

Havai Hat İletkenlerinin Isıl Performans Analizi

Murat Dinç^{1*}, Oktay Arıkan² ve Fırat Akın³

¹Elektrik Mühendisliği/Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

²Elektrik Mühendisliği/Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

³Elektrik Mühendisliği/Fen Bilimleri Enstitüsü, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu yazar: muratdincc60@gmail.com

*Konuşmacı: muratdincc60@gmail.com

Özet – Gelişen teknoloji ve artmakta olan nüfus yoğunluğu sebebiyle enerji talebi gün geçtikçe artmaktadır. Artan enerji talebini karşılamak için gerilim seviyeleri yükseltilmekte, yeni iletim hatları inşa edilmekte, ya da var olan iletim hatları akım taşıma kapasitesi daha yüksek iletkenlerle modifikasyonları gerçekleştirilmektedir. Bilindiği üzere, iletken tiplerinin ısı performansları, mevcut taşıma kapasiteleri üzerinde büyük etkiye sahiptir. Buradan hareketle, bu çalışmada, var olan iletim hatlarının değiştirilmesi konusuna referans olması amacıyla yaklaşık olarak aynı dış çapa sahip ACSR (Aluminum Conductor Steel Reinforced), ACCC (Aluminum Conductor Composite Core), STACIR (Super Thermal Alloy Conductor Invar Reinforced) ve GTACSR (Gap Type Thermal-Resistant Aluminum Alloy Conductor Steel Reinforced) havai hat iletkeninin değişken sıcaklık ve rüzgar hızlarındaki farklı hava koşullarında karşılaştırmalı 2-D ısı performans analizleri, COMSOL Multiphysics yazılımında yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler – havai hat iletkenleri, ısı performans, COMSOL, IEEE-738 std.

Thermal Performance Analysis Of Overhead Conductors

Abstract – Due to developing technology and ever-increasing population density, energy demand increasing day by day. Therefore, in order to meet the increasing energy demand, the voltage levels are increased, new transmission lines are built or existing transmission lines are modified with conductors that have higher current carrying capacity. As is known, the thermal performances of conductor types have a great influence on their current carrying capacities. From this point of view, in this study, comparative 2-D thermal analyzes of ACSR, ACCC, STACIR and GTACSR overhead line conductors with the approximately same outer diameter under various weather conditions with different temperatures and wind speeds were made in COMSOL Multiphysics software, as a reference for replacing existing transmission lines.

Keywords – overhead conductors, thermal performance, COMSOL, IEEE-738 std.

I. GİRİŞ

Dünya genelinde artmakta olan enerji talebinin karşılanması hususunda en büyük engellerden biri maksimum kapasitesine erişmiş olan enerji iletim hatlarıdır. Bu bağlamda, enerji iletim hatlarının kapasitelerinin verimli bir şekilde artırılması önemli bir konu haline gelmiştir.

Üretim tekniklerindeki ilerlemelerle birlikte güç sistemlerinde kullanılmak üzere farklı materyal özelliklerine ve geometrilere sahip iletken çeşitleri ortaya çıkmıştır. Bu nedenle, iletim hatlarının verimliliğinin ve kapasitelerinin artırılması iletken değişimi ile mümkün hale gelmiştir. Bu işlem, yaklaşık aynı çap değerine sahip iletkenler tercih edildiğinde, yardımcı ekipmanların ortak oluşu ve

ekstra bir yükün meydana gelmemesinden dolayı daha ekonomik ve daha pratik olmaktadır.

Havai hatların güç taşıma kapasitesi, hattın akım taşıma kapasitesi ile doğru orantılıdır. Akım taşıma kapasitesini etkileyen faktörlerden birisi de uygun iletken seçimidir. Her iletkenin farklı ısı çalışma koşulları vardır. Bu nedenle iletkenlerin maksimum akım taşıma kapasitesinde çıkabilecekleri maksimum sıcaklık değerleri iletken tipine göre farklılık göstermektedir [1]. Mohd Nawi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada gerçekleştirilen simülasyonlara göre ACSR iletkeni 85 °C maksimum çalışma sıcaklığında 902 A akım taşıma kapasitesine sahipken, ACCC iletkeni 210 °C maksimum çalışma sıcaklığında 2114 A akım taşıma kapasitesine sahip olduğu ortaya konulmuştur [1]. Bunun yanı sıra, farklı iletkenler aynı seviyelerde

akım taşıdıklarında, farklı materyal özelliklerinden veya geometrik yapılarından dolayı, yüzey sıcaklıkları değişkenlik göstermektedir. Örneğin, 1750 A akım değerinde ACSR iletkeni yaklaşık 180 °C seviyelerine ulaşırken, 4 farklı tip HTLS (High Temperature Low Sag) iletkeni yaklaşık 180 °C, 170 °C, 140 °C ve 120 °C seviyelerine ulaştığı belirlenmiştir [2].

İletkenlerin akım taşıma kapasitesini etkileyen faktörlerden birisi de rüzgar hızıdır. Yüksek rüzgar hızlarında iletken yüzeyinin konvektif soğutmasının artmasından dolayı iletkenin daha fazla akım akabilir. ACSR, ACCC, ACCR ve ACSS iletkenleri ile gerçekleştirilen çalışmada, iletkenlerin 0.5 m/s rüzgar hızında sırasıyla yaklaşık 700 A, 1600 A, 1900 A ve 1500 A akım taşıyabildikleri görülürken, 2.5 m/s rüzgar hızında aynı iletkenler sırasıyla yaklaşık 1200 A, 2250 A, 2500 A ve 2000 A akım ile yüklenebilmiştir [3]. Beryozkina ve Sauhats'ın çalışmasında ise diğer koşullar değiştirilmeden 1 m/s rüzgar hızında ACSR, ACCC, ACCR ve GTACSR iletkenlerinin akımları sırasıyla 812 A, 784 A, 816 A ve 794 A iken, 2 m/s rüzgar hızında sırasıyla 975 A, 937 A, 979 A ve 950 A olarak bulunmuştur [4]. Rüzgar etkisinin incelendiği bir diğer çalışmada, iletken 2-D ve 3-D modellenerek, farklı rüzgar hızlarında ve rüzgar yönlerinde iletkenin sıcaklık değişimi incelenmiştir. ANSYS yazılımı kullanılarak yapılan çalışmada 20 °C hava sıcaklığında 433 A akım değerinde ACSR Lynx iletkeninin 0.1 m/s-15 m/s arasında değişen rüzgar hızlarına ve rüzgar yönlerine göre sıcaklık değişimleri sunulmuştur. Buna göre çapraz rüzgar yönünde 2-D CFD (Computational Fluid Dynamics) modelinde 0.1 m/s rüzgar hızında iletken sıcaklığı 51 °C olurken 15 m/s rüzgar hızında 21 °C olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde, çapraz rüzgar yönünde 3-D CFD modelinde 0.1 m/s rüzgar hızında iletken sıcaklığı 51 °C olurken 15 m/s rüzgar hızında 21 °C olmuş ve böylelikle, 2-D CFD modeliyle benzer sonuçlar elde edilmiştir. Son olarak paralel rüzgar uygulandığında, 3-D CFD modeliyle 0.1 m/s rüzgar hızında iletken sıcaklığı 73 °C olurken 15 m/s rüzgar hızında 26 °C olarak belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre çapraz rüzgarların paralel rüzgarlara göre daha fazla soğutma sağladığı ve rüzgar hızı arttıkça iletken sıcaklığının azaldığı anlaşılmıştır [5]. ACSR ve AACR iletkenleri kullanılarak yapılan bir çalışmada, doğal konvektif soğutma, zorlanmış konvektif soğutma ve karma konvektif soğutma modelleri karşılaştırılmıştır. Çalışma neticesinde, karma modelin daha etkili olduğu ve iletkenlerin daha düşük sıcaklıklarda çalıştığı ortaya konmuştur [6].

Akım taşıma kapasitesine etki eden diğer bir faktör ise çevre sıcaklığıdır. Çevre sıcaklığı arttıkça iletken tellerin sıcaklığı artmaktadır. Bu konuda yapılan bir çalışmada 800 A akım değerinde ve 1 m/s rüzgar hızında 4.8 mm, 3.45 mm ve 1.83 mm çapındaki iletkenlerin sıcaklıkları 10 °C ve 40 °C çevre

sıcaklığında karşılaştırılmıştır. Çevre sıcaklığı 10 °C iken 4.8 mm çaplı iletken sıcaklığının 36 °C, 3.45 mm çaplı iletken sıcaklığının 35 °C ve 1.83 mm çaplı iletken sıcaklığının 33 °C olduğu görülmüştür. Çevre sıcaklığı 40 °C iken 4.8 mm çaplı iletken sıcaklığının 66 °C, 3.45 mm çaplı iletken sıcaklığının 65 °C ve 1.83 mm çaplı iletken sıcaklığının 63 °C olduğu görülmüş olup iletken sıcaklıkları çevre sıcaklığıyla yaklaşık 30 °C artmıştır [7]. ACSR ve çeşitli HTLS iletkenleri ile gerçekleştirilen bir modelleme çalışmasında, iletkenler 1000 A ile yüklenmiş ve 0.61 m/s rüzgar hızında, 20 °C ve 55 °C ortam sıcaklıklarında çalışma ısıları karşılaştırılmıştır. Eşit yüklenme altında ortam sıcaklığı arttıkça tüm iletkenlerin çalışma sıcaklıkları artış gösterirken, HTLS 4 tipi iletken en iyi ısı performansı göstermiştir [8].

Maria'nın çalışmasında rüzgar ve sıcaklık etkisinin yanı sıra, rakımın iletken sıcaklığına etkisini araştırmıştır. Çalışma sırasında, simülasyon sonuçları ilgili IEEE ve CIGRE standartlarına ait hesaplama yöntemleri karşılaştırılmış ve sonuçların tutarlılığı kontrol edilmiştir. Sıcaklık ve rüzgar önceki çalışmalar ile benzer etkiler meydana getirirken, rakımın iletken sıcaklığına etkisinin düşük olduğu tespit edilmiştir [9]. Liu, ACSR iletkenin dış yüzeyi ve çelik öz sıcaklık farkını 250 A ve 550 A aralığındaki 4 farklı akım değerinde deneysel ve simülasyon çalışmaları ile incelemiştir. Çalışma neticesinde, iletkene uygulanan akım arttıkça çekirdek ve dış yüzeye arasındaki sıcaklık farkının artış gösterdiği belirlenmiştir [10].

Bu çalışmada, yaklaşık olarak aynı dış çapa sahip ACSR, ACCC, STACIR ve GTACSR iletkenlerinin ısı performansları, aynı akım altında, farklı hava sıcaklıkları ve rüzgar hızları için 2-D simülasyon modeli ve analitik hesaplar ile incelenmiştir. Simülasyon çalışması COMSOL Multiphysics'te bulunan Heat Transfer Modülü ile gerçekleştirilirken, analitik hesaplamalar IEEE-738 standardına göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, ACCC ve GTACSR iletkenlerinin ısı performansının daha iyi olduğu ortaya konmuştur.

II. MALZEMELER VE METOT

A. Havai Hat İletkenlerinin Tanıtımı

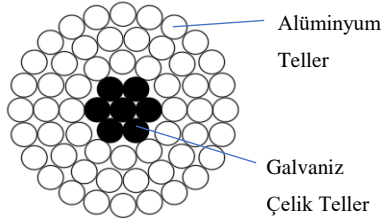
Elektrik enerjisi, üretim merkezlerinden tüketim noktalarına kadar havai hat iletkenleri ile taşınmaktadır. Enerji iletiminin verimli ve güvenli bir şekilde yapılabilmesi için iletken seçimi, ısıya karşı dayanıklılık, çap, sehim, özgül ağırlık, korona kaybı, mekanik dayanıklılık ve iletkenlik gibi kriterlere göre yapılmaktadır. Bu kriterler, iletim hatlarının özelliğine göre iletken seçimini de kolaylaştırır. İletken tiplerine göre bu kriterler farklılık gösterir [11].

A.1. Havai Hat İletkenlerinin Tipleri

Bu bölümde, çalışma kapsamında ısı performans analizleri yapılan iletken çeşitleri tanıtılmıştır.

A.1.1. ACSR

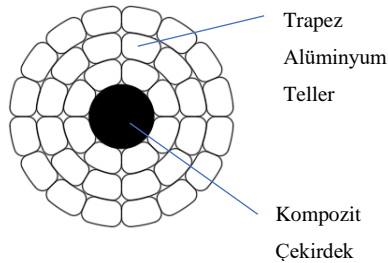
Çelik özlü alüminyum iletkenler geleneksel iletkenler olarak bilinen ve en çok kullanılan iletken tipidir. Alüminyum tellerin sayısı ve çapı iletkenin akım taşıma kapasitesini belirler. Çalışma sıcaklıkları 75-85 °C arasındadır [12].



Şekil 1. ACSR İletken Kesiti

A.1.2. ACCC

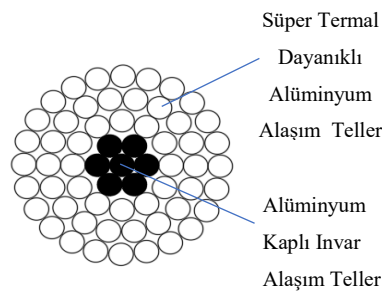
Kompozit özlü alüminyum iletkenler olarak bilinen tiptir. En iç katmanı hibrit karbon ve cam elyaftan, dış katmanlar trapez şeklinde tavllanmış alüminyum şeritlerden oluşur. Hafif, yüksek mukavemetli, düşük sehimli, yüksek akım taşıma kapasitesi ve yüksek çalışma sıcaklığına sahiptir [12]. Çalışma sıcaklığı 175 °C'dir [15].



Şekil 2. ACCC İletken Kesiti

A.1.3. STACIR

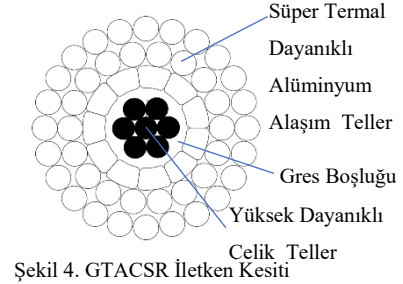
Invar iletkenler de olarak bilinen iletken tipidir. Çekirdeği alüminyum kaplı invar (demir-nikel alaşımı), dış iletken katmanlar ise süper termal dayanıklı alüminyum alaşım (alüminyum-zirkonyum) malzemeden oluşan iletken tipidir. Çalışma sıcaklığı 210 °C'dir [12].



Şekil 3. STACIR İletken Kesiti

A.1.4. GTACSR

Gap tip iletkenler olarak bilinen iletken tipidir. Çekirdeği yüksek dayanıklı çelik, dış katmanları süper termal dayanıklı alüminyum alaşım malzemeden oluşan ve alüminyum teller ile çekirdek arasında boşluk bulunan iletken tipidir. Bu boşluğa termal dayanıklı gres doldurulur [13]. Çalışma sıcaklığı 210 °C'dir [12].



Şekil 4. GTACSR İletken Kesiti

Bu çalışmada kullanılan iletkenlere ait genel özellikler Tablo 1'de verilmiştir [14]-[17].

Tablo 1: İletkenlere Ait Genel Özellikler

Özellikler	ACSR	ACCC	STACIR	GTACSR
Yüklenme Kapasitesi (A)	990	1946	1846	1877
DC Direnç (20°C)(Ohm/km)	0.0598	0.0461	0.0591	0.0545
Maks. Çalışma Sıcaklığı (°C)	75	175	210	210
Ağırlık (kg/km)	1837	1832	1795.7	1939
Maliyet Oranı	1	2.5-3	3-5	2

B. Metod

İletkenlerin, farklı sıcaklık ve rüzgar koşullarındaki 2-D termal analizleri "Comsol Multiphysics" yazılımında "Heat Transfer" modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar IEEE 738-Std. hesaplamaları ile karşılaştırılmıştır.

Temel eşitlikler aşağıda verilmiştir.

B.1. 2-D Isı Transfer Formülasyonu

İncelenen iletkenlerin ısı dağılımı öncelikle Comsol Multiphysics yazılımı yardımıyla ısı transfer modülünde iki boyutlu olarak elde edilmiştir. Isı transfer modülünde kullanılan kararlı durumda ısı iletim eşitliği aşağıdaki gibidir [18]:

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) + q = C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

Burada,

T: Sıcaklık (K)

k: malzemelerin termal iletkenliklerini (W/K.m)

q: üretilen ısı (W/m³)

C_p : Sabit bir sıcaklık için malzemelerin özgül ısı kapasiteleri (J/m³.K)

x ve y : sistem koordinatları

Ayrıca, iletken yüzey için sınır koşulu aşağıdaki eşitliklerdeki gibi ifade edilmektedir:

$$T=T_{conductor}$$

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T-T_{\infty}) \quad (2)$$

Burada [18],

T: Yüzey sıcaklığı (K)

h: konvektif ısı transfer katsayısı (W/m².K)

T_{∞} : Ortam sıcaklığı (K)

Konvektif ısı transfer katsayısı (h) dış zorlanmış konveksiyon (external forced convection) sekmesinde rüzgar hızı ve iletken çapı girilerek program tarafından hesaplanmaktadır. Enerji iletimi sırasında iletken üzerinde meydana gelen ısı üretimi aşağıdaki formül ile ifade edilmektedir [5]:

$$S = \frac{I^2 \cdot R}{L \cdot A} \quad (3)$$

Burada;

I : Tele uygulanan akım (A)

R : Tel direnci (Ω)

L : Tel uzunluğu(m)

A : Tel alanı (m²)

B.2. IEEE 738 Std. Formülasyonu

İletkenlerin çeşitli hava koşullarında, uygulanan farklı akım değerlerine göre erişeceği sıcaklıkları hesaplamak için IEEE-738 standardında çeşitli

formüller sunulmuştur. Buna göre, kararlı hal ısı dengesi eşitliği aşağıdaki gibi tanımlanmıştır [19];

$$q_c + q_r = q_s + I^2 \cdot R(T_{avg}) \quad (4)$$

Burada,

q_c : Birim uzunluk başına konveksiyon ısı kaybı oranı (W/m)

q_r : Birim uzunluk başına yayılan ısı kaybı oranı (W/m)

q_s : Güneşten ısı kazanç oranı (W/m)

I: İletken akımı (A)

$R(T_{avg})$: Ortalama alüminyum şerit katman sıcaklığında iletken direnci (Ω/m)

C. Modelleme ve Analiz

Bu bölümde, yapılan çalışmada kullanılan simülasyon modellerinden, değerlendirmesi yapılan iletkenlere ait malzemelerin özelliklerinden bahsedilmiştir.

Ayrıca, simülasyon sonuçları paylaşılarak, iletkenlerin 5-15-25-35 °C hava sıcaklıklarında ve 0.1-0.5-1- 3-5-7-9-11-13-15 m/s rüzgar hızlarında 2-D karşılaştırmalı ısı analizleri gerçekleştirilmiştir.

C.1. Modelleme

İletken geometrileri Autocad yazılımında oluşturulmuştur. Çizimler sırasında dikkate alınan boyutlar Tablo 2’de gösterilmiştir. Bu ölçülerin yanı sıra, GTACSR iletkeninin geometrisi oluşturulurken iletken katalogunda verilen çap ve kesitlere bağlı kalınarak 1 mm Gres boşluğu bırakılmıştır.

Tablo 2. İletkenlere Ait Bilgiler

İletken	Dış Çap (mm)	İletken Kesiti (mm ²)	Öz Kesiti (mm ²)
ACSR	30.42	484	62
ACCC	30.43	619	60
STACIR	30.42	484	62
GTACSR	31.5	540	52

İletkenlerin cinsine göre alüminyum ve öz kısmında kullanılan malzemeler Tablo 3’te paylaşılmıştır.

Tablo 3. İletkenlerde kullanılan malzemeler

İletken	ACSR	ACCC	STACIR	GTACSR
Al	1350-H19	1350-O	AT3	AT3
St	Galvaniz Çelik	Kompozit Öz	Invar Çelik	Yüksek Dayanımlı Çelik
Gress	-	-	-	Termal Gres

Hazırlanan iletken geometrileri, COMSOL Multiphysics yazılımına aktarıldıktan sonra, ısı analizlerde kullanılmak üzere Tablo 4’te belirtilen karakteristik özellikler malzemelere tanımlanmıştır [20-31],[33].

Tablo 4. İletkenlerde Kullanılan Malzemeler İçin Bazı Değerler

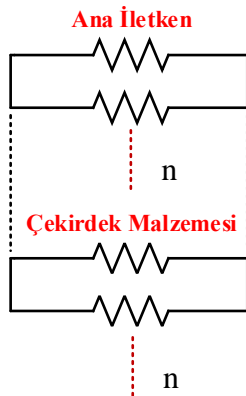
Özellik	Süper		1350-H19 Alüminyum	Invar Çelik	Galvaniz Çelik	Yüksek Dayanıklı Çelik	Kompozit Öz	Termal Gres
	Termal Alüminyum Alaşım (AT3)	1350-O Alüminyum						
Yoğunluk (kg/m ³)	2703	2705	2705	8140	7780	7850	1935	2600
Isıl İletkenlik (W/m.K)	200	234	230	13.4	56	44.5	18	3
Isıl Kapasite (J/kg.K)	908	899	900	515	500	475	813	1200
Direnç (nΩ.m)	28.735	27.899	28.2	815	192	248.02	1.4 Ω	-

C.1.1 Simülasyon Yapısı

Simülasyon çalışması, COMSOL Multiphysics yazılımı Isı Transfer (Heat Transfer) modülünde, kararlı halde (stationary) iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiştir.

50 Hz frekansta, iletkenin akan akımın büyük çoğunluğu homojen olarak iletkenin alüminyum kısmından akarken, çok küçük de olsa iletken özünden de akım akmaktadır. Örneğin, 240/40 mm² kesitli ACSR iletkeni ile yapılan bir çalışmada, iletken öz kısmından akan akımın alüminyum kısmından geçen akımın %2.5'i ile %0.2'si arasında bir değer aldığı belirlenmiştir [32].

Buradan hareketle tüm iletken tiplerinin Şekil 5'te gösterildiği gibi çeşitli katmanlardaki ana iletken ve öz malzemesinin paralel şekilde bir araya gelmesi ile oluştuğu kabul edilmiştir. Buna göre, eşit bir yüklenme meydana getirmek için ACSR'nin akım taşıma kapasitesi olan 990 A, incelenen 4 tip iletkene de uygulanmıştır. Uygulanan akım, iletken malzemeye ait materyallerin direnç değerleri kullanılarak öz ve ana iletken arasında paylaştırılmıştır.



Şekil 5. İletken eşdeğer yapısı

Her tel için akım değerinin elde edilmesinden sonra, formül (3) kullanılarak üretilen ısı hesaplanmış ve simülasyonda uygulanmıştır.

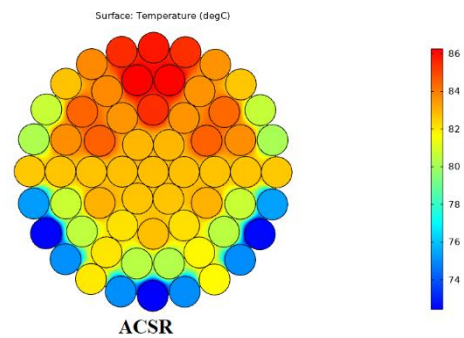
İletken tiplerinin ısı performansları, 5-15-25-35 °C hava sıcaklıklarında ve 0.1-0.5-1-3-5-7-9-11-13-15 m/s rüzgar hızlarında analiz edilmiştir.

C.2. Analiz Sonuçları

COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak 4 tip iletkene çeşitli hava koşullarında 990 A akım uygulanmış ve 2-D ısı analizleri yapılmıştır. Belirlenen senaryolar ve analiz sonuçları bu bölümde verilmiştir.

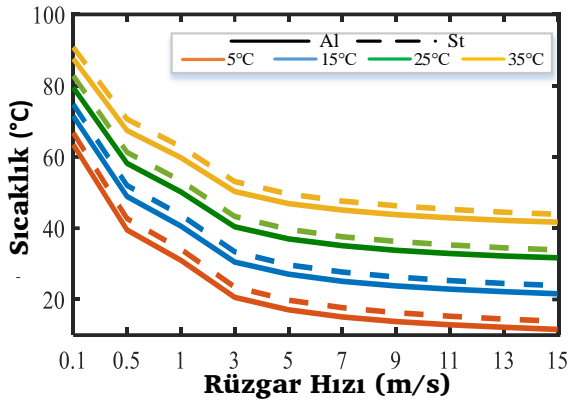
25 °C hava sıcaklığında ve 0.1 m/s rüzgar hızında ACSR iletkeninin COMSOL ısı analizi görüntüsü Şekil 6'da verilmiştir.

ACSR iletkeninin 990 A ile yüklenmesi durumunda, alüminyum ve çelik tellerinin 5, 15, 25 ve 35°C ortam sıcaklıklarında ve 0.1, 0.5, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 m/s rüzgar hızlarındaki ortalama sıcaklık değerleri Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 6. ACSR iletkeni COMSOL analizi görüntüsü

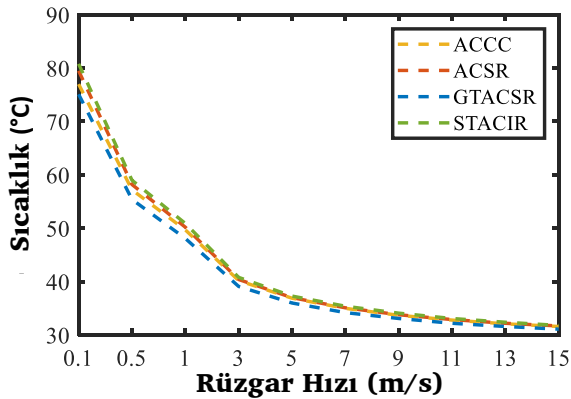
Şekil 7'de görüldüğü gibi ortam sıcaklığı ve rüzgar hızının iletken sıcaklıkları üzerindeki etkisi oldukça yüksektir. Sıcaklık arttıkça alüminyum ve çelik tellerin sıcaklık değerleri de artmaktadır.



Şekil 7. ACSR iletkene ait alüminyum ve çelik tellerin farklı sıcaklık ve rüzgar hızlarında ortalama sıcaklık değişimi

10°C ortam sıcaklık artışı, düşük rüzgar hızlarında iletkin sıcaklığını yaklaşık 8°C artırırken yüksek rüzgar hızlarında bu etki daha belirginleşmekte ve iletkinler arasındaki sıcaklık farkı 10°C olmaktadır. Bunun yanı sıra, rüzgar hızı arttıkça iletkin sıcaklıklarındaki düşüş net şekilde görülmektedir. Ayrıca, sıcaklıktaki azalış hızı, rüzgar hızı ile ters orantılıdır. Örneğin, rüzgar hızı 0.1 m/s'den 0.5'e yükseltildiğinde iletkin sıcaklık değerleri ortalama 20°C'den fazla azalırken, rüzgar 13 m/s'den 15 m/s'ye yükseltildiğinde iletkin sıcaklıkları yaklaşık 0.5 °C düşmektedir.

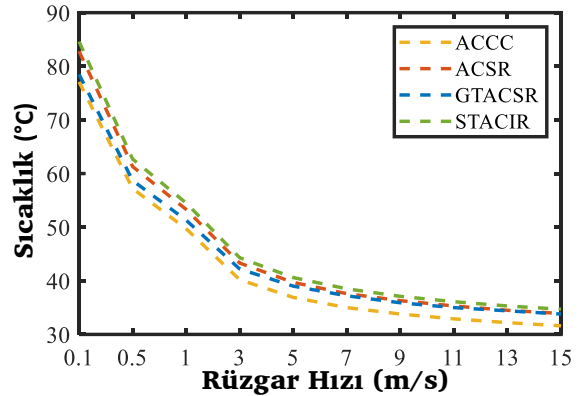
ACSR, ACCC, STACIR ve GTACSR iletkinleri için 25 °C ortam sıcaklığında 0.1, 0.5, 1, 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15 m/s rüzgar hızlarında alüminyum teller ve özlerinin sıcaklık değişimleri Şekil 8 ve Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 8. 4 tip iletkene ait alüminyum tellerin rüzgar hızına göre sıcaklık değişimi (25°C&1000 W/m²)

Alüminyum tellere ait ortalama sıcaklık, en yüksek STACIR iletkeninde görülürken, en düşük olduğu iletkenin GTACSR tipi iletkin olduğu görülmüştür. STACIR iletkeninin alüminyum tellerinin sıcaklığı ACSR iletkeninden yaklaşık 1.3 °C, ACCC iletkeninden yaklaşık 3°C ve GTACSR iletkeninden yaklaşık 5.7 °C yüksek olduğu görülmektedir. İletken öz materyallerinin sıcaklık değerleri, beklendiği gibi, alüminyum tellerden daha yüksek sıcaklığa sahiptir. Bunun yanı sıra, en yüksek ortalama öz sıcaklığı 0.1 m/s rüzgar hızında 84.6 °C,

15 m/s rüzgar hızında 34.7 °C olarak STACIR iletkeninde, en düşük ortalama öz sıcaklığı ise 0.1 m/s rüzgar hızında 77.1 °C, 15 m/s rüzgar hızında 31.6 °C ile ACCC iletkeninde görülmektedir.



Şekil 9. İletken özlerinin rüzgar hızına göre sıcaklık değişimi (25°C&1000 W/m²)

STACIR iletkeninin öz sıcaklığı ACSR iletkeninden yaklaşık 1.8 °C, ACCC iletkeninden yaklaşık 7.5 °C ve GTACSR iletkeninden yaklaşık 6.1 °C yüksektir. Yapılan simülasyon çalışmasının doğrulaması, IEEE 738 standardına göre tüm iletkin tipleri için yapılan hesaplamalar ile gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar sırasında kullanılan parametreler Tablo 5'te verilmiştir. Bu değerler, simülasyon çalışması için de geçerlidir.

Tablo 5. Analitik hesaplarda kullanılan parametreler

Parametre	Kullanılan Bilgi
Ortam Sıcaklığı	25 °C
Absorbitivity	0.8
Emissivity	0.8
Güneş geliş açısı	90°
Rüzgar açısı	90°
Güneş Radyasyonu	1000 W/m ²
Akım	990 A
Havanın Vizikositesi(μ_f)	2.043×10^{-5}
Hava kütlesi (ρ_f)	1.029
Havanın Termal İletkenliği(k_f)	0.02945

Şekil 10'da görüldüğü gibi ACSR, STACIR ve GTACSR iletkeni için düşük rüzgar hızlarında simülasyon sonuçları analitik sonuçlara göre yaklaşık 3 °C daha düşük sonuçlar vermiştir. Rüzgar hızı arttıkça aradaki fark düşmekte ve 9 m/s'den sonra sonuçlar eşit olmaktadır. ACCC iletkeni için

ise simülasyon çalışması neticesinde yaklaşık 2°C daha yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Rüzgar hızı arttıkça bu fark 1 °C civarına düşmektedir. Sonuçlar arasında küçük farklar olsa da simülasyon sonuçları ve analitik sonuçların tutarlı olduğu görülmüştür.

III. DEĞERLENDİRME

Gerçekleştirilen çalışmada, ACSR, ACCC, GTACSR ve STACIR havai hat iletkenlerinin ısı performansları Comsol Multiphysics yazılımı ve IEEE-738 standartı dikkate alınarak incelenmiştir. Farklı ortam sıcaklıkları ve rüzgar hızları için yapılan analizlerin neticesinde göz önüne alınan iletkenlerin davranışları ortaya konmuştur.

5°C ve 35°C sıcaklıkta farklı rüzgar hızları için simülasyon ve analitik hesap ile elde edilen sıcaklık değerleri Tablo 6'da verilmiştir.

Sıcaklık değerlerine bakıldığında ortam sıcaklığı arttıkça iletkenlerin sıcaklıkları arttığı açık şekilde görülmektedir. Bu sebeple sıcak havalarda hattın yüklenebilirliği düşmektedir. 0.1 m/s rüzgar hızında, ortam sıcaklığı 5 °C'den 35 °C'ye çıkarıldığında

STACIR iletkeninin sıcaklığında 23.9 °C artış olmuştur ve diğer iletkenlere göre ortam sıcaklığından daha az etkilenmektedir.

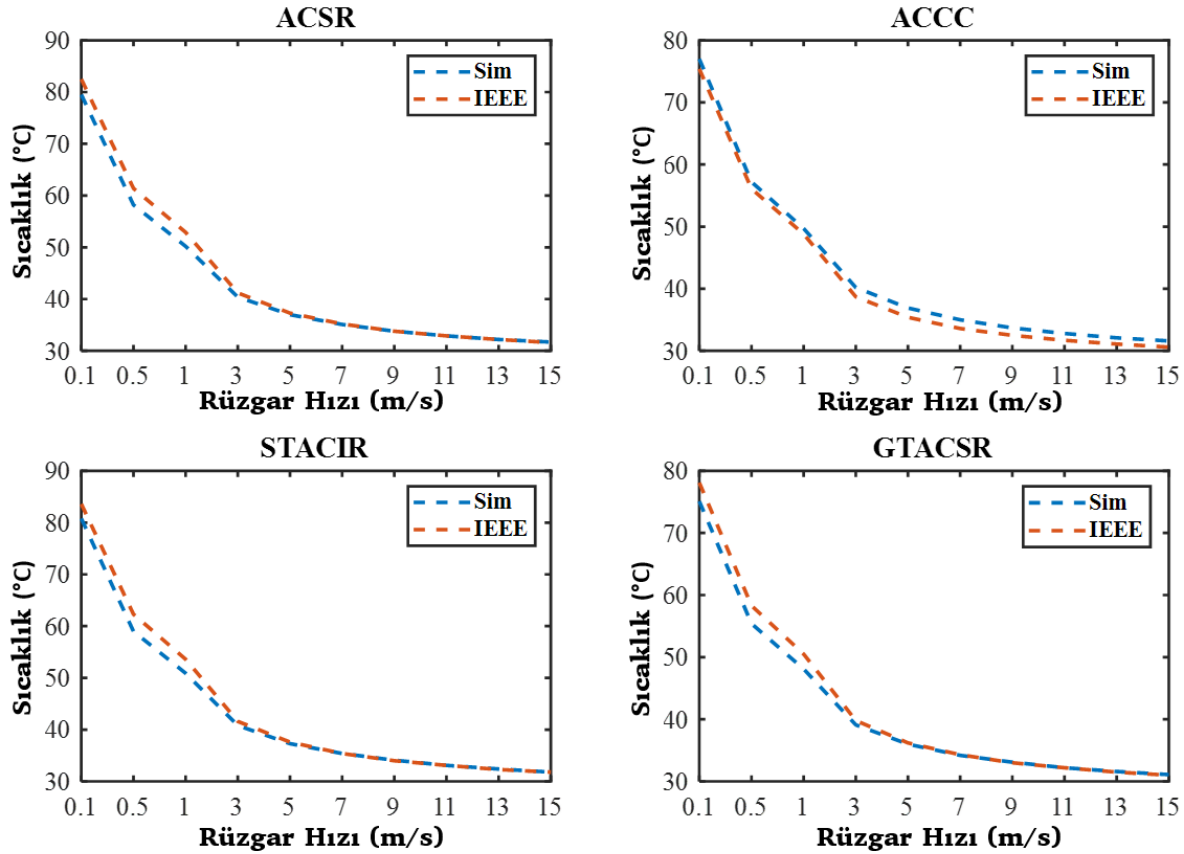
Diğer yandan, rüzgar hızı arttıkça iletkenlerin sıcaklığı azaldığı görülmüştür. Böylece, rüzgar hızı arttıkça hattın yüklenebilirliği de artmaktadır. Düşük rüzgar hızlarında iletkenin sıcaklığı rüzgar hızlarına

büyük oranda bağlıdır, rüzgar hızı arttıkça bu oran azalmaya başlamaktadır. 5 °C ortam sıcaklığında rüzgar hızı 0.1 m/s'den 0.5 m/s'ye çıkarıldığında

STACIR iletkeninin sıcaklığında 24.4 °C azalma olmuştur. Yani rüzgar hızı artışı STACIR iletkeninde daha etkindir. Düşük rüzgar hızlarında farklı tip iletkenler arasında sıcaklık farkları 8 °C'lere ulaşırken yüksek rüzgar hızlarında bütün iletkenlerin sıcaklık farkları 0.7 °C'lere düşerek birbirine çok yaklaşmaktadır.

Aynı zamanda iletkenlerin geometrileri de iletkenin ısı davranışında önemli rol oynamaktadır. İletken tellerin dizilim şekillerine göre yaklaşık aynı çapta iletkenin alüminyum kesiti değişmektedir. Eşitlik 3'te ve sonuçlarda görüldüğü gibi alanın artması ile birlikte iletken ısınması azalmaktadır.

Yapılan analizler ve hesaplamalar sonucunda, uygulanan akıma ve belirlenen şartlara göre GTACSR ile ACCC iletkeni benzer özellikler göstererek en iyi ısı performans gösteren iletken tipleri olmuştur. ACSR ve STACIR iletkenlerinin ısı performansı ise aynı akım altında diğer iletkenlerden daha yüksek sıcaklık değerlerine erişildiği için daha düşüktür.



Şekil 10. Simülasyon ve IEEE 738 hesaplamalarının karşılaştırılması

Tablo 6. İletken tiplerinin 5°C ve 35°C sıcaklıkta rüzgar hızı ile sıcaklık değerlerinin değişimi

Ortam Sıcaklığı		5 °C															
Rüzgar Hızı(m/s)	İletken	ACSR				GTACSR				STACIR				ACCC			
		Sim.(°C)		Std.(°C)		Sim. (°C)		Std.(°C)		Sim. (°C)		Std.(°C)		Sim. (°C)		Std.(°C)	
	Al	Öz	Al	Öz	Al	Öz	Al	Öz	Al	Öz	Al	Öz	Al	Öz	Al	Öz	
0.1		63,5	66,8	66,3	69,5	58,8	62,2	61,6	64,7	64,8	68,7	67,5	70,8	61,0	61,0	58,8	61,5
0.5		39,5	42,7	43,1	46,3	36,6	40,0	39,9	42,9	40,4	44,2	44,0	47,3	38,6	38,7	37,5	40,2
1		31,0	34,1	33,9	37,1	28,8	32,0	31,4	34,5	31,6	35,3	34,6	37,9	30,5	30,5	29,6	32,3
3		20,6	23,5	21,5	24,7	19,3	22,4	20,0	23,1	21,0	24,5	21,9	25,2	20,4	20,4	19,0	21,7
5		17,1	19,8	17,4	20,7	16,1	19,1	16,3	19,4	17,4	20,7	17,7	21,1	16,9	17,0	15,5	18,3
7		15,1	17,7	15,3	18,5	14,3	17,2	14,4	17,4	15,4	18,6	15,5	18,9	15,0	15,0	13,7	16,4
9		13,8	16,3	13,9	17,1	13,1	15,9	13,1	16,2	14,1	17,2	14,1	17,5	13,7	13,8	12,6	15,3
11		12,9	15,3	12,9	16,2	12,2	15,0	12,2	15,3	13,1	16,1	13,1	16,5	12,8	12,8	11,7	14,5
13		12,2	14,5	12,2	15,4	11,6	14,3	11,6	14,6	12,4	15,3	12,4	15,7	12,1	12,1	11,1	13,8
15		11,6	13,9	11,6	14,9	11,1	13,8	11,1	14,1	11,8	14,7	11,8	15,1	11,6	11,6	10,6	13,4
Ortam Sıcaklığı		35 °C															
Rüzgar Hızı(m/s)	İletken	ACSR				GTACSR				STACIR				ACCC			
		Sim.(°C)		Std.(°C)		Sim. (°C)		Std.(°C)		Sim. (°C)		Std.(°C)		Sim. (°C)		Std.(°C)	
	Al	Öz	Al	Öz	Al	Öz	Al	Öz	Al	Öz	Al	Öz	Al	Öz	Al	Öz	
0.1		87,6	90,8	90,7	93,9	83,2	86,6	86,3	89,4	88,7	92,6	91,7	95,1	85,1	85,1	83,7	86,5
0.5		67,4	70,6	70,6	73,8	64,7	68,0	67,5	70,6	68,2	72,0	71,4	74,7	66,5	66,5	65,4	68,1
1		59,8	62,9	62,4	65,7	57,7	61,0	60,1	63,1	60,5	64,1	63,1	66,4	59,3	59,3	58,3	61,1
3		50,3	53,1	51,0	54,2	49,0	52,1	49,6	52,6	50,7	54,1	51,4	54,7	50,1	50,1	48,6	51,3
5		46,9	49,6	47,2	50,4	45,9	48,9	46,1	49,1	47,3	50,5	47,5	50,8	46,8	46,8	45,3	48,0
7		45,1	47,6	45,1	48,3	44,2	47,1	44,2	47,3	45,3	48,5	45,3	48,7	45,0	45,0	43,6	49,3
9		43,8	46,3	43,8	47,0	43,1	45,9	43,0	46,1	44,0	47,1	44,0	47,3	43,7	43,7	42,4	45,2
11		42,9	45,3	42,8	46,1	42,2	45,0	42,1	45,2	43,1	46,1	43,0	46,4	42,8	42,9	41,0	43,8
13		42,2	44,5	42,1	45,3	41,6	44,4	41,5	44,5	42,4	45,3	42,3	45,6	42,2	42,2	41,0	43,8
15		41,7	43,9	41,6	44,8	41,1	43,8	41,0	44,0	41,8	44,7	41,7	45,1	41,6	41,6	40,6	43,3

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, yaklaşık aynı dış çapa sahip ACSR, ACCC, STACIR ve GTACSR tipi 4 farklı havai hat iletkenlerinin eşit yüklenme altındaki iki boyutlu ısı analizleri, COMSOL Multiphysics yazılımı kullanılarak çeşitli hava koşullarında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, IEEE 738 ile analitik hesaplamalar yapılarak sonuçlar desteklenmiştir.

Artan enerji talebini karşılamak için iletim hatlarının yaklaşık olarak aynı çapta iletkenlerle değiştirilmesi sonucu hattın, güç taşıma kapasitenin artırılabilmesinin görülmesi açısından önemli sonuçlar elde edilmiştir.

Isıl analizler neticesinde, 4 tip iletken arasından en iyi performansı GTACSR ve ACCC tip iletkenlerin verdiği görülmüştür. Trapez tipi dizilimli iletkenler yaklaşık olarak aynı dış çapa sahip yuvarlak dizilimli iletkenlere göre alüminyum iletken kesitini artırdığından daha verimlidir.

Diğer yandan, ortam koşullarının, iletkenlerin ısı performansına etkisi nedeniyle akım taşıma kapasitesini etkileyeceği açık şekilde görülmektedir. Bu nedenle, enerji iletim hatlarının inşası için iletken

seçimi yapılırken ilgili bölgenin ortalama sıcaklık ve rüzgar değerleri göz önünde bulundurulmalıdır.

Gelecekte bu çalışmanın, farklı iletken tipleri de dahil edilerek, farklı rüzgar ve güneş açılarında, değişken güneş ışınma koşullarında ve farklı nem ile basınçlar dikkate alınarak genişletilmesi planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] M. Kumar ve R. Rahangdale, "Comparative Analysis of ACSR and HTLS Conductor," *International Journal on Future Revolution on Computer Science & Communication Engineering*, vol. 4, no.5, May 2018.
- [2] B. S. Reddy ve D. Chatterjee, "Analysis of High Temperature Low Sag Conductors used for High Voltage Transmission," *Energy Procedia*, vol. 90, pp. 179-184, Dec. 2016.
- [3] B. S. Reddy ve G. Mitra, "Investigations on High Temperature Low Sag (HTLS) Conductors," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, is. 4, pp. 1716-1724, Aug. 2020.

- [4] S. Beryozkina ve A. Sauhats, "Research and Simulation of Overhead Power Line Uprating Using Advanced Conductors," in *RTUCON'56*, 2015.
- [5] I. Makhkamova, P. C. Taylor, J. R. Bumbay, K. Mahkamov, "CFD Analysis of the Thermal State of an Overhead line Conductor," in *43th International Universities Power Engineering Conference*, 2008.
- [6] S. A. Rahman ve K. Kopsidas, "Modelling of Convective Cooling on Conductor Thermal Ratings Methods," in *IEEE Manchester PowerTech*, 2017.
- [7] J. C. del-Pino-López, D. Garrido-García, P. Cruz-Romero ve A. Gómez-Expósito, "Novel conductor design to increase the thermal rating of overhead lines," in *ICREPO'16*, 2016.
- [8] B. S. Reddy ve D. Chatterjee, "Computation of Current and Temperature Distribution for High Temperature Low Sag Conductors," in *6th IEEE Power India International Conference*, 2014.
- [9] F. A. Gomez, J. M. G. D. Maria, D. G. Puertas, A. Bairi ve R. G. Arrabe, "Numerical Study of the Thermal Behaviour of Bare Overhead Conductors in Electrical Power Lines," in *Proc. AEE'11*, 2011, p. 149.
- [10] G. Liu, Y. Li, K. Qi, J. Yu, ve Y. Cai, "Sag Calculation Difference Caused by Temperature Difference between the Steel Core and Outer Surface of Overhead Transmission Lines," in *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2016.
- [11] N. Ocak, "Accc Lisbon Alüminyum İletkeninin Teknik Özelliklerini Etkileyen Parametrelerin Araştırılması, Geliştirilmesi Ve Acsr Hawk Konvansiyonel İletkeniyle Karşılaştırılması," Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, Türkiye, Eylül 2020.
- [12] M. Sheshagiri ve B. V. Sanker Ram, "Enhancement of Power Transfer Capability of Transmission Lines Using HTLS Conductor," *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, vol. 5, is. 12, Dec. 2016.
- [13] *Presentation on HTLS*, Sterlite Technologies Limited, 2012.
- [14] "Aluminium Conductor Steel Reinforced – ACSR Data Sheet," Nexans Group, Rio De Janeiro, Brezilya
- [15] "Energy Efficient High Current OH Conductors – Technical Data Sheet," Midal Cables Ltd., Dammam, Suudi Arabistan.
- [16] "High Temperature Low Sag Conductor & Optical Ground Wire Data Sheet," LS Cable & System, Anyang-si, Güney Kore.
- [17] M. Ntuli, N. Mbuli, L. Motsoeneng, R. Xezile ve J. Pretorius, "Increasing the Capacity of Transmission Lines via Current Uprating: An Updated Review of Benefits, Considerations and Developments," in *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 2016.
- [18] B. Küçükaydın ve O. Arıkan, "Ortam Koşullarının Yeraltı Kablolarının Sıcaklığı ve Akım Taşıma Kapasitesi Üzerindeki Etkisi," *Elektrik-Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu*, 2014.
- [19] *Standard for Calculating the Current-Temperature Relationship of Bare Overhead Conductors*, IEEE Std. 738, 2012.
- [20] *Thermal-resistant aluminium alloy wire for overhead line conductor*, BS EN 62004, 2009.
- [21] N. M. Zainuddin, M. S. Abd. Rahman, M. Z. A. Ab Kadir, N. H. Nik Ali, Z. Ali, M. Osman, M. Mansor, A. Mohd Ariffin, M. Syahmi Abd. Rahman, S. F. M. Nor, N. A. F. Mohamad Nasir, "Review of Thermal Stress and Condition Monitoring Technologies for Overhead Transmission Lines: Issues and Challenges," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 120053-120081, June 2020.
- [22] J.R. Davis, "Aluminum and Aluminum Alloys", ser. III. Ohio, Amerika Birleşik Devleti: ASM International Handbook Committee, 1993.
- [23] *Standard Specification for Aluminum 1350 Round Wire, Annealed and Intermediate Tempers, for Electrical Purposes*, ASTM B609/B609M – 12, 2021.
- [24] *Standard Specification for Aluminum 1350-H19 Wire for Electrical Purposes*, ASTM B230/B230M – 07, 2021.
- [25] "36% Nickel-Iron Alloy For Low Temperature Service," The International Nickel Company, INC., New York, Amerika Birleşik Devleti.
- [26] The COMSOL Software, Material Library.
- [27] X. Liu, Z. Wu ve J. Yan, "Experimental Study of the Electrical Resistivity of Glass-Carbon/Epoxy Hybrid Composites," *Polymers and Polymer Composites*, vol. 22, no.3, Ap. 2014.
- [28] A. Alawar, E. J. Bosze ve S. R. Nut, "A Composite Core Conductor for Low Sag at High Temperatures," *IEEE Transactions On Power Delivery*, vol. 20, is. 3, july 2005.
- [29] "ACCC Data Sheet", CTC Global Corp., California, Amerika Birleşik Devleti.
- [30] I. M. Alarifi, "Investigation the conductivity of carbon fiber composites focusing on measurement techniques under dynamic and static loads," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 8, is. 5, pp. 4863-4893, Au. 2019.
- [31] J. G. Kaufman, "Fire Resistance of Aluminum and Aluminum Alloys and Measuring the Effects of Fire Exposure on the Properties of Aluminum Alloys," Ohio, Amerika Birleşik Devleti: ASM International, 2016.
- [32] K. Kasas-Lazetic, D. Hecceg, N. Djuric, D. Kljajic, ve M. Prsa, "Influence of ACSR Steel Core Permeability on Entire Conductor's Load Parameters," in *19th*

International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, 2016.

- [33] Sumitomo Electric Industries Ltd., “High-strength heat-resistant aluminium alloy, conductive wire, overhead wire and method of preparing the aluminium alloy,” European Patent Office EP0787811B1, May 3, 2000.