

Al-Cu Bimetalik Kompozit Hammaddesinin Elektrik Anahtarlarındaki Isınma Karakteristiğinin İncelenmesi

Hüseyin Tunahan GÖZEL^{1*}, İdris CESUR², Cenk Kaan ŞAHNALI³

¹ Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya.

² Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Sakarya.

³ İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Uçak ve Uzay Mühendisliği Bölümü, İstanbul.

Sorumlu Yazar ¹e-posta: tunahan.gozel@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7793-7921>

²e-posta: icesur@subu.edu.tr ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-7487-5676>

³e-posta: kaansahnali@gmail.com ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7835-9775>

Geliş Tarihi: 08.06.2022

Kabul Tarihi: 30.11.2022

Öz

Çalışmada, mevcut durumda elektrik anahtarlarında kullanılan bakır ve pirinç hammaddelere göre daha uygun maliyetli bir alternatif olacağı düşünülen Al-Cu bimetalik hammaddesinin elektrik anahtarlarında kullanımının IEC standartları açısından uygunluğu araştırılmıştır. IEC 60669-1 elektrik anahtarları standardının en belirleyici testi olan aşırı akım testinde, iletkenlerin artan ısınma miktarları incelenmektedir. Anahtarın iletkenlerinden ürünün beyan akımının (In:10A) 1,35 katı aşırı akım geçirilerek iletkenlerdeki maksimum sıcaklık artış miktarının (ΔT) 45°C altında olması istenmektedir. Araştırmada, üç farklı hammadde (Al-Cu, pirinç ve bakır) ile oluşturulmuş ürün dotaları, standartta belirtilen sınır şartları dahilinde multi-fizik simülasyonlara tabi tutulmuş ve laboratuvar testleri yapılmadan önce sıcaklık artışı ile alakalı teorik sonuçlara ulaşılmıştır. Simülasyona göre en yüksek sıcaklık artışı 20,5°C ile pirinç, en düşük sıcaklık artışı 17,25°C ile bakır numunede gözlemlenmiştir. Al-Cu numunede ise 19,9°C sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Simülasyonlardan sonra yapılan laboratuvar testlerinde simülasyon verilerine yakın sonuçlar alınmıştır. Test sonuçlarına göre en yüksek sıcaklık artışı meydana gelen pirinç numunede 22,63°C, en düşük sıcaklık artışı meydana gelen bakır numunede 19,14°C ve Al-Cu numunede ise 20,72°C sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Sırasıyla pirinç, Al-Cu ve bakır için analiz-deneysel veri sapma miktarları şu şekildedir; %10,37, %4,10 ve %10,95. Bu verilere göre hiçbir numune maksimum 45°C miktarını aşmamıştır ve numunelerin tamamı standart açısından uygundur. Direncin ısınma ile doğru, iletkenlik ile ters orantılı olduğu bilinmektedir. Bu bilgiler ve test sonuçlarından yola çıkılarak hammaddelerin iletkenlik miktarları için bakır>Al-Cu>pirinç sıralaması yapılabilir. Simülasyon ve deneysel doğrulama sonuç verileri incelendiğinde Al-Cu bimetalik hammaddesinin, uluslararası elektrik anahtarları standardındaki aşırı akım testlerini geçerek elektrik anahtarlarında pirinç ve bakır iletkenlere alternatif olarak kullanılabileceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar kelimeler

Elektrik anahtarı;
Alüminyum (Al);
Bakır (Cu); Bi-metal;
iletken; Elektrik
kaynaklı ısınmalar

Investigation of The Heating Characteristic of Al-Cu Bimetalic Composite Raw Material in Electric Switches

Abstract

In the study, the suitability of the use of Al-Cu bimetallic raw material in electrical switches, which is thought to be a more cost-effective alternative to copper and brass raw materials used in electrical switches, in terms of IEC standards has been investigated. In the overcurrent test, which is the most decisive test of the IEC 60669-1 electrical switches standard, the increasing heating amounts of the conductors are examined. 1.35 times the rated current of the product (In:10A) is passed through the conductors of the switch and it is requested that the maximum temperature increase amount (ΔT) in the conductors be below 45°C. In the research, product 3D data created with three different raw materials (Al-Cu, brass and copper) were subjected to multi-physics simulations within the boundary conditions specified in the standard and theoretical results related to temperature increase were reached before laboratory tests were performed. According to the simulation, the highest temperature increase was observed in the brass sample with 20.5°C, and the lowest temperature increase was observed in the copper sample with 17.25°C. A temperature increase of 19.9°C was observed in the Al-

Keywords

Electric switch;
Aluminum (Al);
Copper (Cu); Bi-metal;
Conductive; Electrical
heating

Cu sample. In the laboratory tests performed after the simulations, results close to the simulation data were obtained. According to the test results, 22.63°C temperature increase was observed in the brass sample with the highest temperature increase, 19.14°C in the copper sample with the lowest temperature increase, and 20.72°C in the Al-Cu sample. Analysis-experimental data deviation amounts for brass, Al-Cu and copper, respectively, are as follows; 10.37%, 4.10% and 10.95%. According to these data, no sample exceeded a maximum of 45°C and all samples conformed to the standard. It is known that resistance is directly proportional to heating and inversely proportional to conductivity. Based on this information and test results, the order of copper>Al-Cu>brass can be made for the conductivity of raw materials. When the simulation and experimental verification result data were examined, it was concluded that Al-Cu bimetal raw material could be used as an alternative to brass and copper conductors in electrical switches by passing the overcurrent tests in the international electrical switch standard.

1. Giriş

Atom onlarca alt bileşenden oluşsa da maddenin halen en temel birimi olarak kabul edilmektedir. Elektrik enerjisinin elde edilmesi, taşınması ve kullanılmasını anlamak için atomun yapısına ilişkin temel düzeyde bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Bir atom temelde iki kısım ve üç parçacıktan oluşmaktadır. Atomun merkezinde yer alan parçacıklar proton ve nötron, yörüngelerinde bulunan parçacıklar ise elektronlardır. Atomlar normal koşullarda yüksüzdür ancak dış etkenler nedeniyle elektron alarak anyon (-), elektron vererek katyon (+) durumuna geçebilirler. İşte bu atomlar arası elektron alışverişi elektrik iletimini oluşturmaktadır. Bir atomun elektronlarının bulunduğu en son yörüngesine valans bandı denir, burada bulunan elektronlara ise valans elektron denir. Bir atomun valans elektronları, atomun diğer elektronlarına göre daha fazla enerjiye sahip olup, ayrılma eğilimindedirler. Dışarıdan enerji verilerek uyarılan valans elektronlar atomdan koparak başka bir atomun yörüngesine geçebilirler (MEB 2011).

Elektrik akımının iletimi valans elektronların bu karakteristiği temelinde gerçekleşir. Elektrikli cihazlar bahsi geçen bu akım ve noktalar arasında oluşan potansiyel fark sayesinde çalışmaktadır.

Atomların valans yörüngelerinde üç ya da daha az elektron bulunan atomlardan oluşan maddelere iletken denir. Bunlara gümüş, bakır, pirinç ve alüminyum örnek verilebilir. Valans yörüngesinde daha az elektron bulunduran atom daha iyi iletkenidir. Bu durumda bir valans elektrona sahip

olan bakır (Cu) için, sahip olduğu valans elektron sayısı üç olan alüminyumdan daha iyi bir iletkenidir çıkarımı yapılabilir.

İletken kesit içerisinde geçebilen serbest haldeki elektronlar elektrik akımını oluşturur. Akımın devrede yani kullanılabilir olması için anahtarlama devresinin kapalı olması gereklidir. Açık olan devrelerde akım geçişi tamamlanamaz, bu durumda elektrikten ve elektrikli cihazdan istifade edilemez (Badur 1978).

Elektrik günümüzde oksijen kadar kıymetli bir ürün haline gelmiştir. Elektrik kesintilerinde işlerin aksaması deyim yerindeyse hayatın durması ile eşdeğer bir ortam oluşmaktadır. Bazen bu hatlarda yapılan bir bakımın sonucu olarak kasıtlı bazen de devrelerdeki açıklık sebebi ile kesinti karşınıza çıkabilir. Günümüzde her alanda kullanılan elektrik anahtarları devrenin tamamlanmasında ve kontrolünde rol oynayan başlıca elemandır (Gözel 2022).

Kullanım alanları tahmin edeceğimizden çok fazla olan elektrik anahtarlarında kullanılan hammaddelerin arz ve tedarik kısmında bazı sıkıntılar tespit edilmiştir. Elektrikli araçların kullanımının yaygınlaşması ve pandemi nedeniyle küresel tedarik zincirinin bozulması, elektrik anahtarlarında kullanılan pirinç ve bakır temelli hammadde kullanımını arttırmış ve maliyetlerin artmasına sebebiyet vermiştir (Int Kyn. 1). Batarya, motor ve iletim hatlarında bol miktarda bakır kullanılan elektrikli araçların yaygınlaşması da bakır ve pirinç maliyetlerini artırmıştır (Int Kyn. 2). 2017

bakır fiyatı 5700\$/ton iken, 2022 yılında bakır fiyatı 9362\$/ton seviyesindedir. Bakır maliyetleri globalde 5 yıllık periyotta %64 artmıştır (Int Kyn. 3). Alternatif bir elektriksel iletken hammadde arayışına geçmeyi düşünenlere el kitabı niteliğinde olacak bu çalışmada daha öncesinde kullanılmayan Al-Cu bimetal kompozit hammaddesinin kullanılabilir olduğunun ispatı için tabi tutulduğu uluslararası standartları (IEC & TS EN 60669-1) sağlayan deney ve testlerin analiz ve sonuçlarına bakıldığında maliyet, performans verimliliği, tedarik kolaylığı gibi durumlarda avantaj sağladığı gözlemlenmiştir. Bu çalışma aynı zamanda, elektriksel bir ürünün iletkenlerinde meydana gelen direnç kaynaklı ısı enerjisinin ortaya çıkışı (ohm kayıpları) ve bu enerjinin ürün üzerinde oluşturduğu sıcaklık artış simülasyonunun nasıl yapılacağı konusunda yol gösterici niteliktedir.

Normalde yapı sektöründe estetik amaçlarla kullanılan ve bu çalışmanın baş rolü olan Al-Cu bimetal kompozit hammaddesinin; temin edilebilirlik, şekil verilebilirlik, uluslararası standartlara uygunluk, ısı ve elektriksel iletkenlik gibi başlıca gereklilikleri sağladığı tespit edilmiş ve elektriksel anahtarlarda iletken olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Kompozit malzemeler, iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı guruptaki malzemelerin en iyi özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla, makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan malzemelerdir (Ulutaş ve Turhan 2017). Bugün istenilen özellikleri sağlamada ileri teknoloji malzemelerine duyulan ihtiyaç giderek artmakta ve tek bileşenli malzemeler ileri mühendislik uygulamalarının ihtiyaçlarını karşılamamaktadır. Bu nedenle üstün özelliklere sahip kompozit malzemelere duyulan ihtiyaç günden güne artmaktadır (Varol 2022). Bu araştırmaya konu olan Al-Cu bimetalik hammadde de alüminyum ve bakırın haddelenerek makro ölçekte birleştirilmesi ile üretilen yassı bir iletkenidir. İki farklı metalin birleştirilmesi oluşan yeni metale literatürde bimetal ismi verilmektedir. Bimetaller kompozit malzemeler olup kendisini meydana getiren iki farklı metalin termal, mekanik ve elektriksel fiziksel

özelliklerini de kendilerinde barındırırlar. Al-Cu bimetalik hammadde alüminyumun hafiflik, termal ve elektriksel iyi iletkenlik, uygun maliyet gibi özelliklerini bimetal katarken bakır da çok iyi termal ve elektriksel iletkenlik özelliklerini bimetal katmıştır.

Bakır kompozit, takviye oranının artışına bağlı olarak elektriksel iletkenlik özelliklerinde değişken değerler veren bir yapıya sahiptir. Piyasa şartlarında dayanım özellikleri geliştirilmiş bakır esaslı malzemeler bulunmaktadır. Ancak mekanik özelliklerin geliştirilmesi için yapılan çalışmaların birçoğu iletkenlik özelliklerini olumsuz yönde etkilemekte ve iletkenlik değerlerini düşürmektedir (Ulutaş ve Turhan 2017). Özellikle uzay ve otomotiv endüstrisinde kullanılmak üzere Al-esaslı (Al-based) alaşımlar elektronik ve kimya endüstrisinde kurşunsuz lehimleme alaşımları (lead-free soldering's) üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Diğer taraftan metallerin ve alaşımların termofiziksel özelliklerinin (viskozite, elektriksel özdirenç ve iletkenlik, yoğunluk, termal iletkenlik vs.) bilinmesi özellikle amaca uygun malzeme üretimi için yapılan çalışmalarda oldukça önemlidir. Malzemeler için önemli termofiziksel özelliklerden biri olan elektriksel özdirenç ve iletkenlik değerleri özellikle metalürjik çalışmalarda (örneğin elektromanyetik uygulama alanlarında) sıklıkla kullanılır (Aker vd. 2019).

Klasik üretim teknikleri ile üretilebilen malzemelerden daha sert, dayanıklı ve hafif malzemelere talebin artmasıyla yeni malzemelerin tasarımı ve geliştirilmesi söz konusu olmuştur (Gök 2010). Elektrik kontak malzemeleri, kayarak veya sabit temas sağlayarak elektrik devrelerini istenen zamanda açmak ve kapatmak için kullanılan metal esaslı parçalardır. Kontak malzemelerine evlerdeki aydınlatma tesisatının anahtarlarında ve her türlü elektrikli ev aletlerinde, endüstride özellikle otomasyonun vazgeçilmez bir parçası olan kondüktörlerde ve şalterlerde, otomobillerdeki elektrik aksamının kontrolü için kullanılan rölelerde ve yine endüstriyel amaçlı rölelerde vb. yerlerde rastlanmaktadır (Yıldız vd. 2020).

Szulborski ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada; ABB marka nominal akım değeri (In) 32A olan minyatür devre kesici ürününe IEC 60947 alçak gerilim devre kesici standardınca 0,8xIn, In ve 2xIn mertebelerinde akım uygulanmış ve akım yolu üzerinde bulunan iletkenlerin ne kadar ısındığı FEA analizi ile tespit edilerek deneysel yöntemlerle doğrulanmıştır. Yapılan çalışmada iletkenlerin ne kadar ısındığını bulabilmek için Ansys Maxwell programı kullanılarak güç mertebesinden omik kayıplar tespit edilmiştir. Tespit edilen bu kayıplar Ansys Mechanical Transient Thermal Analysis modülünde girdi olarak kullanılarak gerekli sınır şartları belirlenmiş ve iletkenlerin belirlenen süre sonunda ne kadar ısındıkları tespit edilmiştir. Ürün içerisinde en çok ısınmanın sırasıyla (azalan şekilde) bobin, kontaklar ve kablo bağlantı terminallerinde olduğu gözlemlenmiştir. Yapılan bu analizler sonrasında numune ürün üç farklı akım değerinde deneysel testlere tabi tutulmuş ve analiz sonuçları ile deneysel verilerin çok küçük sapmalarla birbirlerini doğruladıkları gözlemlenmiştir. Bu çalışma örnek alınarak birçok elektriksel ekipmanın analizleri gerçekleştirilebilir ve ısınma seviyeleri prototip aşamasına geçilmeden bilgisayar ortamında tespit edilebilir. Bu da zaman ve maliyet kazancı olarak araştırmacılara kazanç sağlayacaktır (Szulborski et al. 2021).

Otomatik sigortalar koruma amaçlı bir şalt ürünü olmasının yanında anahtarlama yapabilmekte ve anahtar olarak kullanılabilir. Bu çalışmada; Szulborski vd. (2021) tarafından yapılan otomatik sigorta elektriksel ısınma analiz ve doğrulama test süreçleri referans alınmıştır.

Referans bilgiler ışığında elektrik anahtarı modellemeleri yapılmış olup, üç farklı iletken hammadde varyasyonu ile oluşturulmuş matematiksel modele analizler uygulanmıştır. Bu analiz ve testler, uluslararası elektrik anahtarları standardı (IEC & TS EN 60669-1) test verileri ve kısıtları referans alınarak yapılmıştır. Öncelikle Ansys Electronics Maxwell 3D isimli çözücüde yapılan analizde; iletkenlere standartta belirtilen aşırı akım değeri kadar akım verilmiş ve iletkenlerin öz dirençleri ve kontak temasındaki oluşan direnç

nedeniyle ortaya çıkardığı omik ısı kayıpları ve akım yoğunlukları hesaplanmıştır. Burada hesaplanan ısı kayıplar, Ansys Workbench Transient Thermal modülüne ısı kaynağı olarak tanımlanmış ve belirli bir süre sonunda iletkenlerde meydana gelen sıcaklık artışının zamana göre değişimi gözlemlenmiştir. Al-Cu bimetal, pirinç ve bakır iletkenler ile oluşturulmuş model analiz edilerek çıkan sonuçlar birbirleri ve standartlarda izin verilen değerler ile kıyaslanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Elektrik anahtarının akım yolundaki termal enerji, kablo giriş terminalindeki kablo-terminal teması ile sisteme girer ve elektriksel iletkenleri takip ederek çıkış terminalinden yine kablo-terminal teması ile çıkış yapan iletkenler tarafından üretilirler. Bunun nedeni ise akımın hammadde ve kontak dirençleri ile karşılaşarak ohm kayıplarına neden olmasıdır. Ortaya çıkan bu termal enerji radyasyon, konveksiyon ve iletim olarak çevreye yayılır. Belirli bir iletken akım yolu uzunluğunda üretilen elektrik gücünün değeri, aşağıda belirtilen denklem ile açıklanan akım ve direncin sonucudur (Szulborski et al. 2021):

$$P = I^2 \times R \quad (1)$$

Burada P birim uzunluk başına harcanan güçtür (W), I iletkenin geçen akım (A) değeridir, R ise iletkenin birim uzunluğu için direnç (Ω) değeridir.

İletkendeki akım akışıyla ilgili tüm hesaplamaları, aşağıdaki Maxwell denklemlerini kullanarak yapmak mümkündür (Szulborski et al. 2021):

$$\nabla \times \{H\} = \{J\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} = \{J_s\} + \{J_e\} + \{J_v\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} \quad (2)$$

$$\nabla \times \{E\} = - \left\{ \frac{\partial B}{\partial t} \right\} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \{B\} = 0 \quad (4)$$

$$\nabla \cdot \{D\} = \rho \quad (5)$$

Burada $\nabla \times \text{curl}$ (kırılma) operatörü, ∇ iraksaklık operatörü, $\{H\}$ manyetik alan yoğunluğu vektörü, $\{J\}$ toplam akım yoğunluğu vektörü, $\{J_s\}$ uygulanan

kaynak akım yoğunluğu vektörü, $\{J_e\}$ indüklenmiş girdap (eddy) akım yoğunluğu, $\{J_v\}$ hız akım yoğunluğu vektörü, $\{D\}$ elektriksel akı yoğunluğu vektörü, t zaman, $\{E\}$ elektriksel alan şiddeti vektörü, $\{B\}$ manyetik akı yoğunluğu vektörü ve ρ elektrik yükü yoğunluğudur.

İletken üzerinden akım geçişi olurken ortaya çıkan ısı aşağıdaki şekillerde transfer olur:

- Radyasyon (ışınım) yoluyla;
- Konveksiyon (taşıma) yoluyla;
- İletim yoluyla (Çengel & Ghajar, 2014).

Elektrikli cihazların mevcut akım yolları için hesaplamalar yapılması durumunda, her türlü ısı dağılımı meydana gelebilir. İletken veya yalıtkan malzeme tarafından aktarılan ısı, iletim yoluyla gerçekleştirilir. Nominal elektrik yükü için elektrikli cihazların termal akım yollarını hesaplarken, radyasyonla ısı transferinin payı ve doğal konveksiyon benzerdir (Szulborski et al. 2021).

İletim ve taşıma için gerekli fiziksel temeli, enerjinin korunumundan bahseden termodinamiğin birinci yasasında bulmak mümkündür (Szulborski et al. 2021).

$$\rho \cdot c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \cdot \{L\} \cdot T \right) + \{L\}^T \cdot \{q\} = \ddot{q} \quad (6)$$

Burada ρ yoğunluk, c_p ısı sığası, T sıcaklık, t zaman, $\{L\}$ vektör operatörü, $\{v\}$ hız vektörü, $\{q\}$ ısı akısı vektörü ve \ddot{q} ısı üretim hızıdır.

Taşıma, bir katı yüzey ile ona bitişik, hareket halindeki akışkan (sıvı ya da gaz) arasında ısı transfer türüdür. Taşıma ile ısı geçişi, rastgele moleküler hareket (yayılm/konveksiyon) ve akışkanın kitlesel ya da yığın hareketi (adveksiyon) olmak üzere iki mekanizmadan oluşur. Akışkan hareketi ne kadar hızlı olursa taşıma ile ısı transferi o kadar büyük olur. Yığın ya da kitlesel akışkan hareketinin ortadan kalkması halinde, katı yüzeyle bitişikindeki akışkan arasındaki ısı transferi yalnızca moleküllerin rastgele hareketi yani iletim ile meydana gelir (Çengel and Ghajar 2014).

Taşıma ile ısı geçişi, akışın türüne göre zorlanmış ve doğal taşıma olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Zorlanmış taşıma; akışkan hareketi fan, pompa veya rüzgar gibi dış bir etki ile oluşur. Doğal taşıma ise; akışkan hareketi meydana getiren dış bir etki yoktur. Akışkan içerisindeki sıcaklık değişiminin ortaya çıkardığı yoğunluk farkından kaynaklanan kaldırma kuvveti ile oluşur. (Int Kyn. 4)

Doğal taşıma ile meydana gelen ısı transferi hesabı yapılırken aşağıda belirtilen Newton Soğuma Kanunu kullanılmıştır.

$$\dot{Q} = h \cdot A_s (T_s - T_\infty) \quad (7)$$

Burada \dot{Q} ısı taşıma miktarını ifade etmektedir ve birimi Watt'tır. h , taşıma katsayısını ifade eder ve birimi $W/m^2 \cdot ^\circ C$ şeklindedir. A_s , ısı kaynağının akışkan ile temas eden yüzeylerini ifade eder, birimi m^2 'dir. T_s , ısı kaynağının yüzey sıcaklığını, T_∞ ise ısı geçişinin olacağı akışkanın sıcaklığını ifade eder ve birimleri $^\circ C$ 'dir.

Oluşturulacak olan modelde elektriksel iletkenlerden durgun havaya olan taşıma herhangi bir şekilde zorlanmamış olduğu için doğal taşıma olarak ele alınacaktır. ısı kaynağından havaya olan doğal taşıma katsayısı aşağıdaki tabloda belirtildiği üzere $2-25 W/m^2 \cdot ^\circ C$ arasındadır (Int Kyn. 4).

Çizelge 1. Tipik konveksiyon ısı transfer katsayısı değerleri (Çengel and Ghajar 2014).

Taşıma Tipi	Taşıma Katsayısı, h ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
Gazların Doğal Taşımı	2-25
Sıvıların Doğal Taşımı	10-1000
Gazların Zorlanmış Taşımı	25-250
Sıvıların Zorlanmış Taşımı	50-20000
Kaynama ve Yoğuşma	2500-100000

Yangın nedenleri arasında elektrik kaynaklı olanların sayısı azımsanamayacak seviyededir. Bu nedenle elektriksel ürünlere uygulanan zorlu standart testler arasında önem sıralaması yapmak gerekirse, yangın riski oluşturması nedeniyle sıcaklığı kontrol altında tutmak ilk sırada gelmektedir. Bu tez çalışmasında da elektriksel anahtarlar da kullanılacak yeni bir

alternatif hammaddenin sıcaklık bakımından uygunluğu incelenmektedir (Gözel 2022).

Elektriksel ürünün kontak ve terminallerinin ısınması genellikle testler ve hesaplamalar yoluyla iki farklı durum için değerlendirilir:

- Nominal akımlarla sürekli yük altında ısınan iletkenler.
- Kısa devre akımlarıyla anlık olarak şiddetli şekilde ısınan iletkenler.

Her iki durum için de çok önemli bir parametre olarak, anahtar devresinin elemanlarının izin verilen maksimum sıcaklık değerleridir. Kısa devre akımı koşullarında oluşan kısa süreli ısıtma sırasında izin verilen sıcaklık değerinin, nominal akımla uzun süreli ısıtma durumundan daha yüksek olabileceği gerçeğine dikkat etmek önemlidir. Bunun nedeni, akımın daha yüksek değerine rağmen kısa süreli termal etkilerinin daha küçük olması ve izin verilen değeri aşmamasıdır (Szulborski et al. 2021).

Akım yolları için izin verilen sıcaklıklar aşağıdaki faktörler dikkate alınarak belirlenir:

- Kontak temas direnci
- İletkenin özgül direnci
- Ürünün mekanik mukavemeti
- İletkenleri saran yalıtkanların ısı direnci

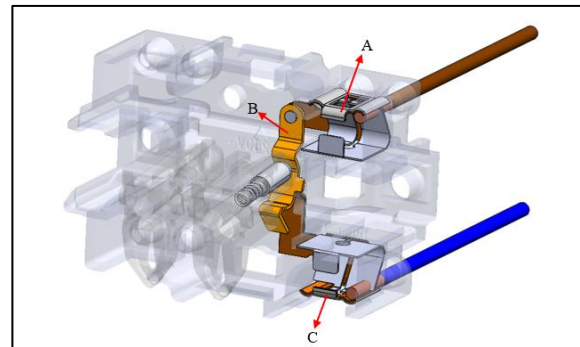
İletkenlerin sıcaklığındaki artış ürünün mekanik mukavemetini azaltırken aynı zamanda iletkenlerin direncini de artırmaktadır. Yukarıda açıklanan faktörler dikkate alınarak ve testler bazında elektrik anahtarları için izin verilen sıcaklık artış limitleri TS EN 60669-1 standardında tanımlanmıştır.

Standart gereği uygulanması gereken testi kısaca özetlemek gerekirse; aşırı akım testleri TS EN 60669-1 ve IEC 60669-1 standartlarının 17. maddesinde belirtildiği üzere numune ürünlere beyan akımının 1,35 katı akım verilerek ürünün ısınma karakteristiği incelenmektedir. Ürünler 10A beyan akımı değerine sahip olduğu için 13,5A ile aşırı akım testine tabi tutulacaklardır (TSE 2005).

2.1 Elektrik Anahtarı 3D Modeli İçin Tasarım Varsayımlar

Günümüzde elektriksel ürün tasarımı, bilgisayar destekli tasarım (CAD) programları ile ürünün parametrik olarak modellenmesi ve bu modelin gerekli sınır şartlarının bilgisayar destekli mühendislik (CAE) programlarında tanımlanarak sanal ortamda analiz edilmesi şeklinde yapılmaktadır. Bu programlar, elektromanyetik indüksiyon yoğunluğunun, sıcaklıkların, gerilimlerin ve 3D modeldeki belirlenecek diğer fiziksel niceliklerin dağılımına izin veren karmaşık hesaplama işlemlerini gerçekleştirir.

Yukarıda bahsedilen bilgisayar simülasyonlarını gerçekleştirmek için elektriksel anahtarın üç boyutlu modeli hazırlanmıştır. Anahtarın tüm yapısal elemanları "Solidworks 2021 ve Creo Parametric 5" yazılımlarında modellenmiş olup, analizlerde fiziki ürünün birebir üretim dataları kullanılmıştır. Analizlerde kullanılacak ürün datasının ana bileşenleri Şekil 1'de belirtilmiştir. Opak olarak gösterilen parçalar, analizde kullanılacak olan birincil parçalardır. Şeffaf olarak gösterilen parçalar ise izolatör ve koruyucu görev üstlenen plastik parçalardır.



Şekil 1. İletken parçalarının montaj gösterimi: A-Giriş Terminali, B-Orta Terminal, C-Çıkış Terminali

Bu şekilde hazırlanan elektriksel anahtarın üç boyutlu modeli, ANSYS Electronics Desktop ve Workbench'teki çözücülere yüklenmeye hazır hale geldi. Karmaşık hesaplama iterasyonlarından sonra,

farklı fiziksel olayların birbirini nasıl etkilediğini kontrol etmemize izin veren kuplajlı analiz yapılmıştır.

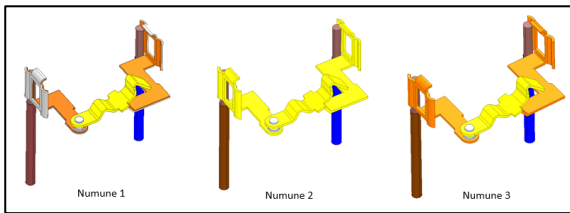
2.2 Elektriksel Kaynaklı Isı Oluşumu Simülasyonları

Öncelikle, birleştirilmiş analiz ilk adımı olarak Ansys Electronics Desktop (Student Version) uygulamasındaki Maxwell 3D modülünde elektriksel model oluşturularak ohm kayıpları tespit edilmiştir. Birleştirilmiş analiz ikinci adımı olan Ansys Workbench Transient Thermal (Student Version) modülünde, buradaki ohm kayıpları ısı kaynağı olarak içeri aktarılacak ve parçaların zamana bağlı ısınması gözlemlenmiştir.

Yapılan analizlerdeki hesaplamalı simülasyonlar, elektrik anahtarında kullanılan iletken parçaların üç farklı hammadde konfigürasyonu için gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan farklı numunelere ait bilgiler Çizelge 2’de belirtilmiştir.

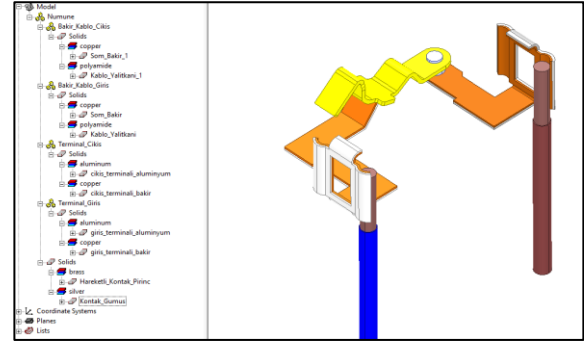
Çizelge 2. Numunelerde kullanılan parçaların hammadde bilgileri

Numune Adı	Giriş Terminali	Orta Kontak	Çıkış Terminali	Kablo
Numune 1	Al-Cu	Pirinç	Al-Cu	Bakır
Numune 2	Pirinç	Pirinç	Pirinç	Bakır
Numune 3	Bakır	Pirinç	Bakır	Bakır



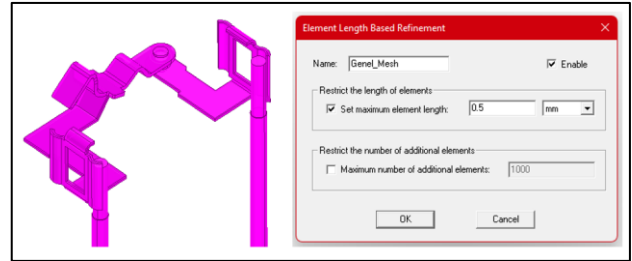
Şekil 2. Üç farklı numuneye ait 3D model görselleri

Ansys Maxwell 3D modülünde parçalara malzeme kitaplığından malzeme özellikleri atandı.



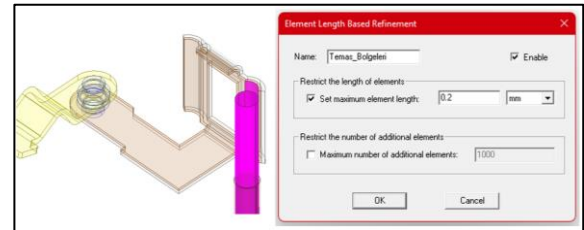
Şekil 3. Malzeme özelliklerinin tanımlanması

Öncelikle tüm parçalara maksimum 0,5 mm boyutunda olacak şekilde mesh atılarak matematiksel ağ yapısı oluşturulmuştur.



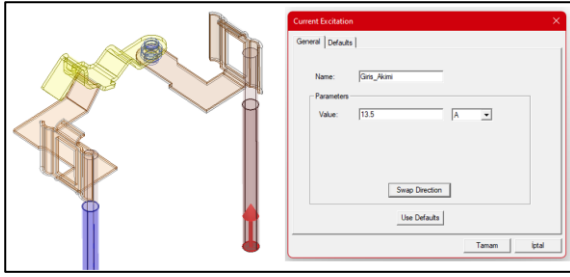
Şekil 4. Genel mesh özelliklerinin tanımlanması

Özellikle kontak temas bölgelerinde yoğunlaşmış şekilde mesh yapıları oluşturuldu. Kontak temas bölgelerindeki maksimum mesh boyutları 0,2 mm olarak ayarlanmıştır.



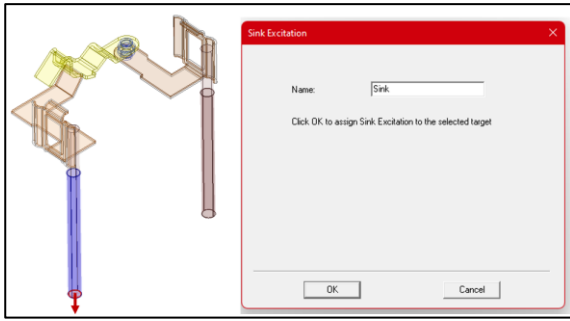
Şekil 5. Bölgesel mesh özelliklerinin tanımlanması

İlgili standartta geçen “Beyan akımı 10A olan anahtarlarda 2,5 mm²’lık, minimum 1 metre uzunluğundaki kablo üzerinden, 1 saat süre ile 13,5A deney akımı geçirilir. Deney sonunda sıcaklık artışı (ΔT) 45°C üzerinde olmamalıdır.” (TSE, 2005) ibaresi uyarınca giriş kablosu üzerinden 13,5A giriş akımı uygulanmıştır. Maxwell 3D ve Transient Thermal modüllerinde ortam sıcaklığı laboratuvar ortamının sıcaklığı referans alınarak 26°C olarak belirlenmiştir.



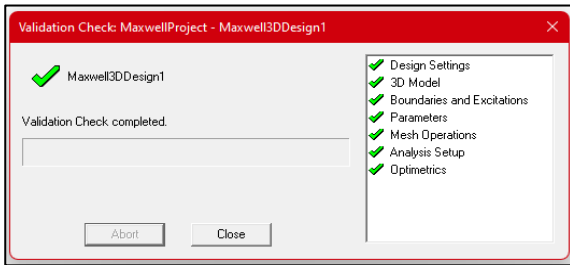
Şekil 6. Giriş kablosundan 13,5A akım tanımlanması

Bir önceki adımda giriş akımı tanımlanmıştı. Akımın belli bir yönde akabilmesini simüle etmek için bir potansiyel fark oluşturulmalıdır. Bu nedenle çıkış kablosuna "Sink" yani gider tanımlaması yapılması gerekmektedir. Çıkış için sink komutuna alternatif olarak, 0 volt değeri de tanımlanabilir.



Şekil 7. Çıkış kablosuna gider (Sink) tanımlanması

Analizi çalıştırmadan önce son kontrolleri yapmak için Validation Check komutu kullanılarak, analizin yürütülmesi ile alakalı herhangi bir problem veya eksik veri olmadığı gözlemlenmiştir. Model, analiz için hazırdır.



Şekil 8. Validation Check komutu ile analiz öncesi son kontrollerin yapılması

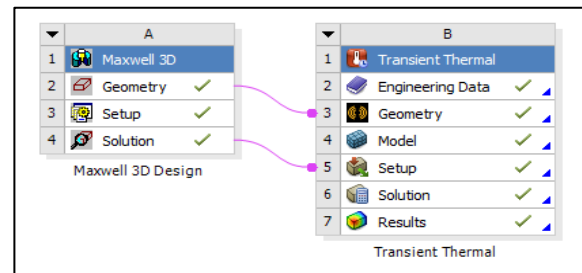
ANSYS Maxwell'de alan gradyanlarının yüksek olduğu bölgelerde, sonraki hesaplama iterasyonları sırasında ağın otomatik olarak sıkıştırılarak

“uyarlanabilir ağ iyileştirme” işlevi yapılmakta ve simülasyondaki hesaplama hataları azaltılmaktadır. Bu azaltılan simülasyon hesaplama hatası, “enerji hatası” olarak tanımlanan hata ile ilişkilendirilebilir. %1'in altındaki hesaplamaların elde edilen yakınsaması, bu tür simülasyonlar için tatmin edici bir sonuçtur (Szulborski et al. 2021).

Simülasyon çoğu zaman, birçok hesaplama yinelenmesine ve birkaç milyon Tetrahedra ögesinden oluşan güçlü bir şekilde oluşturulmuş hesaplama ağına rağmen yakınsamayı başaramaz (Gözel 2022). Bu çalışmada, maksimum üçüncü yineleme iterasyonunda %1'in altında enerji hatası değerine ulaşılmış ve mesh yapısının analiz için uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

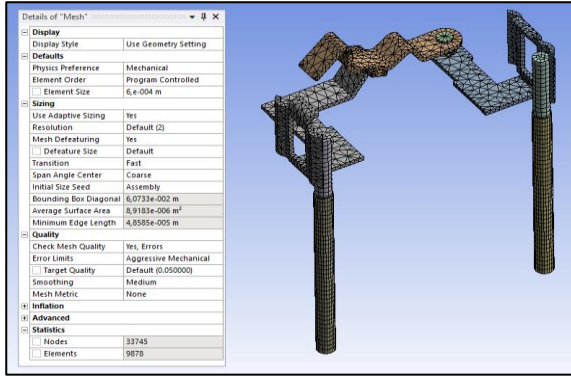
2.3. Zamana Bağlı Sıcaklık Artış Simülasyonları

Akım taşıyan iletken metal parçaların belirli bir zaman aralığında (1800 sn) ve belirli bir ısıl güç altında sıcaklıklarında olan değişimi inceleyebilmek için direnç kaynaklı ohm kayıplarının Transient Thermal modülünde ısı kaynağı olarak içeri aktarılması gerekmektedir. Ansys Workbench çalışma ekranındaki Maxwell 3D geometri ve sonuç verileri Transient Thermal modülü ile ilişkili hale getirilerek, oluşan ohm kayıplarının ısı kaynağı olarak içeri aktarılmasına olanak sağlanmıştır.



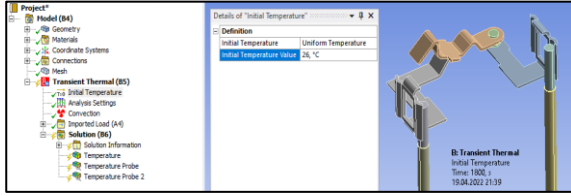
Şekil 9. Maxwell 3D sonuç verilerinin Transient Thermal modülüne aktarılması

Tüm parçalar seçilerek, maksimum 0,6 mm boyutlarında olacak şekilde matematiksel bir mesh yapısı oluşturulmuştur. Mesh yapısı ile alakalı diğer veriler aşağıdaki görselde belirtilmiştir.



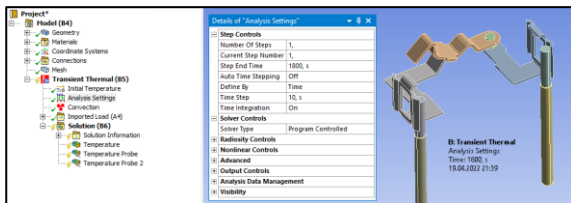
Şekil 10. Mesh ayarlarının tanımlanması

Farklı ortam sıcaklıklarında yapılan analizler için parça sıcaklıkları normal laboratuvar koşulları için 26°C olarak girilmiştir. Bu parça sıcaklık verileri üç farklı sıcaklıkta yapılan deneylerin her biri için ayrı ayrı girilmiş ve farklı analizler çalıştırılmıştır.



Şekil 11. Parça ilk sıcaklıklarının tanımlanması

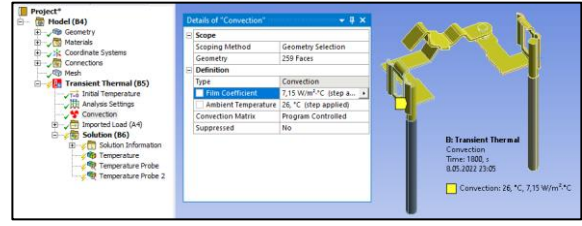
Analiz ayarları sekmesine gelerek analiz süresi 1800 saniye olarak belirtilmiştir. Zaman adımı 10 saniye olarak girilerek, problardan her 10 saniyede bir ölçüm alınması sağlanmıştır.



Şekil 12. Analiz süresi ve ölçüm adım aralıklarının tanımlanması

İletken parçalardan ortama olan doğal taşınımı simüle edebilmek için hava ile temas eden tüm yüzeyler seçilmiş ve doğal taşınım katsayıları Numune 1 için 7,15 W/m².C, Numune 2 için 7,65 W/m².C, ve Numune 3 için 8,65 W/m².C olarak girilmiştir. Doğal taşınım katsayıları deneysel metotlar ile toplanan verilerin harmanlanarak

Newton Soğuma Kanunu formülüne aktarılması ile hesaplanarak bulunmuştur.



Şekil 13. Taşınım katsayısı ve ortam sıcaklığının tanımlanması

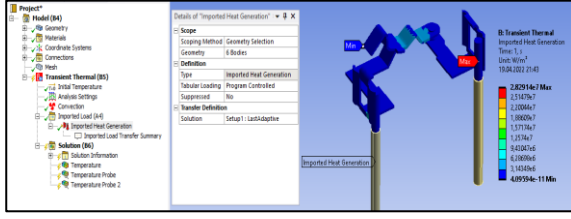
Doğal taşınım katsayısı (h) hesabı yapılırken Newton Soğuma Kanunu kullanılmıştır. Formüldeki ısı geçişi (\dot{Q}) verileri Ansys Maxwell programında hesaplanarak bulunmuş ve "Solutions" penceresindeki "Total Loss (W)" verileri kullanılmıştır. İletkenlerin yüzey alanı (A_s), Solidworks programındaki 3D CAD model üzerinden hesaplanarak alınmıştır. İletkenlerin yüzey sıcaklıklarını (T_s) bulabilmek için numune ürünlere 10'ar dakika süresince akım verilerek ön testler yapılmış ve süre sonundaki maksimum sıcaklıkları referans alınmıştır. Laboratuvar ortamının sıcaklığı 26°C olarak ölçülmüştür. Tüm toplanan bu veriler ışığında numunelerin doğal taşınım katsayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan doğal taşınım katsayısı ve diğer veriler aşağıdaki tabloda belirtilmiştir. Hesaplanan doğal taşınım katsayılarının 2-25 W/m².°C aralığında olması, çıkan sonuçların doğruluğu hakkında pozitif bir etki uyandırmıştır.

Çizelge 3. Doğal taşınım katsayısı (h) hesaplama verileri tablosu

Numune Adı	\dot{Q} (W)	h (W/m ² .°C)	A_s (m ²)	T_s (°C)	T_∞ (°C)
Numune 1	0,23223	7,15	0,00154	47,13	26
Numune 2	0,26676	7,65	0,00154	48,67	26
Numune 3	0,21431	8,65	0,00154	42,15	26

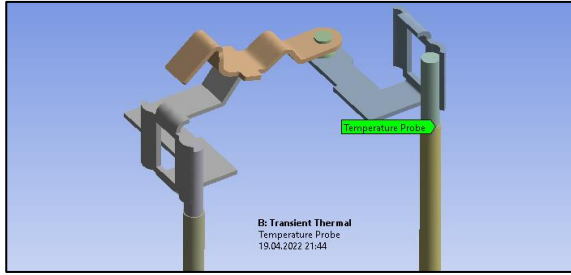
Ansys Maxwell 3D modülünde alınan sonuç verilerinin, Transient Thermal modülünde ısı kaynağı olarak tanımlanması gerekmektedir. Bu nedenle Imported Load sekmesi altında Imported Heat Generation tanımlaması yapıldı. Tüm

elektriksel iletken parçalar seçilerek ısı kaynağı olarak tanımlandı.

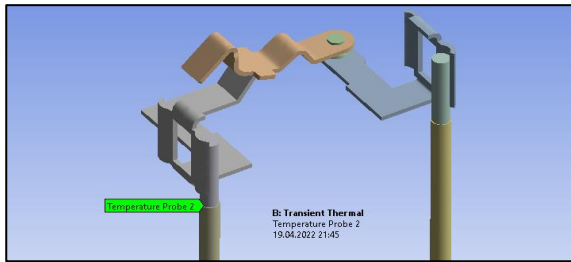


Şekil 14. Maxwell 3D'den içeri aktarılan ohm kayıplarının ısı kaynağı olarak tanımlanması

TS EN 60669-1 standardının ilgili maddesinde sıcaklık ölçümlerinin giriş ve çıkış kabloları üzerinden alınması gerektiği belirtilmiştir (TSE 2005). Bu nedenle giriş ve çıkış kabloları üzerine prob konularak anlık ölçüm alınması sağlanmıştır.



Şekil 15. Giriş terminalinden analiz süresince anlık veri alabilmek için tanımlanan prob konumu



Şekil 16. Çıkış terminalinden analiz süresince anlık veri alabilmek için tanımlanan prob konumu

Özetle, tespit edilen ohm kayıpları Ansys Maxwell'den Ansys Transient Thermal modülünde içe aktarılarak ısı kaynağı olarak tanımlandı. Analizin sınır şartları tanımlandı. Belirli süreli bir analiz başlatılarak iletken parçalarda meydana gelen ısınmalar tespit edildi. Analizde kullanılan malzemelerin mühendislik verileri Çizelge 4'te belirtilmiştir.

Çizelge 4. Analizde kullanılan parçaların malzeme özellikleri tablosu (Ansys, 2021)

Mühendislik Verisi	Bakır	Alüminyum	Pirinç	Birim
Yoğunluk	8300	2712	8500	(kg/m ³)
Young Modülü	1,1x10 ¹¹	1,1x10 ⁸	1,1x10 ¹¹	(N/m ²)
Poisson Oranı	0,34	0,33	0,33	(N/m ²)
Kayma Modülü	4,1x10 ¹⁰	2,55x10 ⁷	3,7x10 ¹⁰	(N/m ²)
Isı İletim Katsayısı	386	237	150	W/m.K
Elektriksel İletkenlik	58,7	36,9	15,9	x10 ⁶ Siemens/m

2.4. Deneysel Doğrulama Çalışmaları

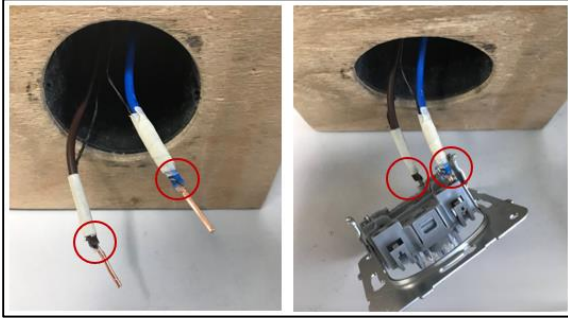
Günümüzde elektrikli cihazlar tasarlanırken mekaniksel, elektriksel, elektrodinamik ve termal analizler gerçekleştirmek için 3D tasarım ve birleştirilmiş simülasyonda programları kullanılmaktadır. Bu tarz araçların olmadığı dönemlerde, tasarımcılar matematiksel hesaplamalar, deneysel metotlar ve yürürlükteki standartlar (IEC, TSE, VDE, NF, BBJ...) temelinde inşa etmişlerdir.

Günümüzde de elektrik anahtarları ve prizler gibi elektriksel ürünler üreticiler tarafından standartlara uygun olarak tasarlanmaktadır. Bu tür standartlardan biri de TS EN 60669-1 (Anahtarlar - Ev Ve Benzeri Yerlerde Kullanılan Sabit Elektrik Tesisatları İçin) standardıdır. Standardın kapsamı, ürünlerin tip testlerini ve verilen gereksinimlere uygunluk testlerini akredite laboratuvarlarda yapmak için kullanılan elektrik anahtarlarının standartlaştırılmış test yöntemlerini içerir. Gerçekleştirilen testler, imalatçıların daha öncesinde 3D yazılımda tasarlanan ve simülasyon analizleri ile bazı basitleştirmeleri içerebilen aparatın çalışmasını ve yapımını kontrol etmelerini sağlar. Ayrıca üreticinin piyasaya sunmak istediği ürün için sertifika alabilmek için tip testi yapılması gerekmektedir.

Bu çalışmada, anma akımı 10A olan bir elektrik anahtarının, elektriksel devre elemanlarındaki

sıcaklık artışını kontrol etmek için testlere tabi tutulmuştur.

Yapılan deneylerdeki sıcaklık artışlarını gözlemlemek üzere, standartta belirtildiği şekliyle kablo giriş-çıkış terminallerindeki 2,5 mm² kesitli bakır kablo üzerine J tipi termal çiftler yerleştirilmiştir.



Şekil 17. J tipi termal çiftlerin kablo üzerindeki konumunu belirten görsel

Standartta net bir şekilde belirtildiği için, termal çiftler kablo üzerine yerleştirilmiştir. Termal çiftlerin kablolar üzerinde olması nedeniyle ürün sökülmemiş olup iç mekanizmaya ve dışarıda kalan izolasyon plastiklerine herhangi bir şekilde müdahalede bulunulmamıştır. Bu da ürünün daha sağlıklı bir şekilde çalışmasına ve daha doğru sonuçlar alınmasına olanak sağlamıştır.

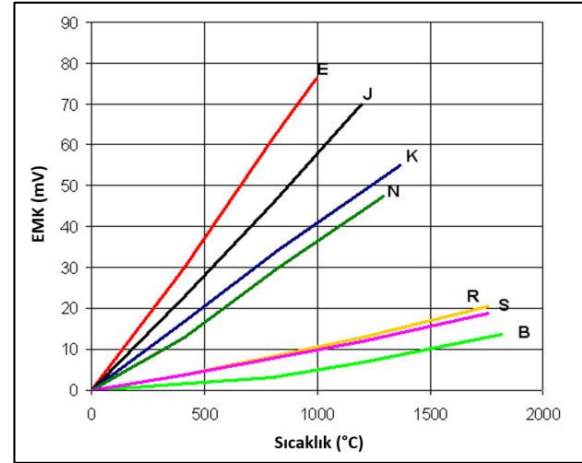
Termal çiftlerin özellikleri standartlaştırılmıştır. Farklı malzemeler ve izin verilen sapmalar için termoelektrik kuvvetin değerleri IEC 60584-3 ve ITS 90 uluslararası standardına dahil edilmiştir.

Çizelge 5. J tipi termal çift ölçüm hatalarına dair veriler tablosu (IEC 2021)

Termal Çift Sınıfı	Hammadde	Sıcaklık Aralığı	İzin Verilen Hata
1	Demir-Konstantan	-40 ~ +375°C	±1,5°C
		+375 ~ +750°C	±0,4%
2	Demir-Konstantan	-40 ~ +333°C	±2,5°C
		+333 ~ +750°C	±0,75%

J tipi termal çiftlerin ölçüm hassasiyeti 52 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ olup, verimli çalışma aralığı -40°C ile 750°C arasındadır. Aşağıdaki tabloda J ve diğer tipteki

termal çiftlerin elektromotor kuvveti-sıcaklık grafiği Şekil 18’de paylaşılmıştır.

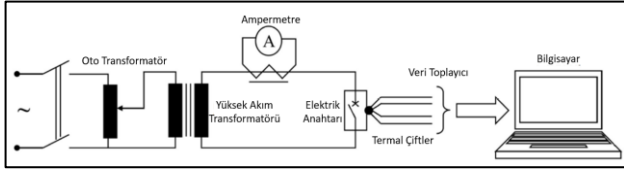


Şekil 18. J ve diğer tipteki termal çiftlerin elektromotor kuvveti-sıcaklık grafiği (Int Kyn. 5)

Farklı hammaddeden imal edilmiş parçalar ile oluşturulmuş 3 farklı numunenin sıcaklık artışını test etmek için bir test standı kuruldu. Ürünlere standardın belirttiği şekilde sürekli bir akım verebilmek için yüksek akım trafosunun bağlı olduğu tek fazlı bir oto transformatör kullanılmıştır. Oto transformatör, yüksek akım transformatörünün çıkışındaki akımı düzenlemek için kullanıldı. Kablolardan geçen akımı ölçmek için akım kaynağının kendi ampermetresi ve onu doğrulamak için sisteme dahil edilen ilave bir ampermetre kullanılmıştır.

Elektrik anahtarının giriş-çıkış kabloları üzerine konulan termal çiftlerden veri toplamak için örnekleme süresi 10 saniyeye ayarlanmış, $0,1^\circ\text{C}$ hassasiyete sahip bir sıcaklık kaydedici kullanılmıştır. Kaydedici olarak Key sight marka 349770A model veri toplayıcı kullanılmıştır.

Key sight 349770A kayıt cihazına gelen veriler, USB iletişim ara yüzü ile çevrimiçi olarak bilgisayardaki kayıt cihazı yazılımı olan Agilent Bench Link Data Logger 3'e gönderildi.



Şekil 19. Elektrik anahtarının test edilen akım devresi için ölçüm sisteminin şeması

Elektrik anahtarına giden güç kaynağı kablolarının uzunluğu standartta kesin olarak tanımlanmıştır. Giriş-çıkış kablolarının her birinin uzunluğu 1'er metre olmalıdır. Ve ayrıca 10A beyan akımına sahip ürüne uygulanacak aşırı akım (13,5A) testinde 2,5 mm² kesitli bakır som kablolar kullanılmalıdır (TSE, 2005). Testler yapılırken beyan edilen bu bilgilerin tamamına uyulmuştur. Şekil 19'da şeması gösterilen test sisteminin gerçek görselleri Şekil 20'de gösterilmiştir.



Şekil 20. Aşırı akım testi uygulanan anahtar ürünlerinin test ve ölçüm düzeneği

Ortam sıcaklığı bir adet termal çift ile test süresince anlık olarak ölçülmüştür. Sıcaklık test süresince ortalama 26°C seviyesindedir.

Elektrik anahtarının akım yolundaki sıcaklık dağılımını göstermek ve ayrıca elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçları doğrulamak için, aşırı akım testleri sonunda, test edilen her ürün için termal görüntüleme kamerası doğrulamalar yapıldı. Termal görüntüleme için Fluke marka termal kamera kullanılmıştır.

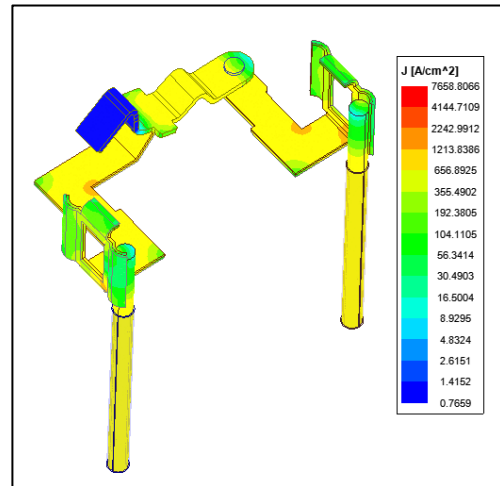
3. Bulgular

Önceki bölümlerde verilen teorik bilgilerin üzerine inşa edilen matematiksel model ve deney düzeneği kullanılarak yapılan çalışmaların sonuçlarına bu bölümde yer verilmiştir. Teorik bulgular bölümünde; öncelikle Ansys Maxwell 3D programında elde edilen iletkenler üzerindeki elektriksel ısınma sonuç verileri ve Ansys Workbench Transient Thermal modülündeki analizlerde elde edilen iletkenlerin ısınma karakteristiği verileri paylaşılmıştır. Deneysel bulgular bölümünde ise; yapılan bu analiz çalışmalarını doğrulamak için sıcaklık artış testi yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda teorik ve deneysel çalışmalar birbirleri ile karşılaştırılarak doğrulamalar yapılmıştır.

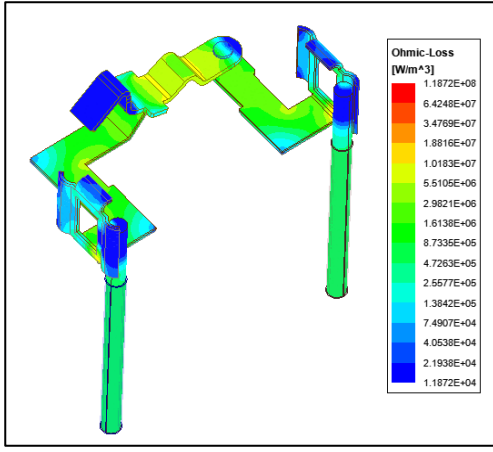
3.1. Teorik Bulgular

Numune 1, Numune 2 ve Numune 3 için Ansys Maxwell 3D programında yapılan elektrik kaynaklı ısı oluşumu (ohm kayıpları) ve akım yoğunluğu analiz sonuç verileri sırasıyla paylaşılmıştır.

Numune 1 iletkenlerine ait akım yoğunluğu (J) verileri direnç kaynaklı oluşan ohm kayıplarının analiz verileri sırasıyla Şekil 20 ve Şekil 21'de paylaşılmıştır.

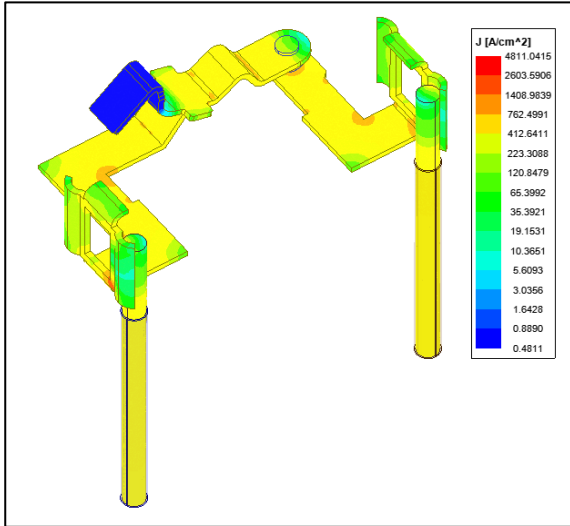


Şekil 20. Numune 1 için analiz ile hesaplanan akım yoğunluğu (J) verisi

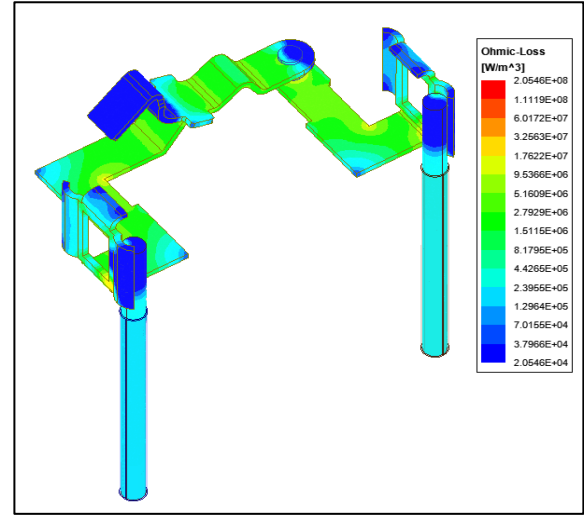


Şekil 21. Numune 1 için analiz ile hesaplanan ohm kayıpları verisi

Numune 2 iletkenlerine ait akım yoğunluğu (J) verileri direnç kaynaklı oluşan ohm kayıplarının analiz verileri sırasıyla Şekil 22 ve Şekil 23'te paylaşılmıştır.

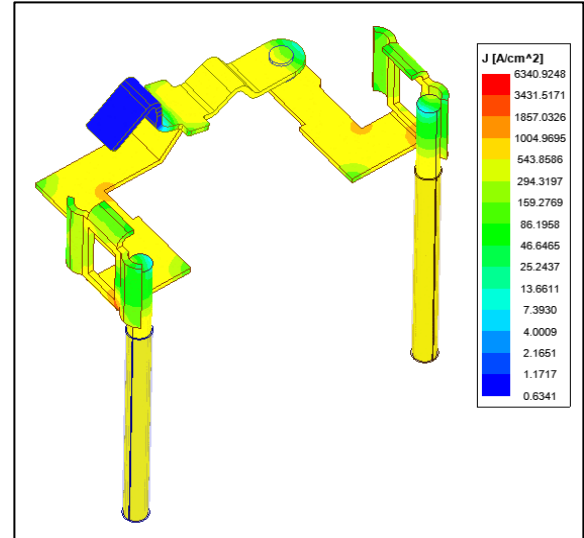


Şekil 22. Numune 2 için analiz ile hesaplanan akım yoğunluğu (J) verisi

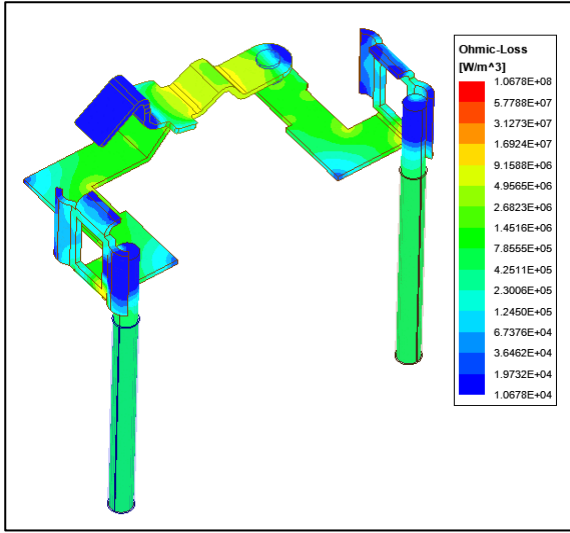


Şekil 23. Numune 2 için analiz ile hesaplanan ohm kayıpları verisi

Numune 3 iletkenlerine ait akım yoğunluğu (J) verileri direnç kaynaklı oluşan ohm kayıplarının analiz verileri sırasıyla Şekil 24 ve Şekil 25'te paylaşılmıştır.



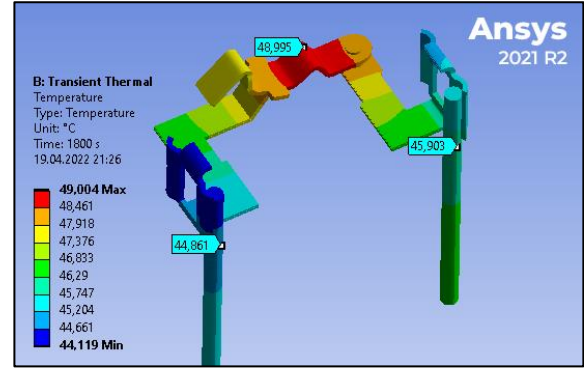
Şekil 24. Numune 3 için analiz ile hesaplanan akım yoğunluğu (J) verisi



Şekil 25. Numune 3 için analiz ile hesaplanan ohm kayıpları verisi

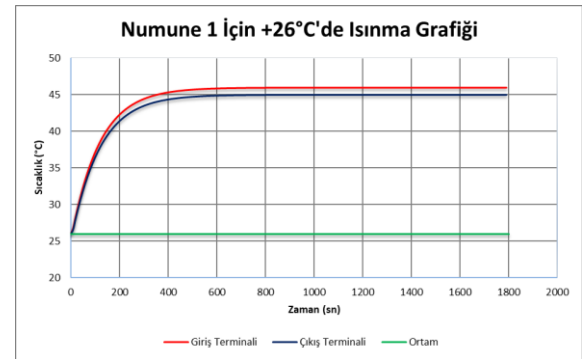
Analiz sonucunda; akımın iletkenler üzerinde hangi yolları izleyip nerelerde yoğunlaştığı ve direnç kaynaklı oluşan omik ısı kayıplarının hangi bölgelerde ne seviyelerde olduğu hakkında veriler elde edilmiştir. Akım yoğunluğunun, giriş ve çıkış kabloları arasında en kısa yolu takip ettiği gözlemlenmiştir. Akım ve omik kayıpların özellikle kontak temas yüzeylerinde yoğunlaştığı gözlemlenmiştir.

Eşleştirilmiş Maxwell 3D ve Transient Thermal modüller kullanılarak ANSYS Workbench ile gerçekleştirilen ilk birleşik analizde, Al-Cu bimetal hammadde ile imal edilmiş giriş-çıkış terminallerinin ısınması ile alakalı teorik sonuçlar elde edilmiştir. Standartta testlerin ortam sıcaklığında yapılması ve sıcaklık değişiminin (ΔT) maksimum 45°C olması gerektiği belirtilmiştir (TSE 2005). 26°C ortam sıcaklığında yapılan testler deneysel metotlar ile de doğrulanmıştır.

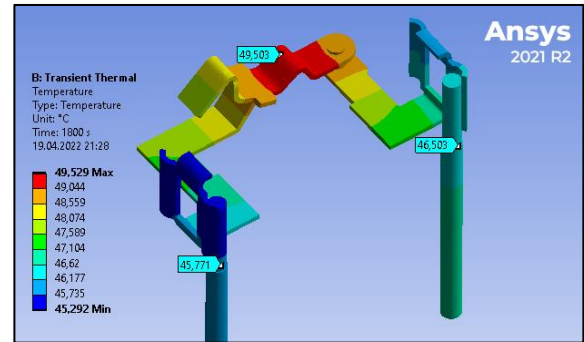


Şekil 26. Numune 1 için 1800 saniyelik analiz sonunda iletken yüzeylerinde oluşan sıcaklıklar

1800 saniye boyunca kablo girişlerinde meydana gelen ısınma grafiği Şekil 27’de belirtilmiştir.

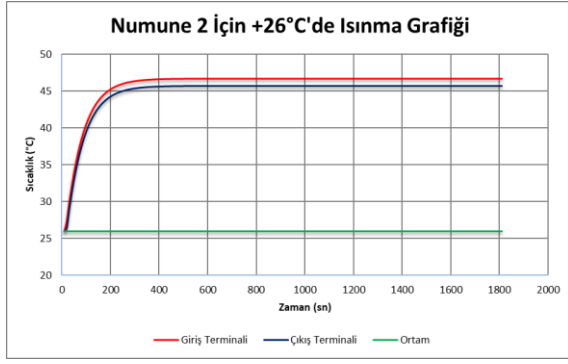


Şekil 27. Numune 1 giriş-çıkış terminallerinde meydana gelen sıcaklık artışı grafiği

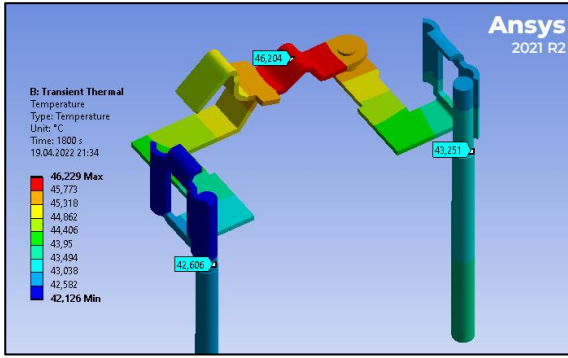


Şekil 28. Numune 2 için 1800 saniyelik analiz sonunda iletken yüzeylerinde oluşan sıcaklıklar

1800 saniye boyunca kablo girişlerinde meydana gelen ısınma grafikleri Şekil 29’da belirtilmiştir.

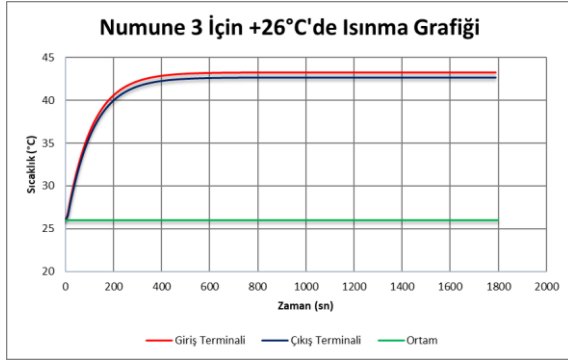


Şekil 29. Numune 2 giriş-çıkış terminallerinde meydana gelen sıcaklık artışı grafiği



Şekil 30. Numune 3 için 1800 saniyelik analiz sonundaki iletken yüzeylerindeki oluşan sıcaklıklar

1800 saniye boyunca kablo girişlerinde meydana gelen ısınma grafiği Şekil 31'de belirtilmiştir.



Şekil 31. Numune 3 giriş-çıkış terminallerinde meydana gelen sıcaklık artışı grafiği

Analizlerin son saniyesinde (1800. sn) kablo girişlerinde oluşan maksimum sıcaklık değerleri ve parçaların ilk sıcaklığına göre artış seviyeleri (ΔT) Çizelge 6'da belirtilmiştir.

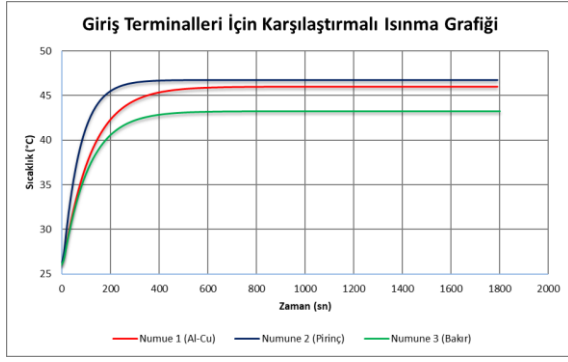
Çizelge 6. Üç farklı numunenin sıcaklık artışı analiz verileri tablosu

Ürün	Ortam Sıcaklığı (°C)	Giriş Kablosu Sıcaklığı (°C)	Çıkış Kablosu Sıcaklığı (°C)	Giriş Kablosu Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)	Çıkış Kablosu Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)
Numune 1	+26	45,903	44,981	19,903	18,981
Numune 2	+26	46,503	45,771	20,503	19,771
Numune 3	+26	43,251	42,606	17,251	16,606

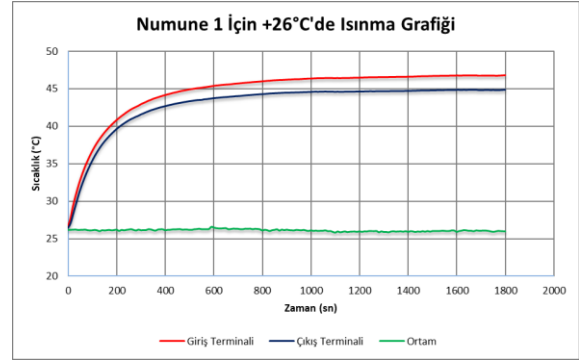
Tablodaki verilere göre;

- Üç farklı numune için sıcaklık değişimleri (ΔT) hiçbir ortam sıcaklığı için 45°C değerini aşmamış hatta yaklaşmamıştır.
- Sıcaklık değerleri standart açısından uygundur.
- Herhangi bir ilave geliştirmeye ihtiyaç duyulmadan deneysel metotlar ile doğrulama aşamasına geçilebilir.
- Sıcaklığın giriş terminalinde daha yüksek olmasının nedeni; iletim yolu üzerindeki en yüksek sıcaklığa sahip orta kontak bölgesinin giriş terminaline daha yakın olmasıdır.
- Bu ısınma verileri, 147°C'de erimeye başlayan polikarbonat (PC) yalıtkan plastik parça (Int Kyn. 6) için herhangi bir sorun teşkil etmeyeceği çıkarımı yapılmıştır.
- En az ısınanın bakır, en çok ısınan hammaddenin ise pirinç olduğu karşılaştırma grafiklerinde açıkça görülmektedir. Al-Cu bimetal ise ısınma karşılaştırmasında mevcutta kullanılmakta olan bakır ve pirincin arasında yer almıştır. Aynı elektrik yükü altında (13,5A) böylesine farklı ısınma veri elde edilmesi bakır, alüminyum ve pirincin Çizelge 4'te belirtilen ısı ve elektriksel iletkenlik özellikleri ile açıklanabilir. Elektriksel ve ısı iletkenliği daha iyi olan hammaddeler daha az ısınırken, nispeten daha kötü hammaddeler daha çok ısınmaktadır.

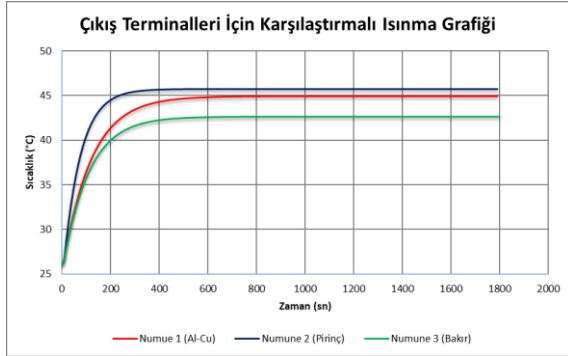
Üç farklı numuneye ait ısınma analizi verileri ile oluşturulmuş giriş terminali sıcaklık artış karakteristiği karşılaştırma grafiği Şekil 32'de, çıkış terminaleri karşılaştırma grafiği ise Şekil 33'te paylaşılmıştır.



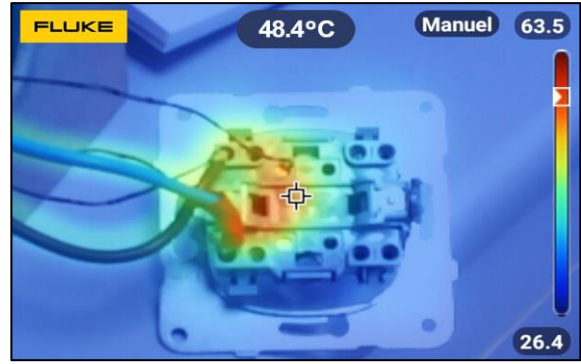
Şekil 32. Üç farklı numuneye ait giriş terminallerinin +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği analiz verilerinin karşılaştırma grafiği



Şekil 34. Numune 1'in aşırı akım testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 33. Üç farklı numuneye ait çıkış terminallerinin +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği analiz verilerinin karşılaştırma grafiği



Şekil 35. Numune 1'in aşırı akım testi sonundaki termal kamera görüntüsü

3.2. Deneysel Doğrulama Çalışması

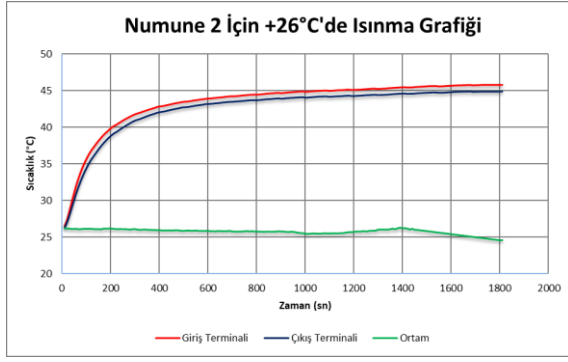
Aynı özelliklere sahip üç adet elektriksel anahtara, TS EN 60669-1 standardınının 17. maddesi uyarınca 1 metre boyundaki 2,5 mm² kesitli bakır som kablo ile akım kaynağına bağlanarak 13,5A aşırı akım uygulanmıştır (TSE 2005). Test tam 30 dakika sürmüştür.

Test süresince her 10 saniyede bir sıcaklık ölçümü alınmıştır. Aynı zamanda ölçümlerin güvenilirliğini artırmak için aynı özelliklere sahip 3 adet numune eşzamanlı olarak teste sokulmuş ve grafiğe 3 ayrı üründen alınan sıcaklık verilerinin ortalaması aktarılmıştır. Test edilen Numune 1, Numune 2 ve Numune 3 isimli ürünlere ait sıcaklık-zaman grafikleri sırasıyla paylaşılmıştır.

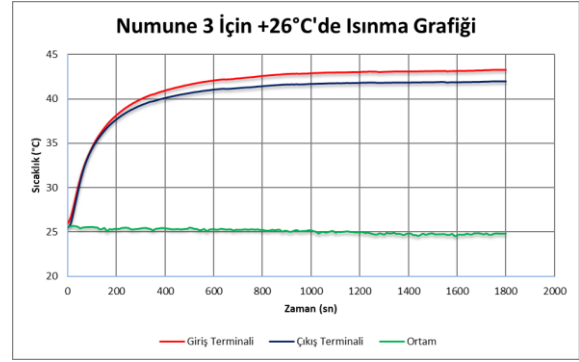
1800 saniyelik testin sonunda terminal bağlantı uçlarındaki sıcaklık maksimum seviyeye gelerek kararlı bir durum sergilemiştir. Deney sonunda kablo bağlantı terminallerinde ölçülen sıcaklıklar Çizelge 7'de belirtilmiştir. Bu tabloda aynı zamanda, teorik olarak hesaplanan analiz verilerine de yer verilmiş ve sapma oranları da belirtilmiştir.

Çizelge 7. Numune 1 için teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırma tablosu

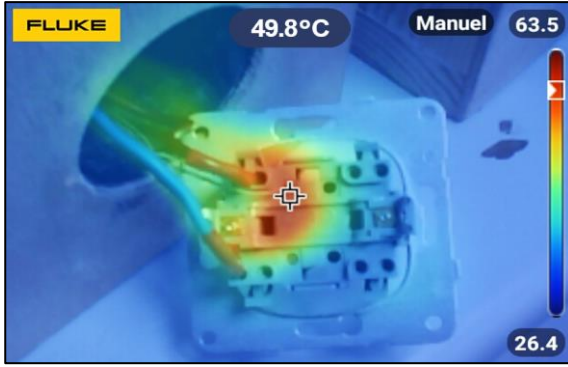
Ürün	Ortam Sıcaklığı (°C)	Giriş Kablosu Sıcaklığı (°C)	Çıkış Kablosu Sıcaklığı (°C)	Giriş Kablosu Sıcaklık Değişimi (ΔT, °C)	Çıkış Kablosu Sıcaklık Değişimi (ΔT, °C)
Numune 1 (Deneysel)	+26,03	46,75	44,85	20,72	18,82
Numune 1 (Analiz)	+26	45,903	44,981	19,903	18,981
Sapma Oranı	-	%1,85	%0,29	%4,10	%0,85



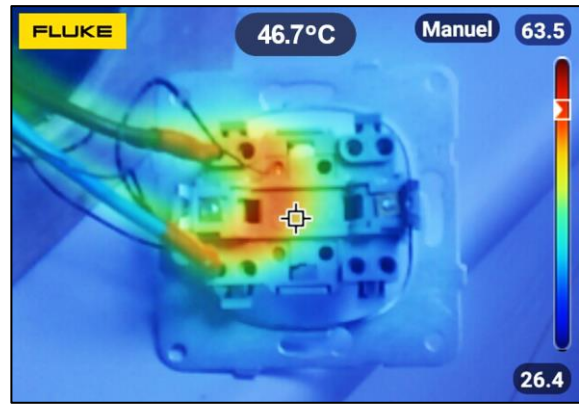
Şekil 36. Numune 2'nin aşırı akım testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 38. Numune 3'ün aşırı akım testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 37. Numune 2'nin aşırı akım testi sonundaki termal kamera görüntüsü



Şekil 39. Numune 3'ün aşırı akım testi sonundaki termal kamera görüntüsü

Yarım saatlik sıcaklık artış testi neticesinde terminal bağlantı uçlarındaki sıcaklık maksimum seviyeye geldiği gözlemlenmiştir. Numune 2'nin (pirinç) deney sonunda kablo bağlantı terminallerinde ölçülen sıcaklıklar Çizelge 8'de belirtilmiştir. Tabloda, teorik olarak hesaplanan analiz verilerine de yer verilmiş ve sapma oranları da belirtilmiştir.

Çizelge 8. Numune 2 için teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırma tablosu

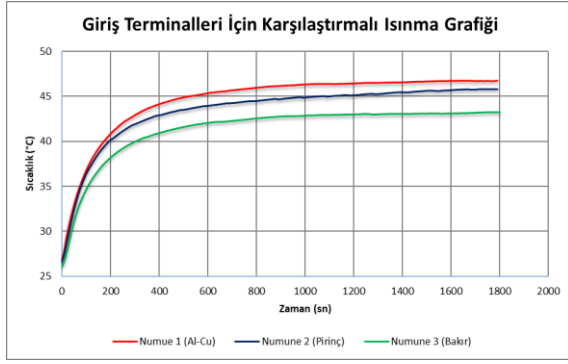
Ürün	Ortam Sıcaklığı (°C)	Giriş Kablosu Sıcaklığı (°C)	Çıkış Kablosu Sıcaklığı (°C)	Giriş Kablosu Sıcaklık Değişimi (ΔT, °C)	Çıkış Kablosu Sıcaklık Değişimi (ΔT, °C)
Numune 2 (Deneysel)	+26,35	48,98	48,04	22,63	21,69
Numune 2 (Analiz)	+26	46,503	45,771	20,503	19,771
Sapma Oranı	-	%5,33	%4,96	%10,37	%9,71

Numune 3'e (bakır) uygulanan sıcaklık artış testi sonunda terminal bağlantı uçlarındaki sıcaklık en kararlı seviyeye ulaşmıştır. Deney sonunda kablo bağlantı terminallerinde ölçülen sıcaklıklar Çizelge 9'da belirtilmiştir.

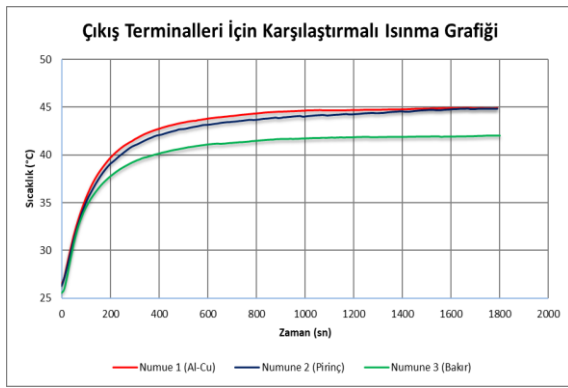
Çizelge 9. Numune 3 için teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırma tablosu

Ürün	Ortam Sıcaklığı (°C)	Giriş Kablosu Sıcaklığı (°C)	Çıkış Kablosu Sıcaklığı (°C)	Giriş Kablosu Sıcaklık Değişimi (ΔT, °C)	Çıkış Kablosu Sıcaklık Değişimi (ΔT, °C)
Numune 3 (Deneysel)	+26,32	45,46	44,51	19,14	18,19
Numune 3 (Analiz)	+26	43,251	42,606	17,251	16,606
Sapma Oranı	-	%5,11	%4,47	%10,95	%9,54

Üç farklı numuneye ait ısınma testi ölçüm verileri ile oluşturulmuş giriş terminali sıcaklık artış karakteristiği karşılaştırma grafiği Şekil 4.40'ta, çıkış terminaleri karşılaştırma grafiği ise Şekil 41'de paylaşılmıştır.



Şekil 40. Aşırı akım testinde, üç farklı numuneye ait giriş terminalerinin yaklaşık +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği test verilerinin karşılaştırma grafiği



Şekil 41. Aşırı akım testinde, üç farklı numuneye ait çıkış terminalerinin yaklaşık +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği test verilerinin karşılaştırma grafiği

TS EN 60669-1 standardının 17. maddesinde geçen “Bağlantı uçlarının sıcaklık artışıdaki fark (ΔT), 45°C değerini aşmamalıdır.” ibaresi uyarınca yapılan hesaplamalarda, terminal sıcaklıklarından ortam sıcaklığı çıkarılarak sıcaklık artış miktarları bulunmuştur. Teorik ve deneysel sonuçların birbiri ile çok küçük bir sapma oranı içerisinde örtüştüğü gözlemlenmiştir. Sıcaklığın giriş terminalinde daha yüksek olmasının nedeni; iletim yolu üzerindeki en yüksek sıcaklığa sahip olan orta kontak bölgesinin giriş terminaline daha yakın olmasıdır. En sıcak nokta olan orta kontağa daha uzak mesafede kalan çıkış terminalinin durgun hava ile temas eden yüzeylerin fazla olması ve iletim yolunun uzun olması nedeniyle daha az ısındığı gözlemlenmiştir. Szulborski vd. (2021) yapmış olduğu çalışmada; yine bir elektriksel anahtarlama elemanı olan otomatik sigortanın analiz ve testlerinde orta kontağa yakın

mesafede olan giriş terminalinin daha fazla ısınırken, nispeten daha uzak mesafede kalan çıkış terminalerinde daha az sıcaklık artışı meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Al-Cu, pirinç ve bakır gibi üç farklı hammadde ile oluşturulmuş numunelerin analiz ve testlerinde terminal bağlantı kablosu olarak bakır kablo kullanılmıştır. Giriş terminali ve hareketli terminaller üzerinde birer adet gümüş kontak kullanılmıştır. Tüm numuneler 13,5A elektriksel yük altında test edilmiştir. Yani iletken kısımlarda sabitler gümüş kontak, bakır kablo ve 13,5A akım iken, değişkenler terminal hammaddeleridir. Test sonuçlarındaki sıcaklık miktarlarına bakarak hammaddelerin direnç, termal ve elektriksel iletkenlikleri üzerine yorum yapılabilir. Çizelge 4’teki termal ve elektriksel iletkenlik verileri incelendiğinde iletkenlik sıralaması şu şekildedir; bakır>Al-Cu>pirinç. Test sonuçlarına bakıldığında ise bakır, Al-Cu ve pirincin en yüksek sıcaklıkları sırasıyla şu şekildedir; 45,46°C, 46,75°C, 48,98°C. Bu sonuçlardan yola çıkarak test sonuçlarının doğruluğu konusunda emin olunmuştur.

Yapılan testler neticesinde, Al-Cu bimetal hammadde ile üretilmiş giriş-çıkış terminalerinin standardın ilgili maddesine uygun olduğu ve aşırı akım ile yapılan sıcaklık artışı testlerini başarıyla geçtiği gözlemlenmiştir. Mevcutta kullanılmakta olan pirinç ve bakır hammaddeler ile hazırlanan numunelerin de testlerden başarıyla geçtiği gözlemlenmiştir.

4. Sonuç

Mevcut durumda yapı sektöründe estetik amaçlarla kullanılan ve bu çalışmanın başrolü olan Al-Cu bimetal kompozit alternatif hammaddesinin; temin edilebilirlik, şekil verilebilirlik, uluslararası standartlara uygunluk, ısı ve elektriksel iletkenlik gibi başlıca gereklilikleri sağladığı tespit edilmiş ve elektriksel anahtarlarda iletken olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Geleneksel hammaddelere alternatif olarak düşünülerek analiz ve testlere tabi tutulan Al-Cu bimetalik hammaddesinin uluslararası standartlara uygunluk sağladığı gözlemlenmiştir. Analiz ve testlerde yapılan doğrulama çalışmasında ilgili hammaddenin standartta belirtilen maksimum 45°C kadar izin verilen sıcaklık değişimi testlerinden başarıyla geçtiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda mevcutta kullanılmakta olan pirinç ve bakır ile mukayese edilerek; iletkenlik performansı olarak pirinç ve bakırın arasında konumlandırılmıştır. Mukavemet olarak pirinç ve bakır kadar rijit bir yapısı olmaması nedeniyle, aşırı kuvvete maruz kalmayacak bölümlerde (çabuk bağlantı terminalleri gibi) iletken olarak kullanılabilir olarak düşünülmektedir. Ya da alüminyuma ısıl işlem uygulayarak mukavemetinin artması sağlanabilir.

Üç farklı hammadde konfigürasyonu (Al-Cu, pirinç ve bakır) ile oluşturulmuş ürün dataları, ilgili standardın 17. maddesi uyarınca belirlenen sınır şartları dahilinde multi-fizik simülasyonlara tabi tutulmuş ve laboratuvar testleri yapılmadan önce sıcaklık artış miktarları ile alakalı teorik sonuçlara ulaşılmıştır. Simülasyon verilerine göre en yüksek sıcaklık artışı 20,5°C ile pirinç numunede, en düşük sıcaklık artışı 17,25°C ile bakır numunede gözlemlenmiştir. Al-Cu numunede ise 19,9°C kadar sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Hiçbir numune maksimum 45°C miktarını aşmamış olup numunelerin tamamı standart açısından uygundur. Simülasyonlardan sonra laboratuvar ortamında doğrulama testleri yapılmış ve testlerde simülasyon verilerine çok yakın sonuçlar alınmıştır. Test sonuçlarına göre en yüksek sıcaklık artışı meydana gelen pirinç numunede 22,63°C, en düşük sıcaklık artışı meydana gelen bakır numunede 19,14°C ve Al-Cu numunede ise 20,72°C kadar sıcaklık artışı gözlemlenmiştir. Sırasıyla pirinç, Al-Cu ve bakır için analiz-deneysel veri sapma miktarları şu şekildedir; %10,37, %4,10 ve %10,95. Bu verilere göre hiçbir numune maksimum 45°C miktarını aşmamıştır ve numunelerin tamamı standart açısından uygundur. Direncin ısınma ile doğru, iletkenlik ile ters orantılı olduğu bilinmektedir. Bu bilgiler ve test sonuçlarından yola çıkılarak hammaddelerin

iletkenlik miktarları için bakır>Al-Cu>pirinç sıralaması yapılabilir. Aynı zamanda bu sonuçların Çizelge 4'te belirtilen iletkenlik verileri ile örtüştüğü gözlemlenmiş ve doğrulanmıştır. Numunelerde sıcaklığın giriş terminallerinde çıkış terminaline oranla yaklaşık %2 daha yüksek olmasının nedeni; iletim yolu üzerindeki en yüksek sıcaklığa sahip olan orta kontak bölgesinin giriş terminaline daha yakın olmasıdır. En sıcak nokta olan orta kontakta daha uzak mesafede kalan çıkış terminalinin durgun hava ile temas eden yüzeylerin fazla olması ve iletim yolunun uzun olması nedeniyle daha az ısındığı gözlemlenmiştir. Szulborski vd. (2021) yapmış olduğu çalışmadaki veriler ile kıyaslanarak bu çıkarımın doğruluğu ispatlanmıştır.

Sonuç olarak; Al-Cu bimetalik hammaddesi standartlarda geçen ve en belirleyici test olan aşırı akım testlerinden başarıyla geçmiş olup, piriince göre daha iyi bir iletken fakat daha zayıf mekanik değerlere sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bakırla mukayese edildiğinde ise, iletkenlik değerlerinin bakıra göre daha düşük olduğu ve bu nedenle bakır numunelerden daha fazla ısındığı gözlemlenmiştir. Yine mukavemet değerleri de bakırın gerisinde ve iyileştirmeye ihtiyaç duyar haldedir. Sonuç olarak Al-Cu bimetal iletkeninin, konut tipi elektrikli anahtar ürünlerde kullanılabilir olduğu kanısına varılmıştır.

5. Kaynaklar

- Aker, A., Nair, F., Yıldırım, İ., & Kaya, H., 2019. Al-Cu Ötektik Alaşımına Ag, Zn Ve Sn Katkılanmasının Mekanik Ve Elektriksel Özelliklere Etkisinin Araştırılması. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1115-1125.
- Badur, Ö. 1978. Elektrik Kumanda Devreleri. Milli Eğitim Gençlik ve Spor Bakanlığı Yayınları.
- Çengel, Y., Ghajar, A., 2014. Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications (5. Baskı b.). McGraw-Hill Education.
- Gök, M., 2010. B₂O₃ Katkılı Kontak Malzemesi Üretimi ve Özelliklerinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 90.

- Gözel, H. T., 2022. Al-Cu Bimetal Kompozitlerinin Elektrik Anahtarlarında İletken Olarak Kullanılabilirliğinin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Sakarya, 135.
- IEC, 2005. IEC 60669-1. Switches for household and similar fixed electrical installations - Part 1: General requirements.
- IEC, 2021. IEC 60584-3 / Thermocouples - Part 3: Extension and compensating cables - Tolerances and identification system.
- MEB, 2011. Elektrik-Elektronik Teknolojisi - Elektriğin Temel Esasları. Milli Eğitim Bakanlığı Yayınları.
- Szulborski, M., Sebastian, L., Łukasz K., and Daniel Z., 2021. Transient Thermal Analysis of the Circuit Breaker Current Path with the Use of FEA Simulation. *Energies*, **14**.
- TSE, 2005. TS EN 60669-1. Anahtarlar - Ev ve benzeri yerlerde kullanılan sabit elektrik tesisatları için - Bölüm 1: Genel özellikler.
- Ulutaş, A., Turhan, H. 2017. Toz Metalurjisi İle Üretilen Cu-Feb Kompozit Malzemelerin Mikroyapı Ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi. *Technological Applied Sciences*, 43-52.
- Varol, T., 2022. AA2024 Matrisli B₄C Parçacık Takviyeli Metal Matrisli Kompozitlerin Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretimi ve Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon 170.
- Yıldız, T., Katı, N., Bozkurt, N. 2020. Toz Metalürjisi Yöntemi ile Üretilen Cu-Sn/Ni Kompozitinin Elektriksel İletkenliğine Isıl İşlemin Etkileri. BEÜ Fen Bilimleri Dergisi, 1437-1448.
- İnternet kaynakları**
- 1- <https://blogs.imf.org>, (07.08.2022)
 - 2- <https://copperalliance.org> (17.05.2022)
 - 3- <https://www.lme.com> (22.07.2022)
 - 4- <http://w3.bilecik.edu.tr> (14.08.2022)
 - 5- <https://instrumentationtools.com> (02.05.2022)
 - 6- <https://www.bayermaterialssciencenafta.com> (03.09.2022)