

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAKIR GİYDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM İLETKENLİ GEÇİT İZOLATÖRÜ
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İlim ERDEN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

EKİM 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BAKIR GİYDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM İLETKENLİ GEÇİT İZOLATÖRÜ
GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**İlim ERDEN
(504111020)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR

EKİM 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504111020 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **İlim ERDEN**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“BAKIR GİYDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM İLETKENLİ GEÇİT İZOLATÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Özcan KALENDERLİ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç Dr. Hasbi İSMAİLOĞLU
Kocaeli Üniversitesi

Teslim Tarihi : **12 Eylül 2013**
Savunma Tarihi : **23 Ekim 2013**

Aileme ve sevdiklerime,

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarımda çok büyük emeği geçen danışman hocam sayın Prof. Dr. Aydoğan ÖZDEMİR'e, her zaman yanımda olarak beni destekleyen ve yardımlarını esirgemeyen sevgili Araş.Gör. Dr. Suat İLHAN'a, İTÜ Fuat Külünk Yüksek Gerilim Laboratuvarı çalışanlarına, finansal desteklerinden dolayı Bilim Sanayi Ve Teknoloji Bakanlığı'na ve Kaleseramik A.Ş.'ye, son olarak da en kıymetli varlığım olan biricik aileme gönülden teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Ekim 2013

İlim ERDEN
(Elektrik-Elektronik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	2
1.2 Yayın Araştırması	2
2. DAF-30 TİPİ HARIÇTEN DAHİLE DUVAR TİPİ GEÇİT İZOLATÖRLERİ	5
3. GEÇİT İZOLATÖRLERİNDE ELEKTRİKSEL KAYIPLARIN HESAPLANMASI	9
4. GEÇİT İZOLATÖRLERİNDE ISI GEÇİŞİ VE ISIL MODEL	13
4.1 İletimle Isı Geçişi	13
4.2 Taşınım ile Isı Geçişi.....	14
4.3 Geçit İzolatörünün Isıl Modeli	15
4.3.1 Isıl kapasite	16
4.3.2 Isıl direnç.....	17
5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	21
5.1 Ön Deneyler	22
5.1.1 Bağlantı iletkenlerinin belirlenmesi	22
5.1.2 En fazla ısınan noktaların saptanması	26
5.1.3 Tij malzemelerinin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi	28
5.2 Mevcut Geçit İzolatörlerinin Isıl Deneyleri	29
5.2.1 Sıcaklık artışı deneyleri.....	29
5.2.1.1 1000 A geçit izolatörleri için sıcaklık artışı deneyleri	31
5.2.1.2 1250 A geçit izolatörleri için sıcaklık artışı deneyleri	33
5.2.2 Isıl kısa süreli akıma dayanımının doğrulanması deneyi	35
5.3 Isıl Performansın İyileştirilmesine Yönelik Deneysel Çalışmalar	38
5.3.1 İletken malzemesinin incelenmesi	38
5.3.1.1 Alüminyum iletken.....	38
5.3.1.2 Bakır iletken	39
5.3.1.3 Bakır giydirilmiş alüminyum iletken	41
5.3.2 Flanştaki aşırı ısınmanın incelenmesi	43
5.3.2.1 Flanştaki aşırı ısınmanın kaynağı.....	44
5.3.2.2 Flanş sıcaklığının tij sıcaklığına etkisinin incelenmesi.....	45
5.3.3 Bağlantı pullarının incelenmesi	48
5.3.4 Porselenin etkisinin incelenmesi.....	49
5.3.4.1 Porselen varlığının tij ve somun sıcaklığına etkisi.....	49

5.3.4.2 Farklı ısı iletkenlikli porselen malzemesinin kullanılması.....	50
6. BENZETİM TEMELLİ ÇALIŞMALAR	53
6.1 Akışkan Fiziği	53
6.2 Benzetim Çalışmaları İçin Parametrelerinin Belirlenmesi	57
6.2.1 Malzeme özellikleri.....	57
6.2.2 Isı transfer katsayısı.....	58
6.3 Sıcaklık dağılımlarının ve ısı yoğunlaşmaların belirlenmesi	59
6.3.1 Isıl kısa süreli akıma dayanımın doğrulanması analizlerinin benzetim yoluyla yapılması	64
6.4 Isıl Performansın İyileştirilmesine Yönelik Benzetim Tabanlı Çalışmalar.....	65
6.4.1 İletken malzemesinin incelenmesi	65
6.4.1.1 Alüminyum iletkende deri etkisi	65
6.4.1.2 Bakır iletkende deri etkisi	68
6.4.1.3 Bakır giydirilmiş alüminyum iletkende deri etkisi.....	69
6.4.2 Flanştaki aşırı ısınmanın incelenmesi	72
6.4.2.1 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatöründe sıcaklık dağılımı	73
6.4.2.2 1250 A alüminyum tij’li geçit izolatöründe sıcaklık dağılımı	75
6.4.3 Porselenin ısı iletkenlik katsayısının incelenmesi.....	78
6.4.3.1 Döküm flanşlı 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatörü.....	78
6.4.3.2 Alüminyum flanşlı 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatörü.....	79
6.4.3.3 Döküm flanşlı 1250 A alüminyum tij’li geçit izolatörü.....	80
6.4.3.4 Alüminyum flanşlı 1250 A alüminyum tij’li geçit izolatörü.....	81
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	83
KAYNAKLAR.....	89
ÖZGEÇMİŞ.....	91

KISALTMALAR

IEC	: International Electrotechnical Commission
AC	: Alternating Current
DC	: Direct Current
OG	: Orta Gerilim
TEİAŞ	: Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
THB	: Toplam Harmonik Bozulma

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 3.1 : Geçit izolatörlerinde kullanılan iletken malzemelerin 20 °C'daki öz dirençleri ve sıcaklık katsayıları.	10
Çizelge 3.2 : Şebeke gerilimindeki harmonik düzeyleri.	12
Çizelge 4.1 : Isı transfer katsayısının (h) tipik değerleri.	15
Çizelge 4.2 : Isıl devreler ile elektrik devrelerinin karşılaştırılması.	16
Çizelge 5.1 : 1020 A'de denen alüminyum baraların kararlı hal sıcaklıkları.	25
Çizelge 5.2 : 1275 A'de denen alüminyum baraların kararlı hal sıcaklıkları.	26
Çizelge 5.3 : Ölçme noktalarının kararlı hal sıcaklık değerleri.	27
Çizelge 5.4 : Çeşitli alüminyum ve bakır tij'lerin ölçülen dirençleri ve hesaplanan büyüklükler.	29
Çizelge 5.5 : 1000 A, saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.	32
Çizelge 5.6 : 1000 A, saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.	32
Çizelge 5.7 : 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.	33
Çizelge 5.8 : 1000 A, saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.	33
Çizelge 5.9 : 1000 A, saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.	34
Çizelge 5.10 : 1250 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.	34
Çizelge 5.11 : 1250 A içi boş alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.	35
Çizelge 5.12 : 1250 A içi boş alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.	35
Çizelge 5.13 : 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.	36
Çizelge 5.14 : 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.	36
Çizelge 5.15 : 1000 A saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.	37
Çizelge 5.16 : 1000 A saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.	37
Çizelge 5.17 : 1250 A, 35 mm çaplı alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.	39
Çizelge 5.18 : 1250 A, 35 mm çaplı alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.	39
Çizelge 5.19 : 1000 A, 32 mm çaplı bakır tij'li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.	40
Çizelge 5.20 : 1000 A, 32 mm çaplı bakır tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.	40

Çizelge 5.21 : 1250 A, 35 mm çaplı bakır tij’li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.....	40
Çizelge 5.22 : 1000 A, 32 mm çaplı bakır tij’li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.....	40
Çizelge 5.23 : 1250 A, 38 mm çaplı bakır tij’li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.....	41
Çizelge 5.24 : 1250 A, 38 mm çaplı bakır tij’li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.....	41
Çizelge 5.25 : 1250 A, 35 mm çaplı bakır giydirilmiş alüminyum tij’li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.....	42
Çizelge 5.26 : 1000 A, 32 mm çaplı bakır tij’li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.....	42
Çizelge 5.27 : 32 mm çaplı geçit izolatörünün tij malzemesinin değişimiyle krtitik noktarda elde edilen % azalma miktarları.....	42
Çizelge 5.28 : 35 mm çaplı geçit izolatörünün tij malzemesinin değişimiyle kritik noktalarda elde edilen % azalma miktarları.....	43
Çizelge 5.29 : 38 mm çaplı geçit izolatörünün tij malzemesinin değişimiyle kritik noktalarda elde edilen % azalma miktarları.....	43
Çizelge 5.30 : 1000 A, 32 mm çaplı alüminyum tij’li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.....	46
Çizelge 5.31 : 1000A, 32 mm çaplı alüminyum tij’li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.....	46
Çizelge 5.32 : 1000 A, 32 mm çaplı alüminyum tij’li flanşsız geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.....	46
Çizelge 5.33 : 1000A, 32 mm çaplı alüminyum tij’li flanşsız geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.....	46
Çizelge 5.34 : 1000 A normal alüminyum tij’li geçit izolatörü için flanşlı ve flanşsız olarak ölçülen sıcaklık artış değerleri.....	47
Çizelge 5.35 : 1000 A alüminyum tijle flanşlı ve flanşsız olarak yapılan sıcaklık artışı deneylerinin hesaplama sonuçları.....	47
Çizelge 5.36 : 1000 A, 32 mm çaplı bakır tij’li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.....	48
Çizelge 5.37 : Kritik noktaların sıcaklık artış değerleri.....	50
Çizelge 5.38 : Mevcut ve yüksek alüminalı porselene sahip 1000 A geçit izolatörlerinin sıcaklık artışı kıyaslaması.....	51
Çizelge 6.1 : Bazı akışkanların dinamik vizkozite değerleri (1 atm, 20 °C).....	54
Çizelge 6.2 : Sıklıkla kullanılan akışkanların Prandtl sayıları.....	54
Çizelge 6.3 : Benzetim programında kullanılan malzeme özellikleri.....	58
Çizelge 6.4 : Geçit izolatörlerine ilişkin ortalama karakteristik uzunluklar.....	59
Çizelge 6.5 : Rayleigh sayılarına karşılık C katsayıları.....	59
Çizelge 6.6 : Rayleigh sayılarına karşılık n katsayıları.....	59
Çizelge 6.7 : Şekil 5.9'da belirtilen noktalarından alınan sıcaklık değerleri.....	60
Çizelge 6.8 : 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatörünün sıcaklık artışı analizi için kritik noktaların sıcaklık ve sıcaklık artış değerleri.....	62
Çizelge 6.9 : 1000 A saflığı yüksek alüminyum tij’li geçit izolatörünün sıcaklık ve sıcaklık artışı değerleri.....	63
Çizelge 6.10 : 1250 A alüminyum Tij’li geçit izolatörü için kararlı hal sıcaklık ve sıcaklık artışları.....	63
Çizelge 6.11 : 1250 A içi boş alüminyum tij’li geçit izolatörünün sıcaklık ve sıcaklık artışları.....	64

Çizelge 6.12 : 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatörü için kritik noktala sıcaklık ve sıcaklık artışları.	64
Çizelge 6.13 : 1000 A saflığı yüksek alüminyum tij’li geçit izolatörü için sıcaklık ve sıcaklık artışları	64
Çizelge 6.14 : 1250 A normal alüminyum tij’li geçit izolatörü için sıcaklık ve sıcaklık artışları	65
Çizelge 6.15 : 1250 A içi boş alüminyum tij’li geçit izolatörü için sıcaklık ve sıcaklık artışları	65
Çizelge 6.16 : 16 mm yarıçaplı alüminyum iletken için, bakır giydirme kalınlıklarına göre aktif güç kayıpları ve kayıplardaki bağıl değişimler.	71
Çizelge 6.17 : 16 mm alüminyum iletken için bakır giydirme kalınlıklarına göre kritik nokta sıcaklıkları ve sıcaklık azalmaları.	71
Çizelge 6.18 : 19 mm yarıçaplı alüminyum iletken için, bakır giydirme kalınlıklarına göre aktif güç kayıpları ve kayıplardaki bağıl azalmalar.	72
Çizelge 6.19 : Bakır giydirme oranlarına göre kritik noktasıcaklıkları.	72
Çizelge 6.20 : Kritik noktalardaki ve geçit izolatörünün çeşitli noktalarındaki sıcaklık değerleri.	74
Çizelge 6.21 : Farklı flanş malzemeleri için, en sıcak noktada sıcaklık artışları.....	75
Çizelge 6.22 : Kritik noktalardaki ve geçit izolatörünün çeşitli noktalarındaki sıcaklık değerleri.	77
Çizelge 6.23 : En yüksek sıcaklıkların ortam sıcaklığına göre artış miktarları.....	77
Çizelge 6.24 : Döküm flanşlı 1000 A alüminyumtij’li geçit izolatörü için, porselen ısı iletkenliğinin sıcaklığa etkisi.	78
Çizelge 6.25 : Farklı ısı iletkenlikli porselene sahip 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatörü için en yüksek sıcaklıklar ve sıcaklık artış miktarları.	79
Çizelge 6.26 : Alüminyum flanşlı 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatörü için kararlı halde kritik noktalardan ve çeşitli kısımlardan elde edilen sıcaklık değerleri.	79
Çizelge 6.27 : Değişik ısı iletkenlik katsayılarına göre ortam sıcaklığına kıyasla sıcaklık artış miktarları.	80
Çizelge 6.28 : 1000 A saflığı yüksek alüminyum tij’li geçit izolatörünün sıcaklık ve sıcaklık artışı değerleri.	80
Çizelge 6.29 : Döküm flanşlı 1250 A alüminyum tij’li geçit izolatöründe farklı ısı iletkenlikli porselenler için en yüksek sıcaklıklar ve bu sıcaklıkların ortam sıcaklığına göre farkları.....	81
Çizelge 6.30 : Alüminyum flanşlı 1250 A alüminyum tij’li geçit izolatöründe, farklı ısı iletkenlikli porselenler için kritik noktala sıcaklıkları.....	82
Çizelge 6.31 : Alüminyum flanşlı 1250 A alüminyum tij’li geçit izolatöründe, farklı ısı iletkenlikli porselenler için en yüksek sıcaklıklar ve sıcaklık artış miktarları.	82

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Saflığı yüksek alüminyum tij'li DAF-30 tipi 1000 A geçit izolatörü..	5
Şekil 2.2 : Normal alüminyum tij'li 1000 A geçit izolatörünün teknik resmi (Çanakkale A.Ş.'nin izniyle)..	6
Şekil 2.3 : Normal alüminyum tij'li DAF-30 tipi 1250 A geçit izolatörü.....	7
Şekil 2.4 : Normal alüminyum tij'li DAF-30 tipi 1250 A geçit izolatörünün teknik resmi (Çanakkale A.Ş.'nin izniyle).....	8
Şekil 3.1 : Silindirsel bir iletkenin kesiti ve deri kalınlığı..	11
Şekil 3.2 : Gerilim harmoniklerini ölçmek için kullanılan harmonik analizörü.....	12
Şekil 4.1 : Bir duvar içerisinde meydana gelen iletimle ısı geçişi.....	14
Şekil 4.2 : Geçit izolatörünün ısı modeli.	16
Şekil 4.3 : Elektriksel direnç ile ısı direnç arasındaki benzerlik..	17
Şekil 4.4 : Geçit izolatörünün kararlı halde ısı dirençlerle gösterimi.....	19
Şekil 5.1 : Deneylerde kullanılan sıcaklık toplama birimi..	22
Şekil 5.2 : 1000 A ve 1250 A deneylerinde kullanılacak tij, pul ve somun malzemeleri..	23
Şekil 5.3 : Deneylerde kullanılan varyak.....	23
Şekil 5.4 : Deneylerde kullanılan ve varyak ile kontrol edilen akım transformatörü..	23
Şekil 5.5 : Alternatif akım ölçmelerinde kullanılan pens ampermetre..	24
Şekil 5.6 : 1000 A geçirilecek olan bağlantı baraları.....	24
Şekil 5.7 : Bağlantı iletkenlerinin belirlenmesi için kurulan deney düzeneği..	25
Şekil 5.8 : 1250 A deneylerinde kullanılan alüminyum bağlantı baraları..	26
Şekil 5.9 : Sıcaklık dağılımının belirlenmesi için oluşturulan deney düzeneği ve sıcaklık ölçüm noktaları..	27
Şekil 5.10 : Aşırı ısınan nokta sıcaklıklarının zamanla değişimi.....	27
Şekil 5.11 : Direnç ölçüm cihazı ve ölçü düzeni..	29
Şekil 5.12 : 1000 A saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü ile kurulan sıcaklık artış deney düzeneği..	31
Şekil 5.13 : Sıcaklık ölçüm noktaları.....	31
Şekil 5.14 : 1000 A, saflığı yüksek alüminyum tij'li izolatör deneyinde, kritik nokta sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi..	32
Şekil 5.15 : 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatörü için kurulan deney düzeneği... ..	34
Şekil 5.16 : 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörünün ısı kısa süreli akıma dayanımının doğrulanması deneyi için kurulan deney hücresi..	36
Şekil 5.17 : 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörünün ısı kısa süreli akıma dayanımının doğrulanması deneyi için kritik noktalardan alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi..	37
Şekil 5.18 : Porseleni çıkarılmış 1000 A'lık normal alüminyum tijli geçit izolatörünün deney düzeneği.....	44
Şekil 5.19 : İki parçalı flanş.....	45

Şekil 5.20 : Aynı düzleme dizilmiş alüminyum halka, 2 parçalı döküm flanş ve demir halkadan oluşan deney düzeneği.	45
Şekil 5.21 : Tüm deney boyunca (birinci ve ikinci kararlı hal dahil olmak üzere) kritik noktalardan alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi. ...	47
Şekil 5.22 : Sıcaklık artışı deneyi boyunca kritik nokta sıcaklıklarının zamanla değişimi.	49
Şekil 6.1 : Laminar ve türbülanslı akışkan akışı.	55
Şekil 6.2 : Reynold sayısının hesaplanmasında kullanılan büyüklükler.	55
Şekil 6.3 : Çeşitli geometrilere sahip şekillerin karakteristik uzunlukları (L_c).	57
Şekil 6.4 : 1000 A geçit izolatörü için tanımlanan karakteristik uzunluklar (D_1 , D_2 , D_3 , D_4).	58
Şekil 6.5 : 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörün için malzeme tanımlanması.	59
Şekil 6.6 : 28705 adet elemene bölünmüş ağa sahip, eksenel simetrik 1000 A geçit izolatörü.	60
Şekil 6.7 : 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörüne ait sıcaklık dağılımı. .	60
Şekil 6.8 : Deneysel ve benzetim ile belirlenen sıcaklıkların karşılaştırılması.	61
Şekil 6.9 : Tij boyunca sıcaklık değerleri.	61
Şekil 6.10 : 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörünün sıcaklık dağılımı.	62
Şekil 6.11 : 1275 A alüminyum tij'li geçit izolatörünün sıcaklık dağılımı.	63
Şekil 6.12 : Ağa bölünmüş 16 mm yarıçaplı alüminyum iletken kesiti.	66
Şekil 6.13 : 16 mm yarıçaplı alüminyum iletkenin enine kesitinde 1020 A geçişine karşılık oluşan akım yoğunluğu.	66
Şekil 6.14 : 16 mm yarıçaplı alüminyum iletkenin kesitinde oluşan aktif güç kayıpları.	67
Şekil 6.15 : Alüminyum iletken için manyetik alanın şiddetinin değişimi.	67
Şekil 6.16 : 16 mm yarıçaplı alüminyum iletkeninde akım yoğunluğunun yarıçap boyunca değişimi.	67
Şekil 6.17 : 16 mm yarıçaplı bakır iletken kesitindeki akım yoğunluğu.	68
Şekil 6.18 : 16 mm yarıçaplı bakır iletken için akım yoğunluğunun yarıçap boyunca değişimi.	68
Şekil 6.19 : 16 mm yarıçaplı bakır ve alüminyum iletkenler için yarıçap boyunca akım yoğunluklarının değişimi.	69
Şekil 6.20 : Bakır giydirilmiş alüminyum iletken geometrisi.	70
Şekil 6.21 : 16 mm yarıçaplı silindrsel iletkenin farklı kalınlıklarda bakır ile kaplanması durumlarında akım yoğunluğundaki değişim.	70
Şekil 6.22 : 1000 A alüminyum tij'li ve alüminyum flanşlı geçit izolatörü için sıcaklık dağılımı.	73
Şekil 6.23 : Flanşsız 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörü için sıcaklık dağılımı.	74
Şekil 6.24 : Döküm flanşlı (manyetik flanşlı), alüminyum flanşlı ve flanşsız 1000 A geçit izolatörü sıcaklık değişimleri.	74
Şekil 6.25 : Alüminyum flanşlı 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatörü için sıcaklık dağılımı.	76
Şekil 6.26 : Flanşsız 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatörü için sıcaklık dağılımı.	76
Şekil 6.27 : Döküm flanşlı (manyetik flanşlı), alüminyum flanşlı ve flanşsız 1250 A geçit izolatörü yüzeyinde sıcaklık değişimleri.	77
Şekil 6.28 : Porselenin ısı iletkenlik katsayısının ısı dağılıma etkisi.	78
Şekil 6.29 : Kararlı halde, porselen malzemesindeki ısı iletkenlik katsayısının değişimine göre porselen yüzeyi boyunca elde edilen sıcaklık dağılımı.	79

- Şekil 6.30 :** Döküm flanşlı 1250 A alüminyum tij’li geçit izolatöründe farklı ısı iletkenlikli porselenler için izolatör yüzeyi boyunca sıcaklık dağılımı.. 81
- Şekil 6.31 :** Kararlı halde, porselen malzemesindeki ısı iletkenlik katsayısının değişimine göre porselen yüzeyi boyunca elde edilen sıcaklık dağılımı.
..... 82

BAKIR GİYDİRİLMİŞ ALÜMİNYUM İLETKENLİ GEÇİT İZOLATÖRÜ GELİŞTİRİLMESİ

ÖZET

Geçit izolatörleri, elektrik enerji sistemlerinde, yüksek gerilimlerin bir ortamdan diğer bir ortama geçişini sağlarlar. Geçit izolatörleri tij olarak da bilinen bir iletken, etrafında, ana yalıtım malzemesi ve bir dış iletken (flanş) oluşur. Geçit izolatörlerinde ana yalıtım malzemesi olarak porselen veya kompozit malzemeler gibi yüksek dielektrik dayanıma sahip yalıtkanlar kullanılır.

DAF-30 olarak adlandırılan ve 400 A, 630 A, 1000 A ve 1250 A anma akımlı duvar tipi geçit izolatörleri, 30 kV işletme geriliminde kullanılırlar. Gelecekte ise 1600 A, 2000 A, 2500 A ve 3150 A'de çalışan DAF-30 tipi geçit izolatörlerinin üretilmesi düşünülmektedir. DAF-30 tipi geçit izolatörlerinin ana yalıtım malzemesi porselendir. Tij malzemeleri olarak çoğunlukla alüminyum kullanılmaktadır. Ülkemiz orta gerilim dağıtım sisteminde kullanılan 1000 A ve 1250 A anma akımlı geçit izolatörlerinin, ısı performanslarında bazı sorunlar olduğu ve aşırı ısındıkları geçmiş deneyimlerden bilinmektedir. Bu çalışmanın amacı, söz konusu ısı sorunlarının deneysel çalışmalarla ve benzetimlerle net olarak ortaya konulması ve çözüm önerileri geliştirilmesidir. Bu amaçla çeşitli deneysel ve benzetim tabanlı çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

Önce ön deneyler gerçekleştirilerek, sağlıklı bir ısı deney için gerekli bağlantı iletkenlerinin boyutları belirlenmiştir. Bu iletkenler kullanılarak, DAF-30 1000 A ve 1250 A geçit izolatörlerinde, anma akımlarında, "sıcaklık artışı deneyi" ve "ısı kısa süreli akımın doğrulanması deneyi"ne tabi tutularak, ısı yoğunlaşmalarının olduğu noktalar; bu kritik noktaların sıcaklıkları ve sıcaklık artışları deneysel olarak belirlenmiştir. Yapılan deneylerde, 1000 A ve 1250 A geçit izolatörlerinin her ikisi için de en fazla ısınan noktanın flanşın çevrelediği tij ortası kısım ve flanşın kendisi olduğu görülmüştür. Manyetik girdap akımları sonucu aşırı ısınan flanşın, ek bir ısı kaynağı olarak davrandığı ve tüm iletken ve özellikle de iletkenin orta kısmında aşırı ısı yoğunlaşmalarının oluşmasına neden olduğu görülmüştür. Flanşa ek olarak, geçit izolatörlerinde kullanılan bağlantı pullarının da birer noktasal ısı kaynağı gibi davranarak yerel sıcaklık artışları meydana getirdikleri anlaşılmıştır. Deney sonuçları, ısı kısa süreli akıma dayanımının doğrulanması deneyi konusunda bir sorun olmadığını göstermiştir. 1000 A ürünlerin sıcaklık artışı deneyinde ise, tij ortası ve flanş sıcaklıklarının öngörülen sınırların üzerinde olduğu, tij üzerindeki diğer bazı kritik noktalardaki sıcaklık artışlarının ise sınır değerlere oldukça yakın olduğu görülmüştür. 1250 A ürünlerde, belirtilen sorunların daha ciddi boyutlarda olduğu anlaşılmıştır.

Deney sonuçları dikkate alınarak, ısı yoğunlaşmaları giderebilmek amacıyla, öncelikle flanş ve pullardaki aşırı ısınmaların nedenleri araştırılmış ve bu ısınmaların iletken sıcaklıklarına etkisi irdelenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar ciddi bir ısı kaynak olan flanş ve noktasal bir ısı kaynak olarak davranan pulların manyetik

olmayan malzemeden (örneğin alüminyum) yapılması veya flanşın 2 parçalı olarak imal edilmesi ile, flanş sıcaklığının önemli ölçüde azalacağı ve bunun yanında pul ve iletken sıcaklıklarında da ciddi azalmaların olacağını göstermiştir. Böyle bir önlemin, 1000 A ürünlerdeki ısı sorunları gidereceği ve fakat 1250 A ürünlerde iyileşme sağlamasına karşın, yetersiz kalacağı görülmüştür. Bu nedenle, deri etkisi de dikkate alınarak, mevcut alüminyum iletkenlerin 2 mm mertebesinde bakır kaplanması durumuna ilişkin deneyler yapılmış ve bu deneyler, alüminyum ve flanş önlemleri ile birlikte , 1250 A ürünler için ısı sorunlarının giderilebileceği sonucunu göstermiştir. Son olarak, porselenin ısı iletkenlik katsayısının iyileştirilmesi ile, ısı sorunlarda iyileşme sağlanıp sağlanamayacağı konusunda deneyler yapılmış ve bir miktar katkı sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Deneyisel çalışmalara ek olarak, çok sayıda benzetim tabanlı çalışma gerçekleştirilmiştir. Benzetim programına, hem gerçek ölçüm değerlerinden elde edilen parametreler (iletkenlik), hem de deri etkisinden gelen katsayılar birleştirilerek girilmiştir. Öncelikle benzetim parametreleri uygun şekilde tanımlanarak, deney ve benzetim sonuçları arasındaki uyum sağlanmıştır. Benzetim çalışmaları da deneyisel çalışmalara benzer sonuçlar vermiş ve yukarıda belirtilen önlemlerle 1000 A ve 1250 A ürünlerde önemli ısı iyileştirmeler sağlanabileceği görülmüştür. Deneyisel olarak doğrulanmamasına rağmen, benzetimlerle ortaya konan bir diğer önemli bulgu ise, tij-porselen arası hava aralığı değiştirilerek ısı performansın artırılabilirliğidir. Bu tür bir değişiklik, döküm flanşlı ürünlerde dahi, flanş sıcaklığı hariç, tüm kritik sıcaklıklarda önemli ölçüde azalma sağlanabileceği görülmüştür.

Deneyisel ve benzetim tabanlı çalışmalar birlikte değerlendirildiğinde; 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörlerinde flanşın döküm yerine alüminyumdan yapılması veya 2 parçalı imal edilmesi, pulların da benzer şekilde alüminyumdan yapılması ve kullanılan 1,5 W/m²K ısı iletkenlik katsayılı porselen yerine daha yüksek iletkenlikli (yüksek alüminalı) porselen kullanılması ile, ısı sorunları giderilebilecek ve standartlarda öngörülen en yüksek sıcaklık ve en yüksek sıcaklık artışı koşulları rahatlıkla sağlanacaktır. 1250 A'lık ürünlerde ise, 1000 A ürünlerdeki önlemlere ek olarak, alüminyum iletken yerine 2 mm mertebesinde bakır kaplı alüminyum iletken kullanılması ısı sorunları giderebilecek ve standartta öngörülen en yüksek sıcaklık ve en yüksek sıcaklık artışı koşullarını rahatlıkla sağlayacaktır.

DEVELOPMENT OF WALL TYPE BUSHINGS WITH COPPER EXTRUDED ALUMINUM CONDUCTOR

SUMMARY

High voltage bushings provide transferring high voltages from one insulating medium to another one. Typical examples are transformer bushings and wall-type bushings. They are one of the critical components in electric power transmission and distribution systems.

DAF-30 type bushings are categorized as indoor-outdoor wall-type bushings in IEC 60137 standard. DAF-30 is the general name of 30 kV distribution system wall type porcelain bushing family. It includes several current levels such as 400, 600, 1000 and 1250 A. Higher current ratings of 1600, 2000, 2500 and 3150 A are expected taken into service in the future.

In addition to classical electrical and mechanical stresses, bushings are additionally subjected to thermal stresses because of heavy currents flowing through their conductors. Their thermal performance is verified by several type tests in accordance with an international standard IEC 60137. Past laboratory experience showed that 1000 A and 1250 A units had some problems and insufficiencies regarding their thermal performances. 1000 A bushings showed high temperature rises at some critical regions, which were so close to upper thermal limits. On the other hand, 1250 A units did not fulfill the temperature rise limits at all. This study is therefore devoted to the improvement of thermal performances of 1000 A and 1250 A DAF-30 wall-type bushings.

The aim of the study is to determine heat distribution and heat concentration on the surface and inside the bushing as well as to propose possible solutions for the improvement of the thermal performance. At this initial phase of the study, we have concentrated on the heat distribution problems. First, critical regions where the temperatures and/or temperature rises were greater than the remaining parts of the bushings have been determined by two-dimensional simulations and by laboratory tests. At the second phase of the study, we intended to develop some solutions to alleviate those thermal problems.

Initial efforts were devoted to the determination of the adequate connection bars for the test assembly in order not to affect the heat distribution of the system. Following those pre-tests, 1000 A and 1250 A bushings were subjected to "temperature rise test" and "verification of thermal short-time current withstand test" in accordance with IEC 60137. Rated currents were applied to the bushings and temperature measurements were recorded up to steady-state conditions. The results have shown that the mid point of conductor just under the flange and the flange itself were the most critical regions from the point of high temperatures and/or high temperature rises. High temperatures on the flange were the result of eddy currents flowing

through its surface. Therefore, the flange was an additional heat source for the remaining part of the system. Mid-point of the conductor was greatly effected from high flange temperatures due to the high thermal resistance of the air between the porcelain and the conductor. In addition, magnetic washers were the point heat sources which were effective locally at their vicinity. On the other hand, thermal short-time current withstand test was found not to be critical creating any problems. When the temperatures and temperature rises were compared with the upper limits specified in IEC 60137; for 1000 A bushings, it was seen that the temperatures on the flange surface and at the mid-point of the conductor were higher than the limits. Moreover, temperature rises at some critical points were near to the specified temperature limits. The problems were more critical for 1250 A units.

The second phase of experimental studies were devoted to alleviation of thermal problems by several revisions either on the conductive parts or on the insulating parts of the bushings. It was clear that, first of all overheating of the flange should be avoided. Therefore, either a nonmagnetic material (i.e. aluminum) should be used or the flange should be seperated into two pieces by inserting an insulator between them. Both alternatives were seen to be effective both for the flange itself and for conductor mid-point and the other critical regions which were effected from high temperature of the flange. On the other hand, improvements of porcelain thermal conductivity was seen to be less effective on the temperatures and temperature rises of the critical points.

Test results have shown that elimination of additional heat sources; i.e. the flange and the washer, by replacing their magnetic material with non-magnetic ones (preferably aluminum) would solve the thermal problems for 1000 A units. However, those actions were seen to be not sufficient for 1250 A ones. Therefore additional studies regarding the conductor material had to be performed. Due to the current concentration phenomena of skin effect, significant amount of the current were preferred to flow through the skin depth of the conductor. Therefore, it was concluded that, copper extruded aluminum conductors would improve the heat distribution of the system since they will show less electrical resistance against the flowing current. In order to verify this idea, we have used copper extruded aluminum bars where the outer 1,75 mm of 35 mm total diameter was copper. Test results showed that, such an implementation provided a temperature decrease of 5% at the critical points. Test results also showed that the usage of copper extruded aluminium conductors in addition to the revisions stated for 1000 A will be satisfactory to comply the conditions stated in the standard.

Following the experimental efforts, we have made similar studies by using Comsol software. First we tried to determine the values of the parameters so that there would be a concordance between the test results and the simulations. In order to simplify the computational efforts, only heat conduction was taken into account and convection phenomena for the air layer between the porcelain housing and the conductor was ignored. Moreover, only the flange was modelled as an heat source and the washers were not included. That is why there was a difference of 5 °C between the experimental temperatures and the ones obtained from the simulations. Simulation studies also showed that the most critical part was the conductor mid-point, which was due to high thermal resistance of the air layer between the porcelain housing and the conductor. The two terminals of the conductor, nuts and the washers were the other critical points where the temperetures were gradually higher than the other parts.

Similar studies were carried out to improve the thermal performance of the system. Simulation results have shown that non-magnetic flanges and improved thermal conductivity of porcelain material would provide satisfactory improvements for 1000 A bushings. However, additional revisions were required for 1250 A ones. For 1000 A bushings, 2 mm and 3 mm copper coatings of aluminium conductors were found to decrease the conductor mid-point temperatures by 13% and 17,4%, respectively. 2 mm copper coating in addition to revisions stated for 1000 A were found to provide satisfactory improvements for 1250 A units.

Another important result derived from simulation studies was the fact that the decrease in the thickness of the air layer between the porcelain housing and the conductor would provide significant improvements for the high temperatures at critical points. However, this was not verified by laboratory tests and thermal expansion problems were not taken into account so far. Therefore, these points need a further study. In addition, filling the space between the conductor and the porcelain housing will better be analysed.

The results of experimental and the simulation based studies can be summarized as:

Using non magnetic flanges, washers and improved porcelain material having a thermal conductivity of $2,5 \text{ W/m}^0\text{K}$ will solve the thermal problems of 1000 A DAF-30 type bushings. Additional copper coated aluminum conductor usage is required for 1250 A units. 2 mm of coating thickness can provide satisfactory results. Finally, some revisions on the porcelain design will bring some economical benefits if it is performed together with the thermal studies.

1. GİRİŞ

Yüksek gerilim izolatörleri, elektrik tesislerinde farklı potansiyellerdeki kısımları elektriksel olarak birbirinden ve topraktan yalıtırları gibi, mekanik açıdan da bağlantı yapılmasını sağlarlar. Kullanım amacı bakımından hava hattı izolatörleri, mesnet izolatörleri ve geçit izolatörleri olarak sınıflandırılırlar.

Geçit izolatörleri yüksek gerilimlerin bir ortamdan diğeri bir ortama güvenli bir şekilde iletilmesi için kullanılırlar. En tipik örnekleri transformatör tipi (genelde buşing olarak isimlendirilir) ve duvar tipi geçit izolatörleridir. Bu tez çalışmasında incelenen geçit izolatörleri, orta gerilimde kullanılan ve DAF-30 ailesi olarak bilinen 30 kV'luk duvar tipi geçit izolatörleridir. Bu izolatörler, elektriksel ve mekanik zorlanmalara ek olarak, akım taşıyıcı iletkenlerdeki kayıplar nedeniyle ısı olarak da zorlanırlar.

Yukarıda belirtilen zorlanmalara karşı gerekli dayanımı sağlamak üzere, geçit izolatörleri IEC 60137 [1] uluslararası standardına göre tip deneylerine dayanacak şekilde tasarlanırlar. Ayrıca Türkiye piyasası için, Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi (TEİAŞ) şartnamesini [2] de sağlamak zorundadırlar. 30 kV orta gerilim düzeyinde 400 A, 600 A, 1000 A ve 1250 A'lık 4 farklı akımda duvar tipi geçit izolatörü üretilmekte ve kullanılmaktadır. Elektrik enerjisine olan talebin artışına bağlı olarak, yakın gelecekte 1600 A, 2000 A, 2500 A ve 3150 A gibi yüksek akımlı geçit izolatörlerinin kullanılması beklenmektedir.

DAF-30 ailesinin farklı anma akımlı tüm bireyleri, aynı yalıtım düzeyinde olmalarına karşın; yüksek akımlı olanlarda (1000 A ve 1250 A) ısı açısından bazı sorunlar ortaya çıkmaktadır. Isıl performansın yeterliliği IEC 60137 standardında yer alan "Sıcaklık Artış Deneyi" ve "Isıl Kısa Süreli Akıma Dayanımın Doğrulanması Deneyi" kapsamında değerlendirilir. Geçmişte yapılan laboratuvar çalışmalarında, 1000 A'lık geçit izolatörlerinin "Sıcaklık Artış Deneyi"nde öngörülen sıcaklık sınırlarına yakın olduğu, 1250 A'lık geçit izolatörlerinin ise sıcaklık artışı koşullarını sağlamadıkları görülmüştür. Diğer yandan 1000 A ve 1250 A'lık geçit izolatörlerinin, "Isıl Kısa

Sürekli Akıma Dayanımın Doğrulanması Deneyi”nin sıcaklık koşulunu sağladıkları görülmüştür.

Bu ısı sorunlarının, mevcut ürünlerde kullanılan alüminyum iletkenlerin yetersiz iletkenlikleri ve/veya bazı tasarım yanlışlıklarından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

1.1 Tezin Amacı

Tezin amacı, silindrisel kesitli alüminyum iletken yerine, bakır giydirilmiş silindrisel kesitli alüminyum iletken kullanımı ile yeterli ısı performansına sahip DAF-30 tipinde 1000 A ve 1250 A duvar tipi geçit izolatörünün geliştirilmesidir. Böylelikle mevcut geçit izolatörlerindeki ısı problemlerin giderilmesi ve bu izolatörlerin kullanım ömrünün arttırılması hedeflenmiştir.

1.2 Yayın Araştırması

Yüksek gerilim geçit izolatörleri konusunda geçmişte birçok çalışma yapılmıştır. Yapılan çalışmaların çoğu transformatör tipi geçit izolatörleri üzerine yoğunlaşmıştır. Gerek kullanım alanlarının fazlalığı, gerekse de endüstriden gelen talepler, araştırmacıları bu alana yöneltmiştir. Isı sorunlarıyla ilgili temel araştırmalar da yine bu izolatörlerde yoğunlaşmıştır.

Yağ emdirilmiş kağıt yalıtımlı transformatör geçit izolatörleri çok eskiden beri kullanılmaktadır. Bu izolatörlerdeki ısı dağılımlarını ilk kez Craghead ve Easley [3] incelemişlerdir. Daha sonra da çeşitli çalışmalar yapılmış ve ısı dağılımlar ayrıntılı bir şekilde irdelenmiştir [4-7].

Teknolojik gelişmelerle beraber, yağ emdirilmiş kağıt yalıtımlı geçit izolatörlerine seçenek olarak, daha üstün elektriksel ve ısı özelliklere sahip olan reçine emdirilmiş kağıt yalıtımlı geçit izolatörleri geliştirilmiştir. Fakat reçine emdirilmiş kağıt yalıtımlı geçit izolatörleri için ısı dağılımlar konusunda kısmen daha az çalışma yapılmıştır [8-10].

Isı dağılımlarda iki temel ısı kaynağı göz önüne alınır. Birinci ısı kaynağı, içinden akım geçen iletkenin direncinden kaynaklanan aktif güç kaybıdır. Diğeri ise, elektriksel zorlanma nedeniyle oluşan dielektrik kayıplardır. Dielektrik kayıplar, iletkende oluşan kayıplara nazaran çok küçük olduğu için, ısı modellerde genellikle

ihmal edilirler [7,10-11]. Buna yanında bazı çalışmalarda, daha kapsamlı ısı dağılım elde etmek amacıyla, dielektrik kayıplar da hesaba katılmıştır [5, 6, 9].

Doğruluğu yüksek ısı analizler yapmak için, bir çok ısı model geliştirilmiştir. Kimi yazarlar, oluşturdukları modelleri deneysel verilerle doğrulamışlar ve güvenilirliklerini kanıtlamışlardır [8, 9, 11]. Böylelikle deneysel çalışmalara olan gereksinim azalmış ve benzetim tabanlı çalışmalarla, bir sistemin tüm noktalarının sıcaklık bilgileri kolaylıkla elde edilebilir hale getirilmiştir.

Alternatif akımdaki deri etkisinden dolayı, akım yoğunluğu iletkenin kesiti boyunca düzgün olarak dağılmayıp, iletkenin dış kısmına doğru artmaktadır. Yüksek frekanslarda ise bu etki kendisini daha fazla hissettirmekte ve alternatif akım direncini daha da arttırmaktadır. Deri etkisinin de hesaba katıldığı bazı ısı dağılım çalışmaları yapılmış ve ana ısı kaynağı olan iletken, alternatif akımda gerçek ısı değerine daha da yakın olacak biçimde modellenmiştir [11, 12].

Pratik uygulamalarda yalıtım durumlarına göre, gaz yalıtımlı, reçine emdirilmiş kağıt yalıtımlı, yağ emdirilmiş kağıt yalıtımlı; kullanıldıkları yerlere göre hariçten dahile duvar tipi, dahilden dahile duvar tipi ve transformatör tipi gibi çeşitli tiplerde geçit izolatörleri kullanılmaktadır [13-19].

2. DAF-30 TİPİ HARIÇTEN DAHİLE DUVAR TİPİ GEÇİT İZOLATÖRLERİ

DAF-30 tipi geçit izolatörleri 30 kV gerilim orta gerilim (OG) kademesinde kullanılırlar. Geçit izolatörleri, gövdede bulunan flanş sayesinde, duvara ya da metal bir levhaya sabitlenirler. İşletmede, flanş kısmının mutlaka topraklanması gerekmektedir. Ayrıca tij olarak adlandırılan iletkenin akım bağlantılarının sıkı bir şekilde yapılması, iletkende ısınma problemlerine yol açmaması açısından önemlidir.

Geçit izolatörlerinde iletken olarak alüminyum tij'ler kullanılmaktadır. Yalıtım kısmında, elektriksel ve ısı özellikleri iyi olan porselen malzemesi kullanılmaktadır. Porselen yalıtkanla iletken arasında ise hava aralığı bulunmaktadır. Ayrıca, geçit izolatörleri klemensli bağlantı olacak şekilde tek parça olarak üretilirler.

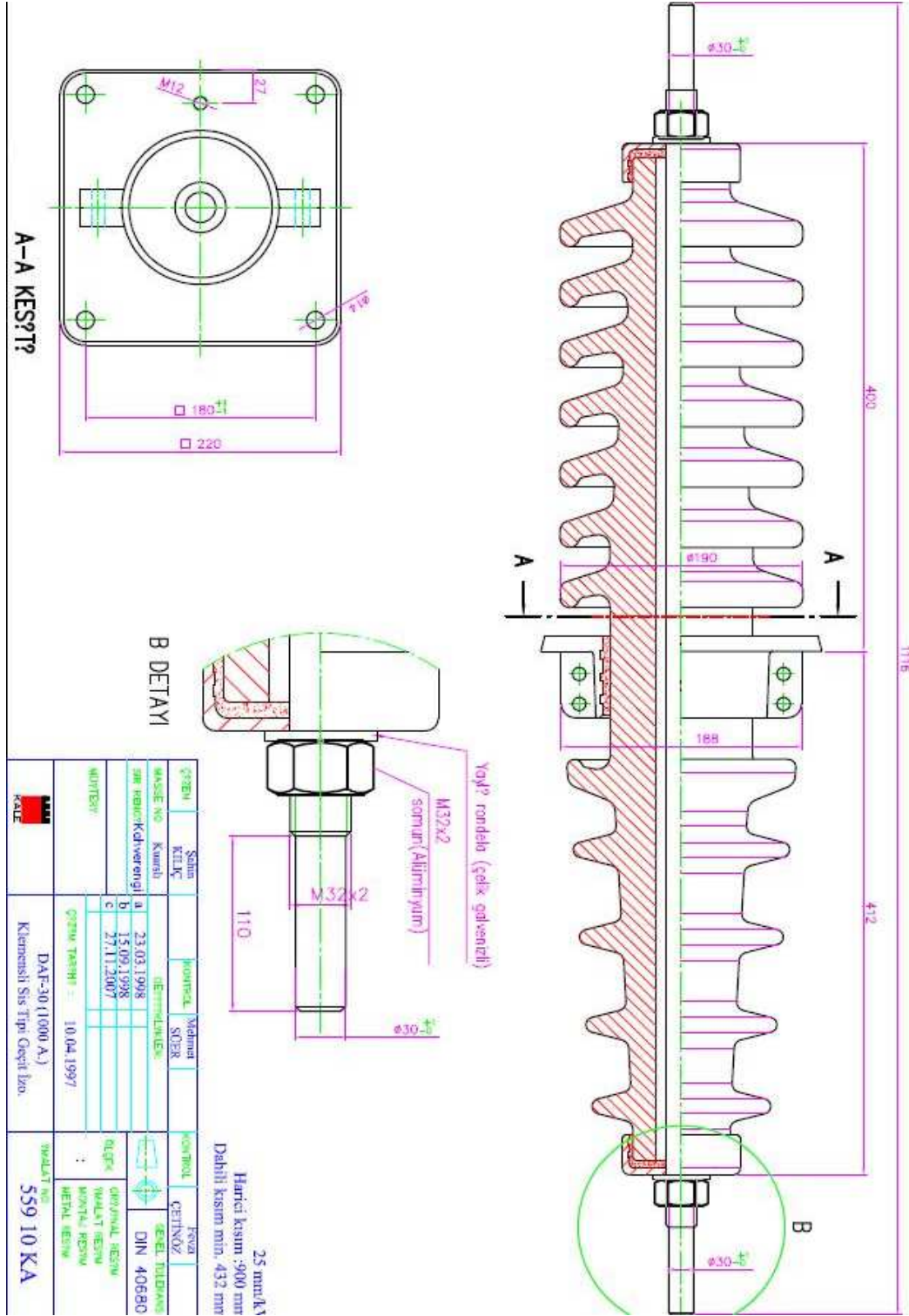
Bu çalışmada ulusal şebekemizde kullanılan , 1000 A ve 1250 A anma akımlı ve Çanakkale Seramik tarafından üretilen DAF-30 duvar tipi geçit izolatörleri kullanılmıştır [19].

1000 A'lık geçit izolatör tij'i olarak genellikle normal alüminyum iletkenler ve ender olarak yüksek saflıklı alüminyum iletkenler kullanılmaktadır. Saf alüminyumdan yapılan tij'in kullanıldığı geçit izolatörüne saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü, normal alüminyumdan yapılan tij'e sahip geçit izolatörüne ise (normal alüminyum tij'li) geçit izolatörü denmektedir. Şekil 2.1'de saflığı yüksek alüminyum tij'li 1000 A geçit izolatörü gösterilmiştir.



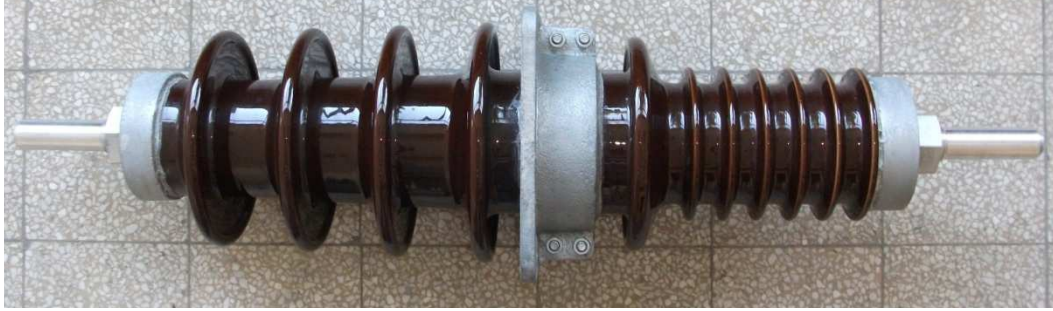
Şekil 2.1 : Saflığı yüksek alüminyum tij'li DAF-30 tipi 1000 A geçit izolatörü.

Şekil 2.2 de teknik resmi verilen 1000 A'lık geçit izolatörlerde porselenle tij arasında 4 mm hava boşluğu vardır. 16 mm yarıçaplı alüminyum tij'in boyu 1123 mm'dir. Flanş kısmı iki parça olarak metal döküm şeklinde üretilmekte ve flanşın porselenle bağlantısı beton malzemesi ile sağlanmaktadır.



Şekil 2.2 : Normal alüminyum tij'li 1000 A geçit izolatörünün teknik resmi (Çanakale A.Ş.'nin izniyle).

Tij' özelliklerine bağılı olarak iki çeşit 1250 A'lık geçit izolatörüdür. Tiji normal saflığa sahip alüminyumdan üretilmiş izolatöre (normal alüminyum tij'li) 1250 A geçit izolatörlü, içi boş (boru) tij'e sahip geçit izolatörüne ise içi boş alüminyum tij'li geçit izolatörü denmektedir. Şekil 2.3'de saflığı normal alüminyum tij'li 1250 A geçit izolatörü görölmektedir.



Şekil 2.3 : Normal alüminyum tij'li DAF-30 tipi 1250 A geçit izolatörü.

Şekil 2.4'de teknik resmi verilen 1250 A'lık geçit izolatöründe, porselen ile tij arasındaki hava boşluğu 19,5 mm'dir. Normal alüminyum tij'li geçit izolatöründe kullanılan tijin yarıçapı 19 mm ve uzunluğu ise 1080 mm'dir. İçi boş alüminyum tij'li geçit izolatörü, saflığı normal alüminyum tij'li geçit izolatörüyle aynı yarıçapa sahiptir ve tij malzemesinin et kalınlığı 8 mm'dir.

3. GEÇİT İZOLATÖRLERİNDE ELEKTRİKSEL KAYIPLARIN HESAPLANMASI

Geçit izolatörlerinde oluşan elektriksel kayıplar, iletken kayıpları ve dielektrik kayıplarından oluşmaktadır. İletken kayıpları toplam kayıpların büyük bir bölümünü oluşturur ve yalıtıkanda oluşan dielektrik kayıplar çoğunlukla hesaplamalarda ihmal edilmektedirler.

Yalıtkan malzemeler, elektriksel olarak kondansatörle modellenebilirler. İdeal bir yalıtıkandan sadece reaktif akım geçer ve reaktif güç kaybı oluşur. Gerçek yalıtkanlar ideal olmayıp, içlerinden reaktif akıma ek olarak aktif akım da geçer ve aktif güç kaybına yol açar. Buna dielektrik kayıp denir ve malzemenin ısınmasına yol açar [20].

Her iletkenin bir direnci vardır ve dolayısıyla iletken içinden akım geçtiğinde elektriksel kayıp oluşur. İletkenlerde oluşan ve ısı olarak açığa çıkan aktif güç kayıplarına Joule kayıpları adı verilmektedir. Aktif güç kaybı,

$$P=I^2R \text{ (W)} \quad (3.1)$$

formülüyle hesaplanmaktadır.

Burada,

I : İletkenden geçen akım (A)

R : İletkenin direnci (Ω)

P: Isıya dönüşen elektriksel güç (W)'tür.

İletkenlerin doğru akım direnci sıcaklıkla değişir. Referans olarak 20 °C oda sıcaklığındaki doğru akım direnci hesaplanır. Bu hesaplama için aşağıdaki bağıntı kullanılır.

$$R_{20} = \frac{\rho_{20}L}{S} \text{ (}\Omega\text{)} \quad (3.2)$$

Burada,

R_{20} : İletkenin 20 °C'deki doğru akım direnci (Ω)

ρ_{20} : İletkenin 20 °C'deki öz direnci ($\Omega.m$)

L : İletkenin boyu (m)

S : İletkenin kesiti (m^2)'dir.

Sıcaklık arttıkça iletken direnci de artar. İletkenin herhangi bir T sıcaklığındaki DC direnci, (3.3) bağıntısı ile hesaplanabilir.

$$R_{DC} = R_{20} [1 + \alpha_{20} (T - 20)] (\Omega) \quad (3.3)$$

Burada,

R_{DC} : T °C sıcaklıkta iletkenin DC direnci (Ω)

α_{20} : İletken malzemeye ait sıcaklık katsayısı ($1/^\circ C$)

T : Sıcaklık ($^\circ C$)'tır.

Geçit izolatörlerinde en çok kullanılan iletken alüminyum ve bakır olup, bu malzemelere ilişkin öz direnç ve sıcaklık katsayıları Çizelge 3.1'de verilmiştir [21].

Çizelge 3.1 : Geçit izolatörlerinde kullanılan iletken malzemelerin 20 °C'daki öz dirençleri ve sıcaklık katsayıları.

Malzeme	Öz direnç ($\Omega.m$)	Sıcaklık Katsayısı ($1/^\circ C$)
Alüminyum	$2.8264.10^{-8}$	$4.03.10^{-3}$
Bakır	$1.7241.10^{-8}$	$3.93.10^{-3}$

İletken dirençleri gibi, elektriksel iletkenlikleri de sıcaklığa bağlı olarak değişir. Sıcaklığa bağlı olarak elektriksel öz iletkenlik değeri (3.4) eşitliği ile verilir.

$$\sigma = \frac{1}{\rho_0 (1 + \alpha (T - T_0))} (S/m) \quad (3.4)$$

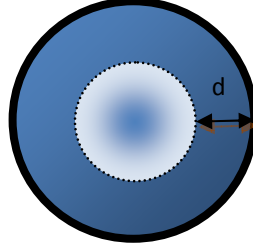
σ : Elektriksel öz iletkenlik (S/m)

α : İletkene ait sıcaklık katsayısı ($1/^\circ C$)

T_0 : Referans sıcaklık ($^\circ C$)'dir.

Alternatif akımda iletken direnci, doğru akımdaki direnç değerine göre daha fazladır. Bu artışın nedeni deri etkisi, yakınlık etkisi, ferromanyetik malzemelerin yakınındaki histerezis ve girdap akım kayıpları ile ferromanyetik olmayan malzemelerin yakınında indüklenen kayıplardır. Bunlar içinde daha baskın olanlar deri etkisi ve yakınlık etkisidir ve ac direnç hesabında daha çok bu iki olay göz önüne alınır [22, 23].

Alternatif akımda, akım yoğunluğu iletken kesiti boyunca düzgün dağılım göstermez ve akım iletkenin dış kısmında yoğunlaşır. Bu olay deri etkisi olarak adlandırılır. İçinden alternatif akım geçen silindrsel yapıdaki bir iletkende, akımın %63 lük kısmı iletkenin dış yüzeyinde deri kalınlığı olarak tanımlanan ve d ile gösterilen kısımdan geçer. Deri kalınlığı Şekil 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 : Silindrsel bir iletkenin kesiti ve deri kalınlığı.

Deri kalınlığı, elektrik akımının frekansına, iletken malzemenin elektriksel ve manyetik özelliklerine bağlı olup, (3.5) eşitliği ile verilir.

$$d = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \sqrt{\frac{\rho}{\pi f \mu_0 \mu_r}} \text{ (m)} \quad (3.5)$$

Deri kalınlığı ifadesinde,

d : Deri kalınlığı (m)

f : Çalışma frekansı (Hz)

μ_0 : Boşluğun manyetik geçirgenliği ($4\pi 10^{-7}$ H/m)

μ_r : İletken malzemenin bağıl manyetik geçirgenliğidir.

Demir dışındaki tüm iletken malzemeler için μ_r yaklaşık 1 olarak alınır ve gerekli sadeleştirmeler yapılırsa deri kalınlığı için (3.6) ifadesi elde edilir.

$$d = \frac{1}{2\pi} \times \sqrt{\frac{\rho \times 10^3}{f}} \text{ (cm)} \quad (3.6)$$

Deri etkisi dikkate alınarak, alternatif akım için silindrsel kesitli bir iletkenin eşdeğer kesiti (3.7) eşitliği kullanılarak hesaplanır.

$$S_e = \pi d(D-d) \text{ (cm}^2\text{)} \quad (3.7)$$

S_e : Deri etkisinin hesaba katıldığı eşdeğer kesit alanı (cm²)

D : Dairesel iletkenin çapı (cm)

Elektrik dağıtım sisteminde bozucu etkilerden birisi de harmoniklerdir. Enerji dağıtım firmalarının tüketicilere sağladıkları elektrik enerjisinin kalitesi, harmonikler dahil çeşitli bozulmalara bazı kısıtlamalar konularak tanımlanmıştır. Bu tezdeki deneysel çalışmalarda, gerilim harmoniklerinin yaratabileceği olumsuzlukları dikkate almak için, belirli zaman dilimlerinde harmonik ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçları Çizelge 3.2'de verilmiştir. Gerilim harmoniklerinin ölçümünde Şekil 3.2'de gösterilen Fluke marka harmonik analizörü kullanılmıştır.

Çizelge 3.2 : Şebeke gerilimindeki harmonik düzeyleri.

Ölçüm zamanı	Harmonikler (%)				
	3. Harmonik	5. Harmonik	7. Harmonik	9. Harmonik	Toplam Harmonik Bozulması (THB), %
07:00	0,2	1,3	0,3	0,2	1,4
09:30	0,2	1,2	0,2	0,2	1,3
16:30	0,3	1,1	0,3	0,1	1,3
19:00	0,2	1,1	0,2	0,1	1,2
01:00	0,3	1,6	0,3	0,1	1,7
03:00	0,2	1,9	0,2	0,1	1,9

Çizelge 3.2 değerlendirildiğinde, gün içerisinde en fazla gerilim harmoniklerinin olduğu saatler gece saatleridir. En yüksek THB (Toplam Harmonik Bozulma) değeri %1,9 olup, bu değer dağıtım şebekeleri için izin verilen %5 limitinin altındadır. Ölçüm sonuçlarına göre en yüksek harmonik bileşeni 5. harmonik bileşenidir ve toplam harmonik bozulması üzerinde baskın rol oynamaktadır.



Şekil 3.2 : Gerilim harmoniklerini ölçmek için kullanılan harmonik analizörü.

4. GEÇİT İZOLATÖRLERİNDE ISI GEÇİŞİ VE ISIL MODEL

Isı geçişi, sıcaklık farkı nedeniyle, herhangi bir kütle alışverişi olmaksızın enerjinin maddeden maddeye geçmesi olarak tanımlanır. Isı geçişi, sıcaklık farkı yanında, ortamın ve yüzeyin özelliklerine de bağlıdır [24].

Isı ve elektrik birbirlerine dönüşebilen iki farklı enerji türüdür. İletkende oluşan elektriksel kayıplar ısı enerjisine dönüşmekte ve sıcaklık farkı nedeniyle çevreye yayılmaktadır. Isı geçişi iletimle, taşınım ve ışınlama gerçekleşir. Geçit izolatörlerinde ise ışınlama ısı geçişi çoğu zaman ihmal edilmektedir.

4.1 İletimle Isı Geçişi

Bir cisim üzerindeki farklı sıcaklıklara sahip bölgeler arasında, temas halinde bulunan atom veya moleküllerin, yüksek enerjili olanlarından düşük enerjili olanlarına doğru enerjinin geçmesine iletimle ısı geçişi denilmektedir. Enerji geçişleri katı, sıvı ve gaz olmak üzere üç tür ortamda da gerçekleşebilmektedir. Katılarda, serbest elektron ve atomların titreşimi ısı geçişini oluşturmaktadır. Ayrıca, bir ortamda bulunan tüm noktalardaki anlık sıcaklık değerlerine de sıcaklık dağılımı denilmektedir [24].

İletimle gerçekleşen ısı geçişinde önemli olan parametrelerden birisi ısıl iletkenliktir. Isıl iletkenlik, bir malzemenin ısıyı iletebilme yeteneğinin bir ölçüsüdür ve k ($W/m^{\circ}K$) sembolü ile gösterilmektedir. Isıl iletkenlik ve sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir [25].

Bir duvar içerisinde ısı geçişi (x yönündeki) Fourier Yasası olarak bilinir ve (4.1) eşitliğiyle verilir.

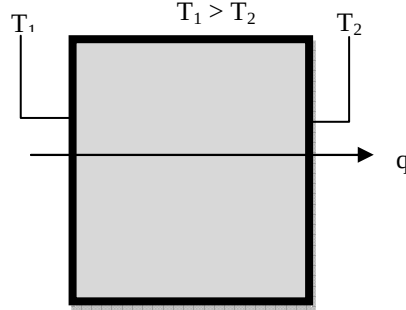
$$q = -k \frac{dT}{dx} \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (4.1)$$

Burada,

q : Isı akısı (W/m^2)

k : Isıl iletkenlik ($W/m^{\circ}K$)'dir.

Denklemden yer alan (-) işareti ısı akısının azalan sıcaklık yönünde olduğunu göstermektedir. Şekil 4.1'de bir duvar içerisindeki tek boyutlu ısı geçişi gösterilmiştir [26].



Şekil 4.1 : Bir duvar içerisinde meydana gelen iletimle ısı geçişi.

Geçit izolatorleri silindrsel yapıdadır. Silindrsel koordinatlarda ısı geçişi (4.2) denklemleriyle verilir.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + W = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.2)$$

Burada,

T : Noktalara ait değişken sıcaklık ($^{\circ}\text{K}$)

W : Birim hacimde üretilen ısı (W/m^3)

ρ : İletkenin yoğunluğu (kg/m^3)

c : Öz ısı ($\text{kJ}/\text{kg } ^{\circ}\text{K}$)

Diferansiyel denklemleri çözmek için sıcaklığa bağlı sınır koşulları gereklidir. Tek boyutlu problemler için iki sınır koşulu, iki boyutlu problemler için dört sınır koşulu ve üç boyutlu problemler için ise altı sınır koşulu gereklidir [25].

4.2 Taşınım ile Isı Geçişi

Taşınım ile ısı geçişi, katı bir yüzey ile ona komşu olan hareket halindeki sıvı ve gaz ortamlar arasında meydana gelen enerji geçişi olayıdır. Taşınım ile ısı geçişi, iletimin ve akışkan hareketinin birleşik etkilerini gerektirmektedir. Daha hızlı akışkan hareketi, daha fazla enerjinin taşınarak transfer edilmesi anlamına gelmektedir. Katı bir yüzey ile komşu bir ortamda bulunan akışkan arasında akışkan hareketi meydana gelmediği takdirde, bu iki ortam arasındaki ısı geçişi sadece iletimle gerçekleşmektedir [25].

Taşınmıla ısı geçişi en önemli tanımlardan birisi ısı transfer katsayısıdır. Isı transfer katsayısı, akışkanların ne oranda ısıyı taşıyabildiğinin bir göstergesi olup h ($W/m^2\text{°K}$) sembolüyle gösterilmektedir. Isı transfer katsayıları deneysel olarak belirlenmekte olup, yüzey geometrisine akışkan hareketinin doğasına, akışkan özelliklerine ve akışkan hızına bağılı olarak değişmektedir [25].

Taşınmıla ısı geçişi, doğal ve zorlanmış taşınmıla ısı geçişi olmak üzere iki çeşittir. Eğer akışkan madde fan, pompa veya rüzgar ile yüzey üzerinde akmaya zorlanıyorsa buna zorlanmış taşınmıla ısı geçişi denmektedir. Aksine, taşınmı akışkan içerisindeki sıcaklık değişiminden dolayı meydana gelen yoğunluk farkından dolayı oluşan doğal kuvvetlerle yapılıyorsa buna da doğal taşınmıla ısı geçişi denmektedir. Çizelge 4.1'de ısı transfer katsayılarının tipik değerleri verilmiştir [25].

Çizelge 4.1 : Isı transfer katsayısının (h) tipik değerleri.

Taşınmı Tipi	h ($W/m^2\text{°K}$)
Gazlarda Doğal Taşınmı	2-25
Sıvılarda Doğal Taşınmı	10-1000
Gazlarda Zorlanmış Taşınmı	25-250
Sıvılarda Zorlanmış Taşınmı	50-20000
Kaynama ve Yoğunlaşma	2500-100000

Newton'un soğuma yasası olarak da bilinen ısı taşınmı ifadesi, (4.3) eşitliği ile verilir.

$$q=h(T_y - T_{\infty}) \left(\frac{W}{m^2} \right) \quad (4.3)$$

Burada,

T_y : Yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$)

T_{∞} : Yüzeyden yeteri kadar uzaktaki akışkan sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$)'dır.

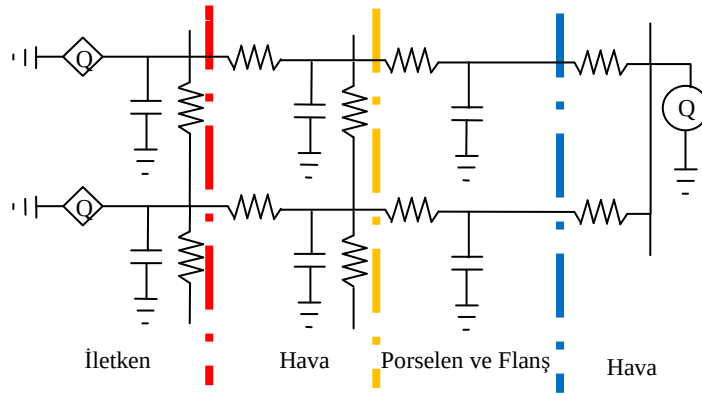
4.3 Geçit İzolatörünün Isıl Modeli

Geçit izolatörleri ısıl olarak modellenirken, elektrik devreleriyle ısıl devreler arasındaki benzerlikten yararlanılır. Isıl devrelerde yer alan ısı kaynağı ve sıcaklık farkı, elektrik devrelerindeki sırasıyla akım kaynağı ve potansiyel farkına karşılık gelmektedir. Isıl devrelerle elektrik devreleri arasındaki benzerlikler Çizelge 4.2'de verilmiştir [7].

Çizelge 4.2 : Isıl devreler ile elektrik devrelerinin karşılaştırılması.

Isıl Devrelerdeki Büyüklükler	Elektrik Devrelerindeki Büyüklükler
Isıl Direnç, $R_{\text{Isıl}}$	Elektriksel Direnç, R
Isıl Kapasite, $C_{\text{Isıl}}$	Elektriksel Kapasite, C
Sıcaklık, T	Potansiyel, P
Sıcaklık Farkı, ΔT	Gerilim, V
Isı Akışı, Q	Akım, I
Isı Kaynağı	Akım Kaynağı

Isıl model oluşturulurken geçit izolatorü, uzunluğu boyunca birçok bölüme ayrılır ve bölüm içerisindeki her bir malzeme dilim olarak veya sıcaklık ölçüm noktası olarak değerlendirilir. Ayrıca her bir dilimin iki düğüm noktası arasında dilimlerin ısı kapasiteleri ve ısı dirençleri yer almaktadır. Geçit izolatorünün ısı modeli Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2 : Geçit izolatorünün ısı modeli[7].

Her bir düğüm noktası arasındaki ısı direnç, ısı geçişine karşı koyarak üzerinde bir sıcaklık farkı oluşturur. Ayrıca, ısı dirençler, geçit izolatorünün uzunluğu boyunca ve uzunluğa dik olacak şekildedir [7].

4.3.1 Isıl kapasite

Isıl kapasite, malzemenin ısıyı depolayabilme yeteneğinin ölçüsü olarak tanımlanır ve $C_{\text{Isıl}}$ olarak gösterilmektedir. Isıl kapasite, elektrik devrelerindeki kapasitenin ısı devrelerindeki karşılığıdır. Isıl kapasite (4.4) eşitliği ile verilir.

$$C_{\text{Isıl}} = c \times m \left(\frac{J}{K} \right) \quad (4.4)$$

Burada,

$C_{\text{Isıl}}$: Isıl kapasite ($J/^{\circ}K$)

c : Öz ısı ($J/kg^{\circ}K$)

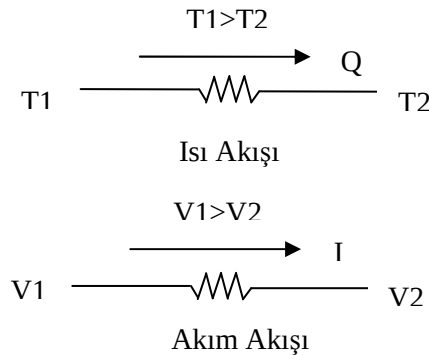
m : Kütle (kg)'dir.

Isı transfer problemlerinde, tıpkı elektriksel devrelerdeki gibi, kararlı hal ve geçici hal olmak üzere iki durum söz konusudur. Isıl sistemlerin zaman sabitleri, elektriksel devrelere göre çok büyüktür. Isıl bir sistemde, son bir saatteki sıcaklık değişiminin 1 derece olduğu hal kararlı hal olarak tanımlanır ve sistemin bu hale gelebilmesi için yeterli sürenin geçmesi gerekmektedir [1]. Geçici halde ise ısıl denge kurulmamıştır ve ortamlar arasında ısı alışverişi devam etmektedir.

Isıl kapasite geçici durum analizlerinde önemli bir yere sahiptir. Çünkü her bir malzemenin belirli bir ısıl kapasitesi bulunmakta ve buna göre ısı depolamaktadır. Kararlı hal analizlerinde ise ısıl kapasiteler sistemden kaldırılarak analiz yapılır [7].

4.3.2 Isıl direnç

Gerek kararlı hal analizlerinde gerekse de geçici hal analizlerinde ısıl dirençler kullanılmaktadır. Elektriksel sistemlerde, uçlarında potansiyel farkı olan bir dirençten akım geçiyorsa, ısıl sistemlerde de uçlarında sıcaklık farkı olan bir ısıl dirençte ise ısı akışı oluşur. Elektriksel direnç ile ısıl direnç arasındaki benzerlik Şekil 4.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 : Elektriksel direnç ile ısıl direnç arasındaki benzerlik.

Düz bir duvar için, bir boyutlu ısı iletimi (4.5) eşitliği ile verilir.

$$Q_{\text{iletim}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{duvar}}} \text{ (W)} \quad (4.5)$$

Burada,

Q_{iletim} : Isı akışı (W)

$T_{1,2}$: Duvar yüzeylerindeki sıcaklıklar ($^{\circ}\text{K}$)

R_{duvar} : Duvarın ısı direnci ($^{\circ}\text{K/W}$)

İletim direnci olarak da nitelendirilen duvara ait ısı direnç ifadesi (4.6) eşitliği ile verilir.

$$R_{\text{duvar}} = \frac{L}{kA} \text{ (K/W)} \quad (4.6)$$

Verilen eşitlik için,

L : Isının geçtiği doğrultudaki duvar kalınlığı (m)

k : Isıl iletkenlik ($\text{W/m } ^{\circ}\text{K}$)

A : Isının geçtiği doğrultuya dik duvar yüzey alanı (m^2) 'dir.

Katı bir yüzeyden taşınım ile meydana gelebilecek ısı akış miktarı (4.7) eşitliğiyle verilir.

$$Q = \frac{T_y - T_{\infty}}{R_{\text{taşınım}}} \text{ (W)} \quad (4.7)$$

T_y : Yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$)

T_{∞} : Yüzeyden yeterince uzaklıktaki akışkanın sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$)

$R_{\text{taşınım}}$: Isıl taşınım direnci ($^{\circ}\text{K/W}$)

Isıl taşınım direnci ise (4.8) eşitliğiyle verilir.

$$R_{\text{taşınım}} = \frac{1}{hA_y} \quad (4.8)$$

Burada,

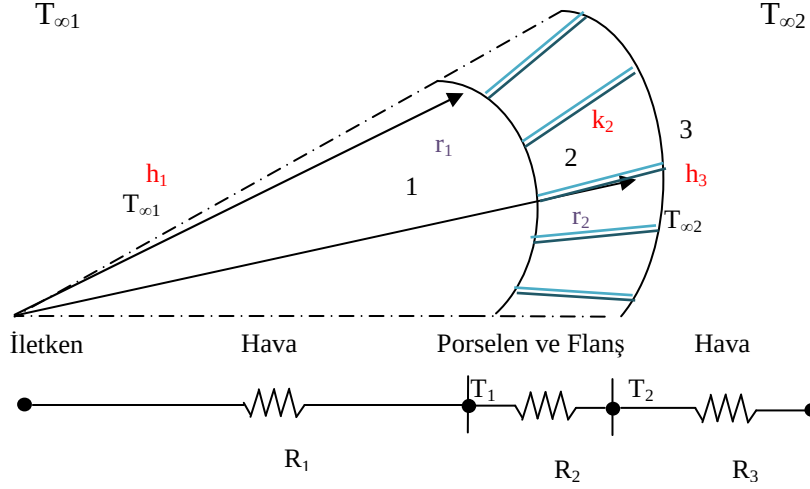
h : Isı transfer katsayısı ($\text{W/m}^2\text{ } ^{\circ}\text{K}$)

A_y : Katının yüzey alanı (m^2) olarak verilmiştir [25].

Kaskat yapılarıdaki ısı dirençler, birbirlerine seri bağlı dirençler olarak düşünülür ve eşdeğer direnç bulunurken tüm dirençler toplanır. Kararlı haldeki bir sistem için bütün katmanlardan aynı ısı miktarı geçecektir. Bu noktadan hareketle tüm düğüm noktalarının sıcaklıkları teker teker belirlenebilir.

Geçit izolatörleri de silindrisel yapıdadır ve bu geometri için geçerli olan ısı direnç eşitlikleriyle, sistem kararlı halde analiz edilebilir. Şekil 4.4'te geçit izolatörünün kararlı halde ısı dirençlerle gösterimi verilmiştir (ışınım ile ısı transferi ihmal edilmiştir).

Şekil 4.4'te R_1 , R_2 ve R_3 sırasıyla taşınım, iletim ve taşınım ısı dirençleri göstermektedir. Silindrsel yapıdaki cisimler için iletimle ısı geçişi esnasında meydana gelecek olan ısı direnç ifadesi, (4.9) eşitliği ile verilir.



Şekil 4.4 : Geçit izolatörünün kararlı halde ısı dirençlerle gösterimi.

$$R_{\text{silindir}} = \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi L k} \left(\frac{K}{W} \right) \quad (4.9)$$

Bu eşitlikte,

R_{silindir} : Silindrsel cismin ısı direnci ($^{\circ}K/W$)

r_1 : Silindrsel cismin iç yarıçapı (m)

r_2 : Silindrsel cismin dış yarıçapı (m)

L : Silindrsel cismin uzunluğu (m)

Şekil 4.4'teki gösterim için eşdeğer direnç, (4.10) eşitliği ile hesaplanır.

$$R_{\text{eş}} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{1}{h_1(2\pi r_1 L)} + \frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi L k_2} + \frac{1}{h_3(2\pi r_2 L)} \left(\frac{K}{W} \right) \quad (4.10)$$

Burada,

$R_{\text{eş}}$: Eşdeğer ısı direnç ($^{\circ}K/W$)

h_1 : 1 Numaralı ortamın ısı transfer katsayısı ($W/m^2 \cdot K$)

h_3 : 3 Numaralı ortamın ısı transfer katsayısı ($W/m^2 \cdot K$)

k_2 : 2 Numaralı ortamın ısı iletkenliği ($W/m \cdot K$)

r_1 : Porselenin iç yarıçapı (m)

r_2 : Porselenin dış yarıçapı (m)

L : Tabaka uzunluğu (m)

İletkende meydana gelip, dış ortama transfer edilen ısı, Şekil 4.4 kullanılarak (4.11) eşitliğiyle hesaplanır.

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{eş}} (W) \quad (4.11)$$

Burada,

Q : Transfer edilen ısı (W)

$T_{\infty 1}$: Porselenin içerisinde, yeterince uzaklıkta bir noktadaki akışkan sıcaklığı (iletken sıcaklığı) ($^{\circ}K$)

$T_{\infty 2}$: Porselenin dışında yeterince uzaklıkta bir noktadaki akışkan sıcaklığı (ortam sıcaklığı) ($^{\circ}K$)

$R_{eş}$: $T_{\infty 1}$ ve $T_{\infty 2}$ sıcaklık noktaları arasındaki eşdeğer direnç ($^{\circ}K/W$)

dir [25].

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalarda 1000 A'lık geçit izolatörleri olarak, saflığı yüksek alüminyum tij'li ve normal alüminyum tij'li geçit izolatörleri kullanılmıştır. 1250 A'lık geçit izolatörleri olarak ise normal alüminyum tij'li ve içi boş alüminyum tij'li geçit izolatörleri kullanılmıştır.

IEC 60137, ısı deneylerin ($I_{\text{çalışma}} \pm \%2$) A ile yapılmasını öngörmektedir. Deneylerde, en kötü koşulları oluşturmak için, çalışma akımlarının $\%2$ fazlası kullanılmıştır. Bu yüzden de 1000 A ve 1250 A geçit izolatörleri için çalışma akımları olarak sırasıyla 1020 A ve 1275A akım değerleri alınmıştır. IEC 60137'de, kararlı hal durumu, son bir saat içerisinde, iletken kısımlardaki sıcaklık değişimlerinin 1°C 'dan az olduğu durum olarak tanımlanmıştır.

İlk olarak, deneylerde kullanılacak olan bağlantı baraları ile ilgili denemeler yapılmış ve IEC 60137'de öngörülen bağlantı iletkeninin 1 metresinde 5°C 'den fazla sıcaklık farkı olmaması kısıtını sağlayacak bağlantı baraları belirlenmiştir. Bu kısıt, bağlantı baralarının sistemi ek olarak ısıtmasının veya soğutmasının önüne geçmek için gereklidir.

Standartta uygun bağlantı baralarının belirlenmesinden sonra, mevcut geçit izolatörlerindeki aşırı ısınan noktalar belirlenmiştir. Ayrıca deneylerde kullanılan iletkenlerin dirençleri ölçülmüş ve malzemelerin elektriksel özdirenç ve iletkenlik değerleri hesaplanmıştır.

Sonrasında, mevcut izolatörlerle yapılan deneysel çalışmalarda, izolatörlerinin IEC 60137 standardında yer alan ısı deneylere uygunluğu araştırılmıştır. Geçit izolatörleri, standartta belirtilen "Sıcaklık Artışı" ve "Isıl Kısa Süreli Akıma Dayanımın Doğrulanması" deneylerine tabi tutulmuştur.

Son olarak, çeşitli parametrelerin geçit izolatör sıcaklık dağılımlarına etkilerini belirlemek için bazı deneyler gerçekleştirilmiştir.

5.1 Ön Deneyler

5.1.1 Bağlantı iletkenlerinin belirlenmesi

Deneylerin doğruluğu açısından, geçit izolatörü ile akım kaynağı arasındaki bağlantının belirlenmesi önemlidir. Deneyler, 1000 A ve 1250 A gibi yüksek akımlarda yapılacağı için, içi dolu alüminyum bağlantı baraları kullanılmıştır. Bağlantı bara kesitinin büyük seçilmesi sistemin soğumasına, küçük seçilmesi ise sistemin ilave ısınmasına neden olmaktadır.

Sıcaklık ölçümlerinde özel ısı algılayıcılar (ısı çiftler) kullanılmış olup; sistemden alınan sıcaklık bilgileri, sıcaklık toplama arayüzü üzerinden 1'er dakika aralıklarla bilgisayar ortamına kaydedilmiştir. Şekil 5.1'de sıcaklık toplama arayüzü ve bilgilerin aktarıldığı bilgisayar ekranını gösterilmiştir.



Şekil 5.1 : Deneylerde kullanılan sıcaklık toplama birimi.

1000 A geçit izolatör tij kesit alanı $8,04 \text{ cm}^2$ 'dir. 1250 A geçit izolatörleri için ise, alüminyum ve alüminyum delikli tij'lerin kesitleri sırasıyla $11,34 \text{ cm}^2$ ve $7,54 \text{ cm}^2$ 'dir. Şekil 5.2'de 1000 A ve 1250 A için kullanılan tij'ler, montaj pulları ve somunları verilmiştir.

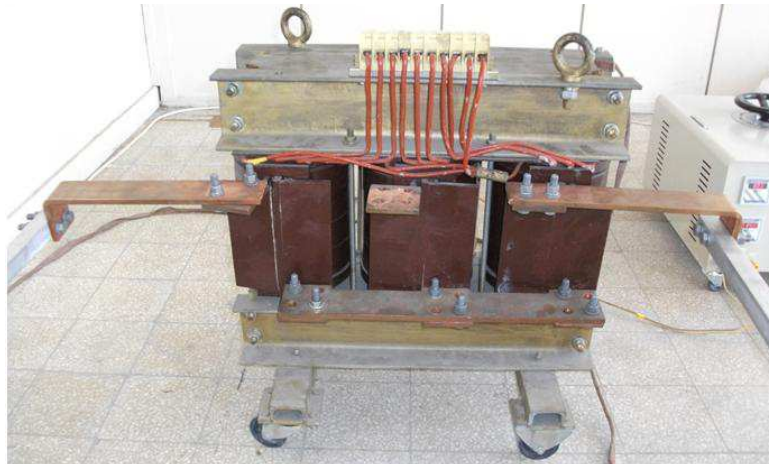
Akım kaynağı olarak, 0-220 V çıkış gerilimi ve 68 A çıkış akımı verebilen, 15 kVA gücünde, elle ayarlanabilir bir varyak (Şekil 5.3) kullanılmıştır. Varyak, 20 kVA gücündeki bir akım transformatörünü beslemekte ve buradan da geçit izolatörü için gerekli deney akımı sağlanmaktadır. Şekil 5.4'te deneylerde kullanılan akım transformatörü gösterilmiştir.



Şekil 5.2 : 1000 A ve 1250 A deneylerinde kullanılacak tij, pul ve somun malzemeleri.



Şekil 5.3 : Deneylerde kullanılan varyak.



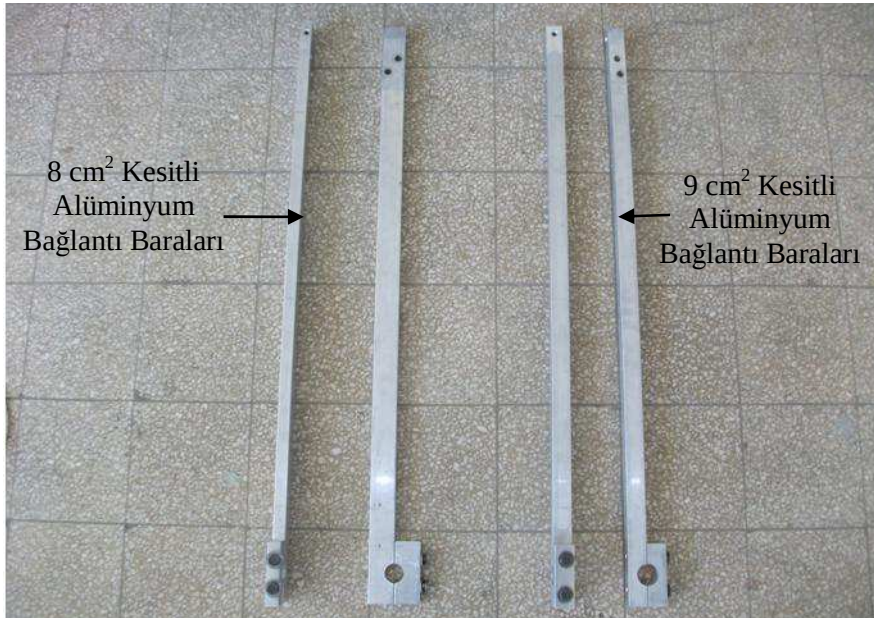
Şekil 5.4 : Deneylerde kullanılan ve varyak ile kontrol edilen akım transformatörü.

Baralardan geçen akımı ölçmek üzere 2500 A ölçme kapasitesinde bir pens ampermetre (Şekil 5.5) kullanılmıştır.



Şekil 5.5 : Alternatif akım ölçmelerinde kullanılan pens ampermetre.

Öncelikle, 1000 A geçit izolatör deneyleri için, 8 cm^2 ve 9 cm^2 kesitli alüminyum bağlantı baraları kullanılmıştır. Kullanılan alüminyum bağlantı baralarının saflık dereceleri %97,5'tir [27]. 1000 A deneyleri için denenen alüminyum bağlantı baraları Şekil 5.6'da gösterilmiştir.

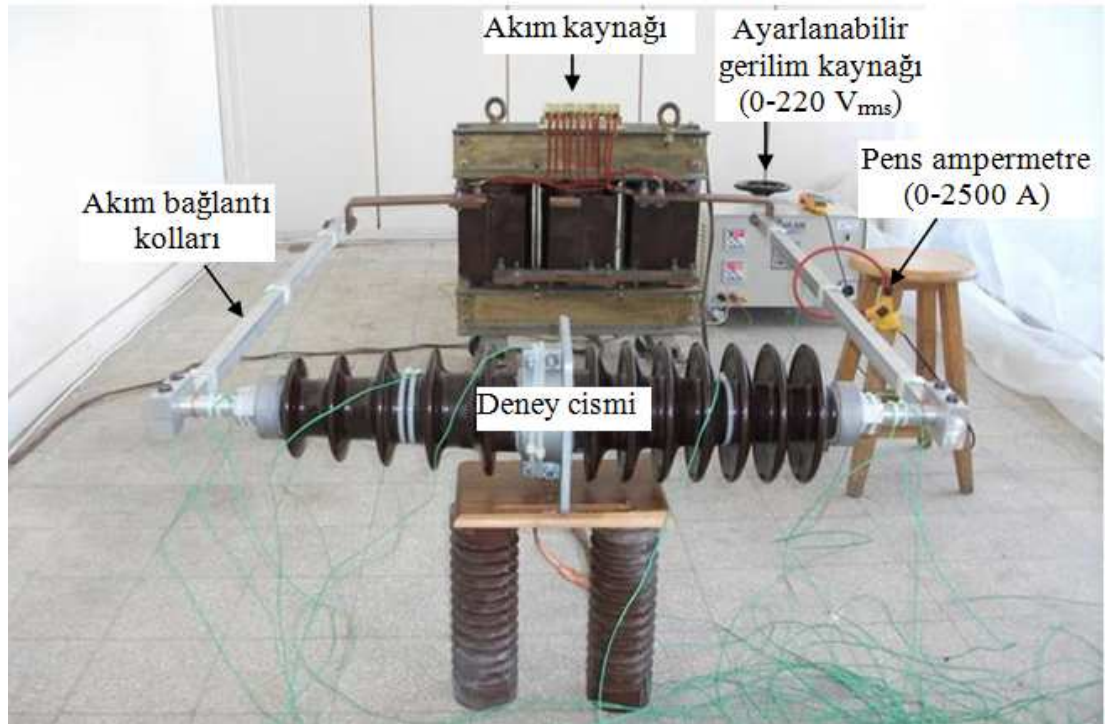


Şekil 5.6 : 1000 A geçirilecek olan bağlantı baraları.

Bağlantı baralarını da içeren tüm deney montaj resmi Şekil 5.7'de gösterilmiştir. 8 cm^2 ve 9 cm^2 kesitli bağlantı baraları ile kurulan deney düzenekleri kullanılarak,

devreden 1020 A alternatif akım geçirilmiştir. Tij bağlantı noktasından 5 cm ve 35 cm uzaklıklara yerleştirilen 2 ısıl çiftle ölçülen kararlı hal sıcaklıkları Çizelge 5.1'de verilmiştir. Çizelgede verilen sıcaklıklar, yüksek sıcaklık ölçülen koldan alınan değerlerdir.

30 cm aralıklı iki ısıl çiftten alınan ölçüm sonuçları, bağlantı kolları boyunca sıcaklığın doğrusal dağıldığı varsayımıyla, 1 m birim uzunluk başına sıcaklık azalmaları hesaplanmıştır. Buna göre, 8 cm² ve 9 cm² kesitli iletkenlerde, 1 metrede oluşacak sıcaklık farkları sırasıyla 9,7 °C ve 3 °C olarak bulunmuştur. Bu sıcaklık farkları, standartta öngörülen koşullar dikkate alınarak değerlendirilmiş ve 8 cm² kesitli bağlantı iletkeninin bu koşulu sağlamadığı ve dolayısıyla 9 cm² kesitli iletkenlerin kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.



Şekil 5.7 : Bağlantı iletkenlerinin belirlenmesi için kurulan deney düzeneği.

Çizelge 5.1 : 1020 A'de denenen alüminyum baraların kararlı hal sıcaklıkları.

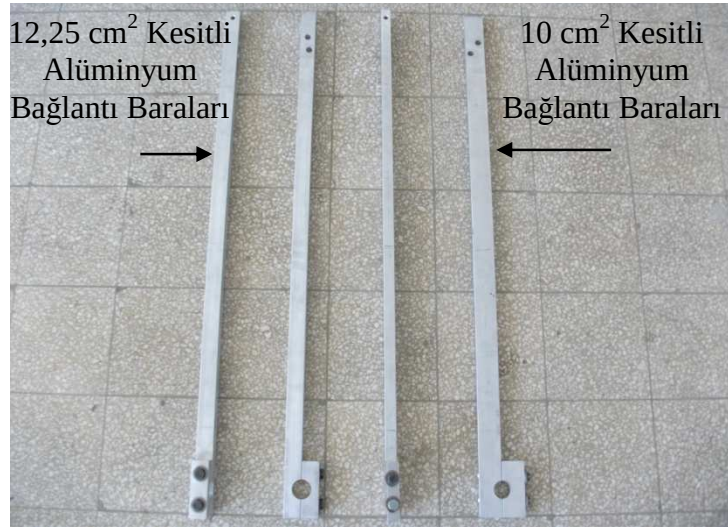
8 cm ² Kesitli Al. Bara	T1(°C)	T2(°C)	Ortam (°C)	T1-T2 (°C)
	78,4	75,5	20,3	2,9
9 cm ² Kesitli Al. Bara	72,6	71,7	20,4	0,9

1250 A deneyleri için, 10 cm² ve 12,25 cm² kesitli alüminyum bağlantı iletkenleri denlenmiştir. Şekil 5.8 'de 1250 A deneyleri için denenecek olan bağlantı iletkenleri

verilmiştir. 1275 A deney akımında, tij bağlantı noktasına 20 cm ve 70 cm uzaklıklarda ölçülen kararlı hal sıcaklıkları Çizelge 5.2 'de verilmiştir.

Çizelge 5.2 : 1275 A'de denen alüminyum baraların kararlı hal sıcaklıkları

10 cm ² Kesitli Al. Bara	T1(°C)	T2(°C)	Ortam (°C)	T1-T2 (°C)
	84,2	81,3	23,5	2,9
12,25 cm ² Kesitli Al. Bara	83,4	82,4	23,7	1



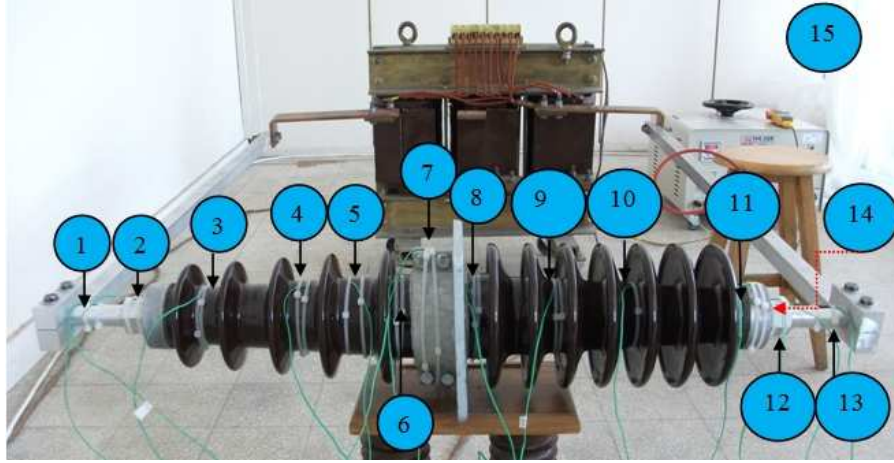
Şekil 5.8 : 1250 A deneylerinde kullanılan alüminyum bağlantı baraları.

Bağlantı iletkenleri boyunca sıcaklığın doğrusal değiştiği varsayılarak, 1 m uzunlukta hesaplanan sıcaklık farkı 10 cm² ve 12,25 cm² kesitli baralar için sırasıyla 5,8 °C ve 2 °C olarak hesaplanmıştır. Standarttaki koşullar dikkate alınarak, 1250 A deneyleri için 12,25 cm² kesitli alüminyum bağlantı baralarının kullanımına karar verilmiştir.

5.1.2 En fazla ısınan noktaların saptanması

Geçit izolatörünün en çok ısınan noktalarının belirlenmesi, izolatörlerde meydana gelen ısıl zorlanma problemlerinin ortaya konması açısından önemlidir. En fazla ısınan noktaların belirlenmesi amacı ile, Şekil 5.9'da gösterildiği gibi, 1000 A geçit izolatörü yüzeyinde, çeşitli noktalara ısıl çiftler yerleştirilmiştir. Yüzeysel ölçmelere ek olarak, tij'in tam orta kısmına da bir adet ısıl çift konularak sıcaklık ölçümü yapılmıştır.

Şekil 5.9'da 1-13 numaralar, izolatör yüzeyi boyunca sıcaklık ölçme noktalarını, 14 no tij ortası sıcaklık ölçme noktasını ve 15 no ise ortam sıcaklığı ölçme noktasını göstermektedir. Ölçüm sonuçları Çizelge 5.3'te verilmiştir.

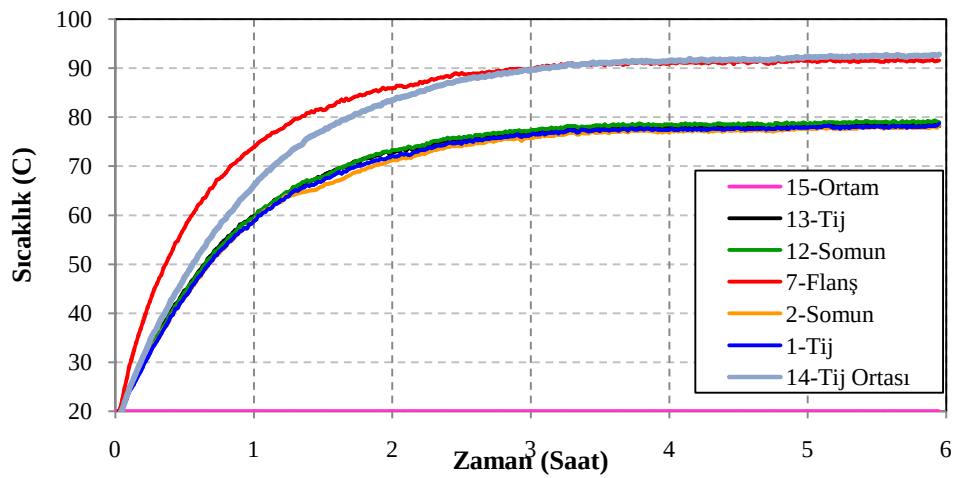


Şekil 5.9 : Sıcaklık dağılımının belirlenmesi için oluşturulan deney düzeneği ve sıcaklık ölçüm noktaları.

Çizelge 5.3 : Ölçme noktalarının kararlı hal sıcaklık değerleri.

Noktalar	Sıcaklıklar(°C)	Noktalar	Sıcaklıklar(°C)	Noktalar	Sıcaklıklar(°C)
1	78,8	6	59,5	11	50,3
2	78,7	7	92,3	12	79,8
3	34,6	8	58,0	13	78,9
4	33,9	9	33,8	14	93,4
5	38,7	10	32,7	15	20,5

Çizelge 5.3'teki sonuçlar değerlendirildiğinde, geçit izolatörü içerisinde, tij ortasının 93,4 °C ile en yüksek sıcaklığa sahip olduğu görülmektedir. 92,3 °C değeri ile flanş bölgesi, ikinci kritik nokta olarak göze çarpmaktadır. 79,8 °C ile, izolatöre harici kısımdaki somun sıcaklığı, flanştan sonra en fazla ısınan bölge olmuştur. Şekil 5.10'da, aşırı ısınan noktalardaki sıcaklık değişimi verilmiştir. Grafikler 20 °C ortam sıcaklığı için çizilmiştir.



Şekil 5.10 : Aşırı ısınan nokta sıcaklıklarının zamanla değişimi.

Şekil 5.10'dan görüldüğü gibi, flanş sıcaklığı hızla yükselmekte ve 3 saat içerisinde 90 °C değerine erişmektedir. Tij ortası sıcaklığı ise, belirli bir gecikme ile artarak flanş sıcaklığı mertebelerine erişmektedir. Kararlı halde tij ortası, flanş sıcaklığına göre 1,1 °C daha yüksektir.

Diğer bir dikkat çeken nokta ise, flanşa yakın porselen kısmın, porselenin diğer kısımlarından daha fazla ısındığıdır. Buradan, flanşın sistemi ısıttığı sonucu çıkarılmıştır. Ayrıca geçit izolatörü içerisinde orta kısımlarda aşırı ısı yoğunlaşması olmuştur. Bu bölgenin sıcaklığı (tij ortası), harici kısım ortam sıcaklığından 13,6 °C daha yüksektir. Bu ısı yoğunlaşmasının nedeni, biraz önce belirtilen flanşın sistemi ısıtıcı etkisi ve tijle porselen arasında bulunan hava ısıl iletkenliğinin çok düşük (yaklaşık olarak 0,026 W/mK⁰) olması nedeniyle tij'de oluşan ısının porselene geçişine gösterdiği yüksek dirençtir.

Ayrıca, deneylerde geçit izolatörleri üzerindeki pulların da aşırı ısındığı gözlemlenmiştir. Buradan çıkarılan sonuç ise pulların birer noktasal ısı kaynakları olarak sistemi ısıttıklarıdır.

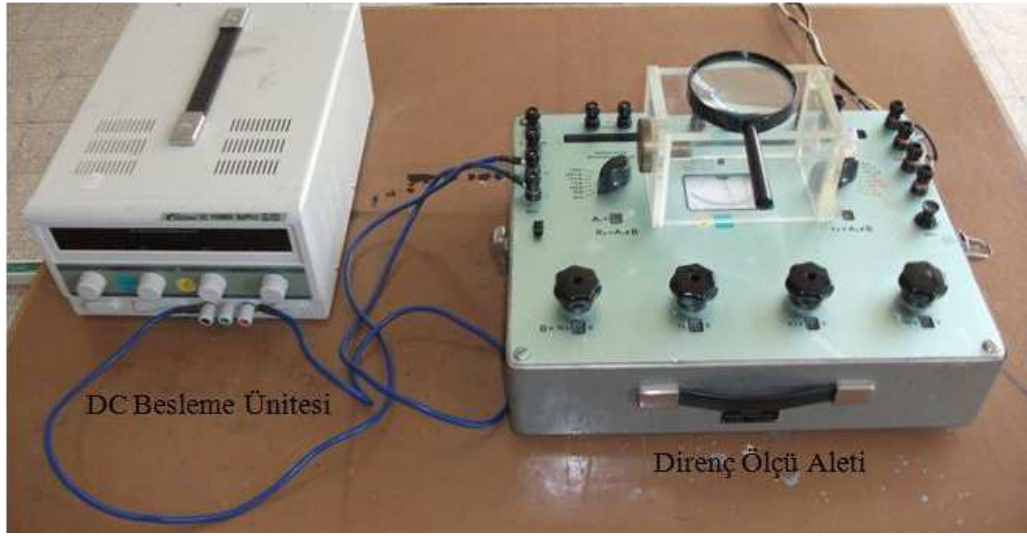
5.1.3 Tij malzemelerinin elektriksel özelliklerinin belirlenmesi

Deneylerde kullanılan alüminyum ve bakır tij'lerin saflık dereceleri ölçtürülmüştür. Alüminyum tij'lerin saflık dereceleri % 96,3, saflığı yüksek alüminyum tij'lerin saflık dereceleri ise %97,4 olarak rapor edilmiştir [28]. Bakır tij'lerin saflık derecesi ise %99,9 olarak rapor edilmiştir [29].

Tij malzemelerinin elektriksel iletkenlik (σ) ve öz direnç (ρ) değerleri hakkında elimizde bir ölçüm bilgisi yoktur. Oysa bu değerler benzetim çalışmaları için büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, deneyler sırasında çeşitli farklı sıcaklıklarda tij DC direnci ölçülerek 20 °C'ye uyarlanmış ve buradan da ortalama bir iletkenlik ve öz direnç değeri hesaplanmıştır. Direnç ölçü aleti ve ölçü sistemi Şekil 5.11'de gösterilmiştir.

Sırasıyla 1000 A alüminyum tij ve bakır tij için ölçülen ve hesaplanan değerler Çizelge 5.4'te verilmiştir. Çizelge 5.4 değerlendirildiğinde, bakır için hesaplanan ortalama elektriksel iletkenlik değeri ($6,06 \cdot 10^7$ S/m) standartta [21] belirtilen değerden ($5,8 \cdot 10^7$ S/m) bir miktar büyüktür. Fakat alüminyum tij'ler için bulunan ortalama elektriksel iletkenlik değeri ($2,95 \cdot 10^7$ S/m) ile standartta [21] belirtilen $3,54 \cdot 10^7$ S/m değer arasında büyük bir farklılık görülmüştür. Saflık derecelerinin iyi

olmasına rağmen alüminyum iletkenlerin elektriksel iletkenlikleri düşük çıkmıştır. Bu da doğal olarak, tij'de daha fazla ısı açığa çıkarması anlamına gelmektedir.



Şekil 5.11 : Direnç ölçüm cihazı ve ölçü düzeni.

Çizelge 5.4 : Çeşitli alüminyum ve bakır tij'lerin ölçülen dirençleri ve hesaplanan büyüklükler.

	$L_{ölçüm}$ (m)	α ($1/^{\circ}C$)	$R_{ölçülen}$ ($\mu\Omega$)	$T_{ölçülen}$ ($^{\circ}C$)	R_{20} ($\mu\Omega$)	σ $\times 10^7$ (S/m)	ρ $\times 10^{-8}$ ($\Omega.m$)
1000A alüminyum (normal)	1	0,00403	44,1	23	43,6	2,93	3,41
	1	0,00403	44,0	24,5	43,2	2,95	3,38
	1	0,00403	44,1	24	43,4	2,94	3,40
1000A alüminyum (saf)	1	0,00403	43,6	22,5	43,2	2,96	3,38
	1	0,00403	43,6	22	43,3	2,95	3,39
1250 A Bakır	0,96	0,0039	16,6	21,5	16,5	6,05	1,65
	0,96	0,0039	16,7	23,5	16,5	6,06	1,65
Alüminyum İçin Ortalama Değerler					43,4	2,94	3,40
Saflığı yüksek alüminyum için Ortalama değerler					43,3	2,96	3,39
Bakır tij için ortalama değerler					16,5	6,06	1,65

5.2 Mevcut Geçit İzolatörlerinin Isıl Deneyleri

5.2.1 Sıcaklık artışı deneyleri

Sıcaklık artışı deneylerinde, geçit izolatörleri ortam koşullarında deneye alınır ve içlerinden çalışma akımları geçirilir. Sistem ısıl dengeye geldiğinde, olası kritik noktaların kararlı hal sıcaklıkları ölçülür. Ayrıca, izolatör iletkeninin direnci, deneye başlamadan önce ve sıcaklık kararlı hala geldikten sonra ölçülür.

Standartta göre, yalıtım malzemesiyle temas eden iletken kısımların kararlı hal sıcaklık değerleri, klemens tipi bağlantılı geçit izolatörleri için en fazla 90 °C olmalıdır [1]. Ayrıca iletken kısımlarda ölçülen en yüksek sıcaklık artış değeri 60 °C'ın altında kalmalıdır.

Kararlı halde, geçit izolatörü iletken kısımlarının en sıcak noktasının θ_M sıcaklığı, standartta belirtilen aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır [1].

$$Q_M = \frac{[3(\frac{R_C}{R_A} \times \frac{1}{\alpha} + \theta_A) - \frac{3}{\alpha} - \theta_1 - \theta_2]^2 \cdot [\theta_1 \times \theta_2]}{3[2(\frac{R_C}{R_A} \times \frac{1}{\alpha} + \theta_A) - \frac{2}{\alpha} - \theta_1 - \theta_2]} \text{ (}^\circ\text{C)} \quad (5.1)$$

θ_A : İletkenin referans sıcaklığı (°C)

θ_B : Kararlı hal için ortam sıcaklığı (°C)

θ_M : İletkenin maksimum sıcaklığı (°C)

θ_1 : İletkenin soğuk olan ucunda ölçülen sıcaklık (°C)

θ_2 : İletkenin sıcak olan ucunda ölçülen sıcaklık (°C)

R_A : Q_A sıcaklığında ölçülen iletken direnci (Ω)

R_C : Belirtilen akımda, kararlı halde ölçülen iletken direnci (Ω)

α : İletkenin, R_A direncinin ölçüldüğü sıcaklıktaki direnç sıcaklık katsayısı (1/°K)

Hesaplanan θ_m sıcaklığının en sıcak nokta olup olmadığını anlamak için (5.2) denkleminde belirtilen M değeri hesaplanır.

$$M = \left[3 \left(\frac{R_C}{R_A} \times \frac{1}{\alpha} + \theta_A \right) - \frac{3}{\alpha} - \theta_1 - \theta_2 \right] - \theta_M \quad (5.2)$$

M değeri eğer pozitifse, iletkenin en yüksek sıcaklığı θ_M olup, bu sıcaklık iletkenin iki ucu arasındaki herhangi bir noktada olabilmektedir. Eğer M değeri negatifse veya sıfırsa, iletkenin en yüksek sıcaklığı θ_2 'dir. En sıcak noktanın, iletkenin iki ucu arasında olması durumunda, soğuk uca olan uzaklığı (5.3) denklemiyle hesaplanmaktadır.

$$L_M = \frac{L}{1 \pm \sqrt{\frac{\theta_M - \theta_2}{\theta_M - \theta_1}}} \text{ (m)} \quad (5.3)$$

L : İletkenin toplam uzunluğu (m)

L_m : İletkenin soğuk ucundan en sıcak noktaya kadar olan uzaklık değeri (m)

İletken üzerindeki en sıcak noktanın sıcaklığı ve bu noktanın soğuk uca olan uzaklığı, standarttaki bağıntılar kullanılarak hesaplanmış ve sonuçlar Çizelge 5.6'da verilmiştir.

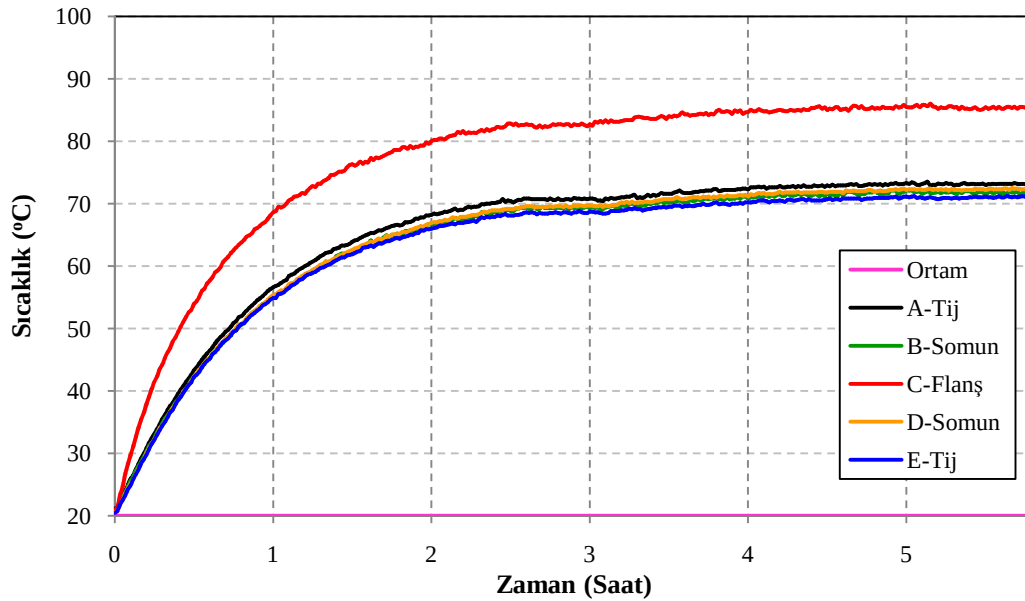
Çizelge 5.5 : 1000 A, saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.

	A	B	C	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları (°C)	75,5	74,4	88,4	74,8	73,7
Sıcaklık artışları (Δ °C)	53,0	51,9	65,9	52,3	51,2
Ortam Sıcaklıkları (°C)		Direnç Değerleri ($\mu\Omega$)			
θ_A	θ_B	R_A		R_C	
22,5	22,5	43,6		53	

Çizelge 5.6 : 1000 A, saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıcaklık (°C)				Uzunluk (mm)
α (1/C)	θ_1	θ_2	θ_M	Δ (θ_M)	L_M
0,00403	74,8	75,5	76,4	53,9	568,8

Çizelge 5.5'den görüldüğü üzere en yüksek sıcaklık değeri flanş bölgesindedir. Fakat, hesaplamalarda, sistemin en yüksek sıcaklık değeri olarak tij üzerindeki sıcaklık değeri dikkate alınmıştır. Sıcaklık ölçümü yapılan noktalardaki sıcaklıkların değişimleri Şekil 5.14'te verilmiştir.



Şekil 5.14 : 1000 A, saflığı yüksek alüminyum tij'li izolatör deneyinde, kritik nokta sıcaklıklarının zamana bağlı değişimi.

İletken için en yüksek sıcaklık artışı A noktasında olup, sıcaklık artışı standartta belirtilen 60 °C'lık sınır değerinden küçük olmasına rağmen sınır değere oldukça yakındır. Flanş bölgesi ise, sistemin en fazla ısınan noktası olup, standartta öngörülen 90 °C'lık üst sınır değere oldukça yakındır.

Sonuç olarak, 1000 A, yüksek saflıklı alüminyum tij'li geçit izolatörünün, kararlı haldeki en yüksek nokta sıcaklığı, sınır değerinin altında, en yüksek sıcaklık artış değerleri de öngörülen sınır değerlerinin altındadır.

1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörüne ait ölçüm sonuçları ve yapılan hesaplamalar sırası ile Çizelge 5.7 ve Çizelge 5.8'de verilmiştir.

Çizelge 5.7 : 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.

	A	B	C	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları (°C)	78,8	78,3	87,7	78,5	78,4
Sıcaklık artışları (Δ °C)	56,4	55,9	65,3	56,1	56
Ortam Sıcaklıkları (°C)		Direnç Değerleri ($\mu\Omega$)			
θ_A	θ_B	R_A		R_C	
23	22,4	44,1		53,1	

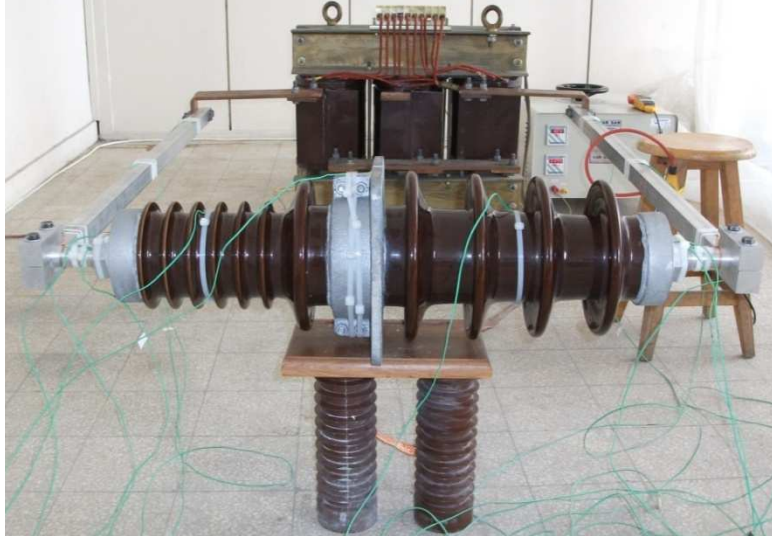
Çizelge 5.8 : 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıcaklık(°C)				Uzunluk(mm)
α (1/C)	θ_1	θ_2	θ_M	Δ (θ_M)	L_M
0,00403	78,5	78,8	78,8	56,4	495,0

Tij üzerindeki sıcaklık artış miktarları değerlendirildiğinde; en yüksek artış A noktasında ve 56,4 °C olarak gerçekleşmiştir. Bu değer, standartta öngörülen 60 °C sınır değerinin altındadır, fakat sınır değere çok yakındır. Sonuç olarak, iletken yüzeyindeki noktaların sıcaklık artış değerleri standartta belirtilen koşulları sağlamakta, fakat flanş sıcaklığı, sıcaklık üst sınır koşuluna oldukça yakındır.

5.2.1.2 1250 A geçit izolatörleri için sıcaklık artışı deneyleri

1250 A geçit izolatörleri için yapılan sıcaklık artışı deneylerinde, Şekil 5.15'te verilen deney düzeneğinde, devreden 1275 A alternatif akım geçirilmiştir. Direnç ölçümleri 960 mm uzunluklu tij için verilmiştir. Ölçüm sonuçları ve yapılan hesaplamalar sırası ile Çizelge 5.9 ve Çizelge 5.10'de verilmiştir.



Şekil 5.15 : 1250 A alüminyum tij’li geçit izolatörü için kurulan deney düzeneği.

Çizelge 5.9 : 1250 A normal alüminyum tij’li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.

	A	B	C	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları (°C)	84,2	85,3	98,0	86,2	85,7
Sıcaklık artışları (Δ °C)	60,5	61,6	74,3	62,5	62,0
Ortam Sıcaklıkları (°C)		Direnç Değerleri ($\mu\Omega$)			
θ_A	θ_B	R_A		R_C	
23,0	23,7	32,0		39,0	

Çizelge 5.10 : 1250 A normal alüminyum tij’li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıcaklık(°C)				Uzunluk(mm)
α (1/C)	θ_1	θ_2	θ_M	Δ (θ_M)	L_M
0,00403	85,3	86,2	86,2	62,5	471,5

Çizelge 5.9 değerlendirildiğinde, tij üzerinde D noktasında oluşan 62,5 °C’lık sıcaklık artışı, standartta öngörülen 60 °C en yüksek sıcaklık artışı koşul değerini sağlamadığı görülmüştür. Flanş sıcaklığı ise 98 °C olup, sıcaklık artışı 74,3 °C dır. Bu değerler de öngörülen üst sıcaklık sınırının üstündedir.

1250 A, içi boş alüminyum tijli geçit izolatörüne ait ölçüm sonuçları ve yapılan hesaplamalar sırası ile Çizelge 5.11 ve Çizelge 5.12’de verilmiştir. Çizelge 5.11 değerlendirildiğinde, tij ve somun sıcaklıkları dikkate alındığında en yüksek sıcaklık artışının 80,7 °C olduğu görülmektedir. Bu değer standartta belirtilen sınır değerinin çok üzerindedir. Ayrıca en yüksek sıcaklıkların 90 °C sınır değerinin de üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Flanş sıcaklığı 99,9 °C olup, sıcaklık artış miktarı 76,5 °C dir ve bu değerler de sınırların üzerindedir.

Çizelge 5.11 : 1250 A içi boş alüminyum tij’li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.

	A	B	C	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları (°C)	98,1	101,3	99,9	104,1	99,1
Sıcaklık artışları (Δ °C)	74,7	77,9	76,5	80,7	75,7
Ortam Sıcaklıkları (°C)			Direnç Değerleri (μΩ)		
θ _A	θ _B	R _A		R _C	
24,0	23,4	50,0		65,0	

Çizelge 5.12 : 1250 A içi boş alüminyum tij’li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıcaklık (°C)				Uzunluk (mm)
α (1/C)	θ ₁	θ ₂	θ _M	Δ (θ _M)	L _M
0,00403	101,3	104,1	104,1	80,7	427,4

5.2.2 Isıl kısa süreli akıma dayanımının doğrulanması deneyi

Isıl kısa süreli akıma dayanımının doğrulanması deneyinde, ortam sıcaklığı 40 °C olacak şekilde ayarlanır ve deney boyunca ortam bu sıcaklıkta sabit tutulur. İzolatörün, iletken anma akımının 25 katı olan akıma dayanımının belirlenmesi için yapılan bir deneydir. Bu değer (5.4) denklemiyle hesaplanır [1].

$$\theta_f = \theta_0 + \alpha \frac{I_{th}^2}{S_t \times S_e} \times t_{th} \text{ (°C)} \quad (5.4)$$

θ_f : İletkenin son sıcaklığı (°C)

θ₀ : 40 °C ortam sıcaklığında, I_r çalışma akım değeri için kararlı halde iletken sıcaklığı (°C)

α : Bakır için 0,8 (K/s) / (kA/cm²)², alüminyum için 1,8 (K/s) / (kA/cm²)² değerlikli katsayı

t_{th} : Kısa süreli akımın süresi (s)

I_{th} : Isıl kısa süreli akım değeri (kA)

S_e : Deri etkisinin hesaba katıldığı kesit alanı (cm²)

S_t : Çalışma değeri (I_r)'ye göre toplam kesit alanı (cm²)'dir.

Standarta göre, iletken son sıcaklığının 180 °C'den küçük olması gerekmektedir. Eğer iletken son sıcaklığı 180 °C'den büyükse, izolatör bir takım ek deneylere tabi tutulur ve geçit izolatörünün ısı kısa süreli akıma dayanımına karar verilir.

Isıl kısa süreli akımına dayanımın doğrulanması deneylerinin yapılması öncesinde bir takım hazırlıklar yapılmıştır. Öncelikle 3 metre genişliğinde, 3 metre boyunda ve 2,10 metre yüksekliğinde galvaniz malzemeden bir deney hücresi oluşturulmuştur. Deney hücresinin dış yüzeyi tek katlı naylon ile kapatılarak ısı yalıtım sağlanmıştır.

Hücreyi ısıtmak üzere toplam gücü 6000 Watt olan üç adet elektrikli ısıtıcı kullanılmıştır. Ortam sıcaklığı 39-41 °C bandında sabit tutulmuştur.

İlk olarak 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörleri için deney yapılmıştır. Deney için hazırlanan hücre Şekil 5.16'de gösterilmiştir. 1000 A, normal alüminyum tijli geçit izolatörüne ait ölçüm sonuçları ve yapılan hesaplamalar sırası ile Çizelge 5.13 ve Çizelge 5.14'de verilmiştir.



Şekil 5.16 : 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörünün ısıl kısa süreli akıma dayanımının doğrulanması deneyi için kurulan deney hücresi.

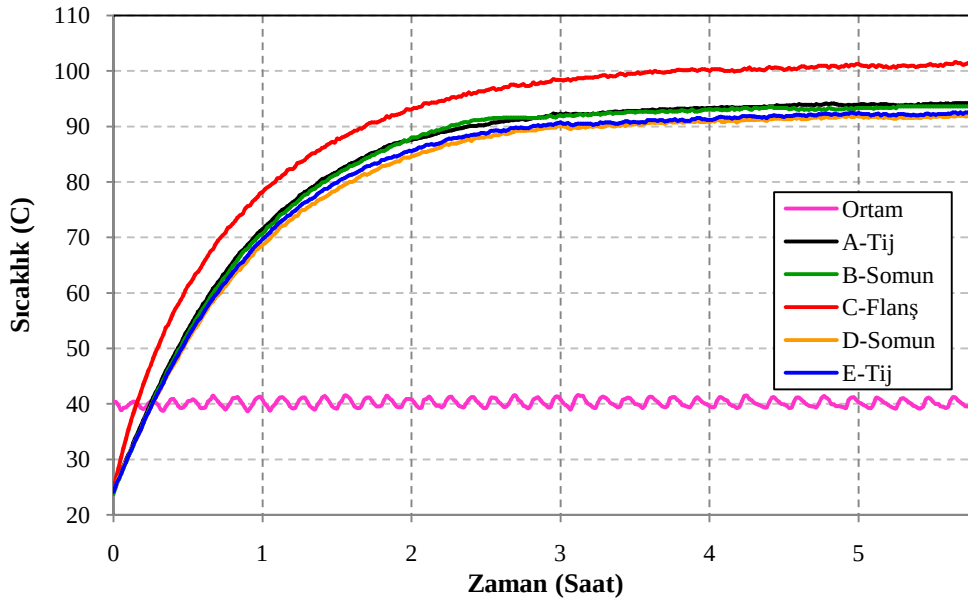
Çizelge 5.13 : 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.

	A	B	C	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları (°C)	94,1	93,5	101,1	91,9	92,5
Ortam Sıcaklıkları (°C)		Direnç Değerleri (μΩ)			
θ_A	θ_B	R_A		R_C	
22,0	40,0	43,5		55,5	

Çizelge 5.14 : 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıcaklık (°C)			
α (1/C)	θ_1	θ_2	θ_0	θ_f
0,00403	92,5	94,1	94,1	112,1

Sıcaklık ölçümü yapılan noktalardaki sıcaklıkların değişimleri Şekil 5.17'de verilmiştir.



Şekil 5.17 : 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörünün ısı kısa süreli akıma dayanımının doğrulanması deneyi için kritik noktalardan alınan sıcaklık verilerinin zamana bağlı değişimi.

Çizelge 5.14 incelendiğinde, 112,1 °C olarak hesaplanan en yüksek kararlı hal sıcaklığı, standartta belirtilen 180 °C üst sınır değerinin altındadır. Flanş sıcaklığı dikkate alınarak hesaplanan iletken son sıcaklık değeri 119,1 °C olup bu değer de sınır değerinin altındadır.

1000 A saflığı yüksek alüminyum tijli geçit izolatörüne ait ölçüm sonuçları ve yapılan hesaplamalar sırası ile Çizelge 5.15 ve Çizelge 5.16'de verilmiştir.

Çizelge 5.15 : 1000 A saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları.

	A	B	C	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları (°C)	92,2	92,8	101,1	93	92,6
Ortam Sıcaklıkları (°C)		Direnç Değerleri (μΩ)			
θ_A	θ_B	R_A		R_C	
22,0	40,0	43,6		55,3	

Çizelge 5.16 : 1000 A saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıcaklık (°C)			
α (1/°C)	θ_1	θ_2	θ_0	θ_f
0,00403	92,8	93	93,0	111,0

Sıcaklık ölçümü yapılan noktalardaki sıcaklıkların değişimleri Şekil 5.17'de verilmiştir.

Çizelge 5.16 incelendiğinde, tij ve somun sıcaklıkları dikkate alındığında iletken son sıcaklığının 111 °C olduğu ve 180 °C'lık sınır değerin altında olduğu görülür. Flanş sıcaklığı dikkate alındığında ise iletken son sıcaklığı 119,1 °C olarak hesaplanacak olup yine sınır değeri aşma durumu yoktur.

5.3 Isıl Performansın İyileştirilmesine Yönelik Deneysel Çalışmalar

Sıcaklık artış deneyi ve ısı kısa süreli akıma dayanımının doğrulanması deneyi sonuçları incelendiğinde, sıcaklık artışı deneyinin daha kritik olduğu görülmüştür. Bu yüzden, ısı performansın iyileştirilmesine yönelik çalışmalar, sıcaklık artışı deneyi üzerine yoğunlaşmıştır.

Öncelikle 17,5 mm yarıçaplı, saflığı yüksek alüminyum, bakır ve bakır giydirilmiş alüminyum tij'li geçit izolatörleri üzerindeki ısı dağılımları incelenmiştir. İkinci kısımda, flanştaki aşırı ısınmanın kaynağı araştırılmış ve flanş sıcaklığının tij üzerindeki sıcaklık dağılımına olan etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Daha sonra bağlantı pullarındaki ısınmanın geçit izolatörü üzerindeki kritik noktalara olan etkisi araştırılmıştır. Son olarak ise geçit izolatöründe kullanılan porselen hammaddesinin ısı iletkenlik katsayısının sıcaklık dağılımına etkisi araştırılmıştır.

5.3.1 İletken malzemesinin incelenmesi

Geçit izolatörlerinde meydana gelen ısınmanın ağırlıklı olarak tij'den kaynaklı olduğu açıktır. Tij'de meydana gelecek ısı iyileşme, geçit izolatörünün daha iyi ısı performansına kavuşmasını sağlayacaktır. İletken malzemelerin ısı performansları üzerindeki etkilerinin kıyaslanması amacıyla, 1000 A geçit izolatörleri için 32 mm çaplı alüminyum ve 32 mm bakır tij göz önüne alınmıştır. 1250 A geçit izolatörleri için ise 35 mm çaplı alüminyum, 35 mm bakır ve 35 mm bakır giydirilmiş alüminyum tij'in ısı performansları araştırılmıştır. Ayrıca 38 mm çapındaki alüminyum ve 38 mm bakır tij de kendi aralarında kıyaslanmıştır.

5.3.1.1 Alüminyum iletken

Isı performansı araştırılacak olan alüminyum iletkenler 32 mm, 35 mm ve 38 mm çaplıdır. 1000 A geçit izolatörleri için 32 mm ve 1250 A için 38 mm çaplı

alüminyum tij'li geçit izolatörlerinin sıcaklık artışı deneylerinin sonuçları mevcuttur. Bu yüzden, 1250 A için sadece 35 mm çaplı alüminyum tij'li geçit izolatörünün sıcaklık artışı deneyi gerçekleştirilmiştir.

35 mm çaplı alüminyum tij'li geçit izolatörü oluşturulurken; 1250 A sıcaklık artışı deneylerinde kullanılan porselen kısmın içerisine somunsuz ve pulsuz haliyle 35 mm çapındaki alüminyum tij yerleştirilmiştir. Porselenle tij arasındaki hava boşluğunun dış ortamla irtibatını engellemek amacıyla tijle porselen kepi arasına sıcaklıkla eriyen kauçuk bant sarılmıştır. Ayrıca bağlantı iletkeninin kesiti ($12,25 \text{ cm}^2$) değişmemek koşuluyla 35 mm çapındaki tij'e uygun yeni bağlantı baraları yaptırılmıştır. 1250 A, 35 mm çaplı alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları ile hesaplama sonuçları sırasıyla Çizelge 5.17 ve Çizelge 5.18'de verilmiştir.

Çizelge 5.17 : 1250 A, 35 mm çaplı alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.

	A	B	C	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları ($^{\circ}\text{C}$)	86	87,5	96,8	87,7	86,8
Sıcaklık artışları ($\Delta \text{ }^{\circ}\text{C}$)	63,4	64,9	74,2	65,1	64,2
Ortam Sıcaklıkları ($^{\circ}\text{C}$)			Direnç Değerleri ($\mu\Omega$)		
θ_A	θ_B	R_A		R_C	
24,5	22,6	32,6		40,0	

Çizelge 5.18 : 1250 A, 35 mm çaplı alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı ($1/^{\circ}\text{C}$)	Sıcaklık($^{\circ}\text{C}$)				Uzunluk (mm)
$\alpha (1/^{\circ}\text{C})$	θ_1	θ_2	θ_M	$\Delta (\theta_M)$	L_M
0,00403	87,5	87,7	87,7	65,1	477,6

Çizelge 5.18 değerlendirildiğinde, tij ve somun sıcaklıkları dikkate alındığında, en yüksek sıcaklık artışının $65,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olduğu ve $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 'lik sınır değeri aştığı görülmektedir. Flanşa meydana gelen sıcaklık artış miktarı $74,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$ olup, standartta belirtilen sınır değerden yüksektir.

5.3.1.2 Bakır iletken

Bakır iletkenlerin ısı performanslarının kıyaslanması amacıyla 32mm, 35 mm ve 38 mm çapına sahip bakır tijler geçit izolatörlerinde kullanılmıştır. 32 mm çaplı bakır tij, 1000 A sıcaklık artışı deneylerinde kullanılan porselenin içerisine geçirilmiş ve tiji sabitlemek amacıyla yine 1000 A sıcaklık artışı deneylerinde kullanılan pul ve

somunlarla sıkılmıştır. 1000 A, 32 mm çaplı bakır tij’li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları ile hesaplama sonuçları sırasıyla Çizelge 5.19 ve Çizelge 5.20’de verilmiştir.

Çizelge 5.19 : 1000 A, 32 mm çaplı bakır tij’li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.

	A	B	C	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları (°C)	66,2	66,6	86,8	65,1	65,3
Sıcaklık artışları (Δ °C)	43,1	43,5	63,7	42	42,2
Ortam Sıcaklıkları (°C)			Direnç Değerleri ($\mu\Omega$)		
θ_A	θ_B	R_A		R_C	
23,5	23,1	22,5		26,4	

Çizelge 5.20 : 1000 A, 32 mm çaplı bakır tij’li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıcaklık (°C)				Uzunluk (mm)
α (1/C)	θ_1	θ_2	θ_M	Δ (θ_M)	L_M
0,0039	65,3	66,6	69,0	45,9	554,3

Çizelge 5.20 değerlendirildiğinde, tij ve somun sıcaklıkları dikkate alındığında, en yüksek sıcaklık artışı 45,9 °C olarak hesaplanmıştır. Bu değer, standartta belirtilen 60 °C’lık sınır değerinden küçüktür. Flanş sıcaklığının artış miktarı ise standartta belirtilen en yüksek sıcaklık artış değerinden yüksektir. 1250 A, 35 mm çaplı bakır tij’li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları ile hesaplama sonuçları sırasıyla Çizelge 5.21 ve Çizelge 5.22’de verilmiştir.

Çizelge 5.21 : 1250 A, 35 mm çaplı bakır tij’li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.

	A	B	C	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları (°C)	72,1	72,6	95,1	70,5	72,6
Sıcaklık artışları (Δ °C)	50,0	50,5	73,0	48,4	50,5
Ortam Sıcaklıkları (°C)			Direnç Değerleri ($\mu\Omega$)		
θ_A	θ_B	R_A		R_C	
23,5	22,1	16,7		20,0	

Çizelge 5.22 : 1250 A, 35 mm çaplı bakır tij’li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıcaklık (°C)				Uzunluk(mm)
α (1/C)	θ_1	θ_2	θ_M	Δ (θ_M)	L_M
0,0039	72,6	72,6	75,0	52,9	480,0

Çizelge 5.22'den de görüleceği üzere, tij ve flanş sıcaklıkları dikkate alındığında oluşan en yüksek sıcaklık artışı 52,9 °C olup, bu değer sınır değerinin altındadır. Flanş sıcaklığı dikkate alınarak bulunacak sıcaklık artış değeri ise sınır değerinin üzerindedir. 1250 A, 38 mm çaplı bakır tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları ile hesaplama sonuçları sırasıyla Çizelge 5.23 ve Çizelge 5.24'te verilmiştir.

Çizelge 5.23 : 1250 A, 38 mm çaplı bakır tij'li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.

	A	B	C	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları (°C)	69,8	67,5	96,6	69	69,2
Sıcaklık artışları (Δ °C)	46,5	44,2	73,3	45,7	45,9
Ortam Sıcaklıkları (°C)			Direnç Değerleri ($\mu\Omega$)		
θ_A	θ_B		R_A	R_C	
23,3	23,3		15,0	18,1	

Çizelge 5.24 : 1250 A, 38 mm çaplı bakır tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıcaklık (°C)				Uzunluk(mm)
α (1/C)	θ_1	θ_2	θ_M	Δ (θ_M)	L_M
0,0039	69,2	69,8	79,7	56,4	487,1

Çizelge 5.24'ten de görüleceği üzere, tij ve flanş sıcaklıkları dikkate alındığında en yüksek sıcaklık artışı 56,4 °C olup, sınır değerinin altındadır. Flanş bölgesindeki sıcaklık artışı ise sınır değerinin üzerindedir.

5.3.1.3 Bakır giydirilmiş alüminyum iletken

Bakır giydirilmiş alüminyum iletkenin çapı 35 mm'dir. Bu silindrsel yapının dıştan 1,75 mm'si bakır, geri kalan kısmı ise alüminyumdur.

Bakır giydirilmiş alüminyum tij'li geçit izolatöründe somunlar ve pullar kullanılmamıştır. 1250 A, 35 mm çaplı bakır giydirilmiş alüminyum tij'li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları ile hesaplama sonuçları sırasıyla Çizelge 5.25 ve Çizelge 5.26'da verilmiştir.

Çizelge 5.26 yorumlanacak olunursa, tij ve somun sıcaklıkları dikkate alındığında en yüksek sıcaklık artışı 68,5 °C olup, sınır değerlerinin üzerindedir. Flanş bölgesinde meydana gelen sıcaklık artışı ise sınır değerinin çok üzerindedir.

32 mm çaplı normal alüminyum tijli geçit izolatörü ve bakır tijli geçit izolatörü ile yapılan sıcaklık artış deneylerinin sonuçları değerlendirildiğinde, tij malzemesinin

normal alüminyum yerine bakır olması durumunda sıcaklık ölçüm noktalarındaki % azalmalar Çizelge 5.27'de hesaplanmıştır.

Çizelge 5.25 : 1250 A, 35 mm çaplı bakır giydirilmiş alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.

	A	B	C	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları (°C)	82,2	83,8	95,5	82,6	82,2
Sıcaklık artışları (Δ °C)	60,8	62,4	74,1	61,2	60,8
Ortam Sıcaklıkları (°C)		Direnç Değerleri ($\mu\Omega$)			
θ_A	θ_B	R_A		R_C	
23,5	21,4	26,7		33,6	

Çizelge 5.26 : 1250 A, 35 mm çaplı bakır giydirilmiş alüminyum tij'li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıcaklık(°C)				Uzunluk (mm)
α (1/C)	θ_1	θ_2	θ_M	Δ (θ_M)	L_M
0,00403	82,6	83,8	89,9	68,5	501,7

Çizelge 5.27 : 32 mm çaplı geçit izolatörünün tij malzemesinin değişimiyle kritik noktarda elde edilen % azalma miktarları.

Büyüklik	Sıcaklıklar (°C)				
	A	B	C	D	E
Δ_1	23,6	22,2	2,5	25,1	24,6
Ortalama Δ_1	23,9				

Çizelge 5.27'de Δ sıcaklık artış değerini, Δ_1 ise alüminyum iletken yerine bakır iletken kullanılması halinde sıcaklık artış miktarlarındaki % azalışı göstermektedir. Flanş sıcaklığındaki % azalış dikkate alınmazsa, ortalama %23,9 luk bir azalma meydana gelmiştir. Bu azalma, beklenen bir değer olup bakırın alüminyuma göre daha yüksek iletkenliğe sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Somun ve pul kullanılmayan 35 mm çaplı alüminyum tijli , bakır tijli ve bakır giydirilmiş alüminyum tijli geçit izolatörlerinde tij malzemesinin değiştirilmesiyle kararlı hal için sıcaklık ölçüm noktalarındaki % azalmalar Çizelge 5.28'de hesaplanmıştır

Çizelge 5.28'de Δ , havaya göre sıcaklık artış değerini; Δ_a alüminyum iletken yerine bakır iletken kullanılması halinde sıcaklık artış değerindeki % azalışı, Δ_b ise alüminyum iletken yerine bakır giydirilmiş alüminyum iletken kullanılması halinde sıcaklık artış miktarlarındaki % azalışı göstermektedir. Flanş sıcaklıklarındaki % azalış dikkate alınmazsa, bakır iletken ve bakır kaplı alüminyum iletken kullanılması

durumlarında alüminyum iletken kullanılması durumuna göre kritik noktalarda sırasıyla ortalama % 22,6 ve % 4,8 düşüş meydana gelmiştir. 1,75 mm bakır giydirilmiş alüminyum iletken kullanıldığı durumdaki sıcaklık düşüşleri beklenen düzeydedir, fakat yeterli değildir.

Çizelge 5.28 : 35 mm çaplı geçit izolatörünün tij malzemesinin değişimiyle kritik noktalarda elde edilen % azalma miktarları.

Büyüklik	Sıcaklıklar (°C)				
	A	B	C	D	E
Δ_a	21,1	22,2	1,6	25,7	21,3
Δ_b	4,1	3,9	0,1	6,0	5,3
Ortalama Δ_a	22,6				
Ortalama Δ_b	4,8				

Sonuç olarak bakır giydirilmiş alüminyum iletkenli geçit izolatörü geliştirilmesiyle bir miktar sıcaklık düşüşü sağlanmaktadır ve bakır kaplama oranının artırılmasıyla sıcaklık düşüşleri daha da artacaktır.

38 mm çaplı normal alüminyum tijli geçit izolatörü ve bakır tijli geçit izolatörü ile yapılan sıcaklık artış deneylerinin sonuçları değerlendirildiğinde, tij malzemesinin normal alüminyum yerine bakır olması durumunda sıcaklık ölçüm noktalarındaki % azalmalar Çizelge 5.29'da hesaplanmıştır.

Çizelge 5.29 : 38 mm çaplı geçit izolatörünün tij malzemesinin değişimiyle kritik noktalarda elde edilen % azalma miktarları.

Büyüklik	Sıcaklıklar (°C)				
	A	B	C	D	E
Δ_2	23,1	28,2	1,3	26,9	26,0
Ortalama Δ_2	26,1				

Çizelge 5.29'da Δ , sıcaklık artış değerini, Δ_2 ise alüminyum iletken yerine bakır iletken kullanılması halinde sıcaklık artış değerindeki % azalışı göstermektedir. Flanş sıcaklıklarındaki % azalma dikkate alınmadığında, ortalama % 26,1 sıcaklık düşüşü meydana gelmiştir.

5.3.2 Flanştaki aşırı ısınmanın incelenmesi

Sıcaklık artışı ve ısı kısa süreli akıma dayanımının doğrulanması deneylerinde, 1000 A ve 1250 A'lık geçit izolatörlerinin flanş bölgelerinin aşırı ısındıkları gözlemlenmiştir. Bu kısımda flanş bölgesinde oluşan aşırı ısınma olayı incelenmiştir.

5.3.2.1 Flanştaki aşırı ısınmanın kaynağı

Öncelikle 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatöründeki porselen kısım çıkarılmıştır. Burada amaç, flanştaki aşırı ısınmanın tijde meydana gelen ısınma ile ilişkili olup olmadığının belirlenmesidir. Porseleni olmayan geçit izolatörü, sadece tij ve flanş olacak şekilde, açık ortamda deneye tabi tutulmuştur. Şekil 5.18'de kurulan deney düzeneği verilmiştir.

16,4 °C ortam sıcaklığında, kararlı haldeki flanş sıcaklığı 87 °C olarak ölçülmüştür. Bu değer porselenli eşdeğer izolatör için bulunan sonuçla aynıdır. Bu sonuç, flanştaki aşırı ısınmanın tij sıcaklığından kaynaklanmadığını göstermiştir.

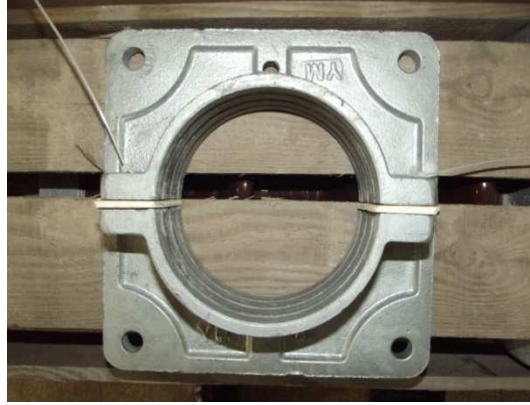
Bir diğer deneysel çalışmada flanş iki parçaya ayrılmış, civataları sökülmüş ve flanşın iki parçası arasına Şekil 5.19'da gösterildiği gibi 0,3 cm kalınlığında yalıtkan malzeme konulmuştur. Bu deney, ısınmanın manyetik temelli olup olmadığının araştırılması için yapılmıştır. Flanş iki parçaya bölünerek, girdap akımları için bir relüktans oluşturulmuştur. 2 parçalı flanş kullanılan eşdeğer izolatörün sıcaklık artışı deneyinde, 16,5 °C ortam sıcaklığında flanş sıcaklığı 58 °C olarak ölçülmüştür. Bu sonuç, flanştaki aşırı ısınmanın flanş yüzeyinde akan girdap akımlarından kaynaklandığını göstermiştir.



Şekil 5.18 : Porseleni çıkarılmış 1000 A'lık normal alüminyum tijli geçit izolatörünün deney düzeneği.

Son olarak, porselen olmaksızın, tij etrafına alüminyum halka, demir halka ve 2 parçalı flanş konulmuştur ve 1020 A'de sıcaklık artışı deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 5.20'de verilmiştir. Deney 17,4 °C ortam sıcaklığında yapılmıştır. Kararlı halde, alüminyum halkanın sıcaklığı 20,9 °C, demir halkanın sıcaklığı 42,9 °C ve 2 parçalı flanşın sıcaklığı ise 58,4 °C olarak ölçülmüştür. Bu

sonuçlar, flanşın ferromanyetik malzemeden yapılmaması gerektiğini ve eğer yapılacaksa boyutunun olabildiğince küçük tutulması gerektiğini göstermiştir.



Şekil 5.19 : İki parçalı flanş.



Şekil 5.20 : Aynı düzleme dizilmiş alüminyum halka, 2 parçalı döküm flanş ve demir halkadan oluşan deney düzeneği.

5.3.2.2 Flanş sıcaklığının tij sıcaklığına etkisinin incelenmesi

Bu kısımda, flanş bölgesinde meydana gelen aşırı ısınmanın tij sıcaklıklarına olan etkisi incelenmiştir. 1000 A normal alüminyum tij’li geçit izolatörünün sıcaklık artışı deneyi yeniden yapılmıştır.

1000 A, 32 mm çaplı alüminyum tij’li geçit izolatörü için ölçüm sonuçları ile hesaplama sonuçları sırasıyla Çizelge 5.30 ve Çizelge 5.31’de verilmiştir.

İkinci deneysel çalışma olarak flanşsız eşdeğer izolatörün sıcaklık artışı deneyi gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinde, flanş tamamen geçit izolatörü üzerinden sökülmüştür. 1000 A, 32 mm çaplı alüminyum tij’li flanşsız geçit izolatörü için ölçüm sonuçları ile hesaplama sonuçları sırasıyla Çizelge 5.32 ve Çizelge 5.33’te

verilmiştir. 1000 A normal alüminyum tij’li geçit izolatörüyle flanşlı ve flanşsız olarak yapılan sıcaklık artış deneylerinde tij üzerindeki sıcaklık artış değerleri ve % olarak sıcaklık artış miktarında meydana gelen azalmalar Çizelge 5.34’te verilmiştir. Burada, Δ_c ve Δ_d sırasıyla flanşlı ve flanşsız durumlardaki sıcaklık artış miktarlarını göstermektedir. Çizelge 5.34’ten de görüldüğü üzere, flanş nedeniyle (flanşlı izolatör) tij sıcaklığında yaklaşık %4 mertebesinde bir sıcaklık artışı olmaktadır.

Çizelge 5.30 : 1000 A, 32 mm çaplı alüminyum tij’li geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.

	A	B	C	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları (°C)	74,8	73,6	95	76	77,1
Sıcaklık artışları (Δ °C)	53,1	51,9	73,3	54,3	55,4
Ortam Sıcaklıkları (°C)		Direnç Değerleri ($\mu\Omega$)			
θ_A	θ_B	R_A		R_C	
23	21,7	43,6		51,9	

Çizelge 5.31 : 1000A, 32 mm çaplı alüminyum tij’li geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıcaklık (°C)				Uzunluk (mm)
α (1/C)	θ_1	θ_2	θ_M	Δ (θ_M)	L_M
0,00403	74,8	77,1	77,1	55,4	466,4

Çizelge 5.32 : 1000 A, 32 mm çaplı alüminyum tij’li flanşsız geçit izolatörü için yapılan ölçüm sonuçları.

	A	B	Flanş Altındaki Bölge	D	E
Kararlı hal sıcaklıkları (°C)	73,0	71,5	31,4	73,9	74,7
Sıcaklık artışları (Δ °C)	51,0	49,5	9,4	51,9	52,7
Ortam Sıcaklıkları (°C)		Direnç Değerleri ($\mu\Omega$)			
θ_A	θ_B	R_A		R_C	
24,0	22	44,1		51,4	

Çizelge 5.33 : 1000A, 32 mm çaplı alüminyum tij’li flanşsız geçit izolatörü için yapılan hesaplama sonuçları.

Sıcaklık Katsayısı (1/°C)	Sıcaklık (°C)				Uzunluk(mm)
α (1/C)	θ_1	θ_2	θ_M	Δ (θ_M)	L_M
0,00403	73	74,7	74,7	52,7	483,9

Yapılan diğer bir deneysel çalışmada, 1000 A’lık normal alüminyum tij, daha önceki deneylerde kullanılmış olan eski 1000 A’lık bir geçit izolatörüne takılmıştır. Oluşturulan geçit izolatörü tekrar sıcaklık artışı deneyine tabi tutulmuştur. Bu deneydeki amaç da flanşın tij sıcaklıklarına olan etkisinin belirlenmesidir.

Sistem sıcaklıkları kararlı hale geldikten sonra, sistem çalışır durumdayken, flanş sök÷lmüş ve flanş sıcaklığını ölçen ısı çift porselenin ortasına takılmıştır. Flanşın sök÷lmesinin ardından sistemin tekrar kararlı hale gelmesi için belirli bir süre beklenilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 5.35'te verilmiştir.

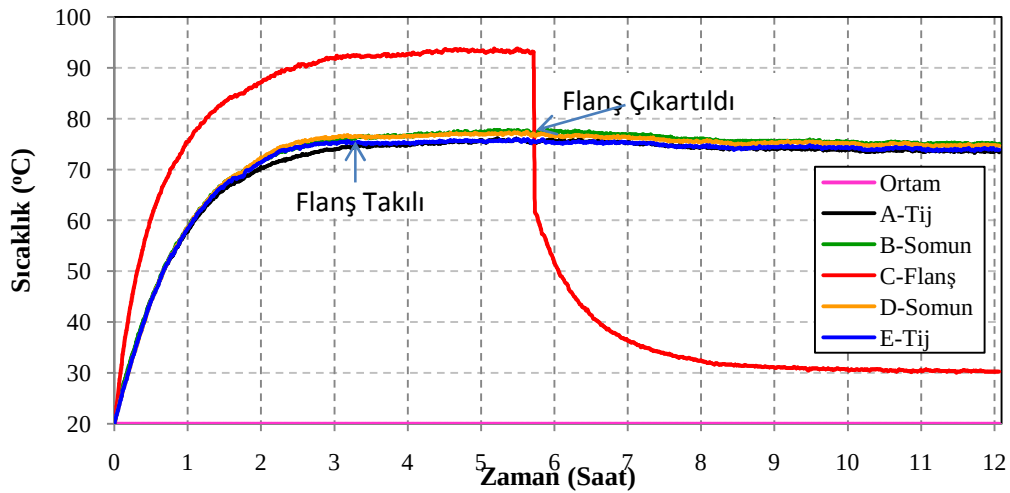
Çizelge 5.34 : 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörü için flanşlı ve flanşsız olarak ölç÷len sıcaklık artış değerleri.

Büyük÷lük	Sıcaklıklar (°C)			
	A	B	D	E
Δ_c	53,1	51,9	54,3	55,4
Δ_d	51	49,5	51,9	52,7
$\Delta_c - \Delta_d$	2,1	2,4	2,4	2,7
% ($\Delta_c - \Delta_d$)	4,0	4,6	4,4	4,9

Çizelge 5.35 : 1000 A alüminyum tijle flanşlı ve flanşsız olarak yapılan sıcaklık artışı deneylerinin hesaplama sonuçları.

Büyük÷lük	Sıcaklıklar (°C)			
	A	B	D	E
Δ_e	55,4	57,5	57,2	55,7
Δ_f	53,7	55,1	54,8	53,9
$\Delta_e - \Delta_f$	1,7	2,4	2,4	1,8
% ($\Delta_e - \Delta_f$)	3,1	4,2	4,2	3,2

Çizelge 5.35'te, Δ_e flanşlı halde ortam sıcaklığına göre meydana gelen sıcaklık artış miktarını, Δ_f ise flanşsız halde ortam sıcaklığına göre meydana gelen sıcaklık artış miktarını göstermektedir. Flanşlı ve flanşsız durum için kritik noktalardan alınan sıcaklık ölç÷mlerinin zamana bağılı değişimi Şekil 5.21'de verilmiştir.



Şekil 5.21 : Tüm deney boyunca (birinci ve ikinci kararlı hal dahil olmak üzere) kritik noktalardan alınan sıcaklık verilerinin zamana bağılı değişimi.

Çizelge 5.34 ve Çizelge 5.35'ten açıkça görülmektedir ki, flaşın geçit izolatörü üzerinden çıkarılmasıyla somun sıcaklıkları ortalama olarak 2,4 °C (%4,4) kadarlık bir düşüş ve tij sıcaklıklarında ise 2,1 °C (%3,8)'lik bir düşüş meydana gelmektedir. Sonuç olarak flaşın geçit izolatörü üzerinde ısıtıcı bir etkisi vardır ve flaş malzemesin manyetik olmayan bir maddeden yapılması gerekmektedir.

5.3.3 Bağlantı pullarının incelenmesi

Ön deneylerde, geçit izolatörlerinde kullanılan pulların noktasal bir ısı kaynağı olarak sistemi ısıttığı gözlemlenmiştir. Bu kısımda bağlantı pullarının tij sıcaklıklarına olan etkileri incelenmiştir.

1000 A normal alüminyum tij, somunlar ve pullarla birlikte sıcaklık artışı deneyine alınmıştır. Sistem kararlı hale eriştikten sonra, somunlara sıkıca birleştirilmiş olan pullar somunlardan ayrılmıştır. Pulların sökülmesinin ardından sistemin tekrar kararlı hale gelmesi için belirli bir süre beklenilmiştir. Her iki kararlı durum için elde edilmiş olan ortam sıcaklığına göre sıcaklık artış miktarları ve sıcaklık artış miktarlarında meydana gelen % sıcaklık düşüşleri Çizelge 5.36'da verilmiştir.

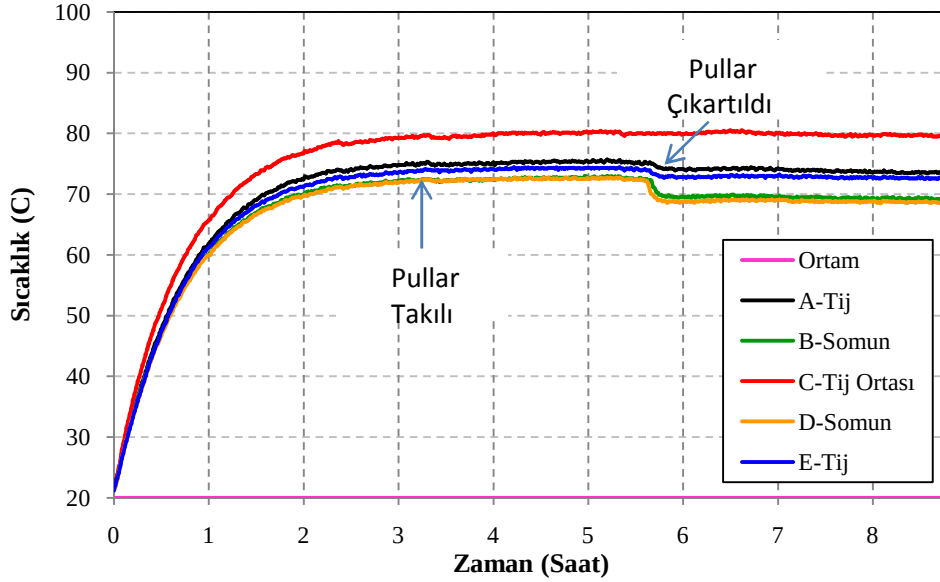
Çizelge 5.36 : Birinci kararlı hal ve ikinci kararlı halde sıcaklık artış değerleri.

Büyükölç	Sıcaklıklar (°C)				
	A	B	C-Tij Ortası	D	E
Δ_g	54,9	52,5	59,5	52,3	53,9
Δ_h	53,3	49	59,3	48,6	52,5
$\Delta_g - \Delta_h$	1,6	3,5	0,2	3,7	1,4
$\%(\Delta_g - \Delta_h)$	2,9	6,7	0,3	7,1	2,6

Çizelge 5.36'da, Δ_g pulların somunlara bitişik olması halinde ortam sıcaklığına göre meydana gelen sıcaklık artış miktarını, Δ_f ise pulların sökülmüş olması halinde ortam sıcaklığına göre meydana gelen sıcaklık artış miktarını göstermektedir. Sıcaklık artışı deneyi süresince kritik noktalardan alınan sıcaklık ölçümlerinin zamana bağlı değişimi Şekil 5.22'de verilmiştir.

Çizelge 5.36 yorumlandığında, pulların sistemde olmadığı durumda, tij sıcaklıklarında ortalama 1,5 °C (% 2,8) azalma, somun sıcaklıklarında ise ortalama 3,6 °C (% 6,9) azalma gözlemlenmiştir. Somun sıcaklıklarında meydana gelen yüksek azalmanın nedeni pulların noktasal bir ısı kaynağı gibi davranarak, somunları daha çok ısıtmasıdır. Ayrıca tij ortasındaki sıcaklıkta 0,2 °C (% 0,3) sıcaklık azalmasının nedeni ise, yine pulların noktasal ısı kaynağı gibi davranmasından dolayı

kendilerinden uzak nokta (tij ortasını) sıcaklıklarına daha fazla etki etmemeleridir. Sonuç olarak pulların, noktasal ısı kaynakları gibi davranıp kendilerine yakın tij ve somun sıcaklıklarını etkiledikleri ve bu etkiyi ortadan kaldırmak için, manyetik olmayan malzemeden yapılmış pulların kullanılması gereklidir.



Şekil 5.22 : Sıcaklık artışı deneyi boyunca kritik nokta sıcaklıklarının zamanla değişimi.

5.3.4 Porselenin etkisinin incelenmesi

Bu kısımda geçit izolatörü porselen hammaddesinin tij üzerindeki sıcaklık dağılımına etkisi incelenecektir.

5.3.4.1 Porselen varlığının tij ve somun sıcaklığına etkisi

Bu bölümde, izolatör hammaddesinin sıcaklık artışı deneylerine olan etkisi incelenmiştir. Bu amaçla normal bir izolatör, izolatör tiji (porselen yoktur) ve farklı hammaddeli (yüksek alüminalı) porselen kullanılarak sıcaklık artışı deneyleri yapılmıştır. Çizelge 5.37'de 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörü ile, sadece normal alüminyum tij, somunlar ve bağlantı pullarından oluşan porselensiz ve flanşsız bir sistemin sıcaklık artışları kıyaslamalı olarak verilmiştir. Burada Δ_i , 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörü için sıcaklık artış değerlerini, Δ_k ise 1000 A normal alüminyum tij, somunlar ve pullardan oluşan deney düzeneğinin sıcaklık artışı değerlerini göstermektedir.

Çizelge 5.37'nin sonuçları değerlendirildiğinde, porselen kısım çıkarıldığında, kararlı halde, tij'de ortalama 1,8 °C (% 3,3) ve somunda ise ortalama 3,6 °C (% 6,5) sıcaklık azalması olmuştur. Bunun nedeni porselenle tij arasındaki hava tabakasının ısıl direncinin yüksek olmasıdır. Sonuç olarak porselen içerisinde, tij ortasında aşırı bir ısıl yoğunlaşma meydana gelmekte ve bu yoğunlaşma da tij üzerindeki sıcaklıkları yükseltmektedir.

Çizelge 5.37 : Kritik noktaların sıcaklık artış değerleri.

Büyüklik	Sıcaklıklar (°C)			
	A	B	D	E
Δ_i	56,4	55,9	56,1	56
Δ_k	54,9	52,5	52,3	53,9
$\Delta_i - \Delta_k$	1,5	3,4	3,8	2,1
% ($\Delta_i - \Delta_k$)	2,7	6,1	6,8	3,8

5.3.4.2 Farklı ısıl iletkenlikli porselen malzemesinin kullanılması

Bu kısımda, farklı ısıl iletkenlikli porselen malzemelerinin geçit izolatörlerinde kullanılması durumunda tij ve somun sıcaklıklarındaki değişimler incelenmiştir. Geçit izolatörlerinde kullanılan porselen, belirli oranlardaki karışımlardan oluşmaktadır. Alümina maddesinin karışımdaki oranının yükselmesi, porselenin ısıl iletkenliğini yükseltir. Buradan hareketle, normal alumina kullanılan geçit izolatörleri ile yüksek alüminaya sahip geçit izolatörlerinin ısıl performansları karşılaştırılmıştır.

Kullanılabilen geçit izolatörleri için porselen ısıl iletkenlikleri 1,5 (W/m⁰K) olarak ölçülmüştür [30]. Yüksek alüminalı porselenin ısıl iletkenlik ölçümü yapılmamakla beraber, değerinin 1,5 (W/m⁰K) değerinden yüksek olduğu tahmin edilmektedir.

1000 A normal alüminyum tijli yüksek alüminalı porselene sahip geçit izolatörü için de sıcaklık artışı deneyi yapılmıştır. Mevcut ve yüksek alüminalı porselene sahip geçit izolatörleri için kritik noktalardan elde edilen sıcaklık artış miktarları Çizelge 5.38'de verilmiştir. Çizelge 5.38'de Δ_m ve Δ_n sırasıyla mevcut ve yüksek alüminalı porselene sahip geçit izolatörleri için sıcaklık artış miktarlarını göstermektedir.

Çizelge 5.38 değerlendirildiğinde, A, B ve D noktalarında önemli bir sıcaklık azalması olmadığı, E noktasında ise 1,4 °C (% 2,5) azalma olduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 5.38 : Mevcut ve yüksek alüminalı porselene sahip 1000 A geçit izolatörlerinin sıcaklık artışı kıyaslaması.

Büyüklik	Sıcaklıklar (°C)				
	A	B	C	D	E
Δ_m	56,4	55,9	65,3	56,1	56
Δ_n	56,3	57	58,4	55,7	54,6
$\Delta_m - \Delta_n$	0,1	-1,1	6,9	0,4	1,4
% ($\Delta_m - \Delta_n$)	0,2	-2,0	10,6	0,7	2,5

6. BENZETİM TEMELLİ ÇALIŞMALAR

6.1 Akışkan Fiziği

Benzetim çalışmaları açısından, taşınım ile ısı transfer katsayısı olarak ifade edilen h 'nin belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Fazla sayıda değişken bulunduğundan dolayı, taşınım ile ısı geçişi çalışmalarında bazı boyutsuz sayılar kullanılmaktadır. Isı transfer katsayısı tanımlanmadan önce akışkan fiziğinde kullanılan önemli terimlerin ve ifadelerin bilinmesi yararlı olacaktır.

Vizkozite, kayma gerilmesine karşı akışkanın gösterdiği direnç olarak ifade edilir ve μ ile gösterilir. Gazlarda vizkozite sıcaklıkla artarken, sıvılarda ise tam tersine sıcaklıkla azalmaktadır. Vizkozite dinamik ve kinematik olmak üzere iki çeşittir. Dinamik vizkoziteye, vizkoz yayılım katsayısı da denilmekte ve (6.1) eşitliği ile verilmektedir.

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \left(\frac{\text{kg}}{\text{m.s}} \right) \quad (6.1)$$

μ : Dinamik vizkozite ($\text{kg}/(\text{m.s})$)

τ : Akışkanın kayma gerilmesi (N/m^2)

$\frac{du}{dy}$: Açısal hız (rad/s)

(6.1) Eşitliğinde dy , akışkanın hareket yönündeki yer değiştirme miktarı (m) olarak ifade edilmektedir.

Dinamik ve kinematik viskozite arasındaki bağıntı ise (6.2) eşitliği ile verilir.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \left(\text{m}^2/\text{s} \right) \quad (6.2)$$

ν : Kinematik viskozite (m^2/s)

ρ : Akışkan yoğunluğu (kg/m^3)

Bazı akışkanlara ait 1 atm basınçtaki ve 20 °C'deki dinamik vizkozite değerleri Çizelge 6.1'de verilmiştir [25].

Çizelge 6.1 : Bazı akışkanların dinamik vizkozite değerleri (1 atm, 20 °C).

Akışkan	Dinamik Vizkozite (kg/(m.s))
Hava	0,000018
Su	0,0010
Gliserin	1,52
SAE 30 Motor Yağı	0,29

Moleküler momentum yayılımının ısı yayınıma oranı Prandtl sayısı olarak adlandırılmaktadır. Prandtl sayısı (6.3) eşitliği ile verilen birimsiz bir büyüklüktür.

$$Pr = \frac{\mu c_p}{k} \quad (6.3)$$

Pr : Prandtl sayısı

c_p : Sabit basınçtaki öz ısı (kJ/(kg.°K))

k : Isıl iletkenlik (W/(m.°K))

Bazı akışkanların Prandtl sayıları Çizelge 6.2'de verilmiştir. Isı yayınımlı sıvı metallerde çok hızlı iken ($Pr \ll 1$) yağlarda çok yavaştır ($Pr \gg 1$). Ayrıca çok küçük Prandtl sayıları, daha yüksek ısı iletkenlik ifade etmektedir.

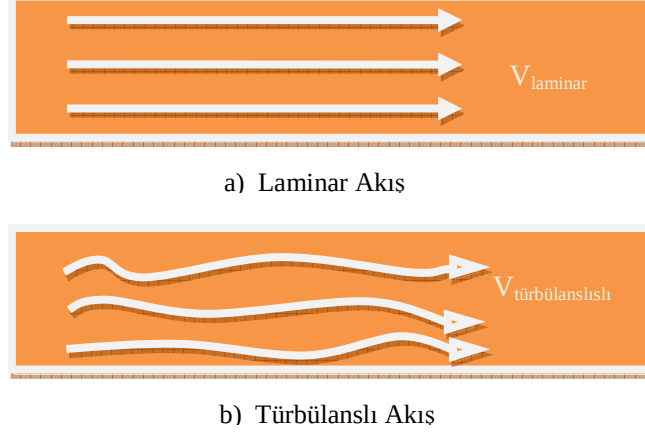
Çizelge 6.2 : Sıklıkla kullanılan akışkanların Prandtl sayıları.

Akışkan	Pr
Sıvı Metaller	0,004 - 0,030
Gazlar	0,7 - 1,0
Su	1,7 - 13,7
Yağlar	50 - 100000

Akışkan fiziğinde üç çeşit akış vardır. Akışkan kütlesi içerisinde bulunan akışkan zerrecikleri, salınımda bulunmadan aynı yönde hareket ediyorlarsa bu akışa laminar akış denilmektedir. Eğer akışkan zerrecikleri aynı yörüngeyi takip etmeden salınım yaparak hareket ediyorlarsa bu tür akışa türbülanslı akış denilmektedir. Akışkan zerrecik hareketlerinin, laminar akış ile türbülanslı akış arasında değişen özellik göstermeleri sonucu oluşan akış çeşidine ise geçici akış denilmektedir. Yüksek viskoziteli olan yağın düşük hızlardaki akışı laminardır. Düşük viskoziteli akışkan olan havanın yüksek hızlardaki hareketi ise türbülanslı akıştır. Şekil 6.1'de laminar ve türbülanslı akışkan akışı gösterilmiştir.

Atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranı şeklinde tanımlanan diğer bir boyutsuz büyüklüğe ise Reynolds sayısıdır. Zorlanmış taşınım, akış rejimi Reynolds sayısı ile belirlenmektedir. Zorlanmış taşınım, düz bir levha üzerinde kritik

Reynold sayısı 5×10^5 'tir. Eğer Reynolds sayısı 5×10^5 'ten küçük ise meydana gelen akış laminardır, büyük ise türbülanslıdır. Reynolds sayısı (6.4) eşitliği ile verilmektedir.



Şekil 6.1 : Laminar ve türbülanslı akışkan akışı.

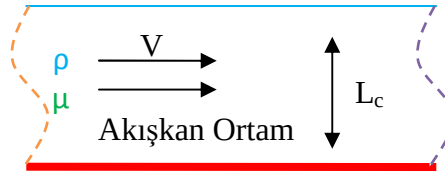
$$Re = \frac{VL_c}{\nu} = \frac{\rho VL_c}{\mu} \quad (6.4)$$

Re : Reynolds sayısı

V : Akışkanın ortalama hızı (m/s)

L_c : Geometrinin karakteristik uzunluğu (m)

Reynold sayısında kullanılan ortalama akışkan hızı (V) ile geometrinin karakteristik uzunluğu (L_c) Şekil 6.2'de gösterilmiştir.



Şekil 6.2 : Reynold sayısının hesaplanmasında kullanılan büyüklükler.

Doğal taşınımındaki akış rejimi Grashof sayısı ile belirlenmektedir. Grashof sayısı akışkana etki eden kaldırma kuvvetinin akışkana etki eden viskoz kuvvete oranı olarak tanımlanmaktadır. Boyutsuz olan Grashof sayısı (6.5) eşitliğinde verilmiştir. Doğal taşınımında akışın laminar veya türbülanslı olduğuna Grashof sayısına bakılarak karar verilmektedir. Doğal taşınımında düşey düz bir yüzey için kritik Grashof sayısı

10^9 olarak alınmaktadır. Eğer Grashof sayısı 10^9 'dan büyük ise akış düzeni türbülanslı, 10^9 'dan küçük ise laminar olmaktadır.

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_y - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} \quad (6.5)$$

Gr_L : Grashof sayısı

g : Yer çekimi ivmesi (m/s^2)

β : Hacimsel genleşme katsayısı ($1/^\circ K$), (İdeal gazlarda $\beta = 1/T$ 'dir.)

T_y : Yüzey sıcaklığı ($^\circ C$)

T_∞ : Yüzeyden yeterince uzaklıktaki akışkanın sıcaklığı ($^\circ C$)

ν : Akışkanın kinematik viskozitesi (m^2/s)

Doğal akışkan akışında diğer bir önemli kavram ise Rayleigh sayısıdır. Rayleigh sayısı, Grashof sayısı ile Prandtl sayısının çarpımı olarak ifade edilmektedir. Rayleigh sayısı (6.6) eşitliğinde verilmiştir.

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_y - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (6.6)$$

Zorlanmış ve doğal akışkan akışında L_c karakteristik uzunluğa sahip bir yüzey üzerinde, taşınım ile ısı geçişindeki ısı akısı eşitliğinin iletimle ısı geçişindeki ısı akısı eşitliğine oranı Nusselt sayısını vermektedir. Nusselt sayısı (6.7) eşitliği ile verilmiştir.

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C(Gr_L Pr)^n = C Ra_L^n \quad (6.7)$$

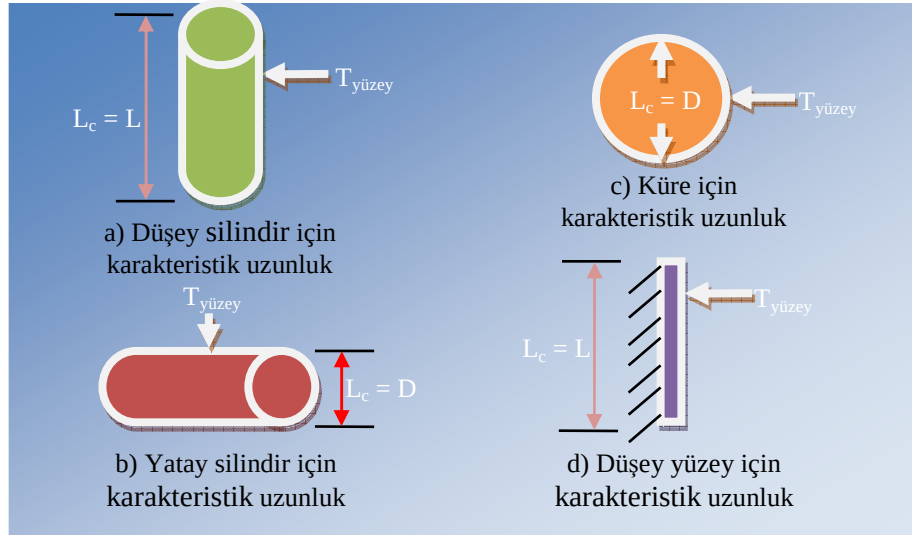
Nu : Nusselt sayısı

h : Taşınım ile ısı transfer katsayısı ($W/(m^2 \cdot K)$)

C : Deneysel olarak belirlenmiş sabit katsayı

n : Deneysel olarak belirlenmiş sabit katsayı.

Nusselt sayısı eşitliğinde C ve n sabitleri yüzey geometrisine ve akış düzenine bağlıdır. n Sabiti genellikle laminar akış için (1/4), türbülanslı akış için ise (1/3) olarak alınmaktadır. Ayrıca C sabiti 1'den küçük bir değerdedir. Karakteristik uzunluk, geometrinin özelliğine göre değişmektedir. Çeşitli şekillere sahip geometriler için karakteristik uzunluklar Şekil 6.3'te gösterilmiştir. Tüm akışkan değerleri film sıcaklığında hesaplanmaktadır. Film sıcaklığı (6.8) eşitliğinde verilmiştir.



Şekil 6.3 : Çeşitli geometrilere sahip şekillerin karakteristik uzunlukları (L_c).

$$T_{\text{film}} = \frac{1}{2} (T_y + T_{\infty}) (\text{K}) \quad (6.8)$$

T_{film} : Film sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$)

T_y : Yüzey sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$)

T_{∞} : Yüzeyden yeterince uzaklıktaki akışkanın sıcaklığı ($^{\circ}\text{K}$).

Hacimsel genleşme katsayısı olan β , ideal gazlar için (6.9) eşitliği kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{film}}} \left(\frac{1}{\text{K}} \right) \quad (6.9)$$

6.2 Benzetim Çalışmaları İçin Parametrelerinin Belirlenmesi

6.2.1 Malzeme özellikleri

Bu kısımda benzetim çalışmalarında kullanılacak malzemelerin elektriksel ve fiziksel özellikleri verilmiştir. Benzetim çalışmalarında iletken malzemelerin öziletkenlikleri ve özdirençleri olarak Çizelge 5.4'teki değerler kullanılmıştır. Benzetim çalışmalarında Comsol isimli sonlu elemanlar yöntemi ile çözüm yapan bir yazılım kullanılmıştır.

İletken bir malzemenin istenilen herhangi bir sıcaklıktaki iletkenlik değeri σ , (3.5) bağıntısıyla hesaplanmaktadır. Aynı sıcaklıkta alternatif akım (AC) direnci ile doğru akım (DC) direnci arasındaki bağıntı (6.10) eşitliği kullanılarak ve kesitlere bağlı olarak tanımlanabilir.

$$\frac{R_{AC}}{R_{DC}} = \frac{\frac{\rho L}{S_{AC}}}{\frac{\rho L}{S_{DC}}} = \frac{S_{DC}}{S_{AC}} \quad (6.10)$$

R_{AC} : Alternatif akım direnci (Ω)

R_{DC} : Doğru akım direnci (Ω)

ρ : İletken malzemenin öz direnci ($\Omega.m$)

L : İletken malzemenin boyu (m)

S_{AC} : Deri etkisinin hesaba katıldığı alternatif akımdaki kesit (m^2)

S_{DC} : Deri etkisinin hesaba katılmadığı doğru akımdaki kesit (m^2)

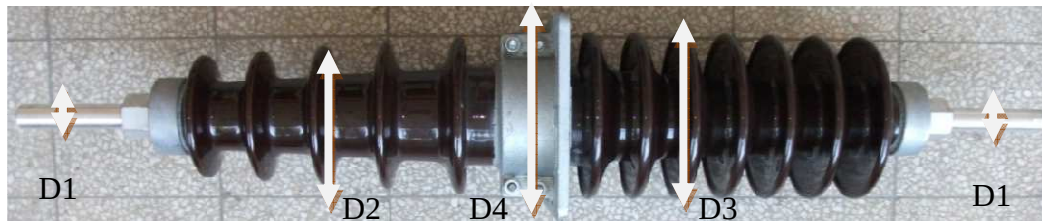
Benzetim programında kullanılan malzeme özellikleri Çizelge 6.3'te verilmiştir. Çizelge 6.3'te k , σ , ϵ_r , ρ , C_p sırasıyla ısı iletkenlik, elektriksel iletkenlik, bağıl dielektrik sabiti, yoğunluk ve ısı kapasitesini göstermektedir. Sıcaklığa bağımlı ifadeler $*(T)$ olarak belirtilmiştir ve program içerisinde sıcaklığın fonksiyonları olarak önceden tanımlanmışlardır.

Çizelge 6.3 : Benzetim programında kullanılan malzeme özellikleri.

Malzemeler	$k(W/^{\circ}K.m)$	$\sigma(S/m)$	ϵ_r	$\rho(kg/m^3)$	$C_p(J/kg.^{\circ}K)$
Hava	$k(T)$	10^{-15}	1	$\rho(T)$	$C_p(T)$
Porselen	1,5	10^{-12}	4,2	2200	920
Beton	0,29	10^{-5}	4,5	2300	960
Alüminyum	$k(T)$	$\sigma(T)^*$	1	$\rho(T)$	$C_p(T)$
Bakır	$k(T)$	$\sigma(T)^*$	1	$\rho(T)$	$C_p(T)$
Demir	$k(T)$	$\sigma(T)$	1	$\rho(T)$	$C_p(T)$
Çelik	44,5	$4,032.10^6$	1	7850	490

6.2.2 Isı transfer katsayısı

Yatay konumda deneyleri yapılan geçit izolatörleri için, karakteristik uzunluk olarak ortalama çap (D) tanımlanmıştır. Geçit izolatörü için karakteristik uzunluklar Şekil 6.4'te belirtilmiş ve sayısal değerleri Çizelge 6.4'te verilmiştir.



Şekil 6.4 : 1000 A geçit izolatörü için tanımlanan karakteristik uzunluklar ($D1$, $D2$, $D3$, $D4$).

Çizelge 6.4 : Geçit izolatörlerine ilişkin ortalama karakteristik uzunluklar.

Karakteristik Uzunluk	D1	D2	D3	D4
1000 A Değeri (mm)	32	128	133	166
1250 A Değeri (mm)	38	138	184	202

Isı transfer katsayıları eşitlik (6.5-6.7) kullanılarak hesaplanmaktadır. Eşitlik 6.7'de kullanılan C katsayıları Çizelge 6.5'te ve n değerleri Çizelge 6.6'da verilmiştir [25].

Çizelge 6.5 : Rayleigh sayılarına karşılık C katsayıları.

Ra Sayıları	C Değerleri
$10^{-9}-10^{-2}$	0,675
$10^{-2}-10^2$	1,02
10^2-10^4	0,85
10^4-10^7	0,48
10^7-10^{12}	0,125

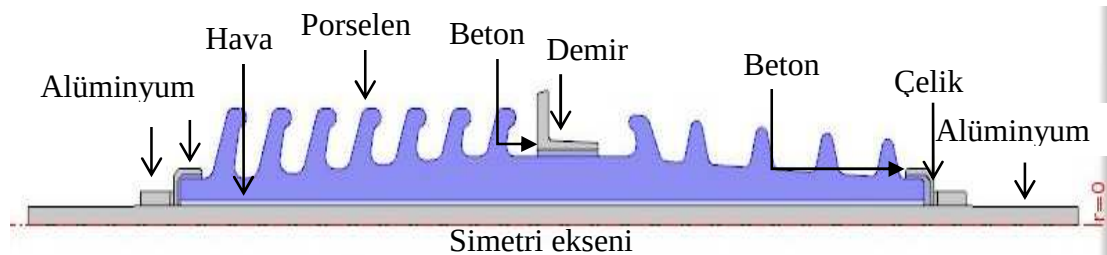
Çizelge 6.6 : Rayleigh sayılarına karşılık n katsayıları.

Ra Sayıları	n Değerleri
$10^{-9}-10^{-2}$	0,058
$10^{-2}-10^2$	0,148
10^2-10^4	0,188
10^4-10^7	0,25
10^7-10^{12}	0,333

6.3 Sıcaklık dağılımlarının ve ısı yoğunlaşmaların belirlenmesi

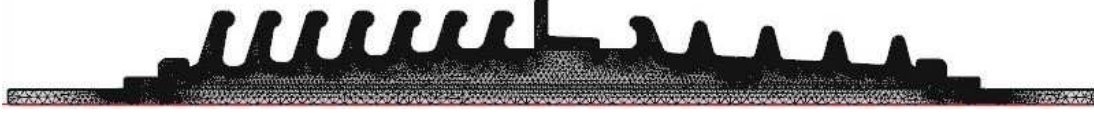
Bu kısımda 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörü için sıcaklık dağılımları ve ısı yoğunlaşma bölgeleri belirlenmiştir. Sonrasında, benzetimle bulunan sıcaklık dağılımları, ön deneylerde bulunan sıcaklık dağılımları ile karşılaştırılmıştır.

Benzetim çalışmalarında geçit izolatörü için 2D eksenel simetrik model dikkate alınmıştır. Şekil 6.5'te 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörü için programda tanımlanan malzemeler gösterilmiştir.



Şekil 6.5 : 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörünün malzeme tanımlanması.

Flanş için, ön deneylerde belirlenen sıcaklık değeri (92,3 °C) dikkate alınmıştır. Kararlı hal için yapılan çalışmada ortam sıcaklığı 20,5 °C olarak girilmiştir. Şekil 6.6'da geçit izolatörünün ağa bölünmüş yapısı verilmiştir.



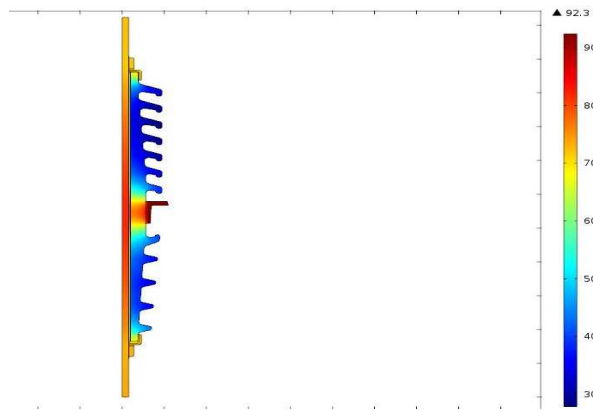
Şekil 6.6 : 28705 adet elemana bölünmüş ağa sahip, eksenel simetrik 1000 A geçit izolatörü.

Geçit izolatöründen 1020 A doğru akım geçirilmiştir. Tijle porselen arasındaki ısı geçişinde, sadece iletimle ısı geçişi olduğu varsayılmıştır ve tüm geometri için de ışınila ısı geçişi ihmal edilmiştir. Kararlı hal için sıcaklık dağılımı ve ısı yoğunlaşmalar Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Şekil 5.9'da gösterilen sıcaklık ölçüm noktalarına göre kararlı haldeki sıcaklık değerleri Çizelge 6.7'de verilmiştir.

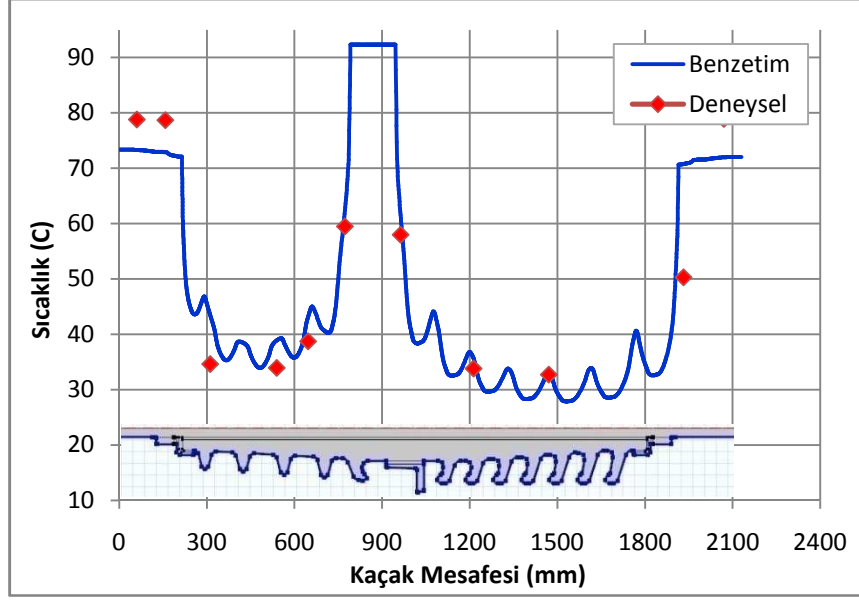
Çizelge 6.7 : Şekil 5.9'da belirtilen noktalarından alınan sıcaklık değerleri.

Noktalar	Sıcaklık(°C)	Noktalar	Sıcaklık(°C)	Noktalar	Sıcaklık(°C)
1	73,3	6	62,7	11	58,5
2	72,9	7	92,3	12	71,5
3	43,4	8	61,6	13	72
4	39	9	35,7	14	81,7
5	44,5	10	32,8	15	20,5

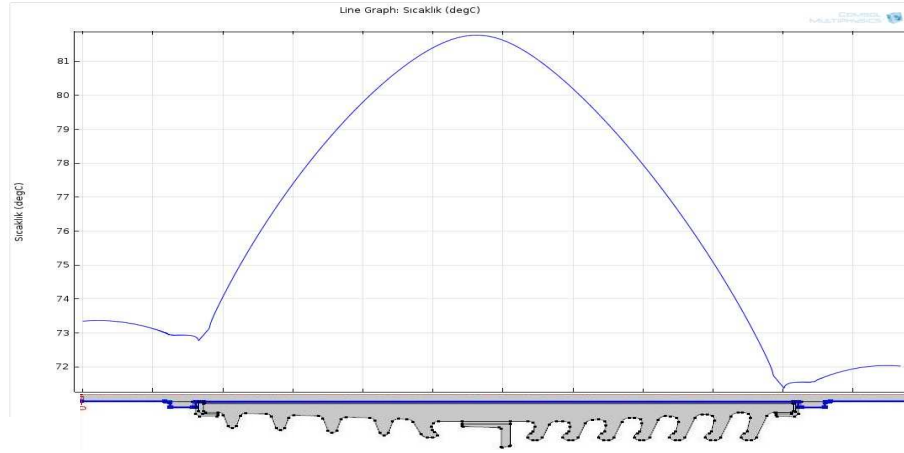
Ön deneylerden elde edilen sonuçlarla, benzetim programından elde edilen sonuçların karşılaştırılması için Şekil 6.8'de gösterildiği gibi izolatör yüzeyi üzerindeki kaçak mesafesi baştan sona kadar seçilmiştir ve grafik oluşturulmuştur. Kararlı halde, geçit izolatörünün tiji boyunca sıcaklığın değişimi Şekil 6.9'da verilmiştir.



Şekil 6.7 : 1000 A normal alüminyum tij'li geçit izolatörüne ait sıcaklık dağılımı.



Şekil 6.8 : Deneysel ve benzetim ile belirlenen sıcaklıkların karşılaştırılması.



Şekil 6.9 : Tij boyunca sıcaklık değerleri.

Benzetim sonuçları değerlendirildiğinde, flanştan sonra en fazla ısınan kısım tij ortası olmaktadır (81,7 °C). Şekil 6.7'den de anlaşılacağı üzere izolatörün iç kısmında ve özellikle orta bölgede aşırı ısı yoğunlaşma oluşmaktadır. Bunun nedenlerinden biri, flanşın ısı kaynağı olarak sistemi ısıtmasıdır. Ayrıca tijle izolatör arasındaki havanın ısı direncinin çok yüksek olması, tij ortasındaki ısı yoğunlaşmaların artmasına neden olmaktadır. Tij üzerinde en fazla ısınan nokta ise 1.nolu ölçüm noktası olmuştur (73,3 °C). Bu nokta ile tij ortası ölçüm noktası arasında 8,4 °C gibi bir fark olduğu görülmektedir ve tij ortasından elde edilen sıcaklık değeri, IEC 60137'ye göre hesaplanan en sıcak nokta sıcaklığı ile kıyaslandığında, oldukça yüksektir.

Genel olarak benzetimle gerçek deney sonuçları karşılaştırıldığında, benzetim sonuçlarının yaklaşık olarak 5 °C daha küçük olduğu görülmektedir. Bunun

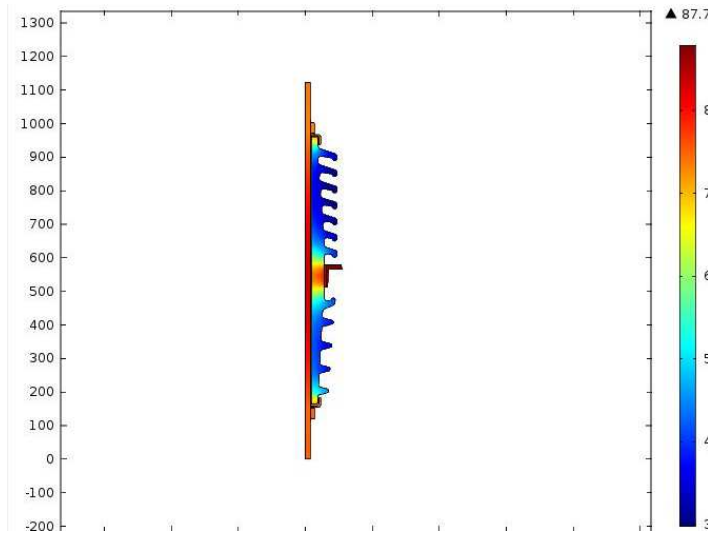
nedeninin, benzetimlerde pulların ısı kaynağı olarak tanımlanmaması ve ısı kaynağı tanımlanmasında kullanılan yaklaşıklıklar olduğu sonucuna varılmıştır.

Öncelikle 1000 A'lık geçit izolatörleri için sıcaklık dağılımı ve sıcaklık artışları benzetim yoluyla belirlenmiştir. Alüminyum tij'li geçit izolatörünün flanş sıcaklığı, deneysel çalışmalarda bulunan 87,7 °C olarak sabit alınmış ve flanş bir ısı kaynağı olarak modellenmiştir. Ortam ise 22,5 °C sabit sıcaklık olarak programa girilmiştir. Devreden 1020 A DC akım geçirilmiş ve tij üzerinden toprağa verilmiştir.

Kritik noktaların kararlı hal sıcaklıkları ve sıcaklık artış değerleri Çizelge 6.8'de verilmiştir. Kıyaslama açısından deneysel sonuçlar da çizelgeye girilmiştir. Kararlı hal sıcaklık dağılımları Şekil 6.10'da verilmiştir.

Çizelge 6.8 : 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörünün sıcaklık artışı analizi için kritik noktaların sıcaklık ve sıcaklık artış değerleri.

Büyüklik	Sıcaklıklar (C)					
	θ_B	A	B	C	D	E
Değerler	22,4	73,8	73,4	87,7	74,8	75,2
Δ benzetim		51,4	51	65,3	52,4	52,8
Δ deney		56,4	55,9	65,3	56,1	56
$\%(\Delta$ deney- Δ benzetim)		8,9	8,8	0,0	6,6	5,7



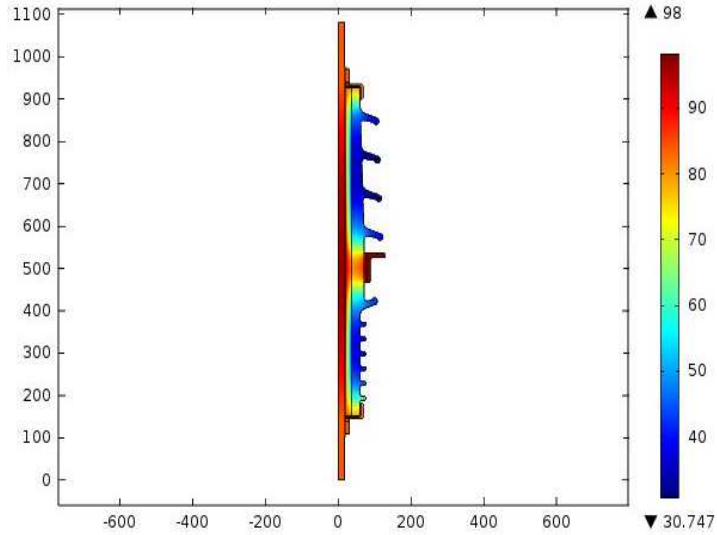
Şekil 6.10 : 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörünün sıcaklık dağılımı.

1000 A saflığı yüksek alüminyum tij'li geçit izolatörü için 88,4 °C sabit flanş sıcaklığı ve 22,5 °C sabit ortam sıcaklığı alınarak benzetimler yapılmış; kararlı hal sıcaklık ve sıcaklık farkları Çizelge 6.9'da verilmiştir.

Çizelge 6.9 : 1000 A saflığı yüksek alüminyum tij’li geçit izolatörünün sıcaklık ve sıcaklık artışı değerleri.

Büyükölük	Sıcaklıklar (C)					
	θ_B	A	B	C	D	E
Değerler	22,5	73,9	73,4	88,4	74,9	75,3
Δ benzetim		51,4	50,9	65,9	52,4	52,8
Δ deney		53	51,9	65,9	52,3	51,2
$\%(\Delta$ deney- Δ benzetim)		3,0	1,9	0,0	-0,2	-3,1

1250 A alüminyum tij’li geçit izolatörünün sıcaklık artış analizi, deneysel olarak ölçülen 98 °C’lik sabit flanş sıcaklığı ve 23,7 °C sabit ortam sıcaklığı için gerçekleştirilmiştir. 1275 A DC akım için elde edilen benzetim tabanlı ısı dağılımlar Şekil 6.11’de ve kararlı hal sıcaklık ve sıcaklık farkları Çizelge 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.11 : 1275 A alüminyum tij’li geçit izolatörünün sıcaklık dağılımı.

Çizelge 6.10 : 1250 A alüminyum Tij’li geçit izolatörü için kararlı hal sıcaklık ve sıcaklık artışları.

Büyükölük	Sıcaklıklar (°C)					
	θ_B	A	B	C	D	E
Değerler	23,7	84,4	84	98	83,9	84,3
Δ benzetim		60,7	60,3	74,3	60,2	60,6
Δ deney		60,5	61,6	74,3	62,5	62
$\%(\Delta$ deney- Δ benzetim)		-0,3	2,1	0,0	3,7	2,3

Son olarak 1250 A içi boş alüminyum tij’li geçit izolatörü için, 99,9 °C sabit flanş sıcaklığı ve 23,4 °C sabit ortam sıcaklığında benzetimler gerçekleştirilmiştir. Kararlı hal sıcaklık ve sıcaklık artışları Çizelge 6.11’de verilmiştir.

Çizelge 6.11 : 1250 A içi boş alüminyum tij’li geçit izolatörünün sıcaklık ve sıcaklık artışları

Büyüklik	Sıcaklıklar (°C)					
	θ_B	A	B	C	D	E
Değerler	23,4	103,1	101,9	99,9	101,8	103
Δ benzetim		79,7	78,5	76,5	78,4	79,6
Δ deney		74,7	77,9	76,5	80,7	75,7
$\%(\Delta$ deney- Δ benzetim)		-6,7	-0,8	0,0	2,9	-5,2

6.3.1 Isıl kısa süreli akıma dayanımın doğrulanması analizlerinin benzetim yoluyla yapılması

1000 A alüminyum tij’li geçit izolatörü için, 40 °C ortam sıcaklığı ve 101,1 °C sabit flanş sıcaklığında, ısı kısa süreli akıma dayanımın doğrulanması benzetimleri gerçekleştirilmiştir. Benzetim sonucu elde edilen kritik nokta sıcaklık ve sıcaklık artışları Çizelge 6.12’de verilmiştir.

Çizelge 6.12 : 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatörü için kritik noktala sıcaklık ve sıcaklık artışları.

Büyüklik	Sıcaklıklar (°C)					
	θ_B	A	B	C	D	E
Benzetim Değerleri	40	94	93,5	101,1	95	95,5
Δ benzetim		54	53,5	61,1	55	55,5
Δ deney		54,1	53,5	61,1	51,9	52,5
$\%(\Delta$ deney- Δ benzetim)		0,2	0,0	0,0	-5,6	-5,7

Saflığı yüksek alüminyum tij’li 1000 A geçit izolatörü için benzeri benzetimler 101,1 °C sabit flanş sıcaklığı ve 40 °C son ortam sıcaklığı için gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar Çizelge 6.13’te verilmiştir.

Çizelge 6.13 : 1000 A saflığı yüksek alüminyum tij’li geçit izolatörü için sıcaklık ve sıcaklık artışları

Büyüklik	Sıcaklıklar (°C)					
	θ_B	A	B	C	D	E
Değerler	40	93,2	92,7	101,1	94,1	94,7
Δ benzetim		53,2	52,7	61,1	54,1	54,7
Δ deney		52,2	52,8	61,1	53	52,6
$\%(\Delta$ deney- Δ benzetim)		-1,9	0,2	0,0	-2,1	-4,0

1250 A normal alüminyum tij’li geçit izolatörünün ısı kısa süreli akıma dayanımının doğrulanması benzetimlerinde ortam sıcaklığı 40 °C ve flanş sıcaklığı 107,1 °C olarak programa girilmiştir. Sonuçlar Çizelge 6.14'te verilmiştir.

Çizelge 6.14 : 1250 A normal alüminyum tij’li geçit izolatörü için sıcaklık ve sıcaklık artışları

Büyükölük	Sıcaklıklar (°C)					
	θ_B	A	B	C	D	E
Değerler	40	103,8	103,4	107,1	103,1	103,5
Δ benzetim		63,8	63,4	67,1	63,1	63,5
Δ deney		62,7	63,4	67,1	59,6	59,4
$\%(\Delta$ deney- Δ benzetim)		-1,8	0,0	0,0	-5,9	-6,9

Son olarak alüminyum içi boş alüminyum tij’li 1250 A geçit izolatörü için ortam sıcaklığı 40 °C ve flanş sıcaklığı 109,5 °C olarak programa girilmiştir. Deney sonuçları Çizelge 6.15'te verilmiştir.

Çizelge 6.15 : 1250 A içi boş alüminyum tij’li geçit izolatörü için sıcaklık ve sıcaklık artışları

Büyükölük	Sıcaklıklar (°C)					
	θ_B	A	B	C	D	E
Değerler	40	124,6	123,4	109,5	123	124,4
Δ benzetim		84,6	83,4	69,5	83	84,4
Δ deney		75,4	73,9	69,5	77,2	77,3
$\%(\Delta$ deney- Δ benzetim)		-12,2	-12,9	0,0	-7,5	-9,2

6.4 Isıl Performansın İyileştirilmesine Yönelik Benzetim Tabanlı Çalışmalar

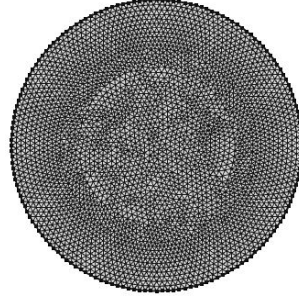
6.4.1 İletken malzemesinin incelenmesi

Deneyisel çalışmalara benzer şekilde benzetimlerle performans iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

6.4.1.1 Alüminyum iletkeninde deri etkisi

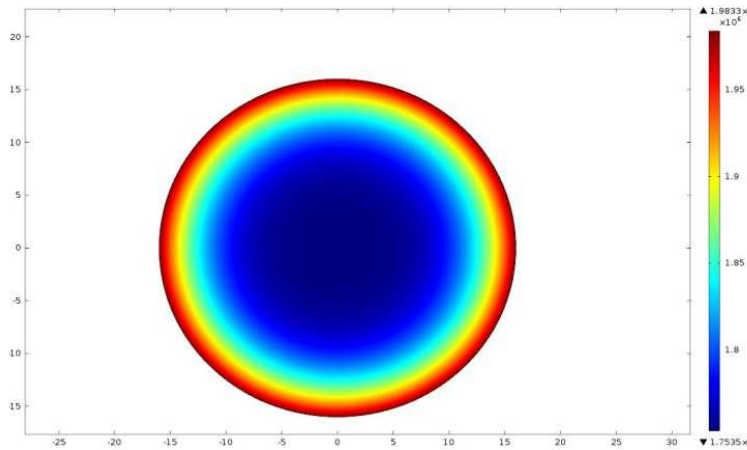
Deri etkisi, iletken kesiti boyunca, yüzeye yakın bölgelerde akımın yoğunlaşması olayı olup, özellikle yüksek frekanslarda çalışan sistemler için büyük önem taşır. Deri etkisi arttıkça, iletkenin taşıdığı akım daha yoğun bir şekilde iletkenin dış yüzeyiyle deri kalınlığı denilen bölgede yoğunlaşır.

Deri etkisi, malzemenin özelliklerine bağlı olduğu kadar çalışma frekansına da bağlıdır. 1020 A Alternatif akım taşıyan 16 mm yarıçaplı alüminyum iletken üzerinde meydana gelecek akım yoğunluğunu belirlenmek üzere, alüminyum iletkenin kesiti 6532 elemana bölünmüştür. Benzetim çalışmalarının hepsinde, alüminyum ve bakır için bağlı manyetik geçirgenlik değeri 1 olarak alınmıştır.



Şekil 6.12 : Ağa bölünmüş 16 mm yarıçaplı alüminyum iletken kesiti.

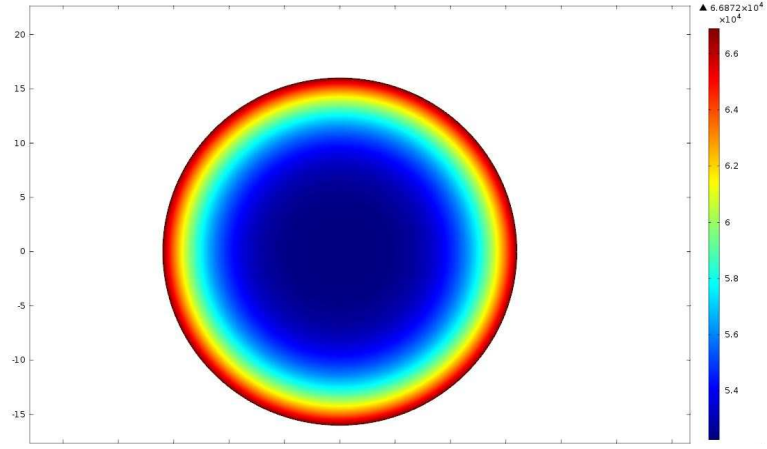
Deri etkisi çalışmalarında manyetik alan fiziği kullanılmıştır. Tüm deri etkisi çalışmaları için sıcaklık değeri 20 °C ve frekans değeri 50 Hz olarak alınmıştır. 1020 A alternatif akım için 16 mm yarıçaplı dairesel kesitli iletken kesitindeki akım yoğunluğu Şekil 6.13'te ve iletken kesitinde oluşan aktif güç kayıpları Şekil 6.14'te verilmiştir.



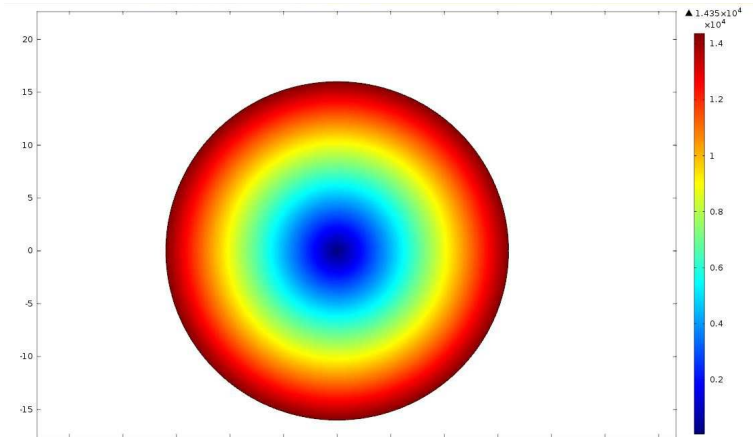
Şekil 6.13 : 16 mm yarıçaplı alüminyum iletkenin enine kesitinde 1020 A geçişine karşılık oluşan akım yoğunluğu.

Ayrıca programda, 16 mm yarıçaplı alüminyum iletken için deri kalınlığı 13,3 mm olarak hesaplanmıştır. Isıl kısa süreli akıma dayanımın doğrulanması deneylerinde ise bu teorik olarak 13,1 mm olarak hesaplanmıştır. Aktif güç kayıpları ise 45,936 (W/m) olarak hesaplanmıştır. Aynı alüminyum iletkenin kesitinde oluşacak manyetik

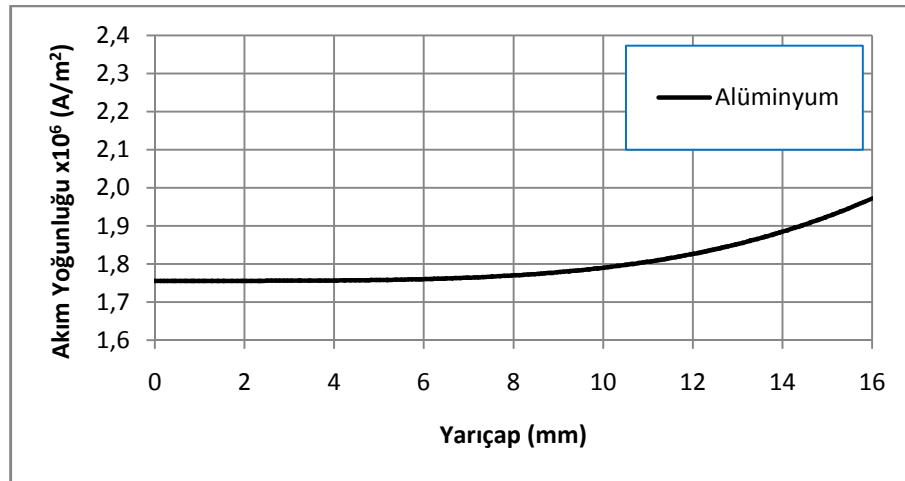
alan şiddeti Şekil 6.15'te gösterilmiştir. Alüminyum iletkenin akım yoğunluğunun yarıçap boyunca değişimi Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.14 : 16 mm yarıçaplı alüminyum iletkenin kesitinde oluşan aktif güç kayıpları.



Şekil 6.15 : Alüminyum iletken için manyetik alanın şiddetinin değişimi.

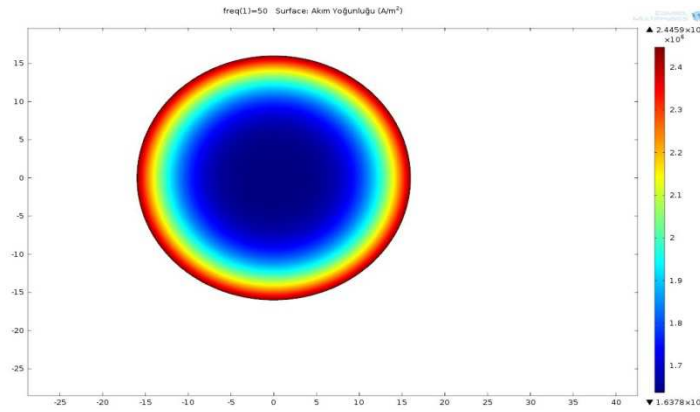


Şekil 6.16 : 16 mm yarıçaplı alüminyum iletkende akım yoğunluğunun yarıçap boyunca değişimi.

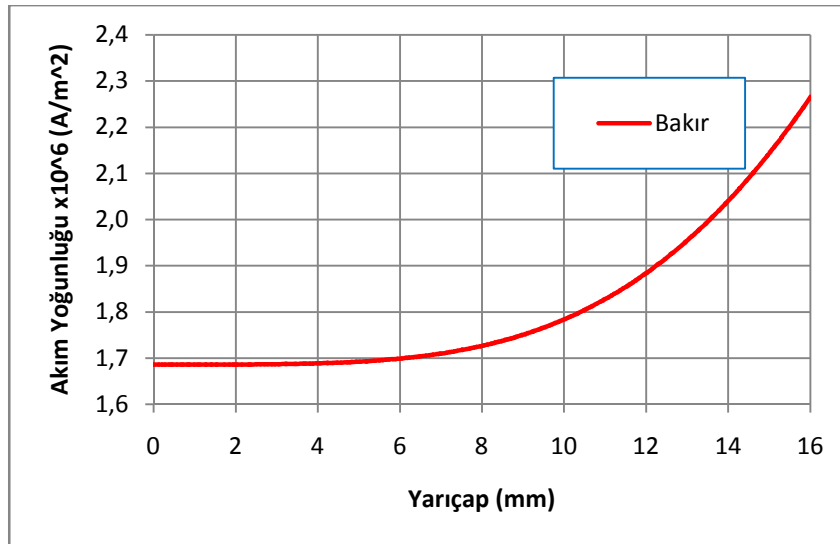
Deri etkisi ile ilgili çalışma sonuçları özetlenecek olursa, akım yoğunlaşmasına bağlı olarak, iletken direncindeki ısıya dönüşen kayıplar artmaktadır. Program tarafından hesaplanan deri kalınlığı ifadesi, standartta hesaplanan değere çok yakındır. Sonuç olarak iletkenin dış kısmının, iletkenliği yüksek bir malzeme ile (örneğin bakır) kaplanması, iletkende oluşacak kayıpları azaltacaktır.

6.4.1.2 Bakır iletken deri etkisi

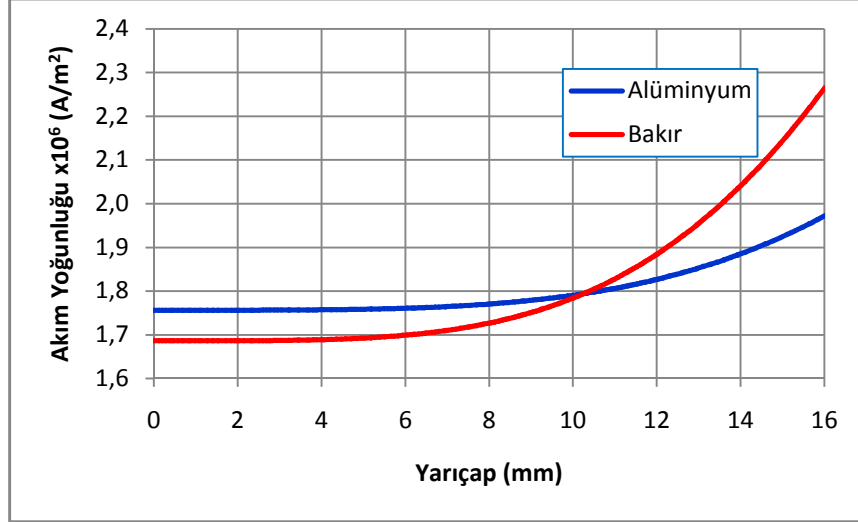
16 mm yarıçaplı bakır iletken kesitinde oluşan akım yoğunluğu Şekil 6.17'de, yarıçap boyunca akım yoğunluğunda oluşan değişim, Şekil 6.18'de verilmiştir. Aynı geometride bakır ve alüminyum iletken için yarıçap boyunca akım yoğunluğunun değişimi Şekil 6.19'da gösterilmiştir.



Şekil 6.17 : 16 mm yarıçaplı bakır iletken kesitindeki akım yoğunluğu.



Şekil 6.18 : 16 mm yarıçaplı bakır iletken için akım yoğunluğunun yarıçap boyunca değişimi.



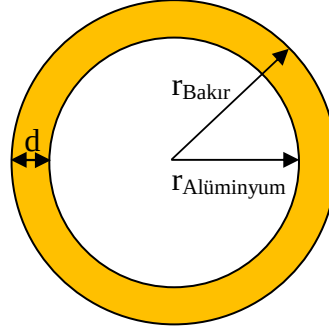
Şekil 6.19 : 16 mm yarıçaplı bakır ve alüminyum iletkenler için yarıçap boyunca akım yoğunluklarının değişimi.

Şekil 6.19'dan da görüldüğü üzere, alüminyum iletkeninde merkez kısımda daha fazla akım yoğunluğu oluşmakta ve yaklaşık 11 mm'den sonra ise bakır iletkenindeki akım yoğunluğu çok hızlı artmaktadır. Alüminyum malzemede ise 11 mm'den sonra daha yavaş bir artış meydana gelmektedir.

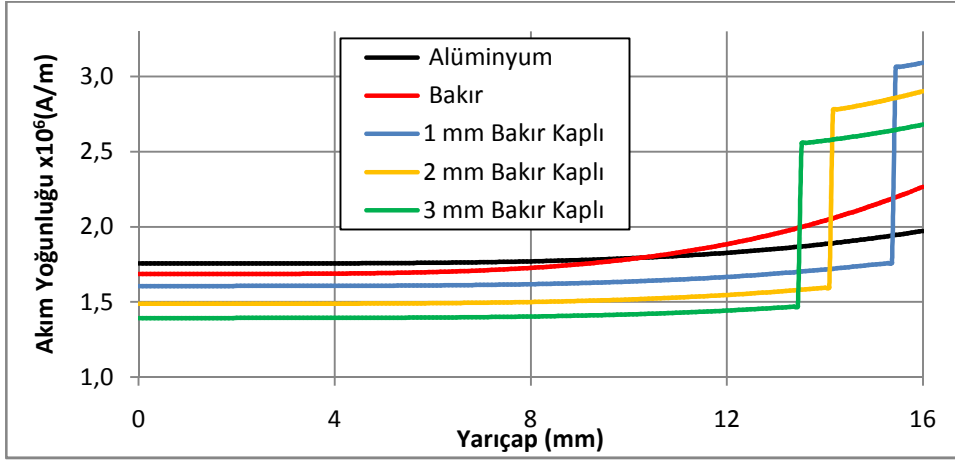
Bakır iletken için deri kalınlığı 9,14 mm olarak programda hesaplanmıştır. Bu değer alüminyumun deri kalınlığı değeri olan 13,1 mm'den daha küçüktür. Buradan çıkarılabilecek sonuç ise, aynı geometride olan farklı malzemelerden yapılmış iletkenlerde, iletkenliği yüksek olanın deri kalınlığının küçük olmasıdır. Deri kalınlığının küçük olmasıyla beraber deri etkisi kendisini daha fazla gösterecek ve daha fazla miktarda akım dış yüzeye yakın kısımlarda akacaktır. Ayrıca, bakır iletkenin direnç kaybının 24,96 (W/m) olduğu ve alüminyum iletkenindeki kayıp değerinden (45,936 W/m) çok küçük olduğu görülmüştür. Bu da doğal olarak, daha az ısınma anlamına gelmektedir.

6.4.1.3 Bakır giydirilmiş alüminyum iletkeninde deri etkisi

Yukarıda belirtilen deri etkisi dikkate alındığında, alüminyum iletkenin bakır ile kaplanmasıyla ısı performansta iyileşme beklenmektedir. Bu amaçla, alüminyum iletken üzerine çeşitli kalınlıklarda bakır giydirilmiş ve Şekil 6.20'deki geometri kullanılarak, farklı bakır kalınlıklarında benzetimler gerçekleştirilmiştir. 16 mm yarıçaplı alüminyum tij için, çeşitli kalınlıklarda bakır giydirilmesiyle yapılan benzetimlerde akım yoğunluğundaki değişimler Şekil 6.21'de verilmiştir.



Şekil 6.20 : Bakır giydirilmiş alüminyum iletken geometrisi.



Şekil 6.21 : 16 mm yarıçaplı silindrsel iletkenin farklı kalınlıklarda bakır ile kaplanması durumlarında akım yoğunluğundaki değişim.

Şekil 6.21 dikkatle incelendiğinde, bakır kaplama miktarı arttıkça alüminyum malzemedeki akım yoğunluğu gittikçe azalmakta, akımın çok büyük bir kısmı bakır kaplı kısımdan geçmektedir.

Yapılan diğer bir çalışmada, çeşitli kalınlıklarda bakırla kaplanmış 16 mm ve 19 mm yarıçaplı alüminyum iletkenler, için 20 °C'deki aktif güç kayıpları hesaplanmıştır. Hesaplanan bu değerler, bakır giydirilmiş alüminyum iletkenli geçit izolatörlerinin tij'leri için ısı kaynağı olarak girilmiştir. Ortam sıcaklığı olarak da 20 °C değeri programa girilmiştir Böylelikle, geçit izolatörlerindeki bağıl sıcaklık azalmaları hesaplanmaya çalışılmıştır. Çizelge 6.16'da 16 mm yarıçaplı iletken için hesaplanan aktif güç kayıpları ve bakır giydirmeye kalınlıklarına göre, kayıplardaki azalmalar yüzde olarak verilmiştir.

Çizelge 6.17'de ise, Çizelge 6.16'de verilen güç kayıplar dikkate alınarak, 1000 A bakır giydirilmiş alüminyum iletkenli geçit izolatörü için kritik nokta sıcaklıkları ve bakır kaplama nedeniyle oluşacak % sıcaklık azalmaları verilmiştir.

Çizelge 6.16 : 16 mm yarıçaplı alüminyum iletken için, bakır giydirme kalınlıklarına göre aktif güç kayıpları ve kayıplardaki bağıl değişimler.

Durumlar	Aktif Güç Kayıpları (W/m)			
	P _{alüminyum}	P _{bakır}	P _{toplam}	%P _{toplam}
Full Alüminyum	45,9	0,0	45,9	0,0
Full Bakır	0,0	25,0	25,0	45,7
1 mm Bakır Kaplı	30,8	10,2	40,9	10,9
2 mm Bakır Kaplı	21,4	15,6	37,0	19,5
3 mm Bakır Kaplı	15,3	18,7	33,9	26,2
4 mm Bakır Kaplı	11,1	20,5	31,6	31,3
5 mm Bakır Kaplı	8,1	21,6	29,7	35,3
6 mm Bakır Kaplı	6,0	22,4	28,4	38,3

Sıcaklık artışı hesaplamalarında ortam sıcaklığı 20 °C olarak girilmiş ve sadece katılarda ısı geçişi fiziği kullanılmıştır. Diğer tüm parametreler ve malzeme özellikleri sıcaklık artışı analizlerinde kullanılanlarla aynıdır.

Çizelge 6.17 değerlendirildiğinde, bakır giydirme miktarının artırılmasıyla birlikte ısı performansta belirgin bir iyileşme meydana geldiği görülmektedir. 3 mm kaplama miktarına kadar ısı performansta meydana gelen iyileşmede yüksek bir artış meydana gelmektedir. 3 mm'den daha fazla olan bakır kaplama miktarlarında ise ısı performansta meydana gelen iyileşmenin daha yavaş arttığı görülmektedir.

Çizelge 6.17 : 16 mm alüminyum iletken için bakır giydirme kalınlıklarına göre kritik nokta sıcaklıkları ve sıcaklık azalmaları.

Durumlar	Sıcaklıklar (C)			
	A	Tij Ortası	E	Tij Ortası İçin % Sıcaklık Düşümü
Full Alüminyum	64,0	70,1	64,9	0,0
Full Bakır	46,3	48,4	46,8	31,0
1 mm Bakır Kaplı	59,9	65,0	60,8	7,3
2 mm Bakır Kaplı	56,7	61,0	57,4	13,0
3 mm Bakır Kaplı	54,1	57,9	54,8	17,4
4 mm Bakır Kaplı	52,1	55,4	52,7	21,0
5 mm Bakır Kaplı	50,5	53,5	51,1	23,7
6 mm Bakır Kaplı	49,3	52,1	49,8	25,7

19 mm yarıçaplı alüminyum iletken için de benzer çalışmalar gerçekleştirilmiş olup, bakır giydirme kalınlığına bağlı olarak 20 °C'da hesaplanan aktif güç kayıpları Çizelge 6.18'de verilmiştir.

Çizelge 6.18 : 19 mm yarıçaplı alüminyum iletken için, bakır giydirme kalınlıklarına göre aktif güç kayıpları ve kayıplardaki bağıl azalmalar.

Durumlar	Aktif Güç Kayıpları (W/m)			
	P _{alüminyum}	P _{bakır}	P _{toplam}	%P _{toplam}
Full Alüminyum	52,9	0,0	52,9	0,0
Full Bakır	0,0	30,7	30,7	41,9
1 mm Bakır Kaplı	36,8	11,3	48,1	9,1
2 mm Bakır Kaplı	26,4	17,6	44,0	16,8
3 mm Bakır Kaplı	19,4	21,7	41,1	22,3
4 mm Bakır Kaplı	14,6	23,5	38,1	28,0
5 mm Bakır Kaplı	11,1	24,9	36,0	32,0
6 mm Bakır Kaplı	8,5	25,9	34,4	35,0

Çizelge 6.19'da, Çizelge 6.18'de verilen güç kayıplarına göre, 1250 A bakır giydirilmiş alüminyum iletkenli geçit izolatörü için kritik nokta sıcaklıkları ve tij ortası sıcaklıklarında meydana gelen % sıcaklık düşüşleri verilmiştir.

Çizelge 6.19'dan görüleceği üzere artan bakır girdirme oranlarıyla beraber kritik noktaların ve tij ortasının sıcaklığında önemli düşüşler meydana gelmektedir.

Çizelge 6.19 : Bakır giydirme oranlarına göre kritik noktasıcaklıkları.

Durumlar	Sıcaklıklar (C)			
	A	Tij Ortası	E	Tij Ortası İçin % Sıcaklık Düşümü
Full Alüminyum	71,2	81,6	71,0	0,0
Full Bakır	52,6	56,3	52,4	31,0
d=1 mm Bakır Kaplı	68,0	76,8	67,8	5,9
d=2 mm Bakır Kaplı	64,5	72,1	64,3	11,6
d=3 mm Bakır Kaplı	61,8	67,9	61,6	16,8
d=4 mm Bakır Kaplı	59,2	65,2	59,0	20,1
d=5 mm Bakır Kaplı	57,4	62,9	57,2	22,9
d=6 mm Bakır Kaplı	55,9	61,2	55,8	25,0

6.4.2 Flanştaki aşırı ısınmanın incelenmesi

Bu kısımda, aşırı ısınan flanş bölgesiyle ilgili benzetim çalışmaları yapılmıştır. Flanş sıcaklığının, sıcaklık dağılımına olan etkisinin incelenmesi amacıyla 1000 A ve 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatörleri için öncelikle mevcut manyetik malzemeden yapılmış flanş için sıcaklık artış analizleri yapılmıştır. Alüminyumdan yapılmış flanş ile sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Alüminyum flanş durumunda programa sabit bir sıcaklık girilmemiştir. Son olarak ise geçit izolatörlerinin flanşsız hali için sıcaklık analizleri yapılmıştır.

6.4.2.1 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatöründe sıcaklık dağılımı

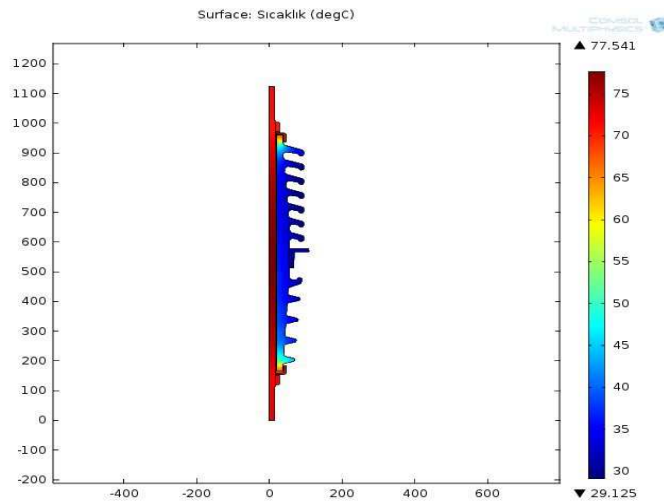
1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörü için döküm flanşın sıcaklığı olarak 87,7 °C ve ortam sıcaklığı olarak ise 22,4 °C girilmiştir. Döküm flanşlı geçit izolatörünün benzetiminin yapılmasıyla elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 6.10'da verilmiştir.

İkinci çalışmada ise alüminyum flanş kullanılmış ve 87,7 °C'lık sabit sıcaklık değeri kaldırılmıştır. Ortam sıcaklığı olarak 22,4 °C değeri için elde sıcaklık dağılımı Şekil 6.22'de gösterilmiştir.

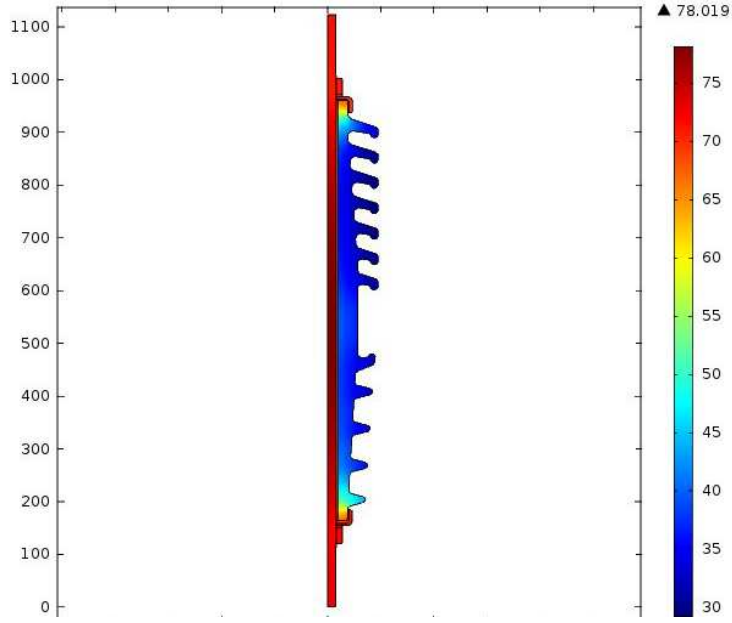
Son çalışmada ise flanş kısmı geçit izolatörü üzerinden tamamen çıkarılmıştır. Ortam sıcaklığı olarak ise 22,4 °C programa girilmiştir ve elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 6.23 'te verilmiştir.

Döküm flanşlı, alüminyum flanşlı ve flanşsız 1000 A geçit izolatörü için sıcaklık değişimleri Şekil 6.24'te verilmiştir. Döküm flanşlı, alüminyum flanşlı ve flanşsız geçit izolatörü için kararlı halde çeşitli noktalarında elde edilen sıcaklık değerleri Çizelge 6.20'de verilmiştir.

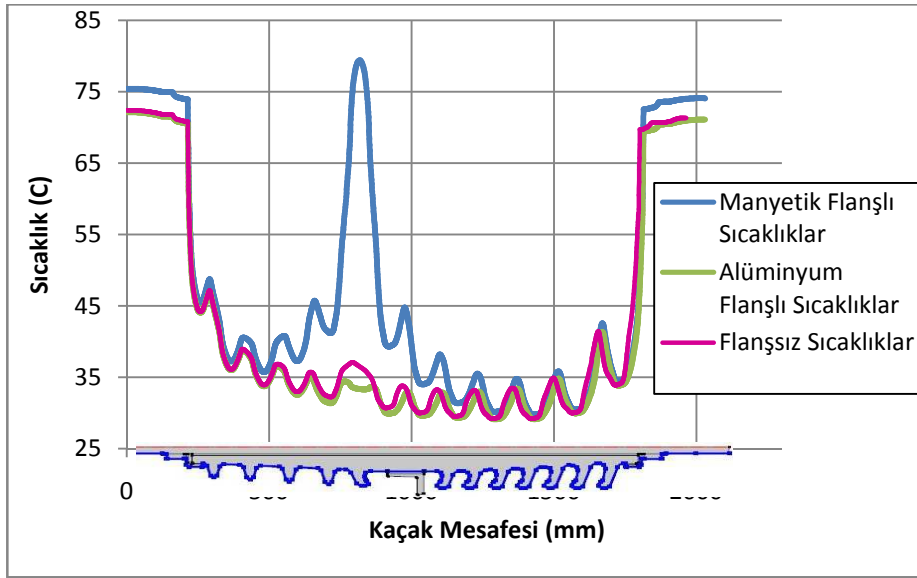
Şekil 6.24'ten de görüldüğü üzere, mevcut döküm flanş, porselenin orta kısmını ısıtmaktadır. Alüminyum flanş kullanıldığında ise porselenin orta kısmındaki sıcaklıklarda önemli bir düşüş olmaktadır ayrıca tij ve somun sıcaklıklarında yaklaşık olarak 3 °C'lık bir düşüş meydana gelmektedir (Çizelge 6.20).



Şekil 6.22 : 1000 A alüminyum tij'li ve alüminyum flanşlı geçit izolatörü için sıcaklık dağılımı.



Şekil 6.23 : Flanşsız 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörü için sıcaklık dağılımı.



Şekil 6.24 : Döküm flanşlı (manyetik flanşlı), alüminyum flanşlı ve flanşsız 1000 A geçit izolatörü sıcaklık değişimleri.

Çizelge 6.20 : Kritik noktalardaki ve geçit izolatörünün çeşitli noktalarındaki sıcaklık değerleri.

Durumlar	Sıcaklıklar (C)							
	A	B	C	Tij Ortası	Flanş Altı	D	E	E'deki % Sıcaklık Azalması
Döküm flanşlı	74	73,6	87,7	83,5	79,2	74,9	75,4	0,0
Alüminyum Flanşlı	71	70,4	31,5	77,5	33,4	71,5	72,1	4,4
Flanşsız	71,2	70,7		78	37,1	71,8	72,3	4,1

Diğer dikkat çekici bir nokta ise alüminyum flanşlı geçit izolatörü yüzeyindeki sıcaklık dağılımı ile flanşsız geçit izolatörü yüzeyindeki sıcaklık dağılımının, flanş altına gelen porselen yüzeyi hariç, birbirine yakın olmasıdır. Alüminyum flanşın, ısı iletkenliği havaya nazaran daha yüksek olduğu için flanş altına gelen porselen yüzeyi üzerinde 3,7 °C'lik bir sıcaklık azalması meydana getirmiştir. Çizelge 6.20'deki sıcaklıklar için, sıcaklık artış değerleri Çizelge 6.21'de verilmiştir.

Çizelge 6.21 : Farklı flanş malzemeleri için, en sıcak noktada sıcaklık artışları.

Durumlar	Kararlı Haldeki Sıcaklıklar (C)		
	Ortam	En sıcak noktanın Sıcaklığı	Ortam Sıcaklığına Göre Sıcaklık Artışı
Döküm flanşlı	22,4	83,5	61,1
Alüminyum Flanşlı	22,4	77,5	55,1
Flanşsız	22,4	78	55,6

Çizelge 6.21 değerlendirildiğinde ve flanş sıcaklığı dikkate alınmadığında en fazla ısınan noktaların tij ortası olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar ön deneylerden elde edilen sonuçları doğrulamaktadır.

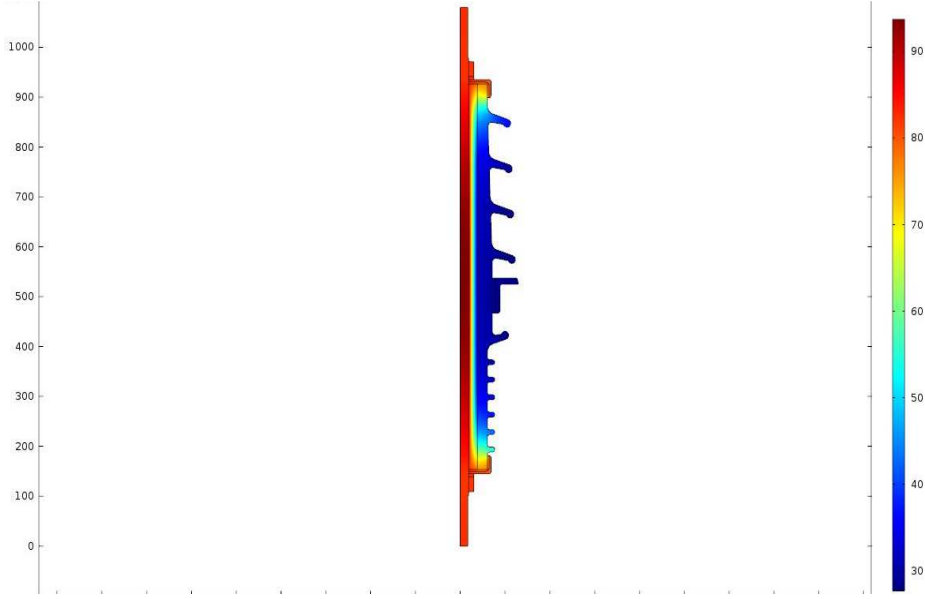
Benzetim çalışması sonuçlarına göre, 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatöründe, alüminyum flanş kullanılmasıyla en çok 55,1 °C'lik bir sıcaklık artışı oluşmaktadır. Çizelge 5.3 ile Çizelge 6.20 karşılaştırıldığında, tij ortası sıcaklığı için benzetim yapıldığında elde edilen sonuçlar deneysel olarak elde edilen sonuçlardan yaklaşık olarak 10 °C eksik ölçülmüştür.

6.4.2.2 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatöründe sıcaklık dağılımı

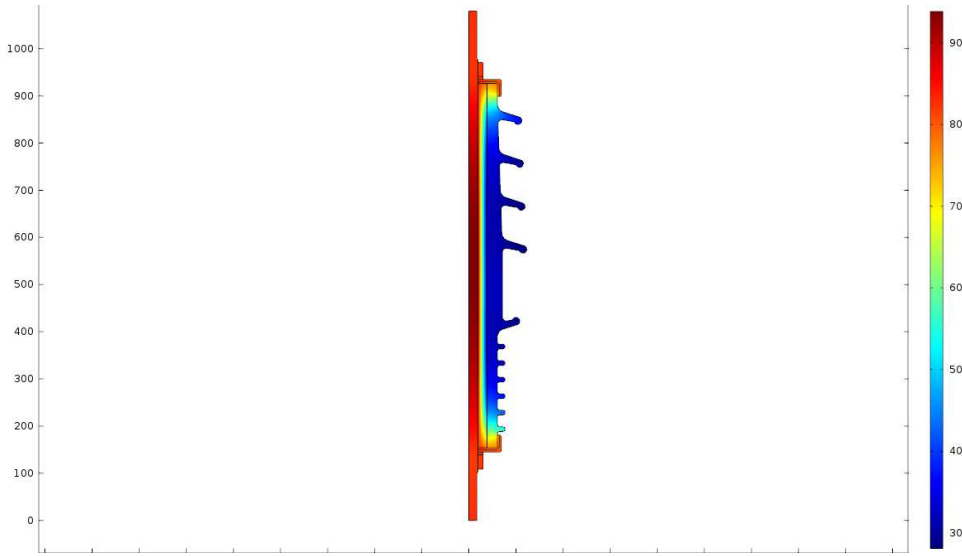
1250 A alüminyum tij'li geçit izolatörü için mevcut döküm flanşın sıcaklığı olarak sabit 98 °C ve ortam sıcaklığı olarak ise 23,7 °C programa girilmiştir. Kararlı halde döküm flanşlı 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatörü için elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 6.11'de verilmiştir.

İkinci çalışmada ise, alüminyum flanş kullanılmış ve flanşın sabit sıcaklık değeri kaldırılmıştır. 23,7 °C ortam sıcaklığı için belirlenen 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatörü sıcaklık dağılımı Şekil 6.25'de gösterilmiştir.

Son çalışmada ise flanş tamamen çıkarılmıştır. 23,7 °C ortam sıcaklığı için elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 6.26 'da verilmiştir.



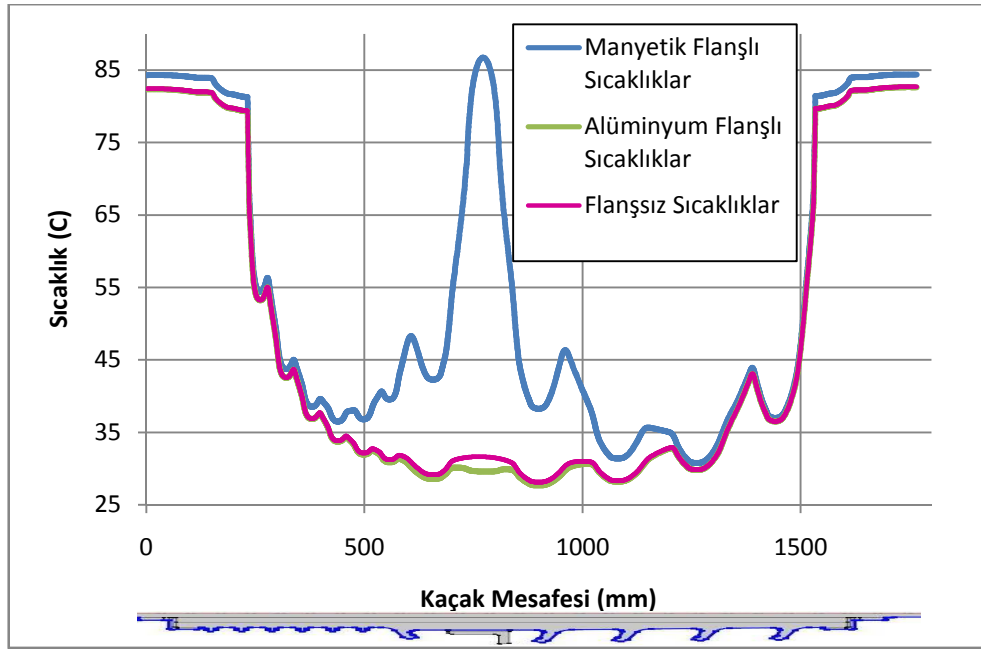
Şekil 6.25 : Alüminyum flanşlı 1250 A alüminyum tij’li geçit izolatörü için sıcaklık dağılımı.



Şekil 6.26 : Flanşsız 1250 A alüminyum tij’li geçit izolatörü için sıcaklık dağılımı.

Her üç duruma ilişkin olarak kararlı halde geçit izolatörü yüzeyinde meydana gelen sıcaklık değişimleri ve programdan alınan sıcaklık değerleri sırasıyla Şekil 6.27 ve Çizelge 6.22’de verilmiştir. Çizelge 6.22’de verilen sıcaklık değerleri için, ortam sıcaklığına göre sıcaklık artış miktarları Çizelge 6.23’te verilmiştir.

Şekil 6.27’den de görüldüğü üzere döküm flanş 1250 A geçit izolatörlerinde yine porselenin orta kısmını ısıtmaktadır. Alüminyum flanş kullanıldığında ise porselenin orta kısmındaki sıcaklıklarda önemli bir düşüş olmakta ve tij ve somun sıcaklıklarında ise yaklaşık olarak 2 °C’lık bir düşüş meydana gelmektedir.



Şekil 6.27 : Döküm flanşlı (manyetik flanşlı), alüminyum flanşlı ve flanşsız 1250 A geçit izolatörü yüzeyinde sıcaklık değişimleri.

Çizelge 6.22 : Kritik noktalardaki ve geçit izolatörünün çeşitli noktalarındaki sıcaklık değerleri.

Durumlar	Sıcaklıklar (°C)							
	A	B	C	Tij Ortası	Flanş Altı	D	E	Edeki % Sıcaklık Azalması
Döküm flanşlı	84,4	84	98	96,6	86,4	83,9	84,3	0,0
Alüminyum Flanşlı	82,6	82,2	28,6	93,6	29,6	81,9	82,3	2,4
Flanşsız	82,6	82,2		93,8	31,6	82	82,4	2,3

Çizelge 6.23 : En yüksek sıcaklıkların ortam sıcaklığına göre artış miktarları.

Durumlar	Kararlı Haldeki Sıcaklıklar (°C)		
	Ortam	En Fazla Isınan Noktanın Sıcaklığı	Ortam Sıcaklığına Göre Artış Miktarı
Döküm flanşlı	23,7	96,6	72,9
Alüminyum Flanşlı	23,7	93,6	69,9
Flanşsız	23,7	93,8	70,1

Çizelge 6.23 değerlendirildiğinde ve flanş sıcaklığı dikkate alınmadığında, en fazla ısınan noktaların tij ortası olduğu görülmektedir.

Benzetim çalışması sonuçlarına göre, döküm flanş yerine alüminyum flanş kullanılması halinde bile sıcaklık artışı deneyinin koşulları yerine getirilemeyecektir. Benzetimle elde edilen sıcaklık sonuçları gerçek değerlerden bir miktar daha düşüktür.

6.4.3 Porselenin ısı iletkenlik katsayısının incelenmesi

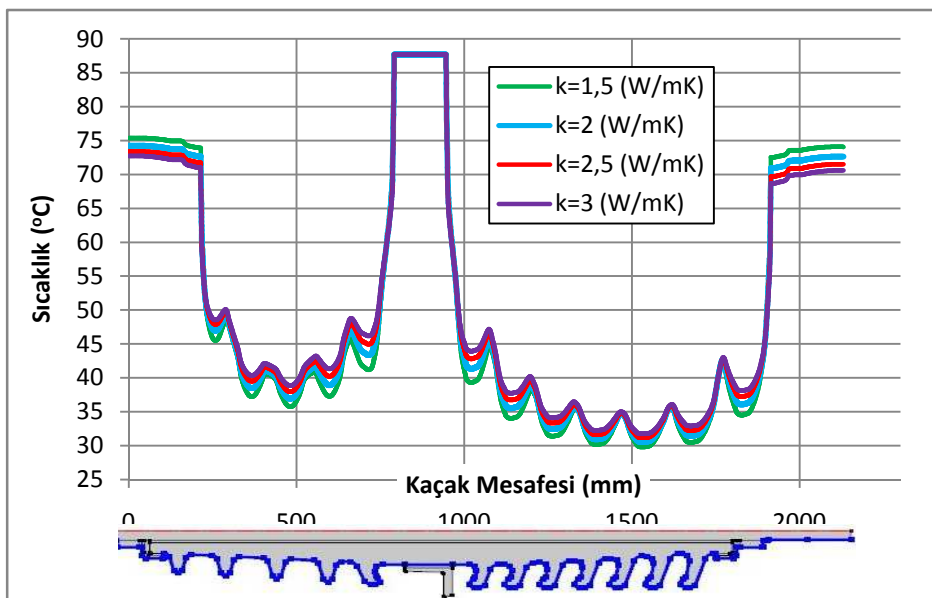
Malzeme analizi sonuçlarına göre, mevcut geçit izolatörlerinde kullanılan porselenin ısı iletkenlik katsayısının 1,5 W/m⁰K olduğu anlaşılmıştır 0. Bu kısımda, porselen ısı iletkenlik katsayısı 1,5 W/m⁰K değeriinden 3 W/m⁰K değeriine kadar kademeli olarak değıştirilerek, farklı flanş seçenekleri için, sıcaklık dağılımları incelenmiştir.

6.4.3.1 Döküm flanşlı 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatörü

22,4 °C ortam sıcaklığı ve 87,7 °C flanş sıcaklığı için, farklı ısı iletkenlikli porselenler kullanılan 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatöründe kritik noktaların sıcaklıkları Çizelge 6.24’te ve izolatör boyunca sıcaklık dağılımı ise Şekil 6.28’de verilmiştir. Ayrıca, bu durumlar için en yüksek sıcaklıklar ve sıcaklık artışları Çizelge 6.25’te verilmiştir.

Çizelge 6.24 : Döküm flanşlı 1000 A alüminyumtij’li geçit izolatörü için, porselen ısı iletkenliğinin sıcaklığa etkisi.

k Katsayısı (W/mK)	Sıcaklıklar (C)							
	A	B	C	Tij Ortası	Flanş Altı	D	E	E'deki % Sıcaklık Azalması
1,5	74	73,6	87,7	83,5	79,2	74,9	75,4	0,0
2	72,6	72	87,7	82,3	77,2	73,8	74,2	1,6
2,5	71,4	70,9	87,7	81,5	75,5	72,9	73,4	2,7
3	70,5	69,9	87,7	80,9	73,9	72,2	72,7	3,6



Şekil 6.28 : Porselenin ısı iletkenlik katsayısının ısı dağılıma etkisi.

Çizelge 6.25 : Farklı ısı iletkenlikli porselene sahip 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatörü için en yüksek sıcaklıklar ve sıcaklık artış miktarları.

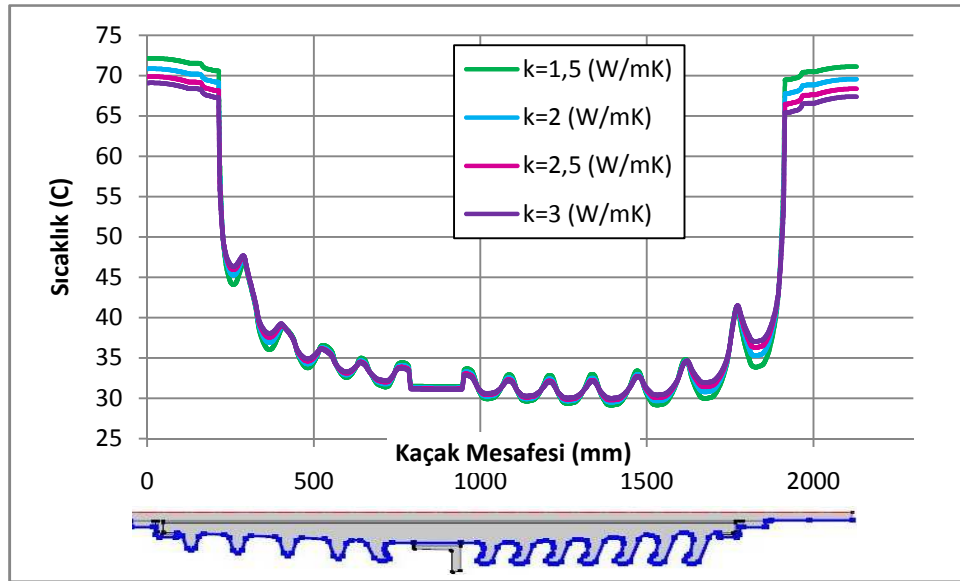
k Katsayısı (W/mK)	Kararlı Haldeki Sıcaklıklar (C)		
	Ortam	En Fazla Isınan Noktanın Sıcaklığı	Ortam Sıcaklığına Göre Artış Miktarı
1,5	22,4	83,5	61,1
2	22,4	82,3	59,9
2,5	22,4	81,5	59,1
3	22,4	80,9	58,5

6.4.3.2 Alüminyum flanşlı 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatörü

Alüminyum flanşlı geçit izolatörü için de benzer ısı iletkenlik katsayılarına bağlı benzetim çalışmaları yapılmıştır. Ortam sıcaklığı 22,4 °C alınmış ve flanş sıcaklığı olarak herhangi bir değer girilmemiştir. Kritik nokta sıcaklıkları Çizelge 6.26’da, izolatör boyunca sıcaklık dağılımı ise Şekil 6.29’da verilmiştir.

Çizelge 6.26 : Alüminyum flanşlı 1000 A alüminyum tij’li geçit izolatörü için kararlı halde kritik noktalardan ve çeşitli kısımlardan elde edilen sıcaklık değerleri.

k Katsayısı (W/mK)	Sıcaklıklar (C)							
	A	B	C	Tij Ortası	Flanş Altı	D	E	E’deki % Sıcaklık Azalması
1,5	71	70,5	31,5	77,5	33,4	71,5	72	0,0
2	69,4	68,8	31,3	76,2	33,2	70,2	70,8	1,7
2,5	68,2	67,6	31,2	75,2	33,1	69,2	69,8	3,1
3	67,3	66,5	31,1	74,4	32,9	68,3	69	4,2



Şekil 6.29 : Kararlı halde, porselen malzemesindeki ısı iletkenlik katsayısının değişimine göre porselen yüzeyi boyunca elde edilen sıcaklık dağılımı.

Değişik ısı iletkenlikli porselene sahip alüminyum flanşlı 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörü için kararlı halde elde edilen en yüksek sıcaklıklar ve sıcaklık artış miktarları Çizelge 6.27'de verilmiştir. Sıcaklıklardaki bu farklılık, manyetik flanşın, sistemi ısıtıcı etkisinden kaynaklanmaktadır.

Çizelge 6.27 : Değişik ısı iletkenlik katsayılarına göre ortam sıcaklığına kıyasla sıcaklık artış miktarları.

k Katsayısı (W/mK)	Kararlı Haldeki Sıcaklıklar (C)		
	Ortam	En Fazla Isınan Noktanın Sıcaklığı	Ortam Sıcaklığına Göre Artış Miktarı
1,5	22,4	77,5	55,1
2	22,4	76,2	53,8
2,5	22,4	75,2	52,8
3	22,4	74,4	52,0

Porselen ısı iletkenlik katsayısının 3 W/m⁰K olması durumunda döküm flanşlı ve alüminyum flanşlı 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörü için E noktasında sırasıyla %3,6 ve %4,2'lik sıcaklık azalması meydana gelmiştir. Tij ortası sıcaklıklarında ise sırasıyla %3,1 ve %4'lük bir sıcaklık düşüşü oluşmuştur.

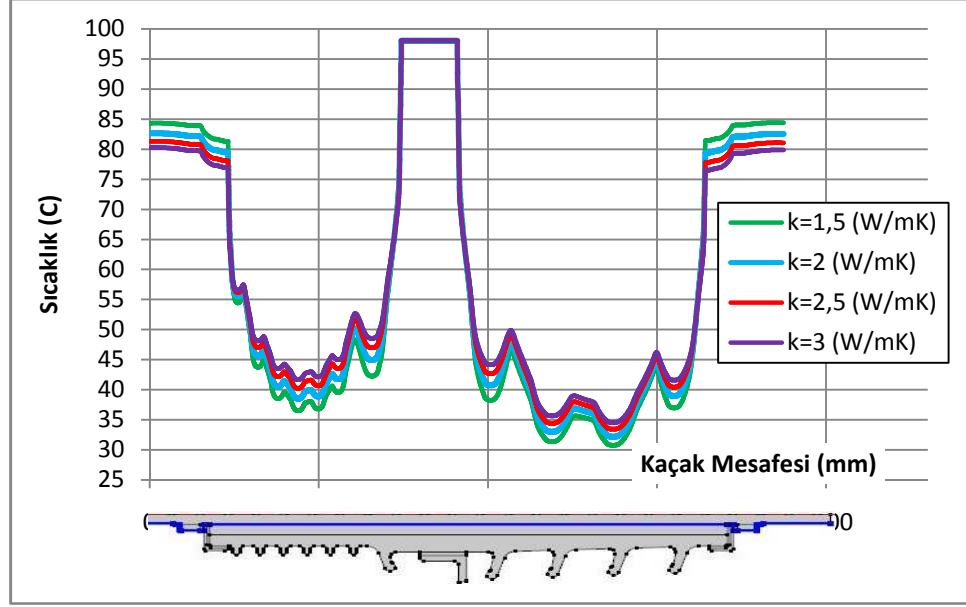
6.4.3.3 Döküm flanşlı 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatörü

Döküm flanşlı 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatörü benzetimi yapılırken, ortam sıcaklığı 23,7 °C ve flanş sıcaklığı 98 °C olarak alınmıştır. Farklı ısı iletkenlik katsayısı durumlarında çeşitli noktaların sıcaklıkları Çizelge 6.28'de, izolatör boyunca sıcaklık dağılımı ise Şekil 6.30'da verilmiştir.

Ayrıca, farklı ısı iletkenlikli porselenler için en yüksek sıcaklıklar ve bu sıcaklıkların ortam sıcaklığına göre farkları Çizelge 6.29'da verilmiştir.

Çizelge 6.28 : Döküm flanşlı 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatöründe farklı ısı iletkenlikli porselenler için sıcaklık değerleri.

k (W/mK)	Sıcaklıklar (C)							
	A	B	C	Tij Ortası	Flanş Altı	D	E	E'deki % Sıcaklık Azalması
1,5	84,4	84	98	96,6	86,4	83,9	84,3	0,0
2	82,5	82,1	98	95	84,2	82,2	82,6	2,0
2,5	81	80,6	98	93,7	82,1	80,8	81,3	3,6
3	79,8	79,3	98	92,6	80,3	79,7	80,2	4,9



Şekil 6.30 : Döküm flanşlı 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatöründe farklı ısı iletkenlikli porselenler için izolatör yüzeyi boyunca sıcaklık dağılımı.

Çizelge 6.29 : Döküm flanşlı 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatöründe farklı ısı iletkenlikli porselenler için en yüksek sıcaklıklar ve bu sıcaklıkların ortam sıcaklığına göre farkları.

k Katsayısı (W/m ² K)	Kararlı Haldeki Sıcaklıklar (°C)		
	Ortam	En Fazla Isınan Noktanın Sıcaklığı	Ortam Sıcaklığına Göre Sıcaklık Artışı
1,5	23,7	96,6	72,9
2	23,7	95	71,3
2,5	23,7	93,7	70
3	23,7	92,6	68,9

6.4.3.4 Alüminyum flanşlı 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatörü

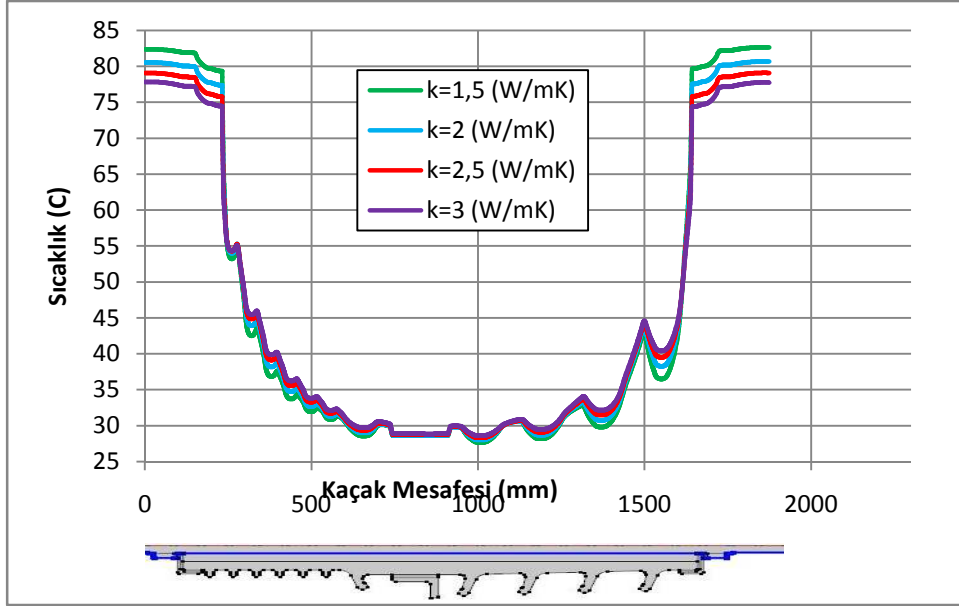
Alüminyum flanşlı geçit izolatörü için ortam sıcaklığı 23,7 °C alınarak benzer benzetimler yapılmıştır. Farklı ısı iletkenlikli porselenler için kritik nokta sıcaklıkları Çizelge 6.30'da ve izolatör boyunca sıcaklık dağılımı Şekil 6.31'de verilmiştir.

Ayrıca, farklı ısı iletkenlikli porselenler için en yüksek sıcaklıklar ve bu sıcaklıkların ortam sıcaklığına göre farkları Çizelge 6.31'de verilmiştir.

Porselenin ısı iletkenlik katsayısının 3 W/m²K alınması halinde döküm flanşlı ve alüminyum flanşlı 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatörlerinin E noktaları için sırasıyla %4,9 ve %5,5'lik sıcaklık düşüşü gerçekleşmiştir. Tij ortası sıcaklıklarında ise sırasıyla %4,1 ve %4,8'lik bir sıcaklık düşüşü meydana gelmiştir.

Çizelge 6.30 : Alüminyum flanşlı 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatöründe, farklı ısı iletkenlikli porselenler için kritik noktala sıcaklıkları.

k (W/mK)	Sıcaklıklar (°C)							
	A	B	C	Tij Ortası	Flanş Altı	D	E	E'deki % Sıcaklık Azalması
1,5	82,6	82,2	28,6	93,6	29,6	81,9	82,3	0,0
2	80,6	80,2	28,7	91,8	29,6	80	80,5	2,2
2,5	79	78,5	28,8	90,2	29,7	78,5	79	4,0
3	77,7	77,1	29	89,1	29,9	77,2	77,8	5,5



Şekil 6.31 : Kararlı halde, porselen malzemesindeki ısı iletkenlik katsayısının değişimine göre porselen yüzeyi boyunca elde edilen sıcaklık dağılımı.

Çizelge 6.31 : Alüminyum flanşlı 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatöründe, farklı ısı iletkenlikli porselenler için en yüksek sıcaklıklar ve sıcaklık artış miktarları.

k (W/m°K)	Kararlı Haldeki Sıcaklıklar (°C)		
	Ortam	En Fazla Isınan Noktanın Sıcaklığı	Ortam Sıcaklığına Göre Artış Miktarı
1,5	23,7	93,6	69,9
2	23,7	91,8	68,1
2,5	23,7	90,2	66,5
3	23,7	89,1	65,4

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, DAF-30 tipi duvar geçit izolatörü ailesinin 1000 A ve 1250 A'lık bireylerinde yaşanan ısı sorunlara çözüm önerileri geliştirilmesi amaçlanmıştır. Öncelikle ön deneylerle, sağlıklı bir ısı deney için gerekli bağlantı iletkenlerinin, 1000 A ve 1250 A geçit izolatörleri için sırasıyla 9 cm² ve 12,25 cm² kesitli alüminyum baralar olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Bu kesitlerden daha küçük kesitteki bağlantı iletkenleri izolatör iletkeninde ek ısınmalara yol açacak, daha büyük kesittekiler ise izolatör iletkenini soğutacaktır.

Ön deneyler sonrasında, DAF-30 geçit izolatörlerinde en çok ısınan ve aynı zamanda ortam sıcaklığı ile en çok ısı farkı oluşturan noktalar, deneysel olarak belirlenmiştir. Bu amaçla izolatörlerden anma akımları geçirilmiş ve kararlı hal sıcaklıklarına erişim sonrasında ısı açıdan kritik noktalar belirlenmiş ve bu noktaların sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Yapılan deneyler, 1000 A ve 1250 A geçit izolatörlerinin her ikisi için de en fazla ısınan noktanın flanşın çevrelediği, tij ortası kısım olduğunu göstermiştir. Tij ortasından sonra ise en fazla ısınan bölgenin flanş olduğu görülmüştür. Manyetik girdap akımları sonucu aşırı ısınan flanşın ek bir ısı kaynağı olarak davrandığı ve tüm iletken ve özellikle de iletkenin orta kısmında aşırı ısı yoğunlaşmalar oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Flanşa ek olarak, geçit izolatörlerinde kullanılan bağlantı pullarının da birer noktasal ısı kaynağı gibi davranarak yerel sıcaklık artışları meydana getirdikleri anlaşılmıştır.

Deneylerde kullanılan alüminyum ve bakır iletkenlerin öziletkenlik ve öz direnç değerleri, farklı sıcaklıklarda yapılan gerçek DC direnç ölçüm sonuçlarından belirlenmiştir. Belirlenen bu değerlere göre, bakırın öziletkenlikleri literatürde verilenle uyumlu çıkmış ve fakat alüminyumun öziletkenliği literatürde verilen değerlerden çok küçük çıkmıştır. Bu durum kendisini ısı deneylerde sıcaklık artışı olarak göstermiştir.

Mevcut geçit izolatörlerinin IEC 60137 standardına göre “sıcaklık artışı deneyi” ve “ısı kısa süreli akıma dayanımın doğrulanması deneyi” yapılmıştır. Sıcaklık artışı deneylerinin sonuçlarına göre normal alüminyum tij’li 1000 A geçit izolatörleri ve

yüksek saflıktaki alüminyum tij'li 1000 A geçit izolatörleri, tij ve somun sıcaklıkları dikkate alındığında ortam sıcaklığına göre en yüksek sıcaklık artış miktarı olan 60 °C sınır değerine yakın sıcaklık artışı göstermişlerdir. Alüminyum tij'li 1250 A geçit izolatörleri ve delikli tij'li 1250 A geçit izolatörlerinde ise sıcaklık artış değeri 60 °C'lık sınır değerden yüksek çıkmıştır. Flanş ve tij ortasının ölçülen sıcaklıkları ve sıcaklık artışları en kritik değerler olup, öngörülen sınırların üzerindedir. Bu sonuçlar bize her iki akım düzeyinde de, izolatör ısı performansında iyileştirme yapılması gerektiği sonucunu vermiştir.

Isıl kısa süreli akıma dayanımın doğrulanması deneylerinde, ölçülen ve hesaplanan değerler IEC 60137'de öngörülen sınırlar içinde olup, bu deney açısından bir sorun çıkmamıştır.

Isıl performansın iyileştirilmesi amacıyla iki paralel kolda çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bir yandan asıl ısı kaynakları olan tij, flanş, pul vb metallerin ısı performansları iyileştirilmeye çalışılırken, diğer yandan ısı yayılımı açısından porselenle ilgili çalışmalar yürütülmüştür. Deri etkisinden dolayı, alternatif akım, iletkenin eşdeğer kesit alanının küçüldüğü, bu nedenle de alternatif akım direncinin doğru akım direncinden yüksek olduğu bilinmektedir. Hem deri etkisini azaltmak hemde ısı performansı arttırmak amacıyla 35 mm çaplı alüminyum, bakır ve 1,75 mm bakır giydirilmiş alüminyum tij'li geçit izolatörlerinin 1275 A'deki ısı performansları deneysel olarak incelenmiştir. Deney sonuçları, alüminyum iletken yerine 1,75 mm bakır giydirilmiş alüminyum iletken kullanılmasıyla, sıcaklık artışında % 4,8 gibi önemli bir azalma olacağını göstermiştir. Fakat bu azalma, öngörülen sınır koşulları sağlama açısından yeterli değildir.

Flanşta oluşan aşırı ısınmanın, manyetik temelli olduğu görülmüştür. Bu aşırı ısınmanın tij'e de yansıdığı ve alüminyum tij'li 1000 A geçit izolatörü flanşının sökülmesi halinde tij sıcaklıklarında ortalama 2,4 °C ile % 4,4'lük, somun sıcaklıklarında ise ortalama 2,1 °C ile % 3,8'lik bir azalma olacağı görülmüştür. Ayrıca, alüminyum v.b. manyetik olmayan malzemeden yapılacak bir flanş ile ısı yayılımının kolaylaşıp, tij sıcaklıklarında daha bir azalma sağlanabileceği anlaşılmıştır.

Bir diğer ek ısı kaynağı olan pul ve somunlarla ilgili çalışmalarda, manyetik pulların tij üzerinden sökülmesiyle, 1000 A alüminyum tijli geçit izolatör tij sıcaklıklarında

1,5 °C (% 2,8), somun sıcaklıklarında 3,6 °C (% 6,9) ve tij ortasında ise 0,2 °C (%0,3) bir sıcaklık azalmasının olacağı görülmüştür. Buradan, pulların noktasal ısı kaynakları olarak davrandığı ve dolayısıyla ancak yakınlarındaki ortam ısını arttırabildikleri ve fakat uzaktaki tij ortası sıcaklığında fazlaca etkin olmadığı sonucu çıkarılmıştır.

Porselenin, sıcaklık dağılımına etkisi incelendiğinde, yüksek ısıl iletkenlikli porselen ve normal porselen durumlarında önemli bir fark görülmemiştir. Dolayısıyla, porselen hammaddesini değiştirerek ısıl problemlere çözüm bulunamayacağı anlaşılmıştır. Diğer yandan, porselenin varlığı tij ortası sıcaklıklarında, standartta verilen doğrusal formül hesaplamalarından çok daha fazla etkisi olduğu görülmüştür. Tij ortasında yüksek sıcaklık değerleri, tij-porselen arasındaki havanın yüksek ısıl direncinden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Buna ek olarak, flanşın aşırı ısınmasından kaynaklanan ek ısının da etkisiyle, tij ortası sıcaklıkları, tijin iki uç noktasından oldukça yüksek çıkmaktadır.

Deneysel çalışmalara ek olarak, çok sayıda benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında programa, hem gerçek ölçüm değerlerinden elde edilen iletkenlik değerleri, hem deri etkisinden gelen katsayılar birleştirilerek girilmiştir. Çünkü benzetim amacıyla kullanılan Comsol programı, frekans domeninde ısı transferi fiziği ile elektrik akımı fiziğini birleştirememektedir. Böylece sistemde alternatif akım varmış gibi çözümler elde edilmiştir.

Benzetim parametreleri tanımlanırken birtakım yaklaşıklıklar ve ihmaller yapılmıştır. Örneğin, deneysel olarak belirlenen sürekli hal ortam sıcaklıkları ve flanş sıcaklıkları programa sabit değerler olarak girilmiştir. Ayrıca ısı transfer katsayıları tanımlanırken, karakteristik uzunluk olarak 4 adet ortalama çap değeri tanımlanmıştır. Çözümlerde, tij'le porselen arasındaki hava ortamında sadece iletimin olduğu varsayılmış ve taşınım ile ısı transferi ihmal edilmiştir. Bağlantı iletkenlerinin ve pulların etkisi ihmal edilerek büyük bir yaklaşıklıkta bulunulmuştur. Bu yüzden de benzetimde elde edilen sıcaklık değerleri, deneysel değerlerden bir miktar küçük çıkmıştır. Benzetim çalışmalarında, tij ve somun sıcaklıkları yaklaşık olarak 5 °C daha düşük çıkmıştır.

Benzetim çalışmaları da, tij ortası sıcaklığı ve flanş sıcaklığının en yüksek sıcaklıklar olduğunu göstermiştir. Bunlar dikkate alınmadığında, iletkenin iki ucu, pullar ve

somunlar en çok ısınan noktalar olmuştur. Flanş sıcaklığının, geçit izolatörünün özellikle iç orta bölgesinde aşırı miktarda sıcaklık yükselmesine yol açtığı konusu da benzetimlerde görülmüştür.

Isıl performansın artırılmasına yönelik olarak yapılan benzetim çalışmalarında, 16 mm yarıçaplı alüminyum iletkenin, 2 mm ve 3 mm kalınlıklı bakır kaplamaların, tij ortası sıcaklıklarında sırasıyla % 9,5'luk ve % 13'lük azalma sağladığı görülmüştür. 3 mm bakır kaplı alüminyum iletkenin döküm flanşlı halde bile tij ortası sıcaklığını öngörülen sınır değerlerin altına getirebileceği görülmüştür. 1250 A geçit izolatörü için, 19 mm yarıçaplı alüminyum iletkenin, 2 mm ve 3 mm bakır kaplanmasıyla sırasıyla tij ortası sıcaklıklarında % 8,7'lik ve %12,4'lük yüksek sıcaklık düşüşleri beklenmektedir.

Mevcut döküm flanş yerine alüminyum flanş kullanılması durumunda, alüminyum tij'li 1000 A geçit izolatörünün tij ortası sıcaklığında %7,2'lik bir sıcaklık düşüşü elde edilmiştir. Çünkü tij ortası aşırı ısınması nedeniyle en kritik noktalar içerisinde yer almaktadır. Benzer şekilde, alüminyum tij'li 1250 A geçit izolatöründe alüminyum flanş kullanılmasıyla, tij ortası sıcaklığında % 3,2'lik bir sıcaklık düşüşü sağlanmıştır. Buradan şu sonuç çıkarılabilir ki; geçit izolatörlerinde flanş kısımları üzerinde mutlaka değişiklik yapılmalı ve manyetik olmayan (alüminyum veya alüminyum alaşım olabilir) malzeme kullanılmalıdır. Böylelikle ısıl performansta ciddi ölçüde iyileşme sağlanmış olunacaktır.

Porselenin varlığının sıcaklık dağılımına olan etkisi incelendiğinde, alüminyum tij'li 1000 A döküm flanşlı geçit izolatörünün porseleni kaldırıldığında tij ortasında % 8,6'lık bir sıcaklık azalması meydana gelmiştir. Aynı izolatörün alüminyum flanşlısının porseleni kaldırıldığında ise tij ortasında % 1,5'lik bir sıcaklık azalması sağlanmıştır. Alüminyum tij'li 1250 A döküm ve alüminyum flanşlı geçit izolatörlerinin porselenleri çıkartıldığında ise tij ortasında sırasıyla % 16,3'lük ve %13,6'luk sıcaklık düşüşleri meydana gelmiştir. Buradan şu sonuca verilebilir ki porselenin varlığı tij ortalarındaki sıcaklıkların yükselmesine neden olmaktadır. En fazla yükselme miktarı ise döküm flanşlı geçit izolatörlerinde olmaktadır.

Porselenin ısıl iletkenlik katsayısının 1,5 (W/m²K)'den 3 (W/m²K)'e yükseltilmesiyle, 1000 A döküm ve alüminyum flanşlı geçit izolatörleri için tij ortasında sırasıyla % 3,1'lik ve % 4'lük sıcaklık azalmaları sağlanmıştır. Porselenin ısıl iletkenlik

katsayısının 1,5 (W/m⁰K)'den 3 (W/m⁰K)'e yükseltilmesiyle 1250 A döküm ve alüminyum flanşlı geçit izolatörleri için ise tij ortasında sırasıyla % 4,1'lik ve % 4,8'lik sıcaklık azalmaları görülmüştür.

Gerçekleştirilen deneysel ve benzetim çalışmaları birlikte değerlendirildiğinde:

- 1000 A alüminyum tij'li geçit izolatörlerinde, flanşın döküm yerine alüminyumdan yapılması, pulların da benzer şekilde alüminyumdan yapılması ile, ısı sorunlar giderilebilecek ve standartlarda öngörülen en yüksek sıcaklık ve en yüksek sıcaklık artışı koşulları rahatlıkla sağlanacaktır.
- 1250 A alüminyum tij'li geçit izolatörlerinde ise, 1000 A'lık olanlarda alınan önlemlerin yetersiz kalması olasılığı vardır. Dolayısıyla bu değişikliklere ek olarak, alüminyum iletken yerine 2 mm mertebesinde bakır kaplı alüminyum iletken kullanımı ısı sorunlar giderilebilecek ve standartlarda öngörülen en yüksek sıcaklık ve en yüksek sıcaklık farkı koşulları rahatlıkla sağlanacaktır.

Son olarak, özellikle 1250 A geçit izolatör porselen formu yeniden tasarlanmalıdır. Kanımca olması gerekenden daha büyük bir porselen kullanıldığı görülmektedir. Aynı yalıtım düzeyinde, daha yüksek yalıtım sağlayabilecek büyük boyutlar maliyete açısından ek yük getirmektedir. Gerek 1000 A ve gerekse 1250 A geçit izolatörü yalıtkanı için, yalıtım açısından form tasarımı ekonomik ve teknik açıdan çok yararlı olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **IEC 60137** (2008). Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V, *The International Electrotechnical Commission*, Geneva, Switzerland.
- [2] **TEİAŞ Orta Gerilim Geçit İzolatörleri Tip Teknik Şartnamesi** (2004). *Türkiye Elektrik İletim A.Ş.*, Ankara.
- [3] **Craghead, D. O. and Easley, J. K.** (1978). Thermal Test Performance of a Modern Apparatus Bushing, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-97**, No. 6, Nov/Dec 1978, pp. 2291-2299.
- [4] **Hebert, P. P. and Steed, R. C.** (1978). A High Voltage Bushing Thermal Performance Computer Model, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, **PAS-97**, No. 6, Nov/Dec 1978, pp. 2219-2224.
- [5] **Youssef, H. K. and Hackam, R.** (1987). Computerized Thermal Analysis of High Voltage Bushings, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **PWRD-2**, No. 4, Oct. 1987, pp. 1145-1151.
- [6] **Youssef, H. K., Abdel Aziz, M., Hackam, R.** (1988). Steady State Temperature Distribution of High Voltage Bushings-Analysis and Measurements, *IEEE Transactions on Power Systems*, **3**, No. 1, Feb. 1988, pp. 278-285.
- [7] **Zhang, S.** (2009). Evaluation of Thermal Transient and Overload Capability of High-Voltage Bushings With ATP, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **24**, No. 3, July 2009, pp. 1295-1301.
- [8] **Zeng, D.** (2000). Evaluation A Study of Current-Carrying Capacity of Drawlead Cable in Condenser Bushing, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **15**, No. 3, July 2000, pp. 925-930.
- [9] **Jyothi, N. S., Ramu, T. S., Mandlik, M.** (2010). Temperature Distribution in Resin Impregnated Paper Insulation for Transformer Bushings, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **17**, No. 3, June 2010, pp. 931-938.
- [10] **Jyothi, N. S., Ramu, T. S.,** (2012). A Model for the Temperature Distribution in Resin Impregnated Paper Bushings, *Power and Energy Engineering Conference (APPEEEEC)*, 27-29 March 2012, pp. 1-4.
- [11] **Ko, C., Zhang, S.** (2008). Improved Transient Hot-Spot Temperature Calculation Method of High Voltage Bushings, *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2008 IEEE/PES, 13-15 Aug. 2008, pp. 1-5.
- [12] **Zeng, D.** (1999). Improved Method for Estimating Temperature Rise of a Bushing Loaded Above Name Plate Rating, *IEEE Transactions on Power Delivery*, **14**, No. 3, July 1999, pp. 986-995.

- [13] **ABB** (2010). Gas Insulated Wall Bushing, Sweden.
- [14] **ABB** (1997). Resin Impregnated Paper Bushings, Sweden.
- [15] **ABB**, ABB Review Special Report, pp. 58-63, Sweden.
- [16] **ALCE**, Insulator Catalog, Pendik, İstanbul.
- [17] **ALLBRO**, Bushings Catalog, Dunswart, South Africa.
- [18] **ELKİM**, Complete Bushings & Epoxy-Resin Bushings Catalog, Gebze, Kocaeli.
- [19] **Kaleseramik Çanakkale Kalebodur Seramik Sanayi A.Ş.**, İzolatör Kataloğu, Çan, Çanakkale.
- [20] **Kalenderli, Ö., Kocatepe, C., Arıkan, O.**, (2005). Çözümlü Problemlerle Yüksek Gerilim Tekniği, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [21] **TS 11598**, (1995). Kablolar-Kararlı Akım Değerlerinin (%100 Yük Faktörü) Hesaplanması, Türk Standartları Enstitüsü.
- [22] **Karaca, G.**, (2006). *Kablolar da Elektriksel ve Isıl Zorlanmaların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Çoklu Analizi*, (yüksek lisans tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [23] **Anders, G. J.**, (1997). Ratings of Electric Cables-Ampacity Calculations for Transmission, IEEE Press, New York.
- [24] **Altınışık, K.**, (2003). Uygulamalarla Isı Geçişi, Nobel Yayın Dağıtım, Ankara.
- [25] **Çengel, Y. A., Ghajar, A. J.**, (2011). Heat and Mass Transfer, Mc Graw Hill, New York.
- [26] **F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine**, (2007). Fundamentals of Heat and Mass Transfer , John Wiley & Sons, United States.
- [27] **Vimetco (2012)**, Alüminyum Malzeme Analiz Raporu, Slatina.
- [28] **Prof. Dr. Kelami ŞEŞEN (2013)**, Alüminyum Malzeme Analiz Raporu, İTÜ Kimya Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- [29] **Cem Metal**, Bakır Malzeme Analiz Raporu, İstanbul. 2012.
- [30] **SEM**, Porselen Malzemesi Isıl İletkenlik Analiz Raporu, Eskişehir. 2013.

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: İlim ERDEN

Doğum Yeri ve Tarihi: Avanos/NEVŞEHİR 08.06.1988

E-Posta: ilim219@hotmail.com

Lisans: Erciyes Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği (2011)

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

- Sanayi Tezleri Projesi (Bilim Sanayi Ve Teknoloji Bakanlığı & Kaleseramik A.Ş.)
9 Ay
- Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Onur Belgesi (2007)

Yayın ve Patent Listesi:

- Ozdemir A., Bagriyanik M., **Erden I.**, Akkaya Y., Single and Multiple Outage Statistics in Turkish National Power Transmission System, *The 12th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, June 10-14, 2012 Istanbul, Turkey.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **Erden I.**, Ozdemir A., Ilhan S., Improvement of Heat Distribution in Daf-30 Type Bushings, *18th International Symposium on High Voltage Engineering*, August 25-30, 2013 Seoul, Korea.
- **Erden I.**, Ozdemir A., Ilhan S., Improvement of Thermal Performance of 36 kV DAF-30 Type Bushing, *The 3rd International Conference on Electric Power and Energy Consersion Systems*, October 2-4, 2013 Istanbul, Turkey.