

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**AL-CU BİMETAL KOMPOZİTLERİNİN ELEKTRİK
ANAHTARLARINDA İLETKEN OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin Tunahan GÖZEL

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
Tez Danışmanı : Doç. Dr. İdris CESUR

Haziran 2022

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

AL-CU BİMETAL KOMPOZİTLERİNİN ELEKTRİK
ANAHTARLARINDA İLETKEN OLARAK
KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hüseyin Tunahan GÖZEL

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 27/06/2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Doç. Dr. Akın Oğuz KAPTI	BAŞARILI
Üye: Doç. Dr. İdris CESUR	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğretim Üyesi Fatih UYSAL	BAŞARILI

BEYAN

Tez içerisindeki bütün verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başka araştırmacıların çalışmalarından yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun şekilde atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Hüseyin Tunahan GÖZEL

27/06/2022

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim süresince kıymetli bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, her konuda görüş ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm süreçlerde yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. İdris Cesur'a teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca aldığım tüm kararlarda beni destekleyip her zaman yanımda olan canım annem Şerife Gözel, babam Süleyman Gözel'e, kardeşlerim Aslıhan ve Ahmet Selim Gözel'e teşekkür ederim.

Bu süreçte yaptıkları yönlendirmeler ve verdikleri destekler için değerli eski yöneticim Dr. Mehmet Onur Yağır'a, kıymetli dostlarım; Yüksek Yangın Uzmanı Fatih Şahin'e, Yüksek Makine Mühendisi İsmail Hakkı Saldamlı'ya, senarist Mustafa Tarık Ötgen'e, yönetmen Bilal Petek ve eşi Sabahat Petek'e ve tarih araştırmacısı M. Nureddin Özel'e teşekkür ederim. Yine değerli dostlarım; kıdemli Bilgisayar Mühendisi Süleyman Balaban'a Makine Mühendisi Burhan Özudoğru'ya ve teşekkür ederim.

Sürecin başından beri desteklerini esirgemeyen değerli yöneticilerim Panasonic Electric Works Türkiye Mekanik Ar-Ge Müdürü Savaş Kalaca ve Mekanik Tasarım Sorumlusu Cenk Kaan Şahnalı'ya, Elektronik Ar-Ge Tasarım Sorumlusu Yiğit Öztürk'e, Ürün Planlama Sorumlusu Müge Buksur'a, Kalite Laboratuvarı çalışanları Kenan Akdağ, Mehmet Yerlikaya, Mutlu Yazıbaşı, Serkan Kıyak ve Mehmet Eser'e teşekkürü borç bilirim.

Son olarak da, bu çalışmanın maddi açıdan desteklenmesine olanak sağlayan Panasonic Electric Works Türkiye ve akademik çalışmalarını teşvik etmek amacıyla Ansys analiz programının öğrenci sürümünü ücretsiz kullanıma sunan Ansys Inc. şirketine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

BEYAN.....	iv
TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	iv
SİMGELER	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	xi
SUMMARY	xii

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	4
1.2. Literatür Araştırması Sonrası Yapılan Çıkarımlar	12

BÖLÜM 2.

GENEL BİLGİLER.....	14
2.1. Elektrik	14
2.2. Elektrik Anahtarları	15
2.2.1. Hızlı kesme anahtarı	16
2.2.2. Toggle anahtarı	17
2.2.3. Basmalı düğme anahtarları	20
2.2.4. Devirmeli anahtarlar	22
2.2.5. Kısmi anahtarları	24
2.2.6. Dokunmatik anahtar	26
2.2.7. Temassız anahtarlar	27
2.3. Elektriksel İletkenler	28
2.3.1. İletkenlik ve direnç kavramları	29
2.3.2. Kompozit ve geleneksel iletkenler	30
2.4. Elektriksel yalıtkanlar.....	37
2.5. Elektrik Arkı.....	38
2.6. Elektriksel Ürün Standartları.....	44

2.6.1. IEC'nin amaçları	45
2.6.2. IEC'nin hedefleri	45
2.7. RoHS Direktifi	46
 BÖLÜM 3.	
MODELLEME VE ANALİZ.....	47
3.1. Teorik Termal Model	47
3.2. Elektrik Anahtarı 3D Modeli.....	54
3.3. Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) Simülasyonları	55
3.3.1. Elektriksel kaynaklı ısı oluşumu simülasyonları.....	55
3.3.2. 3 Farklı numune için maxwell 3D analiz ve sonuçları	61
3.3.3. Zamana bağlı sıcaklık artışı simülasyonları	64
3.3.4. 3 Farklı numune için transient thermal analiz sonuçları ve karşılaştırması	69
 BÖLÜM 4.	
DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE TARTIŞMA.....	78
4.1. Öncül Testler	78
4.1.1. Çekme testi	78
4.1.2. Sertlik ölçümü	83
4.1.3. Ham madde kimyasal analiz	84
4.2. Standart Testleri	85
4.2.1. Aşırı akım testleri	89
4.2.2. Elektrik yükü altında mekanik ömür testi	95
4.2.3. Ömür testi sonrası sıcaklık artışı testi	100
4.2.4. İzolasyon testi.....	107
 BÖLÜM 5.	
SONUÇ VE ÖNERİLER.....	112
 KAYNAKÇA	115

KISALTMALAR

ABS	: Akrilonitril Bütadien Stiren
AC	: Alternatif Akım
BMC	: Dökme Kalıplama Bileşiği (Kompoziti)
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım
CAE	: Bilgisayar Destekli Mühendislik
DC	: Doğru Akım
FEA	: Sonlu Elemanlar Analizi
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
ITS	: Uluslararası Sıcaklık Ölçeği
NC	: Normalde Kapalı
NO	: Normalde Açık
PA6/66	: Polyamid 6/66
PBT	: Polibütilen Tereftalat
PC	: Polikarbonat
PC/ABS	: Polikarbonat/Akrilonitril Bütadien Stiren
PP	: Polipropilen
RoHS	: Tehlikeli Maddelerin Kısıtlanması Direktifi
SF6	: Kükürt Hekzaflorür
SMC	: Sac Kalıplama Bileşiği (Kompoziti)
TPE	: Termoplastik Elastomer
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
WEEE	: Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman Yönergesi

SİMGELER

ρ	: Yoğunluk
A_s	: Yüzey Alanı
$\dot{Q}$	: Isı Taşınım Miktarı
T_∞	: Ortam Sıcaklığı
T_s	: Yüzey Sıcaklığı
A	: Amper
h	: Doğal Taşınım Katsayısı
I	: Akım
I_n	: Nominal Akım
J	: Akım Yoğunluğu
P	: Güç
R	: Direnç
t	: Zaman
V	: Voltaj
W	: Watt
ΔT	: Sıcaklık Değişimi
Ω	: Ohm

TABLolar LİSTESİ

Tablo 1.1: Farklı tip araçların bakır kullanım oranı	2
Tablo 1.2: Bakır maliyetlerindeki değişim tablosu	2
Tablo 1.3: Bakır kullanımındaki gelecek 10 yıllık artış öngörüsü	3
Tablo 3.1: Tipik konveksiyon ısı transfer katsayısı değerleri	51
Tablo 3.2: Numunelerde kullanılan parçaların ham madde bilgileri	56
Tablo 3.3: Doğal taşınım katsayısı (h) hesaplama verileri	67
Tablo 3.4: Analizde kullanılan parçaların malzeme özellikleri	69
Tablo 3.5: Numune 1'in (Al-Cu) farklı ortam sıcaklıklarındaki sıcaklık artış verileri ...	70
Tablo 3.6: Numune 2'nin (Pirinç) farklı ortam sıcaklıklarındaki sıcaklık artış verileri .	72
Tablo 3.7: Numune 3'ün (Bakır) farklı ortam sıcaklıklarındaki sıcaklık artış verileri ...	74
Tablo 4.1: Ham madde çekme testi sonuçları	82
Tablo 4.2: Çekme testi cihazı test ayarları	82
Tablo 4.3: Ham madde sertlik ölçüm verileri	83
Tablo 4.4: Al-Cu, pirinç ve bakır ham madde alaşım oranları	84
Tablo 4.5: J tipi termal çift ölçüm hatalarına dair veriler	86
Tablo 4.6: Numune 1 (Al-Cu) için teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırması	90
Tablo 4.7: Numune 2 (Pirinç) için teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırması	92
Tablo 4.8: Numune 3 (Bakır) için teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırması	93
Tablo 4.9: Ömür testi öncesi ve sonrası direnç verileri karşılaştırma	98
Tablo 4.10: Numune 1 (Al-Cu) sıcaklık artış testi sonuçları	102
Tablo 4.11: Numune 2 (Pirinç) sıcaklık artış testi sonuçları	103
Tablo 4.12: Numune 3 (Bakır) sıcaklık artış testi sonuçları	105
Tablo 4.13: İzolasyon test sonuçları	111

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1: Hızlı kesme teknolojisine sahip olmayan en ilkel anahtar mekanizması.....	16
Şekil 2.2: Holmes tarafından geliştirilen hızlı kesme anahtarı	17
Şekil 2.3: Günümüzde kullanılmakta olan basit bir Toggle anahtarı.....	17
Şekil 2.4: Toggle mekanizmasının şematize edilmiş görseli	18
Şekil 2.5. Yavaş (sol) ve hızlı (sağ) toggle anahtarları	19
Şekil 2.6: Kompakt şalterlerde kullanılan Toggle mekanizması görseli.....	19
Şekil 2.7: Günümüzde kullanılmakta olan bir basmalı düğme anahtarı	20
Şekil 2.8: Farklı tiplerdeki push-button anahtar mekanizmalarının şematize edilmiş görseli	21
Şekil 2.9: 1910-1920 yıllarına ait bir push-button anahtar	21
Şekil 2.10: Viko By Panasonic marka devirmeli anahtar	22
Şekil 2.11: Devirmeli anahtar kontakları açık konumda olup, ürün OFF konumdadır..	23
Şekil 2.12: Devirmeli anahtar kontakları kapalı konumda olup, ürün ON konumdadır.	23
Şekil 2.13: Devirmeli anahtar patlatılmış görünüm	24
Şekil 2.14: Viko By Panasonic marka kısma anahtarı	24
Şekil 2.15: Kısma anahtarı patlatılmış görünüm.....	25
Şekil 2.16: Rotatif, dokunmatik ve push-button kısma anahtarları.....	25
Şekil 2.17: Capsense algılama sistemi	26
Şekil 2.18: Dokunmatik anahtar ve komütatör	27
Şekil 2.19: Viko By Panasonic marka temassız anahtar	27
Şekil 2.20: Temassız anahtar patlatılmış görünüm	28
Şekil 2.21: İletken boyutlarını belirten görsel. A: Kesit Alan, ℓ :Uzunluk.....	29
Şekil 2.22: Bimetal iletkenlerin çalışma prensibi	34
Şekil 2.23: Analiz ve testlerde kullanılan Al-Cu bimetal levha.....	35
Şekil 2.24: Al-Cu bimetal levha üretim prosesi	35
Şekil 2.25: Bimetalik levha kullanılarak alınan metal kalıp baskı numuneleri	36
Şekil 2.26: Polikarbonat (PC) ham madde kullanılarak alınan plastik kalıp baskı numuneleri.....	38
Şekil 2.27: Elektriksel ürünler için arkı uzaklaştırma ve parçalama yöntemlerinden bazıları	39
Şekil 2.28: Ark oluşumunun akım yoğunluğu ile ilişkisini belirten görsel	39
Şekil 2.29: Ark oluşumu nedeniyle kontaklarda oluşan deformasyonlar	40
Şekil 2.30: İki kontak arasındaki arkın şematik yapısı ve katot-anot arasındaki ark voltajı karakteristik eğrisi.....	41
Şekil 2.31: AC arkının iki karakteristik özelliği	42
Şekil 2.32: Bir ark sütunu meydana getiren birleştirilmiş fiziksel süreçler	43
Şekil 3.1: Sıcak bir yüzeyden havaya taşınım ile ısı transferi.....	50
Şekil 3.2: Zorlanmış ve doğal taşınım örnekleri	51

Şekil 3.3: İletken parçaların montaj gösterimi: A-Giriş Terminali, B-Orta Kontak, C-Çıkış Terminali.....	54
Şekil 3.4: Ürünün alt mekanizmasının montaj görünümü	55
Şekil 3.5: Üç farklı numuneye ait 3D model görselleri	56
Şekil 3.6: Malzeme özelliklerini tanımlanması.....	56
Şekil 3.7: Genel mesh özelliklerinin tanımlanması	57
Şekil 3.8: Bölgesel mesh özelliklerinin tanımlanması	57
Şekil 3.9: Giriş akımının tanımlanması.....	58
Şekil 3.10: Gider (sink) tanımlanması	58
Şekil 3.11: Çözücü ayarlarının tanımlanması	59
Şekil 3.12: Validation Check komutu ile analiz öncesi son kontrollerin yapılması	59
Şekil 3.13: Numune 1 (Al-Cu) hesaplamalı iterasyon verileri.....	60
Şekil 3.14: Numune 2 (Pirinç) hesaplamalı iterasyon verileri	60
Şekil 3.15: Numune 3 (Bakır) hesaplamalı iterasyon verileri.....	60
Şekil 3.16: Numune 1 (Al-Cu) için analiz ile hesaplanan akım yoğunluğu (J) verisi	61
Şekil 3.17: Numune 1 (Al-Cu) için analiz ile hesaplanan ohm kayıpları verisi	61
Şekil 3.18: Numune 2 (Pirinç) için analiz ile hesaplanan akım yoğunluğu (J) verisi.....	62
Şekil 3.19: Numune 2 (Pirinç) için analiz ile hesaplanan ohm kayıpları verisi.....	62
Şekil 3.20: Numune 3 (Bakır) için analiz ile hesaplanan akım yoğunluğu (J) verisi.....	63
Şekil 3.21: Numune 3 (Bakır) için analiz ile hesaplanan ohm kayıpları verisi.....	63
Şekil 3.22: Maxwell 3D sonuç verilerinin Transient Thermal modülüne aktarılması.....	64
Şekil 3.23: Mesh ayarlarının tanımlanması.....	65
Şekil 3.24: Parça ilk sıcaklıklarının tanımlanması.....	65
Şekil 3.25: Analiz süresi ve ölçüm adım aralıklarının tanımlanması.....	66
Şekil 3.26: Taşınım katsayısı ve ortam sıcaklığının tanımlanması.....	66
Şekil 3.27: Maxwell 3D'den içeri aktarılan ohm kayıplarının ısı kaynağı olarak tanımlanması	67
Şekil 3.28: Giriş terminalinden analiz süresince anlık veri alabilmek için tanımlanan prob konumu	68
Şekil 3.29: Çıkış terminalinden analiz süresince anlık veri alabilmek için tanımlanan prob konumu	68
Şekil 3.30: Numune 1 (Al-Cu) için 1800 saniyelik analizin sonunda iletken yüzeylerinde oluşan sıcaklıklar	70
Şekil 3.31: Numune 1 (Al-Cu) giriş-çıkış terminallerinde meydana gelen sıcaklık artışı grafığı	71
Şekil 3.32: Numune 2 (Pirinç) için 1800 saniyelik analizin sonunda iletken yüzeylerinde oluşan sıcaklıklar.....	72
Şekil 3.33: Numune 2 (Pirinç) giriş-çıkış terminallerinde meydana gelen sıcaklık artışı grafığı	73
Şekil 3.34: Numune 3 (Bakır) için 1800 saniyelik analizin sonunda iletken yüzeylerinde oluşan sıcaklıklar.....	74
Şekil 3.35: Numune 3 (Bakır) giriş-çıkış terminallerinde meydana gelen sıcaklık artışı grafığı	75
Şekil 3.36: Üç farklı numuneye ait giriş terminallerinin +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği analiz verilerinin karşılaştırma grafığı.....	77
Şekil 3.37: Üç farklı numuneye ait çıkış terminallerinin +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği analiz verilerinin karşılaştırma grafığı.....	77
Şekil 4.1: Çekme testi için hazırlanmış papyon ham madde numuneleri	78

Şekil 4.2: Al-Cu papyon numuneye uygulanan çekme testi görselleri	79
Şekil 4.3: Al-Cu papyon numuneye uygulanan çekme testi kuvvet-uzama grafiği	79
Şekil 4.4: Al-Cu papyon numuneye uygulanan çekme testi görselleri	80
Şekil 4.5: Pirinç papyon numuneye uygulanan çekme testi kuvvet-uzama grafiği	80
Şekil 4.6: Bakır papyon numuneye uygulanan çekme testi görselleri	81
Şekil 4.7: Bakır papyon numuneye uygulanan çekme testi kuvvet-uzama grafiği	81
Şekil 4.8: Bakır ham maddenin sertlik ölçümü yapılırken ki görseli	83
Şekil 4.9: Bakır numunenin XRF Kimyasal Analiz yapılırken çekilmiş görseli	84
Şekil 4.10: J tipi termal çiftlerin kablo üzerindeki konumunu belirten görsel	86
Şekil 4.11: J ve diğer tipteki termal çiftlerin elektromotor kuvveti-sıcaklık grafiği	87
Şekil 4.12: Elektrik anahtarının test edilen akım devresi için ölçüm sisteminin şeması	88
Şekil 4.13: Aşırı akım testi uygulanan anahtar ürünlerinin test ve ölçüm düzeneği	88
Şekil 4.14: Numune 1'in (Al-Cu) aşırı akım testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği	89
Şekil 4.15: Numune 1'in (Al-Cu) aşırı akım testi sonundaki termal kamera görüntüsü	90
Şekil 4.16: Numune 2'nin (Pirinç) aşırı akım testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği	91
Şekil 4.17: Numune 2'nin (Pirinç) aşırı akım testi sonundaki termal kamera görüntüsü	91
Şekil 4.18: Numune 3'ün (Bakır) aşırı akım testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği	92
Şekil 4.19: Numune 3'ün (Bakır) aşırı akım testi sonundaki termal kamera görüntüsü	93
Şekil 4.20: Aşırı akım testinde, üç farklı numuneye ait giriş terminallerinin yaklaşık +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği test verilerinin karşılaştırma grafiği	94
Şekil 4.21: Aşırı akım testinde, üç farklı numuneye ait çıkış terminallerinin yaklaşık +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği test verilerinin karşılaştırma grafiği	94
Şekil 4.22: Elektrik anahtarı ömür test cihazı ve ayar-takip ekranı	96
Şekil 4.23: Ömür testi boyunca iletkenlerden geçen akım değişiminin bir dakikalık kesitini belirten grafik	97
Şekil 4.24: Ömür testi esnasında ON konumdayken (Akım 10A)	97
Şekil 4.25: Ömür testi esnasında ürün OFF konumdayken (Akım 0A)	97
Şekil 4.26: Numune 1 (Al-Cu) ömür testi sonrasında çekilmiş kontak görselleri	99
Şekil 4.27: Numune 2 (Pirinç) ömür testi sonrasında çekilmiş kontak görselleri	99
Şekil 4.28: Numune 3 (Bakır) ömür testi sonrasında çekilmiş kontak görselleri	99
Şekil 4.29: Ömür testi sonrasında yapılan sıcaklık artışı test düzeneği	100
Şekil 4.30: Numune 1'in (Al-Cu) sıcaklık artışı testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği	101
Şekil 4.31: Numune 1'in (Al-Cu) sıcaklık artışı testi sonundaki termal kamera görüntüsü	101
Şekil 4.32: Numune 2'nin (Pirinç) sıcaklık artışı testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği	102
Şekil 4.33: Numune 2'nin (Pirinç) sıcaklık artışı testi sonundaki termal kamera görüntüsü	103
Şekil 4.34: Numune 3'ün (Bakır) sıcaklık artışı testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği	104

Şekil 4.35: Numune 3'ün (Bakır) sıcaklık artışı testi sonundaki termal kamera görüntüsü	104
Şekil 4.36: Ömür testi sonrası sıcaklık artış testlerinde, üç farklı numuneye ait giriş terminallerinin yaklaşık +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği test verilerinin karşılaştırma grafiği	106
Şekil 4.37: Ömür testi sonrası sıcaklık artış testlerinde, üç farklı numuneye ait çıkış terminallerinin +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği analiz verilerinin karşılaştırma grafiği	106
Şekil 4.38: Numunelerin izolasyon testi için hazırlık süreci	107
Şekil 4.39: Numunenin tüm bağlantılarının yapılarak izolasyon test kabine konumlandırılması.....	108
Şekil 4.40: Kontaklar arası izolasyon testi için yapılan kablo bağlantısı.....	109
Şekil 4.41: Ürünün 1500V izolasyon testinden geçtiğini belirten görsel.....	109
Şekil 4.42: İletkenler ve yalıtkan yüzeyler arası izolasyon testi için yapılan kablo bağlantısı	110
Şekil 4.43: Ürünün 2800V izolasyon testinden geçtiğini belirten görsel.....	110

AL-CU BİMETAL KOMPOZİTLERİNİN ELEKTRİK ANAHTARLARINDA İLETKEN OLARAK KULLANILABİLİRLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Elektrik anahtarlarında iletken olarak çoğunlukla bakır ve pirinç hammaddeler tercih edilmektedir. 2019’da başlayan küresel hadiselerin etkisi sonucu tedarik zincirinin bozulması ve aynı zamanda da elektrikli araç sektörünün de hızla gelişmesi nedeniyle bakır ve pirinç ham madde arzı talepleri karşılayamaz hale gelmiştir. Bakır ve pirinç gibi gelenekselleşmiş ham maddelerin artan maliyetleri ve tedarik edilebilirliğinin zorlaşması nedeniyle daha kolay temin edilebilir iletken ham maddeler için araştırmalar yapılmaktadır. Bu tez çalışmasında da, bakır ve pirince alternatif olacağı düşünülen daha düşük maliyetli Al-Cu bimetallik kompozit ham maddesinin konut tipi elektrik anahtarlarında kullanılabilirliği teorik ve deneysel olarak araştırılmıştır.

Al-Cu bimetallik kompozit alternatif ham maddesi; temin edilebilirlik, şekil verilebilirlik, uluslararası elektrik standartlarına uygunluk, ısı ve elektriksel iletkenlik gibi başlıca gereklilikleri karşılayacağı öngörülmüş ve elektriksel anahtarlarda iletken olarak kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Tez iki aşamadan oluşmaktadır. Araştırmanın birinci aşamasında teorik termal analizler yapılmıştır. Termal analizler, Ansys Electronics Maxwell 3D ve Ansys Workbench Transient Thermal modülleri kullanılarak multi-fizik simülasyonu şeklinde gerçekleştirilmiştir. Teorik olarak yapılan simülasyon çalışmalarında; yeni iletken Al-Cu bimetallik ile mevcutta kullanılan iletkenler olan bakır ve pirincin elektrik akımı altındaki ısınma karakteristikleri incelenmiştir. Tezin ikinci aşamasında ise deneysel çalışmalar yapılarak teorik çalışmaların doğrulaması ve uluslararası elektrik standartlarına uygunluğunu kontrol için bir dizi test yapılmıştır. Üç farklı ham maddeye öncelikle; çekme, sertlik, XRF kimyasal analizler yapılmıştır. Daha sonra bu hammaddeler kullanılarak oluşturulmuş üç farklı numuneye uluslararası elektrik standartları gereği uygunluk testleri uygulanmıştır. Bu testler ise sırasıyla; aşırı akım testi, elektrik yükü altında ömür testi, sıcaklık artış testi ve izolasyon testleridir. Yapılan testlerin sonuçları, teorik-deneysel ve ham maddelerin birbirleri ile karşılaştırılması şeklinde sunulmuştur.

Yapılan analiz ve testler sonunda Al-Cu bimetallik ham maddesinin elektrik anahtar standartlarını sağladığı ve iletken olarak kullanılabilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Alüminyum (Al) iletken, bakır (Cu) iletken, pirinç iletken, bimetallik, elektrik anahtarı

INVESTIGATION OF THE USAGE OF AL-CU BIMETAL COMPOSITES AS CONDUCTORS IN ELECTRIC SWITCHES

SUMMARY

Copper and brass raw materials are mostly preferred as conductors in electrical switches. Due to the deterioration of the supply chain as a result of the global events that started in 2019 and the rapid development of the electric vehicle industry, the supply of copper and brass raw materials has become unable to meet the demands. Due to the increasing costs and difficult supply of traditional raw materials such as copper and brass, more easily available conductive raw materials are being searched. In this thesis, the usability of lower cost Al-Cu bimetallic composite raw material, which is thought to be an alternative to copper and brass, in residential electrical switches was investigated theoretically and experimentally.

Al-Cu bimetal composite alternative raw material; It is predicted that it will meet the main requirements such as availability, formability, compliance with international electrical standards, thermal and electrical conductivity, and its usability as a conductor in electrical switches has been evaluated.

The thesis consists of two stages. In the first stage of the research, theoretical thermal analyzes were made. Termal analizler, Ansys Electronics Maxwell 3D ve Ansys Workbench Transient Thermal modülleri kullanılarak multi-fizik simülasyonu şeklinde gerçekleştirilmiştir. In theoretical simulation studies; The heating characteristics of the new conductor Al-Cu bimetal and the currently used conductors copper and brass under electric current were investigated. In the second stage of the thesis, a series of tests were carried out to verify the theoretical studies and to check their compliance with international electrical standards by conducting experimental studies. First of all, three different raw materials; tensile, hardness, XRF chemical analysis were made. Then, conformity tests were applied to three different samples, which were created using these raw materials, in accordance with international electrical standards. These tests are respectively; over current test, life test under electrical load, temperature rise test and insulation tests. The results of the tests are presented in the form of comparison of theoretical-experimental and raw materials with each other. As a result of the analysis and tests, it was concluded that the Al-Cu bimetallic raw material meets the electrical switch standards and can be used as a conductor.

Keywords: Aluminum (Al) conductor, copper (Cu) conductor, brass conductor, bimetal, electrical switch

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Atom onlarca alt bileşenden oluşsa da maddenin temelde halen en küçük birimi olarak kabul edilmektedir. Elektrik enerjisinin üretilmesi, aktarılması ve kullanımını anlamak için atomun yapısına dair temel seviyede bilgi sahibi olmak gerekmektedir. Bir atom temelde iki kısım ve üç parçacıktan oluşmaktadır (Elektriğin Temel Esasları, 2011). 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 (Elektriğin Temel Esasları, 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 (Griffiths & Preston, 1992). 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. Bir nevi elektrik akması diye adlandırabileceğimiz bu durum iletken metaller vasıtası ile gerçekleşir. Elektrik akımının iletken içerisinde ilerleyerek elektriğin kullanılacağı cihaza ulaşması için anahtarlama devresinin kapalı olması gereklidir, yani kontaklar

birbirine temas ediyor olmalıdır. Kontakları açık olan devrelerde akım geçişi tamamlanamaz, haliyle 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.

Kullanım alanları tahmin edeceğinizden çok fazla olan elektrik anahtarlarında kullanılan ham maddelerin 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 ham madde kullanımını arttırmış ve maliyetlerin artmasına sebebiyet vermiştir (IMF, 2021). Batarya, motor ve iletim hatlarında bol miktarda bakır kullanılan elektrikli araçların yaygınlaşması da bakır ve pirinç maliyetlerini artırmıştır (Uluslararası Bakır Ajansı, 2017).

Tablo 1.1: Farklı tip araçların bakır kullanım oranı (Uluslararası Bakır Ajansı, 2017)

Araç Türü	Bakır Miktarı (Araç/Kg)
İçten Yanmalı Motorlu Araç	23
Hibrit Elektrikli Araçlar (HEV)	40
Şarj Edilebilir Hibrit Araçlar (PHEV)	60
Bataryalı Elektrikli Araçlar (BEV)	83
Hibrit Elektrikli Otobüsler (Ebus BEV)	89
Bataryalı Elektrikli Otobüsler (Ebus BEV)	224-369

2017 bakır fiyatı 5700\$/ton iken, 2022 yılında bakır fiyatı 9362\$/ton seviyesindedir. Bakır maliyetleri globalde 5 yıllık periyotta %64 artmıştır. (Londra Metal Borsası, 2022).

Tablo 1.2: Bakır maliyetlerindeki değişim tablosu (Londra Metal Borsası, 2022)

Yıl	Bakır Maliyeti	Artış Oranı
2017	5700 \$/Ton	64%
2022	9360 \$/Ton	

Tablo 1.3: Bakır kullanımındaki gelecek 10 yıllık artış öngörüsü (Uluslararası Bakır Ajansı, 2017)

Yıl	Bakır Kullanımı	Artış Oranı
2017	185.000 Ton	940%
2027	1.740.000 Ton	

Alternatif bir ham madde arayışına geçmeyi düşünenlere el kitabı niteliğinde olacak bu çalışmada daha öncesinde kullanılmayan Al-Cu bimetal kompozit ham maddesinin kullanılabilir olduğunun ispatı için tabi tutulduğu uluslararası standartları sağlayan deneylerin ve testlerin analizine ve sonuçlarına bakıldığında maliyet, performans verimliliği, tedarik kolaylığı gibi durumlarda avantaj sağladığı gözlemlenmiştir.

Anahtarlar elektrik akımını kesmek ve elektrik enerjisinin iletkenler üzerinden geçerek gerekli faydayı sağlayan elektromekanik ekipmanlar olarak sınıflandırılmıştır. 1884 yılından bu yana kullanılan elektrik anahtarları birçok tasarım ve ham madde değişikliği sonucunda günümüzdeki şeklini almıştır. Anahtarların detaylı tarihçesine çalışmanın genel bilgiler bölümünde ayrıntılı olarak değinilmiştir.

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

Teze konu olan bu çalışmada, elektrik ve elektriksel ürünler hakkında genel hatlarıyla bilgi verilmiş, çalışmanın amacı aktarılmış, mevcutta kullanılmakta olan bakır ve pirinç iletkenlere hangi amaçla alternatif bir ham madde arayışına girildiği anlatılmış ve literatür araştırmasında bu konu özelinde yapılmış bir çalışma olmadığı için benzer çalışmalardan yapılan çıkarımlara değinilmiştir. Elektrik, elektrik anahtarları ve çeşitleri, geleneksel ve alternatif kompozit elektriksel iletkenler, elektriksel yalıtkan polimerler, elektriksel anahtarlama ürünlerindeki ark oluşumu, uluslararası elektrik standartlarının gereklilikleri (IEC-International Electrotechnical Commission) ve elektriksel ürünlerde kullanımı yasak olan materyalleri bildiren RoHS Direktifi (The Restriction of Hazardous Substances Directive) hakkında bilgiler verilmiştir. Daha sonra teorik termal ve 3D CAD model varsayımlarının yapılması, Ansys Electronics Maxwell 3D programında sonlu

elemanlar analizi (FEA) varsayım ve analizlerinin yapılarak Al-Cu bimetal, pirinç ve bakır iletkenlerdeki elektriksel direnç kaynaklı ısınmaların hesaplanması, ardından bu ısınma sonuç verilerinin Ansys Workbench Transient Thermal modülüne aktarılarak belirli bir süre sonundaki iletken sıcaklıklarındaki artış miktarının program tarafından hesaplanması ve sonuçların uluslararası elektrik standart (IEC & TS EN 60669-1) verileri ile karşılaştırılması şeklindedir. Teorik hesaplama ve analiz verileri ile mukayese edebilmek için deneysel metotlarla da gözlemler yapılmıştır. Deneysel olarak öncelikle, kıyaslaması yapılacak olan ham maddeler için; çekme, sertlik ve ham madde kimyasal analizi gibi öncül testler yapılarak ham maddeler hakkında bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır. Sonrasında bu ham maddeler kullanılarak oluşturulmuş üç farklı numune, koşulları uluslararası standartlarca belirlenmiş testlere tabi tutulmuşlardır. Öncelikle aşırı akım testi yapılarak en zorlu şartlar altında iletkenlerin ısınma karakteristiği incelenmiş, ardından numuneler 40.000 kez açma-kapamaya tabi tutularak ömür testi yapılmıştır. Numuneler ömür testi sonunda tekrar sıcaklık testine tabi tutulmuş ve üç farklı ham maddenin tüm bu testler sonundaki davranışları birbirleri ve teorik hesaplamalar ile mukayese edilmiştir. Numune ürünler, en son adım olarak izolasyon testlerine tabi tutulmuş ve numunelerin tamamı bu testleri de başarıyla geçmiş ve Al-Cu bimetal iletkeninin bu ürünlerde kullanılabilir olduğu kanısına varılmıştır. Son olarak da yapılan bu özgün Ar-Ge çalışmasının detaylı özetine ve ilerleyen zamanlarda bu alanda yapılabilecek çalışmalara ışık tutmak için önerilere yer verilmiştir.

Mevcut durumun iyileştirilmesi ve öngörülen ham madde tedarikindeki sıkıntıların aşılması için büyük rol oynayacak Al-Cu bimetal alternatif ham madenin kullanımı ile elektrik anahtarı üretiminde maliyeti uygun, verimliliği yüksek alternatif yeni bir dönem başlatılması hedeflenmektedir.

1.1. Literatür Araştırması

Elektriğin kullanılmaya başlandığı 19. yüzyıldan beri elektrik iletkenleri üzerine birçok çalışma yapılmış ve maliyeti azaltıp kolay temin edilebilirliği sağlamak amacıyla farklı alternatifler üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Bu tez çalışmasında da pirinç ve bakır iletkenlere alternatif olacağı düşünülen Al-Cu bimetal ham maddesinin elektrik anahtarlarında iletken olarak kullanılabilirliği değerlendirilecektir. Yapılan literatür araştırmalarında haddelenerek birleştirilmiş sac metal şeklindeki Al-Cu bimetal ham

maddelerin elektriksel uygulamalarda kullanılmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedendir ki yapılan bu çalışma bimetal ham maddelerin elektriksel iletiminde kullanımı için bundan sonra yapılacak çalışmalara güzel bir örnek ve farklı bir bakış açısı kazandıracaktır.

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 $0,8 \times I_n$, I_n ve $2 \times I_n$ 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, Łapczynski, Kolimas, & Zalewski, 2021).

Aksoy tarafından yapılan çalışmada; elektrik, üretim yerinden son kullanıcıya ulaşana dek birçok süreçten geçmekte ve bu süreçlerde elektrik aktarımının sağlanabilmesi için çokça elektriksel bağlantı gerçekleşmektedir. Elektriksel iletim elemanların uygun olarak bağlanması hem sistemin güvenliği hem de elektrik enerji aktarım kalitesi açısından çok önemlidir. Yapılan bu çalışmada; vida bağlantılı kablo terminalleri (klemensler) ile yapılan kablo eklerinde, vidaya uygulanan yüke bağlı olarak oluşan akım-sıcaklık ilişkisi araştırılmıştır. Problemin modellenerek çözümlenmesinde Comsol Multiphysics programı kullanılmıştır. İlk olarak, vida-iletken teması incelenmiş, daha sonrasında oluşan bu geometri üzerinde elektriksel-termal analiz gerçekleştirilmiştir. Matematiksel modelin doğruluğunu göstermek için deneysel çalışmalar yapılmış ve bu çalışmalar yapılırken konut tipi tesisatlarda kullanılmakta olan iletken ve vida tipleri referans alınmıştır. Vidalı tip klemenslerde vida üzerine uygulanan yüke bağlı olarak iletkendeki

deformasyon (ezilme) miktarı bu durumun akım taşıma kapasitesi üzerine olan etkileri araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar, teorik ve deneysel sonuç verilerinin birbirini doğruladığını göstermiştir (Aksoy, 2018).

Kolimas ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; FEM (sonlu elemanlar yöntemi), elektrikli aletlerin tasarım sürecini açıkça optimize edebilen önemli ve güçlü bir sayısal yöntemdir. Bu yazıda, elektriksiz aletlerin mühendisliğine ve modellemesine yardımcı olmak için Solidworks, COMSOL ve ANSYS gibi FEM araçlarının kullanılması önerilmiştir. Tedarik edilen devre kesici modellerine; ısıtma, elektrik potansiyeli dağılımı, elektrik yükü hızı ve dönüş yolları ile ilgili simülasyonları uygulanmıştır. Elde edilen veriler, Varşova Teknoloji Üniversitesi Kısa Devre Laboratuvarında sağlanan deneysel verilere karşı yan yana konumlandırılmıştır. Teorik yaklaşımın yansıması, deneysel sonuçlarda açıkça belirtilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Gerçeğiyle benzer şekilde modellenen elektriksiz ürünün ilgili bölümleri, belirli koşullar altında test edildiğinde aynı fiziksel özellikleri ve dayanım problemlerini ifade etmiş olup deneysel metodların sonuçlarını tam olarak yansıtmıştır. Ayrıca, elektrik ürün mühendisliği için gerekli olan olgular daha model aşamasında belirlenebilmiştir. Bu çalışmada FEM analizlerinin; malzeme, zaman ve kaynak ekonomisi açısından, tasarım/mühendislik çalışmaları esnasında ne kadar değerli olduğu kanıtlanmıştır (Kolimas, S., Szulborski, & Łapczyński, 2020).

Khazaal ve arkadaşlarının yapmış olduğu bu çalışmada; elektromanyetik ve termal analizleri birleştirmek için iki program, Ansoft Maxwell ve Ansys Workbench paketleri kullanılarak, lehimleme işlemini gerçekleştirmek için indüksiyonlu ısıtma (IH) fırını simüle ve analiz edilmiştir. Ansoft Maxwell paketinin simülasyonu, iş bobini içindeki elektromanyetik alan dağılımını belirlemek ve üç farklı uyarma akımı (100A, 200A ve 300A) ve farklı frekanslar (50 kHz, 75 kHz ve 100 kHz) için Omik kaybı hesaplamak için kullanılmıştır. Ansys Workbench paketi ile simülasyon, iş parçası içindeki sıcaklık dağılımını ve gerekli iş bobini akımını ve frekansını belirlemek için iki bakır iş parçasının sıcaklığını sadece iki dakika içinde 1000'e (erime noktasının (1083) altına) yükseltmek için kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, laboratuvarda yapılan pratik lehimleme işlemi ile iyi bir şekilde eşleştirilmiştir (Khazaal, Abdulbaqi, & Thejel, 2017).

Yazıcıoğlu tarafından yapılan çalışmada maliyet avantajı nedeniyle Türkiye ve dünyada çokça tercih edilen bir elektriksel iletken olan alüminyumun genel özellikleri araştırılmış olup; farklı kompozisyondaki alüminyum alaşımlar ve bakır kaplamalı alüminyum numuneler mekanik ve elektriksel testlere tabi tutulmuştur. Alüminyum kablo bağlantı noktalarında oluşan aşırı ısınma ve ark bertaraf etmek için farklı denemeler yapılmıştır. Sonuç olarak; diğer seri alüminyumların 1000 serisi alüminyuma göre daha iyi iletken olduğu, bakır kaplı alüminyum kablonun kontak direncini azalttığı için daha iyi iletken özellik gösterdiği ancak bakır kaplamanın kolay bir şekilde soyulması nedeniyle alüminyumun elektroliz ile kaplamaya uygun olmadığı, kablo bağlantı terminali ve kablo ucuna spreyle ile yağ alma işlemi uygulanarak direncin azaltılabileceği, kablo bağlantısında kullanılan vidalı montaj yönteminde kablonun yüksek sıkma torklarına dayanamayarak koptuğu, bağlantı terminallerindeki vidaların gevşemesi nedeniyle ark oluşup yangına sebebiyet verebileceği sonuçlarına ulaşılmıştır (Yazıcıoğlu, 2016).

Plesca ve Mihet-Popa'nın çalışmasında; yarı iletken bağlantının sıcaklığı, termal kaçak ve erime nedeniyle yüksek değerlere ulaşır, güç redresörleri geri dönüşü olmayan bir şekilde hasar görebilmektedir. Bu makalede, endüktif dirençli yük sağlayan köprü doğrultucularında kullanılan güç diyotlarındaki bağlantı noktasını ve kasa sıcaklığını hesaplamak için matematiksel bir model önerilmiştir. Bu yeni termal model; sıkma torku, diyottan geçen doğru akım, hava akışı hızı ve yük parametrelerinin (direnç ve endüktans) çeşitli değerleri için kararlı durum rejiminde güç diyotlarının termal davranışını araştırmak için kullanılabilir. Elde edilen hesaplama verileri; 3 boyutlu termal simülasyon sonuçları ve deneysel testler ile karşılaştırılmıştır. Hesaplanan veriler, simülasyon sonuçları ve deneysel veriler birbirleri ile örtüşmüştür. (Plesca & Mihet-Popa, 2020)

Fu ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada; bakır kaplamalı alüminyumun sıvı alüminyum alaşımı ve katı bakır ile sürekli dökümünü hazırlamak için katı-sıvı yöntemi kullanılmış ve farklı dökme sıcaklıklarında (700, 750, 800°C) Al-Cu bimetalinin arayüzey faz oluşumu şu yöntemlerle araştırılmıştır; metalograf, taramalı elektron mikroskopu (SEM) ve enerji dağılımlı spektrometri (EDS) yöntemleri. Sonuçlar göstermiştir ki, alüminyum eriyiğinin dökme sıcaklığının, bakırın katı halinden alüminyum alaşım eriyiğine element difüzyonu ve Al ile Cu arasındaki reaksiyonların yanı sıra Al-Cu arayüzünün morfolojisi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Dökme sıcaklığı 800°C

olduğunda, ara yüzeyin yakınında bol miktarda Al-Cu intermetalik bileşikler (IMC- Intermetallic Compound) vardı. Bununla birlikte, daha düşük bir dökme sıcaklığında (700°C) yapılan denemelerde, bağlanma ve mekanik özellikler için zararlı olan boşlukların oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu çalışmadaki koşullar altında, 750°C'lik bir dökme sıcaklığında Al-Cu metallerinin iyi şekilde metalurjik bağlanması sağlandı (Fu, ve diğerleri, 2017).

Çetintav'ın çalışmasında; pirinç-çelik ve bakır-çelik kombinasyonlarından oluşan bimetalik parça numunelerine deneysel metotlarla dövme işlemi uygulanmış ve aynı sınır şartları ile FEM simulasyonları yapılarak deneysel ve teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır. Bu çalışmadan çıkarılacak sonuçlar özetle şu şekildedir; içi bakır silindir-dışı çelik boru şeklinde olan bimetal numunelerin dövme işlemi ile birbirine daha iyi tutunduğu görülmüş olup içi pirinç-dışı çelik olan numunelerde bölgesel seviyede birleşmenin olup bazı bölgelerde boşluklar olduğu ve parçaların birbirlerine iyi bir şekilde tutunamadığı görülmüştür. Malzeme akışının numunenin birinde iyi seviyedeyken diğerinde istenen seviyede olmamasının nedeni ise bakırın daha sünek bir materyal iken pirincin daha rijit bir yapıya sahip olmasıdır. Bu çalışmada bimetalik birleştirme yöntemleri için sünek-sünek ve sünek-rijit yapıların üretime daha uygunken rijit-rijit bimetallerin üretimi için yeni yöntemler geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir (Çetintav, 2014).

Abbasi ve arkadaşlarının kaleme almış olduğu makalede; bu makalenin amacı, 250°C'de soğuk haddelenmiş Al/Cu bimetal ara yüzeyinde intermetalik bileşiklerin büyüme hızını incelemek ve sonuçları Al-Cu'nun sürtünme kaynağı üzerinde yapılan benzer bir çalışma ile karşılaştırmaktır. Üç katmanlı Cu-Al-Cu kompozit numuneleri, soğuk haddeli kaynak işlemi ile üretildi ve 1 ila 1000 saat boyunca 25°C'lik sabit sıcaklıkta ısıtılma işlemi tabi tutuldu. Cu ve Al ara yüzeyindeki intermetalik bileşiğin kalınlığı, morfolojisi ve bileşimi, optik ve taramalı elektron mikroskobu ve EDX analizörü ile incelenmiştir. Çeşitli intermetalik bileşiklerin (Cu_3Al , Cu_4Al_3 , $CuAl$ ve $CuAl_2$) varlığı tespit edilmiş ve her bir bileşiğin oluşum önceliği incelenmiştir. Farklı numunelerin bağ kuvveti ve elektrik direnci, sırasıyla soyma testi ve yüksek hassasiyetli bir mikro-ohmmetre ile ölçülmüştür. Metaller arası bileşiğin kalınlığına karşı öz direnç ve bağ kuvveti varyasyonları çizildi. İntermetalik bileşiklerin kalınlığının artmasıyla birlikte mukavemet ve elektriksel iletkenliğin büyük ölçüde azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, hadde kaynaklı bimetal

kompozitte intermetalik bileşiklerin büyüme oranı, benzer sürtünme kaynaklı numuneler için bildirilenlere kıyasla daha düşüktür (Abbasi, Taheri, & Salehi, 2000).

Wąsek ve arkadaşlarının yayımlamış olduğu makalede; patlama yöntemiyle yuvarlak Al-Cu bimetalik çubuklar şeklinde yarı bitmiş bir ürün elde etmek için araştırma sonuçlarını sunmaktadır. Patlama kaynağının sistemleri ve teknolojik parametreleri, dış çapı yaklaşık 22 mm olan bitmiş bimetalik çubuklar ve yaklaşık olarak bimetal kesitinin %15 ve %30 bakır alan fraksiyonu elde edecek şekilde seçilmiştir. Bu çalışmada, stok malzemelerin kesitleri üzerindeki mikroyapı değişikliklerinin ve mikrosertlik dağılımının bir analizi yapılmıştır. Eklem sınırındaki maksimum kayma gerilmesi belirlenerek katman bağlantı kalitesi testleri de yapılmıştır. Sonuçlar, patlayıcı kaplama yönteminin bakır katmanlar ile alüminyum çekirdeğin kalıcı bağlantısını garanti ettiğini göstermektedir (Wąsek, Mróz, Stradomski, & Laber, 2012).

Honarpisheh ve arkadaşlarının çalışmasında; bir Al/Cu/Al çok katmanlı levha, patlayıcı kaynak işlemi ile üretilmiş ve tavlama sıcaklığının Al/Cu bimetalin ara yüzey özellikleri üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, numunelerin kalınlığı boyunca sertlik değişimleri ölçülmüş olup, optik mikroskopi (OM) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile birleşim ara yüzeyinde oluşan intermetalik bileşiklerin kalınlıkları ve türleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, tavlama sıcaklığının artmasıyla intermetalik bileşiklerin kalınlığının arttığını ve birleştirme ara yüzeyinin kalınlığı boyunca sertlik miktarının azaldığını göstermektedir. 400°C'de 30 dakika tavlanan numunede, Al/Cu bimetallerinin ara yüzeyinde intermetalik tabakaların oluştuğu gözlemlendi. Bu tabakalar; AlCu₃, Al₂Cu ve AlCu intermetalik bileşiklerinden oluşur ve kalınlıkları bazı noktalarda yaklaşık 5 µm'ye ulaşır. Vickers mikro-sertlik testinin ardından SEM tarafından yapılan incelemeler, 400°C'de tavllanmış numunenin üst ve alt arayüzünde bir takım mikro çatlakların varlığını göstermiştir. Bu, birleşim ara yüzeyinde kırılğan intermetalik bileşiklerin oluşumunu ve ayrıca bu bileşiklerin düşük sünekliğini göstermektedir (Honarpisheh, Asemabadi, & Sedighi, 2012).

Omaç ve arkadaşlarının yayınladığı makalede; Bir elektrikli makine için boyut parametrelerinin tahmin edilmesi, üretim hattına monte edilmeden önce büyük önem taşımaktadır. Nitekim araştırmacılar, bir elektrikli makinenin analitik tasarımını yapmaya karar verdikten sonra optimum çözüm bulunmalıdır. Bu çalışmada, tekerlek içi

anahtarlamalı relüktans motor (IW-SRM) için türetilen matematiksel denklemler aracılığıyla boyutsal ve elektriksel parametreler bulunmaya çalışıldı ve bu motor imal edildi. Ayrıca deneysel bir kurulum tasarlanmış ve IW-SRM'in hız ve tork kontrolü gerçekleştirilmiştir. Hem durma hem de çalışma testini içeren motor testleri, deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Motor analizi yazılım paketi tarafından yapıldığından, ilk boyut parametreleri sezgisel olarak sağlanmıştır. Ardından, optimum sonuçları elde etmek için çok sayıda deneme yapılmış ve incelenmiştir. Aslında bu motor, tasarımı devam eden bir elektrikli araç tarafından kullanılmaktadır. Bu nedenle, 18/12 kutuplu IW-SRM için üretilen denklemler MATLAB üzerinden çözülerek gerekli taban hız ve tork için optimum motor parametreleri tahmin edilmiştir. Tahmin edilen parametreler dikkate alınarak, IW-SRM'nin analizi Ansoft Maxwell 15.0 Yazılım Paketi ile 3B sonlu elemanlar yöntemine (3B-FEM) dayalı olarak yapılmıştır. Sonuç olarak, tahmin edilen parametreler Maxwell 3D FEM sonuçları ile doğrulanmıştır. Tasarlanan motor sürücüsü ile imal edilen motorun deneysel sonuçları elde edilmiştir; Maxwell 3D tarafından da doğrulanmıştır (Omaç, ve diğerleri, 2017).

Qi ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada; darbe gerilimi altındaki yağ pres panosu yapısının elektrik alan dağılımı, transformatör yalıtımının tasarımı için hayati bir referans sağlamaktadır. Darbe gerilimi altındaki elektrik alan dağılımı genellikle kapasitif alanınkine eşit tutulur ve simülasyon yazılımı ile hesaplanır. Daha sonra izin verilen mukavemete göre hesaplama sonuçlarına uygun bir marj seçilir. Bununla birlikte, bu şekilde tanımlanan tasarım değeri, gerçek ölçümün desteklenmesi ve doğrulanması konusunda yetersiz kalmaktadır. Bu makale, optik sistem, fotoelektrik dönüştürücü cihaz, sızdırmaz boşluk ve darbe gerilim jeneratöründen oluşturulmuş bir ölçüm aparatı kullanarak, darbe gerilimi altında yağlı pres panosu yapısının elektrik alan dağılımını araştırmak için gerçek zamanlı bir ölçüm yöntemi önermektedir. Lazer ışınının yayılma yönü boyunca üniform elektrik alanı oluşturan bir çift plaka elektrot tarafından kalibre edilmiş ve doğrulanmış olup ölçülen değerlerin, hem varyasyon eğilimi hem de sayısal değer açısından elektrik alanının gerçek değerleri ile iyi bir uyum içinde olduğu kanıtlanmıştır. Kurulan ölçüm aparatının minimum hassasiyeti 3.5 kV/mm, maksimum sapma ise %3,6 olarak kaydedilmiştir. (Qi, Zhao, Zhang, Meng, & Li, 2017)

Altındal'ın yapmış olduğu çalışmada bimetallik malzemeler volan tahrikli sürtünme kaynağı ile başarıyla birleştirilmiştir. Kaynak işlemi ısı ölçüm ekseninde; istatistiksel

analiz, çekme testi, mikro gözlem, eds ölçümleri ve sertlik testi ile araştırılmıştır. Yapılan kaynak işlemi sonucunda bimetalik malzemeler arasında metalik bağ olduğu gözlemlenmiştir. Oluşan intermetalik katmanın da Al-Cu doymuş katı çözeltisi şeklinde olduğu görülmüştür. Bimetalik malzemenin alüminyum yüzeyine yakın taraftaki sertlik bakır taraftan daha düşük olmuştur. Isı değişimleri alüminyum ve bakır taraflarda farklı olarak ölçülmüştür. Sıcaklığın intermetalik birleşme bölgesinde mekanik ve metalürjik özellikler üzerinde önemli bir etkisinin olduğu gözlemlenmiştir (Altındal, 2014).

Karadağ tarafından yapılan çalışmada; katkı oranı ve tanecik boyutunun, toz metalürjisi ile üretilen Cu-B₄C kompozitinin elektromekanik özellikleri üzerine olan etkisi incelenmiştir. Kompozit bileşenlerinde matris olarak Cu, ve katkı malzemesi olarak farklı boyutlardaki B₄C tozları kullanılmıştır. Hazırlanan toz karışımları yük altında preslenerek 750°C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Bu proses esnasında oksitlenmeyi engellemek için numuneler grafit tozuna gömülmüştür. Üretilen numunelerin elektromekanik özelliklerinin incelenmesi için SEMEDS ve XRD analizler yapılmış ve daha sonrasında ham madde yoğunluğu, elektriksel iletkenlik, aşınma dayanımı ve sertlik değerleri ölçülmüştür. Katkı malzemelerinin matris içerisinde homojen şekilde dağılmadığı gözlemlenmiş olup kompozitlerde az da olsa oksitlenme gözlemlenmiştir. Takviye nedeniyle parçaların sertliklerinin takviyesiz olanlara nazaran önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Elektriksel iletkenlik testleri sonucunda ise takviyesiz numunelerin takviyeli numunelere göre daha yüksek elektrik iletkenliğe sahip olduğu tespit edilmiştir. İletkenlikteki azalmanın oksitlenme nedeniyle düzenli olmadığı tespit edilmiştir (Karadağ, B₄C Partikül Takviyeli Bakır Matrisli Elektrik İletken Kompozit Üretimi, 2017).

Nalçacıoğlu'nun yayınlamış olduğu çalışmada; toz metalürjisi yöntemi ile imal edilen AA7075 alaşımının farklı sıcaklık ve sürede tabi tutulduğu yaşlandırma ısıl işlemlerinin, alaşımın elektrik iletkenliği ve korozyon dayanımına etkileri incelenmiştir. Çalışma kapsamında ilgili alaşım tozları ön şekillendirmeye tabi tutulup sinterlendikten sonra 485°C sıcaklıkta iki saat bekletildikten sonra solüsyona alınarak soğutulmuştur. Daha sonra bu numunelere farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırılma işlemine tabi tutulmuşlardır. Yaşlandırılan alaşımlar; SEM+EDS, XRD, sertlik ve yoğunluk ölçümleri ile karakterize edilmiş ve numuneler üzerinde gözlemler yapılmıştır. Çalışma sonucu literatür kaynakları ile karşılaştırılarak doğruluğu kontrol edilmiştir (Nalçacıoğlu, 2017).

Wolisz tarafından yapılan çalışmada; ISO (Uluslararası Standardizasyon Örgütü), DIN (Alman Standardizasyon Enstitüsü), Berlin Teknik Üniversitesi İnovasyon Ekonomisi Kürsüsü ve Siemens AG ile işbirliği çerçevesinde yürütülen bu çalışmanın amacı, yakın zamanda geliştirilen ISO metodolojisini temel alan standartları kullanmanın ekonomik faydaları üzerinedir. Analiz, Siemens'in anahtar teknolojisinin araştırma, geliştirme ve pazara hazırlanması ile bu teknolojiye ilişkin DIN EN 62271 serisi standartlar örnek alınarak yapılmıştır. Bu, ISO metodolojisinin kullanımına ilişkin bir pilot proje olduğundan, bu metodolojinin pratikliği ve kullanım kolaylığı da değerlendirilmiştir. Bir standardın sadece içeriği değil, aynı zamanda yapısı da ekonomik yararı için sonuçlar doğurduğundan, Siemens'in önerisini takiben, bir standardın yapısının subjektif olarak ne ölçüde değerlendirildiği ile ilgilenen ampirik bir araştırma şeklinde ek bir araştırma yapılmıştır. Bu çalışma sırasında, metodolojinin uygulanmasında, büyük ölçüde, farklı şirket türlerinin ihtiyaçlarına göre ayarlanmayan bireysel adımlarının çok genel tanımlarının bir sonucu olan bazı zorluklar vardı. Metodoloji, prosedürde birkaç ayarlama ile başarılı bir şekilde uygulandıktan sonra, hem temel konsept hem de sağlanan belgeler ve araçlar için iyileştirme önerileri yapılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları, standartların kullanılmasının açık ekonomik faydaları olduğunu göstermektedir. Gözlemlenen etkilerin çok muhafazakar bir değerlendirmesi bile, söz konusu şirket alanlarında kâr (EBIT) üzerinde yaklaşık %1,1'lik bir etki olduğunu göstermektedir. Siemens anahtar teknolojisi için olumlu bir fayda bu şekilde açıkça gösterilmiştir. Ancak bu etkinin genel olarak diğer şirketler için geçerli olup olmadığı, bu pilot proje kapsamında Siemens dışındaki şirketlerde ve diğer çerçeve koşullarla yürütülen birçok çalışma değerlendirilmeden tespit edilemeyecektir. Kapsamlı standartların yapısının, bu tür standartların algılanan kullanılabilirliği üzerindeki etkisine ilişkin bir anket de yapılmıştır, çünkü bir standardın kullanıcı dostu olması, kullanımından kaynaklanan faydalar üzerinde de bir etkiye sahiptir. DIN EN 62271 serisinde, kapsamı çok geniş olarak kabul edilen standartların yapısında birkaç düzeltme yapılarak algılanan pratikliğin artırılabilirliği gösterilmiştir (Wolisz, 2011).

1.2. Literatür Araştırması Sonrası Yapılan Çıkarımlar

Türkiye ve uluslararası literatürde yapılan araştırma sonucunda; elektriksel ürün tasarımının başında yapılan analizlerin zaman ve maliyet anlamında sağladığı fayda,

elektriksel ürünlerdeki en istenmeyen durum olan sıcaklık artışının teorik olarak modellenmesi ve bu modelin pratikte yapılan deneylerle hangi metotlar kullanılarak doğrulanacağı, elektriksel iletkenlerdeki ısı oluşumu ve ısınma karakteristiğini etkileyen faktörlerin belirlenmesi sağlanmıştır. Ayrıca, kompozit iletken ham maddeler, daha verimli alternatif ham madde arayışları ve uluslararası standartların önemi hususunda kazanımlar elde edilmiştir.

Literatürdeki bilgiler referans alınarak yapılan bu özgün çalışma neticesinde farklı bir bakış açısı katılarak literatüre katkı sunulmuştur. Mevcut durumun iyileştirilmesi, ham madde tedarikindeki sıkıntıların aşılması, mevcut durumda maliyeti nispeten daha yüksek olan pirinç ve bakıra alternatif oluşturulması gibi faydaları kendisinde haiz olan Al-Cu bimetalik ham madenin kullanımı ile elektrik anahtarı üretiminde maliyeti uygun, verimliliği yüksek, yeni bir dönem başlatılması umulmaktadır.

BÖLÜM 2. GENEL BİLGİLER

2.1. Elektrik

Elektrik, elektronların akışı ile meydana gelen bir enerji biçimidir. Tüm maddeler atomlardan oluşur ve atomun çekirdek adı verilen bir merkezi vardır. Çekirdek, proton adı verilen pozitif yüklü parçacıklar ve nötron adı verilen yüksüz parçacıklar içerir. Bir atomun çekirdeği elektron adı verilen negatif yüklü parçacıklarla çevrilidir. Bir elektronun negatif yükü, bir protonun pozitif yüküne eşittir ve bir atomdaki elektronların sayısı genellikle protonların sayısına eşittir. Protonlar ve elektronlar arasındaki dengeleme kuvveti bir dış kuvvet tarafından bozulduğunda, bir atom bir elektron kazanabilir veya kaybedebilir. İletken (metaller) atomlarının son yörüngelerinde bulunan elektronlar bir atomdan eksilip diğer bir atoma geçtiğinde zincirleme bir itme hareketine neden olur ve bu elektronların serbest hareketi bir elektrik akımı oluşturur (Nilsson & Riedel, 2007).

Elektrik, doğanın temel bir parçasıdır ve en yaygın kullanılan enerji formlarımızdan biridir. İkincil bir enerji kaynağı olan elektriği, birincil kaynaklar olarak adlandırılan kömür, doğal gaz, petrol, nükleer enerji ve diğer doğal kaynaklar gibi diğer enerji kaynaklarının dönüştürülmesinden elde edilir. Birçok şehir ve kasaba, iş yapmak için su çarklarını döndüren şelalelerin (birincil mekanik enerji kaynağı) yanında inşa edilmiştir. 100 yıldan biraz daha uzun bir süre önce elektrik üretimi başlamadan önce, evler gazyağı lambalarıyla aydınlatılır, yiyecekler buz kutularında soğutulur ve odalar odun ya da kömür yakan sobalarla ısıtılırdı. Benjamin Franklin'in Philadelphia'da fırtınalı bir gecede uçurtma deneyinden başlayarak elektriğin prensipleri yavaş yavaş anlaşıldı. 1800'lerin ortalarında, elektrik ampulünün icadıyla herkesin hayatı değişti. 1879 öncesinde elektrik, dış alan aydınlatmaları için ark lambalarında kullanılıyordu. Elektrik, bir asırdan fazla bir süredir insanların hava ve su gibi birincil ihtiyaçlarından biri haline gelmiştir (Jones, 1991).

Elektrik ve elektriksel sistemler icat edildiği günden beri geliştirilmiş, kendisi üzerine ilgi duyulmuş, insan hayatının vazgeçilmez bir kolaylaştırıcı parçası olmuş ve teknolojinin bu kadar hızlı gelişmesinde belirleyici bir unsur olmuştur. “Elektrik, 2. sanayi devriminin itici gücüydü ve bugün de 4. sanayi devrimi için aynı şekilde önemli olmaya devam ediyor.” (IEC, 2022).

2.2. Elektrik Anahtarları

Elektrik mühendisliğinde anahtar, bir elektrik devresindeki iletken yolu kesebilen veya bağlayabilen, elektrik akımını kesebilen veya bir iletkeniden diğerine yönlendirebilen bir elektrik bileşenidir (Morris, 1979). En yaygın şekilde kullanılmakta olan anahtar türü, dış devrelere bağlı bir veya daha fazla sayıda hareketli elektrik kontağından meydana gelen elektromekanik bir cihazdır. Bir çift kontak birbirine dokunduğunda aralarından akım geçebilir, kontaklar ayrıldığında ise hiçbir akım geçemez.

Anahtarlar birçok farklı konfigürasyonda tasarlanarak üretilir ve kullanılırlar. Aynı düğme veya aktivatör tarafından kontrol edilen çok sayıda kontağa sahip olabilirler ve kontaklar aynı anda, sırayla veya değişimli şekilde çalışabilir. Bir elektriksel anahtar, örneğin bir lamba anahtarı veya bir klavye düğmesi gibi el ile çalıştırılabilir veya bir cihazın parça konumunu, sıvı seviyesini, basıncı veya bir termostat gibi sıcaklığı ölçmek amacıyla bir algılama elemanı olarak işlev görebilir (Relay and Switch Industry Association (RSIA), 2011). Toggle anahtarları (toggle switches), rotatif anahtarlar (rotative switches), civa anahtarları (mercury switches), basmalı düğme anahtarlar (push-button switches), geri vites anahtarları (reversing switches), röleler (relays) ve devre kesiciler (circuit breakers) gibi birçok özel kullanım yöntemi bulunmaktadır. Yaygın bir kullanım yöntemi de, aydınlatma cihazlarının uygun şekilde kontrol edilmesini sağlamak için birçok anahtarın bir devreye bağlanabileceği aydınlatma kontrolüdür. Yüksek güç devrelerindeki anahtarlar, açıldıklarında tahrip edici ark oluşumunu engellemek için özel yapılara sahip olmalıdır.

Elektrik kablo tesisatının veya ev kablolama sisteminin bir parçası olarak, elektrik anahtarlarının üretimi ve montajlanması güvenlik ve standartlarla ilgili yetkili bir organizasyon tarafından denetlenir. Farklı ülkelerde, duvar montaj donanımının (duvara monte kasa, çerçeve, düğme vb.) standart boyutları farklı olabilir.

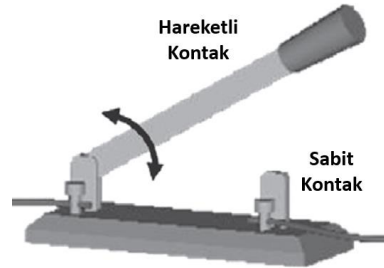
Üründe kullanılan çerçeve ve düğme gibi dış parçaların ürünü tamamen kapsaması gerektiği için, standartlar duvara monte edilen tüm ekipmanların minimum boyutlarını belirler. Bu nedenle, duvara monte kasaların ve elektriksel ürün dış parçalarının şekli ve boyutları ülkeden ülkeye farklılık gösterir.

Boyutlar, mekanik tasarımlar ve hatta elektrik anahtarlarının genel görünüşleri zaman içinde yavaşça değişmiştir. Anahtarlar genellikle on yıllar boyunca hizmet vermektedir ve genellikle sadece elektrik tesisatı yenilenirken değiştirilmektedir. Hala işlevsel olarak kullanılan yüzyıldan kalma ışık anahtarlarını görmek alışılmadık bir durum değildir.

Üreticiler çeşitli yeni formlar ve tarzlar sunmakla birlikte, bunların çoğu dekorasyon ve moda endişesi için çerçeve ve düğme tasarımlarını yenilemekle sınırlıdır. Modern kısma (dimmer) anahtarları bile en az kırk yaşında olup, en yeni yapıdaki anahtarlardır.

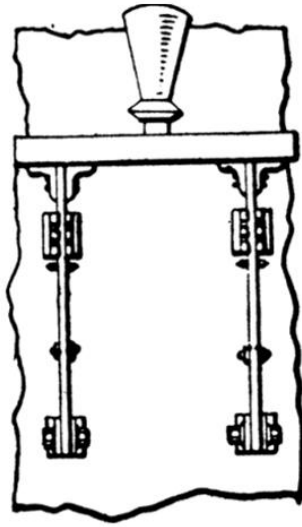
2.2.1. Hızlı kesme anahtarı

Hızlı kesme (Quick Break) teknolojisini kullanan ilk elektrik anahtarı, 1884 yılında Newcastle'ın Shieldfield ilçesinde John Henry Holmes tarafından icat edilmiştir. Hızlı kesme anahtarı, devrenin her açılışında veya kapatılmasında oluşan yüksek miktardaki elektriksel ark oluşumu sorununu aştı. (Sagar, 2020)

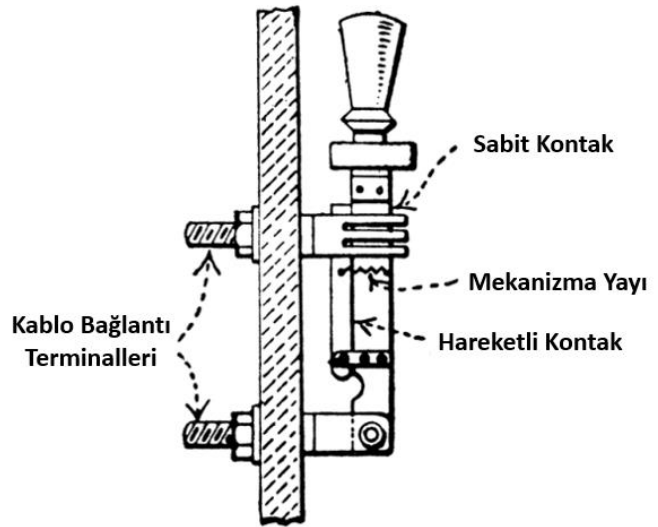


Şekil 2.1: Hızlı kesme teknolojisine sahip olmayan en ilkel anahtar mekanizması

Elektriksel ark, kontaklardan biri üzerinde aşınmaya ve diğeri üzerinde ise partikül birikmesine neden olur ve anahtarın kullanım ömrü azalır. Holmes'un icadı, kontakların çok hızlı bir şekilde ayrılabilceği veya bir araya getirilebileceğini ortaya koydu (Sagar, 2020).



Ön Görünüş



Yan Görünüş

Şekil 2.2: Holmes tarafından geliştirilen hızlı kesme anahtarı

Bu hızlı mekanizmasının asıl etki noktası, ark oluşması için yeterli süre olmaması ve bu nedenle de anahtarın uzun bir çalışma ömrüne sahip olmasıdır. Bu hızlı kesme teknolojisi, bugün dünyadaki neredeyse tüm sıradan elektrik anahtarlarında hala kullanılmaktadır.

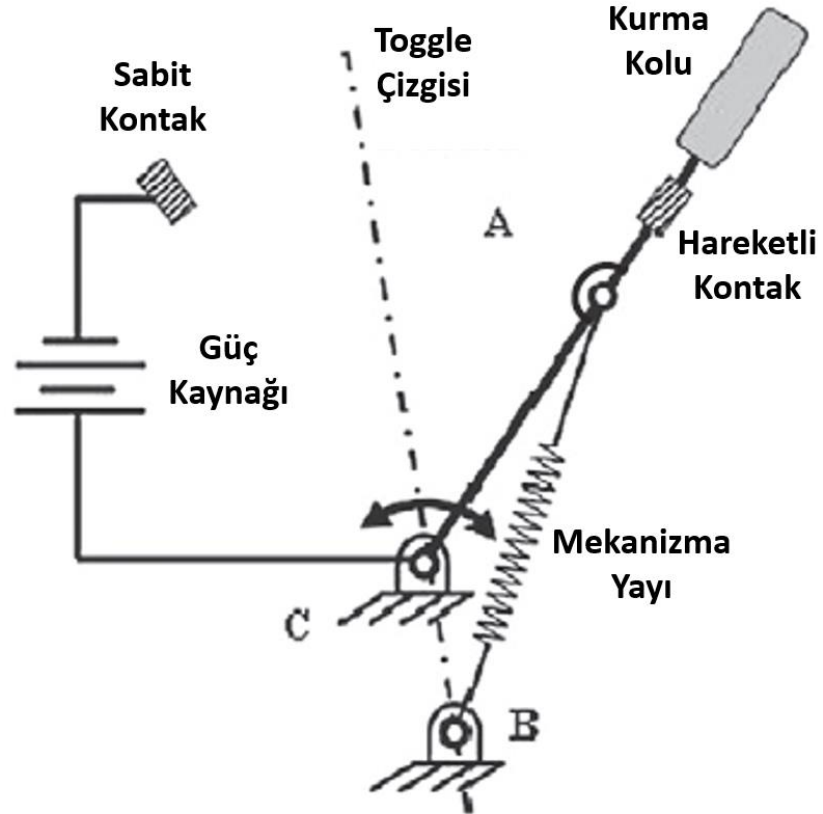
2.2.2. Toggle anahtarı

Toggle anahtarı (Toggle Switches) 1917 yılında William J. Newton tarafından icat edilerek patentlenmiştir (ABD Patent No. US1248384A, 1916). Bu yeni anahtar mekanizması John Henry Holmes'un geliştirmiş olduğu anahtar mekanizma tasarımını bir adım daha öteye taşıyarak günümüzde halen kullanılmakta olan devirmeli anahtarların (rocker switch) gelişmesine öncülük etmiştir.



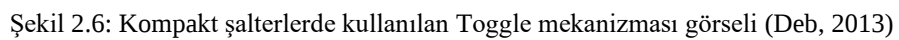
Şekil 2.3: Günümüzde kullanılmakta olan basit bir Toggle anahtarı

Toggle mekanizmasında kurma kolu, Toggle çizgisinin hangi tarafında bulunuyorsa daima orada kalmaya devam eder. Bunun nedeni ise; mekanizma yayının Toggle çizgisi üzerindeki konumunda en gergin hale gelerek en yüksek kuvvet limitlerine ulaşmış olmasıdır. Mekanizmayı bu hali ile çizgi üzerinde tutmaya çalışmak çok zor olup, mekanizma sağa veya sola devrilmek üzere kararsız hareketler sergilemektedir. Bu nedenle mekanizma yayı, kurma kolu ve hareketli kontağı Toggle çizgisinin sağında veya solunda tutmaya zorlar. Bu konumlarda yay daha az gergindir ve sistem statik bir kuvvet dengesine kavuşmuştur. Kurma koluna, toggle çizgisinin diğer tarafına geçirmek için yay kuvvetini yenecek bir kuvvet uygulanırsa kol ve kontak diğer bölgeye geçer (Deb, 2013). Toggle mekanizmasında kontak açma ve kapama sistemi bu şekilde özetlenebilir. Günümüzde evlerde kullanılan elektriksiz anahtarlar, minyatür devre kesici (otomatik sigorta), kaçak akım rölesi, kompakt şalterler bu bahsedilen Toggle mekanizması ve onun özelleşmiş türevleri üzerine tasarlanıp üretilerek kullanılmaktadır.



Şekil 2.4: Toggle mekanizmasının şematize edilmiş görseli (Deb, 2013)

Devre kesici ürünlerde, anahtarlamanın yanında kısa devre ve aşırı
işlevlerinin bulunması nedeniyle mekanizmanın çok kısa bir süre içerisinde
oluşumu ile devreyi kesmesi istenmektedir. Bu nedenle devre kesici ürün
mekanizmaları anahtarlardan daha farklı ve özelleşmiş şekildedir (Deb
2.6’da bir kompakt şalterin mekanizması temsili olarak gösterilmiştir.



2.2.3. Basmalı düğme anahtarları

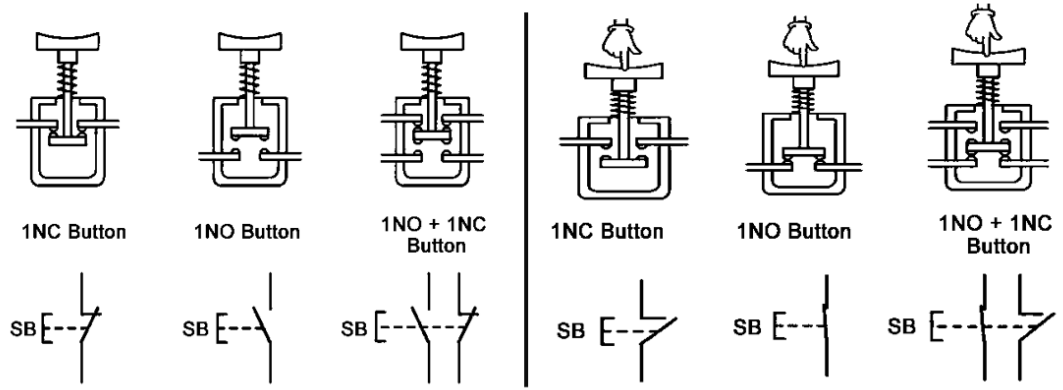


Şekil 2.7: Günümüzde kullanılmakta olan bir basmalı düğme anahtarı (Anchor By Panasonic)

Basmalı düğme anahtarları (Push-Button Switches), yalnızca anahtar fiziksel olarak çalıştırıldığında bir elektrik devresinin durumunda geçici bir değişikliğe neden olan anlık veya kilitlenmesiz anahtarlardır. Yay içeren otomatik bir mekanizma, basma etkisinin kalkmasının hemen ardından varsayılan konumuna yani ilk devre durumuna geri döner. Bu anahtarın iki türü vardır:

Elektrik geçişi için düğmesine basılması gereken anahtardır, düğme basılı tutulduğunda iki kontak arasında elektriğin akmasına izin verir. Düğme bırakıldığında devre kesilir. Bu anahtar türü, normalde açık (NO) anahtar olarak da bilinir.

Elektriği kesmek için düğmesine basılması gereken anahtardır, yani düğmeye basılmadığında elektrik akabilir, ancak basıldığında devre kesilir. Bu anahtar türü, normalde kapalı (NC) anahtar olarak da bilinir.



Şekil 2.8: Farklı tiplerdeki push-button anahtar mekanizmalarının şematize edilmiş görseli

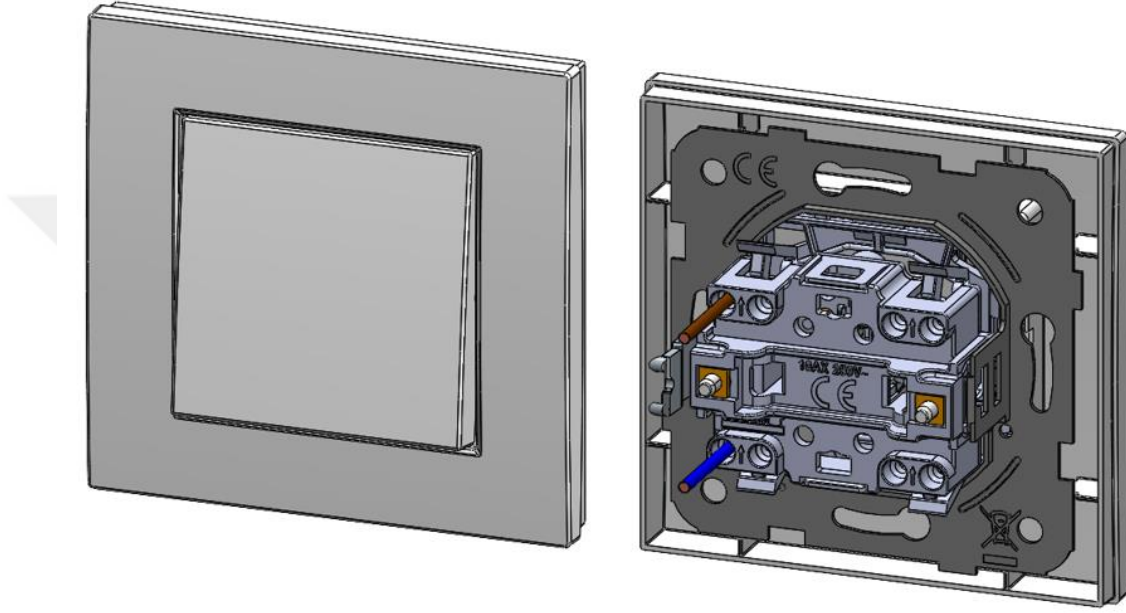
Pek çok basmalı anahtar, hem NO hem de NC anahtarları olarak işlev görecek şekilde tasarlanmıştır. Bu anahtarlar için kablo tesisatında yapılacak farklı konfigürasyonlar ile birbirleri arasında dönüşüm gerçekleştirilebilmektedir.



Şekil 2.9: 1910-1920 yıllarına ait bir push-button anahtar (Restoringross, 2017)

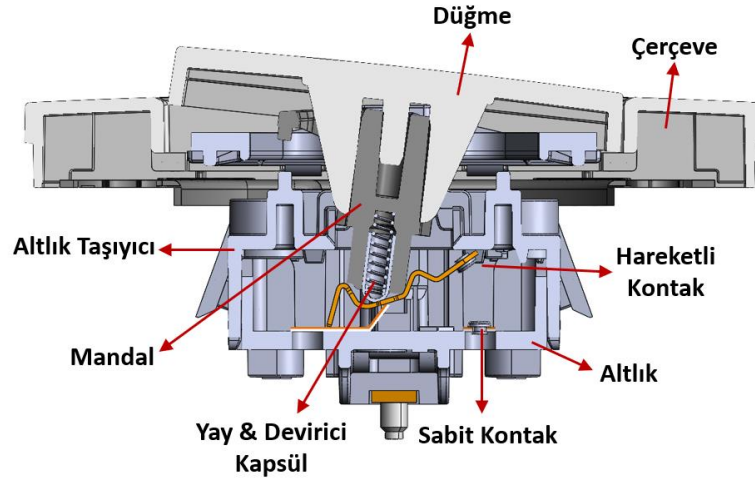
2.2.4. Devirmeli anahtarlar

Devirmeli anahtarlar (Rocker Switches), karşılaşılabilecek en tanıdık anahtar türleri arasındadır. Tanımı basitçe, mekanizmanın düğmesine basıldığında iki veya daha fazla konum arasında hareket etmesini gerektirir. Bu yapıda bir uç yükselirken, diğeri alçalmaktadır. Bazen tahterevalli anahtarları olarak da adlandırılırlar.

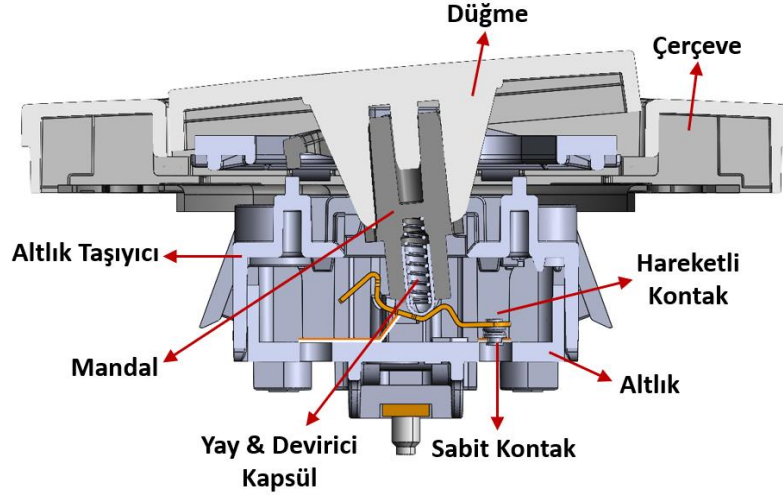


Şekil 2.10: Viko By Panasonic marka devirmeli anahtar

Devirmeli anahtarlar, Toggle ve push-button anahtarlar ile karşılaştırılabilir. Toggle anahtarlarında, anahtarın konumunun değiştirilmesi genellikle küçük bir kolun oturduğu yerde yukarı veya aşağı hareket ettirilmesini içerir. Yine basmalı anahtarlarda, düğmenin bir yuva içerisinde içeri-dışarı yönlerde hareketi ile sınırlıdır. Devirmeli anahtarları ise bu şekilde hareket edecek şekilde tasarlanmamıştır. Bunun yerine, merkezi bir eksen etrafında tahterevalli şeklinde ileri-geri salınım yaparlar. Tabi bu farklı tasarıma sahip mekanizmaların hepsi Toggle mekanizmasının farklı türevleridir.



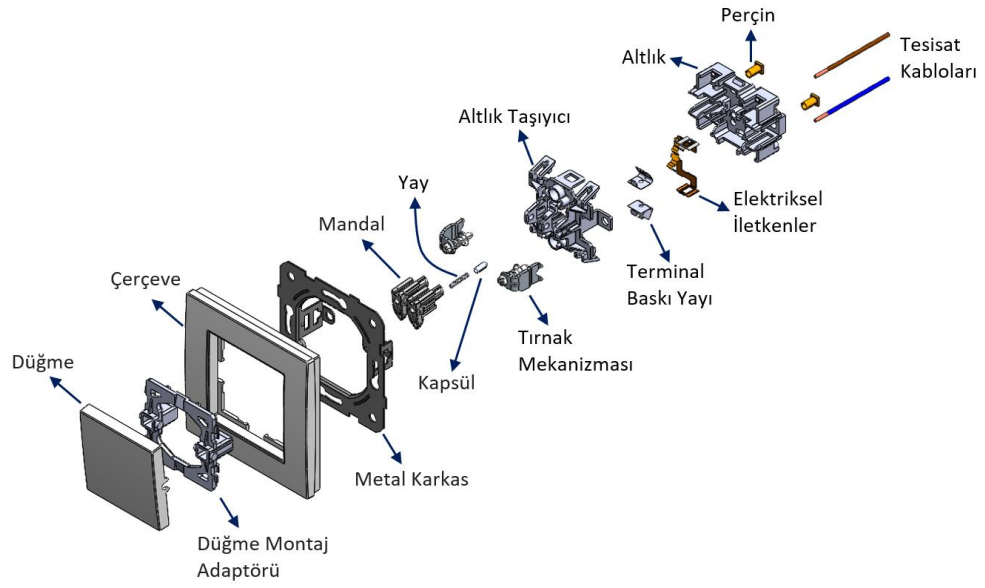
Şekil 2.11: Devirmeli anahtar kontakları açık konumda olup, ürün OFF konumdadır.



Şekil 2.12: Devirmeli anahtar kontakları kapalı konumda olup, ürün ON konumdadır.

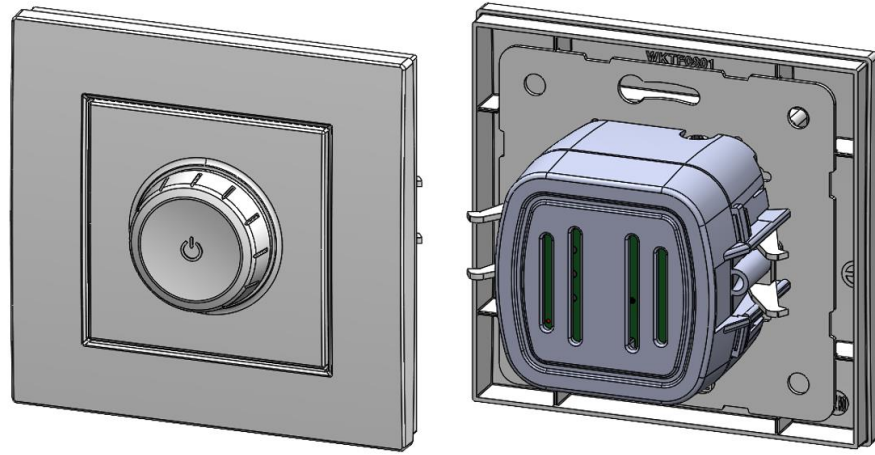
Bir devirmeli anahtarın konum seçenekleri genellikle açma/kapama ile sınırlı olmaktadır, ancak bazı tiplerde seçim yapılabilecek üç veya daha fazla seçenek olabilir. Bu özelliğe sahip anahtarlar, evdekilerin aksine endüstriyel ortamlarda daha yaygın olarak kullanılma eğilimindedirler.

Bu tez çalışmasında, Viko By Panasonic marka B2 çabuk bağlantılı anahtar mekanizma üzerinde çalışmalar yapılmıştır. Ürün, 2009 yılında seri üretime geçmiş olup Türkiye ve çevre ülkelerde yıllardır piyasayı domine etmektedir. Ürünü oluşturan bileşenler Şekil 2.13'teki patlatılmış görselde belirtilmiştir.



Şekil 2.13: Devirmeli anahtar patlatılmış görünüm

2.2.5. Kısmi anahtarları



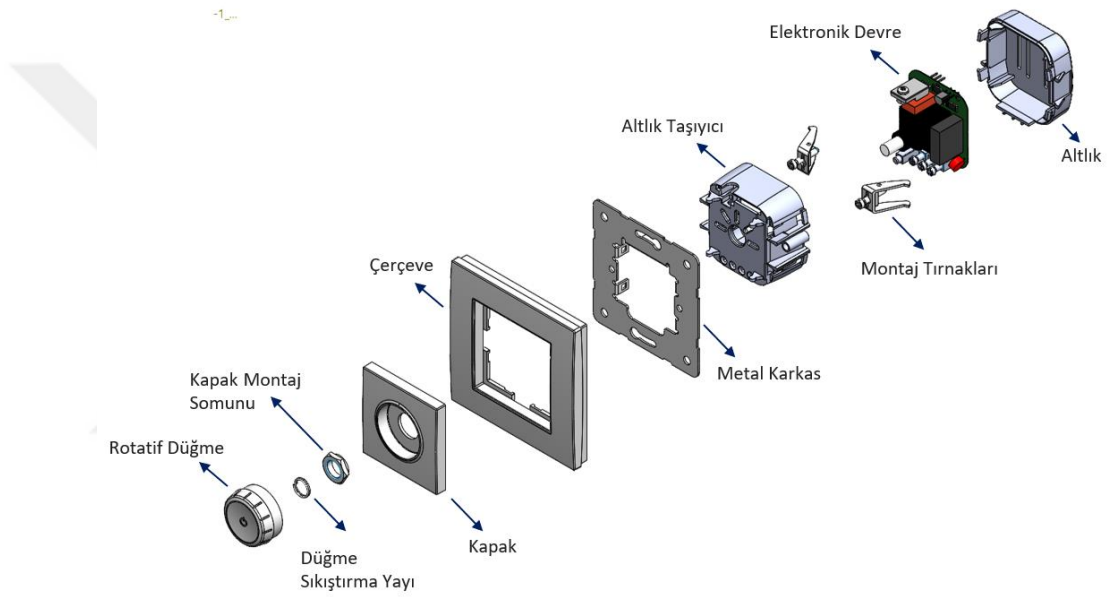
Şekil 2.14: Viko By Panasonic marka kısma anahtarı

Kısma anahtarı (Dimmer Switches), lambalardan geçen akımı kontrol ederek aydınlatmadaki ışık miktarını ayarlayan bir potansiyometre türüdür. Kısmi anahtarları; LED, Halojen, CFL (kompakt floresan lamba) gibi ışık kaynaklarının parlaklığının kullanıcılar tarafından istenilen seviyeye getirilmesini sağlar.

Kısma anahtarı, yemek odası veya aile odası gibi evin bazı bölümlerinde ışıkların parlaklığını kontrol etmek için kullanılır. Akkor, floresan ve led aydınlatma için özelleşmiş farklı modeller bulunmaktadır.

Dimmer anahtarları, öncü faz prensibini kullanarak çalışır. Her sinüzoidal yarım dalganın başlangıcında, dimmer lambaya giden akımı bloke eder, iletken değildir. Dimmerdeki elektronik anahtar (TRIAC) yalnızca bağlı yüklere enerji veren, kullanıcı tanımlı bir gecikme süresi olan T_z 'nin başlatılmasından sonra bağlanır. Bu şekilde, bağlı aydınlatma ortamının parlaklığı istenilen şekilde ayarlanabilir. Anahtarlama işlemi tarafından üretilen parazit voltajları, uygun filtreleme önlemleri kullanılarak azaltılır (IEEE, 2011).

Rotatif tasarıma sahip bir kısma anahtarının patlatılmış görüntüsü Şekil 2.15'te belirtilmiştir.



Şekil 2.15: Kısma anahtarı patlatılmış görünüm

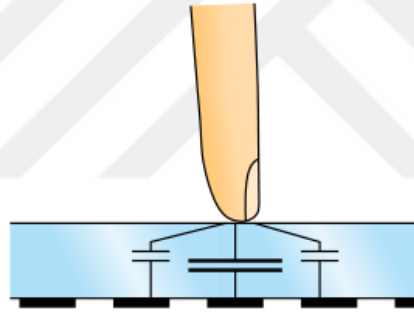
Kısma anahtarları kullanım şekline göre; rotatif, dokunmatik ve push-button olmak üzere üç farklı yapıda bulunabilmektedir.



Şekil 2.16: Rotatif, dokunmatik ve push-button kısma anahtarları

2.2.6. Dokunmatik anahtar

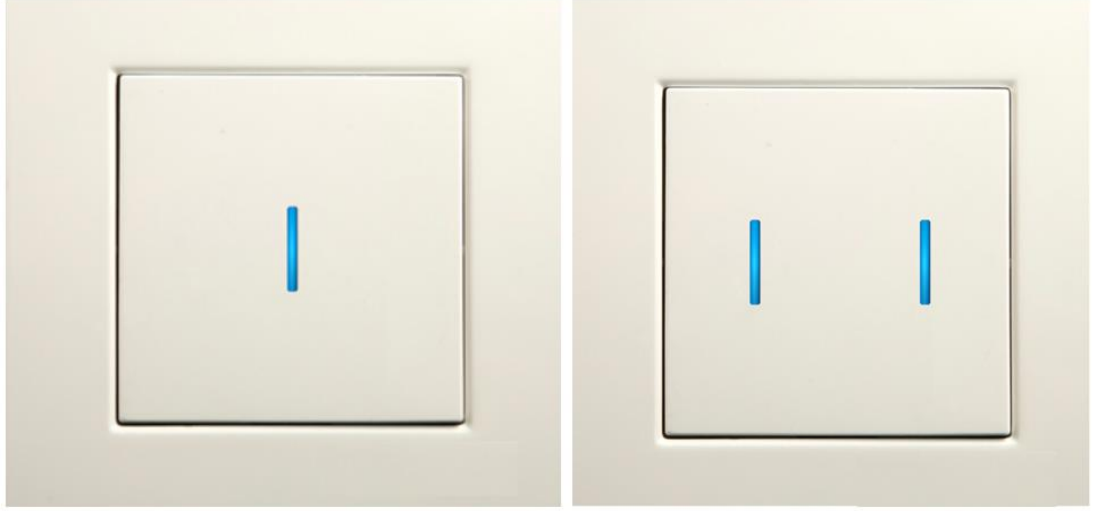
Elektrik mühendisliğinde kapasitif algılama (capacitive sensing), iletken olan veya havadan farklı bir dielektrik değerine sahip olan her şeyi algılayabilen ve ölçebilen kapasitif kuplaja dayalı bir teknolojidir. Yakınlık, basınç, konum ve yer değiştirme, kuvvet, nem, sıvı seviyesi ve ivmeyi algılamak ve ölçmek için sensörler dahil olmak üzere birçok sensör türü kapasitif algılama kullanır. Yeni nesil dijital müzik çalarlar, cep telefonları ve tablet bilgisayarların giriş aygıtı olarak kapasitif algılama dokunmatik ekranlar kullanılmaktadır. Kapasitif sensörler ayrıca mekanik düğmelerin yerini alabilir. Örnek vermek gerekirse, uzun bir süre önce hayatımıza giren dizüstü dokunmatik panelleri (touchpad) haricen kullanılan farenin yerini almaya başlamıştır (Baxter, 1996). Dokunmatik anahtarlar uluslararası literatürde “Capsense Switches” olarak nitelendirilmektedir.



Şekil 2.17: Capsense algılama sistemi

Kapasitif dokunmatik ekran tipik olarak en az iki adet tamamlayıcı metal oksit-yarı iletken (CMOS) entegre devre (IC) yongası, özel bir yapıya sahip entegre devre (ASIC) denetleyicisi ve bir dijital sinyal işlemcisi (DSP) ile birlikte bir kapasitif dokunmatik sensörden oluşur. Kapasitif algılama, 2007'de Apple'ın iPhone ürünü tarafından popüler hale getirilen mobil çoklu dokunmatik ekranlar için yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Kent, 2010).

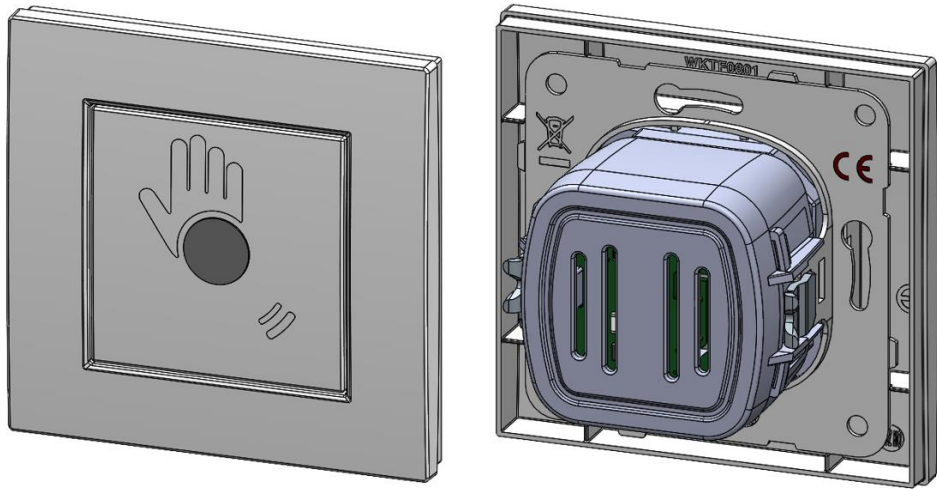
Bu teknoloji elektrik anahtarlarında açma, kapama ve dimmer uygulamaları için kullanılmakta ve her geçen gün yaygınlaşmaktadır.



Şekil 2.18: Dokunmatik anahtar ve komütatör

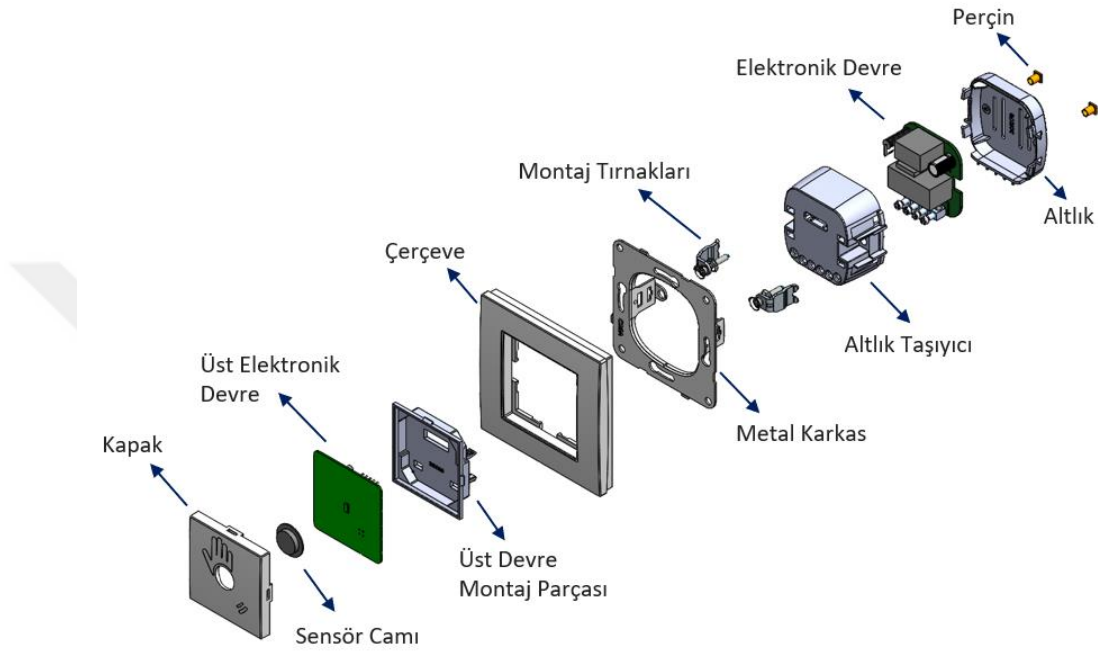
2.2.7. Temassız anahtarlar

2019-2020 yıllarında başlayan pandeminin de etkisi ile hijyen ve izolasyona verilen önem artmış olup umuma açık ortamlarda herkesin kullandığı anahtar düğmelerinin temassız hale getirilmesinin pandemi döneminde hijyen anlamında topluma katkı sağlayacağı düşünülmüş ve inovatif bir yaklaşımla kısa bir sürede bu ihtiyacı karşılayacak olan temassız elektrik anahtarı (Touchless Switch) Panasonic Electric Works Türkiye çatısı altında Ar-Ge birimi tarafından geliştirilerek toplumun hizmetine sunulmuştur. Bunun dışında elektronik anahtarların gelişiminin önünü açarak sektöre yeni bir soluk getirmiştir.



Şekil 2.19: Viko By Panasonic marka temassız anahtar

Ürün ana hatlarıyla; anahtarlama devresi ve harekete duyarlı sensör devresinden meydana gelmektedir. 6 santimetrelilik mesafe içerisinde bir hareket algılaması üzerine devreyi açma veya kapama yapmaktadır. Geleneksel anahtarlarda olduğu gibi düğmeye dokunmak yerine, kullanıcının elini sensöre yaklaştırmasıyla anahtar aktive edilmektedir.



Şekil 2.20: Temassız anahtar patlatılmış görünüm

2.3. Elektriksel İletkenler

Fizik ve elektrik mühendisliğinde iletken, yükün yani elektrik akımının bir veya daha fazla yönde akışına izin veren bir nesne veya malzeme türüdür. Metalden yapılmış malzemeler yaygın elektrik iletkenleridir. Atomlarında 1 valans elektron bulunan metaller iyi iletkenlerdir, bunlara örnek olarak gümüş, bakır, altın ve alüminyum verilebilir. Elektrik akımı, negatif ve bazen de pozitif yüklü elektronların akışıyla üretilir (Copperinfo, 2013).

Akımın kapalı bir elektrik devresi içinde akabilmesi için, yüklü bir parçacığın akımı üreten bileşenden (akım kaynağı) onu tüketenlere (yükler) doğru gitmesi gerekmez. Bunun yerine, yüklü parçacığın komşusunu sonlu bir miktarda itelemesi gerekmektedir. Esasen, mobil yük taşıyıcıları arasında uzun bir momentum aktarımı zinciri meydana gelmektedir. Bu yapıya Drude modeli adı verilmiştir. Drude modeli bu iletim sürecini

daha ayrıntılı bir şekilde açıklamaktadır. Bu bahsi geçen momentum transfer modeli, metali ham maddeleri iletkenlik için ideal bir seçim haline getirir. Metaller karakteristik olarak, elektronlara çarpışmak için yeterli hareket serbestliği veren ve böylece momentum transferini tetikleyen, delokalize bir elektron denizine sahiptir (Heaney, 2003).

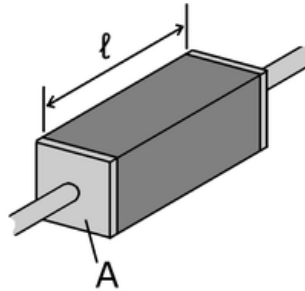
Yukarıda tartışıldığı gibi, elektronlar metallerde birincil hareket ettiricidir; bununla birlikte, bir pilin katyonik elektrolitleri veya bir yakıt hücresinin proton iletkeninin hareketli protonları gibi diğer cihazlar, pozitif yük taşıyıcılarına dayanır.

2.3.1. İletkenlik ve direnç kavramları

Belirli bir iletken malzemenin direnci, imal edildiği malzemeye ve boyutlarına bağlıdır. Belirli bir malzeme için direnç, malzemenin kesit alanı ile ters orantılıdır. Örnek vermek gerekirse, kalın bir bakır tel, ince bir bakır telden daha düşük dirence sahiptir. Ayrıca, belirli bir malzeme için direnç uzunlukla orantılıdır; örneğin, göreceli olarak uzun bir bakır tel, yine göreceli olarak kısa bir bakır telden daha yüksek dirence sahiptir. Bu nedenle, düzgün kesitli bir iletkenin direnci (R) ve iletkenliği (G) 2.1 ve 2.2 numaralı formüller ile hesaplanabilir (Standard Handbook for Electrical Engineers 11th Edition, 1978).

$$R = \rho \frac{\ell}{A} \quad (2.1)$$

$$G = \sigma \frac{A}{\ell} \quad (2.2)$$



Şekil 2.21: İletken boyutlarını belirten görsel. A: Kesit Alan, ℓ :Uzunluk

Burada ℓ iletkenin metre (m) cinsinden ölçülen uzunluğudur, A iletkenin metre kare (m^2) cinsinden ölçülen kesit alanıdır, σ (sigma) metre başına siemens ($S \cdot m^2$) cinsinden ölçülen

elektriksel iletkenliktir ve ρ (rho) malzemenin ohm-metre ($\Omega \cdot m$) cinsinden ölçülen elektrik direncidir (özgül elektrik direnci de denir). Direnç ve iletkenlik orantı sabitleridir ve bu nedenle telin geometrisine değil, yalnızca telin yapıldığı malzemeye bağlıdır. Direnç ve iletkenlik ters orantılı olarak artar yada azalır. Özdirenç, malzemenin elektrik akımına karşı koyma yeteneğinin bir ölçüsüdür (Standard Handbook for Electrical Engineers 11th Edition, 1978).

Bu formül kesin olmamakla beraber, pratik durumda her zaman doğrusal olmayan iletkendeki akım yoğunluğunun tamamen tekdüze olduğunu varsayar. Bununla birlikte bu formül, teller gibi ince-uzun iletken malzemeler için günümüzde hala iyi bir yaklaşım sağlamaktadır.

Bu formülün kesin olmadığı başka bir durum da alternatif akım (AC) ile ilgilidir, çünkü deri etkisi iletkenin merkezine yakın akım akışını engeller. O halde geometrik kesit, akımın fiilen aktığı etkin kesitten farklıdır, dolayısıyla direnç beklenenden daha yüksektir. Benzer şekilde, AC akım taşıyan iki iletken birbirine yakınsa, yakınlık etkisinden dolayı dirençleri artar.

Telin geometrisinin yanı sıra, sıcaklığın da iletkenlerin etkinliği üzerinde önemli bir etkisi vardır. Sıcaklık, iletkenleri iki ana yoldan etkiler; birincisi, malzemelerin ısı uygulaması altında genişleyebilmesidir. Malzemenin genişleyeceği miktar, malzemeye özgü termal genişleme katsayısı tarafından yönetilir. Böyle bir genişleme (veya büzülme), iletkenin geometrisini ve dolayısıyla karakteristik direncini değiştirecektir. Ancak bu etki genellikle küçüktür ve yaklaşık olarak 10^{-6} mertebesinde. Sıcaklıktaki bir artış, malzeme içinde üretilen fononların sayısını da artıracaktır. Bir fonon esasen bir kafes titreşimi veya daha doğrusu malzemenin atomlarının küçük, harmonik bir kinetik hareketidir. Bir langirt makinesinin sallanması gibi, fononlar elektronların yolunu bozarak onların dağılmasına neden olur. Bu elektron saçılması, elektron çarpışmalarının sayısını azaltacak ve dolayısıyla aktarılan toplam akım miktarını azaltacaktır.

2.3.2. Kompozit ve geleneksel iletkenler

Kompozit materyaller, iki ya da daha fazla sayıdaki aynı veya farklı gruptaki malzemelerin en iyi özelliklerinin, yeni ve tek bir malzemede toplamak amacıyla makro düzeyde birleştirilmesiyle oluşturulan materyaller olarak adlandırılırlar (Birecikli, 2016).

En az iki farklı malzemenin makro ölçekte birleştirilmesi ile elde edilen kompozit malzemelerde iki bileşen grubu da önemli rol oynar. Daha sert ve daha yüksek dayanıma sahip olan faz takviye fazı olarak adlandırılır. Ana yapı ise matris fazı olarak adlandırılır (Kurt, 2010).

İki farklı fazdan meydana gelen tüm malzemeler kompozit malzeme sayılmaz. Bir malzemenin kompozit olup olmadığını belirlemek için aşağıdaki kriterler kullanılabilir.

- Suni olarak üretilmiş olmalıdır. Bileşenleri, bir ara yüzeyle ayrılabilen ve kimyasal olarak farklı yapıdaki en az iki ham maddenin kombinlenmesi ile oluşturulmuş olmalıdır.
- Kompozit yapıyı oluşturan farklı ham maddeler, üç boyutlu olarak kombinlenmelidir.
- Belirlenen özellikler, kompozit ham maddeyi meydana getiren bileşenlerin hiçbiri tarafından tek başlarına sağlanamamalıdır (Kurt, 2010).

Kompozit malzemeler imal edildikleri farklı tip malzemelerin üstün özelliklerine sahip olurlar. Kompozit üretimi ile geliştirilebilecek özellikler maddeler halinde belirtilmiştir (Cilasun, 2013).

- Dayanım
- Elektriksel iletkenlik
- Termal iletkenlik
- Korozyon direnci
- Aşınma direnci
- Estetik özellik
- Ağırlık
- Yorulma dayanımı
- Sıcaklık karakteristiği
- Isı yalıtımı
- Ses yalıtımı

Bu geliştirilebilir olarak belirtilen özelliklerin tamamının bir malzemede birleştirilebilmesi imkansızdır. Üretilmesi planlanan kompozitler, kullanım amacına göre tasarlanmalı ve geliştirilmelidir.

Tüm bu üstün özelliklerin yanısıra kompozitlerin bazı olumsuz yönleri de vardır. Bu olumsuz yönlerden bazıları maddeler halinde belirtilmiştir.

- Üretim proseslerinin zorluğu.
- Çoğu zaman mevcut duruma göre maliyetinin daha yüksek olması.
- Geri dönüşümünün daha uzun sürmesi.
- Kırılma uzamasının az olması (Korçak, 2005).
- Mekanik özelliklerin tam olarak öngörülmesi zordur.
- Aynı kompozit malzeme için çekme, basma, kesme ve eğilme mukavemet değerlerinin farklılıklar göstermektedir (Önal, 2013).
- Kompozit malzemeler (parçacık takviyeli kompozitler hariç) anizotropiktir (Arıcasoy, 2006).

Bu çalışmada kullanılan kompozit iletkenin içeriği alüminyum ve bakırdan oluştuğu için, bundan sonraki paragraflardaki konular alüminyum ve bakır özelinde olacaktır.

Alüminyum alaşımlarını diğer endüstriyel metal ham maddelere göre birçok bakımdan avantajlı kılan özellikleri; hafiflik, mukavemet, geri dönüştürülebilirlik, paslanmaya karşı yüksek direnç, şekillendirilebilirlik, dövülebilirlik, işlenebilirlik, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik, ışık ve ısıyı iyi yansıtma özellikleri olarak sıralanabilir (Nalçacıoğlu, 2017).

Alüminyumun ham maddenin alaşım ve kompozitlerinin endüstriyel uygulamalardaki gün geçtikçe hızlı bir şekilde artmaktadır. Örnek vermek gerekirse, imal edilen bir taşıtın kütleli hafifliği, taşıt kütleli azaltılarak yakıt sarfiyatının azaltılması ve aracın taşıma kapasitesinin artırılması şeklindedir. İyi seviyede elektrik iletkenliğine sahip olan alüminyum ham madde, elektrik iletim hatlarında kullanılmaktadır. Sahip olduğu bu özelliği nedeniyle alüminyum, bakırdan imal edilen araç-gereçlerin ve yerini almaktadır (TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası, 2016).

Bakır ve alaşımları ise, geleneksel metaller arasında imal edilme ve tüketim bakımından demir/çelik ve alüminyumun ardından gelen en büyük üçüncü gruptur (Karadağ, 2017). Bakır insanlık tarihi boyunca kullanılan en eski metaldir. İlk keşfedildiği zamandan bugüne insanların hayatlarında hep bir yere sahip olmuştur. Hatta ve hatta bir çağa adını verebilecek kadar büyük bir öneme sahiptir. (Altınsoy, 2009).

Bakırın kullanımının yaygın olmasının ayrıca nedenlerinden bazıları da şunlardır; kolay şekil verilebilirlik, orta derecede mukavemet, dekoratif renk, paslanmaya karşı direnç, yüksek termal ve elektriksel iletkenlik. Saf bakır günümüz dünyasında kablo ve tellerde, elektrik kontak materyallerinde ve elektrik akımının iletimini sağlayan çok çeşitli aplikasyonlarda kullanılır (Karadağ, 2017).

Gümüş, elektrik iletkenliği en yüksek olan malzemedir (Karadağ, 2017). Ancak gümüş maliyetinin yüksek olması nedeniyle elektrik kontaklarında kullanılırken iletken olarak daha ucuz maliyetli olan; alüminyum, pirinç ve bakır tercih edilmektedir. Bakır, elektrik iletkenliği açısından bakıldığında gümüşten sonra en iyi iletkenliğe sahip olan metaldir. Bu nedendir ki elektrik iletkenliğinin önemli olduğu aplikasyonlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bakır ham maddenin gümüşten sonra elektrik iletkenliği açısından en büyük rakibi alüminyumdur, fakat alüminyumun iletkenlik ve mukavemet değerleri bakırınki kadar yüksek değildir.

İşte bu tez çalışmasında; bakır ve alüminyumun haddeleme yöntemiyle birleştirilmesi ile oluşturulmuş elektriksel, termal ve mekanik açıdan iyi özelliklere sahip yeni bir kompozit ham maddenin elektriksel anahtarlar da kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Analiz ve testlerde kullanılan bu Al-Cu bimetalik kompozit ham maddesinin sağladığı avantajlar maddeler halinde belirtilmiştir.

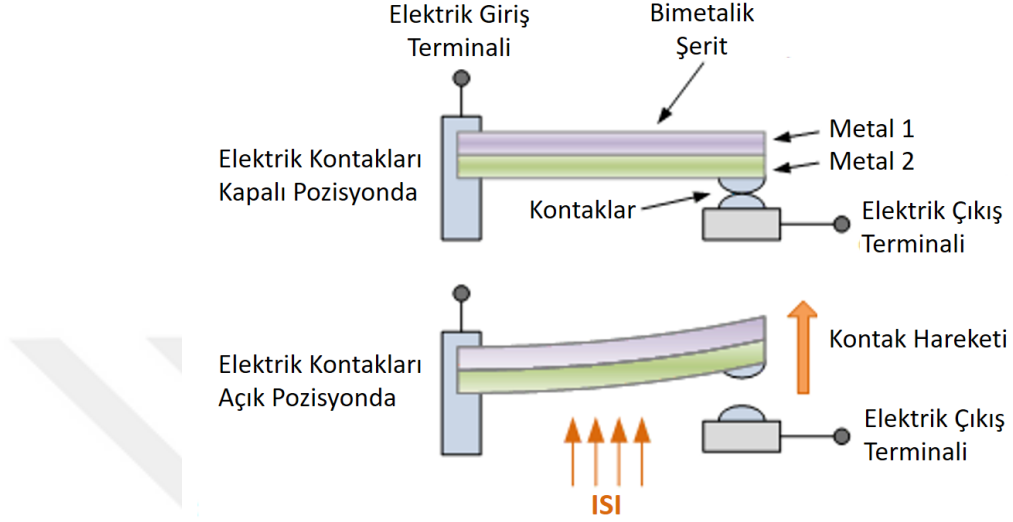
- Pirinç ham maddeye göre daha iyi termal ve elektriksel iletkenlik
- Hafiflik
- Kolay şekil verilebilirlik
- Düşük maliyet

Al-Cu bimetalik kompozit ham maddesinin sağladığı dezavantajlar maddeler halinde belirtilmiştir.

- Saf bakır ham maddeye göre nispeten daha kötü termal ve elektriksel iletkenlik
- Düşük mukavemet

Sıcaklık değişimini mekanik yer değişimine dönüştürmek için genellikle bimetalik şeritler kullanılır. Bimetalik şerit, ısıtıldıkça farklı oranlarda genişleyen iki farklı ısı genleşme katsayısına sahip metal şeridin perçinlenmesi ya da farklı yöntemlerle birleştirilmesi ile oluşur. Farklı genleşmeler, yassı şerit ısıtıldığında bir yönde ve

başlangıç sıcaklığının altına soğutulduğunda ters yönde bükülmeye zorlar. Daha yüksek termal genleşme katsayısına sahip metal, şerit ısıtıldığında eğrinin dış tarafında ve soğutulduğunda ise iç tarafındadır.



Şekil 2.22: Bimetal iletkenlerin çalışma prensibi

Bimetalik şeridin icadı, 1759'da icat edilen üçüncü deniz kronometresinin (H3) denge yayındaki sıcaklığa bağlı değişiklikleri telafi etmek için bir saat yapımcısı olan John Harrison tarafından yapılmıştır (Mason, 2013). Harrison'ın icadı, İngiltere'deki Westminster Abbey'deki anıtında sergilenmektedir (Westminster-Abbey, 2022).

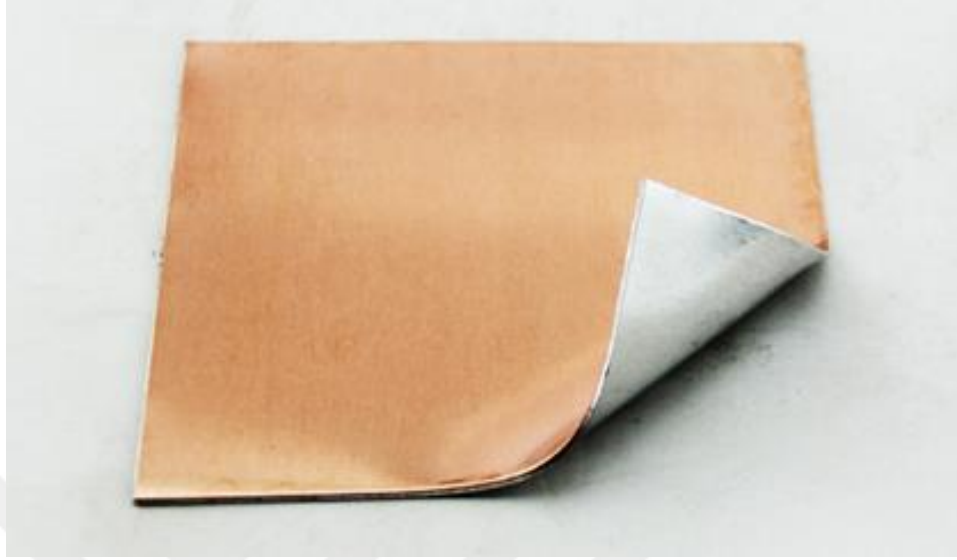
Bu etki, çeşitli mekanik ve elektrikli cihazlarda kullanılır. Buna; saatler, termostatlar, termometreler, ısı motorları, minyatür ve kompakt tip devre kesiciler gibi elektrikli cihazlar örnek verilebilir.

Şerit, ısıtıldıkça farklı oranlarda genişen, genellikle çelik-bakır, çelik-pirinç ve alüminyum-bakır gibi metallerden oluşan iki şeritten oluşur. Şeritler uzunlukları boyunca perçinleme, lehimleme, kaynaklama veya haddeleme ile birleştirilir.

Bazı uygulamalarda bimetal şerit düz formda kullanılmaktayken, diğerlerinde kompaktlık için bir bobine sarılır. Sarmal versiyonun daha uzun olması gelişmiş hassasiyet sağlar.

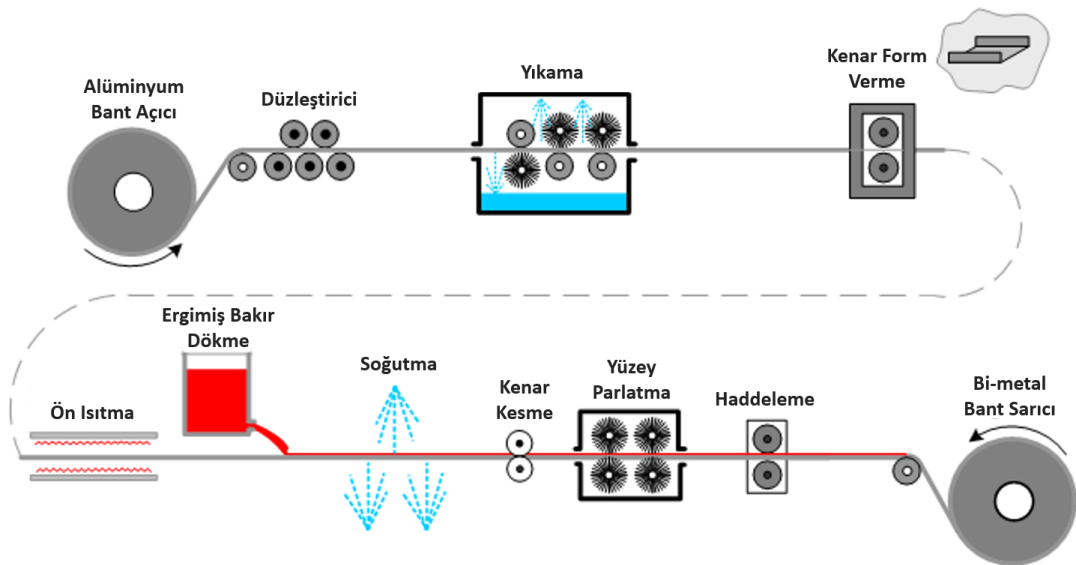
Bimetalik iletkenler, mekanik ısı enerjisinin mekanik enerjiye çevrilmesinin yanında iki farklı materyalin kendi fiziksel ve kimyasal özelliklerini koruyarak daha gelişmiş özellikler sunabilen kompozitlerdir. Bu tez çalışmasında, ısı genleşme katsayıları birbirine nispeten yakın olan bakır ve alüminyumun elektriksel iletim kabiliyetleri

incelenmiş ve bu ham maddenin uygun maliyetli bir iletken olarak kullanılabilirliği incelenmiştir.



Şekil 2.23: Analiz ve testlerde kullanılan Al-Cu bimetal levha

Elektrik iletiminde sıklıkla kullanılan bakır, pirinç, alüminyum ve fosfor-bronz gibi ham maddeler; eğer özel bir formda (çubuk, boru, köşebent, kare profil gibi) üretilmesi gerekiyorsa genellikle ekstrüzyon yöntemiyle, bant şeklinde üretilmesi gerekiyor ise haddelenerek üretilmektedir. Bir bimetalik şeridin üretim süreçleri aşağıdaki şemada belirtilmiştir.



Şekil 2.24: Al-Cu bimetal levha üretim prosesi

Testlerde Numune 1’de kullanılmak üzere kalıptan alınan Al-Cu bimetel giriş-çıkış terminalleri aşağıdaki görselde belirtilmiştir. Kalıptan baskı alınırken, kablo temas yüzeylerine bimetelik ham maddenin bakır tarafı denk gelecek şekilde baskı alınmıştır. Bunun nedeni ise, bakırın alüminyuma göre daha iyi bir iletken olması ve kablo bağlantı temas yüzeylerinde direncin daha az olacak olmasıdır. Direncin az olması da sıcaklığın daha az yükselmesine neden olmaktadır.



Şekil 2.25: Bimetelik levha kullanılarak alınan metal kalıp baskı numuneleri

2.4. Elektriksel yalıtkanlar

Elektriksel yalıtkan, elektriğin serbest bir şekilde akamadığı, ilerleyemediği maddelerdir. Bu nedenle elektriksel bir yüke maruz kaldıkları zaman, elektrik akımını iletmeleri zordur. Mükemmel olarak nitelendirilebilecek yalıtkan malzemeler bulunmamaktadır. Fakat, cam ve bazı polimerler gibi yüksek özdirence sahip bazı malzemeler çok iyi elektriksel yalıtkanlardır. Kauçuk polimerler ve birçok plastik bu gruba dâhildir. Bu tür malzemeler düşükten orta dereceli gerilimleri güvenli bir şekilde yalıtılmasına hizmet eder. Polimerler genel olarak çok zayıf elektriksel özellikleri ile yalıtkan özellik gösterirler. Elektriksel yalıtkan malzemeler, elektriği iletmemelerine rağmen uygulanan elektriksel alandan etkilenmektedirler. Elektriksel alan etkisi altında kaldıklarında elektrik yüklü elektronlar, iyonlar yer değiştirir, dolayısıyla elektriksel yük merkezleri yer değiştirir, bunun sonucu elektriksel kutuplaşma meydana gelir. Oluşan bu elektriksel kutuplar malzeme yüzeyinde elektriksel yük birikintilerine neden olur. Diğer yandan bazı dielektrik materyallerde boyutlar elektrik alan etkisi altında değişir, ayrıca kuvvet etkisi altında malzemenin uç noktaları arasında potansiyel fark meydana gelir (Yanılmaz, 2010).

Polimerler, elektriksel yalıtkanlığı iyi olan malzemeler olarak tanınmaktadır. Polimerlerin sahip olduğu kolay şekillendirme, maliyet avantajı, sünek ve hafiflik özellikleri ile metallerin bir yüksek iletkenlik özelliğini tek bir malzemedede toplayabilmek her zaman ilgi çeken bir araştırma konusu olmuştur.

Elektrik anahtarları ve devre kesici ürünlerde sıkça kullanılan yalıtkan plastik ve reçinelerin başlıcaları şu şekildedir; PC, PC/ABS, ABS, PP, PA6, PA6.6, PBT, TPE, BMC, SMC, bakalit. Tasarımlarda kullanılacak ham madde belirlenirken; uluslararası standartlarca belirlenmiş maksimum izolasyon dayanımı, yanmazlık, termal dayanım, mekanik dayanım ve ham madde birim maliyeti göz önünde bulundurularak karar verilmektedir.

Testlerde kullanılacak olan numune mekanizmalarının birincil yalıtkan parçaları olan altlık, altlık taşıyıcı ve mandal parçaları PC ham madde ile üretilmektedir. PC ham maddenin 1 MHz yük altındaki dielektrik sabiti 2,9'dur (Sabic, 2015). Polikarbonatın camsı geçiş sıcaklığı yaklaşık 147°C (Bayer Material Science Nafta, 2008), olduğundan bu noktanın üzerinde kademeli olarak yumuşar ve yaklaşık 155°C'nin üzerinde akar

(Cityplastics, 2012). Camsı geçiş sıcaklığı plastiğin yumuşayarak akışkan hale gelmeye başladığı sıcaklıktır. Bu sıcaklık değerleri analiz ve testlerde ortaya çıkan maksimum sıcaklıklar ile karşılaştırılarak, ısınan iletkenlerin PC ham madde ile üretilmiş yalıtkan parçaları için bir risk oluşturup oluşturmayacağı incelenecektir. Altlık ve altlık taşıyıcı parçaların kalıp baskı süreçlerine ait görsel şekil 2.26’da paylaşılmıştır.

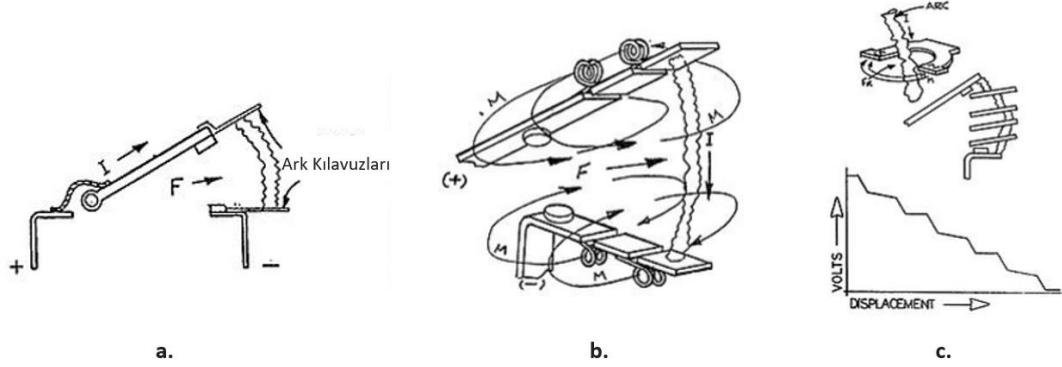


şekil 2.26: Polikarbonat (PC) ham madde kullanılarak alınan plastik kalıp baskı numuneleri

2.5. Elektrik Arkı

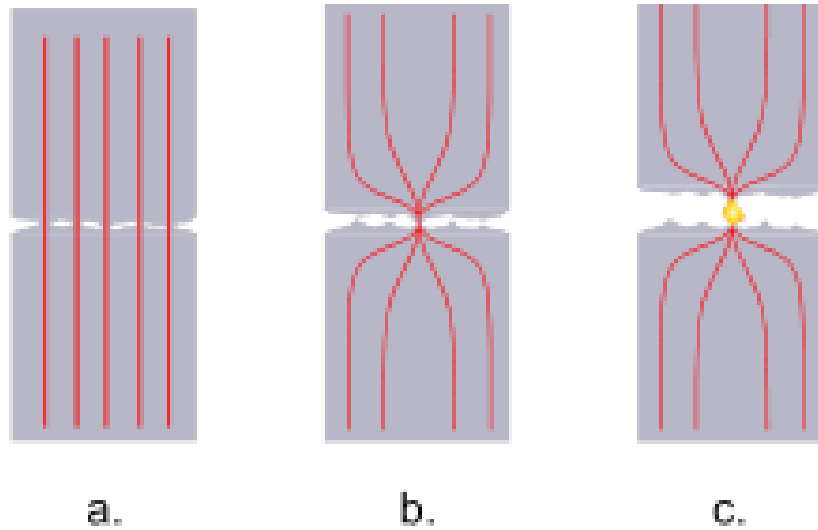
Anahtarlama arkı, üzerinden elektrik akımın geçen iki elektrik kontağı ayrıldığında meydana gelen bir seri arktır (halk dilinde kıvılcım olarak da bilinir). Düşük akımlarda genellikle kendi kendine snen kıvılcımlar oluşur. Daha yüksek akımlarda ise, kontakların yüksek sıcaklıklardan zarar görmesini önlemek için özel bileşenlerle ark oluşumu engellenir veya arkın hızlı bir şekilde bölünerek söndürülmesi sağlanır (Mechprod, 2022). İlgili görsellerde de belirtildiği gibi; ark yönlendirici tasarımları (a) ile ark uzunluğu artırmak, limitr ve bobin mekanizmaları gibi elektromanyetik kuvvetler (b) yardımı ile arkı ötelemek, ark söndürme odası (c) ile arkı parçalamak gibi yöntemler

ile oluşan ark kısa sürede bertaraf edilir. Tabi bu gibi sistemler genellikle yüksek amperli devre kesici ürünlerde kullanılmaktadır.



Şekil 2.27: Elektriksel ürünler için arkı uzaklaştırma ve parçalama yöntemlerinden bazıları (Mechprod, 2022)

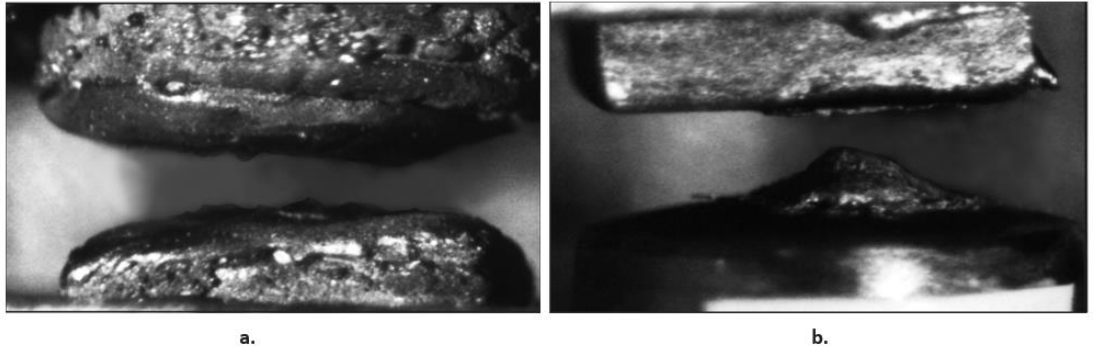
Anahtarlama arkları; elektrik akımının, aşağıdaki çizimde gösterildiği gibi kontaklar açıldıktan sonra bir ark boşalması şeklinde akmaya devam etmesi nedeniyle oluşur. Kapalı kontaklarda (a görselinde gösterildiği gibi), kırmızı akım çizgileriyle belirtildiği şekliyle yaklaşık olarak homojen bir akım dağılımı vardır. Kontaklar ayrılmaya başladığında, akım yoğunluğu son kontak noktasında (b görselinde gösterildiği gibi) yoğunlaşır. Kontakların daha da fazla açılması ile ark, (c görselindeki gibi) o noktada veya noktalarda kontaklar arasında oluşur ve yeterince ısınarak anlık bir patlamaya neden olur (Müller, 2015).



Şekil 2.28: Ark oluşumunun akım yoğunluğu ile ilişkisini belirten görsel (Müller, 2015)

Bunun nedeni, henüz tam olarak açık olmayan kontaklar arasındaki havanın iyonize olarak iletken bir hale dönüşmüş olmasıdır. Kontaklar birbirinden ayrıldığı anda küçük bir kesit üzerinden akım devam eder ve yüksek akım yoğunlukları, kopma noktalarında ışıma emisyonuna neden olur. Bunun sonucunda deforme olan kontaklar en sonunda kullanılamaz hale gelir veya çok uzun süreler ark oluşumu devam ederse artan ısı ile birlikte öncelikle kontak çevresinden başlayarak deformasyonu daha da artırır ve yangınlara sebebiyet verebilir. “Gümüş kontaklar arasında oluşan elektrik arkındaki elektronların oluşturmuş olduğu plazma ortamının sıcaklığının anlık olarak 50.000°C’ye kadar çıkabilmektedir” (Electrical Power Systems, 2017).

Net bir şekilde söylenebilir ki kontak arkının sonucu, kontak ömrünün kısalmasıdır. Arkın şiddetine ve süresine bağlı olarak, bir ark her tuttuğunda temas erozyonu meydana gelir. Bu erozyon, iki koşuldan biriyle sonuçlanacak olan temas malzemesi kaybına neden olur. Koşul 1; kontaklardan yük devresini elektriksel olarak kapatamayacak kadar çok malzemenin kaybolduğu yerdir (a). Koşul 2; bir kontağın diğer kontağa çok fazla malzeme kaybettiği ve bunun sonucunda ani bir krater oluşması durumudur (b). Görseller Şekil 2.29’da belirtilmiştir.

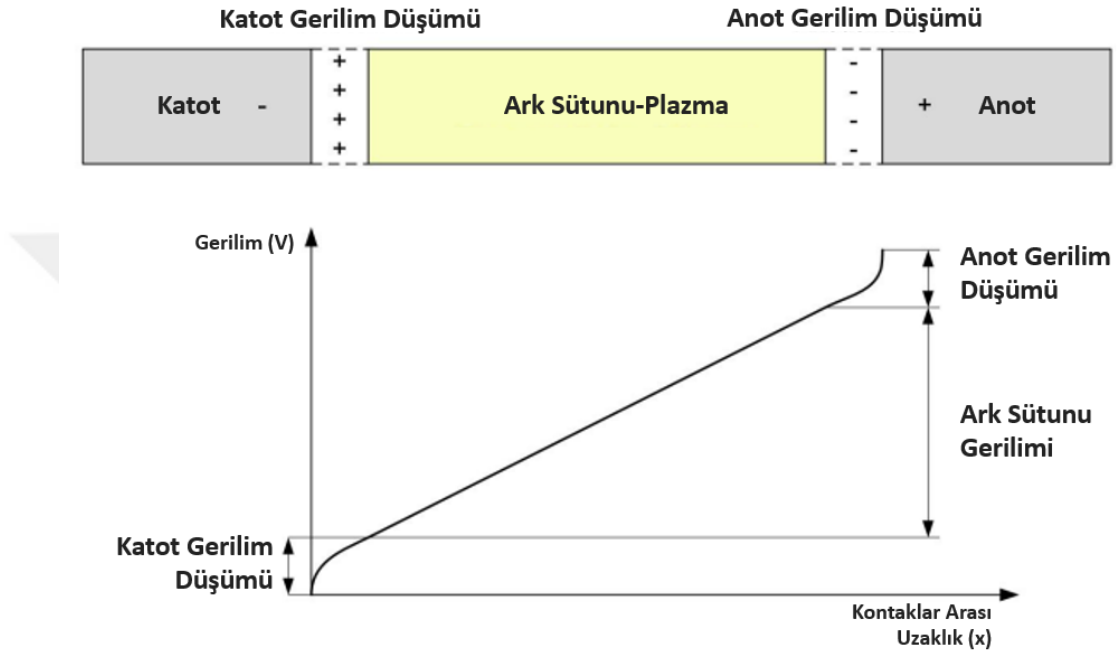


Şekil 2.29: Ark oluşumu nedeniyle kontaklarda oluşan deformasyonlar (TE Connectivity, 2016)

Endüktif yüklerin (motorlar, kontaktör bobinleri, elektromıknatıslar, transformatörler gibi) kapatılması özellikle sorun teşkil etmektedir. Burada, endüktansın manyetik alanında depolanan enerji, akımın akmaya devam etmesine neden olur ve kontaklar arasındaki voltaj, kontaklar açıldığında kısa sürede çok yüksek değerlere yükselir (TE Connectivity, 2016).

İki elektrot arasında yanan ark, Şekil 2.30’da gösterildiği gibi üç alana ayrılabilir. Plazma olarak da adlandırılan ark sütunu, arkın en büyük bölümünü oluşturur. Kolon, sıcak ve

çoğunlukla iyonize gazdan oluşur. İçinde manyetik alan kuvveti neredeyse sabittir ve gaz karışımının bileşimine, basınca ve soğutma koşullarına bağlıdır. 2×10^3 V/m ile serbest yanan arklar için bir yaklaşım olarak kabul edilebilir (Lindmayer, 1987). Plazmadaki elektrik alanı, yük taşıyıcıların kaymasına neden olarak akımın taşınmasını sağlar ve iletken görevi görür.



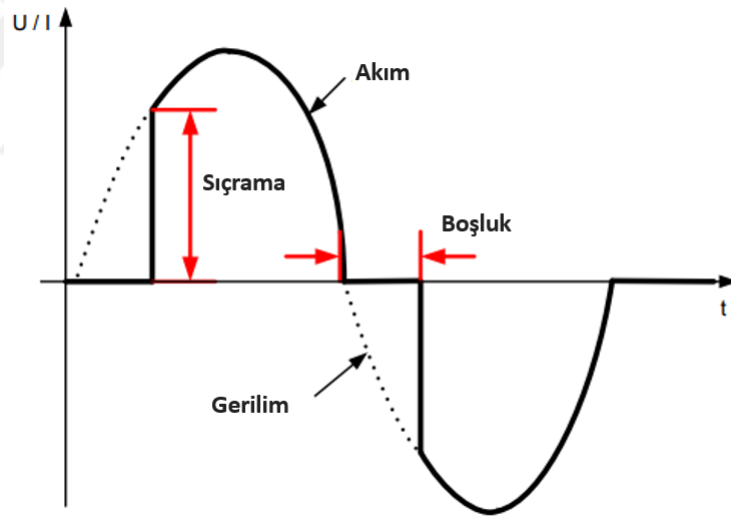
Şekil 2.30: İki kontak arasındaki arkın şematik yapısı ve katot-anot arasındaki ark voltajı karakteristik eğrisi (Müller, 2015)

Yük taşıyıcıların hareketi nedeniyle, elektrotlarda karşılık gelen yüksüz bölgeler oluşturulur. Bu bölgelere negatif potansiyele sahip katodun önündeki "katot gerilim düşümü" ve pozitif potansiyele sahip anodun önüne "anot gerilim düşümü" denir. Katot durumundaki pozitif iyonların hızlanması, katotla çarpışmadan sonra ısınmaya neden olarak, elektronların termiyonik emisyonuna neden olur. Bakır gibi düşük kaynama sıcaklığına sahip metallerde, katodun önünde akım yoğunluğu 10^{11} A/m²'ye kadar olan odak noktaları oluşabilir. Katot düşüşünün ve anot düşüşünün boyutu, kullanılan elektrot (kontak) malzemesine bağlıdır. Katot ve anot düşümü değerleri genellikle 10 V'un üzerindedir (Lindmayer, 1987).

Alternatif akım ve bir omik yük (fazdaki voltaj ve akım) ile akım akışı durumunda, gerilim arkı yeniden ateşleyecek kadar yüksek olana kadar sıfır konumunda durdurulur. Endüktif yük durumunda (akım voltajın gerisinde kalır), akım sıfır noktasını geçtiğinde

ark da söner. Bununla birlikte önde gelen voltaj nedeniyle, yeniden ateşleme voltajına daha hızlı ulaşılır, böylece kesinti daha önce açıklanandan önemli ölçüde daha kısa olur. Kısaltılmış zaman aşımı, ark yolunun yeniden iyonlaşmasını daha da kolaylaştırır. Bu da endüktif yüklerde, anahtarlama arkının omik bir yükten daha şiddetli söndüğü anlamına gelir (Müller, 2015).

Diğer yüklerin aksine ark, voltaj sıfır geçişinden sonra ateşlenir. Elektrotlar arasındaki yük taşıyıcılarında çığ benzeri artış ve bir plazma kanalı oluşumu nedeniyle, akım akışında çok hızlı bir artış mümkün olur. Ark akımı sıfırdan yükselir ve ardından artan voltajı takip eder. Bu ateşleme işlemi, kontaklar arasındaki gaz karışımına ve manyetik alan kuvvetine bağlı olarak farklı hızlarda gerçekleşir. Yüksek voltajlarda yalıtkan ortam SF6 (gazlı yalıtım sistemi) ile, birkaç nano saniyelik yükselme sürelerine sahip ark oluşumları elde edilebilir. Düşük voltajlı kontak yapılarında akımın yükselme süreleri çok daha yavaştır (Müller, 2015).

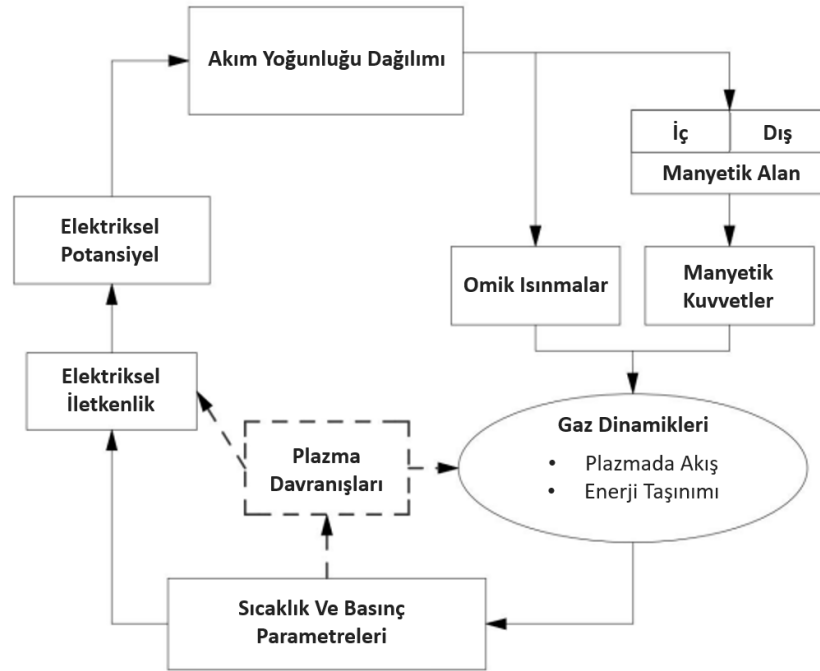


Şekil 2.31: AC arkının iki karakteristik özelliği (Müller, 2015)

Kapasitif yükte ise durum tam tersidir. Akım alternatif akım grafiğinde sıfır geçtiğinde, voltaj 0 yönünde daha da düşer ve bu nedenle ilgili ateşleme voltajı seviyesine tekrar ulaşmak önemli ölçüde daha uzun sürer. Ancak bu süre zarfında, ark aralığı (kontaklar arası) çoğunlukla deiyonize olmuş ve direnç artmıştır, bu da yeniden ateşlemeyi daha da zorlaştırmaktadır (Lindmayer, 1987).

Bu nedenle endüstriyel elektromekanik anahtarlar olan kontaktörler, yüksek endüktif yüklerde AC-3 yük tipi olarak adlandırılır ve bu ürünlerin kontak ömürleri aşırı artan kaynaklı olarak nispeten daha kısadır. Omik yüklerde ise AC-1 yük tipi belirtilir ve daha az yıpranma nedeniyle ömürleri birkaç milyon çevrim açma-kapama kadardır. Çok daha yüksek frekanslarda, anahtarlama arkları, doğrudan voltajda olduğu gibi benzer şekilde sorunlu bir şekilde davranır. Yüksek frekanslarda sönmeleri daha da zordur çünkü yer değiştirme akımları da burada iyonlaşmaya katkıda bulunur ve kontaklar arasındaki plazma ortamını destekler.

Bir arkın özelliklerini incelemek için durum simüle edilebilir ve pratik testler ile veriler çoğaltılabilir. Karmaşık simülasyon modelleri, özellikle arkın dinamik özelliklerini ve değişen çevresel koşullar altındaki davranışını (elektrotların temas şekli ve malzemesi, ark ayırıcılar ve çevredeki izolasyon malzemeleri tarafından soğutmanın etkisi vb.) araştırmak için oluşturulur. Bir arkı tanımlayan çok sayıda teorik olarak olası parametre (bir sonraki şekil), arkın çevresiyle etkileşimleri ve anlamlı bir sonucu etkileyebilecek bozucu değişkenler nedeniyle, bir simülasyonun hazırlanması önemli bir görevdir. Çok sayıda yayın ve tez; termal özellikler, yüzeylerle etkileşimler veya plazmadaki elektromanyetik süreçler gibi arkların farklı yönelimleri ile ilgilidir.



Şekil 2.32: Bir ark sütunu meydana getiren birleştirilmiş fiziksel süreçler (Lindmayer, 1987)

Ark simülasyonunun geniş alanına ve sınırlamalarına ve basitleştirmelerine genel bir bakış sağlar. Özellikle, bir ark tutuşturulurken ve yakılırken farklı etkileşimler nedeniyle, tam bir ark modeli oluşturmak, uygulamak çok zordur (Lindmayer, 1987).

Ark arızalarını tespit etme prosedürü, yalnızca simülasyona dayalı ark verilerini gerçekte karşılaştırmak genellikle zordur. Bu nedenle bu çalışmada ark simülasyonu kullanılmamış, bunun yerine deneysel test tercih edilmiştir. Bu, özellikle ark ateşlendiğinde rol oynayan stokastik etkilerin gerçekçi bir şekilde temsil edilebilmesi avantajına sahiptir. Benzer şekilde, ölçümlerden tüm faktörlerin önceden bilinmesi gereken bir simülasyondan çok daha fazla bilgi elde edilebilir. Ölçüm, tekrarlanabilirlikte dalgalanmalar olması dezavantajına sahiptir. Etkisi olabilecek nem, sıcaklık ve yüzey kalitesi gibi parametrelerin yeniden üretilmesi zordur. Ancak gerçekçi ölçümlerle, tüm sistemi tamamen modellemek zorunda kalmadan nispeten hızlı bir şekilde analiz edilebilir.

2.6. Elektriksel Ürün Standartları

19. Yüzyılda bilim adamları, ortak terminoloji, ölçüm ve derecelendirme eksikliğinin elektrik biliminin ilerlemesini yavaşlattığını ve sektörün gelişimini engellediğini fark etmeye başladılar.

Uluslararası Elektrik Kongresi 1904'te St. Louis'deki Dünya Fuarı'nda toplandığında; birçok farklı voltaj değeri, doğru akım veya 1, 2 veya 3 fazlı alternatif akımlı farklı cihazlar ve birçok farklı frekans değerinin yanı sıra çeşitli konektörler ve fişler sergiyi işgal etmekteydi. Her ne kadar bu farklılıklar elektriksel ürünlerin gelişimine katkı sağlasa da sektörün geleceği ve güvenlik risklerini minimize etmek için ortak bir paydada buluşulması gerekiyordu (IEC, 2022).

Sonuç olarak kongre, elektrikli aparat ve makinelerin dereceleri için terimleri ve ölçüleri belirlemekle görevli kalıcı bir uluslararası komisyon kurulması için bir teklifte bulundu. Daha sonrasında, IEC (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) Londra'da kuruldu ve ilk toplantısını 26 ve 27 Haziran 1906'da Hotel Cecil'de Alexander Siemens başkanlığında yaptı (IEC, 2022).

Avusturya, Belçika, Kanada, Fransa, Almanya, İngiltere, Hollanda, Macaristan, İsviçre, İspanya, Japonya ve ABD'den temsilciler katıldı. Norveç, İsveç ve Danimarka, temsil edilmese de önerilen örgütün üyeleri idi.

Bu toplantıda Lord Kelvin, Komisyonun ilk Başkanı seçildi ve Charles Le Maistre Sekreter vekili oldu, Le Maistre 1953'teki ölümüne kadar bu pozisyonu korudu.

Uluslararası elektrik ve elektriks el ürün standartları yüzyılı aşkın bir süredir IEC tarafından denetlenmekte ve geliştirilmektedir (IEC, 2022).

2.6.1. IEC'nin amaçları

1906 yılından beri elektrik ve elektronik alanlarında uluslararası standart hazırlama görevini üstlenen IEC'nin (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu) amacı, elektrik ve benzer teknolojiler konusunda uluslararası standartlar hazırlamaktır (Küçük, 2004).

- Elektrik ürünleri piyasalarının gerekliliklerini efektif bir şekilde yerine getirmek,
- Elektrik sektöründeki teknik problemleri aşarak yeniliklere öncülük etmek ve dünya ticaretini kolaylaştırmak,
- Farklı kompleks yapıların karşılıklı çalışır olması için gerekli şartları hazırlamak,
- Sağlık ve güvenliği gözetmek amacıyla ürünlerde denetimler yapmak ve gerekli durumlar da yaptırımlar uygulamak,
- Sanayi uygulamalarının verimliliğini artırmak,
- Gelişen sektörün ihtiyaçlarını karşılayacak alt yapıyı oluşturmak,
- Ürün ve servislerin kalitesini yukarıda tutmak ve artırmaktır (IEC, 2022).

2.6.2. IEC'nin hedefleri

- Küresel çaptaki pazarın ihtiyaçlarını karşılamak,
- Ürünlerin ve hizmetlerin kalitesini arttırmak ve kalitede sürekliliği sağlamak,
- Sağlık ve güvenliğ e katkıda bulunmak,
- Doğanın korunmasına katkı sağlamaktır (Küçük, 2004).

2.7. RoHS Direktifi

Elektrikli ve elektronik cihazlarda belirli tehlikeli maddelerin kullanımının kısıtlanmasına ilişkin yönergenin kısaltması olan Tehlikeli Maddelerin Kısıtlanması Yönergesi (Restriction of Hazardous Substances Directive) 2002/95/EC (RoHS 1), Avrupa Birliği tarafından Şubat 2003'te kabul edilmiştir (Avrupa Birliği, 2011).

RoHS 1 direktifi 1 Temmuz 2006'da yürürlüğe girdi ve her üye devlette zaman içerisinde yasalaştı. Bu direktif (istisnalar dışında) çeşitli elektronik ve elektrikli ekipmanların imalatında on tehlikeli maddenin kullanımını kısıtlamaktadır. İstisnalara ek olarak, güneş paneli gibi ürünler için istisnalar vardır. Elektrikli ürünler için toplama, geri dönüşüm ve geri kazanım hedeflerini belirleyen 2002/96/EC Atık Elektrikli ve Elektronik Ekipman Direktifi (WEEE) ile yakından bağlantılıdır (Avrupa Birliği, 2011).

Her Avrupa Birliği üye devleti, yönergeyi rehber olarak kullanarak kendi uygulama ve uygulama politikalarını benimsemektedir.

RoHS genellikle "kurşunsuz direktif" olarak anılır ve aşağıdaki on maddenin kullanımını kısıtlar (Avrupa Birliği, 2011):

- Kurşun (Pb)
- Cıva (Hg)
- Kadmiyum (Cd)
- Altı değerli krom (Cr 6+)
- Polibromlu bifeniller (PBB)
- Polibromlu difenil eter (PBDE)
- Bis(2-etilheksil) ftalat (DEHP)
- Butil benzil ftalat (BBP)
- Dibütil ftalat (DBP)
- Diizobütil ftalat (DIBP)

İzin Verilen Maksimum Konsantrasyon: %0,1

Kadmiyum için Maks: %0,01

BÖLÜM 3. MODELLEME VE ANALİZ

3.1. Teorik Termal Model

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 ham madde 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, Łapczynski, Kolimas, & Zalewski, 2021):

$$P = I^2 \times R \quad (3.1)$$

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

İletkendeki akım akışıyla ilgili tüm hesaplamalar, aşağıdaki Maxwell denklemleri kullanılarak mümkündür (Szulborski, Łapczynski, Kolimas, & Zalewski, 2021):

$$\nabla \times \{H\} = \{J\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} = \{J_s\} + \{J_e\} + \{J_v\} + \left\{ \frac{\partial D}{\partial t} \right\} \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \{E\} = - \left\{ \frac{\partial B}{\partial t} \right\} \quad (3.3)$$

$$\nabla \cdot \{B\} = 0 \quad (3.4)$$

$$\nabla \cdot \{D\} = \rho \quad (3.5)$$

Burada $\nabla \times$ curl (kırılma) operatörü, ∇ ıraksaklık operatörü, $\{H\}$ manyetik alanın 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 yolları için hesaplamalar yapılması durumunda, her türlü ısı dağılımı meydana gelebilir. İletken veya yalıtkan malzeme tarafından aktarılan ısı, iletim yoluyla gerçekleştirilir. Nominal yük için elektrikli cihazların termal akım yollarını hesaplarken, radyasyonla ısı transferinin payı ve doğal konveksiyon benzerdir (Szulborski, Łapczyński, Kolimas, & Zalewski, 2021).

Termal hesaplamalarda çevreye doğru olan ısı transferinin koşulları genellikle ısı transfer katsayısı (h) kullanılarak yapılır. Buradaki ısı transfer katsayısı; soğutulan cisimden çevreye birim zamanda verilen ısı miktarını tanımlar.

Hava ortamına yerleştirilen akım taşıyan iletkenin ısı transfer katsayısı aşağıdaki denklemde de gösterildiği gibi konveksiyon ve radyasyon yoluyla olan ısı transfer katsayılarının toplamı kadardır (Szulborski, Łapczyński, Kolimas, & Zalewski, 2021).

$$k = k_r + k_k \quad (3.9)$$

Burada k_r radyasyonla olan ısı transferinin katsayısı ve k_k ise konveksiyonla olan ısı transferinin katsayısıdır.

$$\frac{Q_o}{Q} + \frac{Q_w}{Q} + \frac{Q_p}{Q} = 1 \quad (3.10)$$

Burada Q_o dalga yansıma katsayısı, Q_w dalga absorpsiyon katsayısı, Q_p ise dalga iletim katsayısıdır.

Stefan-Boltzman yasasını kullanarak, yayılan cismin yüzeyine göre radyasyon gücü P_{pr} 'yi belirlemek mümkündür (Szulborski, Łapczyński, Kolimas, & Zalewski, 2021):

$$P_{pr} = \varepsilon \sigma_0 \theta^4 \quad (3.11)$$

Burada ε siyah ışıma katsayısı, σ_0 Stefan-Boltzmann katsayısı, θ ise radyoaktivite gösteren iletkenin Kelvin cinsinden sıcaklık değeridir.

Belirli bir akım güzergahında meydana gelen radyasyon esnasında farklı uzunluklarda elektromanyetik dalgalar gönderilir. Ancak, hepsi termal enerjiyi aktaramaz. Dalga boyuna bağlı olarak enerjiyi az ya da çok yayarlar. Ortama ısı enerjisini en etkin şekilde aktaran dalga boyları, 0,4-10 μm aralığındaki ve kırmızılaşmış alan olarak adlandırılan bölgede yer alan dalgalardır. Belirli bir cisimden yayılan enerji kısmen yansıtılır, kısmen emilir ve başka bir cisimden geçer; bu fenomen aşağıdaki formülle tanımlanır (Szulborski, Łapczyński, Kolimas, & Zalewski, 2021):

$$dQ = -\lambda S \text{ grad } \vartheta dt \quad (3.12)$$

$$P_C = -\lambda S \text{ grad } \vartheta \quad (3.13)$$

$$P = -\lambda \text{ grad } \vartheta \quad (3.14)$$

Burada dQ , dt süresi boyunca S yüzeyinden iletim yoluyla aktarılan ısı enerjisi miktarıdır. $\text{grad } \vartheta$, S yüzeyine normal sıcaklık gradyanı, λ malzemenin termal iletkenlik katsayısıdır. P_C , S yüzeyinden iletim yoluyla aktarılan toplam ısı gücüdür. Ve P , iletim yolu ile birim alandan aktarılan ısıyı ifade etmektedir.

λ katsayısının değeri, tüm cisimler için cismin sıcaklıklarına bağlıdır. Ek olarak, katılar söz konusu olduğunda malzemenin yapısına, özgül ağırlığına, basınca ve neme de bağlıdır. Termal iletkenlik, elektriksel olarak yalıtkan malzemeler söz konusu olduğunda örneğin bakır akım yoluna göre birkaç kat daha düşüktür (Szulborski, Łapczyński, Kolimas, & Zalewski, 2021).

Temas eden yüzeyler veya bir yüzey ile çevresi arasındaki enerji değişimi, genel ısı dağılımı üzerinde büyük bir etkiye sahip olabilir. Bu nedenle, radyasyon etkileri genel olarak ısı transfer çözümünü sadece sınır koşulları yoluyla etkilese de, bu birliktelik radyasyonun doğrusal olmayan sıcaklık bağımlılığı nedeniyle özellikle güçlüdür. Bu nedenle, başlama noktaları aşağıdaki denklemlerdir (Szulborski, Łapczyński, Kolimas, & Zalewski, 2021).

Stefan-Boltzmann yasasını n -yüzey sistemi için genişleterek, her yüzey için enerji dengesi, enerji kayıplarını yüzey sıcaklıklarıyla ilişkilendiren Siegal ve Howell denklemi ile tanımlanabilir (Szulborski, Łapczyński, Kolimas, & Zalewski, 2021).

$$\sum_{i=1}^n \left(\frac{\delta_{ji}}{\varepsilon_i} - F_{ji} \cdot \frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i} \right) \frac{1}{A_i} \cdot Q_i = \sum_{i=1}^n (\delta_{ji} - F_{ji}) \sigma \cdot T_i^4 \quad (3.15)$$

Burada n yüzey sayısını, δ_{ji} Kronecker deltası, ε_i emisyon, F_{ji} radyasyon faktörü, A_i yüzey alanı, Q_i enerji kayıpları, σ Boltzman faktörü ve T_i mutlak sıcaklıktır.

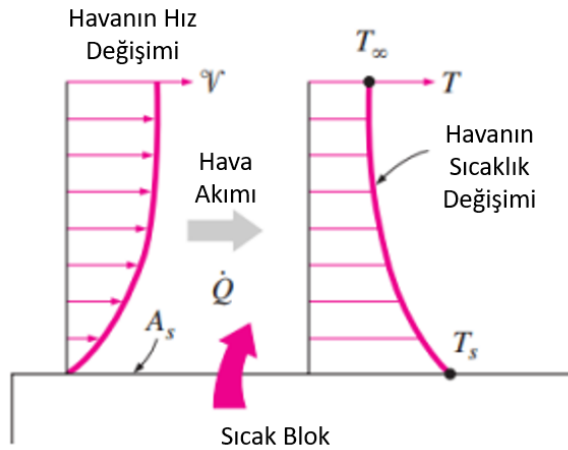
İletim ve taşınım için gerekli fiziksel temeli, enerjinin korunumundan bahseden termodinamiğin birinci yasasında bulmak mümkündür.

$$\rho \cdot c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \cdot \{L\} \cdot T \right) + \{L\}^T \cdot \{q\} = \ddot{q} \quad (3.16)$$

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.

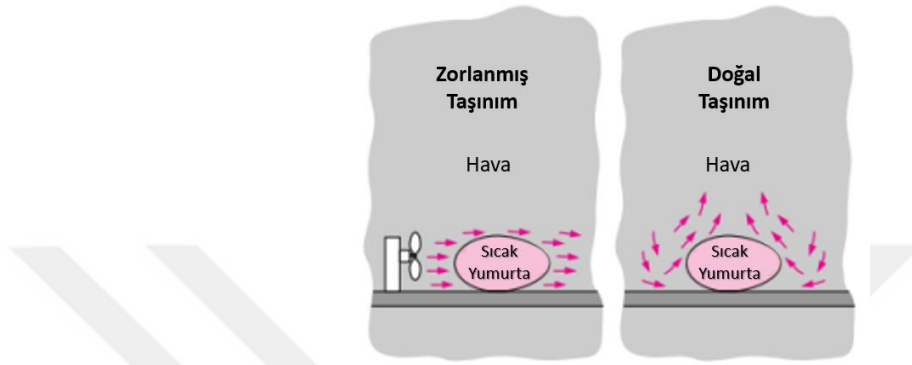
Taşınım, bir katı yüzey ile ona bitişik, hareket halindeki akışkan (sıvı ya da gaz) arasında ısı transfer türüdür. Taşınımla ısı geçişi, rastgele moleküler hareket (yayılm/konveksiyon) ve akışkanın kitlesel ya da yığın hareketi (adveksiyon) olmak üzere iki mekanizmadan oluşur. Akışkan hareketi ne kadar hızlı olursa taşınım 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 & Ghajar, 2014).

Bir sonraki şekilde gösterildiği gibi, sıcak bir bloğun üst yüzeyinden soğuk hava üflenerek soğutulmasını dikkate alalım; ısı önce blok ile bitişik hava tabakasına iletim ile aktarılır (çünkü bloğa bitişik hava tabakasının hızı sıfırdır). Daha sonra ısı yüzeyden taşınım (yayılm/konveksiyon + adveksiyon) ile transfer edilerek blok yüzeyi soğutulur. Taşınım içerisindeki rastgele moleküler hareket (yayılm) katkısı, akışkan hızının düşük olduğu yüzeye yakın kısımda etkilidir (Çengel & Ghajar, 2014).



Şekil 3.1: Sıcak bir yüzeyden havaya taşınım ile ısı transferi (Çengel & Ghajar, 2014)

“Taşınım ile ısı geçişi, akışın türüne göre zorlanmış ve doğal taşınım olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Zorlanmış taşınım; akışkan hareketi fan, pompa veya rüzgar gibi dış bir etki ile oluşur. Doğal taşınım ise; akışkan hareketi meydana getiren dış bir etki yoktur. Akışkan içerisindeki sıcaklık değişiminin ortaya çıkardığı yoğunluk farkından kaynaklanan kaldırma kuvveti ile oluşur.” (Kaya, 2011).



Şekil 3.2: Zorlanmış ve doğal taşınım örnekleri (Çengel & Ghajar, 2014)

Doğal taşınım katsayısı hesabı yapılırken aşağıda belirtilen Newton Soğuma Kanunu kullanılmıştır.

$$\dot{Q} = h \cdot A_s (T_s - T_\infty) \quad (3.17)$$

Burada $\dot{Q}$ ısı taşınım miktarını ifade etmektedir ve birimi Watt'tır. h , taşınım 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 taşınım herhangi bir şekilde zorlanmamış olduğu için doğal taşınım olarak ele alınacaktır. Isı kaynağından havaya olan doğal taşınım katsayısı aşağıdaki tabloda da belirtildiği üzere $2-25 W/m^2 \cdot ^\circ C$ arasındadır (Turan, 2022).

Tablo 3.1: Tipik konveksiyon ısı transfer katsayısı değerleri (Çengel & Ghajar, 2014)

Taşınım Tipi	Taşınım Katsayısı, h ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
Gazların Doğal Taşınımı	2-25
Sıvıların Doğal Taşınımı	10-1000
Gazların Zorlanmış Taşınımı	25-250
Sıvıların Zorlanmış Taşınımı	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 oluşturmaması nedeniyle sıcaklığı kontrol altında tutmak ilk sırada gelmektedir. Bu tez çalışmasında da elektriksel anahtarlarda kullanılacak yeni bir alternatif ham maddenin sıcaklık bakımından uygunluğu incelenmektedir.

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

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

İlk durumda, akım yolundan salınan ısı miktarı çevreye verilen ısı miktarına karşılık geldiğinde test edilen akım yolları termal denge durumuna ulaşır (Szulborski, Łapczynski, Kolimas, & Zalewski, 2021).

İletkenlerin anlık kısa devre akımları ile ısıtılması durumunda, süreleri çevreye anlık olarak verilen ısı miktarı ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Elde edilen sıcaklık, esas olarak geçen kısa devre akımı sırasında çevreye salınan ısı miktarına bağlıdır.

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.

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

- Temas direnci
- İletkenin özgül direnci
- Ürünün mekanik mukavemeti
- İletkenleri çevreleyen yalıtkanların ısıl 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 sınır sıcaklık artışları TS EN 60669-1 standardında tanımlanmıştır.

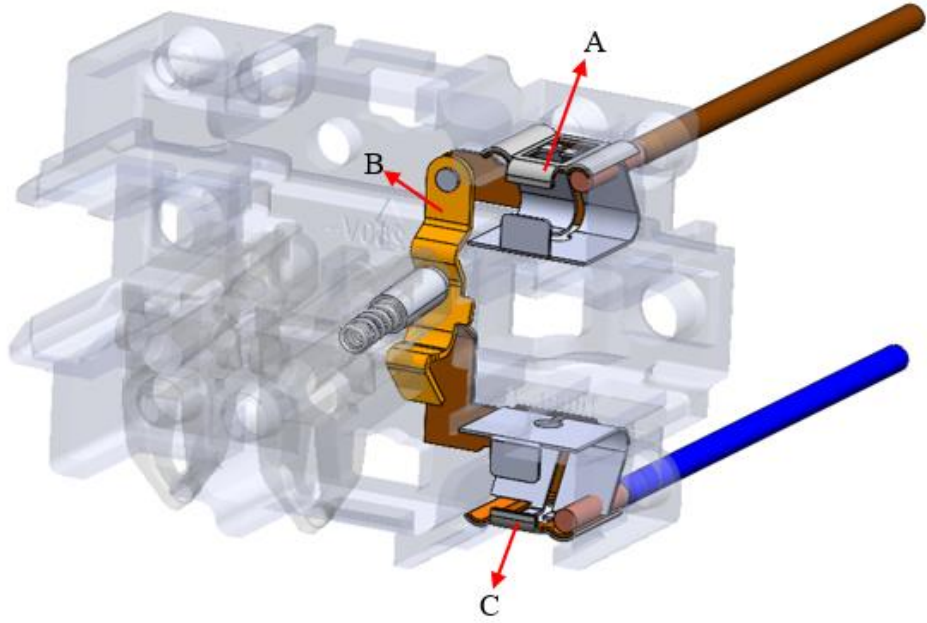
Standart gereği uygulanması gereken testleri kısaca özetlemek gerekirse;

- Testlere başlanmadan önce numuneler ön bir kontrole tabi tutulmalıdırlar. Anahtar mekanizmasının elektriği açma-kapama görevini yerine getirebiliyor olmalıdır. Akım taşıyan bölümler kolayca erişilemeyecek şekilde izole edilmiş olmalıdır. Ürün boyutsal olarak standart ölçülere uygun olmalıdır. Testler gerçekleştirilirken oluşabilecek problemler öngörülerek, test numuneleri iyileştirilmelidir. Üründe kullanılan ham maddelerin RoHS uygunluğu kontrol edilerek yasaklı materyallerin ürünlerde kullanılmadığından emin olunmalıdır.
- Aşırı akım testleri; ilk test olarak 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).
- Elektrik yükü altında mekanik ömür testleri; numune ürünler ömür testi cihazına bağlanarak ürünlere beyan değerleri kadar akım ve voltaj verilmektedir. Üzerinde elektrik yükü bulunan ürünler 40.000 kere açma-kapamaya tabi tutulur ve ürünün gündelik kullanımı simüle edilerek ömür testine tabi tutulur. Bu testler ilgili standardın 19. maddesinde beyan edilmektedir (TSE, 2005).
- Ömür testi sonrası sıcaklık artışı testleri; standardın 19. maddesi uyarınca uygulanan ömür testi sonrasında ürünler testi başarı ile tamamlamışsa, 17. maddede olduğu gibi tekrar sıcaklık artışı testine tabi tutulurlar. Buradaki tek fark, ömür testi sonrasında uygulanan sıcaklık artışı testinde ürüne beyan akımı verilerek sıcaklık ölçümü yapılmaktadır (TSE, 2005).
- İzolasyon testi; eğer ürün yukarıdaki maddelerde belirtilen testleri tamamlamış ve testler sırasında herhangi bir problemle karşılaşılmamışsa, ürün izolasyon testine tabi tutulur. Ürüne faz-nötr arası 1500V gerilim uygulanarak izolasyon zafiyeti olup olmadığı gözlemlenir. Son olarak da, ürünün akım taşıyan bölümleri ile dış parçaları arasında 2800V gerilim uygulanarak izolasyon durumu incelenir (TSE, 2005).

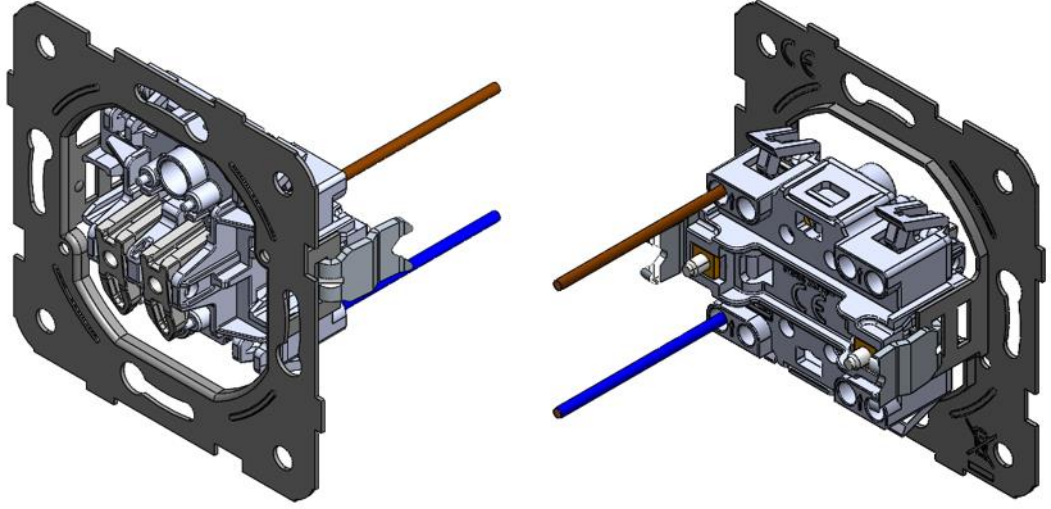
3.2. Elektrik Anahtarı 3D Modeli

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 3.3’te belirtilmiştir. Opak olarak gösterilen parçalar, analizde kullanılacak olan birincil parçalardır. Şeffaf olarak gösterilen parçalar ise izolatör ve koruyucu görev üstlenen plastik parçalardır.



Şekil 3.3: İletken parçaların montaj gösterimi: A-Giriş Terminali, B-Orta Kontak, C-Çıkış Terminali



Şekil 3.4: Ürünün alt mekanizmasının montaj görünümü

Bu şekilde hazırlanan elektriksel anahtarın 3 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 analizin yapılmasına izin verdi.

3.3. Sonlu Elemanlar Analizi (FEA) Simülasyonları

Bu başlık altında Ansys Maxwell 3D analizleri için varsayım ve ayarlar üzerine yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Yapılan birleştirilmiş analiz Ansys Maxwell 3D ve Ansys Transient Thermal modülleri kullanılarak iki farklı çözücünün birleştirilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Yapılan analiz çalışmaları başlıklar altında detaylı olarak açıklanmıştır.

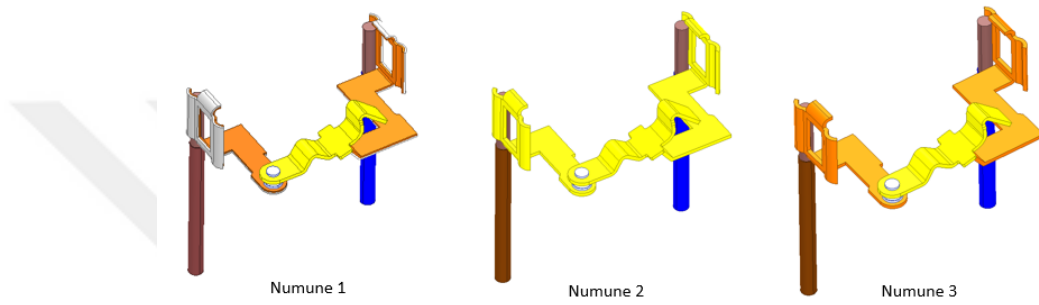
3.3.1. Elektriksel kaynaklı ısı oluşumu simülasyonları

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

Yapılacak olan analizlerde, hesaplamalı simülasyonlar elektrik anahtarında kullanılan iletken parçaların üç farklı ham madde konfigürasyonu için gerçekleştirilmiştir. Oluşturulan farklı numunelere ait bilgiler Tablo 3.2’de belirtilmiştir.

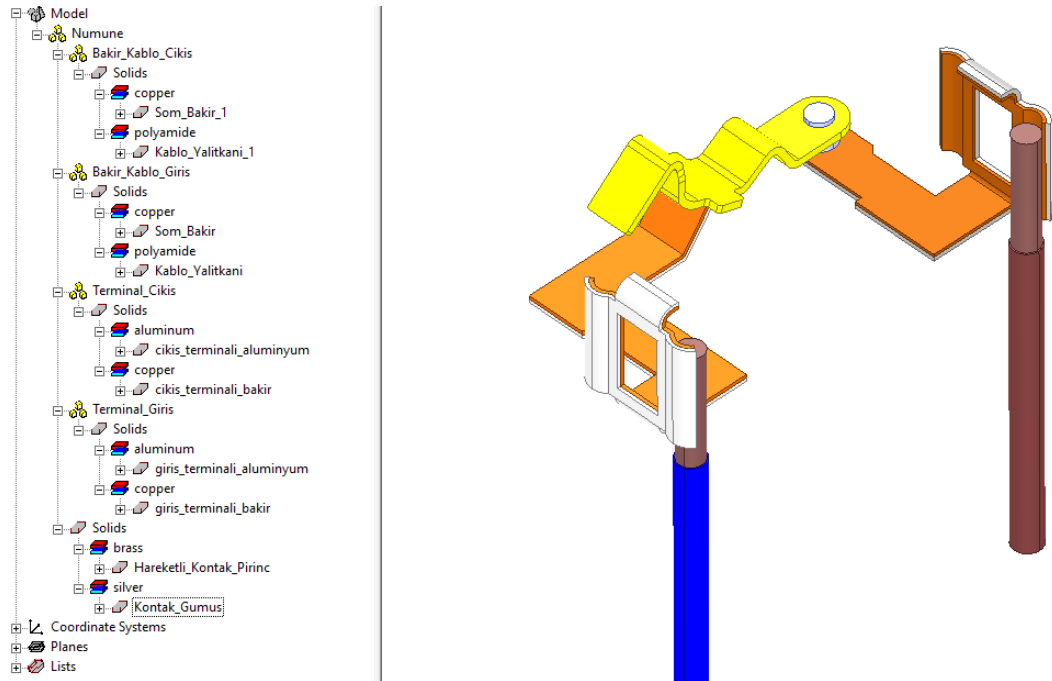
Tablo 3.2: Numunelerde kullanılan parçaların ham madde bilgileri

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



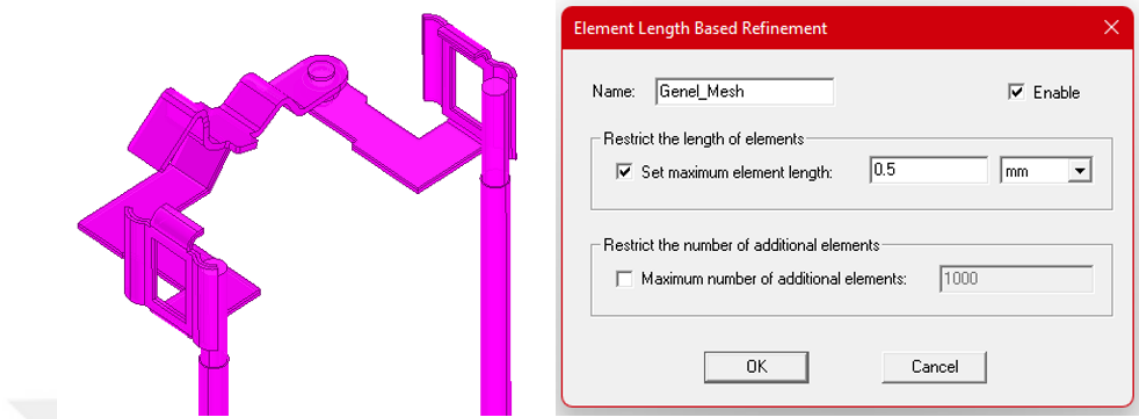
Şekil 3.5: Üç farklı numuneye ait 3D model görselleri

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



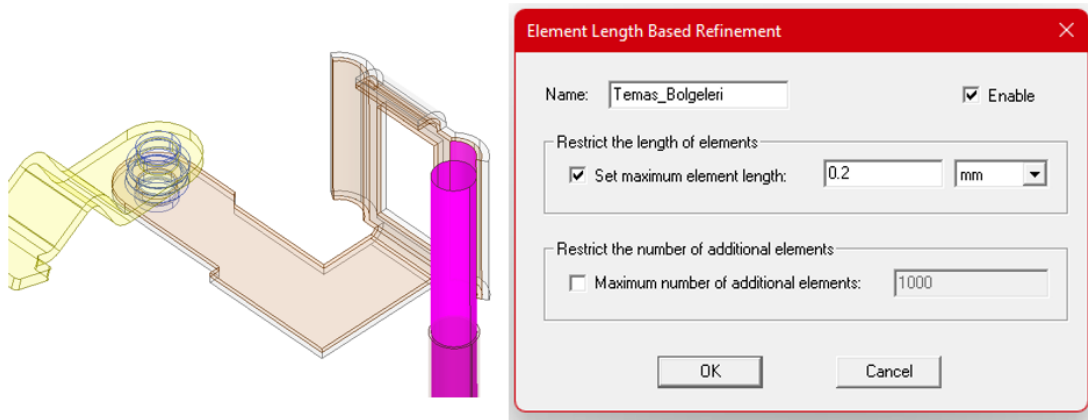
Şekil 3.6: Malzeme özelliklerini tanımlanması

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



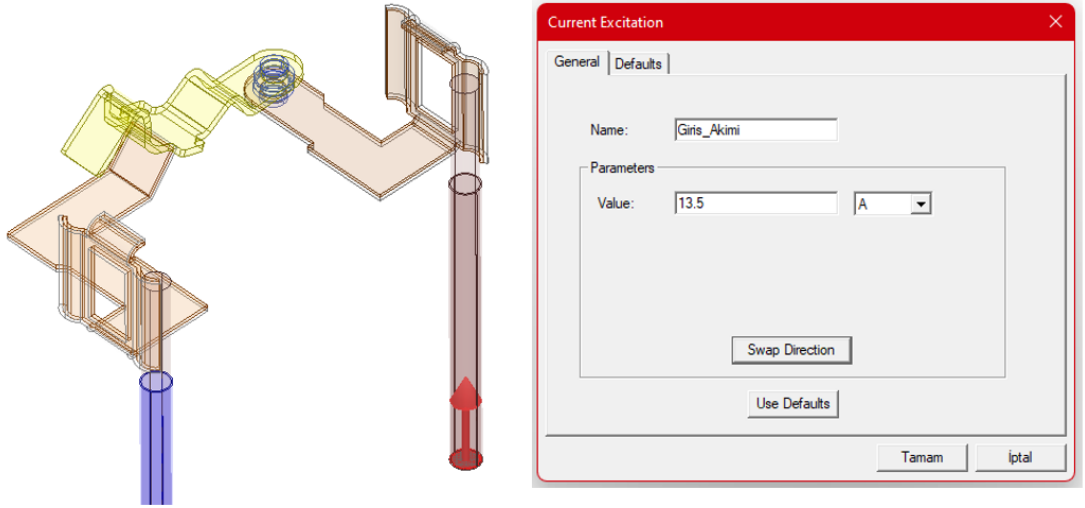
Şekil 3.7: Genel mesh özelliklerinin tanımlanması

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



Şekil 3.8: Bölgesel mesh özelliklerinin tanımlanması

Ardından, ilgili standartta geçen “Beyan akımı 10A olan anahtarlarda 2,5 mm²’lik, 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.



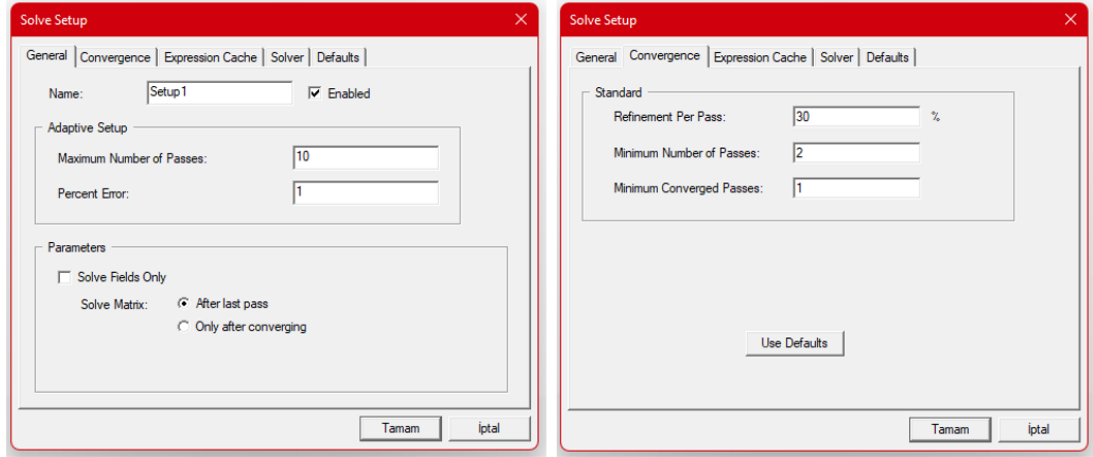
Şekil 3.9: Giriş akımının tanımlanması

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



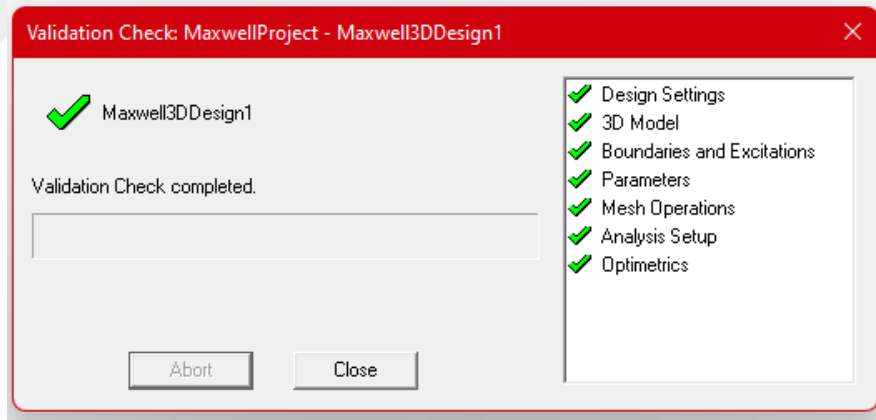
Şekil 3.10: Gider (sink) tanımlanması

Bir sonraki adım olarak analiz çözücü ayarları aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.



Şekil 3.11: Çözücü ayarlarının 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 3.12: 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. Simülasyon çoğu zaman, birçok hesaplama yinelenmesine ve birkaç milyon Tetrahedra ögesinden oluşan güçlü bir şekilde oluşturulmuş hesaplama ağına

rağmen yakınsamayı başaramaz. Şekil 3.13, Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'te sırasıyla Numune 1 (Al-Cu), Numune 2 (Pirinç) ve Numune 3 (Bakır) için hesaplamalı iterasyon verileri belirtilmiştir.

Pass	# Tetrahedra	Total Loss (W)	Loss Error (%)	Delta Loss (%)
1	258700	0.23204	0.25326	N/A
2	351400	0.23223	0.16537	0.080613

Şekil 3.13: Numune 1 (Al-Cu) hesaplamalı iterasyon verileri

Pass	# Tetrahedra	Total Loss (W)	Loss Error (%)	Delta Loss (%)
1	257631	0.21415	0.28629	N/A
2	349789	0.44075	0.18234	105.65
3	475720	0.26672	0.11283	39.506
4	646986	0.26676	0.07008	0.018314

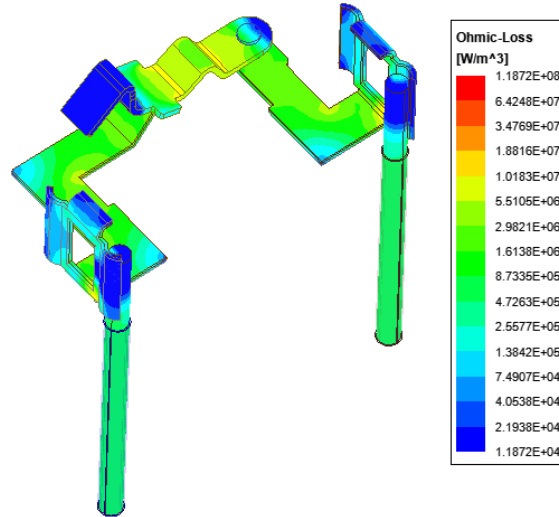
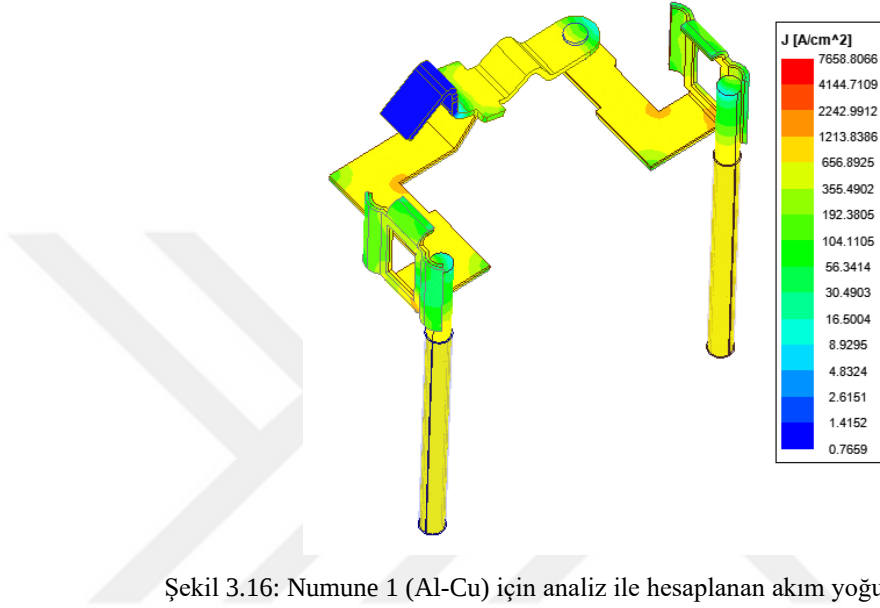
Şekil 3.14: Numune 2 (Pirinç) hesaplamalı iterasyon verileri

Pass	# Tetrahedra	Total Loss (W)	Loss Error (%)	Delta Loss (%)
1	257631	0.21415	0.28629	N/A
2	349789	0.21431	0.17254	0

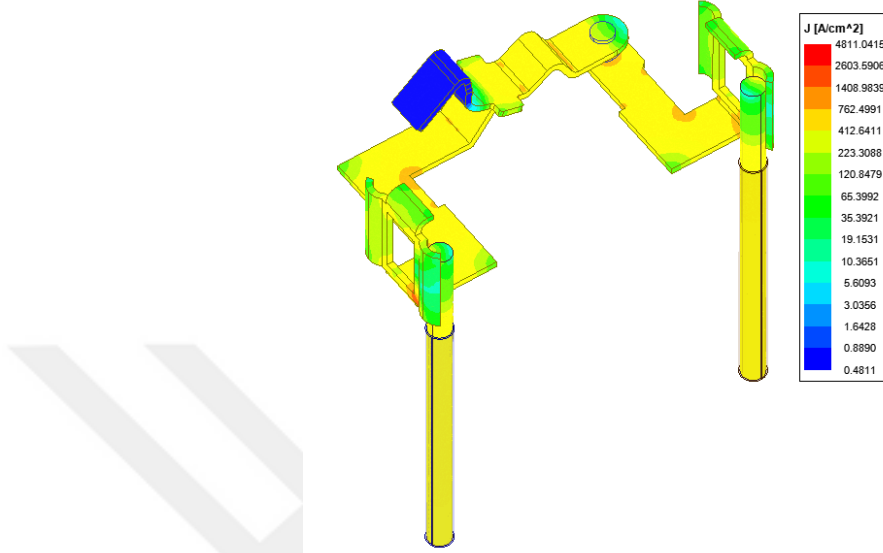
Şekil 3.15: Numune 3 (Bakır) hesaplamalı iterasyon verileri

3.3.2. 3 Farklı numune için maxwell 3D analiz ve sonuçları

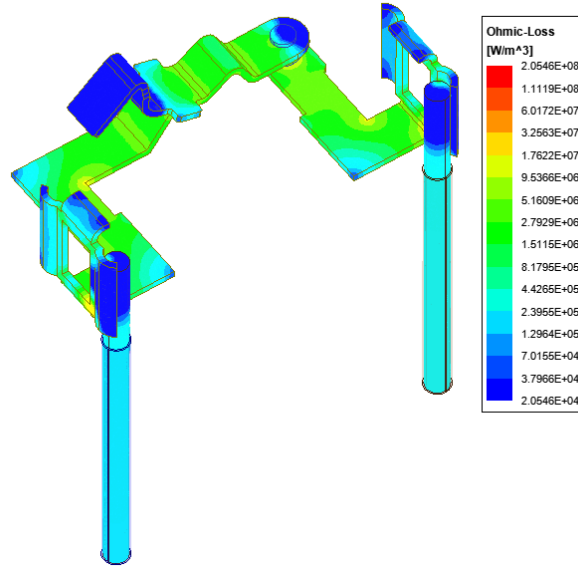
Hazırlık süreci sonrasında Numune 1 (Al-Cu bimetal) için analiz çalıştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar alınmıştır. Şekil 3.16’da akım yoğunluğu (J) verileri bulunurken, Şekil 3.17’de direnç kaynaklı oluşan ohm kayıplarının analiz verileri bulunmaktadır.



Numune 2 (Pirinç) için analiz sonunda aşağıdaki sonuçlar alınmıştır. Şekil 3.18’de akım yoğunluğu (J) verileri bulunurken, Şekil 3.19’da direnç kaynaklı oluşan ohm kayıplarının analiz verileri bulunmaktadır.

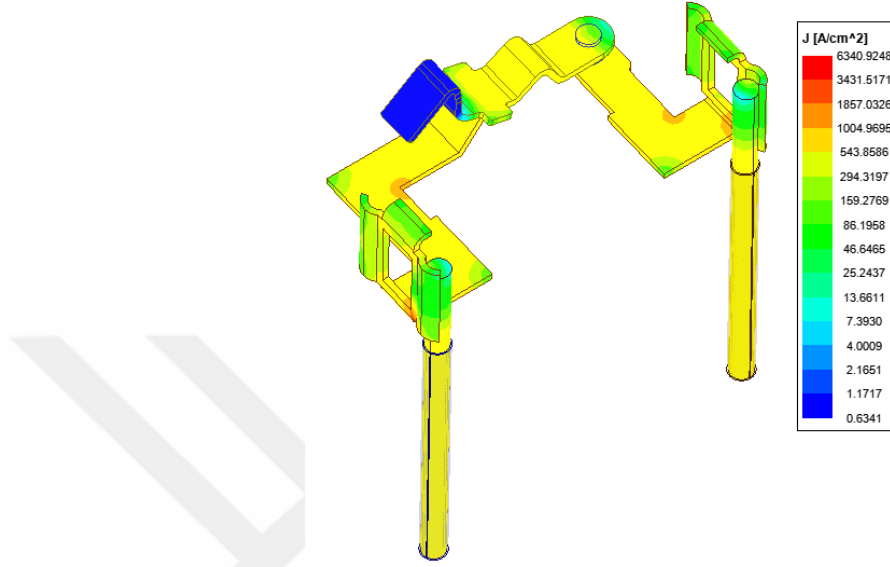


Şekil 3.18: Numune 2 (Pirinç) için analiz ile hesaplanan akım yoğunluğu (J) verisi

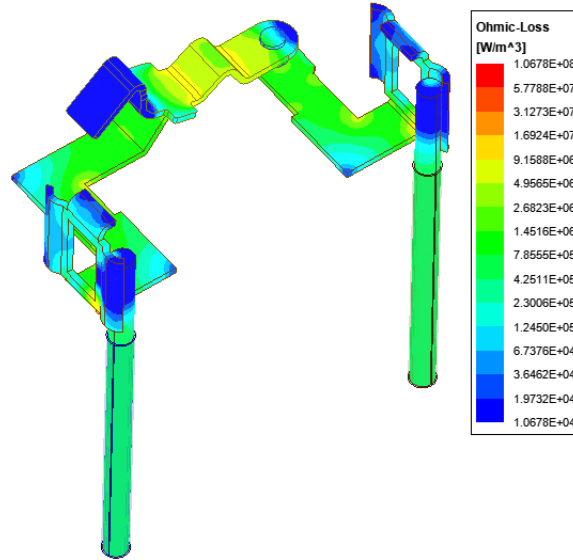


Şekil 3.19: Numune 2 (Pirinç) için analiz ile hesaplanan ohm kayıpları verisi

Numune 3 (Bakır) için analiz sonunda aşağıdaki sonuçlar alınmıştır. Şekil 3.20’de akım yoğunluğu (J) verileri bulunurken, Şekil 3.21’de direnç kaynaklı oluşan ohm kayıplarının analiz verileri bulunmaktadır.



Şekil 3.20: Numune 3 (Bakır) için analiz ile hesaplanan akım yoğunluğu (J) verisi

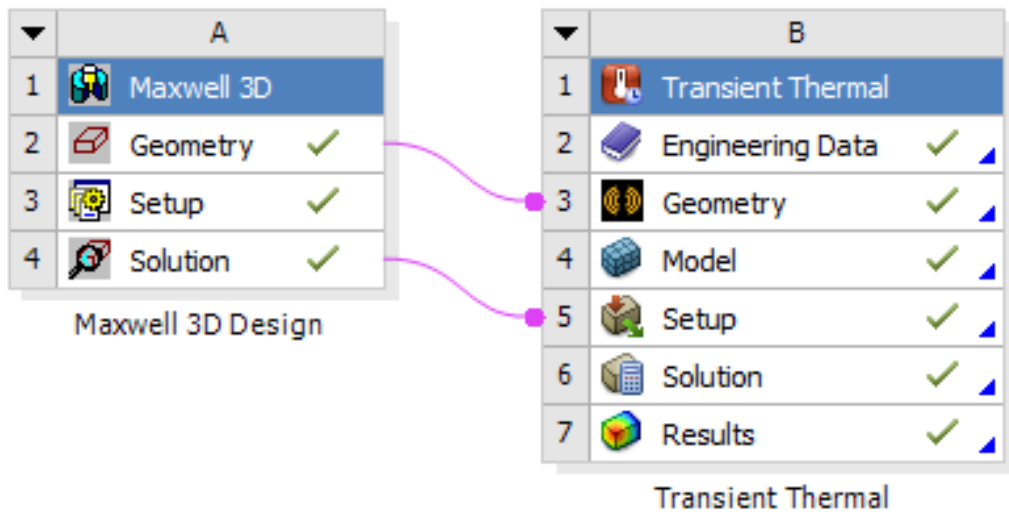


Şekil 3.21: Numune 3 (Bakır) için analiz ile hesaplanan ohm kayıpları verisi

Üç farklı hammadde ile hazırlanmış numunelerin analiz sonuçlarında; 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. En yüksek ohm kayıplarının pirinç terminaller ile hazırlanmış Numune 2’de, en düşük ohm kayıplarının ise bakır terminaller ile hazırlanan Numune 3’te olduğu gözlemlenmiştir. Bu veriler üç farklı hammadde arasında en iyi iletkenin bakır, sonrasında sırasıyla al-cu bimetal ve pirinç olduğu çıkarımının yapılmasına olanak sağlamıştır.

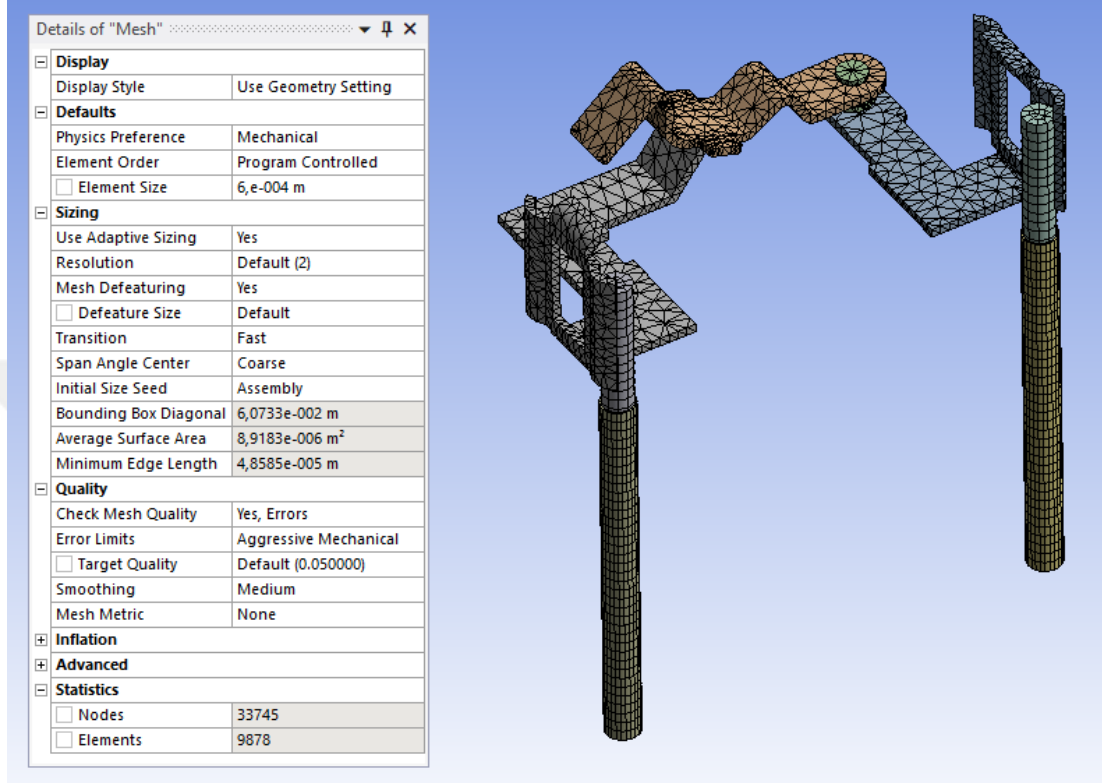
3.3.3. Zamana bağlı sıcaklık artışı simülasyonları

Akım taşıyan iletken metal parçaların belirli bir zaman aralığında (1800 sn) ve belirli bir ısı gücü altında sıcaklıklarında olan değişimi inceleyebilmek için, önceki konu başlıkları altında incelenen akım ve direnç kaynaklı ohm kayıpları 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.



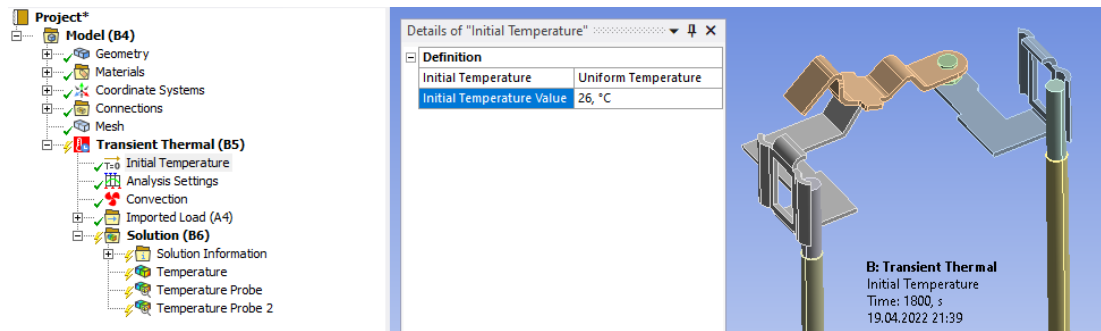
Şekil 3.22: Maxwell 3D sonuç verilerinin Transient Thermal modülüne aktarılması

Tüm parçalar seçilerek, maksimum 0,6 mm boyutlarında olacak şekilde matematiksel bir mesh yapısı oluşturulmuştur. Mesh yapısı ile alakalı diğer veriler Şekil 3.23'te belirtilmiştir.



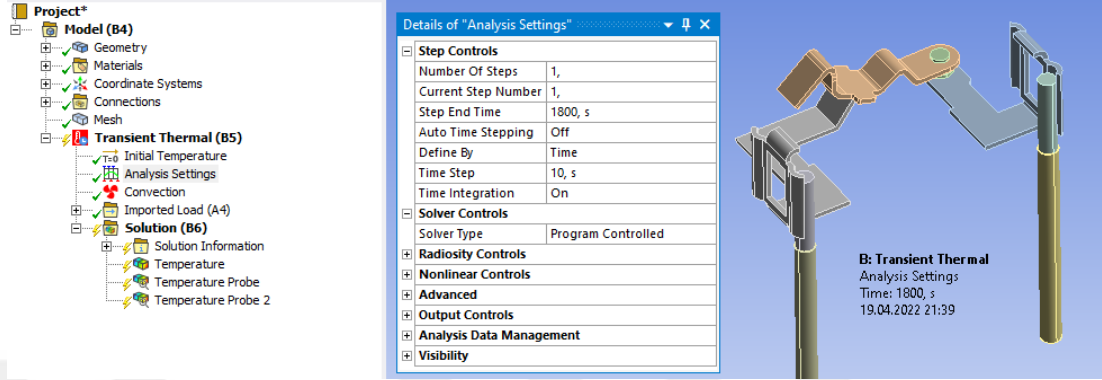
Şekil 3.23: Mesh ayarlarının tanımlanması

Farklı ortam sıcaklıklarında yapılan analizler için parça sıcaklıkları normal laboratuvar koşulları için 26°C, ürünün beyanında bulunan maksimum-minimum çalışma sıcaklıkları için 35°C ve -5°C sıcaklıkları girilmiştir. Bu parça sıcaklık verileri 3 farklı sıcaklıkta yapılan deneylerin her biri için ayrı ayrı girilmiş ve farklı analizler çalıştırılmıştır.



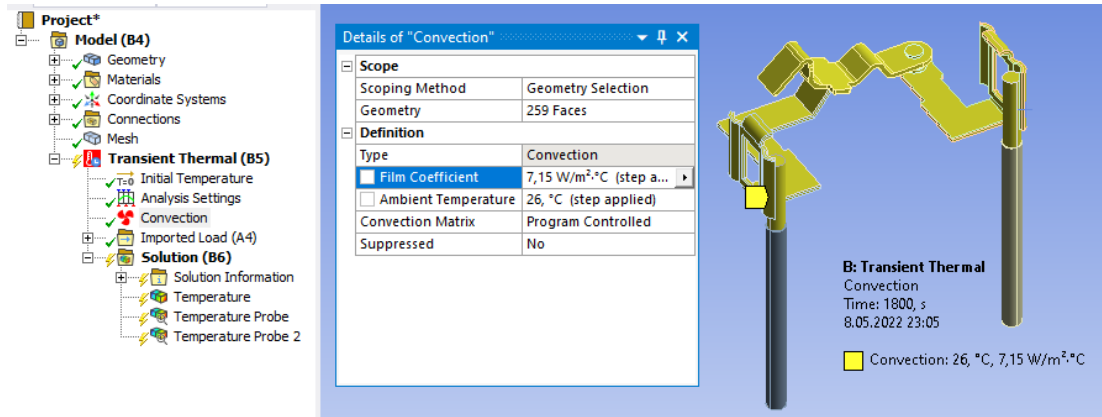
Şekil 3.24: Parça ilk sıcaklıklarının tanımlanması

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 3.25: 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 (Al-Cu) için $7,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$, Numune 2 (Pirinç) için $7,65 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$, ve Numune 3 (Bakır) için $8,65 \text{ W/m}^2\cdot\text{C}$ olarak girilmiştir. Doğal taşınım katsayıları deneysel methotlar ile toplanan verilerin harmanlanarak Newton Soğuma Kanunu formülüne aktarılması ile hesaplanarak bulunmuştur.



Şekil 3.26: Taşınım katsayısı ve ortam sıcaklığının tanımlanması

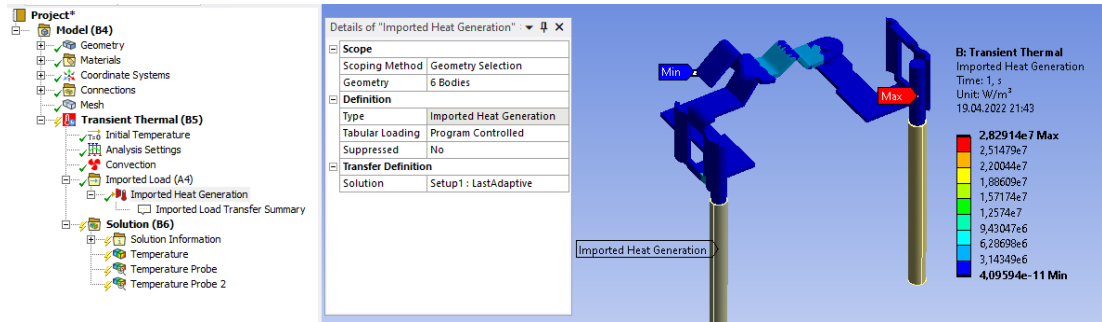
Doğal taşınım katsayısı (h) hesabı yapılırken Newton Soğuma Kanunu kullanılmıştır. Formüldeki ısı geçişi ($\dot{Q}$) verileri Ansys Maxwell programında hesaplanarak bulunmuş ve “Solutions” penceresindeki “Total Loss (W)” verileri kullanılmıştır. İletkenlerin yüzey alanı (A_s), Solidworks programındaki 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.

Tablo 3.3: Doğal taşınım katsayısı (h) hesaplama verileri

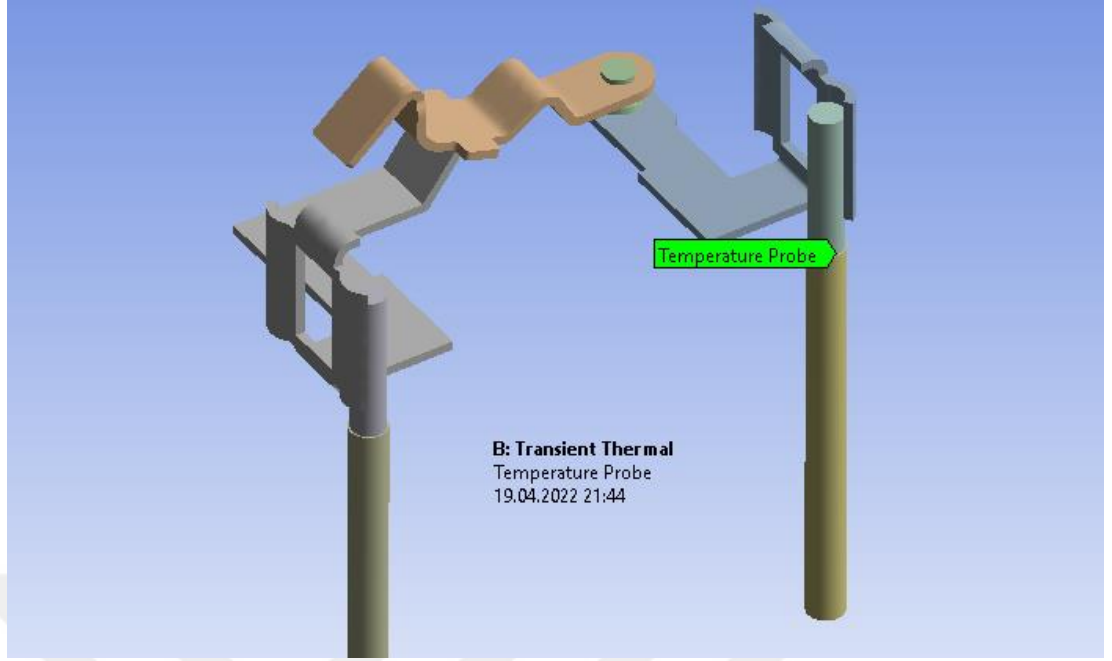
Numune Adı	$\dot{Q}$ (W)	h (W/m ² .°C)	A_s (m ²)	T_s (°C)	T_∞ (°C)
Numune 1 (Al-Cu)	0,23223	7,15	0,00154	47,13	26
Numune 2 (Pirinç)	0,26676	7,65	0,00154	48,67	26
Numune 3 (Bakır)	0,21431	8,65	0,00154	42,15	26

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.

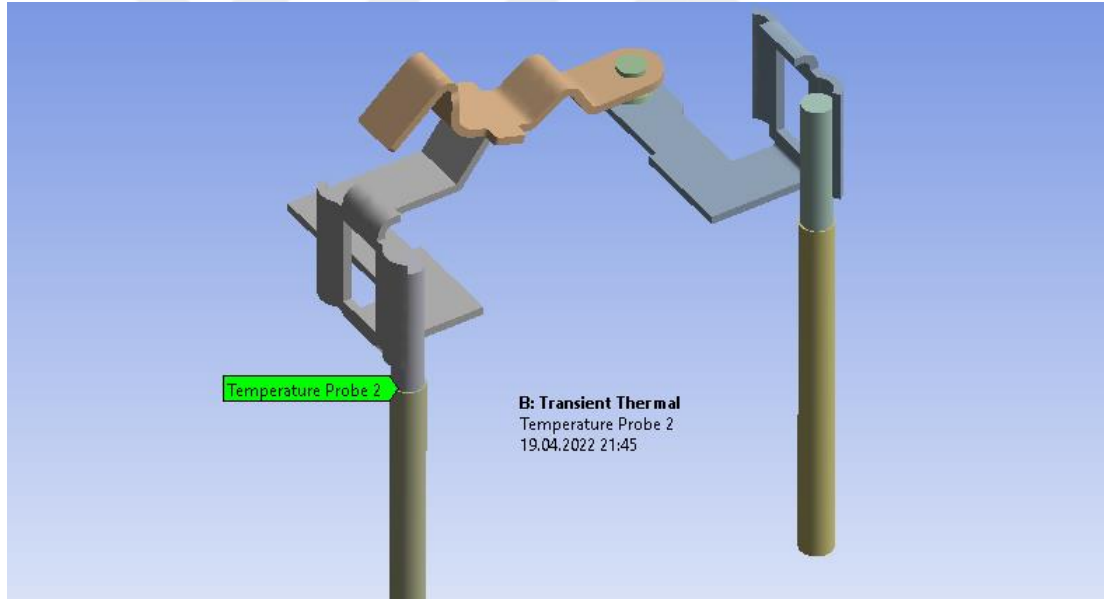


Şekil 3.27: Maxwell 3D'den içeri aktarılan ohm kayıplarının ısı kaynağı olarak tanımlanması

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



Şekil 3.28: Giriş terminalinden analiz süresince anlık veri alabilmek için tanımlanan prob konumu



Şekil 3.29: 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 Tablo 3.4'te belirtilmiştir.

Tablo 3.4: Analizde kullanılan parçaların malzeme özellikleri (Ansys, 2021)

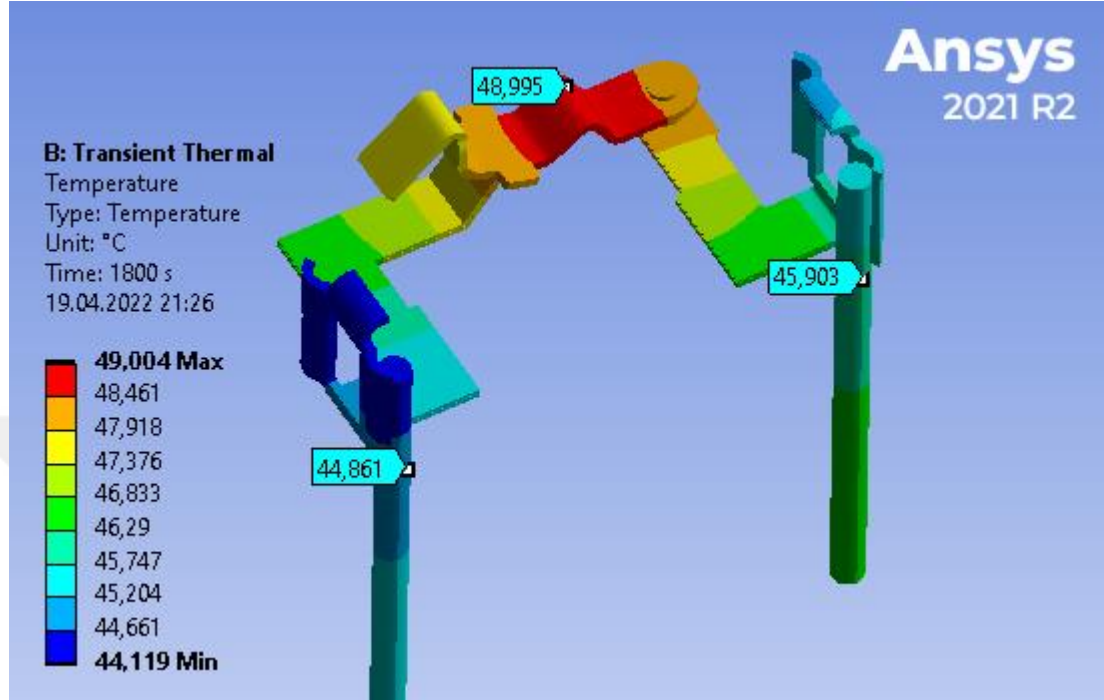
Mühendislik Verisi	Bakır	Alüminyum	Pirinç	PC	ABS	Birim
Yoğunluk	8300	2712	8500	1190	1024	(kg/m ³)
Young Modülü	1,1x10 ¹¹	1,1x10 ⁸	1,1x10 ¹¹	2,3x10 ⁹	1,25x10 ⁹	(N/m ²)
Poisson Oranı	0,34	0,33	0,33	0,39	0,4	(N/m ²)
Kayma Modülü	4,1x10 ¹⁰	2,55x10 ⁷	3,7x10 ¹⁰	8,2x10 ⁸	8,75x10 ⁸	(N/m ²)
Isı İletim Katsayısı	386	237	150	0,22	0,21	W/m.K
Elektriksel İletkenlik	58,7	36,9	15,9	-	-	x10 ⁶ Siemens/m

3.3.4. 3 Farklı numune için transient thermal analiz sonuçları ve karşılaştırması

Eşleştirilmiş Maxwell 3D ve Transient Thermal modüller kullanılarak ANSYS Workbench ile gerçekleştirilen ilk birleşik analizde, Al-Cu bimetal ham madde 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. 26°C ortam sıcaklığında yapılan testler deneysel metotlar ile de doğrulanmıştır.

Ürünün maksimum (+35°C) ve minimum (-5°C) sıcaklıklardaki çalışma beyanları referans alınarak limit değerlerdeki durumlar da gözlemlenmiştir. Bu maksimum-minimum limit sıcaklık testleri ürün hakkında bilgi sahibi olmak ve bu sıcaklıklarda ürün çalışması ile alakalı herhangi bir problem teşkil edip etmediğini gözlemlemek için yapılmıştır. Deneysel metotlar ile doğrulaması yapılmamıştır. Üç farklı numuneye ait sıcaklık artış analizleri görseller ve tablolar ile paylaşılmıştır.

Numune 1'e (Al-Cu Bimetal)) ait sıcaklık artış analizleri görseller ve tablolar ile aşağıda paylaşılmıştır.



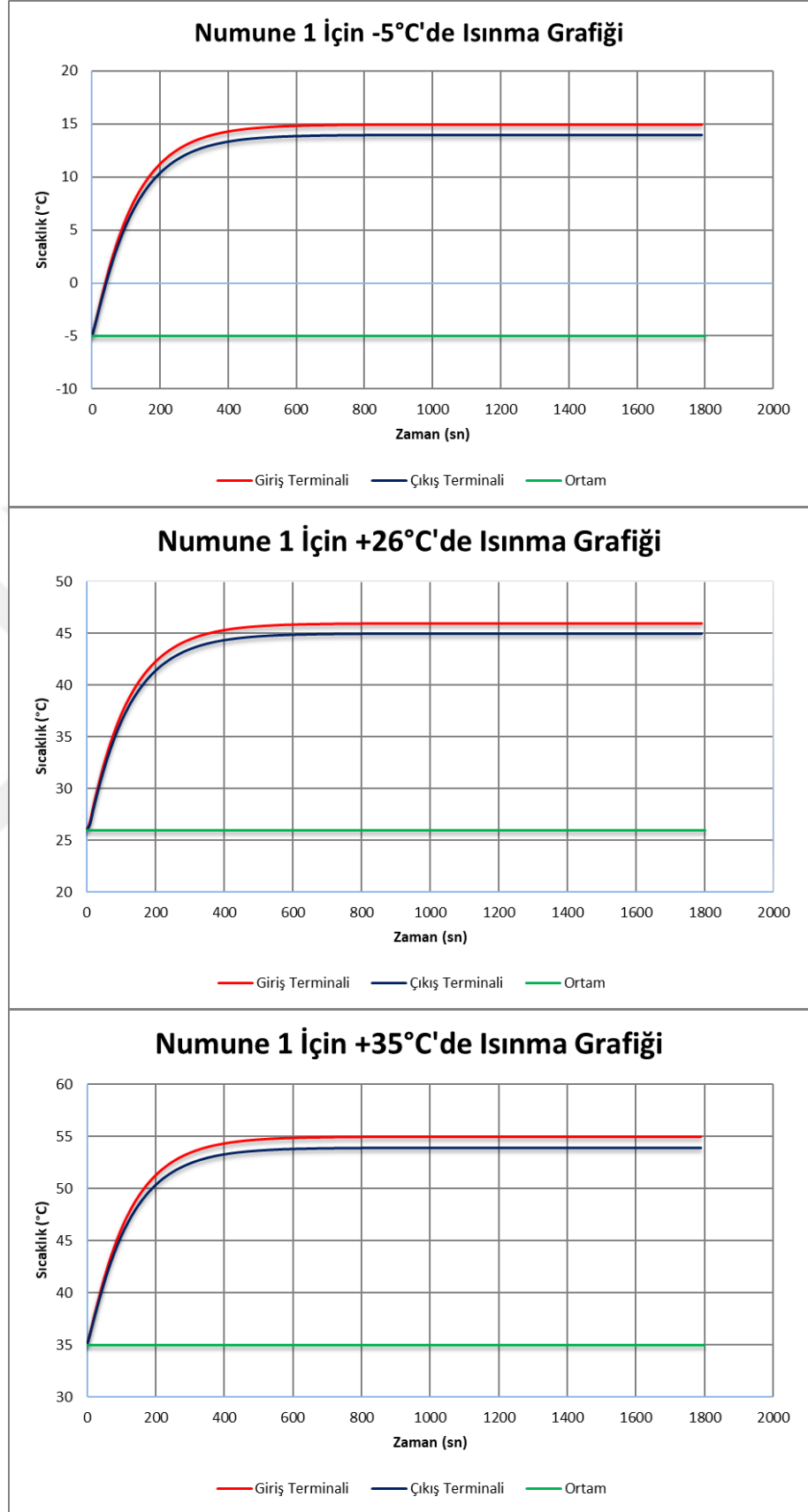
Şekil 3.30: Numune 1 (Al-Cu) için 1800 saniyelik analiz sonunda iletken yüzeylerinde oluşan sıcaklıklar

Numune 1'e (Al-Cu) uygulanan analizlerin son saniyesinde (1800. saniye) kablo girişlerinde oluşan maksimum sıcaklık değerleri ve parçaların ilk sıcaklığına göre artış seviyeleri (ΔT) Tablo 3.5'te belirtilmiştir.

Tablo 3.5: Numune 1'in (Al-Cu) farklı ortam sıcaklıklarındaki sıcaklık artış verileri

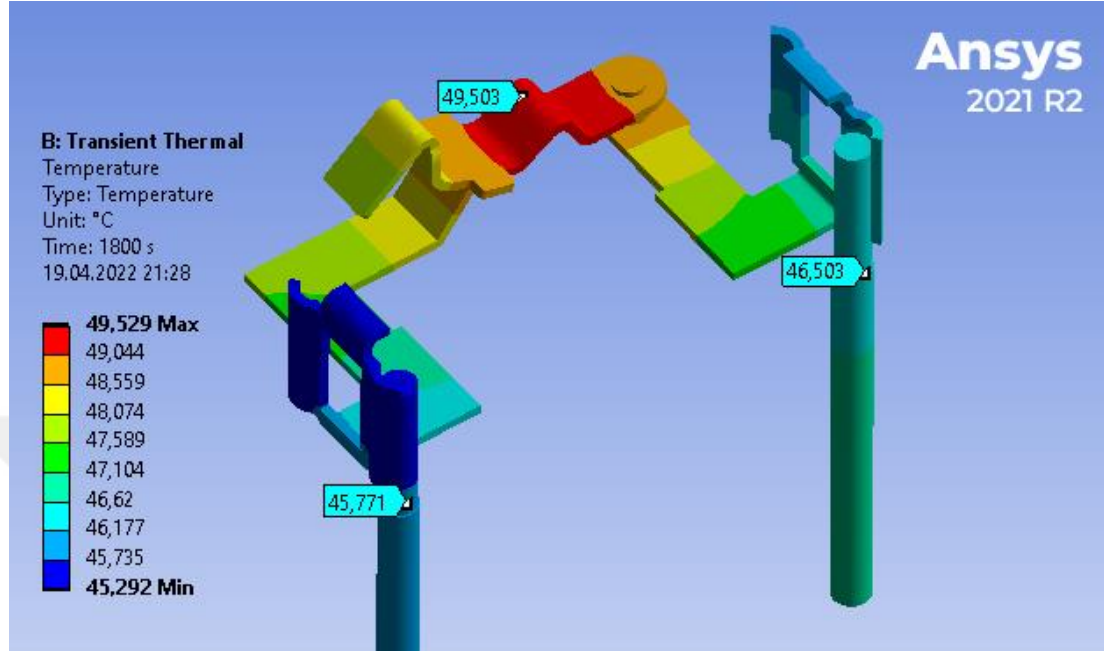
Ürün	Ortam Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklığı (°C)	Çıkış Terminali Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)	Çıkış Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)
Numune 1 (Al-Cu)	-5	14,98	13,94	19,98	18,94
	+26	45,903	44,981	19,903	18,981
	+35	54,93	53,91	19,93	18,91

1800 saniye boyunca kablo giriş ve çıkış terminallerinde meydana gelen ısınma verilerine ait grafikler Şekil 3.31'de belirtilmiştir.



Şekil 3.31: Numune 1 (Al-Cu) giriş-çıkış terminallerinde meydana gelen sıcaklık artışı grafiği

Numune 2'ye (Pirinç) ait sıcaklık artış analiz verileri görseller ve tablolar ile aşağıda paylaşılmıştır.



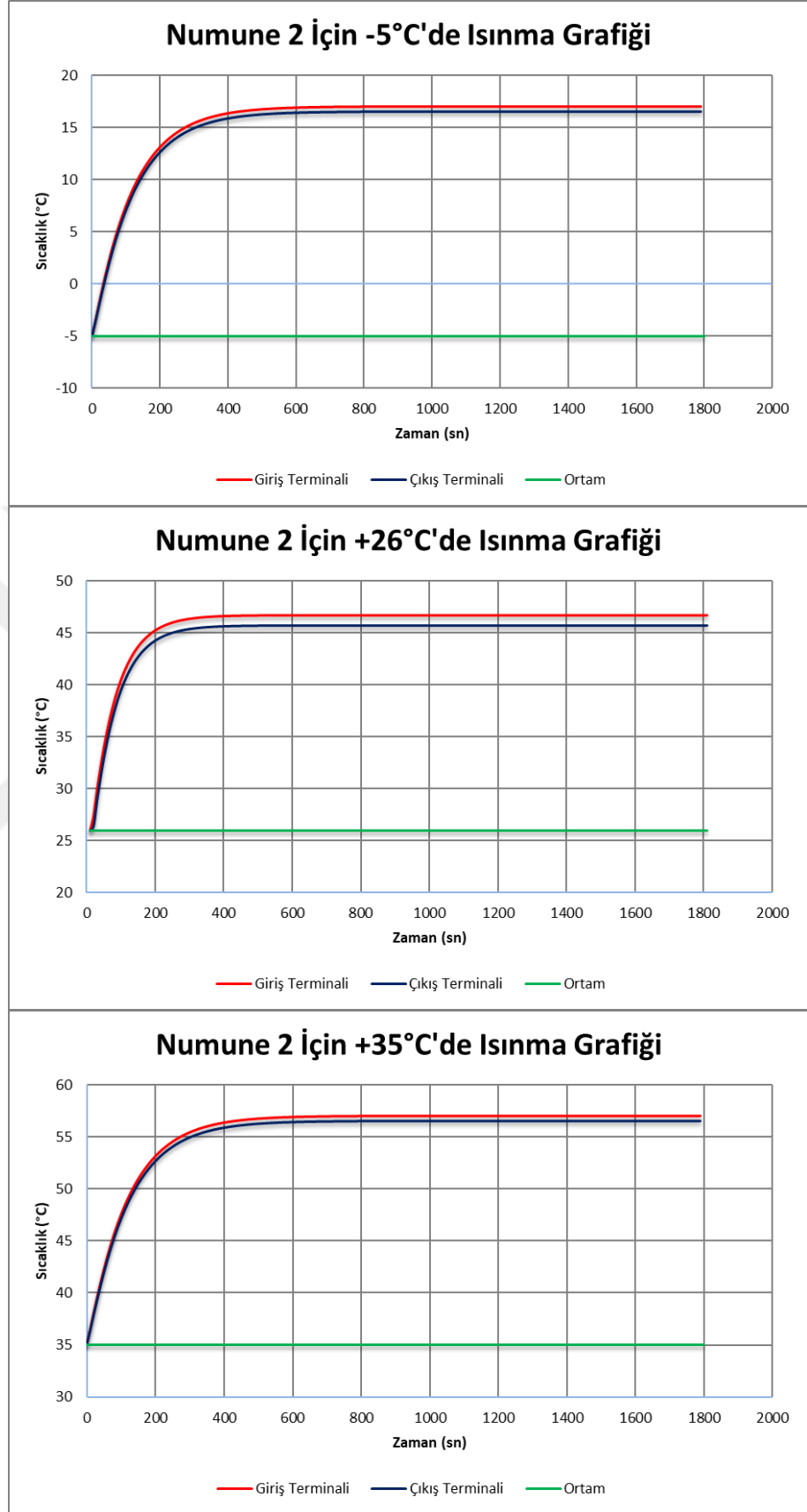
Şekil 3.32: Numune 2 (Pirinç) için 1800 saniyelik analiz sonunda iletken yüzeylerinde oluşan sıcaklıklar

Analizlerin son saniyesinde (1800. saniye) kablo girişlerinde oluşan maksimum sıcaklık değerleri ve parçaların ilk sıcaklığına göre artış seviyeleri (ΔT) Tablo 3.6'da belirtilmiştir.

Tablo 3.6: Numune 2'nin (Pirinç) farklı ortam sıcaklıklarındaki sıcaklık artış verileri

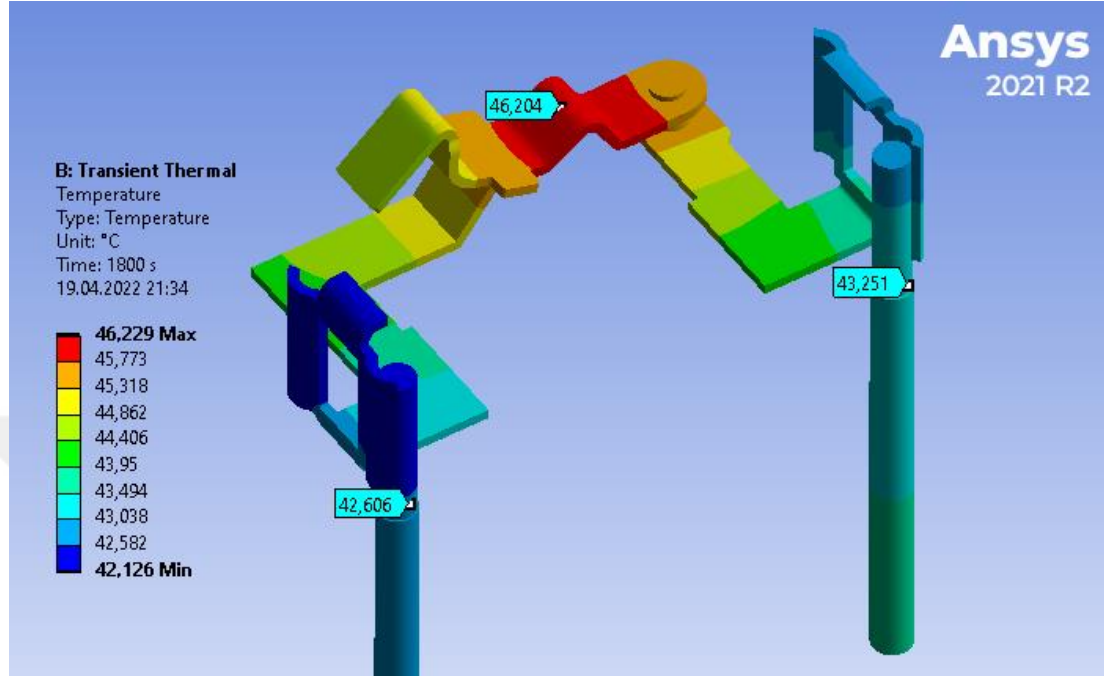
Ürün	Ortam Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklığı (°C)	Çıkış Terminali Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)	Çıkış Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)
Numune 2 (Pirinç)	-5	17,01	16,51	22,01	21,51
	+26	46,503	45,771	20,503	19,771
	+35	57,4	56,52	22,4	21,52

1800 saniye boyunca kablo girişlerinde meydana gelen ısınma grafikleri Şekil 3.33'te belirtilmiştir.



Şekil 3.33: Numune 2 (Pirinç) giriş-çıkış terminallerinde meydana gelen sıcaklık artışı grafiği

Numune 3'e (Bakır) ait sıcaklık artış analiz verileri görseller ve tablolar ile aşağıda paylaşılmıştır.



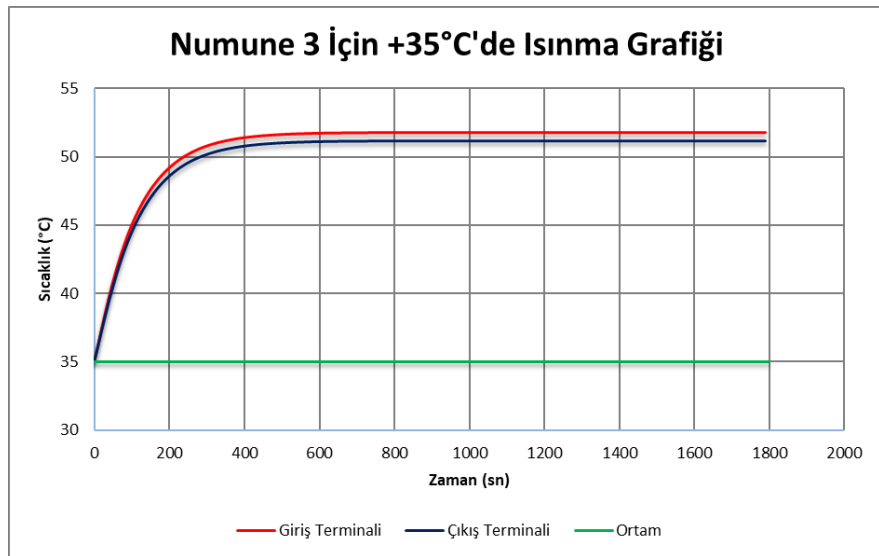
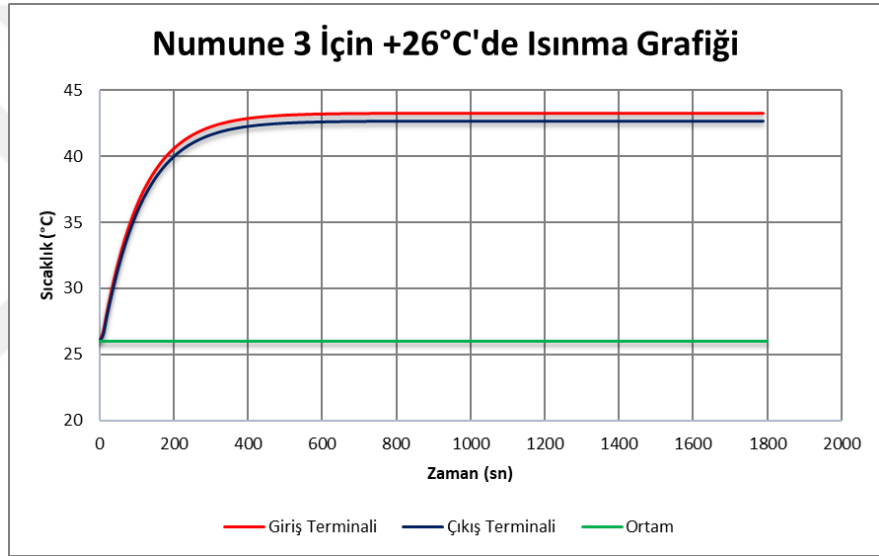
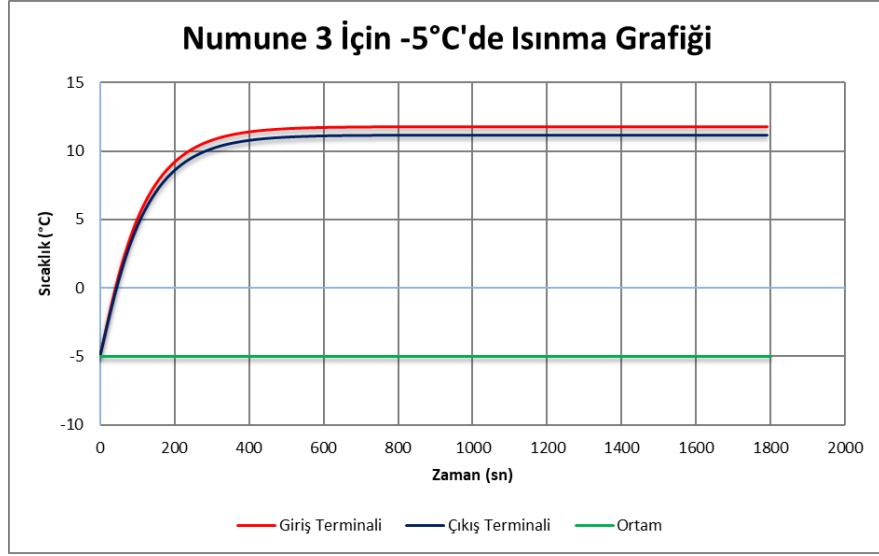
Şekil 3.34: Numune 3 (Bakır) için 1800 saniyelik analizin sonunda iletken yüzeylerinde oluşan sıcaklıklar

Analizlerin son saniyesinde (1800. saniye) kablo girişlerinde oluşan maksimum sıcaklık değerleri ve parçaların ilk sıcaklığına göre artış seviyeleri (ΔT) Tablo 3.7’de belirtilmiştir.

Tablo 3.7: Numune 3’ün (Bakır) farklı ortam sıcaklıklarındaki sıcaklık artış verileri

Ürün	Ortam Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklığı (°C)	Çıkış Terminali Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)	Çıkış Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)
Numune 3 (Bakır)	-5	11,77	11,139	16,77	16,139
	+26	43.251	42.606	17,251	16,606
	+35	51,77	51,139	16,83	16,161

1800 saniye boyunca kablo girişlerinde meydana gelen ısınma grafikleri Şekil 3.35’te belirtilmiştir.

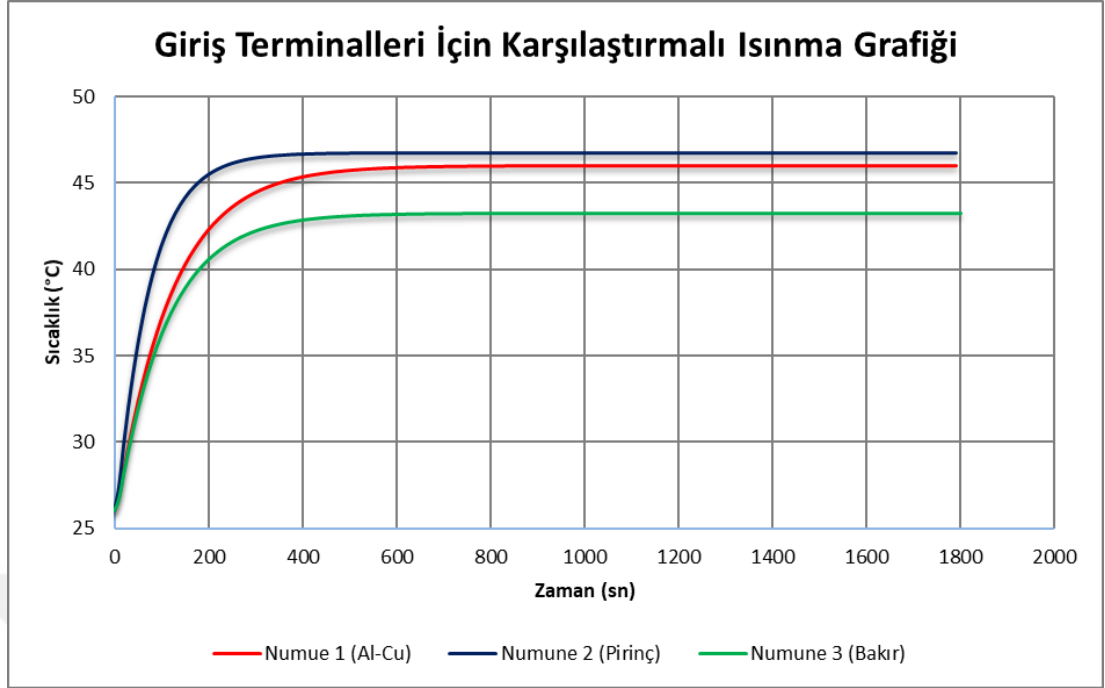


Şekil 3.35: Numune 3 (Bakır) giriş-çıkış terminallerinde meydana gelen sıcaklık artışı grafiği

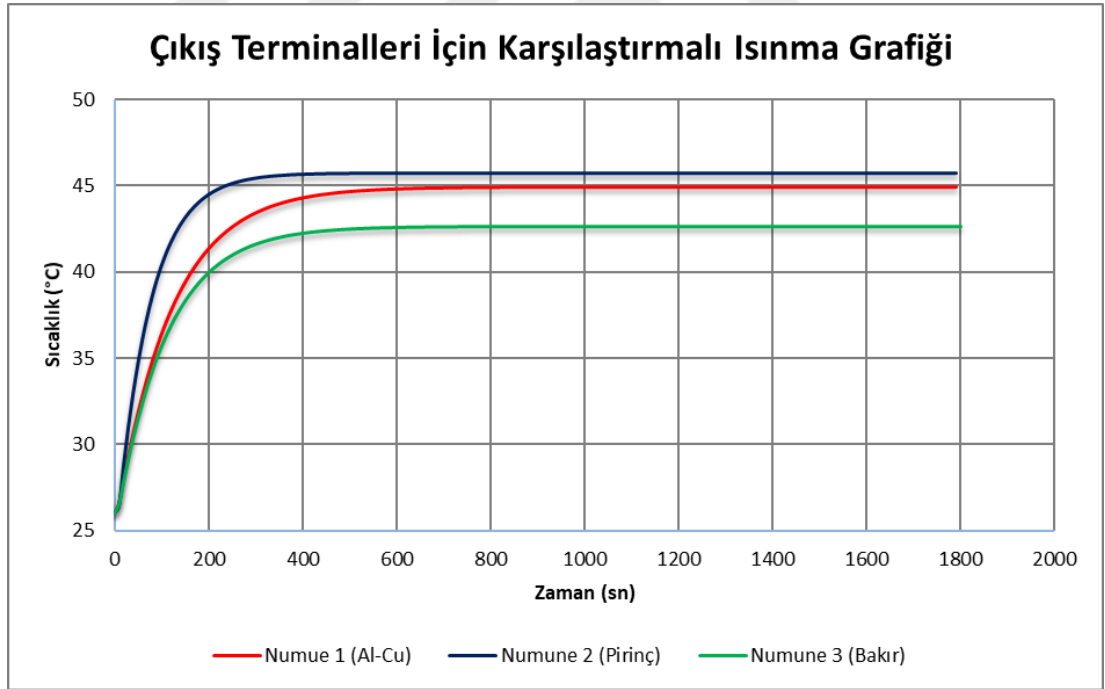
Tablolardaki verilere göre;

- 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 olan orta kontak bölgesinin giriş terminaline daha yakın olmasıdır.
- Bu ısınma verileri, 147°C 'de erimeye başlayan polikarbonat (PC) yalıtkan plastik parça (Bayer Material Science Nafta, 2008) için herhangi bir sorun teşkil etmeyeceği çıkarımı yapılmıştır.

Üç farklı numuneye ait ısınma analizi verileri ile oluşturulmuş giriş terminali sıcaklık artış karakteristiği karşılaştırma grafiği Şekil 3.36'da, çıkış terminalleri karşılaştırma grafiği ise Şekil 3.37'de paylaşılmıştır. En az ısınanın bakır, en çok ısınan ham maddenin ise pirinç olduğu karşılaştırma grafiklerinde açıkça görülmektedir. Al-Cu bimetal ise ısınma performansı olarak mevcutta kullanılmakta olan bakır ve pirincin arasında yer almıştır.



Şekil 3.36: Üç farklı numuneye ait giriş terminallerinin +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği analiz verilerinin karşılaştırma grafiği



Şekil 3.37: Üç farklı numuneye ait çıkış terminallerinin +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği analiz verilerinin karşılaştırma grafiği

BÖLÜM 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE TARTIŞMA

4.1. Öncül Testler

Mukayesesi yapılacak olan ham maddeler hakkında bilgi sahibi olup, öngörülerde bulunabilmek için öncül testler yapılmıştır. Bu testler yapılarak; yeni Al-Cu bimetel ham maddesinin mekanik mukavemet dayanımının mevcutta kullanılan pirinç ve bakır ile kıyaslanması amaçlanmıştır. Aynı zamanda yapılan hammadde kimyasal analiz ile de hammaddelerin alaşım oranları kıyaslanmış ve RoHS uygunluğu kontrol edilmiştir.

4.1.1. Çekme testi

İlerleyen aşamalardaki testlerde kullanılacak olan üç farklı ham maddenin mekanik dayanımı hakkında bilgi sahibi olabilmek için ham maddelere çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi için 0,5 mm kalınlığındaki metal bantlardan papyon şeklinde numuneler alınmıştır. Bahsi geçen deney numuneleri aşağıdaki görselde görünmektedir.



Şekil 4.1: Çekme testi için hazırlanmış papyon ham madde numuneleri

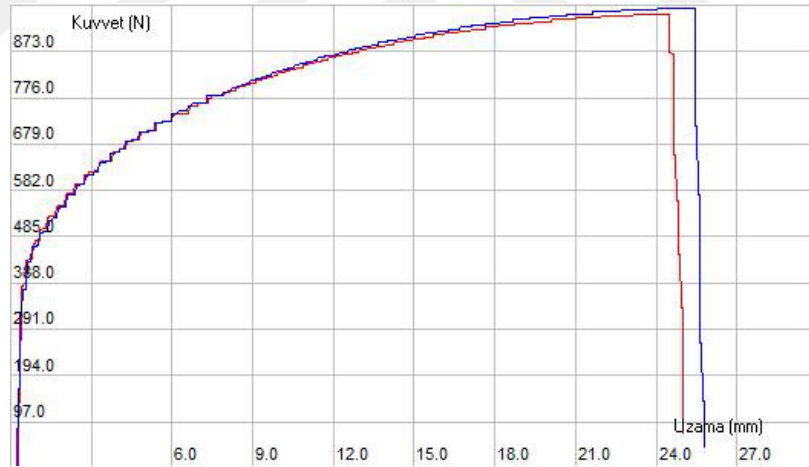
Numuneler Panasonic Giriş Kalite Birimindeki Devotrans marka test cihazına bağlanarak test edilmişlerdir. Cihaz modeli DVT GP_DLC ve maksimum kapasitesi 20 kN'dur. Cihazın genel duyarlılığı $\pm 0,5\%$ 'tir, hareket duyarlılığı ise 0,001 mm'dir. Testler ISO527

standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir. Test cihazının kalibrasyonu 24.01.2022 tarihinde yapılmıştır.

Al-Cu bimetel banttan kesilen papyon numuneler test cihazına bağlanarak çekme testi gerçekleştirilmiştir. Test görselleri ve teste ait kuvvet-uzama grafiği aşağıda paylaşılmıştır.



Şekil 4.2: Al-Cu papyon numuneye uygulanan çekme testi görselleri

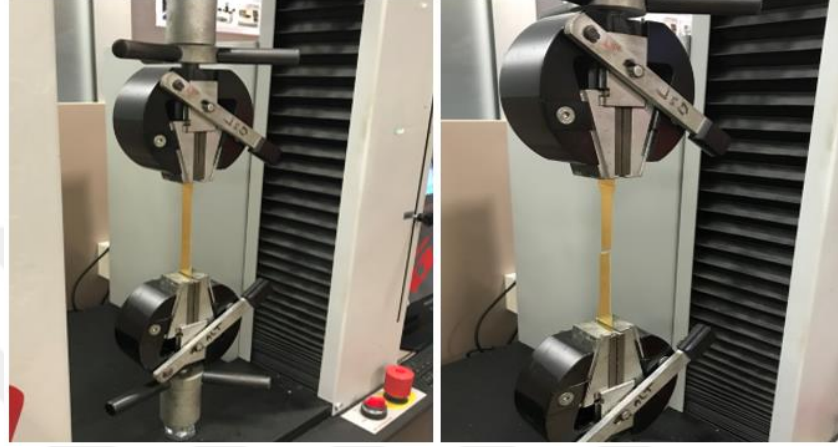


Şekil 4.3: Al-Cu papyon numuneye uygulanan çekme testi kuvvet-uzama grafiği

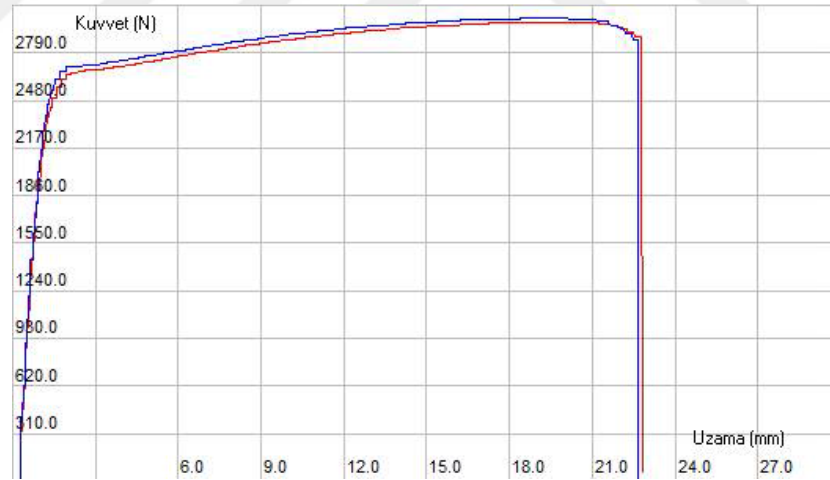
Al-Cu bimetel ham maddesinde, T2 bakır ve 1060 alüminyum kullanılmıştır. Ham maddede kullanılan Al ve Cu'nun hacimsel olarak birleşim oranı sırasıyla %55 ve %45'tir. Yapılan test sonucunda alüminyum tarafın bombe yaparak daha fazla şekil değişimine uğradığı ve bakır tarafın daha az uzayarak koptuğu gözlemlenmiştir. Numunenin maksimum dayanım kuvveti 958 Newton, maksimum uzama miktarı ise 23,62 mm olarak ölçülmüştür. Al-Cu ham madde test edilirken doğrulama için üst üste

iki kez test yapılmıştır, mavi renk deneme 1 ve kırmızı renk ise deneme 2'yi ifade etmektedir. Test esnasında alınmış ölçüm verileri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Pirinç banttı kesilen papyon numuneler test cihazına bağlanarak çekme testi gerçekleştirilmiştir. Test görselleri ve teste ait kuvvet-uzama grafiği aşağıda paylaşılmıştır.



Şekil 4.4: Al-Cu papyon numuneye uygulanan çekme testi görselleri



Şekil 4.5: Pirinç papyon numuneye uygulanan çekme testi kuvvet-uzama grafiği

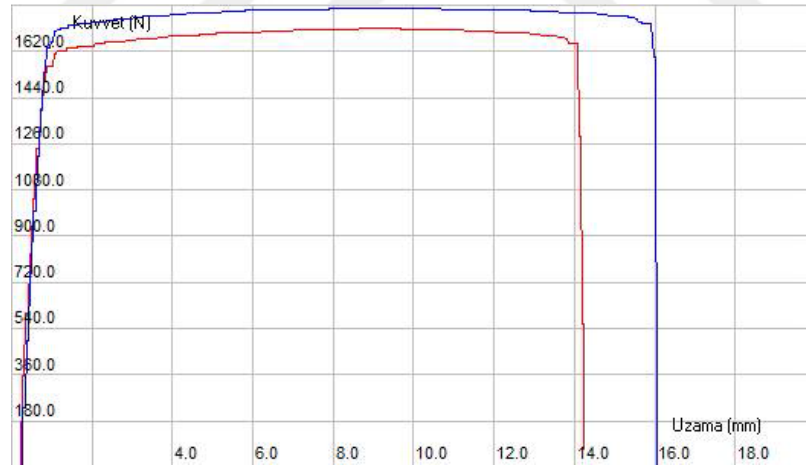
Ms70 serisi pirinç ham maddeye uygulanan test sonunda, numunenin maksimum dayanım kuvveti 3004 Newton, maksimum uzama miktarı ise 18,69 mm olarak ölçülmüştür. Pirinç ham madde test edilirken doğrulama için üst üste iki kez test yapılmıştır, mavi renk deneme 1 ve kırmızı renk ise deneme 2'yi ifade etmektedir. Yaklaşık olarak Al-Cu bimetal kadar kopma uzamasına sahip olduğu ancak çok daha

yüksek kuvvetlere dayanıklı olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Test esnasında alınmış ölçüm verileri Tablo 4.1’de verilmiştir.

Bakır banttı kesilen papyon numuneler test cihazına bağlanarak çekme testi gerçekleştirilmiştir. Test görselleri ve teste ait kuvvet-uzama grafiği aşağıda paylaşılmıştır.



Şekil 4.6: Bakır papyon numuneye uygulanan çekme testi görselleri



Şekil 4.7: Bakır papyon numuneye uygulanan çekme testi kuvvet-uzama grafiği

Bakır ham maddeye uygulanan test sonucunda; numunenin maksimum dayanım kuvveti 1748 Newton, maksimum uzama miktarı ise 8,285 mm olarak ölçülmüştür. Bakır ham madde test edilirken doğrulama için üst üste iki kez test yapılmıştır, mavi renk deneme 1 ve kırmızı renk ise deneme 2’yi ifade etmektedir. Bakırın, Al-Cu ve pirince göre daha gevrek özellik gösterdiği ancak Al-Cu’ya göre daha mukavim olduğu çıkarımı yapılmıştır.

Üç farklı ham maddeye uygulanan çekme testi sonuçları aşağıdaki tabloda paylaşılmıştır.

Tablo 4.1: Ham madde çekme testi sonuçları

Numune Adı	Max. Kuvvet (N)	Max Uzama Δl (mm)	Max. Gerilme (N/mm ²)	Kopma Mukavemeti (N/mm)	Kopma Kuvveti (N)	Kopma Uzaması Δl (mm)	Kopma Uzaması (%)
Al-Cu Bimetal	958	23,62	144,604	76,64	44	25,42	33,9
Pirinç Bant	3004	18,69	480,64	254,71	2908	22,72	31,56
Bakır Bant	1748	8,285	279,68	139,84	68	15,14	21,03

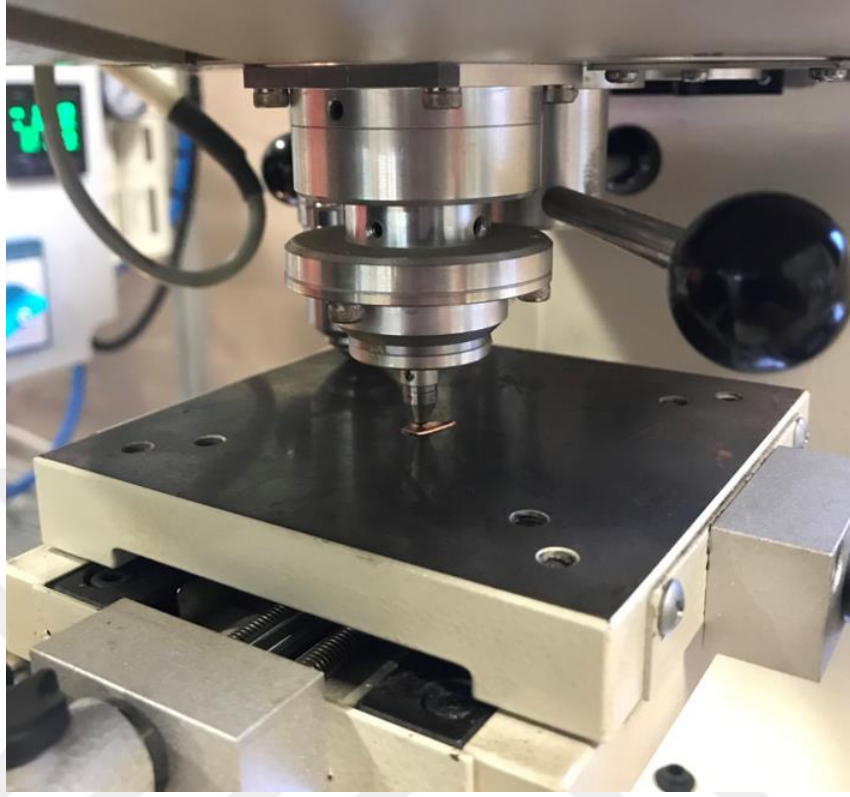
Test sonucunda yapılan çıkarımlar şu şekildedir;

- Al-Cu bimetal ham madde, mevcutta seri üretimde kullanılan pirinç ve bakır ham maddelere göre daha az mukavemete sahiptir.
- Al-Cu bimetal ham maddenin diğer ham maddelere göre daha kolay şekillendirilebileceği düşünülmektedir.
- Al-Cu bimetal ham maddenin, diğer ham maddelere göre daha az mukavim olması ve kolayca deforme olabilmesi nedeniyle sahada ve testlere yüksek kuvvet uygulanan vidalı tip bağlantı terminallerinde kullanılması uygun görülmemektedir. Bu nedenle, ilgili ham madde çabuk bağlantı terminallerinde denenecektir.

Tablo 4.2: Çekme testi cihazı test ayarları

Numune Adı	Test Cinsi	Test Hızı	Test Süresi	Kesit Alanı	Boy (L ₀)	Ön Yük	Nem	Sıcaklık
Al-Cu Bimetal	Kopma Mukavemeti	50 mm/dk	33,9 sn	6,25 mm ²	72 mm	0	%80	24°C
Pirinç Bant	Kopma Mukavemeti	50 mm/dk	27,3 sn	6,25 mm ²	72 mm	0	%80	24°C
Bakır Bant	Kopma Mukavemeti	50 mm/dk	21 sn	6,25 mm ²	72 mm	0	%80	24°C

4.1.2. Sertlik ölçümü



Şekil 4.8: Bakır ham maddenin sertlik ölçümü yapılırken ki görseli

Al-Cu bimetal, pirinç ve bakır olmak üzere üç farklı ham maddeye sertlik ölçümü yapılmıştır. Ölçüm yapılan cihaz Mituyoto 810-126D'dir, cihaz 0,001 HV hassasiyet ile ölçüm yapmaktadır. Ham maddelerin sertlik ölçüm bilgileri Tablo 4.3'te belirtilmiştir.

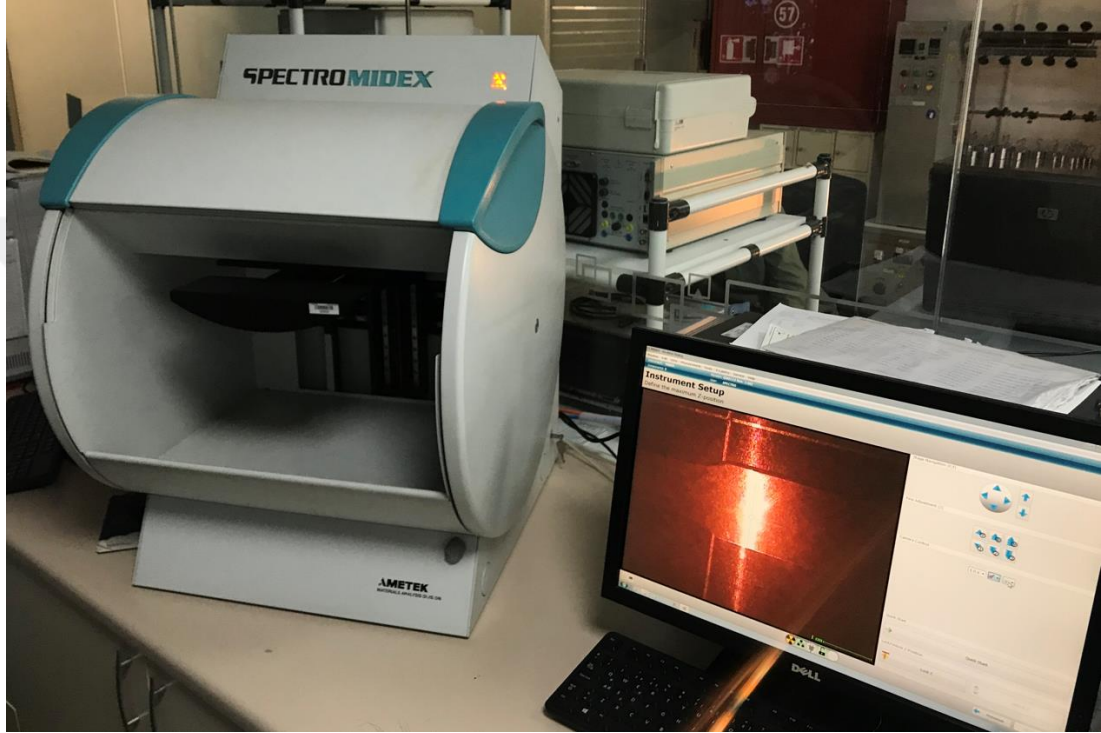
Tablo 4.3: Ham madde sertlik ölçüm verileri

Numune Adı	Sertlik
Bimetal Cu Tarafı	66 HV
Bimetal Al Tarafı	31 HV
Pirinç Bant	162 HV
Bakır Bant	96 HV

Al-Cu bimetalik ham maddesinin mevcutta kullanılan bakır ve pirince göre sertlik değerlerinin çok düşük olduğu, düşük kuvvetlerde dahi deformasyona uğrayabileceği çıkarımı yapılmıştır.

4.1.3. Ham madde kimyasal analiz

Testlerde kullanılacak üç farklı ham maddenin alaşım verilerinin elde edilebilmesi RoHS Direktifi'nce uygunsuz olarak belirtilen materyallerin tespiti için Panasonic Kimya Laboratuvarında XRF Kimyasal Analiz uygulanmıştır. Test için Spectro Midex marka test cihazı kullanılmıştır. Test cihazının kalibrasyon tarihi 22.02.2022'dir.



Şekil 4.9: Bakır numunenin XRF Kimyasal Analiz yapılırken çekilmiş görseli

Ham madde alaşımlarına ait veriler Tablo 4.4'te belirtilmiştir.

Tablo 4.4: Al-Cu, pirinç ve bakır ham madde alaşım oranları

Numune Adı	Cu (%)	Zn (%)	Al (%)	Ni (%)	Fe (%)	Ga (%)	In (%)	Sn (%)
Bimetal Cu Taraf	99,91	0,01	0,01	0,032	0,026	0,015	0,0098	0,0261
Bimetal Al Taraf	3,98	1,23	92,91	0,554	1,119	0,012	0,0082	0,1546
Pirinç Bant	71,47	28,11	0,01	0,021	0,022	0,01	0,03	0,0514
Bakır Bant	99,89	0,01	0,01	0,039	0,025	0,018	0,0187	0,017

Test edilen ham maddelerde, RoHS Direktifi'nde yasaklı olarak belirtilen maddelerden herhangi birine rastlanmamıştır.

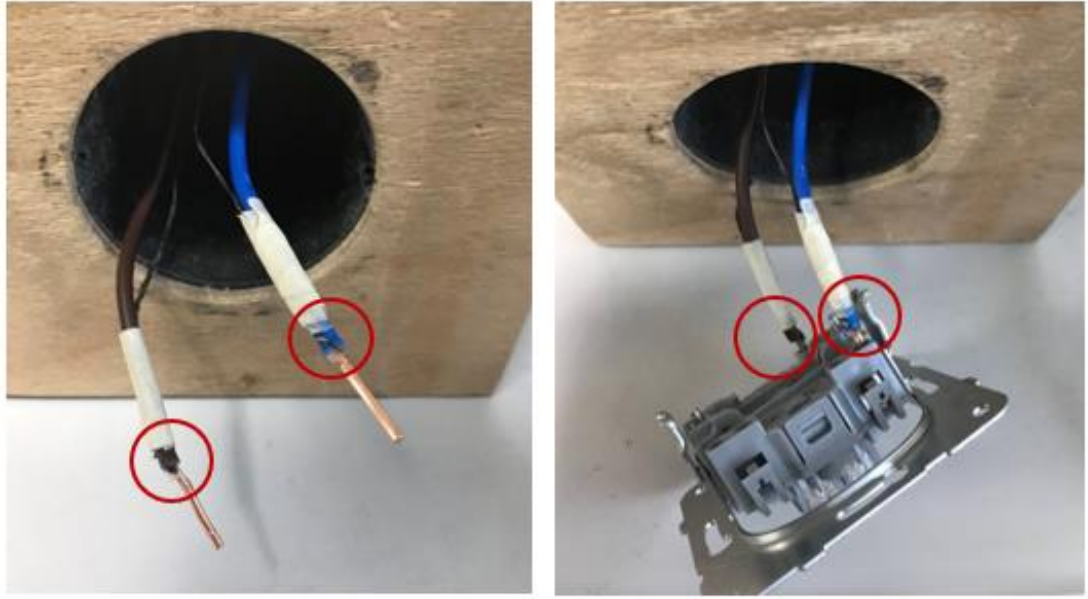
4.2. Standart Testleri

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, akım 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 4.10: J tipi termal çiftlerin kablo üzerindeki konumunu belirten görsel

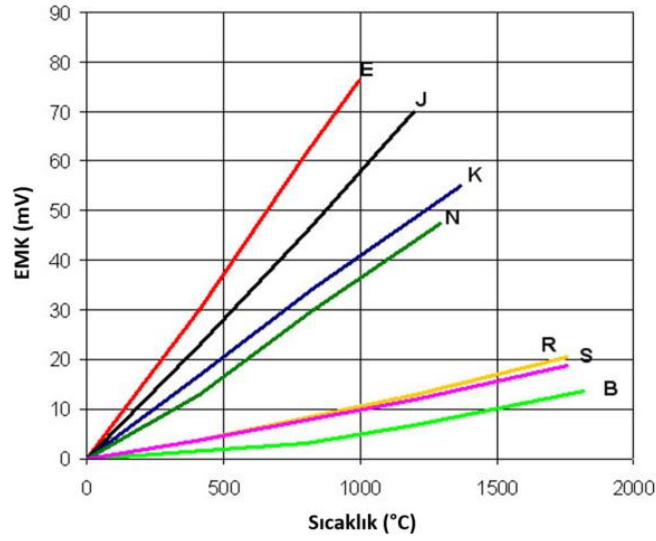
Standartta net bir şekilde belirtildiği için termal çiftler kablo üzerine yerleştirilmiştir. Termal çiftlerin kablolar üzerinde olması nedeniyle ürün sökülmemiş olup iç mekanizmaya ve dışarıda kalan izolasyon plastiklerine herhangi bir şekilde müdahalede bulunulmamıştır. Bu da ürünün daha sağlıklı bir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

Tablo 4.5: J tipi termal çift ölçüm hatalarına dair veriler (IEC, 2021)

Termal Çift Sınıfı	Ham madde	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 4.11’de paylaşılmıştır.

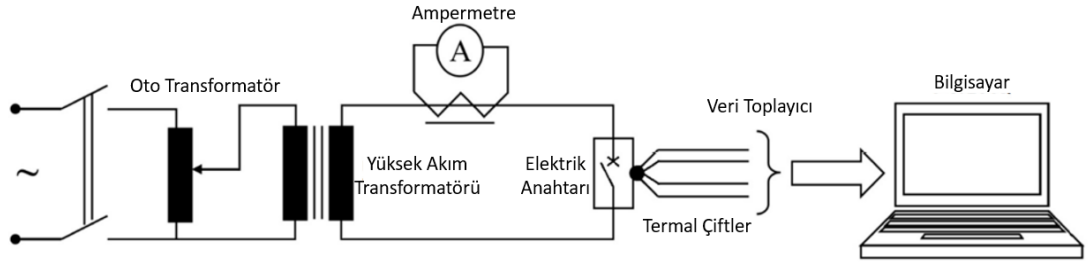


Şekil 4.11: J ve diğer tipteki termal çiftlerin elektromotor kuvveti-sıcaklık grafiği (Instrumentationtools, 2022)

Farklı ham maddeden 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 ototransformatör kullanılmıştır. Ototransformatör, 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. Akım kaynağı olarak EMS Mekatronik marka, 0-50A arası akım sağlayabilen bir cihaz kullanılmıştır. Cihazın kalibrasyonu 15.06.2021 tarihinde Ayer Kalibrasyon tarafından yapılmıştır.

Elektrik anahtarının giriş-çıkış kabloları üzerine konulan termal çiftlerden veri toplamak için örnekleme süresi 10 saniyeye ayarlanmış, 0,1°C hassasiyete sahip bir sıcaklık kaydedici kullanılmıştır. Kaydedici olarak Keysight marka 349770A model veri toplayıcı kullanılmıştır. Ürünün kalibrasyonu 29.01.2022 tarihinde Panasonic Kurumsal Kalite Birimi tarafından yapılmıştır.

Keysight 349770A kayıt cihazına gelen veriler, USB iletişim arayüzü ile çevrimiçi olarak bilgisayardaki kayıt cihazı yazılımı olan Agilent Benchlink Data Logger 3'e gönderildi.



Şekil 4.12: 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. Testler yapılırken beyan edilen bu bilgilerin tamamına uyulmuştur. Şekil 4.12'de şeması gösterilen test sisteminin gerçek görselleri Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13: Aşırı akım testi uygulanan anahtar ürünlerinin test ve ölçüm düzeneği

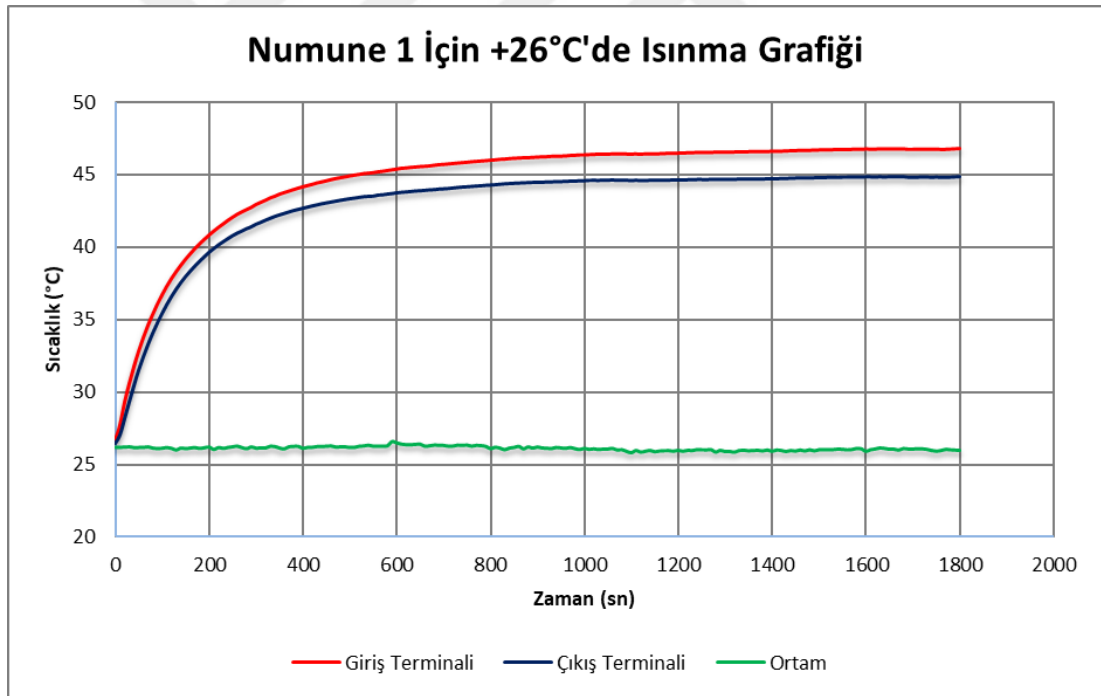
Laboratuvar ortam sıcaklığı testler esnasında anlık olarak ölçülmüştür. Sıcaklık test süresince ortalama olarak 26°C seviyesindedir.

Elektrik anahtarının akım yolundaki sıcaklık dağılımını göstermek ve elde edilen deneysel verileri doğrulamak için, test edilen her ürüne termal görüntüleme kamerası ile doğrulamalar yapıldı. Termal görüntüleme için Fluke marka termal kamera kullanılmıştır.

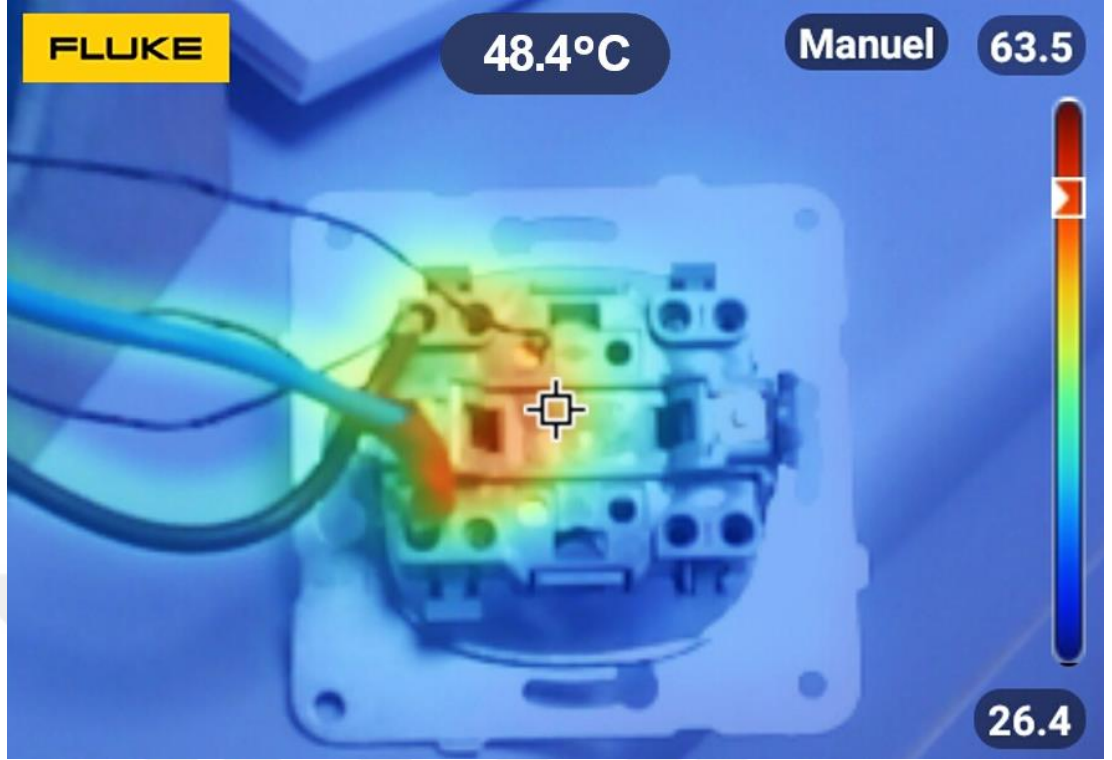
4.2.1. Aşırı akım testleri

Numune ürünlere elektrik anahtarları standardının 17. maddesi uyarınca aşırı akım testleri uygulanmıştır. Aynı özelliklere sahip üç adet elektrikselsel anahtara, TS EN 60669-1 standardının 17. maddesi uyarınca 1 metre boyundaki 2,5 mm² kesitli bakır som kablo ile akım kaynağına bağlanarak 13,5A aşırı akım uygulanmıştır. İletken terminallerin standartta istenen maksimum sıcaklık artış miktarı (ΔT) olan 45°C'nin üzerine çıkmaması hedeflenmiştir. Testler tam 30 dk 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. Al-Cu bimetal hammadde kullanılarak hazırlanmış numunelere ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 4.14'te paylaşılmıştır.



Şekil 4.14: Numune 1'in (Al-Cu) aşırı akım testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği



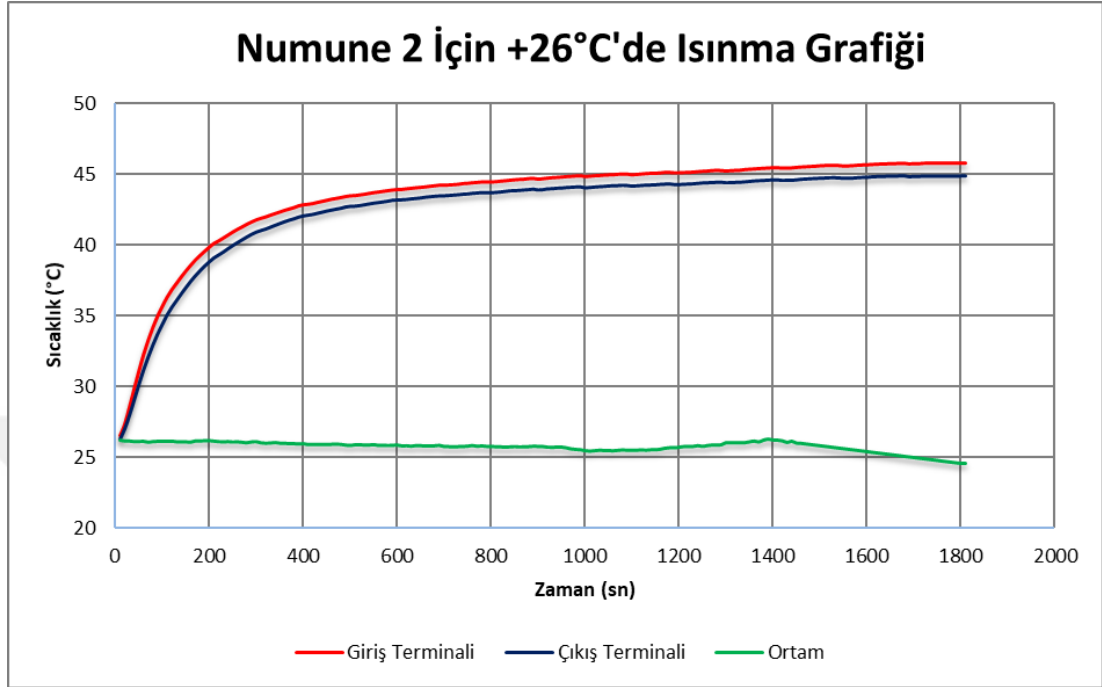
Şekil 4.15: Numune 1'in (Al-Cu) aşırı akım testi sonundaki termal kamera görüntüsü

1800 saniyelik testin sonunda terminal bağlantı uçlarındaki sıcaklık maksimum seviyeye gelerek kararlı bir durum sergilemiştir. Deney sonunda kablo bağlantı terminallerinde ölçülen sıcaklıklar Tablo 4.6'da belirtilmiştir. Bu tabloda aynı zamanda, teorik olarak hesaplanan analiz verilerine de yer verilmiş ve sapma oranları da belirtilmiştir.

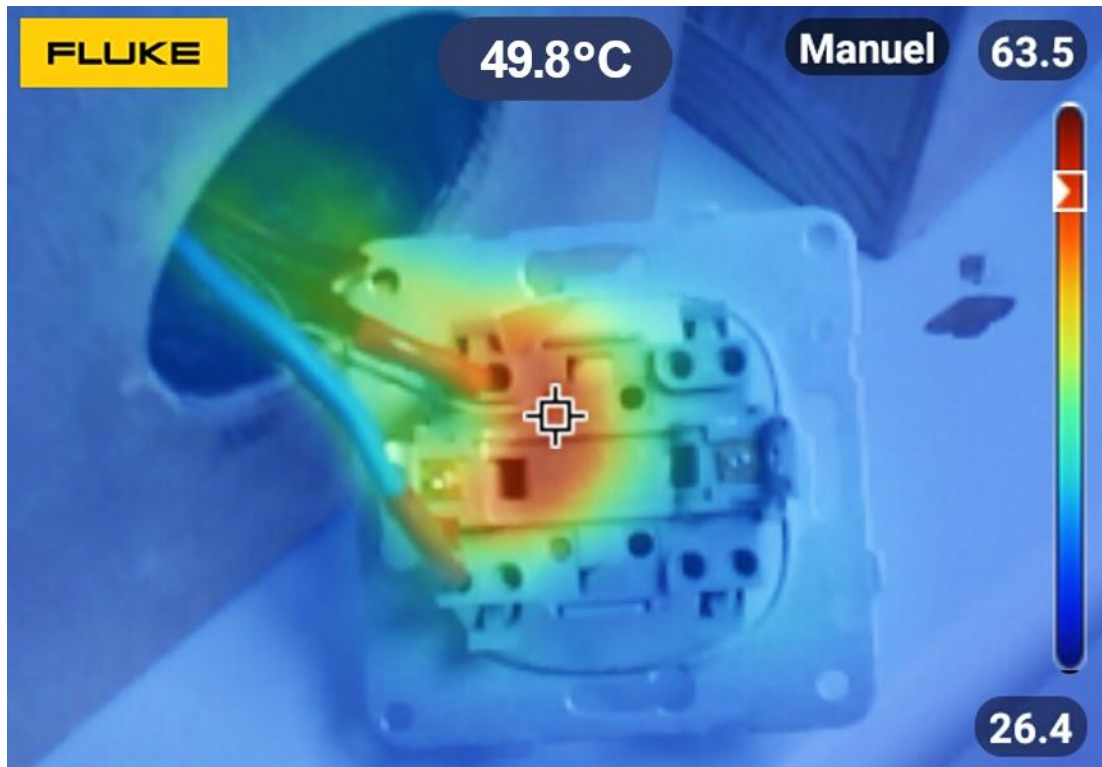
Tablo 4.6: Numune 1 (Al-Cu) için teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırması

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

Pirinç hammadde kullanılarak hazırlanmış numunelere ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 4.16'da paylaşılmıştır.



Şekil 4.16: Numune 2'nin (Pirinç) aşırı akım testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği



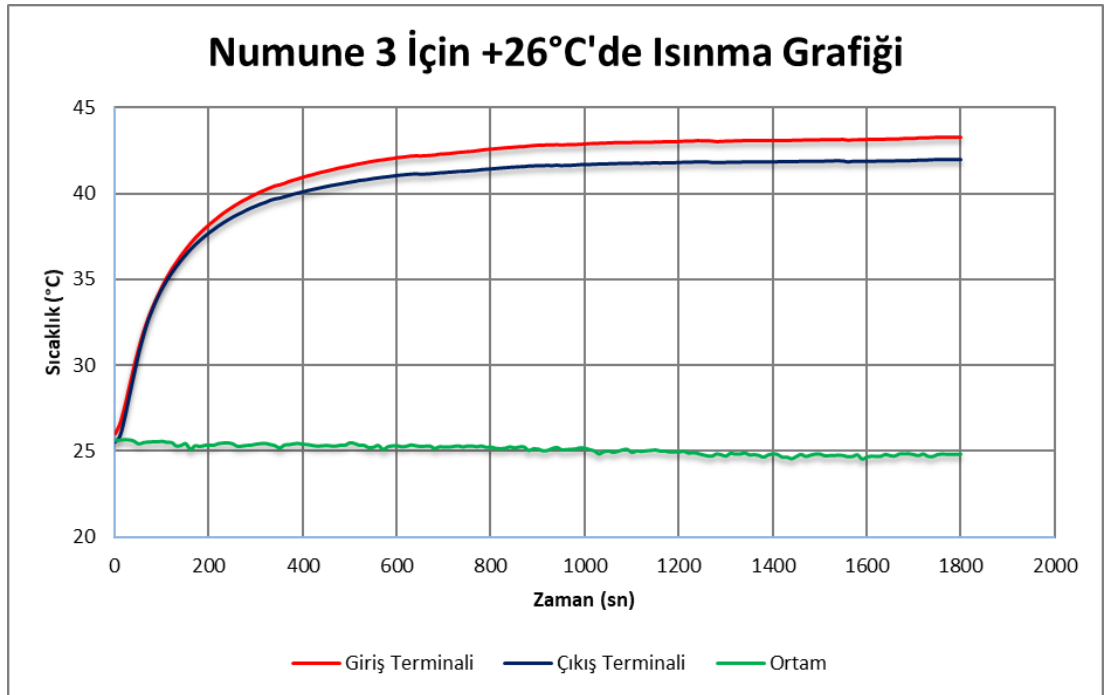
Şekil 4.17: Numune 2'nin (Pirinç) aşırı akım testi sonundaki termal kamera görüntüsü

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 Tablo 4.7'de belirtilmiştir. Tabloda, teorik olarak hesaplanan analiz verilerine de yer verilmiş ve sapma oranları da belirtilmiştir.

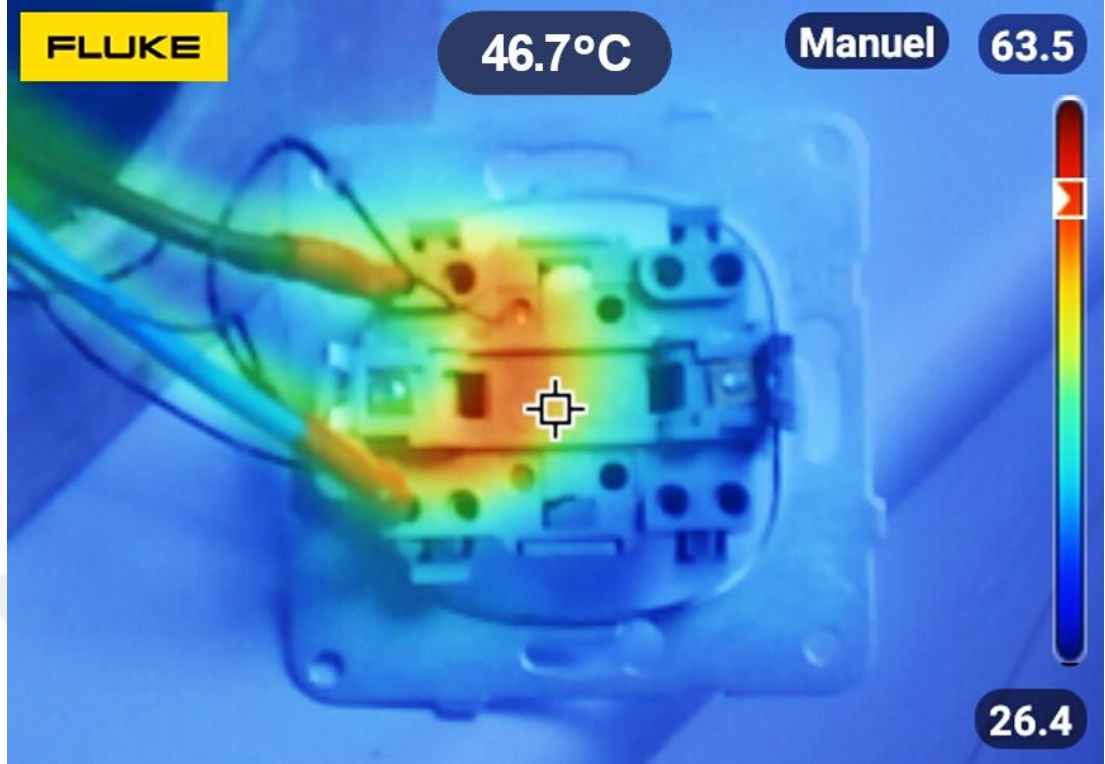
Tablo 4.7: Numune 2 (Pirinç) için teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırması

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

Bakır hammadde kullanılarak hazırlanmış numunelere ait sıcaklık-zaman grafiği Şekil 4.18'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.18: Numune 3'ün (Bakır) aşırı akım testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği



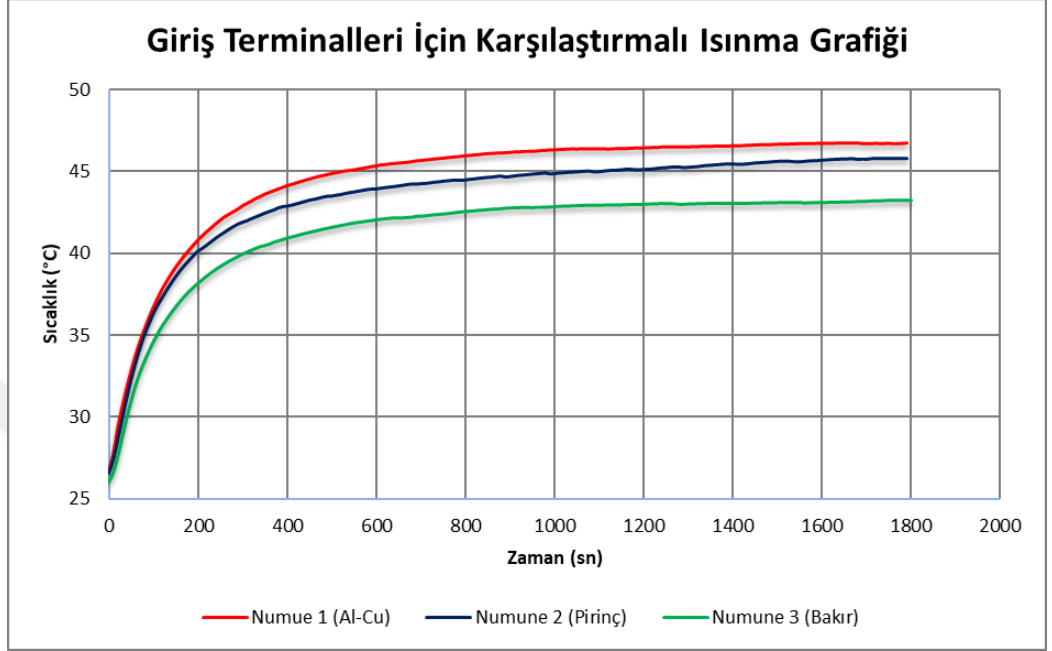
Şekil 4.19: Numune 3'ün (Bakır) aşırı akım testi sonundaki termal kamera görüntüsü

Numune 3'e (bakır) uygulanan sıcaklık artış testi sonunda terminal bağlantı uçlarındaki sıcaklık en kararlı seviyeye ulaşmıştır. Deney sonunda kablo bağlantı terminallerinde ölçülen sıcaklıklar Tablo 4.8'de belirtilmiştir.

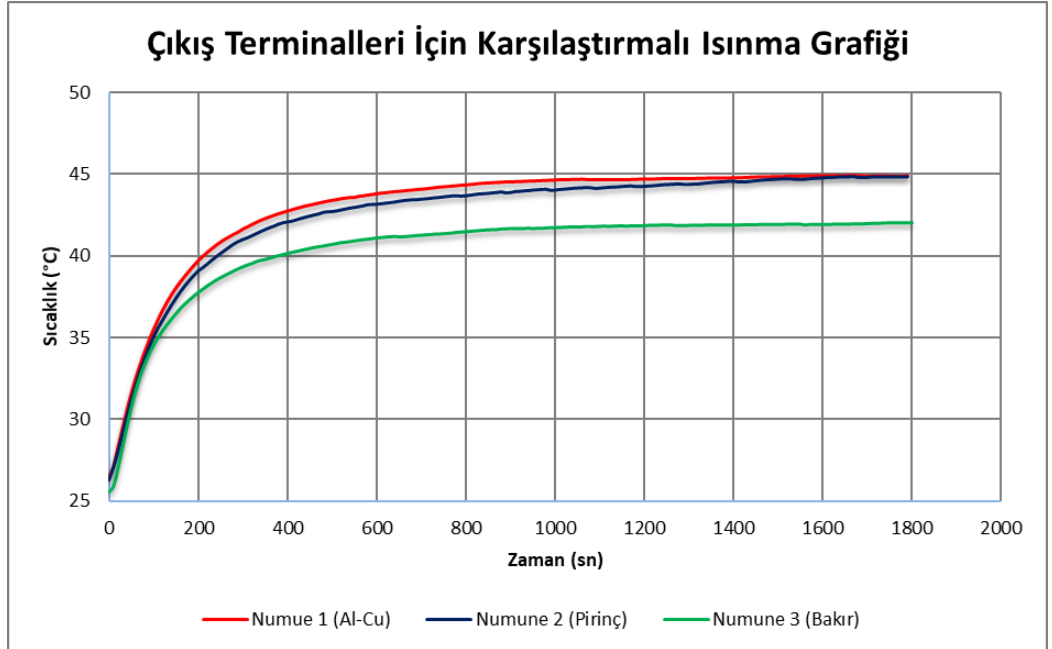
Tablo 4.8: Numune 3 (Bakır) için teorik ve deneysel sonuçlar karşılaştırması

Ürün	Ortam Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklığı (°C)	Çıkış Terminali Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)	Çıkış Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)
Numune 3 (Deneysel Veri)	+26,32	45,46	44,51	19,14	18,19
Numune 3 (Analiz Verisi)	+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 terminalleri karşılaştırma grafiği ise Şekil 4.41'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.20: Aşırı akım testinde, üç farklı numuneye ait giriş terminallerinin yaklaşık +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği test verilerinin karşılaştırma grafiği



Şekil 4.21: Aşırı akım testinde, üç farklı numuneye ait çıkış terminallerinin 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 terminallerinde daha az sıcaklık artışı meydana geldiği gözlemlenmiştir.

Yapılan testler neticesinde, Al-Cu bimetal ham madde ile üretilmiş giriş-çıkış terminallerinin 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.

4.2.2. Elektrik yükü altında mekanik ömür testi

TS EN 60669-1 standardının 19. maddesinde; “Anahtarlar, aşırı yıpranma ve diğer zararlı etkiler olmaksızın, normal kullanımda meydana gelen mekanik, elektriksel ve ısıl zorlamalara dayanmalıdır.” şeklinde geçmektedir. Ürünün bu teste uygunluğu ise, 16A’ye kadar ve 16A dâhil, 250 VAC’ı aşmayan beyan gerilimine sahip anahtarlar için kendi beyan akımı kadar akım verilerek 40.000 açma-kapama testine tabi tutularak belirlenmektedir. Anahtarlar, standardın ilgili maddesinde ifade edildiği üzere ürünün beyan akımında (10A) test edilmelidir. Akım türü alternatif akım olmalı ve güç faktörü de $\cos\phi=0.6 \pm 0,05$ olmalıdır. Bağlantı kablolarının uzunluk ve kesitleri, aşırı akım testlerindeki ile aynı olması gerektiği standartta belirtilmiştir (TSE, 2005).

Bu test için Panasonic Kurumsal Kalite laboratuvarındaki anahtar ömür testi cihazı kullanılmıştır. Belirtilen ömür testi cihazı, standartlarda geçen bu test için özel olarak

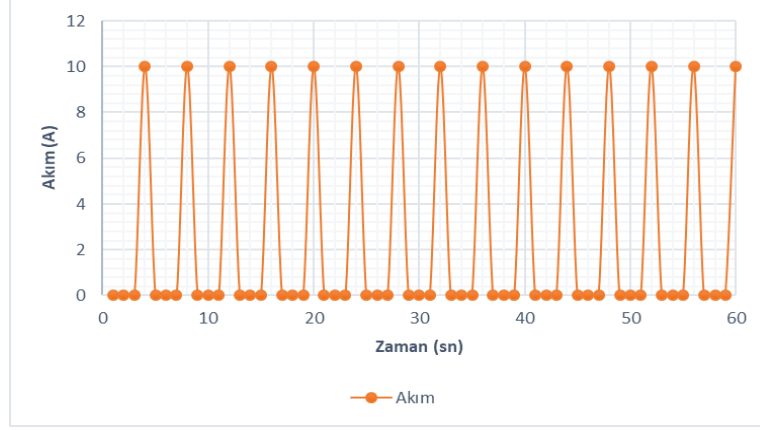
üretilmiştir. Cihaz kendi içerisinde dahili bir akım kaynağı bulundurmaktadır. Bunun dışında cihazın dokunmatik ayar ekranından testte kullanılacak akım, voltaj, güç faktörü, anahtar açma-kapama sayısı gibi veriler girilerek ürünler teste tabi tutulabilmektedir. Cihaz iş kazalarının önüne geçebilmek için cam kabinli şekilde imal edilmiştir ve güvenlik önlemi olarak kapaklar açıldığında test durdurulmaktadır. Test cihazının üretici bilgisi ve diğer teknik özellikleri gizlilik politikası nedeniyle paylaşılmamıştır. Ömür testi cihazı Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



Şekil 4.22: Elektrik anahtarı ömür test cihazı ve ayar-takip ekranı

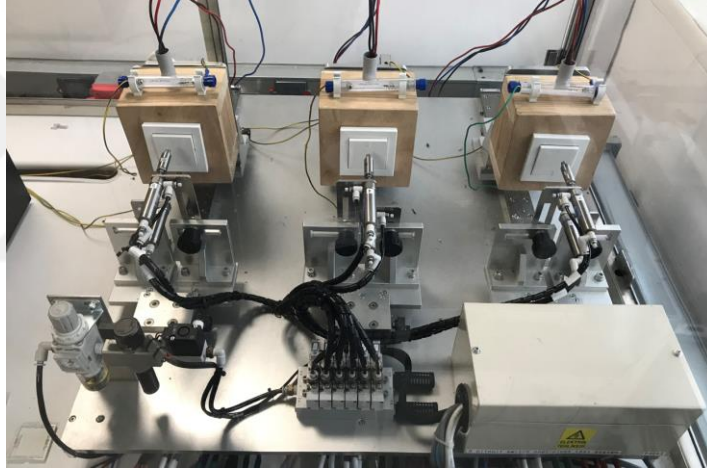
Numune 1 (Al-Cu terminaller), Numune 2 (pirinç terminaller) ve Numune 3 (bakır terminaller) isimli prototip ürünlerin her birinden birer adet hazırlanarak Panasonic Kurumsal Kalite Birimi laboratuvarındaki ömür testi cihazına bağlanmıştır. Standardın 19. maddesi uyarınca makine 40.000 açma-kapama yapacak şekilde ayarlanmıştır. Voltaj değeri 250VAC ve akım değeri de 10A olarak girilmiştir. Güç faktörü ise $\cos\phi=0,6$ olacak şekilde ayarlanmıştır.

Standardın 19. maddesinde, bir önceki madde olan standardın 18. maddesine atıfta bulunarak test cihazının operasyon süreleri belirtilmiştir. Bu maddeye göre; 13,5A beyan akımını aşmayan anahtarlama elemanları için 30 manevra/dk (15 açma-15 kapama) hızında teste tabi tutulması gerekmektedir. “akım devrede” süresi, toplam çevrimin $\% 25^{+5}_0$ ’i olmalı ve “akım devre dışı” süresi $\% 75_{-5}^0$ ’i olmalıdır (IEC, 2005). Deney anında iletkenlerden geçen akımın süre ile değişiminin bir dakikalık kesitini gösteren grafik Şekil 4.23’te paylaşılmıştır.

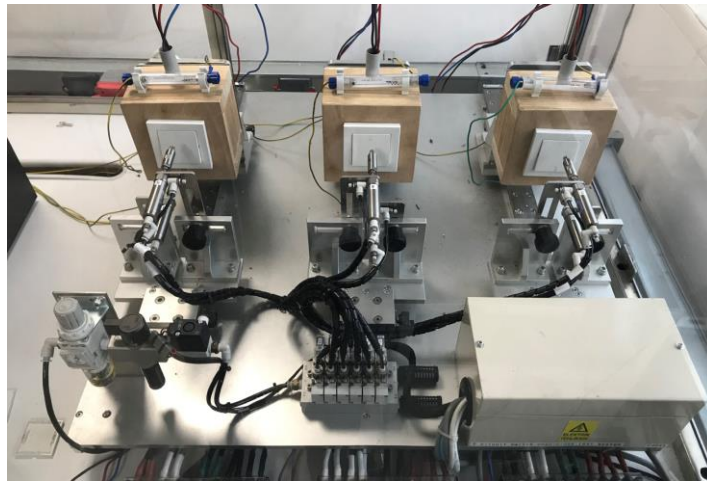


Şekil 4.23: Ömür testi boyunca iletkenlerden geçen akım değişiminin bir dakikalık kesitini belirten grafik

Ömür testi yapılırken çekilmiş aşağıdaki iki fotoğrafta ürünün açık (Şekil 4.24) ve kapalı (Şekil 4.25) konumlarını görebilirsiniz.



Şekil 4.24: Ömür testi esnasında ON konumdayken (Akım 10A)



Şekil 4.25: Ömür testi esnasında ürün OFF konumdayken (Akım 0A)

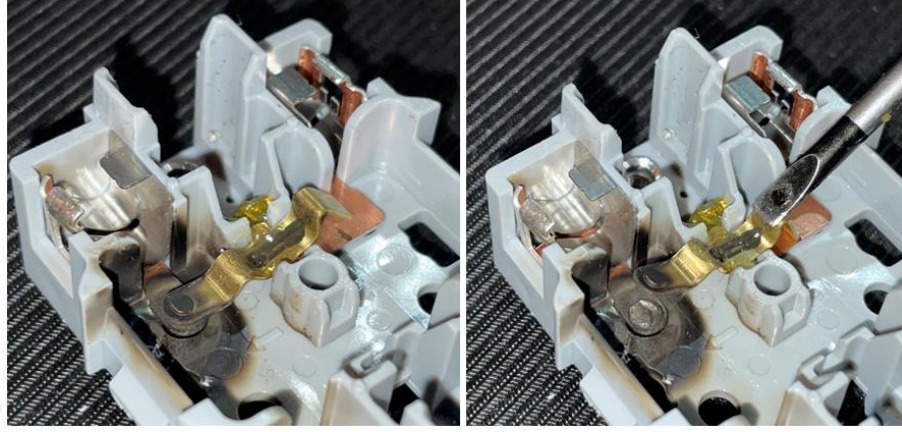
Ürünlerin ömür testleri sorunsuz bir şekilde başarıyla tamamlanmıştır. Üç farklı ürün de 40.000 açma-kapama sonunda halen iletim yapabilmektedir. Ürün mekanizmalarının çalışmasında herhangi bir problem gözlemlenmemiştir.

Ömür testi sonrasında ürünün içi açılarak deformasyon bölgeleri incelenmiştir. Kablo giriş terminalleri, orta (hareketli) kontak devrilme mafsalı, mekanizma kapsülü ve yayda herhangi bir deformasyon gözlemlenmemiştir. Gümüş kontakların açılıp kapanması esnasında oluşan arkın etkisiyle kontaklarda ve kontak çevresinde kararma, kurum birikimi ve iletimi etkilemeyecek şekilde yüzeysel deformasyonlar gözlemlenmiştir. En az deformasyona maruz kalan numunenin pirinç ham madde kullanılarak hazırlanan Numune 2 olduğu gözlemlenmiştir. Mevcutta kullanılan bakır hammadde kullanılarak oluşturulmuş Numune 3'ün en yüksek deformasyona maruz kalan numune olduğu tespit edilmiştir. Al-Cu bimetal ham madde kullanılarak hazırlanmış Numune 1 ise bakıra göre daha az, pirince göre ise daha fazla deforme olmuştur. Al-Cu bimetal ve bakırın, pirince göre daha fazla deforme olmasının nedeninin bakır oksidasyonu nedeniyle oluşan direnç artışı olduğu düşünülmektedir. Numunelerin ömür testi öncesi ve sonrasında ölçülen direnç değerleri Tablo 4.9'da belirtilmiştir. Farklılıkların nedeninin kontaklarda oluşan deformasyona bağlı temas azalması olduğu düşünülmüştür. Aynı zamanda, Al-Cu bimetal ve bakır hammaddelerde oluşan aşırı direnç artışının nedenlerinden biri de ısınma ile artan bakır korozyonudur.

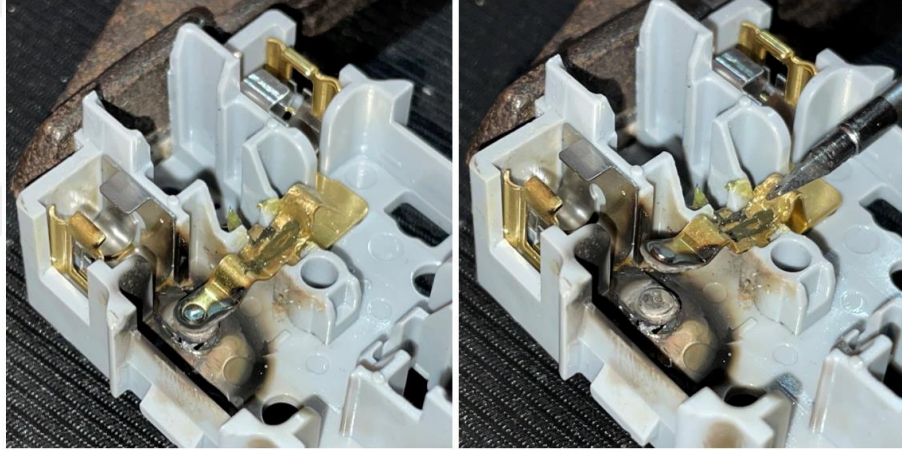
Tablo 4.9: Ömür testi öncesi ve sonrası direnç verileri karşılaştırma

Numune Adı	Ömür Testi Öncesi Direnç (mΩ)	Ömür Testi Sonrası Direnç(mΩ)	Artış Oranı
Numune 1 (Al-Cu)	4,1	11,8	%288
Numune 2 (Pirinç)	7,6	13,7	%180
Numune 3 (Bakır)	3,1	16,1	%519

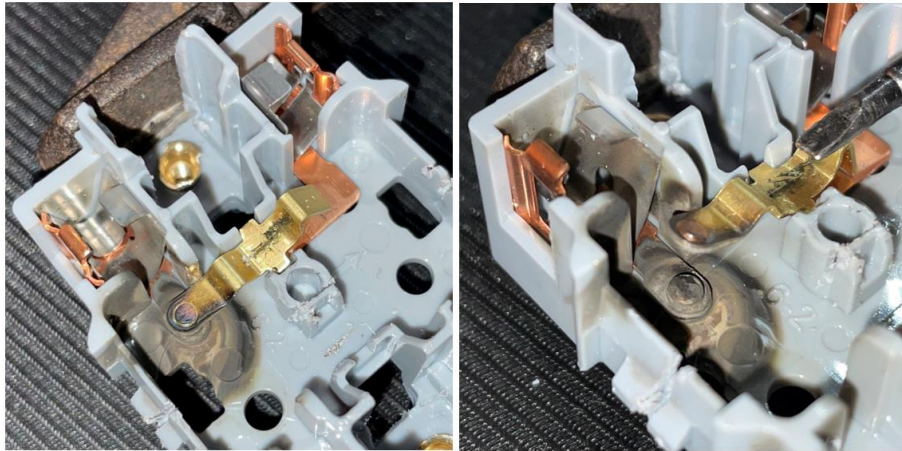
Kontaklar ve çevresinde ark kaynaklı deformasyonlar Şekil 4.26, Şekil 4.27 ve Şekil 4.28'de gösterilmiştir.



Şekil 4.26: Numune 1 (Al-Cu) ömür testi sonrasında çekilmiş kontak görselleri



Şekil 4.27: Numune 2 (Piringç) ömür testi sonrasında çekilmiş kontak görselleri



Şekil 4.28: Numune 3 (Bakır) ömür testi sonrasında çekilmiş kontak görselleri

Standardın 19. maddesinde test sonrasında aşağıdaki maddelerde belirtilen hususların kontrol edilmesi ve maddelerle alakalı herhangi bir uygunsuzluk olmaması istenmektedir.

- Daha sonraki kullanımı bozan yıpranma gözlemlenmemelidir.
- Harekete geçirme elemanının konumu gösterilmiş ise, harekete geçirme elemanının konumu ile hareket eden kontakların konumu arasında uyumsuzluk gözlemlenmemelidir.
- Mahfazalar, yalıtkan kaplamalar veya bariyerler anahtarın daha sonra çalıştırılmayacağı dereceye kadar deforme olmamalıdır.
- Sızdırmazlık bileşiği varsa sızma yapmamalıdır.
- Elektriksel veya mekanik bağlantılar gevşememelidir.
- Hareketli kontaklarda bağlı yer değiştirme görülmemelidir (TSE, 2005).

Ömür testi sonunda yapılan kontrollerde yukarıda belirtilen maddelerin hiçbirinde uygunsuzluk gözlemlenmemiştir. Ürünler ömür testlerini başarıyla tamamlamışlardır.

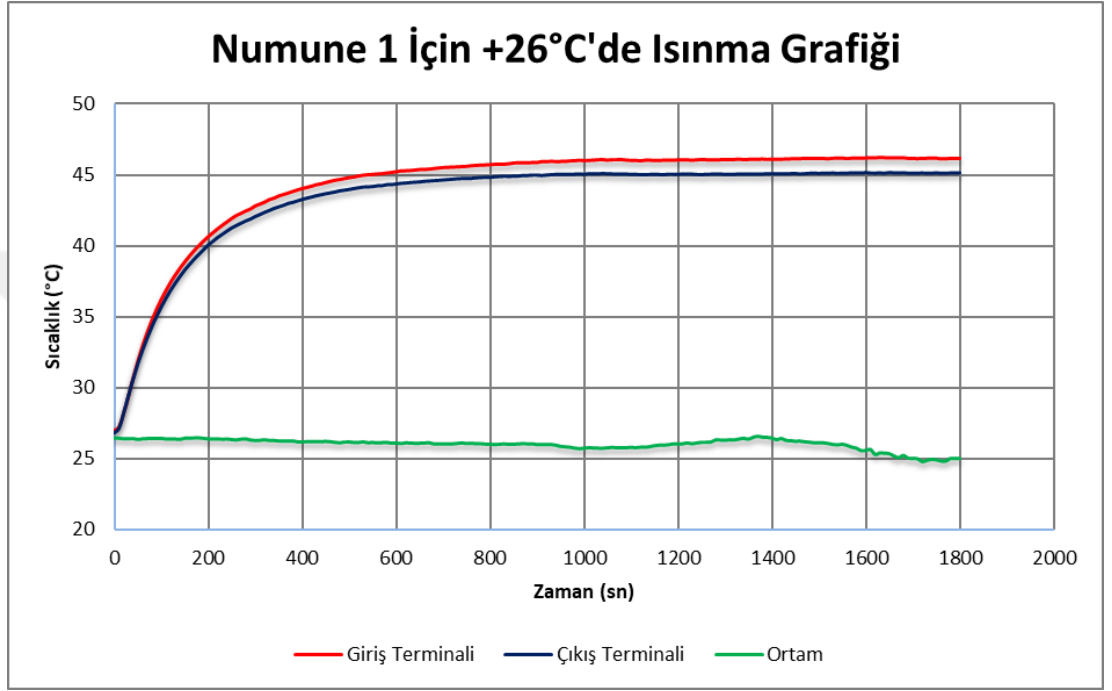
4.2.3. Ömür testi sonrası sıcaklık artışı testi

Standardın 19. maddesinin son bölümünde 17. maddeye atıfta bulunularak, ömür testinden geçen elektrik anahtarlarına yeniden sıcaklık artışı testi uygulanmasını belirtir. Aşırı akım testinde ürünün beyan akımının 1,35 katında (13,5A) testler yapılmıştı, ömür testi sonrasındaki sıcaklık artışı testinde ise ürüne beyan akımı (10A) kadar elektriksel yük uygulanarak sıcaklık artış karakteristiğinin incelenmesi istenmektedir. Testler aşırı akım test düzeneğinde 10A akım verilerek yapılmıştır. Test süresi 1800 saniyedir. Yine bu sıcaklık artışı testlerinde, sıcaklık artış miktarının 45°C'yi aşmaması gerekmektedir.

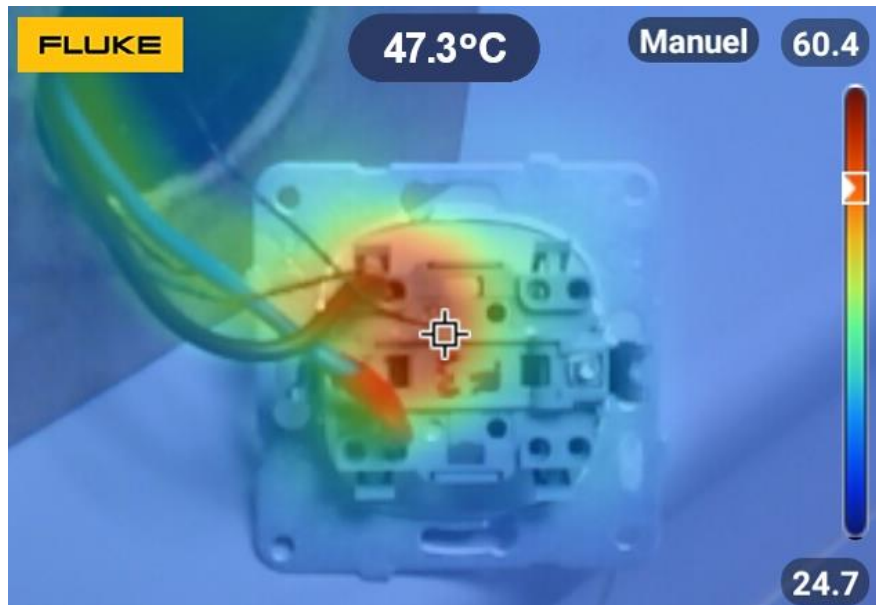


Şekil 4.29: Ömür testi sonrasında yapılan sıcaklık artışı test düzeneği

Aynı özelliklere sahip üç adet elektriksel anahtara, TS EN 60669-1 standardının 17. maddesi uyarınca 1 metre boyundaki 2,5 mm² kesitli bakır som kablo ile akım kaynağına bağlanarak 10A akım uygulanmıştır. Test tam 1800 saniye sürmüştür. Al-Cu bimetal hammaddesi kullanılarak hazırlanmış Numune 1'in test sırasında toplanan veriler ile oluşturulmuş sıcaklık-zaman grafiği Şekil 4.30'da belirtilmiştir.



Şekil 4.30: Numune 1'in (Al-Cu) sıcaklık artışı testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği



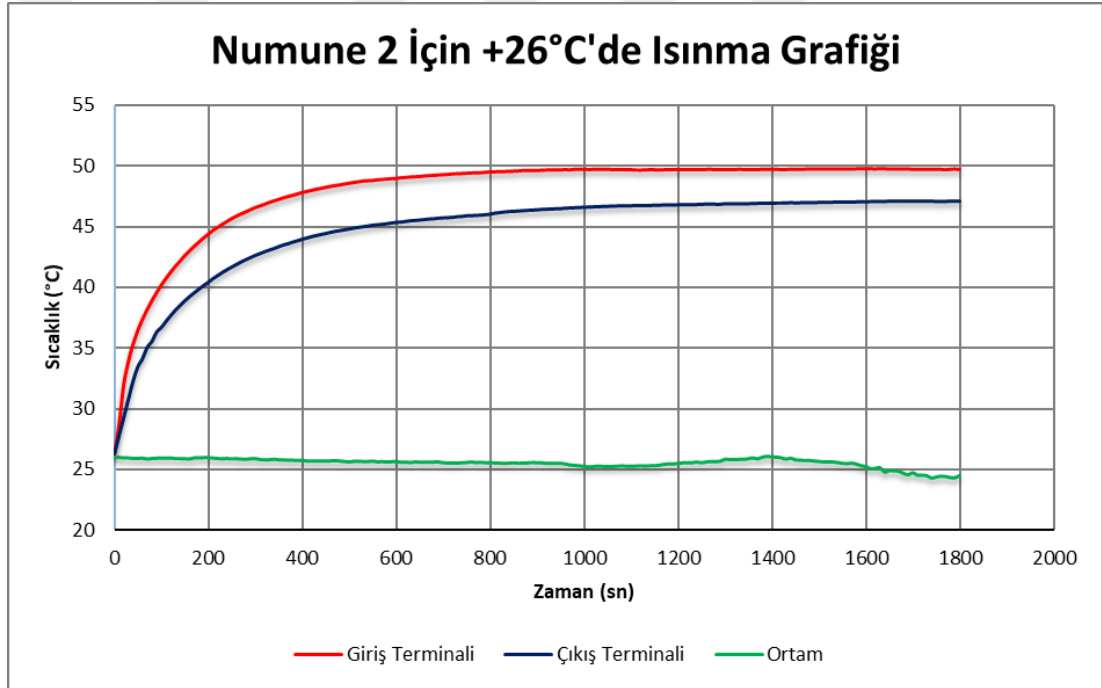
Şekil 4.31: Numune 1'in (Al-Cu) sıcaklık artışı testi sonundaki termal kamera görüntüsü

Yapılan testin son anında (1800. saniye) kablo giriş bölgelerinden alınan maksimum sıcaklık verileri ve sıcaklık artış miktarları Tablo 4.10’da belirtilmiştir.

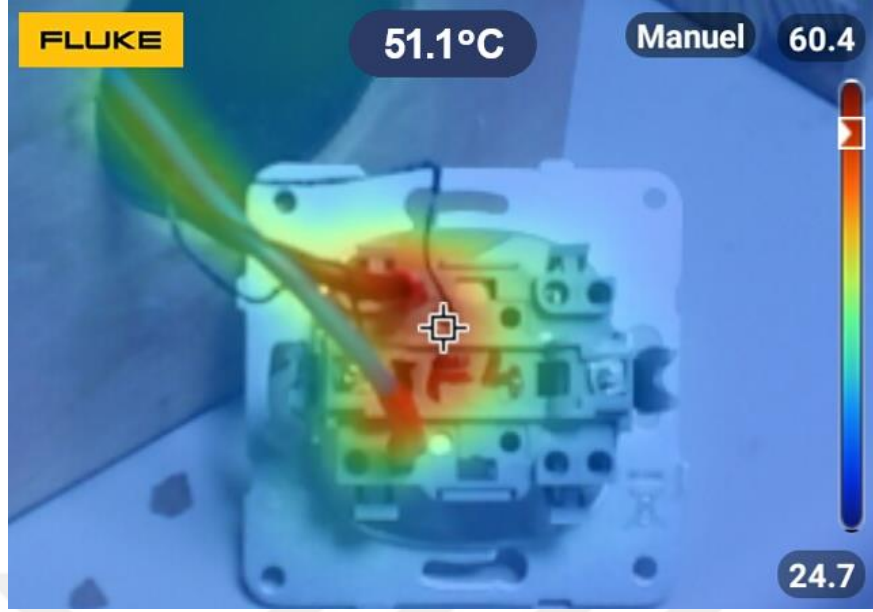
Tablo 4.10: Numune 1 (Al-Cu) sıcaklık artış testi sonuçları

Ürün	Ortam Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklığı (°C)	Çıkış Terminali Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)	Çıkış Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)
Numune 1 (Deneysel Veri)	+26,23	46,144	45,114	19,914	18,884

Pirinç ham madde kullanılarak hazırlanmış Numune 2’nin test sırasında toplanan veriler ile oluşturulmuş sıcaklık-zaman grafiği Şekil 4.32’de belirtilmiştir.



Şekil 4.32: Numune 2’nin (Pirinç) sıcaklık artışı testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği



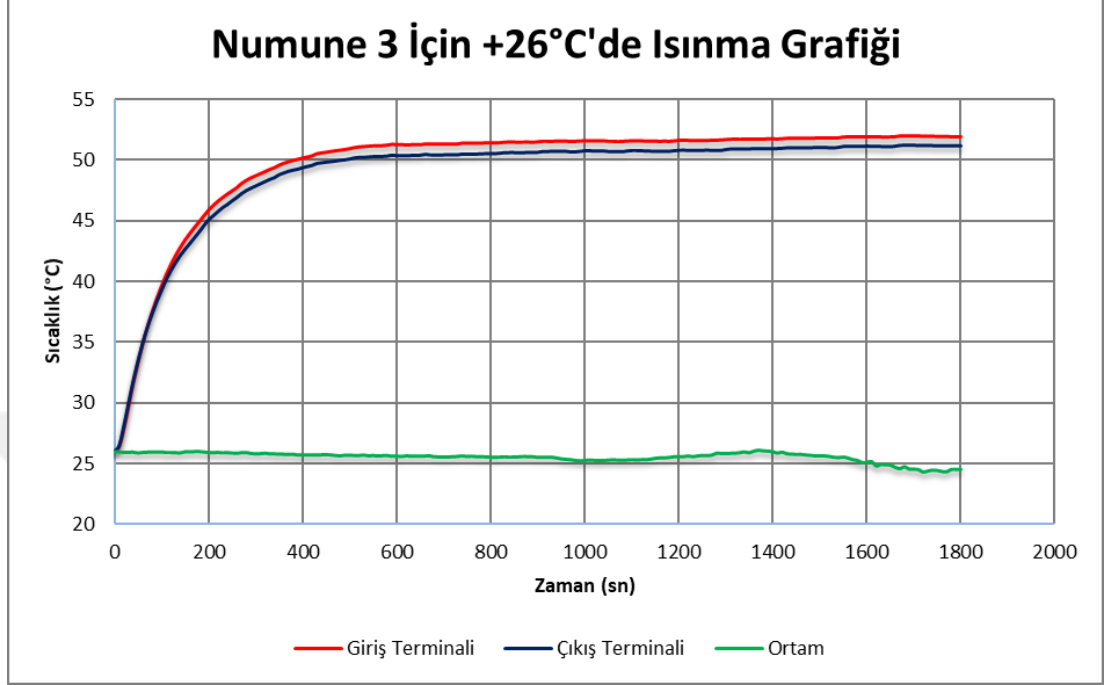
Şekil 4.33: Numune 2'nin (Pirinç) sıcaklık artışı testi sonundaki termal kamera görüntüsü

Numune 2'ye (pirinç) uygulanan yarım saatlik sıcaklık testi sonunda kablo giriş bölgelerinden alınan maksimum sıcaklık verileri ve sıcaklık artış miktarları Tablo 4.11'de belirtilmiştir.

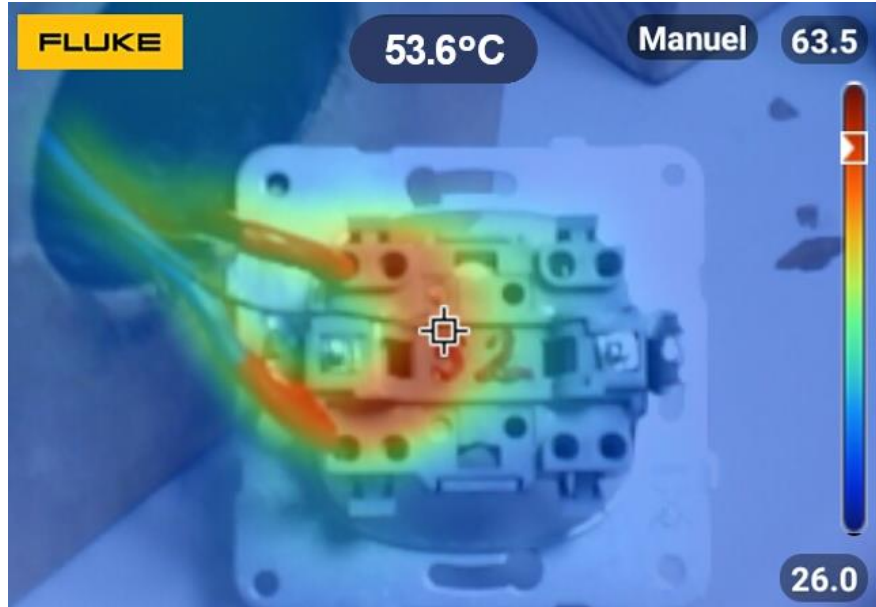
Tablo 4.11: Numune 2 (Pirinç) sıcaklık artış testi sonuçları

Ürün	Ortam Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklığı (°C)	Çıkış Terminali Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)	Çıkış Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)
Numune 2 (Deneysel Veri)	+26,23	49,742	47,058	23,512	20,828

Bakır hammadde kullanılarak hazırlanmış Numune 3'ün test sırasında toplanan veriler ile oluşturulmuş sıcaklık-zaman grafiği Şekil 4.34'te belirtilmiştir.



Şekil 4.34: Numune 3'ün (Bakır) sıcaklık artışı testi boyunca giriş-çıkış kabloları üzerinde oluşan sıcaklık değişimini içeren sıcaklık-zaman grafiği



Şekil 4.35: Numune 3'ün (Bakır) sıcaklık artışı testi sonundaki termal kamera görüntüsü

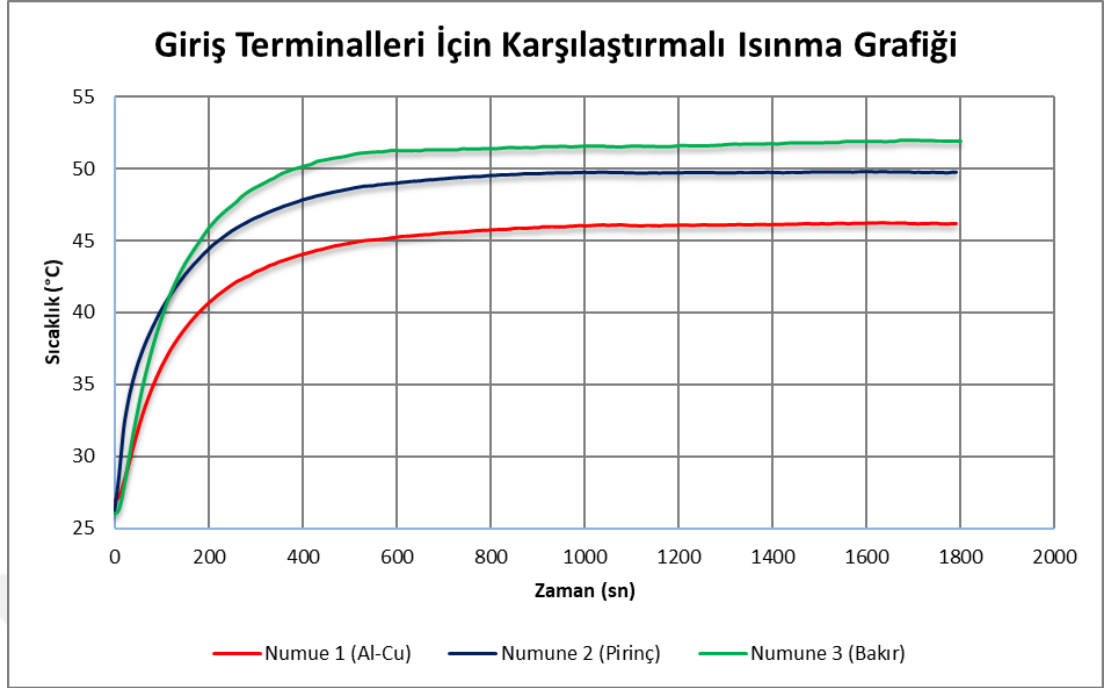
Numune 3'e (bakır) uygulanan yarım saatlik sıcaklık testi sonunda kablo girişlerinden alınan maksimum sıcaklık verileri ve sıcaklık artış miktarları Tablo 4.12'de belirtilmiştir.

Tablo 4.12: Numune 3 (Bakır) sıcaklık artış testi sonuçları

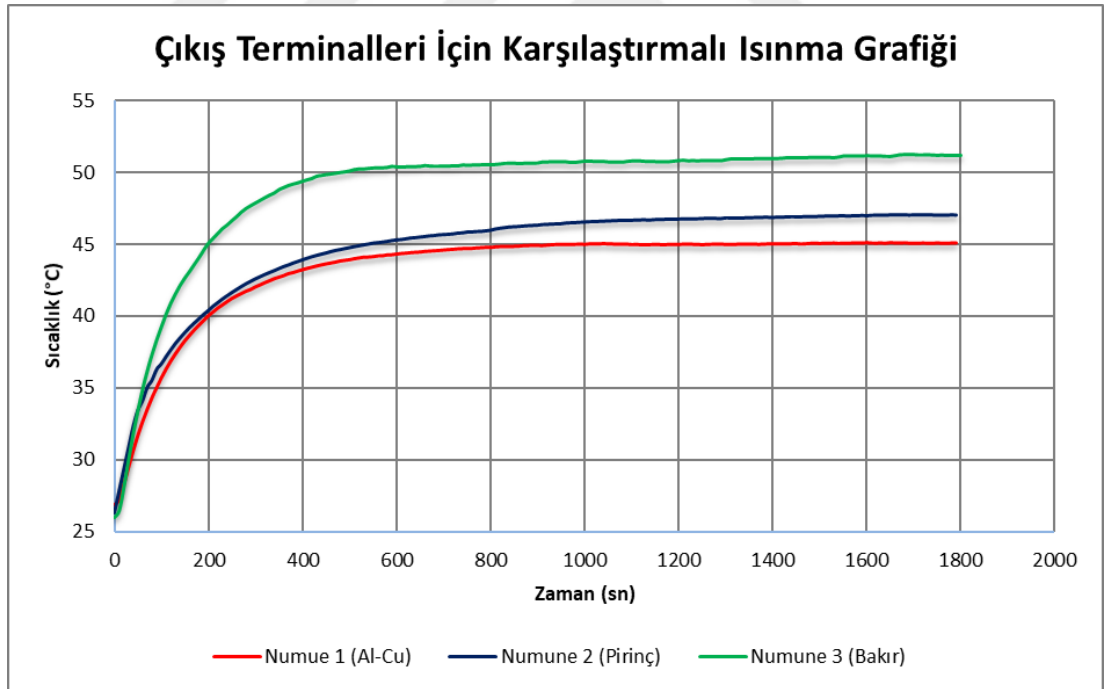
Ürün	Ortam Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklığı (°C)	Çıkış Terminali Sıcaklığı (°C)	Giriş Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)	Çıkış Terminali Sıcaklık Değişimi (ΔT , °C)
Numune 3 (Deneysel Veri)	+26,23	51,874	51,177	25,644	24,947

- Üç farklı numunenin sıcaklık artış (ΔT) verileri incelendiğinde, standardın belirttiği maksimum artış miktarı olan 45°C sıcaklığının aşılmadığı gözlemlenmiştir.
- Bu sıcaklık testi; 10A yük altında yapılmasına rağmen, 13,5A altında yapılan aşırı akım testlerindeki sıcaklık verilerinden daha yüksek sıcaklık değerleri gözlemlenmiştir. Bunun nedeni, ömür testi boyunca gümüş kontakların deforme olarak dirençlerinin artmasıdır.
- Yapılan sıcaklık testleri sonucunda, pirinç ham maddenin ilgili testleri başarıyla geçtiği gözlemlenmiştir.

Üç farklı numuneye ait ömür testi sonrası sıcaklık artış testi ölçüm verileri ile oluşturulmuş giriş terminali sıcaklık artış karakteristiği karşılaştırma grafiği Şekil 4.36'da, çıkış terminalleri karşılaştırma grafiği ise Şekil 4.37'de paylaşılmıştır.



Şekil 4.36: Ömür testi sonrası sıcaklık artış testlerinde, üç farklı numuneye ait giriş terminallerinin yaklaşık +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği test verilerinin karşılaştırma grafiği

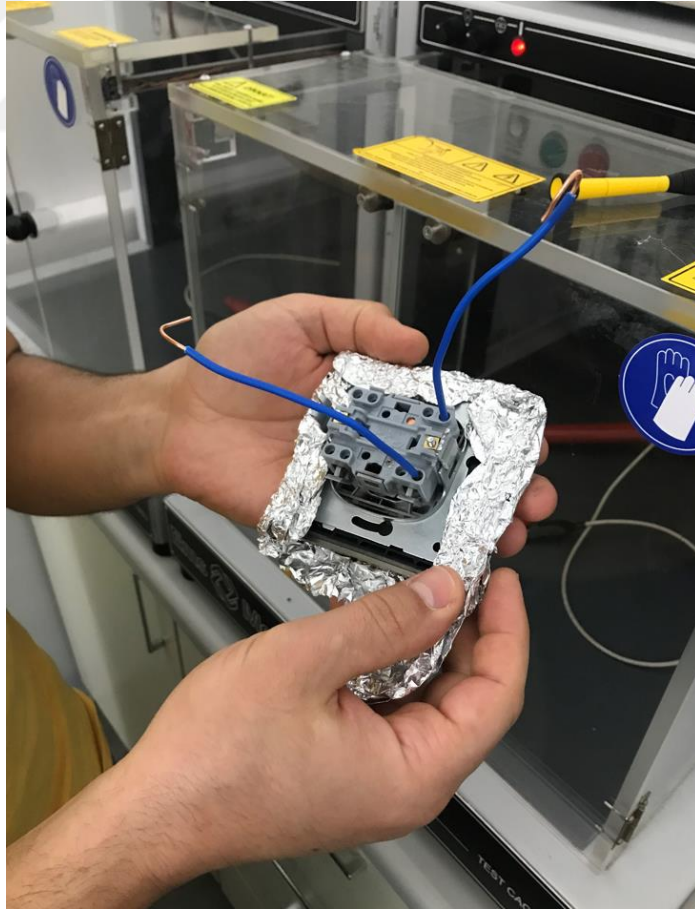


Şekil 4.37: Ömür testi sonrası sıcaklık artış testlerinde, üç farklı numuneye ait çıkış terminallerinin +26°C ortam koşulundaki ısınma karakteristiği analiz verilerinin karşılaştırma grafiği

4.2.4. İzolasyon testi

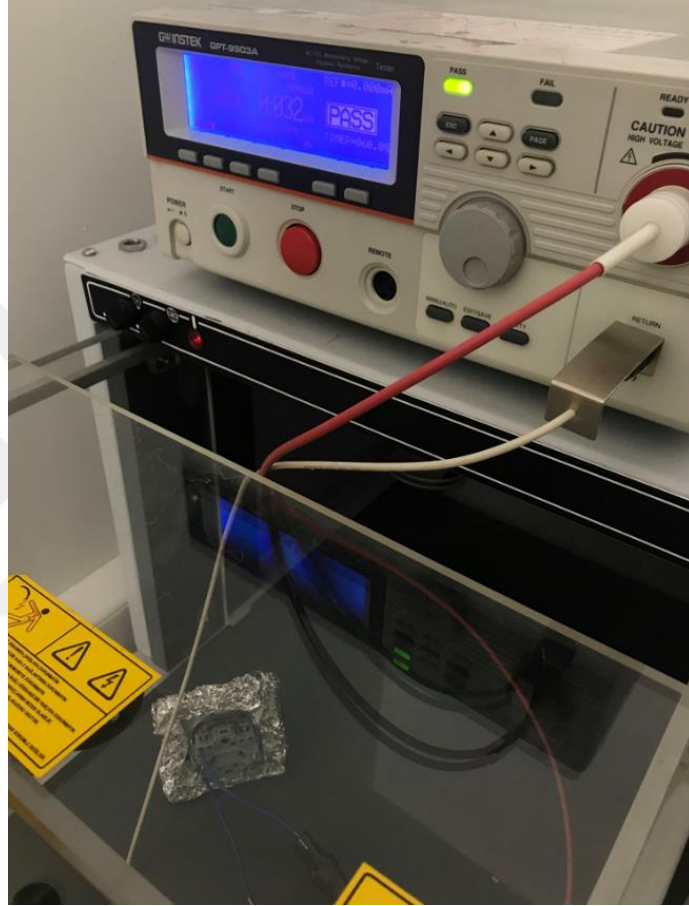
Standartta ömür testi olarak bahsedilen 19. maddenin son satırlarında izolasyon ile alakalı olan 16. maddeye atıfta bulunarak ömür testi sonrasında yapılan sıcaklık artışı testinin ardından ürünün izolasyon testine tabi tutulması gerektiği belirtilmiştir. Bunun nedeni ise ürünün sahada kullanıldığı on yıllarca süre boyunca karşılaşılabileceği büyük deformasyonlara rağmen ürünün kullanıcıyı elektrik çarpması riskine, anahtara bağlı cihazları da bozulmaya karşı korumasının istenmesidir.

Ömür testi süresince ürün defalarca açma kapamaya maruz bırakılmaktadır. Açma kapama işlemleri esnasında kontaklar arasında ark oluşarak ani bir sıcaklık artışı olmaktadır. Anlık olarak bu kadar yüksek sıcaklıklara maruz kalan metal parçalar etrafa saçılarak yalıtkan parçalar üzerine yapışır ve yüksek gerilimlerde anot-katot arası kısa devreye neden olarak iletim yapabilmektedir. Bu da kullanıcı için çarpılmaya, elektrikli cihazlar için bozulmaya ve yangına sebebiyet verebilmektedir.



Şekil 4.38: Numunelerin izolasyon testi için hazırlık süreci

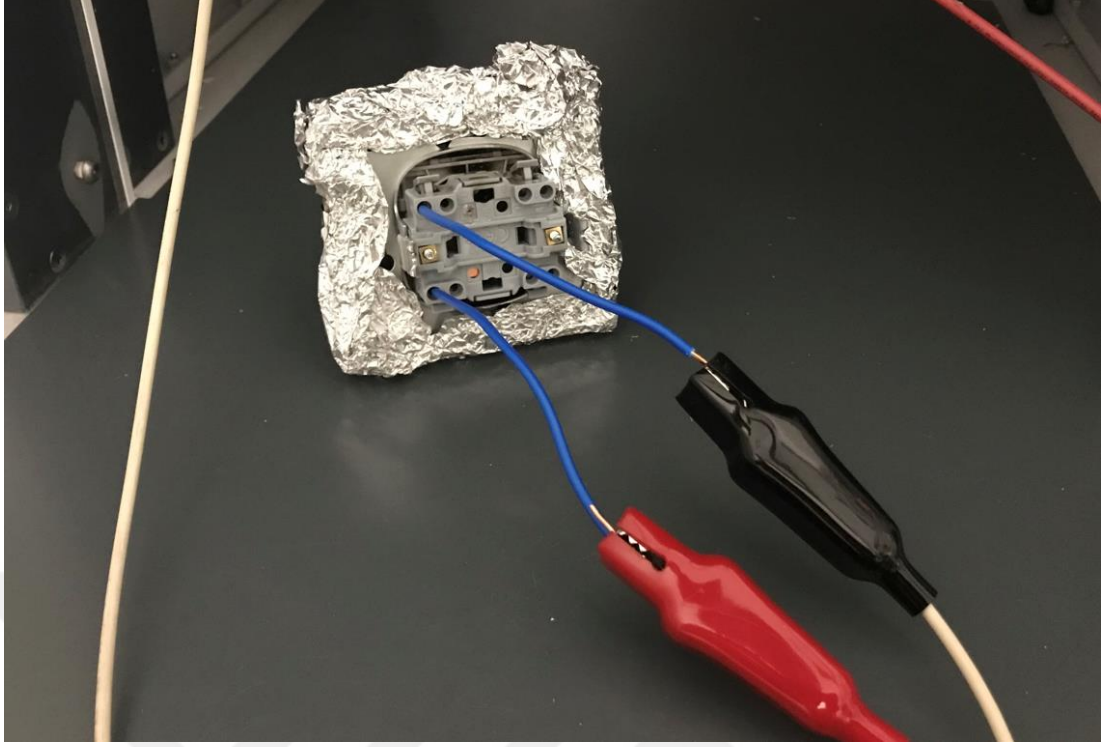
Sıcaklık ve ömür testlerinde kullanılan numunelerin giriş ve çıkış terminallerine kablo bağlantısı yapılarak ürün izolasyon test cihazına bağlanmıştır. Standardın 16. maddesinde kontaklar arasındaki izolasyon için 1250V dayanım istenmektedir ancak Panasonic standardı gereği ürünler 1500V’ta test edilmektedir (Panasonic Corporation, 2011). Şekil 4.39’daki görselde ürünün izolasyon cihazına bağlantı şekli gösterilmiştir.



Şekil 4.39: Numunenin tüm bağlantılarının yapılarak izolasyon test kabinine konumlandırılması

Test için GW Instek firmasına ait izolasyon test cihazı kullanılmıştır. Cihazın çalışma aralığı 0,3-100mA (AC), 0,3-10mA (DC) ve 0,2-5kV (AC/DC) şeklindedir. Cihazın sapma bilgileri AC/DC kV $\pm 1\%$, 5V mA/m Ω $\pm 1\%$ şeklindedir. Cihazın kalibrasyonu 09.12.2022 tarihinde Netes firması tarafından yapılmıştır.

Aşağıdaki görsellerde kontaklar arası izolasyon testine tabi tutulan ürünün kablo bağlantı şekli ve ürünün 1500V gerilimde herhangi bir izolasyon hatasına izin vermediği bilgileri paylaşılmıştır. Tüm numuneler 1500V izolasyon testinden geçmiştir.



Şekil 4.40: Kontaklar arası izolasyon testi için yapılan kablo bağlantısı

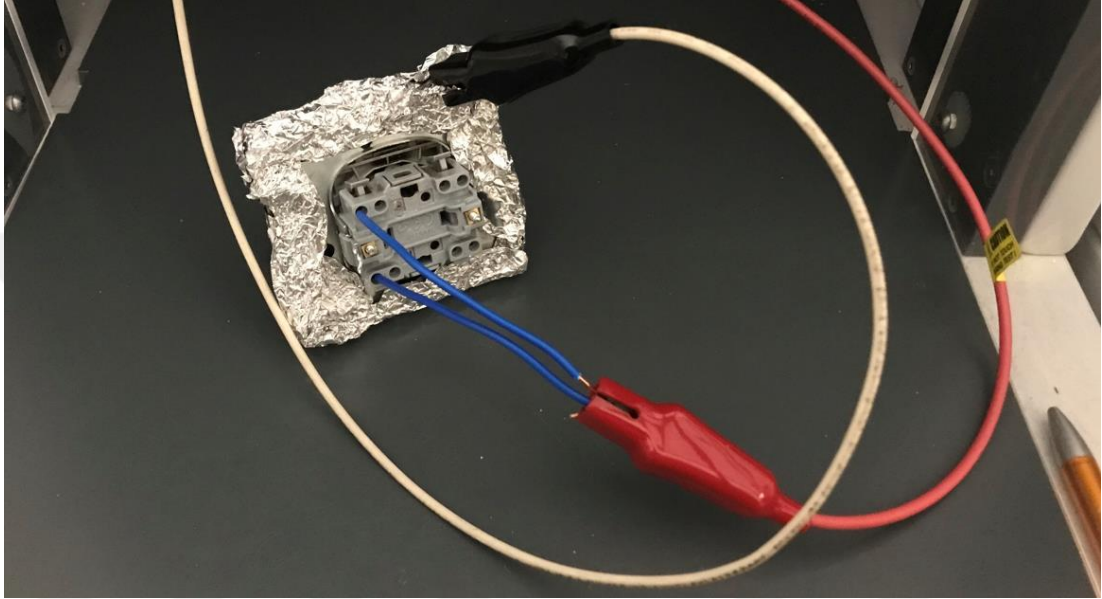


Şekil 4.41: Ürünün 1500V izolasyon testinden geçtiğini belirten görsel

Standardın 16. maddesinde bulunan Çizelge 14’te belirtildiği üzere “Düğme veya benzeri bir harekete geçirme elemanı yüzeyi ile iletken bölümler arasında 2000V gerilim uygulandığında izolasyon hatası ile karşılaşılmalıdır.” (TSE, 2005) ibaresi uyarınca

ikinci bir izolasyon testi de uygulanmalıdır. Panasonic standardı gereği bu test 2800V gerilim uygulanarak icra edilmiştir (Panasonic Corporation, 2011).

Aşağıdaki görsellerde kontaklar arası izolasyon testine tabi tutulan ürünün kablo bağlantı şekli ve ürünün 2800V gerilimde herhangi bir izolasyon hatasına izin vermediği bilgileri paylaşılmıştır. Tüm numuneler 2800V izolasyon testinden geçmiştir.



Şekil 4.42: İletkenler ve yalıtkan yüzeyler arası izolasyon testi için yapılan kablo bağlantısı



Şekil 4.43: Ürünün 2800V izolasyon testinden geçtiğini belirten görsel

Numunelere iki farklı voltaj seviyesinde uygulanan izolasyon testlerinin sonuçları Tablo 4.13'te belirtilmiştir.

Tablo 4.13: İzolasyon test sonuçları

Ürün	Kontaklar Arası İzolasyon Tesi (1500V)	İletken ve Yalıtkan Dış Plastikler Arası İzolasyon Tesi (2800V)
Numune 1 (Al-Cu)	Geçti	Geçti
Numune 2 (Pirinç)	Geçti	Geçti
Numune 3 (Bakır)	Geçti	Geçti

Aşırı akım, ömür testi, ömür testi sonrası sıcaklık artışı testi gibi zorlu testlerden sonra yıpranmış olan ürüne uygulanan izolasyon testleri, elektriksel ürünün devredeki cihazlara ve anahtarları kullanan canlılara zarar verip vermediğini gözlemlemek için yapılmıştır. Uluslararası standartlarca kabul görmüş izolasyon gerilim değerlerinden çok daha yukarıda uygulanan darbe voltajlarında dahi herhangi bir izolasyon zafiyeti gözlemlenmemiştir. Tüm numune ürünler testlerden başarıyla geçmiş olup, Al-Cu bimetalik ham maddesinin de artık bakır ve pirince alternatif bir iletken olarak kullanılabileceği kanısı oluşmuştur.

BÖLÜM 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

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

Çalışmanın teorik kısmında; teorik termal ve 3D CAD model varsayımlarının yapılması, sonlu elemanlar analizi (FEA) varsayım ve analizlerinin yapılarak Al-Cu bimetal, pirinç ve bakır iletkenlerdeki elektriksel direnç kaynaklı ısınmaların hesaplanması, ardından bu ısınma sonuç verilerinin diğer bir analiz modülüne aktararak belirli bir süre sonundaki iletken sıcaklıklarındaki artış miktarının program tarafından hesaplanması ve sonuçların uluslararası elektrik standart (IEC & TS EN 60669-1) verileri ile karşılaştırılması şeklindedir.

Çalışmanın deneysel doğrulama kısmında ise; kıyaslaması yapılacak olan ham maddeler için; çekme, sertlik ve ham madde kimyasal analizi gibi öncül testler yapılarak ham maddeler hakkında bilgi sahibi olunması amaçlanmıştır. Sonrasında bu ham maddeler kullanarak oluşturulmuş üç farklı numune, koşulları uluslararası standartlarca belirlenmiş elektro-termal testlere tabi tutulmuşlardır. Öncelikle aşırı akım testi yapılarak en zorlu şartlar altında iletkenlerin ısınma karakteristiği incelenmiş, ardından numuneler 40.000 kez açma-kapamaya tabi tutularak ömür testi yapılmıştır. Numuneler ömür testi sonunda tekrar sıcaklık testine tabi tutulmuş ve üç farklı ham maddenin tüm bu testler sonundaki davranışları birbirleri ve teorik hesaplamalar ile mukayese edilmiştir. Numune ürünler, en son adım olarak izolasyon testlerine tabi tutulmuş ve numunelerin tamamı bu testleri de başarıyla geçmiştir. Analiz ve testler sonucunda elde edilen veriler maddeler halinde sunulmuştur.

- Ham maddelere uygulanan çekme ve sertlik testlerinde, Al-Cu bimetalinin mukavemet değerlerinin pirinç ve bakıra göre düşük olduğu gözlemlenmiştir.
- Yapılan kimyasal analizlerde ham maddelerde; kurşun (Pb), civa (Hg) ve kadmiyum (Cd) gibi RoHS Direktifine aykırı materyaller gözlemlenmemiştir.
- Yapılan sıcaklık artış simülasyonları ile deneysel sonuçların küçük sapmalar ile örtüştüğü gözlemlenmiştir.
- Farklı tip bütün numunelerin 13,5A yük altında uygulanan aşırı akım testlerinden geçtiği gözlemlenmiştir. Sıcaklık artış miktarları sıralaması Pirinç>Al-Cu>Bakır şeklindedir. En az ısınan bakır iletkenler en iyi sonucu verirken, içlerinde en çok ısınan hammadde pirinç terminaller olmuştur. Al-Cu bimetal ham maddenin ise pirince göre daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklık artış miktarları (ΔT) hiçbir numunede 45°C değerini geçmediği için tüm numuneler testi başarıyla geçmiştir.
- 10A yük altında 40.000 açma-kapama ile yapılan ömür testinden tüm numunelerin başarıyla geçtiği gözlemlenmiştir. Ömür testinde; mekanik, elektriksel, termal ve manyetik etkilere maruz kalan numuneler arasında en çok deformasyona uğrayanın bakır olduğu gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin bakır oksidasyonu nedeniyle direncin artması olduğu düşünülmüştür. Al-Cu bimetal iletken ise pirince göre daha fazla deforme olurken, bakıra göre daha iyi bir performans sergilemiştir.
- Ömür testi sonunda yıpranmış olan numunelere uygulanan 10A sıcaklık artış testinden tüm numuneler başarıyla geçmiştir. Bakır oksidasyonu nedeniyle en çok deforme olan bakır numunenin direncinin diğer numunelere göre daha fazla arttığı ve daha fazla ısınmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Pirinç hammadde en iyi sonucu verirken, ömür testinde meydana gelen bakır oksidasyonu nedeniyle pirince göre daha fazla deforme olan Al-Cu bimetal hammaddesi pirince göre daha kötü sonuç verirken, bakıra göre daha iyi sonuç vermiştir. Sıcaklık artış miktarları (ΔT) hiçbir numunede 45°C değerini geçmediği için tüm numuneler testi başarıyla geçmiştir.
- Son olarak yapılan 1500V ve 2800V aşırı gerilim izolasyon testlerinden tüm numuneler başarıyla geçmiştir.

Bu veriler ışığında; hafiflik, kolay şekil verilebilirlik, iyi iletkenlik, maliyet avantajı ve kolay temin edilebilirlik gibi olumlu özelliklere sahip olan Al-Cu bimetalik

hammaddesinin uluslararası IEC & TS EN 60669-1 standardını sağladığı sonucuna ulaşılmıştır. Al-Cu bimetal hammaddesinin çabuk bağlantılı elektrik anahtarlarında kullanımı uygundur.

Bakır, pirinç ve Al-Cu bimetalik ham maddelere uygulanan çekme ve sertlik testleri sonucunda Al-Cu bimetalik ham maddesinin mekanik mukavemetinin diğer iki ham maddeye göre düşük olduğu ve bu değerlerin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar yapılması önerilmektedir.

Yapılan bu çalışmada; bimetalik kompozitin hacimsel olarak %45'ini bakır, geriye kalan %55'lik hacmini ise alüminyum oluşturmaktadır. Farklı birleşim oranlarında oluşturulmuş bimetalik iletkenler ile çalışmalar yapılarak optimum birleşim oranının belirlenmesi yönünde çalışmalar yapılabilir. Bu farklı birleşim oranları denenirken; yüksek mekanik mukavemet, iyi elektriksel ve ısı iletkenlik ve son olarak da düşük maliyet temelinde çalışmalar yapılmalıdır.

Bu çalışmada alüminyum ve bakırdan oluşan kompozit iletken incelenmiş olup olumlu sonuç alınmıştır. Bundan sonraki çalışmalarda ürün gerekliliklerine göre; bakır-çelik, bakır-pirinç, alüminyum-fosfor bronz gibi farklı konfigürasyonlar denenerek incelemeler yapılabilir. Aynı zamanda alüminyum ve bakırın birlikte kullanıldığında ortaya çıkan galvanik korozyon etkileri de incelenmelidir.

KAYNAKÇA

- Abbasi, M., Taheri, A. K., & Salehi, M. T. (2001). Growth rate of intermetallic compounds in Al/Cu bimetal produced by cold roll welding process. *Journal of Alloys and Compounds*, 319(1-2), 233-241.
- Aksoy, H. (2018). *Vida bağlantılı klemenslerle yapılan kablo eklerinin sonlu elemanlar metodu kullanılarak elektrik-ısı- mekanik analizi* (Yüksek Lisans Tezi, Kütahya Dumlupınar Üniversitesi/Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Altındal, A. (2014). *Sürtünme kaynağında birleştirilen bimetalik parçaların mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Altınsoy, İ. (2009). *Alümina takviyeli bakır kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu* (Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi).
- Ansys 2021 (R2). [Bilgisayar Yazılımı] Workbench Malzeme Kütüphanesi. Ansys Inc.
- Arıcasoy, O. (2006). Kompozit sektör raporu. *İstanbul Ticaret Odası*, 4, 22.
- Badur, Ö. (1978). *Elektrik Kumanda Devreleri*. Ankara, Türkiye: Milli Eğitim Gençlik ve Spor Bakanlığı Yayınları.
- Baxter, L. K. (1996). *Capacitive Sensors: Design and Applications*. New York: John Wiley and Sons.
- Birecikli, B. (2016). Çift zigzag tip yapıştırma bağlantıların tasarımı ve mekanik analizi/The design and mechanical analysis of double zigzag type adhesive joints.
- Cilasun, N. S. (2013). *Karıştırmalı döküm yöntemi ile SiC takviyeli Al esaslı kompozit üretimi ve aşınma özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi).
- Çengel, Y., & Ghajar, A. (2014). *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications* (5. Baskı b.). New York: McGraw-Hill Education.
- Çetinsav, I. (2014). *Farklı malzemeler kullanılarak üretilmiş bimetalik malzemelerin mekanik özelliklerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).

- Deb, M., & Sen, D. (2014). Design of double toggle switching mechanisms. *Mechanism and Machine Theory*, 71, 163-190.
- Erek, H. B. (2016). *Toz Metalurjisi Yöntemi İle Üretilen AA7075 Alüminyum Alaşımına Ti Ve B4C İlavesinin Korozyon Ve Elektrik İletkenliğine Etkisinin İncelenmesi* (Doktora Tezi, 2016, Karabük Üniversitesi).
- Fu, Y., Zhang, Y. B., Jie, J. C., Svyarenko, K., Liang, C. H., & Li, T. J. (2017). Interfacial phase formation of Al-Cu bimetal by solid-liquid casting method. *China Foundry*, 14(3), 194-198.
- Goldberg, W. J. (1916). *ABD Patent No. US1248384A*.
- Griffiths, A. K., & Preston, K. R. (1992). Grade-12 students' misconceptions relating to fundamental characteristics of atoms and molecules. *Journal of research in Science Teaching*, 29(6), 611-628.
- Heaney, M. B. (2003). Electrical conductivity and resistivity. *Electrical measurement, signal processing, and displays*, 7(1).
- Honarpisheh, M., Asemabadi, M., & Sedighi, M. (2012). Investigation of annealing treatment on the interfacial properties of explosive-welded Al/Cu/Al multilayer. *Materials & Design*, 37, 122-127.
- IEC. (2005). *Switches for household and similar fixed electrical installations - Part 1: General requirements* (IEC 60669-1).
- IEC. (2021). *Thermocouples - Part 3: Extension and compensating cables - Tolerances and identification system* (IEC 60584-3)
- Jones, D. A. (1991). Electrical engineering: the backbone of society. *IEE Proceedings A (Science, Measurement and Technology)*, 138(1), 1-10.
- Karadağ, M. (2017). *B4c partikül takviyeli bakır matrisli elektrik iletken kompozit üretimi* (Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi).
- Kaya, A. (2011). Absorbsiyonlu soğutma sistemlerinin performans analizi ve optimizasyonu.
- Kent, J. (2010, October). New touch technology from time reversal acoustics: A history. In *2010 IEEE International Ultrasonics Symposium* (pp. 1173-1178). IEEE.
- Thejel, H. (2017). Electromagnetic-thermal coupled analysis of a brazing process by induction furnace using finite element method. *Journal of Engineering and Sustainable Development*, 21(01).
- Kolimas, Ł., Łapczyński, S., Szulborski, M., & Świetlik, M. (2020). Low voltage modular circuit breakers: FEM employment for modelling of arc chambers. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, (1).

- Korçak, M. (2005). *Seramik Takviyeli Çinko Metal Matrisli Kompozit Malzeme Üretimi ve Karakterizasyonu* (Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara).
- Kurt, H. (2010). Alüminyum-Alümina Kompozit Malzeme Üretiminde Karıştırma Tekniğinin Kompozitin Aşınma Davranışı Üzerine Etkilerinin Araştırılması. *Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi*.
- Küçük, O. (2004). Standardizasyon ve kalite: ISO 9000: 2000 kalite güvence sistemleri kalite el kitabı uygulaması ve örnek meslek standardı. Seçkin Yayıncılık.
- Lindmayer, M., Schaltgeräte-Grundlagen, A., & Wirkungsweise, D. (1987). 3300 Braunschweig.
- Mason, S. F., & Daybelge, U. (2013). *Bilimler tarihi*. Türk Tarih Kurumu.
- MEB. (2011). *Elektriğin Temel Esasları*. Ankara: MEB Yayınları
- Morris, W. (1979). *The American Heritage Dictionary Of The English Language* (Cilt Koleji Sürümü). Boston: Mifflin, Houghton.
- Murty, P. S. R. (2017). *Power systems analysis*. butterworth-heinemann.
- Müller, P. (2015). *Detektion von stromschwachen Störlichtbögen in Niederspannungsschaltanlagen*. IEH.
- Nalçacıoğlu, C. (2017). *Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen AA7075 alüminyum alaşımlarında T6 ısıtma işlem parametrelerinin elektrik iletkenliği ve korozyon özelliklerine etkisi* (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Nilsson, J., & Riedel, S. (2007). *Electric Circuits*. Prentice Hall.
- Oğuz, B. (1990). *Demirdışı metaller kaynağı: metalurji-uygulama*. Oerlikon.
- Omaç, Z., Polat, M., Öksüztepe, E., Yıldırım, M., Yakut, O., Eren, H., ... & Kürüm, H. (2018). Design, analysis, and control of in-wheel switched reluctance motor for electric vehicles. *Electrical Engineering*, 100(2), 865-876.
- Önal, T. (2013). Kompozit balsa sandviç yapıların dinamik özelliklerinin incelenmesi. Erzurum.
- Panasonic Corporation. (2011). *Panasonic Electric Works Kurumsal Kalite Standardı* (PEWTRSS-11). İstanbul: Panasonic Electric Works Dokümantasyon Yönetimi.
- Parvin, M. (1975). The effect of temperature on the fracture of polycarbonate. *Journal of Materials Science*, 10-11.
- Plesca, A., & Mihet-Popa, L. (2020). Thermal analysis of power rectifiers in steady-state conditions. *Energies*, 13(8), 1942.

- Qi, B., Zhao, X., Zhang, S., Huang, M., & Li, C. (2017). Measurement of the electric field strength in transformer oil under impulse voltage. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 24(2), 1256-1262.
- Relay and Switch Industry Association (RSIA). (2011). *Engineer's Relay Handbook, 5th edition*. Arlington.
- Beaty, H. W., & Fink, D. G. (2013). *Standard handbook for electrical engineers*. McGraw-Hill Education.
- Szulborski, M., Łapczyński, S., Kolimas, Ł., & Zalewski, D. (2021). Transient thermal analysis of the circuit breaker current path with the use of fea simulation. *Energies*, 14(9), 2359.
- TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası. (2016). *Alüminyum Raporu*.
- TSE. (2005). *Anahtarlar - Ev ve benzeri yerlerde kullanılan sabit elektrik tesisatları için - Bölüm 1: Genel özellikler (TS EN 60669-1.)*
- Turan, D. O. (2022). Şeyh Edebali Üniversitesi Makine ve İmalat Mühendisliği Isı Geçişi Ders Notları. Bilecik.
- Wąsek, S., Mróz, S., Stradomski, G., & Laber, K. B. (2013). The analysis of Al-Cu bimetallic bars bond layers joined by the explosive method. In *Solid State Phenomena* (Vol. 199, pp. 508-513). Trans Tech Publications Ltd.
- Wolisz, H. (2011). Investigation of the economic benefits of standardization for Siemens switch technology. *Berlin: TU Berlin*.
- Yanılmaz, M. (2011). *Poliüretan/polipirol Kompozit Nanolif, İnce Film Üretimi Ve Karakterizasyonu* (Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Yazicioğlu, İ. (2016). *Electric conductivity and resistivity of aluminum alloys for the application of electric counters* (Yüksek Lisans Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Url-1 < <https://ec.europa.eu> >, erişim tarihi 24.05.2022.
- Url-2 < <http://www.bayermaterialsciencenafta.com> >, erişim tarihi 09.03.2022.
- Url-3 < <http://www.copperinfo.co.uk> >, erişim tarihi 24.04.2022.
- Url-4 < <https://www.iec.ch> >, erişim tarihi 18.03.2022.
- Url-5 < <https://ewh.ieee.org> >, erişim tarihi 12.04.2022.
- Url-6 < <https://blogs.imf.org> >, erişim tarihi 22.02.2022.
- Url-7 < <https://books.google.com.tr> >, erişim tarihi 14.03.2022.
- Url-8 < <https://www.mechprod.com> >, erişim tarihi 26.01.2022.

Url-9 < <https://second.wiki.de> >, erişim tarihi 22.02.2022.

Url-10 < <https://restoringross.com> >, erişim tarihi 19.01.2022.

Url-11 < <https://heatonhistorygroup.org> >, erişim tarihi 27.04.2022.

Url-12 < <https://www.te.com> >, erişim tarihi 11.05.2022

Url-13 < www.metalurji.org.tr >, erişim tarihi 09.04.2022

Url-14 < <http://w3.bilecik.edu.tr/> >, erişim tarihi 14.04.2022

Url-15 < <https://www.westminster-abbey.org> >, erişim tarihi 01.05.2022

Url-16 < <https://www.sabic.com> >, erişim tarihi 03.05.2022

Url-17 < www.lme.com >, erişim tarihi 17.05.2022

