kullanılan bakır lamalar genellikle kısa boylarda kesilerek ve birbirine cıvatalarla bağlanarak enerji iletimi sağlamaktadır. Bu uygulama, bağlantı noktalarındaki temas direnci kaynaklı kayıpları beraberinde getirmektedir. Bu nedenle temas yüzeylerinin pürüzlülüğü, yüzeysel boşluklar ve bunların konumu, malzemenin korozyon dayanımı ve oksidasyon eğilimi, temas yüzeylerinin birbiri üzerinde oluşturdukları basıncın elektriksel özelliklere etkisi önemlidir.

Söz konusu çalışmamızda, bakır lamaların temas yüzeyleri arasındaki elektriksel direnci etkileyen faktörler araştırılmıştır. Bakır lamaların kalay kaplama işlemi sonrasında gösterdikleri yüzey davranışları incelenmiş ve buna bağlı olarak temas dirençlerindeki değişimleri, kaplamanın korozyon üzerine ve ara yüzey oksidasyonu ve temas yüzeyi üzerine etkileri saptanmaya çalışılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Bakır Lama, Enerji Kaybı, Korozyon, Pürüzlülük, Temas Direnci.

NEGATIVE EFFECTS OF THE SURFACE OF COPPER BUS BARS ON CONTACT PERFORMANCE AND SOLUTION INVESTIGATIONS

ABSTRACT

Most of the energy production processes require the use of natural resources have harmful effects on environment. Efficiency in usage is as important as the production of energy. Among the factors leading to energy losses, one of the most important factors is the electrical resistance at conductor connections. For example, copper bus bars for power transmission are generally used in short lengths with screwed connections in industrial applications. This practice brings about important energy losses at the contact surfaces of those connections. Therefore, surface quality, corrosion resistance, interface oxidation and applied pressure of contact surfaces are very important features to be taken into account in the design and selection of conductors.

In this paper, the factors affecting the electrical resistance of contact surfaces of copper bus bars before and after tin coating are investigated. The effect of tin coating on corrosion and geometry of contact area of the bus bar interfaces have been stated.

Key Words: Copper Bus Bars, Corrosion, Contact Resistance, Power Losses, Roughness.

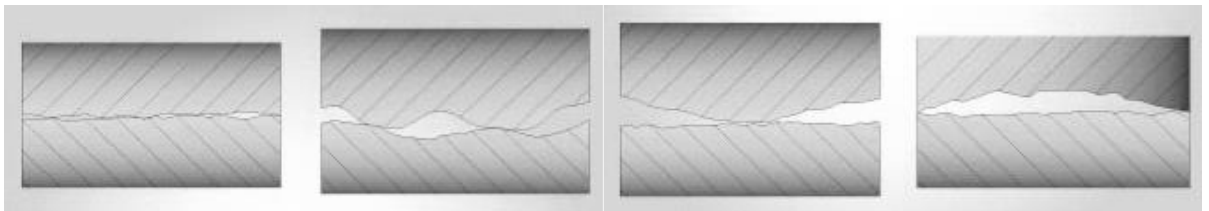
1. GİRİŞ

Enerji tasarrufu, üretim ve kaliteyi düşürmeden elektrik enerjisi sistemlerinde gerilim, frekans gibi elektriksel büyüklüklerin belli sınırlar dahilinde değiştirilmeden güvenilir yöntemlerle sağlanması açısından önem taşımaktadır. Günümüzde enerji politikasını belirleyici unsurlardan biri de enerji tüketiminin ekonomikliğinin yanı sıra hem çevre dostu üretime yönelik olması hem de enerji kayıplarına sebebiyet vermeyecek şekilde olmasını esas almaktadır. Bu politika kapsamında en az maliyetli enerjinin verimli kullanım ve üretimde kayıp olmaksızın tasarruf edilen enerji olduğu da günümüzde göz ardı edilemeyen bir gerçektir. 2004 yılına ait Türkiye elektrik enerjisi üretim ve tüketim değerlerine baktığımızda % 2,4' ü iletim kaynaklı ve % 13,6' sı ise dağıtım kaynaklı olmak üzere toplam olarak üretilen enerjinin %16' sı şebeke kaybı ile yok olmaktadır [1].

Bilindiği üzere, özellikle yüksek akıma maruz kalınan transformatörlerde, elektrik panolarında, yüksek akım iletiminde, baz ve şalt istasyonlarında, malzeme özelliklerinin sağladığı avantajlarından dolayı elektrolitik bakır lamalar kullanılmaktadır. Bu sebepten dolayı elektrik iletkenlerinde iyi bir bağlantı sağlamak ve temas kayıplarını azaltmak önem taşımaktadır. Özellikle iletken bağlantı noktalarındaki zayıf bölgelerde sistemlerin maruz kaldıkları elektriksel dirençler artmaktadır. Bu durum enerji kayıplarına sebep olan sonuçları da beraberinde getirir. Son yıllarda, günümüze kadar yapılan birçok araştırma ve çalışmaya ait yayınlar incelendiğinde verimi etkileyen ve enerji kayıplarına sebep olan bu bağlantı noktalarının çeşitli modeller ve teorik açıklamalarla ispatlandığı ve iletken temas yüzeylerinin iyileştirilmesi ile ilgili çalışmaların da yer aldığı görülmektedir [2,3,4].

1.1. Bakır Lama Ara Yüzeylerin Tanımlanması

Mikroskobik düzeyde incelenen yüzeylerde girinti çıkıntı halinde yer alan pürüzler ve düz bölgelerin yer aldığı saptanmıştır. İki temas yüzeyine uygulanan belirli bir kuvvetle örtüşmesi sağlanan yüzeylere bakıldığında girinti çıkıntılar ve düzlemlerin üst üste gelerek temas noktalarını oluşturduğu görülmektedir. Ara yüzey örtüşmesinde ve temas noktalarının oluşmasında sisteme uygulanan kuvvet de önemlidir. Fazla basınçla uygulanan kuvvet karşısında temas noktaları artış gösterse de bu durum çıkıntıların kırılmasına sebep olmaktadır. Bu yüzden iletken yüzeyleri spesifik bir kuvvet ile temas noktasında düşük temas direnci sağlanarak, temas noktalarını arttıracak şekilde uygulanması gerektiği de yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlar arasındadır. Şekil 1' de ara yüzey geometrileri tanımlanmıştır [5].



Normal Ara Yüzey

Dalgalı Ara Yüzey

Konveks Ara Yüzey

Konkav Ara Yüzey

Şekil 1. Ara yüzey geometrileri

Teoride birçok incelemede temas halindeki ara yüzeylerde oluşan temas noktalarında iletim üç temel farklı parça üzerinden olmaktadır. Bunlardan birincisi düzlemsel metalik temas olup akımın geçtiği ana temas noktasıdır. İkincisi, pürüzlü metalik temas noktaları olup bu kısımlar yüzeylerin örtüşmesiyle meydana gelen pürüz kontaklarıdır. Üçüncüsü ise oksit, sülfat gibi ince filmler üzerindedir [6].

1.2. Bakır Lamalarda İletkenliği ve Bağlantı Performansını Etkileyen Fiziksel Özellikler

Elektrik iletkenlerinde iyi bir bağlantı sağlamak için iletkenlik kabiliyetini etkileyen birçok faktör vardır. Bunlardan en önemlisi yüzey şartları ve oluşabilecek ara yüzey gerilimlerinin sistem tarafından karşılanmasıdır. Bu faktörler arasında yüzey şartlarından kaynaklanan kirlilik ve korozyon temas noktalarında kötü elektrik iletkenliğine ve malzemede ısıl yorulma ile bağlantıların gevşemesine ve iletkenlik özelliğinin daha da azalmasına neden olmaktadır. Dış yüzey şartları olduğu kadar temas yüzey şartlarında da yüzey kirliliği, uzun süreli korozyon, ısıl yorulma ve mekanik gerilmelerin artışı iletkenliğin düşüşünü beraberinde getirmektedir [5]. Oksidasyon ve galvanik korozyonun da iletkenlerdeki verimliliği olumsuz etkilediği bilinmektedir. Özellikle bakır iletkenlerde yüzeyde oluşan bakır oksit düşük temas basınçlarında bile kırılabilir özelliktedir. İyi bir teması sağlamak ise temiz, düzgün ve parlatılmadan, yüzey oksidinin yüzeyden uzaklaşmasına rağmen tekrar yüzeyin oksitlenmesine sebebiyet vermeyecek şekilde olması da gerekmektedir. Bunun yanı sıra sistemlerdeki metal bağlantılarının galvanik korozyonla galvanik pil oluşumunu tetiklemeyecek şekilde olması göz önünde bulundurulmalıdır.

1.3. Bakır Lama Bağlantılarını Geliştirme Yöntemleri

İletkenlerde zayıf bağlantı noktalarının geliştirilmesi ve bilhassa başta korozyondan korunma olmak üzere ara yüzey temas direncini de iyileştirmek için kaplama yöntemleri, ara yüzey tabakası olarak ısıl gres yağları, ısıl geçirgen bileşikler ve yapıştırıcı malzemeler kullanılarak da bağlantı noktaları geliştirilmektedir [7]. Bağlantıların geliştirilmesinde, kalay, kalay-kurşun alaşımları, gümüş ve bazı özel durumlarda altın, kaplama metali olarak kullanılmaktadır. Özellikle kalay kaplamalar en yaygın kullanılan kaplama türüdür. Bunun temel sebebi ise, bazı koşullarda her ne kadar korozyona uğrasalar da diğer kaplama metallerine kıyasla korozyona oldukça dayanıklılık gösterirler. Uygulamalarda yumuşak ve kolay aşınabilir olmakla birlikte normal iç mekan koşullarında ise yine birçok metalden daha iyi koruma sağlamakta ve maliyet olarak da diğerlerine göre daha elverişli ve üstünlüğe sahip bir kaplama malzemesidir. Bakır üzerine yapılan kalay kaplama uygulamalarında, yüzeydeki kalay kararlı bir davranış gösterir ve kaplama yüzeyi altındaki bakır tabakasını korozyona karşı dirençli bir şekilde korur. Büyük birleşme alanlarında kalay kaplı bakır temas direnci ile birleşme verimliliğini de beraberinde getirdiği bugüne kadar bu konuda yapılan çalışmalar arasındadır. Tablo 1’ de bakır çubuk malzemesinde eşit kesitlerde yapılan denemeler ile kaplamaların gösterdikleri temas direnci değerleri yer almaktadır [5]. Elde edilen temas dirençlerinde nikel kıyasla temas direnci daha düşük olmakla birlikte, gümüşle kıyaslandığında daha yüksek temas direncine sahip olduğu görülmektedir. Ancak gümüşün kalaya oranla daha az ekonomik olması da kullanım yaygınlığını arttırmada etkili bir parametre olarak burada karşımıza çıkmaktadır.

Tablo1: Temas Direnci Karşılaştırması

Malzeme	Direnç (mΩ/mm ²)
Bakır Çubuk	20
Nikel Kaplı Bakır	35
Kalay Kaplı Bakır	6,8
Gümüş Kaplı Bakır	0,3

Kaplama ile elde edilen iletken sistemlerde çalışma sıcaklık aralığı değerleri de kaplamayla artış göstermektedir. Cıvata ile bağlanmış bakır çubuklara ait izin verilen çalışma sıcaklığı atmosfere açık ortamda 90°C olduğu yapılan çalışmalarla saptanırken kalay kaplı bakır çubuklar için bu değerlerin 105°C’ ye kadar çıktığı görülmüştür [5].

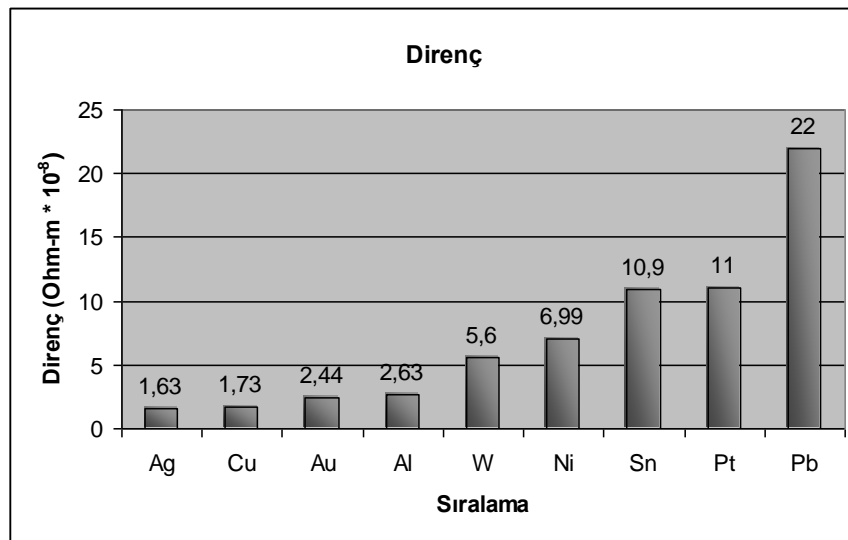
Elektrik uygulamalarda kaplamaya bağılı olarak elde edilen birçok standart yer almaktadır. Kalay kaplamanın üstünlüğünün de belirtildiği uluslararası standartlar yer almaktadır. Bu standartlarda kalay kaplı bakır temas dirençlerinin diğer temas çeşitlerine kıyasla daha düşük değerler aldığı ve kalay tabakasının yeterli kalınlıkta olması ile öz direnci koruyacak özellikte olduğu vurgulanmaktadır [8, 9].

Bakır lamalar için kalayın yanında yaygın olarak kullanılan nikel ve gümüşün fiziksel değerlerinin bakır ile karşılaştırılması Tablo 3' de yer almaktadır [10].

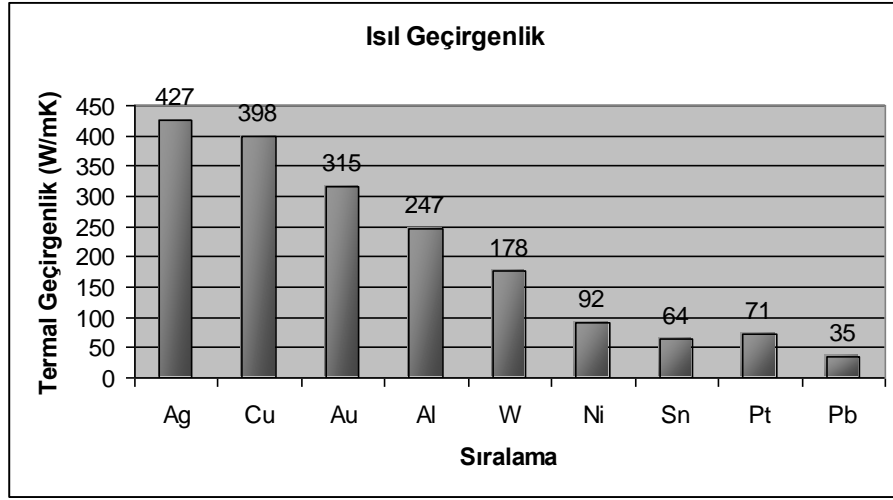
Tablo 3. Bakır lamalarda kullanılan bakır ve kaplama malzemeleri özellikleri

Özellik	Bakır	Nikel	Gümüş
ρ (elektriksel direnç), $\mu\Omega\text{cm}$	1,72	6,84	1,59
λ (ısı iletkenlik), $\text{W/m}^\circ\text{K}$	380	70	418
H (Mikrosertlik), MPa	500	8000	700
E (Elastisite Modülü), GPa	115	207	71
σ_t (Gerilim), MPa	250	317	125
α_t (Sıcaklık katsayısı), $10^{-3}/^\circ\text{C}$	3,97	6,90	4,01
α_e (Isıl genleşme katsayısı), $10^{-3}/^\circ\text{C}$	16,8	13,3	19,6
T_m , $^\circ\text{C}$	1084	1455	1482
T_s (ergime sıcaklığı), $^\circ\text{C}$	190	520	180
T_b (kaynama sıcaklığı), $^\circ\text{C}$	2582	2837	2193
t (kaplama kalınlığı), μm		3-5	3-5

Kaplama malzemelerinin direnç ve ısı geçirgenlik değerlerinin karşılaştırması Şekil 2 ve Şekil 3' de yer almaktadır [11,12]. Şekildeki metaller arasında kurşunun en yüksek direnç değerine, gümüşün de en düşük direnç değerine sahip olduğu, sıralamadan da görülmektedir. Kalayın direnç değeri, gümüş, altın, ve nikelde daha yüksek olmasına karşın, yumuşak metal olması nedeniyle temas noktasındaki boşlukları tamamen doldurma yeteneğine sahip olduğu için 105°C sıcaklığın altındaki çalışma ortamlarında rakipsiz duruma gelmektedir. Sertlik açısından alternatif gibi görülebilecek olan kurşunun elektrik iletkenliğinin çok düşük olması da kalaya önemli bir avantaj sağlamaktadır. Şekil 3'te görüldüğü gibi, metallerin ısı iletkenlik değerleri de, elektrik iletkenliği ile paralel değişim göstermektedir.



Şekil 2. Kaplama Malzemelerinin Direnç Değerlerinin Karşılaştırılması



Şekil 3. Kaplama Malzemesi Isıl Geçirgenlik Değerlerinin Karşılaştırılması

Temas yüzeylerindeki metalik olmayan film tabakasının elektrik direnci üzerine etkileri vardır. Temas uygulamalarında başarısızlıklara sebep olur. Atmosferdeki nem temas yüzeyini etkiler. Bakır lamalarda farklı metallerle kaplama ticari olarak en çok tercih edilen uygulamalardandır. Bağlantıların kararlılığını geliştirerek korozyondan korunmayı sağlar. Gümüş ve nikel kaplamalar da kalay kaplamalar gibi bakır-bakır bağlantılarda kullanılan kaplama çeşitlerindedir. Temelde temas direncini etkilemekle birlikte bağlantı noktalarında kararlı davranışı sağlasalar da kullanım elverişliliği açısından ve korozyon direnci açısından en yaygın kalay kaplama tercihi olarak kullanılmaktadır. Elektrik temaslarda ve bağlantıların ömürlerinin arttırılmasında kaplama malzemesi etkindir. Nem ve oksidasyon filminin elektriksel direncinin etkisi bakır bağlantılarda performans üzerine etkin rol oynar. Kaplanmamış ve kaplanmış bağlantılar için hesaplanan güç miktarlarında değerler olarak kaplanan bağlantıların üstün olduğu da görülmektedir. Temas sıcaklığı, voltaj düşüşü ve temas direnci de yine bağlantı verimini etkilemektedir.

Temas problemlerinde dikkat edilecek diğer bir konu da yüzey kirliliğidir. Özellikle de temas metalleri oksidasyon ve tekrar oksidasyon ile korozyon yorulması, yaşlanma, temas bölgesinde ısınmaya neden olur. Birçok çalışma koşullarına ve uygulamalara dayanan çalışmalarda farklı metallerle bakır lamaların kaplanması ticari olarak uygulanmaktadır. Temas direnci temas yüzeyindeki kaplama tabakası ile azaltılabilir ve yeterli kalınlıkta düşük direnç sağlanabilir. Oksitler, sülfatlar ve diğer yüzey kirlilikleri ana metalden daha yüksek dirence sahiptir. Tüm metallerin havayla temas halinde yüzeyde oluşturdukları oksit tabakasının kararlılığı da önemlidir. Kaplanmamış bakır bağlantılarının kalay, nikel, gümüş, kadmiyum ile kaplanması sonrasında elde edilen bakır bağlantılarına kıyasla mükemmel bir kararlılık, düşük temas direnci ve daha iyi temas karakteristiklerini de getirdiği gözlenmiştir. Nikel ve gümüş gibi kaplamalarda yüksek çalışma sıcaklıklarına uygun (400 °C civarı) olsalar da kalaya göre daha yüksek maliyetli olmaları sebebiyle kalay kaplamalarında yüksek sıcaklıklara uygunluğundan dolayı kalay kaplamalar yaygın olarak kullanılmaktadır [13,14,15].

Kalay fiziksel olarak yumuşak bir metaldir. Kalay kaplanan bakır lamaların yüzeylerinin bir araya getirilmesi sonrasında Şekil 1' de ifade edilen temas yüzey boşlukları kalay tarafından doldurularak temas yüzeyleri arasında tam örtüşme sağlanmaktadır. Bu sayede temas direnci değerinde büyük ölçüde düşüş sağlanmaktadır.

Elektrik bağlantı ömürlerini etkileyen bazı faktörler arasında bağlantı sıkıştırma kuvveti, bağlantı uzunluğu, akım, temastaki çalışma sıcaklığı ve yüzeylerdeki toz oluşumunun elektrik bağlantı ömrüne olumsuz etkisi vardır. Bağlantı ömürleri temas direncine bağlıdır ve kaplama malzemeleri bağlantılardaki temas direncini büyük ölçüde etkilemektedir. Elektrik bağlantı ömürlerinin lamalardaki kaplama ile artışı ve etkileri (kalay, nikel ve gümüş kaplama) yapılan çalışmalarda görülmüştür. Çünkü temas direnci bu lamalarda çıplak bakır lamalara oranla daha düşüktür. Toz parçacıklarının temas ara yüzeyine girmesi durumunda iki yönlü olumsuz etki görülür. Bunlardan birincisi, iletken olmadıkları için direnç yaratmaları, ikincisi de, özellikle aktif tozlardan oluşuyorsa metalle reaksiyona girerek korozyona neden olmalarıdır. Atmosferdeki aktif tozların yüzeyde meydana getirdiği sülfat ve oksit filmlerinin metal yüzeyinde büyümesi ile temas direnci önemli ölçüde kayba uğrar. Ayrıca korozyonun devam etmesi de bağlantı ömrünü azaltır. Kalay, nikel veya altın gibi aktif tozlara dirençli metallere yapılan kaplama, tozların olumsuz etkisini de önemli ölçüde ortadan kaldırır [16,17,18].

Temas noktalarının davranışı sıcaklığa büyük ölçüde duyarlıdır. Yaşlanma hızı ara yüzeydeki gerilim kaybı ile orantılı olarak artar. Kalay, fiyat ve amaca uygunluk kriterleri ile değerlendirildiğinde özellikle aşırı yüksek sıcaklığa maruz kalınmayan ortamlar için iyi bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun yanı sıra gümüş de mükemmel bir iletkenidir. Ancak pahalı bir kaplama malzemesi olması sebebiyle ancak spesifik durumlarda tercih edilir. Kalay kaplama, kaplanmamış bakır bağlantılara göre daha performanslıdır ve kararlıdır. Bağlantıların kaplanması ise enerji maliyeti açısından da birçok getirileri sağlamaktadır [10]. Günümüze kadar yapılmış olan birçok çalışmaları destekleyici özellikte ara yüzey özellikleri açısından boşluk oluşturan yüzeyler Sarkuysan A.Ş tarafından da üretimi yapılan bakır lamalarda ve kalay kaplı bakır lamalarda gözlenmiştir. 10 cm genişliğinde ve 1,7 cm kalınlığındaki eşit boyutsal özellikteki lamaların 15 Nm aynı kuvvetle sıkıştırılması ile elde edilen yüzeylerdeki örtüşme farkı da literatürü desteklemektedir.

2. GENEL SONUÇLAR

Son yıllarda yüzeylerin geliştirilmesinde ve elektriksel bağlantılarda performansın artırılması için birçok araştırma yapılmaktadır. Özellikle de kaplama ile elde edilecek yüzey avantajları göz önüne bulduğunda atmosfere açık denize yakın nemli bölgelerde ve korozyon oluşturabilecek tuzların bulunduğu ortamlarda bağlantı bölgeleri ve özellikle de bakır yüzeyler büyük ölçüde olumsuz etkilenmektedir. Enerji kayıpları ve küresel ısınmanın da etkin olduğu bu kayıplar açısından elektrik iletkenlerinde yüzey gelişimleri önem taşımaktadır. Birçok metalin de kaplama malzemesi olarak karşılaştırılmalı şekilde incelendiği çalışmada kalay metalinin bakır lamalar üzerinde sağladığı avantajların üstünlüğü vurgulanmaktadır. Kalay metalinin gerek temas direnci değeri, gerekse de ısıl geçirgenliği açısından ve maliyet göz önünde bulduğunda iyi bir kaplama malzemesi olduğu sonucuna varılmıştır. Kalay metalinin diğer metallere kıyasla daha yumuşak bir metal olması ve örtüşen yüzeylerin ara yüzey bölgelerindeki boşlukları doldurması ile de temas direnci üzerinde olumlu bir etkide bulunmaktadır. Nikel veya gümüşle kıyaslandığında, nikelin daha kırılğan bir metal olmasından dolayı kaplama yüzeylerinin birbiri ile örtüşmesinde kalaya kıyasla daha az bütünlük sağlamaktadır. Nikelin yüksek sıcaklıklardaki korozyon dayancı ise nikel kaplamayı sadece yüksek sıcaklığa maruz ortamlarda rakipsiz kılmaktadır. Gümüşe kıyasla maliyet olarak daha uygun bir metal olan kalayın aynı zamanda yine gümüşe oranla daha az korozyona uğradığı da bilinmektedir. Yine bağlantı noktaları dışında yüzeyel olarak gerek nemli gerekse de korozyonu oluşturabilecek tuzların bulunduğu ortamlarda korozyona direnci de bir başka üstünlük olarak değerlendirilebilir.

3. KAYNAKLAR

1. Türkiye Elektrik Dağıtım ve Tüketim İstatistikleri, 1994-2004.
2. R.W. Caven, J.Jelali, "Predicting The Contact Resistance Distribution of Electrical Contacts by Modeling The Contact Interface", Electrical Contacts, Proceedings of The Thirty-Seventh IEEE Holm Conference, 83-89, Chicago, USA, 1991.
3. A.C. Sun, H.K. Moffat, D.G. Enos, C. S. George, Pore Corrosion Model for Gold-Plated. Copper Contacts, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 30, December 2007.
4. G.S. Zhangt , J.Lins, W.Chent, Fuzhou University, Fuzhou, F'ujian, Osaka University, A Study of Contact Resistance Model for The Busbar Joints Lubricated by Contact Aid Compounds, Osaka, Japan.
5. http://www.orientalcopper.com/knowledge_base.php
6. R.Holm, Electric Contacts, New York, 1-15, 1967.
7. Miksa de Sorgo, Thermal Interface Materials, Electronics Cooling, Vol. 2, 12-15, September 1996.
8. IEC/TR 60943 Ed.2.0 b:1998 , Guidance Concerning The Permissible Temperature Rise for Parts of Electrical Equipment in Particular for Terminals "
9. IEC60694: 2002, "Common Specifications for High-Voltage Switchgear and Controlgear Standards".
10. W. Andrew, Coating Materials for Electronic Applications, United States , America, 2003.
11. http://en.wikipedia.org/wiki/Electrical_resistivity
12. R. Holm, Electric Contact Theory and Application, Fourth Edition, Springer - Verlag, 1979.
13. M. Bramovic, "Evaluation of Different Platings for Aluminum to Copper Connections", IEEE Trans. On Comp. Hyb. and Manuf. Tech., Vol. 15, April 1992.
14. J. Lefebvre, J. Galand, R. M. Marsolais, "Electrical Contacts on Nickel-Plated Aluminum: The state of the Art", IEEE Tran. on Com-Hvb, and Manuf. Tech., 204-215, 1992.
15. M. A. Farahat, M. M. Abdel Aziz, A. A. Alaily, "The Effect of The Electric Contact Performance on The Electric Joint", Third Middle East Power System Conference, Faculty of Engineering Cairo University, January 3-6 1994.
16. S. Benhenda, N. Ben Jemaa, M. Bourir, "Effect of Pulse Plating Parameters on Electrical Contact Behavior of Nickel Coating", IEEE Trans. on Cornu. Pack. and Manuf. Tech., Vol. 17, No. 2, June 1993.
17. J. Zhang and X. Wen, "The Effect of Dust Contamination on Electric Contacts", IEEE Trans. LD, 53-58, March 1986.
18. M. A. Farahat, E. Gockenbach, A. A. El-Alaily, M. M. Abdel Aziz, "Effect of Coating Materials on The Electricalance of Copper Joints" Electrical Contacts, 1996, Proceedings of The Forty-Second IEEE Holm Conference on Joint with The 18th International Conference on Electrical Contacts, 472 – 478, 16-20 Sep. 1996.