



Multi-Physical analysis of the effect of cable layout, distance between cables and ambient temperature on cable current carrying capacity in air vehicle wiring with finite element method

Burhan Mert Yıldız^{1*}, Özcan Kalenderli², Özkan Altay¹

¹Turkish Aerospace Industries Inc., 06980, Ankara, Türkiye

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Electrical and Electronics Engineering, İstanbul Technical University, 34469, İstanbul, Türkiye

Highlights:

- Factors affecting the current carrying capacity of the cables in air vehicle
- The effect of distance between cables and ambient temperature on cable current carrying capacity
- Importance of cables layout in air vehicle

Keywords:

- Air vehicle cables
- Thermal analysis
- Current carrying capacity
- Finite element method
- Multi-physical analysis

Article Info:

Research Article

Received: 16.07.2021

Accepted: 03.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.971960

Correspondence:

Author: Burhan Mert Yıldız
e-mail:
burhanmert.yildiz@tai.com.tr
phone: +90 531 274 5842

Graphical/Tabular Abstract

In order to determine the laying conditions of power cables used in air vehicles, the thermal behavior, which is one of the dominant factors affecting the current carrying capacity, was investigated. When considering maximum operating temperature of cables, multi physical analysis model is created in order to investigate current carrying capacity depends on varying parameters that are the ambient temperature and distance between cables. For this reason, the model is examined by finite element method to observe the relationship between the temperature of the cable and the environment in which it is laid and the current carrying capacity (Figure A).

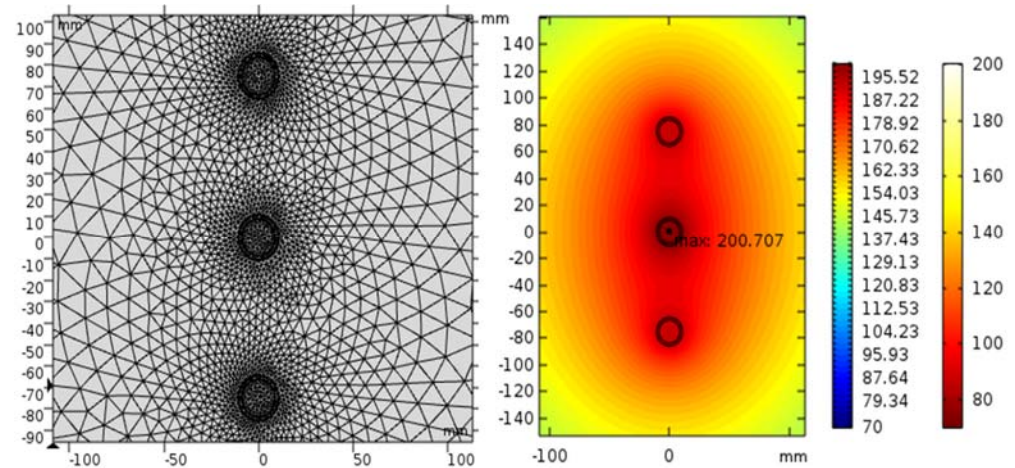


Figure A. The effect of temperature on cables in air vehicle

Purpose:

In this study, the analyses were carried out to observe the effect of ambient temperature and distance between cables on current carrying capacity.

Theory and Methods:

A power cable was modeled, the environmental was created according to aerospace standards, and electrical-thermal multi-physical analysis were performed with finite element method in the program.

Results:

The decrease in the distance between the cables causes the current carrying capacity of the cable to decrease and it has been observed that the falling of ambient temperature also reasons the current carrying capacity of the cable to increase.

Conclusion:

While making wiring design or cable selection for the safe power transmission in aerospace vehicles should be considered the ambient temperature, the position of cables relative to each other and current carrying capacity of cables.



Hava araçlarında kablolamada kablo düzeninin, kablolar arası uzaklığın ve ortam sıcaklığının kablo akım taşıma kapasitesine etkisinin sonlu elemanlar yöntemi ile çoklu fiziksel analizi

Burhan Mert Yıldız^{1*}, Özcan Kalenderli², Özkan Altay¹

¹TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayii A.Ş., 06980, Kahramankazan, Ankara, Türkiye

²İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, 34469, Maslak, İstanbul, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Hava aracındaki kabloların akım taşıma kapasitesini etkileyen faktörler
- Kablolar arasındaki mesafenin ve ortam sıcaklığının kablo akım taşıma kapasitesine etkisi
- Hava aracında kablo düzeninin önemi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 16.07.2021

Kabul: 03.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.971960

Anahtar Kelimeler:

Hava aracı kabloları
ısı analizi
Mevcut taşıma kapasitesi
sonlu eleman yöntemi
çoklu fiziksel analiz

ÖZ

Bu çalışmada, hava araçlarında kullanılan güç kablolarının, döşeme koşullarının belirlenmesi amacıyla akım taşıma kapasitelerini etkileyen baskın etkenlerden olan ısısal davranışı, sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Bu amaçla kablolonun ve döşendiği ortamın sıcaklığı ile akım taşıma kapasitesi arasındaki ilişkiyi gözlemlemek için COMSOL programında, elektrik-ısısal çoklu fiziksel analiz modeli oluşturulmuştur. Analizlerde SAE AS22759/1 standartına uygun bir damarlı, 2 AWG (39,19 mm²) kesitli kablolar göz önüne alınmıştır. Çalışma kapsamında hem ortam sıcaklığının hem de kablolar arası uzaklığın kablolonun akım taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir. Seçilen kabloların dayanabileceği en büyük sıcaklık değeri (200°C) göz önünde bulundurularak, kablolar arasında 75 mm mesafe varken bir kablodan geçen akım değeri 198A olduğu görülmüştür. Kablolar arasındaki mesafe 30 mm ve kablolar bitişik olduğunda sırasıyla kablolardan geçen akım değeri 184A ve 181A olarak gözlemlenmiştir. Kablolar bitişik düzende olduğunda, ortam sıcaklık değerleri 70°C, 50°C ve 20°C için analizler yapılmıştır. Belirtilen ortam sıcaklık değerlerine göre kablodan geçen akım değerleri sırasıyla 179A, 191,5A ve 205A olarak hesaplanmıştır. Yapılan analizler sonucunda, kablolar arasındaki uzaklığın azalmasının kablolonun akım taşıma kapasitesinin azalmasına; ortam sıcaklığının azalmasının da kablolonun akım taşıma kapasitesinin artmasına neden olduğu görülmüştür.

Multi-Physical analysis of the effect of cable layout, distance between cables and ambient temperature on cable current carrying capacity in air vehicle wiring with finite element method

H I G H L I G H T S

- Factors affecting the current carrying capacity of the cables in air vehicle
- The effect of distance between cables and ambient temperature on cable current carrying capacity
- Importance of cables layout in air vehicle

Article Info

Research Article

Received: 16.07.2021

Accepted: 03.10.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.971960

Keywords:

Air vehicle cables
thermal analysis
current carrying capacity
finite element method
multi-physical analysis

ABSTRACT

In this paper, in order to determine the laying conditions of power cables used in air vehicles, the thermal behavior, which is one of the dominant factors affecting the current carrying capacity, was investigated by the finite element method. For this purpose, electrical-thermal multiple physical analysis model was created in COMSOL programme to observe the relationship between the temperature of the cable and the environment in which it is laid and the current carrying capacity. In the analysis, 2 AWG (39.19 mm²) cross-section cables in accordance with SAE AS22759/1 standard were taken into consideration. Within the scope of the study, the effect of both the ambient temperature and the distance between the cables on the current carrying capacity of the cable was examined. Considering the maximum temperature value (200°C) that the selected cables can withstand, while there is a distance of 75 mm between the cables it has been observed 198A for a cable. When the distance between the cables is 30 mm and the cables are adjacent, current values are as 184A and 181A, respectively. When the cables are in adjacent, analysis was performed for ambient temperature values of 70°C, 50°C and 20°C. According to these ambient temperature values, current carrying capacity is calculated as 179A, 191,5A and 205A respectively. As a result of the analysis, the decrease in the distance between the cables causes the current carrying capacity of the cable to decrease and it has been observed that the decrease in the ambient temperature also causes the current carrying capacity of the cable to increase.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : *burhanmert.yildiz@tai.com.tr, kalenderli@itu.edu.tr, ozaltay@tai.com.tr /
Tel: +90 531 274 5842

1. Giriş (Introduction)

Havacılık sektöründe ihtiyaçların ve görev gereksinimlerin zamanla artması, bu alanda yeniliklerin doğmasına neden olmuştur [1]. Bakım ve sürdürme tabanlı işletme maliyetlerini [2] ve yakıt tüketimini azaltmak ve bu doğrultuda uçakların ağırlığını düşürmek amacı ile öncelikle daha fazla elektrikten yararlanan (özellikle pnömatik (havalı) ve hidrolik (yağlı) sistemlerin yerine elektrikli sistemlerin kullanılması), bunun sonucunda da daha yüksek gerilimli uçak kavramı ortaya çıkmıştır [3]. Artan gerilim seviyeleri ile aynı güç miktarının iletilmesinde, akım seviyesi düşerek kullanılan iletken kesitlerindeki azalma sonucu uçak kablolarında ağırlık ve hacimsel olarak azalma sağlanmaktadır [4]. Düşük ağırlık, düşük hacim, düşük bakım ve sürdürme maliyetleri hava araçlarının verimini, performansını ve işletme maliyetlerini etkileyen en önemli unsurlardır [5]. Bu nedenlerle, hava araçlarında kabloların tasarımı esnasında hem optimum kablo yerleşim güzergahını belirlemek hem de uygun kablo kesitini, malzemesini, çevresel koşullara dayanımını belirlemek büyük önem arz etmektedir [6]. Kablo boyutu seçimi yapılırken kabloların akım taşıma kapasitesi hesabı yapılmaktadır. Kabloların akım taşıma kapasitesi, kabloların yapısına ve kabloların bulunduğu ortama bağlı olarak değişkenlik göstermektedir [7].

Kablolar, iletkeninden akım geçtikçe, iletken direncinde harcanan elektrik enerjisinin karşılığı olarak ısınacaktır. Kablolarındaki bu ısınma, sıcaklığa bağlı olarak kablo iletken direncinin artmasına ve kabloların akım taşıma kapasitesinin düşmesine neden olacaktır. Bu ilişkiyi göz önüne alarak belirlenecek olan akım taşıma kapasitesi de kabloların kesitini, yapısını, hava aracı üzerinde döşenme koşullarını belirleyecektir [8]. Çünkü kabloların fiziksel yapısından dolayı bozulmadan (yumuşamadan, erimeden, yanmadan) ancak belirli bir sıcaklık değerine kadar çalışması mümkündür. Böylece kabloların akım taşıma kapasitesinin doğru hesaplanması, kabloların verimli, uzun ömürlü, güvenli ve güvenilir kullanabilmesine olanak sağlayacaktır [9]. Kabloların akım taşıma kapasitesi, kabloların fiziksel özelliklerinin yanı sıra kabloların döşenme (yerleştirilme) biçimine ve kabloların bulunduğu ortam sıcaklığına da bağlıdır [10]. Bu nedenle akım taşıma kapasitesinin hesabında birçok değişken büyüklük (parametre) bulunmaktadır; kabloların bulunduğu ortamın ısı özellikleri, ortam sıcaklığı, kabloların yerleştirme biçimi gibi çeşitli etmenler mevcuttur [11].

Bir güç kablosunun akım taşıma kapasitesinin hesabı için birçok analitik ve sayısal yöntem mevcuttur [12]. Analitik yöntemler, IEC (International Electrotechnical Commission) 60287 standardına dayanmaktadır [13]. Sayısal yöntemler ise çoğunlukla sonlu elemanlar yöntemi kullanılan uygulamalardır [14]. Hava araçları üzerinde bulunan elektrik güç tüketicilerinin (sistem donanımlarının) beslemesine yönelik seçilen kablolarla genellikle ilgili donanımın maksimum akım ihtiyacı ve kabloların kullanıldığı hava aracı kısımlarındaki çevresel koşullar göz önünde bulundurularak hızlı bir seçim yapılır (kablolar için hazırlanmış olan standart tablolar kullanılmaktadır.) [15]. Ancak, kabloların birbirlerine olan uzaklıkları ve yerleştirme koşulları da göz önünde bulundurulmalıdır, aksi takdirde yerde veya uçuş esnasında hava aracının güvenli çalışmasını etkileyecek kullanım koşulları oluşabilir [16]. Bu kapsamda, literatürde kabloların oluşan ısınmalarla ilgili birçok çalışmalar mevcuttur. Duraisamy vd. [12]. Denizaltında yerleştirilen kabloların nominal çalışma koşullarında, kabloların akım taşıma kapasitesinin analizleri yapılmıştır. COMSOL programında sonlu elemanlar yöntemini kullanılarak ısı-elektrik modeli ve ısı transferi modeli ile incelemeler yapılmıştır. Burada kabloların dayanabileceği en büyük sıcaklık değeri 90°C'dir. IEC standartına göre akım taşıma kapasitesi hesaplamaları yapılmıştır. Hesaplamalar ve program çıktıları karşılaştırıldığında ısı kayıpları incelenmiştir.

Ukil vd. [17]. Yeraltı kabloları için ortam sıcaklığının akım taşıma kapasitesi üzerine etkisini incelemiştir. Analizler CYMCAP yazılımında gerçekleştirilmiştir. Değişken ortam sıcaklıklarına göre kabloların akım taşıma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Toprağın ısı iletkenlik değerlerini ve kabloların yerleştirme derinliğini değiştirerek kabloların taşıyabileceği akım değerleri incelenmiştir.

Karaca [18]. Yeraltı kabloları için elektrik alan ve ısı analizleri yapılmıştır. Bu analizlerde sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır ve FEMLAB programı ile çalışılmıştır. Seçilen kabloyu farklı iletkenliğine sahip olan topraklarda incelenmiştir. Belirli bir ısı direncine sahip toprakta belirli aralıklarla kablolar yerleştirilmiş ve kabloların ısı dağılımı incelenmiştir. Karahan vd. [11]. Güç kablolarında elektrik ve ısı zorlanmalarının etkisi altında sıcaklık dağılımı ve ömürlerin belirlenmesi çalışması yapılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile yeraltı kablolarının ısı modeli oluşturulmuştur. Burada kablolar arasındaki mesafenin kablo sıcaklık dağılımına etkisi ve toprağın ısı iletkenliğinin değişiminin kablo sıcaklığına ve akım taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir.

Küçükaydn vd. [10]. Ortam koşullarının yeraltı kablolarının sıcaklığı ve akım taşıma kapasitesi üzerindeki etkisini incelemiştir. COMSOL programında sonlu elemanlar yöntemi ile analizler yapılmıştır. 380kV'luk yeraltı kablosu seçilmiştir. Kabloların gömülme derinliği, yatak malzemesinin ısı iletkenliği, toprak yüzey sıcaklıkları için analizler yapılmıştır. Her bir durum için kabloların akım taşıma kapasiteleri değerlendirilmiştir. Erdoğan vd. [19]. Hava araçlarında kullanılan iletken hatların üzerindeki akım taşıma kapasiteleri için hesaplamalar yapılmıştır. Ayrıca iklimlendirme kabini içerisindeki basınç kontrollü bir tüpte kablo deneyleri yapılmıştır. Kablo demet çaplarına göre birden fazla test durumları için araştırmalar ile kablolar arası ısı alışverişi incelenmiştir.

Yapılan çalışmalara bakıldığında, genellikle yeraltı güç kablolarının üzerine çalışılmıştır. Kabloların dayanabileceği sıcaklık ve gerilim değerleri dikkate alındığında kabloların akım taşıma kapasite değerleri analiz edilmiştir. Bu çalışmada, literatüre ek olarak hava araçlarında kullanılan kabloların ortam sıcaklığının ve kablolar arasındaki mesafelerin akım taşıma kapasitesi üzerine etkisi incelenmiştir. Seçilen kablo havacılıkta kullanılan ve SAE AS22759/1 standardına uygun 600V ve 200°C'ye dayanan kablo bilgilerini içermektedir.

2. Teorik Yöntem (Theoretical Method)

2.1. Güç Kablosunun Modellenmesi (Modelling of Power Cable)

Bu bölümde, bir güç kablosunda oluşabilecek sıcaklık dağılımı ile birlikte kabloların akım taşıma kapasitesini hesaplamak için gerekli teorik bilgilere yer verilmiştir. Kabloların oluşan ısınmanın başlıca nedeni, iletkenin geçen akım ile kabloların direncinin yaratmış olduğu elektriksel güç kaybıdır. Bu kayıp, I^2R olarak ifade edilmektedir [20]. Kabloların ısı kaybı, t zamanda gerçekleştiğinde ise I^2Rt olarak ifade edilen elektrik enerjisi harcanmaktadır. Bu elektrik enerjisi kaybı, kendini kabloların ısı enerjisine dönüştürerek göstermektedir. Ortaya çıkan bu ısı, ısı kaynağından çevresine yayılmaktadır. Isı kaynağı, kablo ile ortam arasında bir ısı transferi olur. Kabloların ısı ısınma, kabloların akım taşıma kapasitesini etkiler. Bu durumda, ısı transferi (1) diferansiyel Eş. 1 ile verilir.

$$\nabla \cdot (k \nabla \theta) + W = \rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (1)$$

Burada θ [K] cinsinden sıcaklığı, k [W/Km] cinsinden ortamın ısı iletkenliğini, ρ [kg/m³] cinsinden ortamın yoğunluğunu, c [J/kgK] cinsinden ortamın ısı kapasitesini ve W [W/m³] cinsinden ise

hacimsel olarak ısı yoğunluğunu (enerjisini) belirtmektedir. Burada ısı enerjisi ile elektrik enerjisi arasında akımdan dolayı bir ilişki vardır. Bu nedenle denklemde belirtilen ve elektrik akımı sonucunda oluşan W ısı enerjisi elektriksel güçle benzer şekilde ifade edilebilir. Elektriksel güç Eş. 2'de verilmiştir.

$$P = J \cdot E \, dx \, dy \, dz \quad (2)$$

Burada J [A/m²] cinsinden akım yoğunluğunu, E [V/m] cinsinden elektrik alan şiddetini ve $(dx \, dy \, dz)$ ise [m³] cinsinden malzemenin birim hacmini belirtmektedir. Akım yoğunluğu $J = \sigma \cdot E$ ile belirtilirse, buradan $E = J/\sigma$ yazılır. Bu eşitlik, (2) denklemine yerine yazılırsa Eş. 3 elde edilir.

$$P = \frac{1}{\sigma} J^2 \, dx \, dy \, dz \quad (3)$$

Bu denklemde σ [1/Ohm.m] cinsinden kablo iletkeninin elektriksel iletkenliğini belirtmektedir.

2.2. Sonlu Elemanlar Yöntemi (Finite Element Method)

Bu çalışmada da yararlanılan Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY), fiziksel matematiğin sınır değer problemlerine yaklaşık çözümler elde etmek için kullanılan sayısal bir yöntemdir [21]. Sonlu elemanlar yöntemi, pek çok mühendislik disiplininde kullanılan bir analiz yöntemidir [22]. 1956 yılında uçak yapılarının analizleri için sonlu elemanlar yöntemi kullanılmaya başlanmıştır. Bu uygulama sonlu elemanlar yönteminin gelişimine önemli katkıda bulunmuştur.

Sonlu elemanlar yönteminin çözümlenmesi, incelenecek bölge içindeki enerjinin en küçük değere indirgenme ilkesine dayanmaktadır. Yöntemde sonlu sayıda bilinmeyen büyüklükleri bulmak için bilinen büyüklükler kullanılarak sonuçlar elde edilir. SEY çözümlenmesi, oluşturulan kapalı bir bölge içinde yapılmaktadır. Bu kapalı bölgenin fiziksel özellikleri belirlenmelidir. Sınır koşulları da belli olan bu bölge içinde her noktada tanımlı bir fonksiyon ile ilişkilendirilir [23]. Tanımlanan sistemde kapalı bölge içinde sonlu elemanlar oluşturularak çözüm yapılmaktadır. SEY ile beş adımda problemlerin çözümleri elde edilmektedir:

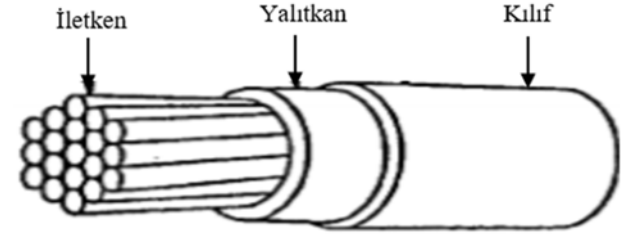
- Problem geometrisi, malzeme özellikleri ve sınır koşullarının tanımlanması,
- Çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılması,
- Her bir eleman için temel denklemin yazılması,
- Çözüm bölgesindeki tüm elemanların birleştirilmesi,
- Elde edilen denklem takımının çözümü.

2.3. Sayısal Çözümleme Çalışmaları (Numerical Analysis Studies)

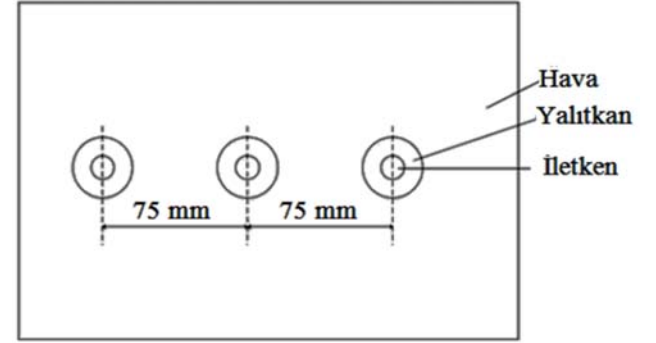
Kablolarda oluşan sıcaklık dağılımını incelemek için yapılan çalışmalar, SAE AS22759/1 (Wire, Electrical, Fluoropolymer-Insulated, PTFE and PTFE-Coated Glass, Silver-Coated Copper Conductor, 600 V) standardında yer alan, hava taşıtlarında kullanılan, bir damarlı, 2 AWG kesitli kablo üzerinde gerçekleştirilmiştir [24]. Seçilen bu kablo 600 V gerilime ve 200°C sıcaklığa dayanan bir kablodur. Bu kablodan, üç adet kablo kapalı bir ortama yerleştirilmiş ve sonlu elemanlar yöntemi ile kablonun sıcaklığa bağlı akım taşıma kapasitesi incelenmiştir [25]. Kablonun ana yalıtkanı PTFE (Poly

Tetra Fluoro Ethylene) olup iletken çapı 8,7 mm ve kablo çapı 10,7 mm'dir. Standarttan seçilen kablo modeli Şekil 1'de gösterilmiştir.

Üç kablo, Şekil 2'deki gibi, belirli aralıklarla yerleştirilmiş olup aralarındaki uzaklık değiştirilerek kablonun 200°C sıcaklığa dayanacak şekilde akım taşıma kapasiteleri belirlenmiş ve kablolar arası mesafe ile akım taşıma kapasitesinin değişimi incelenmiştir. Daha sonra kablo yerleşimi ve uzaklıkları değiştirilmeden ortam sıcaklığı değiştirilmiş ve ortam sıcaklığının kablonun akım taşıma kapasitesine etkisi incelenmiştir.



Şekil 1. Kablo modeli [24] (Cable model).



Şekil 2. Hava ortamında, yatay düzende, aralarında 75 mm uzaklık bırakılarak yerleştirilen kablolar (Cables placed in air environment, horizontally, with 75 mm distance between them).

Kablo modelinin ısıl analizi COMSOL programında elektrik-ısıl modeli ile sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Üç kablo modeli kapalı bir bölge içinde belirli aralıklarla yerleştirilmiştir. Kablo modeli, malzeme ve sınır koşulları ile tanımlanmıştır. İki boyutlu ısıl analiz yapılmış olup kablonun uzunluğu sonsuz olarak kabul edilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler; ısı iletkenlik, ısıl kapasite ve yoğunluk değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Bu parametreler, ısıl transfer diferansiyel (1) denkleminde kullanılmıştır.

Isı kaynağı (3) denklemine göre tanımlanmıştır. Model ve malzeme tanımlamalarından sonra sınır koşulları belirlenmiştir. Çözüm bölgesinin Dirichlet sınır koşulları 70°C olarak tanımlanmıştır. Neuman sınır koşulu olarak $d\theta/dx = 0$ alınmıştır. Isı taşınım katsayısı (h) aşağıda verilen ampirik Eş. 4 ile hesaplanmaktadır [18].

$$h = 7,371 + 6,43 \cdot v^{0,75} \quad (4)$$

Tablo 1. Modelde kullanılan malzemelerin ısıl özellikleri (Thermal properties of materials used in the model).

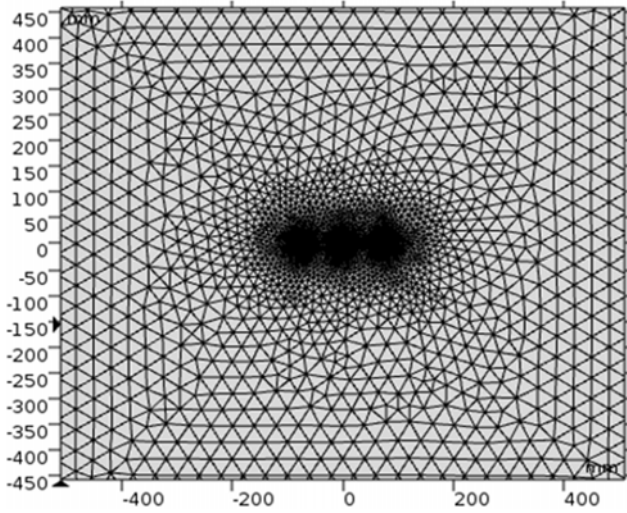
Malzeme	Isıl iletkenlik (W/K.m)	Isıl kapasite (J/kgK)	Yoğunluk (Kg/m ³)
Bakır iletken	400	385	8700
PTFE yalıtkan	0,24	1050	2200
Hava	Değişken	1008	1,0287

Denklemden v rüzgâr hızını belirtmektedir. Yapılan analizlerde rüzgâr hızı sıfır ($v = 0$) olarak kabul edilmiştir. Buna göre ısı taşınım katsayısı $h = 7,371$ olarak alınmıştır.

Sonlu elemanlar analizinin yapılabilmesi için çözüm bölgesi sonlu elemanlara ayrılmıştır. Bu işlem bilgisayar tarafından otomatik ve çözüm bölgesine uyarlamalı olarak yapılmıştır. Böylece belirlenen koşullarda kablolarda ısı analizi yapılmıştır. Bu işlemler, yan yana düzende, kablolar arası uzaklığın 75 mm, 30 mm olduğunda ve kabloların bitişik düzende yerleştirilerek tekrarlanmıştır. Daha sonra kablolar çözüm bölgesine bir üçgenin köşelerine gelecek düzende (üçgen düzende) yerleştirilmiş ve ortam sıcaklık değerleri 20°C, 50°C ve 70°C iken analizler yapılmış ve akım taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır.

3. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Yukarıda belirtilen durum ve verilen parametrelerle modeller, sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmiştir. Şekil 3'te modelin çözüm bölgesinin sonlu elemanlara ayrılmış (SEY ağı oluşturulmuş) hali gösterilmiştir.

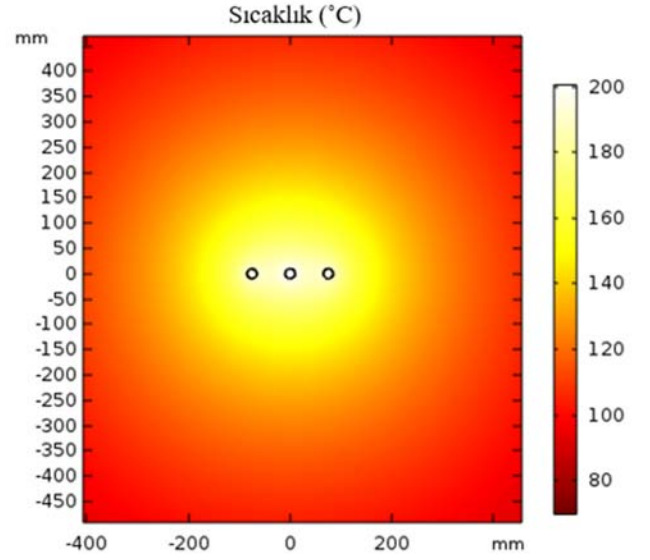


Şekil 3. Sonlu elemanlara ayrılmış çözüm bölgesi (Solution region divided by finite elements).

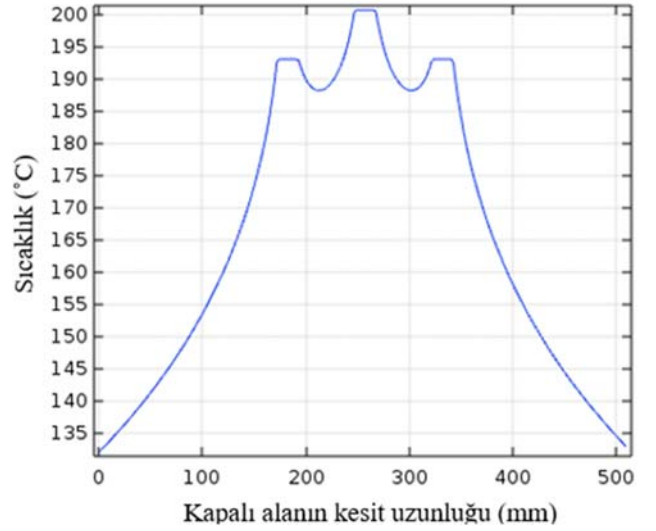
Üç kablo yatay düzende ve aralarında 75 mm, 30 mm uzaklık varken ve bitişik durumda ısı analizleri yapılmıştır. Ortam sıcaklığı, 70°C sabit olarak kabul edilmiştir. Kabloların dayanabileceği sıcaklık değeri ise 200°C'dir. Bu koşullarda yapılan analiz için kablolardaki sıcaklık dağılımı Şekil 4'de gösterilmiştir.

Yapılan analiz sonucunda, yatay düzende kablolar arası mesafe 75 mm olduğunda kablolardan geçen akım değerinin 198A olduğu görülmüştür. Analizlerde kabloların her birinden aynı değerde akım geçtiği göz önünde bulundurulmuştur. Şekil 5'ten de görüleceği gibi, 200°C sıcaklığa ilk ulaşan ortadaki kablodur. Bu nedenle kabloların akım taşıma kapasitesi bu kabloya göre belirlenmiştir.

Kablolar arası uzaklık 30 mm'ye düştüğünde ise kablolardan geçen akım değeri 184 A ve kablolar bitişik olarak yerleştirildiğinde kablolardan geçen akım değeri 181 A olarak belirlenmiştir. Kablolar arasındaki uzaklık azaldıkça kabloların akım taşıma kapasitesinde azalma gözlenmiştir. Kablolar birbirine yaklaştıkça sıcaklığın daha fazla arttığı buna bağlı olarak kablo iletken direncinin arttığı ve akım taşıma kapasitelerinin düştüğü anlaşılmıştır. Belirtilen üç durum için kabloların akım taşıma kapasiteleri Tablo 2'de verilmiştir.



Şekil 4. Yatay düzende yerleştirilmiş kabloların sıcaklık dağılımı (Temperature distribution for a group of horizontal cables).



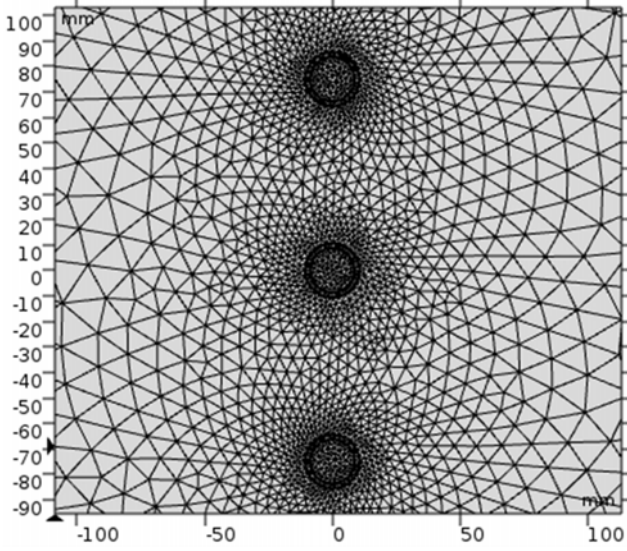
Şekil 5. Hava ortamında, yatay düzende, aralarında 75 mm uzaklık bulunan kabloların ısı analiz sonuçları (Thermal analysis results of cables with 75 mm distance between them in air environment, horizontal arrangement).

Tablo 2. Kablolar arasındaki uzaklığa göre kabloların akım taşıma kapasiteleri (Variation current carrying capacity of the cable with changing distance between cables).

Kablolar arasındaki uzaklık (mm)	Kabloların akım taşıma kapasitesi (A)
75	198
30	184
0	181

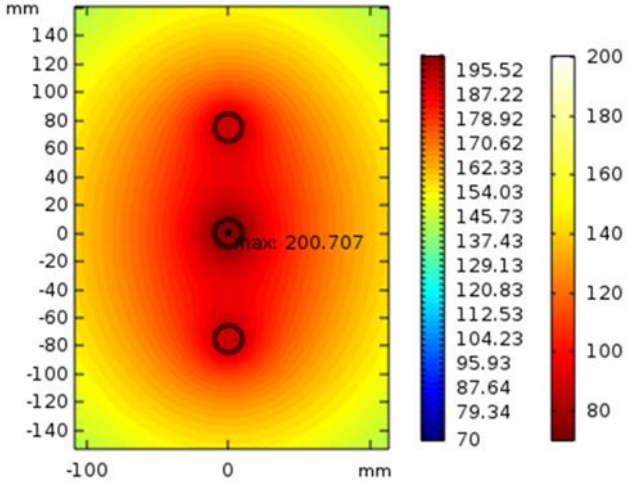
Tablo 2'den görüleceği üzere kabloların hava araçlarına yerleştirilmesi esnasında ortam sıcaklığının yanı sıra özellikle yerleştirme biçimlerini dikkate alarak her bir iletken için akım taşıma kapasitelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bu durum seçilen kabloların kullanım senaryolarına göre (ortam sıcaklığı vb.) aşırı yüklenerek kritik dayanım sıcaklıklarının üzerine çıkılmasını

engelleyecektir. Bu çalışmaların yanı sıra kabloların düşey düzende yerleştirildiği durum da incelenmiştir. Yine kabloların aralarında 75 mm uzaklık göz önüne alınarak incelemelere başlanmıştır. Daha sonra kablolar arasındaki uzaklık azaltılarak 30 mm için ve kablolar bitişik iken sıcaklık-akım taşıma kapasitesi ilişkisi incelenmiştir. Şekil 6'da düşey şekilde yerleştirilmiş, aralarında 75 mm uzaklık bulunan kablolar için üçgen sonlu elemanlara ayrılmış durum (sonlu elemanlar ağı) gösterilmiştir.



Şekil 6. Düşey düzende yerleştirilmiş kablolar için sonlu elemanlar ağı (Finite element mesh for cables placed in vertical arrangement).

Bu incelemelerde de kabloların boyutları ve özellikleri önceki ısı analizinde kullanılan kabloların boyutları ve özellikleri ile aynıdır. Analiz sonucu Şekil 7'deki gibi elde edilmiştir.

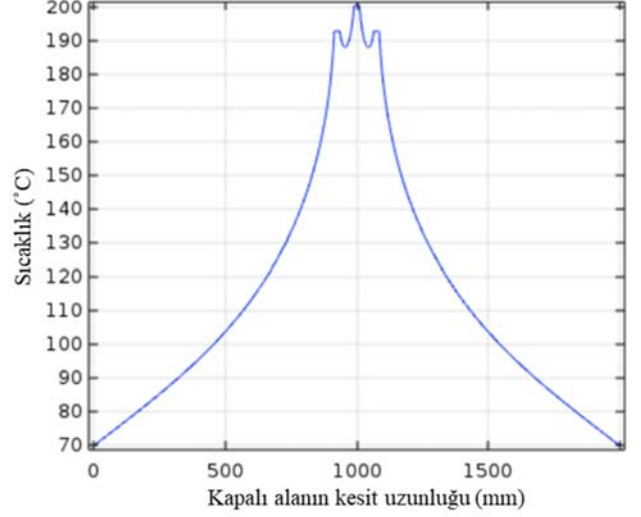


Şekil 7. 75 mm aralıklarla düşey düzende yerleştirilmiş kabloların sıcaklık dağılımı (Temperature distribution of cables placed vertically at intervals of 75 mm).

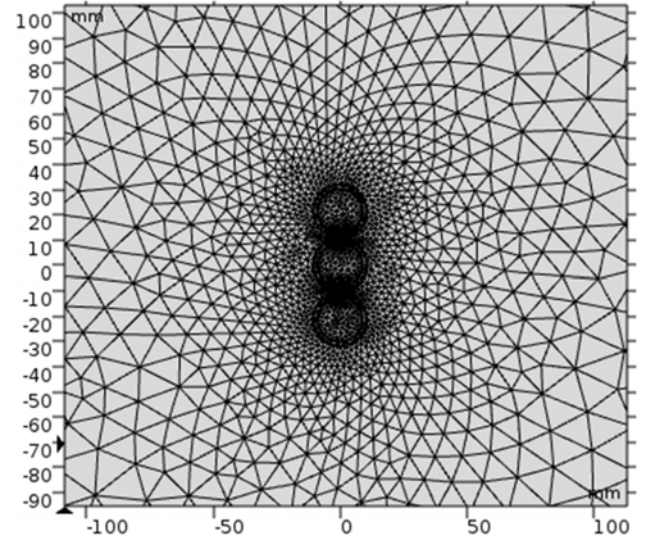
Analizde 200°C sıcaklığa kadar dayanabilen kablo kullanılmıştır. Kablo bu sıcaklık değerine, kablodan en fazla 198 A geçtiğinde ulaşmaktadır. Her kabloya ait sıcaklık dağılımı Şekil 8'de gösterilmiştir.

Sonrasında kablolar arasındaki uzaklık 30 mm olduğunda, oluşacak sıcaklık-akım taşıma kapasitesi ilişkisi incelenmiştir. Kabloların

dayanabileceği sıcaklık değeri olan 200°C sıcaklığa ulaştığında akım 184 A olarak belirlenmiştir. Kablolar birbirine yaklaştıkça akım taşıma kapasitesinin düştüğü görülmektedir. Bir de kablolar arasında uzaklık yokken (bitişikken) düşey düzende yerleştirilen kabloların sıcaklık-akım ilişkisi incelenmiştir.



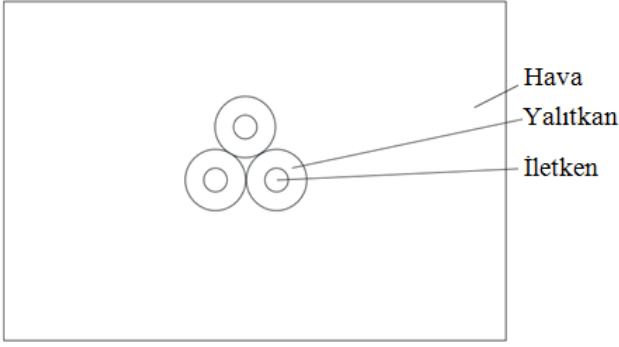
Şekil 8. 75 mm aralıklarla düşey düzende yerleştirilmiş kabloların sıcaklık değerleri (Temperature values of cables placed vertically at intervals of 75 mm).



Şekil 9. Düşey düzende bitişik yerleştirilmiş kablolar için sonlu elemanlar ağı (Finite element mesh for adjacent cables in vertical arrangement).

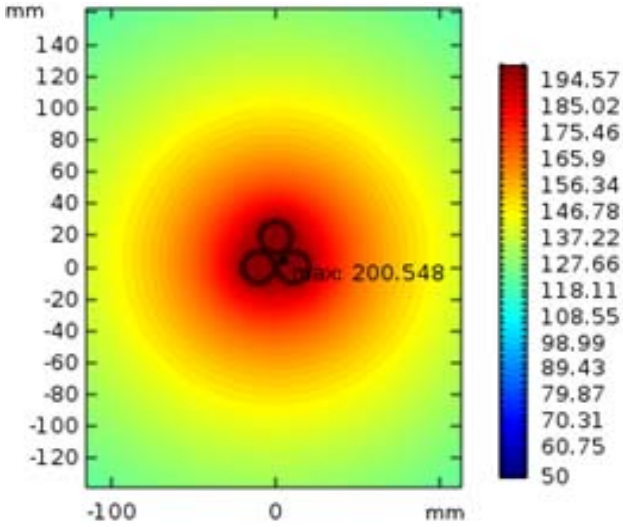
Şekil 9'da kablolar, düşey düzende ve bitişik yerleştirilmiştir. Bu analiz sonucunda kabloda ulaşılan maksimum sıcaklık 200°C iken kablolardan 182 A geçmektedir. Kablo sınır sıcaklığı olan 200°C için kablodan geçen akım değeri, kablolar birbirine yaklaştıkça düşmektedir. Bu durum yatay olarak yerleştirilmiş kabloların durumu ile benzer sonuçları vermektedir.

Üç kablo, üçgen düzende, bitişik olarak kapalı çözüm bölgesine yerleştirilmiştir (Şekil 10). Ortam sıcaklığı 20°C, 50°C ve 70°C iken ısı analizler yapılmıştır.



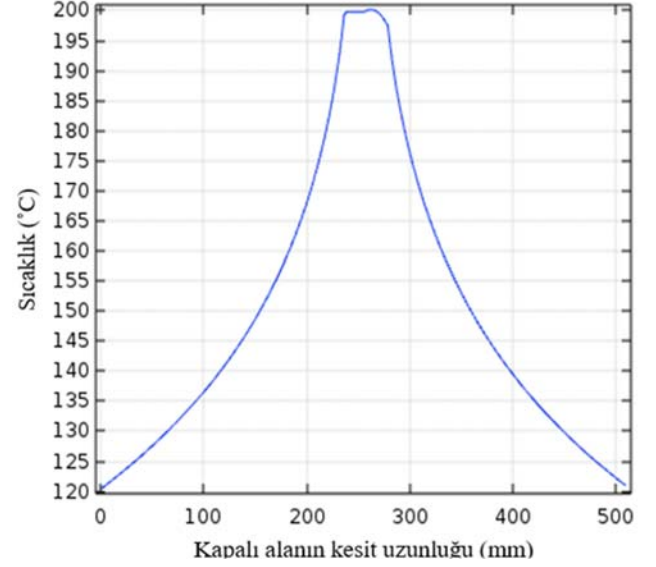
Şekil 10. Hava ortamında, üçgen düzende, bitişik yerleştirilmiş kablolar (In the air, in triangular arrangement, adjacent cables).

Böylece ortam sıcaklık değerine bağlı olarak kabloların akım taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Havacılıkta kablo seçimi yaparken SAE AS50881 (Wiring, Aerospace Vehicles) standardı göz önüne alınmaktadır [8]. Bu standarda göre de kabloların akım taşıma kapasiteleri hesaplanmış ve yapılan analiz sonuçları karşılaştırılmıştır. Üçgen düzende yerleştirilmiş kabloların sıcaklık dağılımı Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 11. Üçgen düzende yerleştirilmiş kabloların sıcaklık dağılımı (Temperature distribution for the triangle-shaped set-up).

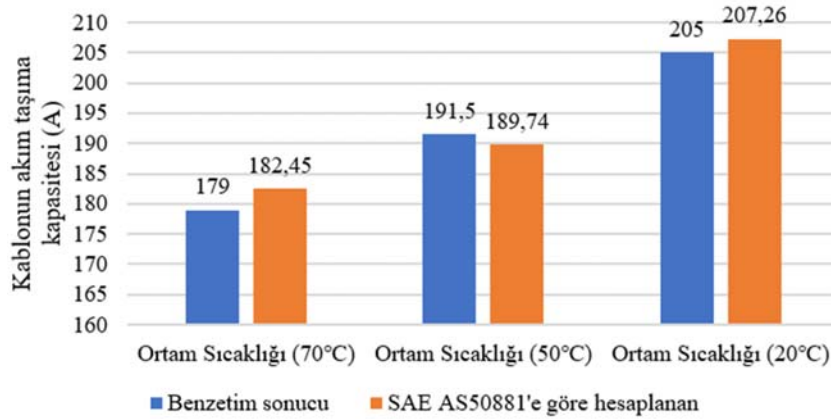
Ortam sıcaklığı 70°C iken kabloların akım taşıma kapasitesi 179 A olarak hesaplanmıştır (Şekil 12). Ortam sıcaklık değeri 50°C iken 191,5 A ve ortam sıcaklığı 20°C olduğunda ise kabloların akım taşıma kapasitesi 205 A olarak bulunmuştur. Böylece ortam sıcaklık değeri düştüğünde kabloların akım taşıma kapasitesinin artmakta olduğu saptanmıştır.



Şekil 12. Hava ortamında, üçgen düzende, bitişik yerleştirilmiş kabloların ısı analiz sonuçları (Thermal analysis results of cables placed adjacent, in triangular arrangement, in air environment).

Belirlenen ortam sıcaklık değerleri için standarda göre hesaplanan kabloların akım taşıma kapasiteleri değerleri Şekil 13'te verilmektedir.

Sonuç olarak üç farklı biçimde (yatay, dikey ve üçgen) kabloları yerleştirerek sıcaklık-akım taşıma kapasitesi analizleri yapılmıştır. Bu analizler yapılırken kablo özellikleri sabit tutularak kabloların arasındaki uzaklık değiştirilmiştir. Kabloların dayanabileceği sıcaklık değeri 200°C'ye göre kabloların geçebilecek akım değerleri belirlenmiştir. Bu sonuçlar, hava araçlarında güvenli şekilde güç iletimi için kabloların tasarımında tüketicinin akım ihtiyacına, ortam sıcaklığına ve kabloların hava aracı üzerinde yerleştirilme şekillerine bağlı olarak iletken seçiminin yapılmasının gerekliliğini vurgulamaktadır.



Şekil 13. Ortam sıcaklık değerlerinin akım taşıma kapasitesine etkisi (The effect on current carrying capacity of ambient temperature).

4. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, kablolar arasındaki uzaklığın akım taşıma kapasitesine etkisini gözlemlemek adına analizler yapılmıştır. Kablolar arası uzaklıklar 75 mm, 30 mm ve bitişik yatay ve düşey düzende iken ısı analizleri yapılmıştır. Kablolar birbirlerine yaklaştıkça sıcaklığın arttığı ve buna bağlı olarak da kablonun akım taşıma kapasitesinin azaldığı görülmüştür. Ayrıca ortam sıcaklık değerinin kablonun akım taşıma kapasitesine üzerine olan etkisini araştırmak için üç farklı ortam sıcaklık değeri için ısı analizler yapılmıştır. Burada 20°C, 50°C ve 70°C'de bulunan aynı kabloların akım taşıma kapasiteleri hesaplanmıştır. Analiz sonuçlarına göre ortam sıcaklığı arttıkça kablolarındaki akım taşıma kapasitesinde azalma olduğu görülmüştür.

Havacılıkta kablo seçimi yaparken SAE AS50881 standardı göz önüne alınmaktadır. Bu standartta kablolar için ortam sıcaklığı, basınç, çoklu kablonun aynı demet içerisinde yerleştirilmesi gibi parametreler geliştirilmiş tablolar üzerinden tasarımcılara veri sağlamaktadır. Bu çalışma göstermiştir ki; kabloların hava araçlarına yerleştirilmesi esnasında ortam sıcaklığının yanı sıra özellikle yerleştirme biçimlerini dikkate alarak her bir iletken için akım taşıma kapasitelerinin belirlenmesi gerekmektedir. Sonuç olarak hava araçlarında kablo seçimi ve yerleşimi yapılırken kablonun teknik özelliklerinin yanı sıra çevresel koşullara da dikkat edilmesi gerekmektedir. Kablonun bulunduğu ortam sıcaklığındaki değişimler ve de özellikle kabloların yerleştirilme şekli kabloların taşıyabileceği en yüksek akım değerini belirleyecektir. Bu durum seçilen kabloların kullanım senaryolarına göre (ortam sıcaklığı vb.) aşırı yüklenerek kritik dayanım sıcaklıklarının üzerine çıkılmasını engelleyecektir.

Kaynaklar (References)

1. Erdoğan H. Y., Ocaklı S., Erdem S., Yılmaz A.E., Aviyonik güç dağıtım sistemleri ve irtifanın hava araçlarında kullanılan iletim hatları üzerindeki akım taşıma kapasitesine etkisi, VII. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, 2018.
2. Çoruh N., Aras F., Kaya N., Çiğerci İ., A Maintenance-Oriented Assessment of Aging and Deterioration of Aircraft Cable System, Engineer and Machinery, 60 (694), 1-9, 2019.
3. Berger R., Aircraft electrical propulsion, the next chapter of aviation, Aircraft Electrical Propulsion, 2017.
4. Christou I., Optimisation of high voltage electrical systems for aerospace applications. (Doctoral dissertation). The University of Manchester, The Faculty of Engineering and Physical Sciences, School of Electrical and Electronic Engineering, 2011.
5. Cotton I., Gardner R., Schweickart D., Grosean D., Severns C., Design Considerations for Higher Electrical Power System Voltages in Aerospace Vehicle., IEEE, 2016.
6. FAA, Aircraft Electrical Wiring Interconnect System (EWIS) Best Practices, 2018.
7. Rickman S. L. ve Iannello C. J., Heat transfer analysis in wire bundles for aerospace vehicles, 14 International Conference on th Simulation and Experiments in Heat Transfer and its Applications, 2016.
8. Kocatepe C., Arıkan O., Kumru C. F. ve Akbulut A., Yüksek gerilim kablolarının farklı döşeme koşullarında ısı analizi, ELECO 2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 2012.
9. SAE AS50881, Society of Automotive Engineers International Aerospace Standard, Wiring Aerospace Vehicle, 2019.
10. Küçükaydın B., Arıkan O., Ortam koşullarının yeraltı kablolarının sıcaklığı ve akım taşıma kapasitesi üzerindeki etkisi, ELECO 2014 Elektrik - Elektronik - Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, 2014.
11. Karahan M., Kalenderli Ö., Coupled electrical and thermal analysis of power cables using finite element method, www.intechopen.com, 2011.
12. Durai N., Ukil A., Ampacity estimation for HV submarine power cables installed in saturated seabed, IEEE International Conference on Power Electronics, Drives, Energy, 2019.
13. Sedaghat A., León F., Thermal analysis of power cables in free air: Evaluation and Improvement of the IEC Standard Ampacity Calculations, IEEE Transactions on Power Delivery, 29(5), 2306- 2314, 2014.
14. Karahan M., Varol H. S., Kalenderli Ö., Güç kablolarının elektrik ve ısı zorlanmalarının etkisi altında sıcaklık dağılımlarının ve ömürlerinin belirlenmesi. 12. Ulusal Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Konferansı, Eskişehir, 2007.
15. Izquierdo P., Azcona R., Jerro L., Electrical Power Distribution System (HV270DC), for Application in More Electric Aircraft, Military Air Systems-Defense and Security Division, 2010.
16. ASTM F2639-18, Standard Practice for Design, Alteration, and Certification of Aircraft Electrical Wiring Systems, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2018, www.astm.org.
17. Duraisamy N., Ukil A., Cable Ampacity Calculation and Analysis for Power Flow Optimization, IEEE, 2016.
18. Karaca G., Kablolarında Elektriksel ve Isıl Zorlanmaların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Çoklu Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2006.
19. Erdoğan H., Ocaklı S., Erdem S., Yılmaz A., Aviyonik Güç Dağıtım Sistemleri ve İrtifanın Hava Araçlarında Kullanılan İletim Hatları Üzerindeki Akım Taşıma Kapasitesine Etkisi, VII. Ulusal Havacılık ve Uzay Konferansı, Samsun, 2018.
20. Kocar I., Ertas A., Thermal analysis for determination of current carrying capacity of PE and XLPE insulated power cables using finite element method, IEEE MELECON, 2004.
21. Karahan M., Sonlu elemanlar metodu kullanılarak güç kablolarının ısı analizi ve akım taşıma kapasitesinin değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2007.
22. Minaz M., Yıldız K., Short Circuit Fault Analysis of BLDC Motor by Finite Element Method, Dicle University Journal of Engineering, 12 (1), 1-21, 2021.
23. Memiş S., Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Yıldırımın Uçaklara olan Etkilerinin İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2019.
24. SAE AS22759/1, Society of Automotive Engineers International Aerospace Standard. Wire, Electrical, Fluoropolymer-Insulated, Copper or Copper Alloy, 2018.
25. Aras F., Oysu C., Thermal analysis of 154 kV underground cable joint using finite element method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 22 (3), 281-286, 2007.