







Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

IE1 Verimlilik Sınıfında Rotoru Sincap Kafesli Bir Asenkron Motorun Soğutulmasında Karşıt Akışlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüp Kullanımı

 İsmail CEBECİ^a,  Serkan GÜRKAN^a,  Seydi DOĞAN^b,  Volkan KIRMACI^{c,*}

^a Kara Aştsubay MYO, Milli Savunma Üniversitesi, Balıkesir, TÜRKİYE

^b Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, TÜRKİYE

^c Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık-Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: volkankirmaci@bartin.edu.tr

DOI: 10.29130/dubited.1133458

ÖZ

Enerji verimliliği, tüm dünyanın üzerinde dikkatle durduğu önemli bir konudur. Dünyada üretilen elektrik enerjisinin % 43 - 45'inin elektrik motorları tarafından tüketildiği tahmin edilmektedir. Elektrik motorunun çalışması sırasında açığa çıkan yüksek sıcaklık, verimliliği ve performansı olumsuz yönde etkilemektedir. Bundan dolayı, yüksek ısıya maruz kalan elektrik motorlarından ısının uzaklaştırılması büyük bir öneme sahiptir. Getirilen standartlarla IE3 ve IE4 verimlilik sınıfındaki elektrik motorlarının kullanımı teşvik edilmesine karşın, kullanımı devam eden önemli sayıda IE1 ve IE2 verimlilik sınıfında elektrik motoru mevcuttur. Bu çalışmada, IE1 verimlilik sınıfında rotoru sincap kafesli bir asenkron motorun soğutulması için, karşıt akışlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü (RHVT) entegre edilmiştir. Böylelikle elektrik motorlarının soğutulması alanında literatüre yeni bir yöntem kazandırılmıştır. Önerilen sistemin elektrik motoru verimliliğine etkisini analiz etmek için ANSYS Motor-CAD analiz programı kullanılmıştır. Benzetim çalışmaları neticesinde; önerilen sistem ile soğutulan elektrik motorunda, geleneksel fanlı soğutma yöntemi ile soğutulan elektrik motoruna göre % 3,86 verimlilik artışı elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Karşıt akışlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüp, Elektrik makinaları, Termodinamik, ANSYS Motor-CAD

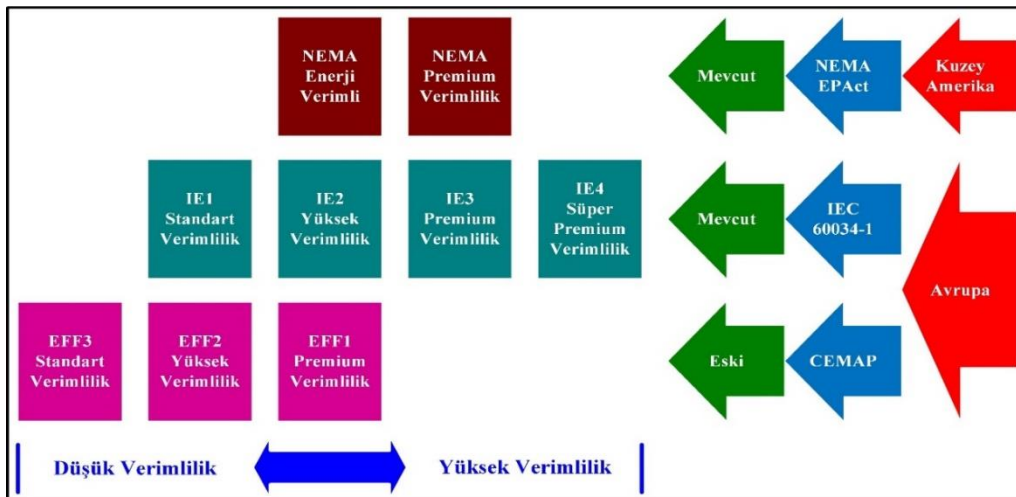
The Use of Counter Flow RHVT for Cooling an IE1 Efficiency Class Squirrel Cage Induction Motor.

ABSTRACT

Energy efficiency is an important issue that the whole world pays attention to. It is estimated that 43-45% of the electrical energy produced in the world is consumed by electric motors. The high temperature that occurs during the operation of the electric motor adversely affects the efficiency and performance. Therefore, it is of great importance to remove heat from electric motors that are exposed to high temperatures. Although the use of IE3 and IE4 efficiency class electric motors is encouraged by the standards introduced in the world, there are a significant number of IE1 and IE2 efficiency class electric motors still in use. In this study, a counter-flow Ranque-Hilsch Vortex Tube (RHVT) is integrated to cool an IE1 efficiency class induction motor with a squirrel-cage rotor. Consequently, a new method has been introduced to the literature in the field of cooling of electric motors. ANSYS Engine-CAD analysis program has been used to analyze the effect of the proposed system on the efficiency of the electric motor. As a result of the simulation studies, an efficiency increase of 3,86% has been obtained in the electric motor cooled by the proposed system, compared to the electric motor cooled by the traditional fan cooling method.

I. GİRİŞ

Enerji verimliliği ve hali hazırda kullanılan elektrikli sistemlerin verimliliğinin artırılması, çözümü aranan önemli mühendislik problemlerindedir. Dünyada üretilen nihai enerjinin yaklaşık % 40'ı sanayide kullanılmaktadır [1]. Elektrik motoru içeren sistemlerin, dünyada üretilen elektrik enerjisinin % 43 - % 45'ini tükettiği tahmin edilmektedir [2]. Avrupa elektrik motorları pazar payının yaklaşık % 96'sı alternatif akım motorlarına aittir [3]. Alternatif akım motorlarının ise % 90'ını asenkron motorlar oluşturmaktadır [4]. Üç fazlı sincap kafesli asenkron elektrik motorları, sanayide kullanılan elektrik motorlarının % 87'sine karşılık gelmektedir [5]. Türkiye'de enerji tüketiminin % 45'i sanayide gerçekleşmektedir [6], [7]. Diğer taraftan; fosil yakıt kullanan taşıtlardan, elektrik enerjisi kullanan taşıtlara geçiş sürecinin hız kazanması nedeniyle elektrik motorlarında sarf edilen enerjinin her geçen yıl artacağı tahmin edilmektedir [8]. Tüm bu bilgiler birlikte ele alındığında; piyasaya arzı yapılan yeni elektrik motorlarının yüksek verimli olması ya da ekonomik ömrünü tamamlamamaları nedeniyle kullanımı devam eden elektrik motor verimliliklerinin artırılması önemli bir hâl almaktadır. Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) ve Ulusal Elektrik Üreticileri Birliği (NEMA) dünya nihai elektrik enerjisi tüketiminde çok önemli bir payı olan elektrik motorlarında standartları belirlemek üzere faaliyet gösteren ve belirlenen standartları yayımlayan iki önemli organizasyondur. IEC Avrupa standartları için faaliyet gösterirken, NEMA Amerikan standartlarını belirlemek üzere faaliyet göstermektedir. Motor verimlilik sınıfları IEC ve NEMA tarafından belirlenmiştir. IEC 60034-30 ile yayınlanan standartlara göre IE1 (standart verimlilik), IE2 (yüksek verimlilik), IE3 (premium verimlilik), IE4 (süper premium verimlilik) olmak üzere dört verimlilik sınıfı bulunmaktadır [9]. Amerika Birleşik Devletleri'nde 1992 yılındaki bir kongrede elektrik motorlarında Enerji Politikası Yasası'nın (EPA) bir parçası olarak verimlilik sınıflarında bazı sınırlandırmalar getirilmiştir [10], [11]. Bu kapsamda; NEMA tarafından enerji verimli (energy efficient) ve premium olmak üzere iki motor verimlilik sınıfı belirlenmiştir. IEC ve NEMA'ya ek olarak Avrupa Elektrik Makineleri ve Elektronik İmalatçıları Komitesi (CEM) tarafından yapılan araştırmaya göre elektrik motorları EFF3 (en verimsiz), EFF2 (orta verimli), EFF1 (en verimli) olmak üzere üç verimlilik sınıfına ayrılmıştır [12]. CEM tarafından getirilen verimlilik sınıfları, IEC tarafından getirilen sınıfların temelini teşkil etmiştir ve günümüzde kullanımda değildir. Elektrik motorlarının verimlilik sınıflarına ilişkin toplu gösterim Şekil 1 de verilmiştir.

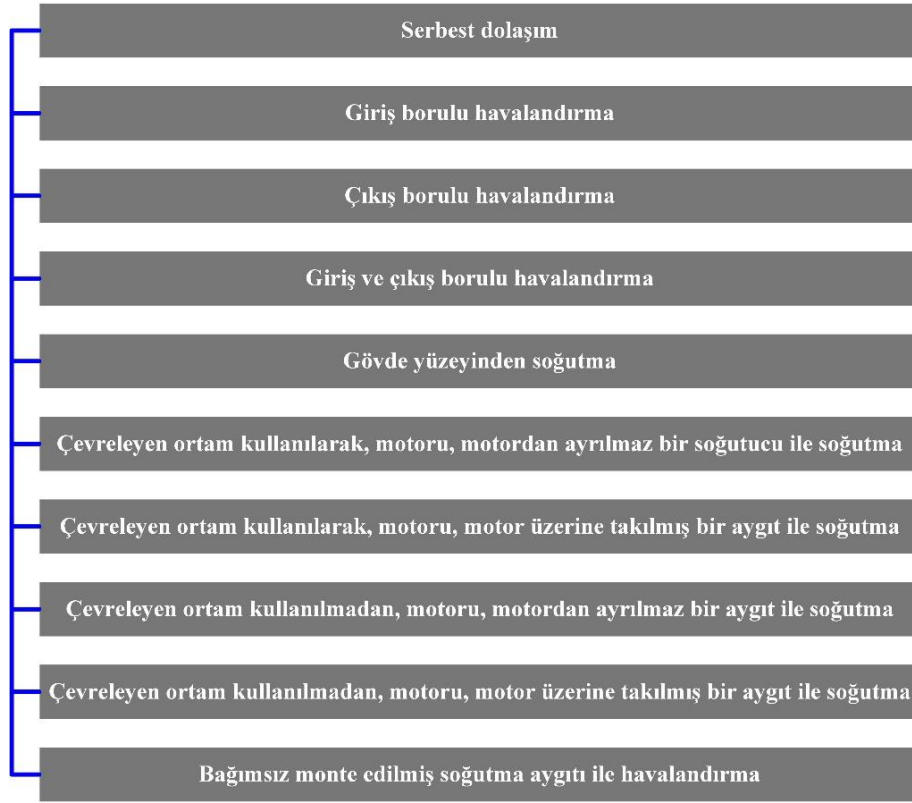


Şekil 1. Elektrik motorlarında verimlilik sınıfları.

Elektrik motorlarının verimliliklerine ilişkin Türkiye'deki uygulama takvimi incelendiğinde; 01 Nisan 2012 tarihinden itibaren 0,75 kW - 375 kW anma gücü aralığındaki motorlar için IE2, 01 Ocak 2015 tarihinden itibaren 7,5 kW - 375 kW anma gücü aralığındaki motorlar için IE3 standartlarının

uygulanması gerekmektedir. Bu bilgidan hareketle, 2015 yılından itibaren Türkiye’de 7,5 kW anma gücünün üzerindeki güçlerde yalnızca IE3 verimlilik sınıfına ait elektrik motorlarının piyasaya arzı gerekmektedir. 7,5 kW anma gücünün altındaki motorlarda ise hız kontrol cihazı kullanılması şartıyla sadece IE2 verimlilik sınıfındaki motorlar piyasaya arz edilebilecektir. 01 Nisan 2012 ve 01 Ocak 2015 tarihlerinde uygulanmaya başlanan hususlar yalnızca piyasaya yeni arz edilecek elektrik motorları ile ilgili olup, hali hazırda kullanılan elektrik motorlarını kapsamamaktadır.

İmalat Sanayisinde Kullanılan Elektrik Motorları Envanteri Analiz Raporuna göre, sanayide toplam 4.306.622 adet 7,5 kW ve üzeri alternatif akım motorunun hâli hazırda kullanıldığı tahmin edilmektedir. Bu motorların verimlilik analizleri incelendiğinde; 7,5 kW ve üzeri güçteki motorların % 65’inin IE1, % 27’sinin IE2, % 1’inin ise IE3 verimlilik sınıfında olduğu görülmektedir [13]. Ekonomik ömürlerini doldurmadıkları ya da değişim maliyetlerinin yüksek olmalarından dolayı kullanımları devam eden düşük verimlilik değerlerine sahip özellikle IE1 motorlarının hız kontrol cihazları ile kullanımı ya da mevcut koşullarda verimliliklerin artırılması büyük önem kazanmaktadır. Elektrik motorlarının soğutulması için uygun koşulların oluşturulması ile verimlilik artışı sağlanabilir [14]. Literatürde, elektrik motorlarının soğutulmasına ilişkin 3 temel metot bulunmaktadır: hava soğutma, su soğutma ve yağ soğutma [15]. Elektrik motoru soğutma teknikleri IEC 34-6’da Şekil 2’de verildiği gibi on farklı şekilde sıralanmıştır [16].

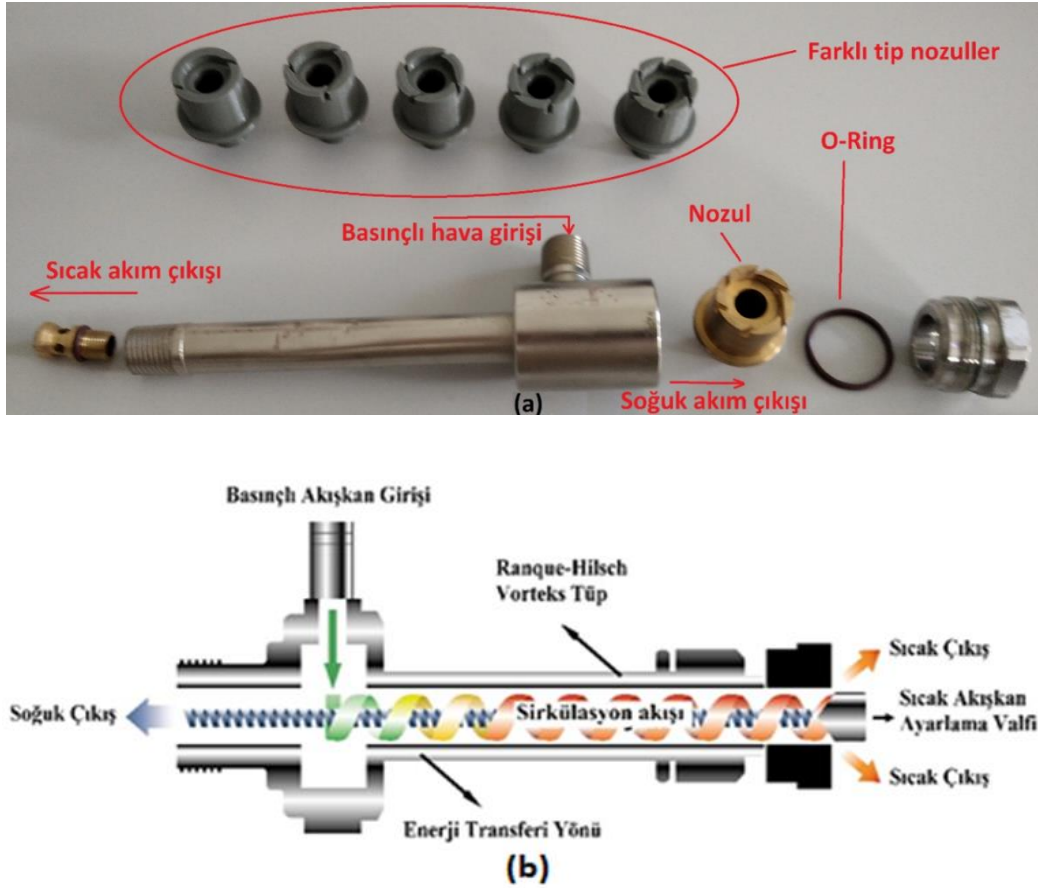


Şekil 2. IEC 34-6 elektrik motoru soğutma teknikleri.

Literatürde yer alan çalışmalar irdelendiğinde, IE1 ve IE2 verimlilik sınıfındaki alternatif akım elektrik motorlarında soğutma yönteminin verimliliğe etkilerinin ele alındığı önemli çalışmalar bulunduğu ve bu konudaki çalışmaların halen devam ettiği göze çarpmaktadır. Gouws ve Jaarsveldt 2012’de gerçekleştirdikleri çalışmada, geleneksel hava soğutma sistemine ek olarak peltiyer kullanılan bir soğutma sistemi önermişler ve elektrik motorunun verimliliğini % 3,75 artırdıklarını ifade etmişlerdir [17]. Araştırmacılar bu çalışmalarında fiziksel bir uygulama gerçekleştirmemişler, bir Matlab® Simulink® modeli önermişlerdir. Fujita ve arkadaşları 2019 yılındaki çalışmalarında 47 kW anma gücüne sahip bir elektrik motorunda su ceketini yerine soğutucu akışkan ile soğutma tekniğini önermişler, gerçekleştirdikleri benzetim çalışmaları sonucunda torkta % 60’lık bir artış elde ettiklerini

belirtmişlerdir [15]. Guo ve Zhang'ın 2019'daki çalışmalarında elektrikli araçlarda kullanıma uygun daimi mıknatıslı senkron motor için yağ soğutma tabanlı bir sistem önerilmiş, stator sargılarındaki sıcaklıkta önemli ölçüde iyileşme meydana geldiğini ve bunun da verimliliği % 2-3 artırdığını bildirmişlerdir [18]. Fang ve arkadaşları; hava soğutmalı bir sistem üzerinde çalışmışlar, kullandıkları elektrik motorunda stator sargılarının çevresine içerisinde hava dolaşan bir boru yerleştirmişler, geleneksel fan soğutmalı sisteme göre stator sargı sıcaklığında % 22,3'e kadar iyileşme elde etmişler, bu iyileşmenin motor verimliliğini % 3,5 artıracığını bildirmişlerdir [19].

Bu çalışmada; IE1 verimliliğe sahip rotoru sincap kafesli bir asenkron motorun çalışması esnasında oluşan yüksek sıcaklığı minimize etmek için Karşıt akışlı Ranque-Hilsch Vorteks Tüpü (RHVT) literatürde ilk kez kullanılacaktır. Karşıt akışlı RHVT; hareketli bir elemanı bulunmayan, basit bir yapıya sahip, basınçlandırılarak içerisine gönderilen gaz akışkan vasıtasıyla işlevini yerine getiren, meydana gelen enerji transferi sonucunda da hem soğutma hem de ısıtma işlemi aynı anda gerçekleştirebilen sistemlerdir. Karşıt akışlı RHVT; küçük ebatları, hafif ağırlıkları, ısıtma ve soğutma rejimine hızlı bir şekilde ulaşması, ekolojik açıdan zararlı kimyasal soğutucu akışkana ihtiyaç duymaması gibi birçok özelliği üzerinde barındıran ve soğutma-ısıtma problemlerinin çözümünde günümüzde sıklıkla kullanılan bir sistemdir [20]-[22]. Şekil 3'de Karşıt akışlı RHVT'nü oluşturan temel elemanlar ve enerji transferi verilmiştir.

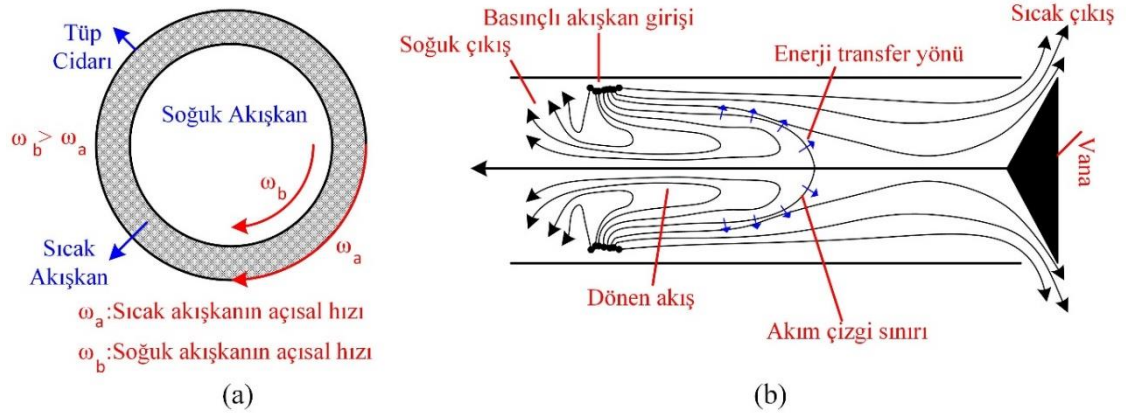


Şekil 3. Karşıt akışlı RHVT (a) görünümü ve bileşenleri (b) enerji transferi.

Karşıt akışlı RHVT'lerde sıcak ve soğuk akışın meydana gelişi ve tüp içerisinde meydana gelen akışlar Şekil 4'te verilmiştir. ω_a ve ω_b açısal hızlarıyla döngüsel bir şekilde hareket eden iki farklı bölge akışının arasında gerçekleşen mekanik enerji geçişi, karşıt akışlı RHVT'lerde birbirinden farklı sıcaklığa sahip akış meydana gelmesinin temel nedenini belirler. RHVT'nin giriş kısmında yer alan nozula gelen basınçlı gaz akışkan, karşıt akışlı RHVT'nin iç duvarına teğet olacak şekilde giriş yapar. RHVT'de yer alan nozuldan sonra basınç düşer ve bunun sonucunda da RHVT içerisindeki akışkanın hızı artar.

Nozuldan geçen akışkan, karşıt akışlı RHVT'nin sahip olduğu silindirik yapı nedeniyle döngüsel harekete başlar. Çok yüksek hızlara ulaşan merkez akış, meydana gelen merkezkaç kuvvetinin tesiriyle RHVT cidarı istikametinde hareket etmek zorunda kalır.

RHVT merkezinde ve cidarında bulunan farklı açısızlı hızlara sahip iki akış arasında basınç farkı oluşur. Akış, oluşan bu fark nedeniyle, RHVT merkezinden RHVT cidarı doğrultusunda genişler. Açısızlı momentumun korunumu ilkesinin RHVT'de yarattığı etki sonucunda da RHVT merkezinde yer alan akışın açısızlı hızı, RHVT cidarında bulunan akışın açısızlı hızından daha fazla değerlere ulaşır ve RHVT içerisinde farklı hıza sahip şekilde dönen iki akış meydana gelir. Daha fazla hıza ulaşan merkez akış, RHVT cidarında oluşan akışı ivmelendirmeye zorlar ve merkez yer alan akıştan, cidarda yer alan akışa enerji aktarımı meydana gelir. Enerji transferi nedeniyle enerjisinde azalma olan merkezdeki akış soğuk akış, RHVT cidarındaki sürtünme etkisi ve merkezdeki akıştan gerçekleşen mekanik enerji transferi nedeniyle RHVT cidarındaki akış sıcak akıştır [22]-[24].



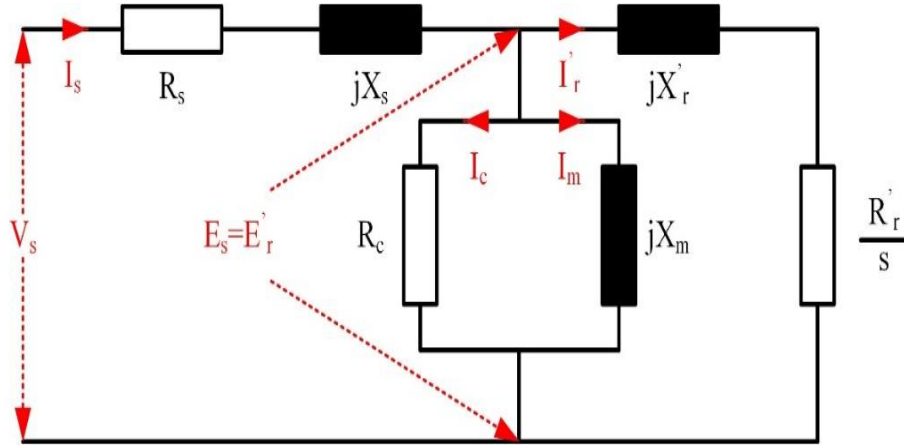
Şekil 4. Karşıt akışlı RHVT içerisindeki olaylar (a) sıcak ve soğuk akışın hareketi (b) akış.

Bu çalışmada, IE1 verimliliğe sahip rotoru sincap kafesli bir asenkron motorun soğutulmasında literatürde ilk kez karşıt akışlı RHVT kullanılmış, karşıt akışlı RHVT ile elde edilen soğuk hava ile soğutma durumunda verimlilikte meydana gelen değişimler ANSYS Motor-CAD analiz programı ile analiz edilmiştir.

II. ROTORU SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORUN ELEKTRİKSEL VE TERMAL ÖZELLİKLERİ

A. ROTORU SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORUN ELEKTRİKSEL ÖZELLİKLERİ

Üç fazlı asenkron motorlar; stator, rotor, rotor yatakları, fan ve yan kapaklardan oluşan, elektrik enerjisini mekanik enerjiye dönüştüren elektrik makineleridir. Stator; üzerinde sargıların bulunduğu, motorun kutup sayısını belirleyen bileşenidir. Rotor ise sargılı ve kısa devre çubuklu olmak üzere iki şekilde imal edilebilir. Rotoru sargılı motorlar, üzerinde üç fazlı sargı barındırır ve bu sargılar bilezikler yardımıyla motor üzerinde bulunan bağlantı kutusuna aktarılır. Kısa devre çubuklu rotor, rotoru sincap kafesli olarak bilinir ve rotor gövdesine açılmış olukların içerisine alüminyum çubuklar yerleştirilerek monte edilirler. Rotoru sincap kafesli asenkron motorlarda, statorun uygulanan elektrik enerjisi mekanik enerjiye çevrilir ve rotorun merkezine bağlı milden (şafttan) mekanik enerji elde edilir. Rotoru sincap kafesli asenkron motorun statora aktarılmış bir faz eşdeğer devresi Şekil 5'de verilmiştir.



Şekil 5. Asenkron motorun statora aktarılmış bir faz eşdeğer devresi.

Şekil 5’de; R_s : stator sargı direnci [Ω], X_s : stator sargı reaktansı [Ω], X_r' : stator devresine aktarılmış eşdeğer devrede rotor reaktansı [Ω], R_r' : stator devresine aktarılmış eşdeğer devrede rotor direnci [Ω], s : kayma, X_m : mıknatıslanma reaktansı [Ω], R_c = çekirdek kayıbi bileşeni [Ω]’dir.

Rotoru sincap kafesli bir asenkron motorda; stator bakır kayıpları (P_{sk}), rotor bakır kayıpları (P_{rk}), demir kayıpları (P_{dk}), sürtünme ve rüzgâr kayıpları (P_{srk}) ve kaçak yük kayıpları (P_{kyk}) temel kayıplardır. Asenkron motorlarda toplam kaybın % 25-45’ini P_{sk} , % 15-25’ini P_{rk} , % 20-35’ini P_{dk} , % 5-15’ini P_{srk} % 5-20’sini diğer kayıplar oluşturur [25], [26].

Stator kayıpları R_s kaynaklıdır. Bu bilgidен hareketle, stator kayıpları Eş. 1’deki gibi yazılabilir.

$$P_{sk} = 3I_s^2 R_s \quad (1)$$

Rotor kayıpları R_r' kaynaklıdır. Bu bilgidен hareketle, rotor kayıpları Eş. 2’deki gibi yazılabilir.

$$P_{rk} = 3I_r'^2 R_r' \quad (2)$$

Rotor bakır kaybı, rotor akımı ve etkin rotor direncine göre değişmektedir. Etkin rotor direnci (R_{etk}) kayma ile değiştiğinden, rotor bakır kayıpları rotor akımı ve motor kaymasına göre değişir. Bu durumda, Eş. 3 yazılabilir.

$$R_{etk} = \frac{R_r'}{s} = R_r' + R_r' \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (3)$$

Eş. 3’te R_r' rotor bakır kayıplarının, $R_r' \left(\frac{1-s}{s} \right)$ ise elektrik enerjisinden mekanik enerjiye dönüştürülen gücün kaynağıdır. Bu durumda, bir faz için çekirdek kayıpları (P_{rc}) Eş. 4’teki gibi yazılabilir. Eş. 4’te verilen toplam ifadesinin ilk kısmı rotor kayıpları, ikinci kısım ise mile aktarılan güçtür.

$$P_{rc} = I_r'^2 \frac{R_r'}{s} = I_r'^2 R_r' + I_r'^2 R_r' \left(\frac{1-s}{s} \right) \quad (4)$$

Uygulanan elektrik akımı ile stator ve buna bağlı olarak çekirdekte meydana gelen sıcaklık denetlendiğinde kayıplar azaltılabilir, bu durum motor verimliliğini artırabilir.

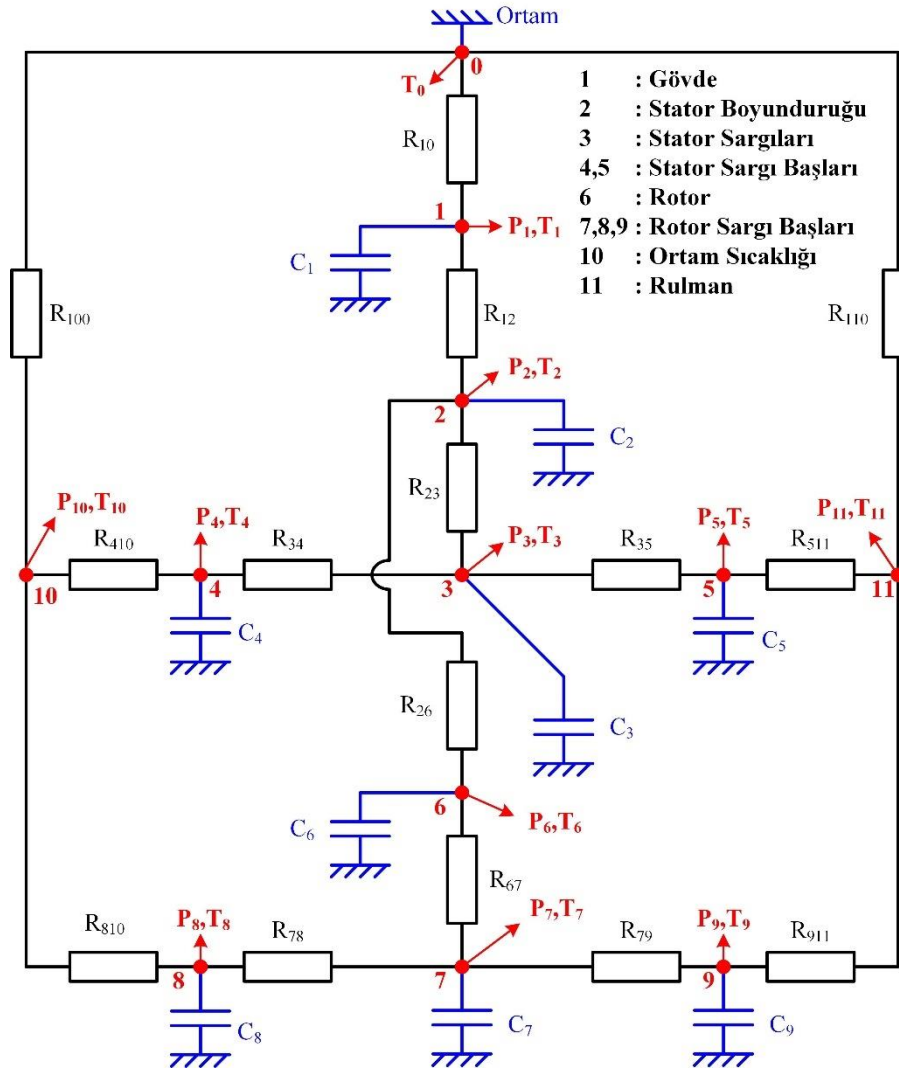
B. ROTORU SİNCAP KAFESLİ ASENKRON MOTORUN TERMAL ÖZELLİKLERİ

Elektrik makinelerinde ısı aktarımı iletim, taşınım ve radyasyon aracılığıyla olur [27]. Elektrik makinesinin katı bileşenleri için iletim yoluyla aktarım gerçekleşir. Soğutucu akışkanlarının aktarımında

ise taşınım yoluyla transfer gerçekleşir. Makine sıcaklığının aşırı yüksek seviyelere ulaşmamasından dolayı radyasyon yoluyla ısı transferi ihmal edilebilir [28].

Elektrik makinesinin gövdesi ile ortam arasındaki ısı transferi yayılım yolu ile gerçekleşir ve gövdede kayıp meydana gelmediği kabul edilir. Statora ait sac bileşenleri ile gövde arasındaki ısı transferi iletim yoluyla olur. Demir kayıpları, elektrik makinesinde boyunduruğun ve dışların oluşturduğu stator sac bileşeni bölgesinde meydana gelir. Bu bölgede açığa çıkan ısı enerjisi demir kayıplarının ana kaynağıdır. Stator sargılarıyla sac bileşeni ve sargıların başları arasındaki ısı transferi de iletim yoluyla gerçekleşir. Kapak boşluğu ile stator sargısı, hava aralığı, stator sargı başları arasındaki ısı transferi ise taşınım yoluyla meydana gelir. Kapak boşluğunda meydana gelen hava ile etkileşim içinde bulunan tüm yüzeylerin ısı transferi de taşınım ile olur [27].

Elektrik motorlarında uygulamaların öncesinde ısıl model oluşturulması, bu model üzerinden geçici ve sürekli durum analizlerinin gerçekleştirilmesi sık kullanılan bir yöntemdir [27], [29]. Toplu parametrelili ısıl devre modeli (Lumped Parameter Thermal Circuit Model) elektrik motorlarının ısıl modelinin elde edilmesinde sıklıkla tercih edilir [30], [31]. Rotoru sincap kafesli asenkronun toplu parametrelili ısıl devre modeli Şekil 6'da verildiği gibi oluşturulabilir.



Şekil 6. Rotoru sincap kafesli motora ait toplu parametrelili ısıl devre modeli.

Isıl devre modelindeki parametrelerin elde edilmesinin ardından motora ait geçici ve sürekli durumdaki sıcaklık artışları ve sıcaklıkların dağılımları Eş. 5'in çözülmesiyle elde edilebilir.

$$C_i \frac{dT}{dt} = \frac{T_i - T_j}{R_{ij}} + P_i \quad i, j = 1, 2, \dots \dots \dots 11 \quad (5)$$

Eş. 5'te T_i ve T_j : i ve j numaralı düğümlerdeki sıcaklıklar, P_i : i numaralı düğümden meydana gelen kayıp, C_i : i numaralı düğümden ısı kapasiteyi ifade eder. ρ : malzeme yoğunluğu, c : öz ısı, V : hacim olmak üzere, i numaralı düğümden ısı kapasite, Eş. 6'daki gibi hesaplanabilir.

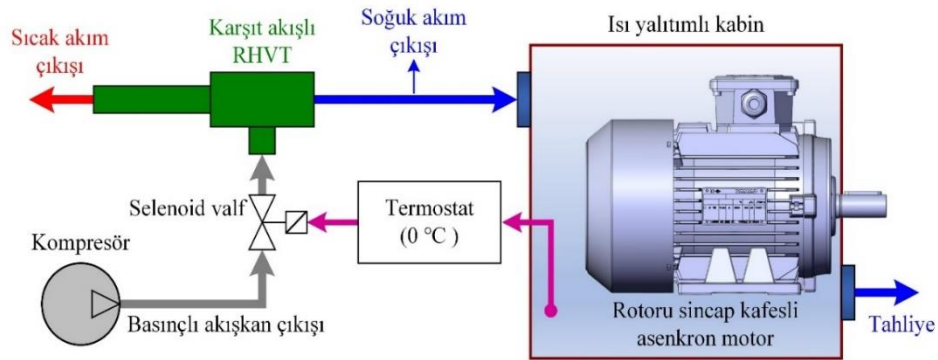
$$C_i = \rho c V \quad (6)$$

Isı akışına gösterilen direnç ise Eş. 7'deki gibi hesaplanabilir. Eş. 7'de L : ısı akışının aldığı yol, A : akışa dik kesit alanı, k : ısı iletkenliktir.

$$R_{ij} = \frac{L}{kA} \quad (7)$$

III. MATERYAL VE METOT

Gerçekleştirilen bu çalışmada; elektriksel özellikleri bilinen 180W gücünde rotoru sincap kafesli üç fazlı asenkron bir motor referans motor olarak tercih edilmiştir. Bu üç fazlı elektrik motorunda gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında karşıt akışlı RHVT ile soğutulduğu varsayılan motorda meydana gelen verimlilik değişimi incelenmiştir. Önerilen yöntemle ilişkin basitleştirilmiş şema Şekil 7'de verilmiştir.

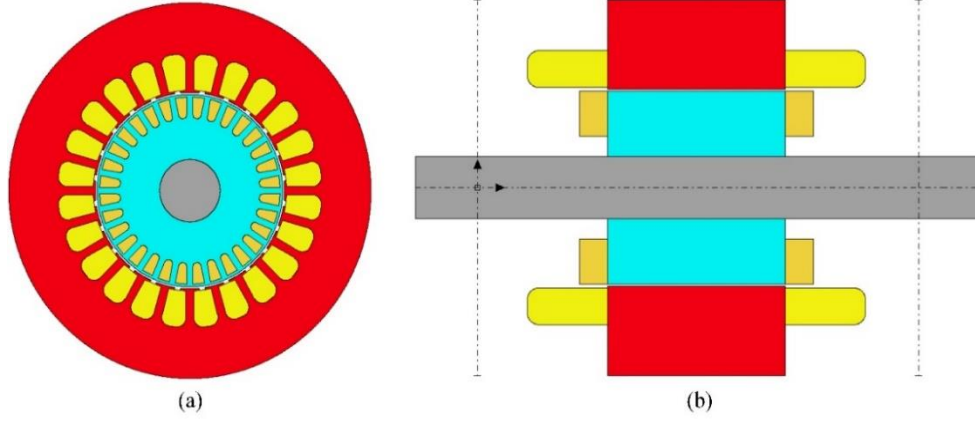


Şekil 7. Önerilen yöntemle ilişkin basitleştirilmiş şema.

Çalışmada; çapı 10 mm, gövde uzunluğu 100 mm olan ve 6,9 bar çalışma basıncında maksimum soğutma kapasitesine (2900BTU/h) ulaşan karşıt akışlı RHVT referans alınmıştır. Gerçekleştirilen benzetim çalışmalarında kullanılan motorun temel elektriksel parametreleri Tablo 1'de, ANSYS Motor-CAD görünümleri Şekil 8'de ve ANSYS Motor-CAD temel parametreleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'deki değerler benzetimde kullanılan motorun üzerinden fiziki ölçümler ile elde edilmiştir.

Tablo 1. Benzetim çalışmalarında kullanılan rotoru sincap kafesli asenkron motora ait temel elektriksel parametreler.

Gerilim [V]	Frekans [Hz]	Akım [A]	Güç [W]	cos φ	Devir [d/dak]
Y 460	60	0,6	210	0,78	3384
Y 380	50	0,6	180	0,8	2820
Δ 220	50	1,03	180	0,8	2820

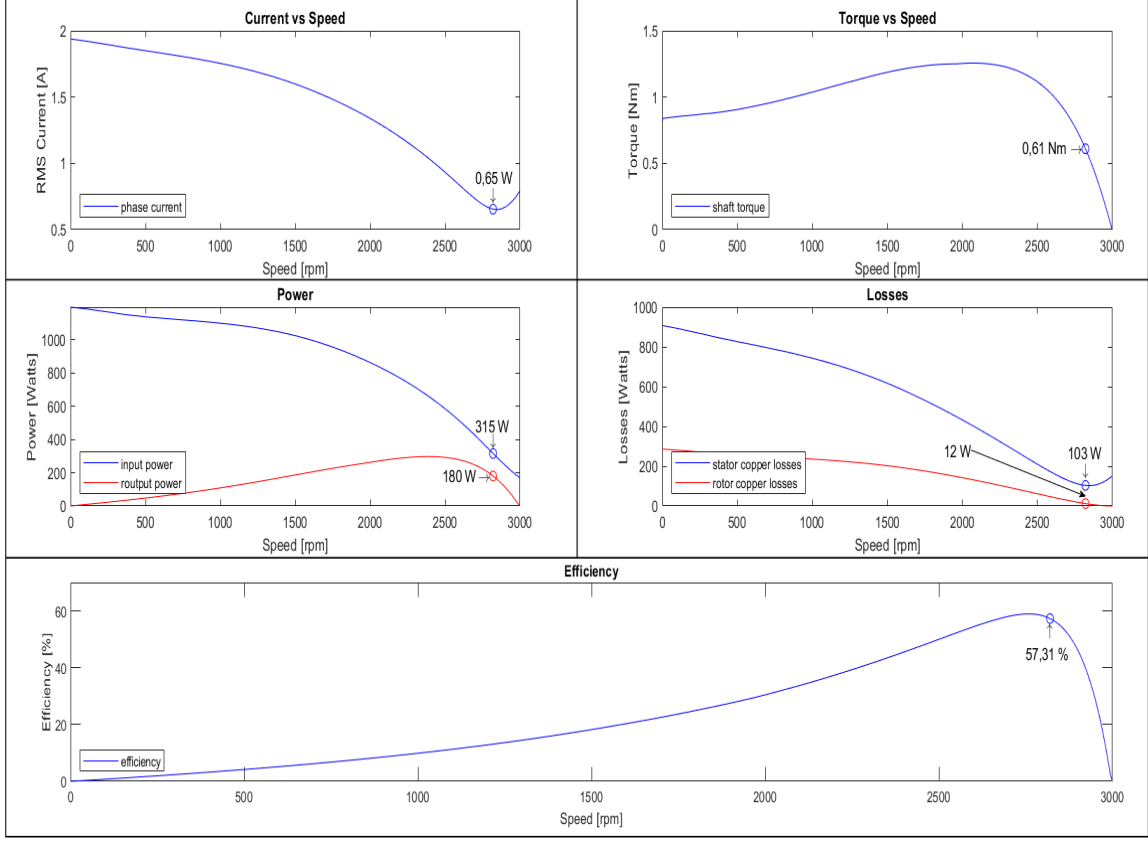


Şekil 8. Benzetimde kullanılan motora ait ANSYS Motor-CAD görüntüleri (a) radial görünüm (b) axial görünüm.

Tablo 2. Benzetimde kullanılan motora ait ANSYS Motor-CAD temel parametreleri.

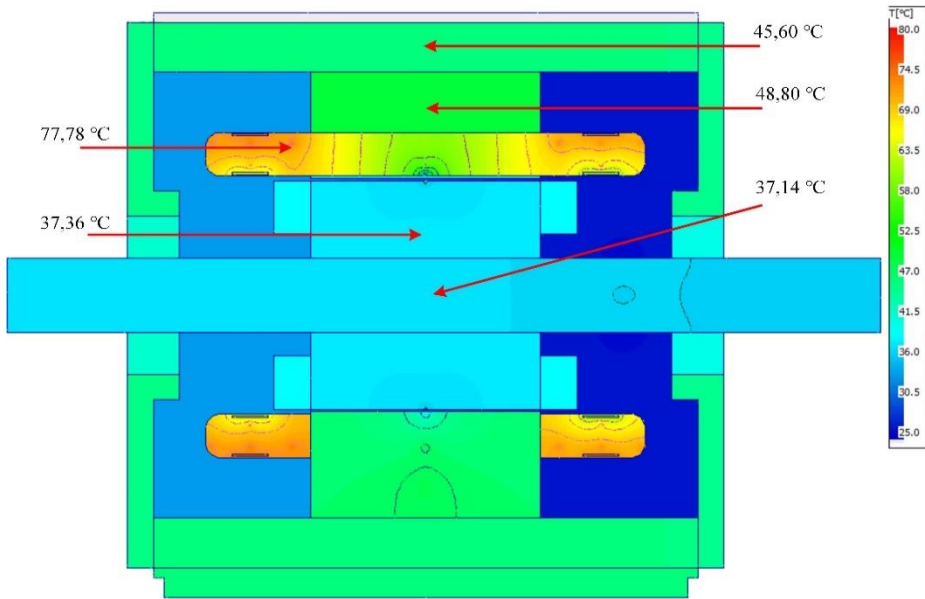
Slot Number (Slot Sayısı)	24	Rotor Bars (Rotor Çubuğu)	32	Motor Length (Motor Genişliği)	114 mm
Stator Lamination Outer Diameter (Stator Kaplama Dış Çapı)	90 mm	Pole Number (Kutup Sayısı)	2	Stator Lam Length (Stator Lam Genişliği)	44 mm
Stator Bore Diameter (Stator Oyuk Çapı)	47 mm	Bar Opening Depth [Top] (Çubuk Açıklığı)	0,7 mm	Rotor Lam Length (Rotor Lam Genişliği)	44 mm
Tooth Width (Diş Genişliği)	2 mm	Rotor Tooth Width [Top] (Rotor Diş Genişliği [Üst])	1,6 mm	End winding axial overhang [Front] (Sargı Başı Eksenel Taşma [Ön])	20 mm
Slot Depth (Slot Derinliği)	9,3 mm	Bar Depth [Top] (Çubuk Derinliği [Üst])	5 mm	End winding axial overhang [Rear] (Sargı Başı Eksenel Taşma [Geri])	20 mm
Slot Corner Radius (Slot Köşe Açısı)	2,2°	Bar Corner Radius [Top] (Çubuk Köşe Açısı [Üst])	0,9°	Wdg Extension [Front] (Sargı Uzantısı [Ön])	3 mm
Tooth Tip Depth (Diş Uç Derinliği)	0,5 mm	Airgap (Hava Boşluğu)	0,47 mm	Wdg Extension [Rear] (Sargı Çıkıntısı [Geri])	3 mm
Slot Opening (Slot Açıklığı)	1,4 mm	Shaft Diameter (Şaft Çapı)	15 mm	EndRing Thickness (Sargı Kalınlığı)	7 mm
Shaft Extension [Front] (Şaft Çıkıntısı [Ön])	23 mm	Shaft Extension [Rear] (Şaft Çıkıntısı [Geri])	30 mm	EndRing Add [Inner] (Sargı Taşması)	5 mm

Benzetim çalışmasının ilk bölümünde, ANSYS Motor-CAD yazılımından yararlanılarak geleneksel fanlı soğutma sistemine sahip asenkron motorun 25 °C ortam sıcaklığında ve anma gücünde çalıştığı varsayılarak analizler gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında; motora ilave bir soğutma uygulanmadan, motorun kabin dışında bulunduğu, yıldız 380 V modunda anma gücünde çalıştırıldığı, deniz seviyesinde bulunduğu, IEC 60034-1 standartları gereği ortam sıcaklığının 40 °C'yi aşmadığı varsayılmıştır. Bu koşullar altında yürütülen benzetim çalışmaları neticesinde Şekil 9'da görülen elektriksel veriler elde edilmiştir. Elde edilen elektriksel veriler, benzetim çalışmasında referans alınan elektrik motorunun katalog verileri ile uyumludur [32]. Bu bilgiden hareketle, ANSYS Motor-CAD ortamında referans elektrik motoru için oluşturulan modelin, bu çalışma ile önerilen soğutma yönteminin analizlerinde kullanılabileceği söylenebilir.



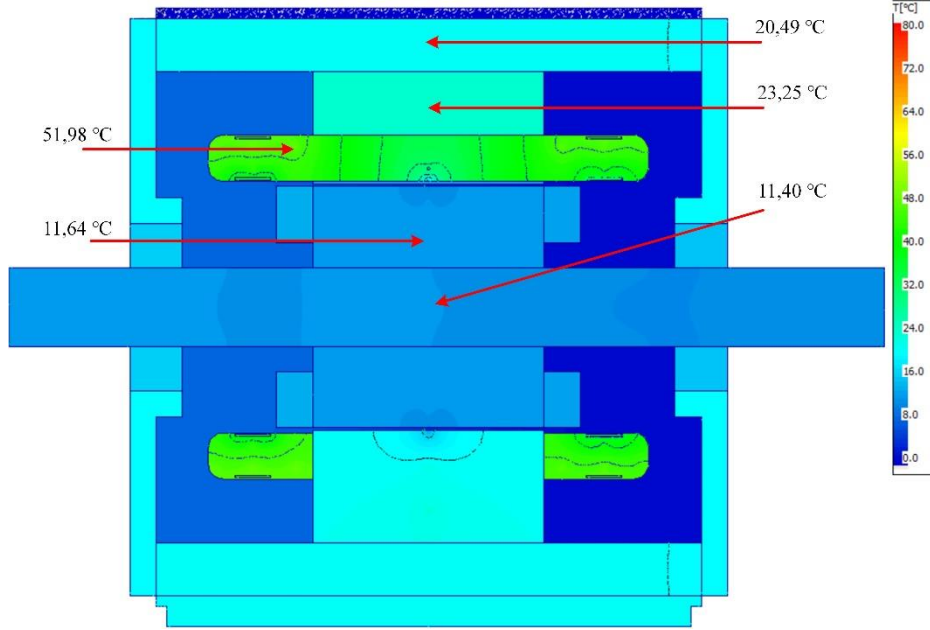
Şekil 9. 25 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilen benzetim neticesinde elde edilen grafikler.

25 °C ortam sıcaklığında, referans elektrik motoru için anma gücünde yürütülen benzetim çalışmaları neticesinde elde edilen termal dağılımlar incelendiğinde; gövde sıcaklığının 45,60 °C'ye, stator boyunduruk sıcaklığının 48,80 °C'ye, stator sargı sıcaklığının 77,78 °C'ye, rotor sıcaklığının 37,60 °C'ye, şaft sıcaklığının 31,14 °C'ye kadar ulaştığı, verimliliğin ise %57,31 olduğu görülmüştür. Gerçekleştirilen analiz neticesinde, motor elemanlarında meydana gelen sıcaklık dağılımları Şekil 10'da verilmiştir.



Şekil 10. 25 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirilen benzetim neticesinde elde edilen sıcaklık dağılımı.

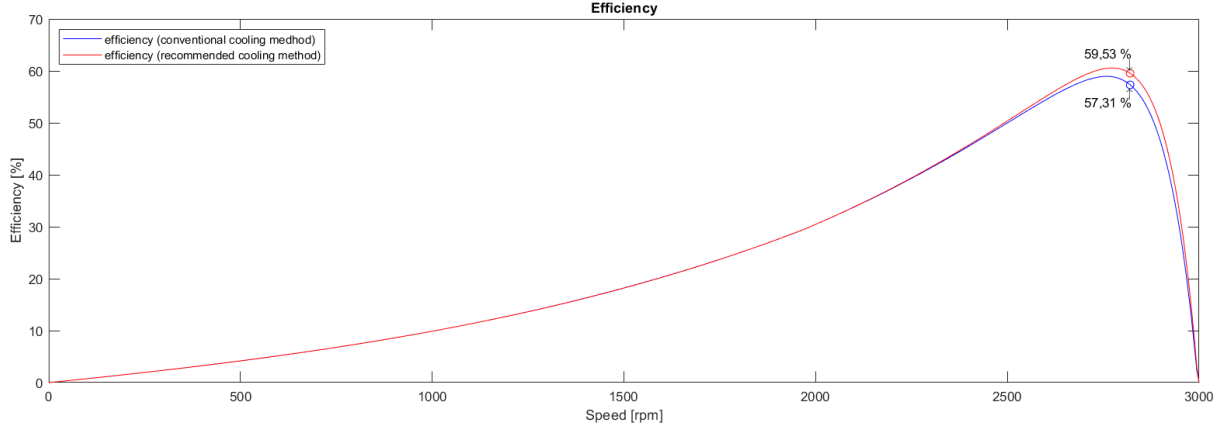
Benzetim çalışmasının ikinci bölümünde; referans elektrik motorunun Şekil 7’de görüldüğü gibi bir kabin içerisinde çalıştırıldığı ve kabin içi sıcaklığın karşıt akışlı RHVT tarafından üretilen soğuk akışkan yardımıyla 0 °C sıcaklıkta sabit tutulduğu varsayılarak anma yükü durum analizleri gerçekleştirilmiştir. 0 °C kabin içi sıcaklığında, referans elektrik motoru için anma gücünde yürütülen benzetim çalışmaları neticesinde elde edilen termal dağılımlar incelendiğinde; gövde sıcaklığının 20,49 °C’ye, stator boyunduruk sıcaklığının 23,25 °C’ye, stator sargı sıcaklığının 51,98 °C’ye, rotor sıcaklığının 11,64 °C’ye, şaft sıcaklığının 11,40 °C’ye kadar ulaştığı, verimliliğin ise %59,53 olduğu görülmüştür. Analiz neticesinde, motor parçalarında oluşan sıcaklık dağılımları Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. 0 °C kabin içi sıcaklığında gerçekleştirilen benzetim neticesinde elde edilen sıcaklık dağılımı.

IV. SONUÇ VE TARTIŞMA

Elektrik motorlarında kayıpların en önemli kaynağı Şekil 9’da da görüleceği üzere stator sargılarında boşa harcanan enerjidir. Stator sargılarında boşa harcanan enerji ısı enerjisi olarak elektrik motorlarının diğer bileşenlerine yayılır ve açığa çıkar. Çalışma kapsamında önerilen yöntem ile stator sargı sıcaklığının azaltılarak elektrik motorunun verimliliğine etkisinin incelenmesi hedeflenmiştir. Gerçekleştirilen benzetim çalışmaları neticesinde; 25 °C sıcaklıkta çalışan ve geleneksel fanlı soğutma ile soğutulan rotoru sincap kafesli asenkron motorda verimlilik %57,31 olarak gerçekleşmiştir. Aynı elektrik motorunun bir kabin içerisine yerleştirildiği ve kabin içi sıcaklığın karşıt akışlı RHVT ile elde edilen akışkan sıcaklığının 0 °C’de sabit tutulduğu varsayılarak analizler gerçekleştirildiğinde verimliliğin %59,53 elde edildiği görülmüştür. İki farklı şartta gerçekleştirilen benzetim çalışmaları neticesinde elde edilen verimlilik değerleri karşılaştırıldığında, önerilen yöntemle soğutulan elektrik motorunun verimliliğinde %3,86 oranında artış elde edilmiştir. 0 °C ve 25 °C kabin sıcaklıklarında gerçekleştirilen benzetimler neticesinde elde edilen verimlilik grafikleri Şekil 12’de birlikte verilmiştir.



Şekil 12. 0 °C ve 25 °C kabin içi sıcaklıklarında gerçekleştirilen benzetimler neticesinde elde edilen verimlilik grafiklerinin karşılaştırılması

Bu sonuç, karşıt akışlı RHVT'nin referans motor olarak kullanılan IE1 verimlilik sınıfında rotoru sincap kafesli asenkron motorun soğutulmasında kullanılabileceğini ve verimlilikte artış sağladığını ortaya koymaktadır. Önerilen karşıt akışlı RHVT ile soğutma yönteminde; Gouws'un 2012'de, Fang'ın 2019'da önerdikleri soğutma yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar elde edilmiştir [17], [19]. Bu çalışma ile önerilen karşıt akışlı RHVT temelli soğutma yönteminde stator sargılarındaki sıcaklık 25 °C ortam sıcaklığı ve anma gücü şartları için %33,17 oranında azaltılabilmektedir. Fang ve diğerlerinin 2019'da önerdikleri soğutma yönteminde, elektrik motorunun anma gücünde stator sargılarında, geleneksel soğutma yöntemine göre % 22,3'e kadar iyileşme sağlanacağı bildirilmiştir [19]. Şekil 10 ve Şekil 11 karşılaştırıldığında, önerilen yöntemle soğutulan elektrik motorunun bileşenlerindeki ısı dağılımının çok daha düşük değerlerde olduğu, bunun da bakım maliyetlerini azaltacağı kıymetlendirilmektedir.

Çalışma kapsamında IE1 verimlilik sınıfında rotoru sincap kafesli bir asenkron motor referans alınarak benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Ancak ilerleyen yıllarda IE1 verimlilik sınıfındaki motorların ekonomik ömürlerini doldurması ve yerlerini IE2 ve IE3 verimlilik sınıfındaki motorların alması söz konusudur. Bu çalışma ile önerilen soğutma yönteminin IE2 ve IE3 verimlilik sınıfındaki elektrik motorlarına uygulanması durumunda elde edilecek benzetim sonuçlarının incelenmesi gelecek çalışmalar için önerilebilir.

Benzetim çalışmaları uygulamalı alanlarda önemli bir aşamadır ve uygulamada karşılaşılabilecek sonuçlar hakkında önemli veriler elde edilmesini sağlar. Ancak benzetim çalışmasının sonuçlarının geçerliliğini test etmek için konu ile ilgili uygulamanın fiziki olarak gerçekleştirilmesi esastır. Bu çalışma ile önerilen yöntemin de geçerliğini kanıtlamak için fiziki uygulamanın gerçekleştirilmesi önemli bir husustur.

V. KAYNAKLAR

- [1] International Energy Agency. (2022, May 15). *World Energy Outlook 2021* [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2021>.
- [2] S. Büyük, "Elektrik motorlarında enerji verimliliği mevzuatının Türkiye pazarına etkisinin analizi," Yüksek Lisans Tezi, Enerji Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2018.
- [3] A. Boglietti, A. Cavagnino, D. Staton, M. Shanel, M. Mueller, and C. Mejuto, "Evolution and modern approaches for thermal analysis of electrical machines," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 3, pp. 871–882, 2009.
- [4] F. E. P. Santiago, "Study of the thermal behavior of a three-phase induction motor under fault

conditions,” M.s. Thesis, Electrical and Computer Engineering, Universidade da Beira Interior, Covilhã, Portugal, 2017.

[5] D. F. de Souza, F. A. M. Salotti, I. L. Sauer, H. Tatizawa, A. T. de Almeida, and A. G. Kanashiro, “A performance evaluation of three-phase induction electric motors between 1945 and 2020,” *Energies*, vol. 15, no. 6, 2022.

[6] Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, “2020 yılı Türkiye elektrik dağıtım sektör raporu,” Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. Genel Müdürlüğü, Ankara, Türkiye, 2021.

[7] Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı, “Elektrik piyasası sektör raporu,” Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Ankara, Türkiye, 2020.

[8] International Energy Agency, “Global ev outlook 2021,” France, 2021.

[9] *Rotating electrical machines Part 30: Efficiency classes of single-speed, three-phase, cage-induction motors (IE code)*, IEC Standard IEC 60034-30-1, 2014.

[10] B. Zöhra ve M. Akar, “Türkiye’de verimli elektrik motorlarına geçiş süreci ve şebeke kalkışlı sabit mıknatıslı senkron motorlar,” *Int. J. Multidiscip. Stud. Innov. Technol.*, c. 3, s. 2, ss. 236–242, 2019.

[11] American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE). (2022, June 15). *Motor Provisions in the Energy Policy Act of 1992* [Online]. Available: <https://web.archive.org/web/20110501200008/http://aceee.org/motors/epactapp.htm>.

[12] TC Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı. (2022, 15 Haziran). *Elektrik Motorlarında Enerji Verimliliği* [Çevrimiçi]. Erişim: http://www.iaosb.org.tr/Media/FileDocument/Elektrik_Motorlar_brosur.pdf.

[13] Verimlilik Genel Müdürlüğü, “İmalat sanayisinde kullanılan elektrik motorları envanteri analiz raporu,” TC Bilim Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı, Ankara, Türkiye, 2016.

[14] E. Gundabattini, R. Kuppan, D. G. Solomon, A. Kalam, D. Kothari, and R. A. Bakar, “A review on methods of finding losses and cooling methods to increase efficiency of electric machines,” *Ain Shams Eng. J.*, vol. 12, no. 1, pp. 497–505, 2021.

[15] H. Fujita, I. Atsushi, and U. Tohru, “Newly developed motor cooling method using refrigerant,” *World Electr. Veh. Control*, vol. 10(2), no. 38, pp. 1-10, 2019.

[16] *Rotating electrical machines - Part 6: Methods of cooling rotating machinery*, IEC Standard 34-6, 1991.

[17] R. Gouws and H. V. Jaarsveldt, “Thermal and efficiency analysis of a single phase induction motor with peltier devices,” *World J. Eng.*, vol. 9, no. 1, pp. 63–70, 2012.

[18] F. Guo and C. Zhang, “Oil-cooling method of the permanent magnet synchronous motor for electric vehicle,” *Energies*, vol. 12, no. 15, pp. 1–11, 2019.

[19] G. Fang, W. Yuan, Z. Yan, Y. Sun, and Y. Tang, “Thermal management integrated with three-dimensional heat pipes for air-cooled permanent magnet synchronous motor,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 150, no. 2019, pp. 594–604, 2019.

[20] V. Kırmacı, "Paralel bağlı karşıt akışlı ranque-hilsch vorteks tüp sisteminde farklı çalışma akışkanı ve nozul malzemesi kullanımının performans etkisinin deneysel incelenmesi," *Düzce*

- [21] H. Kaya, O. Uluer, E. Kocaoğlu, and V. Kırmacı, “Experimental analysis of cooling and heating performance of serial and parallel connected counter-flow Ranque–Hilsch vortex tube systems using carbon dioxide as a working fluid,” *Int. J. Refrig.*, vol. 106, pp. 297–307, 2019.
- [22] İ. Cebeci, S. Gürkan, S. Doğan, V. Kırmacı, “Üç fazlı asenkron motorun RHVT ile soğutulmasına ilişkin bir benzetim çalışması,” *Hodja Akhmet Yassawi 6th International Conference on Scientific Research*, Lankaran, Azerbaijan, 2022, ss 308-315.
- [23] W. Fröhlingsdorf and H. Unger, “Numerical investigations of the compressible flow and the energy separation in the Ranque-Hilsch vortex tube,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 42, no. 3, pp. 415–422, 1998.
- [24] V. Kırmacı, H. Kaya, and İ. Cebeci, “An experimental and exergy analysis of a thermal performance of a counter flow Ranque–Hilsch vortex tube with different nozzle materials,” *Int. J. Refrig.*, vol. 85, no. 2018, pp. 240–254, 2018.
- [25] C. Ocak ve B. Yenipınar, “Hibrit yapıları rotor sargısının asenkron motor verimliliği ve performansı üzerindeki etkisinin incelenmesi,” *Avrupa Bilim ve Teknol. Derg.*, c. 26, s. Special Issue, ss. 242–246, 2021.
- [26] E. B. Agamloh and A. Cavagnino, “High efficiency design of induction machines for industrial applications,” presented at IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD), Paris, France, 2013.
- [27] F. Gürgöze ve A. F. Mergen, “Üç fazlı asenkron motorlarda sıcaklık dağılımının çıkartılarak tasarım optimizasyonunun yapılması,” *İTÜ Derg. / D Mühendislik*, c. 9, s. 1, ss. 36–44, 2010.
- [28] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Parvis, and A. Vallan, “Evaluation of radiation thermal resistances in industrial motors,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 42, no. 3, pp. 688–693, 2006.
- [29] A. S. Çabuk, “Tekerlekiçi fırçasız doğru akım motorlarının sıcaklık dağılımlarının toplu parametrelili devre modeli şeması ile incelenmesi,” *Int. J. Adv. Eng. Pure Sci*, c. 32, s. 2, ss. 128–136, 2020.
- [30] H. Rouhan, J. Faiz, and C. Lucas, “Lumped thermal model for switched reluctance motor applied to mechanical design optimization,” *Math. Comput. Model.*, vol. 45, no. 2007, pp. 625–638, 2007.
- [31] R. Jebahi, H. Aloui, and M. Ayadi, “One-dimensional lumped-circuit for transient thermal study of an induction electric motor,” *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 1714–1724, 2017.
- [32] Volt Motor. (2022, 15 Haziran). *Teknik Katalog* [Çevrimiçi]. Erişim: https://www.voltmotor.com.tr/downloads/pdf/tr/catalogue_tr.pdf.