

# 3 Fazlı Asenkron Motorda Sıcaklık Artışı ve Dağılımının Elektriksel Benzeşim ve Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Hesaplanması

Filiz Şimşek<sup>1</sup>

Faik Mergen<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, İstanbul

<sup>1</sup>e-posta: filiz@elk.itu.edu.tr

<sup>2</sup>e-posta: mergen@itu.edu.tr

## Özetçe

Asenkron motorların güncel uygulamalarında yüksek verim, düşük ağırlık ve maliyet ihtiyacı gibi beklentiler, ısı analizi motor tasarımının önemli bir parçası haline getirmektedir. Bu çalışmada, asenkron sürekli halde sıcaklık dağılımını ve ısı geçici rejimi belirlemek üzere akım kaynaklı elektriksel devre benzeşimine dayanan bir ısı model oluşturulmuştur. Isıl modeli oluşturmakta kullanılan kritik parametreler belirlenmiş ve bu parametrelerin hesabı incelenmiştir. Farklı yüklenme durumları için elde edilen sonuçlar, deneysel yolla elde edilen verilerle kıyaslanarak modelin doğruluğu gösterilmiştir.

## 1. Giriş

Asenkron motorlar, yapılarının basitliği, üretim kolaylığı, düşük üretim ve bakım maliyetleri, yüksek güvenilirlik gibi nedenlerden dolayı elektromekanik enerji dönüşümünde en yaygın olarak kullanılan motor tipidir. Teknolojinin geldiği noktada otomotiv sanayinden, havacılığa veya beyaz eşya sektörüne kadar her alanda kompakt yapıda elektrik motorlarının kullanımı ihtiyacı artmıştır. Artan malzeme maliyetleri de elektrik motorlarının boyutlarındaki azalmayı destekler yöndedir. Ancak boyuttaki bu azalma, düşük verimin yanı sıra ısı aşırı yüklenmeye karşı artan duyarlılığı da beraberinde getirmektedir. Değişken frekanslı sürücü devrelerinin yaygın olarak kullanılması, yüksek sıcaklığın sargı yalıtımına zarar vererek motor ömrünü kısaltması, rotorda ve yataklarda mekanik sorunlara yol açması gibi nedenler de göz önüne alındığında, asenkron motorlarda sıcaklık dağılımının doğru olarak belirlenebilmesinin önemi açıktır.

Motorun karmaşık bir geometriye sahip olması, kullanılan malzemelerin farklı ısı özellikler taşıması, ısı kaynaklarının, yani kayıpların makine içinde dağılmış olması ve motorun hareketli parçalar içermesi nedeniyle sıcaklık ölçümünü sensörler aracılığıyla doğrudan yapmanın maliyeti çok yüksektir. Bunun yanı sıra rotora yerleştirilmiş bir sensör yüksek merkezkaç kuvvetlerinin etkisi altında zarar görebilir. Ayrıca ölçü aletlerinin büyük zaman sabitleri sıcaklık değişiminin hızlı olduğu kısa devre, faz kaybı gibi durumlarda sıcaklıktaki değişimi algılamakta geç kalacaktır. Bu nedenle araştırmacılar motorun ısı davranışını temsil edebilecek modeller üzerinde yoğunlaşmıştır.

Elektrik makinelerinin ısı analizinde kullanılan modeller belli başlangıç koşulları altında makinenin ısı davranışını, makinedeki sıcaklık dağılımını öngörebilmek için kullanılır. Bir ısı modelin kurulmasında öncelikle elektrik makinesi,

yük ve çevre koşullarının fiziksel bir modeli oluşturulur. Daha sonra bu fiziksel model matematiksel olarak ifade edilecek ve sayısal çözüm yöntemlerinden biri kullanılarak çözümleme yapılacaktır. Doğrudan sıcaklık ölçümünün maliyetini yükselten faktörler, modelleme aşamasında da yüksek bilgisayar donanım maliyetleri ve çözümleme sürecinin çok uzun olması biçiminde kendini gösterir. Isıl analizin maliyetinin azaltılabilmesi için, motor davranışını en iyi biçimde temsil edebilen, kullanıcının ihtiyacını karşılamakta yeterli, ancak bunların yanı sıra mümkün olduğunca sadeleştirilmiş ısı modellerin oluşturulması gereklidir.

Bu çalışmada 3 fazlı 2.2 kW, 380 V, p=4 kutuplu tamamen kapalı tipte bir asenkron motorda geçici rejim ve sürekli hal için sıcaklık artışı ve dağılımının belirlemek üzere az sayıda düğüm ve elemandan oluşan, kendisini oluşturan elemanların değerlerindeki değişime karşı hassasiyeti düşük, yüksek doğrulukta bir model elde edilmiş, bu modelden elde edilen sonuçlar 2D sonlu elemanlar analizi ve ölçümlerden elde edilen verilerle kıyaslanmıştır.

## 2. Yöntem ve Deneysel Çalışma

Elektriksel benzeşim yöntemi, birçok mühendislik probleminin çözümünde kullanılan etkili ve basit bir matematiksel modelleme yöntemidir. Isıl analizi yapılacak sistem ısı iletimi açısından homojen kısımlara ayrılarak, her bir parçanın ısı akışına karşı gösterdiği ısı direnci ve ısı kapasitesini temsil eden elektriksel direnç ve kondansatör elemanlarının bağlı bulunduğu düğümlerle temsil edilir. Asenkron motorlarda bu ayrıştırma, malzeme, geometri ve kayıpların dağılımı göz önünde bulundurularak yapılır. Bu çalışmada söz konusu parçalar; karkas, stator sargısı ve dişleri, stator oluk sargısı ve sargı başı, rotor kısadevre kafesi, rotor manyetik devresi ile mil olarak seçilmiştir. Motorun elektriksel ve mekanik kayıpları, ısı kaynaklarını oluşturur. Motor içerisinde ve motorla dış ortam arasında ısı aktarımı iletim, taşınım ve radyasyon aracılığıyla olur. Makinenin katı parçaları için iletim yöntemi baskındır, soğutucu akışkanlardaki aktarım ise taşınım yöntemiyle olmaktadır. Küçük ve orta güçlü kapalı tipte asenkron motorlarda, hızın (dolayısıyla zorlanmış taşınım) ısı aktarımının çok düşük olduğu durumlar haricinde yayınım yoluyla aktarılan ısı enerjisi, taşınım oranla çok küçüktür ve ihmal edilebilir [1]. Bu çalışmada incelenen motorda da bu iki büyüklük arasındaki oran 1:200 olarak hesaplanmıştır.

Karkas ve dış ortam arasında taşınım ve yayınım yoluyla ısı aktarımı olur. Karkas kayıpsız olarak kabul edilir. Stator sac paketi ve karkas arasında temel olarak iletim mekanizması

geçerlidir. Boyunduruk ve dişlerden oluşan stator saç paketi makinada demir kayıplarının meydana geldiği bölgedir. Bu kayıplar ısı enerjisi olarak açığa çıkar. Stator sargıları ile saç paketi ve sargı başları arasında ısı, iletim mekanizmasıyla aktarılır. Stator oluk sargıları ve sargı başlarındaki bakır kayıpları ile bu bölgede büyük miktarlarda ısı enerjisi üretilir. Stator sargıları ile hava aralığı, sargı başları ile de kapak boşluğu havası arasında taşınım mekanizması geçerlidir. Kapak boşluğu havası temas halinde olduğu tüm yüzeylerle (motor yan kapakları, rotor kısa devre halkası, rotor ve stator manyetik devreleri) taşınım yoluyla ısı alışverişi yapar. Bu alışveriş 8 düğümlü bir modelle temsil edilebilir. Isıl eşdeğer devre parametrelerinin bulunmasıyla, asenkron motorun geçici ısı rejim ve sürekli durumdaki sıcaklık artışı ve dağılımı denklem 1' in çözümüyle elde edilir.

$$C_i \frac{dT}{dt} = \frac{T_j - T_i}{R_{ji}} + P_i \quad i,j=1,2,\dots,8 \quad (1)$$

$i=1\dots 8$  indisleri sırasıyla karkas, stator sargısı, stator dişleri, stator oluk sargısı, stator sargı başı, rotor kısa devre kafesi, rotor manyetik devresi ile mili temsil etmektedir.  $T_i$  ve  $T_j$  i. ve j. düğümlerin sıcaklıklarını,  $R_{ji}$  i. düğümle j. düğüm arasındaki ısı akışına gösterilen direnci temsil etmektedir.  $P_i$ , i. düğüm tarafından temsil edilen motor bileşeninde meydana gelen kayıp ve  $C_i$  bu motor bileşeninin ısı kapasitesidir.  $\rho$  ( $\text{kg/m}^3$ ) malzemenin yoğunluğu,  $c$  ( $\text{J/kg}^\circ\text{C}$ ) öz ısısı,  $V$  ( $\text{m}^3$ ) hacim olmak üzere ısı kapasitenin genel ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$C_I = \rho c V \quad (2)$$

Elektriksel dirence benzer olarak, ısı akışına gösterilen direnç ısı akışının kat ettiği yolla doğru, akışa dik kesit alanı ile ters orantılıdır. Orantı katsayısı, malzemenin ısı iletkenliğinin (k) tersidir.

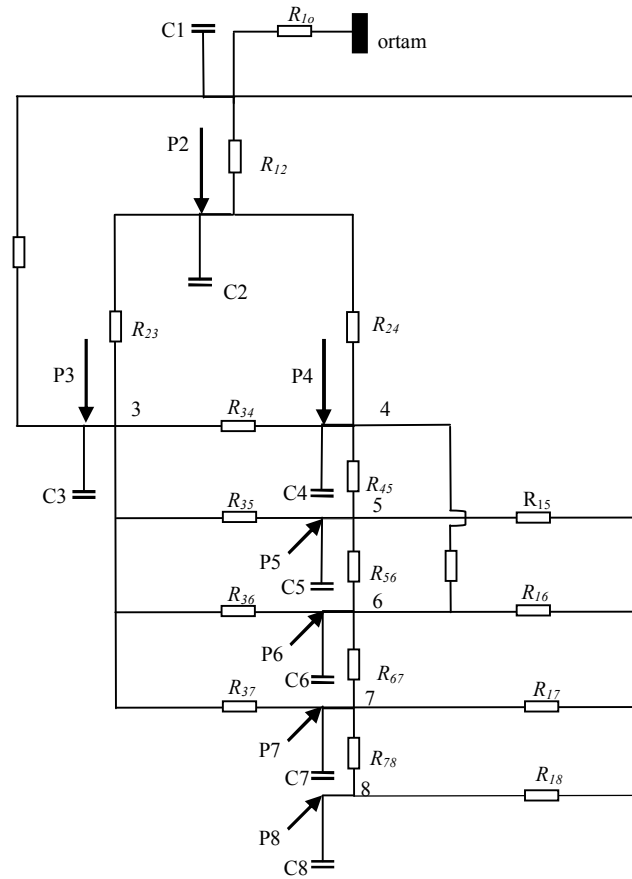
$$R_I = \frac{L}{kA} \quad (3)$$

Asenkron motorun elektriksel ağ benzeşim modelini oluşturan bileşenler incelenirken, her bir alt bileşen yaklaşık olarak bir silindirik biçiminde modellenir. Bu bileşenlerin incelenmesine temel oluşturan temel silindirik bileşenle ilgili ayrıntılar, literatürde bulunabilir [2,3].

Denklem 1'e ilişkin devre Şekil 1' de gösterilmektedir. Devreyi oluşturan bileşenlerden büyük bir bölümü motora ilişkin geometrik büyüklükler ve kullanılan malzemenin ısı iletim katsayıları kullanılarak hesaplanır. İstisnai olarak karkasla dış ortam arasındaki taşınım direncinin değeri deneysel olarak bulunmuştur. Gövdeyle ortam arasında bileşke (doğal+zorlanmış) konveksiyonla ısı aktarım direncini belirlemek için, motor sabit yük altında son sıcaklığına ulaşana kadar beklenmiş, motor kayıplarının %80 'i, karkas-ortam sıcaklık gradyanı kullanılarak karkas ve dış ortam arasında ısı akışına karşı gösterilen direnç hesaplanmıştır [2,4]. Bu yöntemle elde edilen zorlanmış taşınım katsayısının literatürde verilen hesap yöntemlerinden elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu görülmüştür [5].

Asenkron motorun sıcaklık dağılımının elde edilebilmesi için modeldeki ısı kaynaklarının, yani motor kayıplarının belirlenmesi gerekmektedir. Bunu için motorda boşta çalışma, kısadevre ve yükleme deneyleri yapılmıştır. Sürtünme ve vantilasyon kayıplarının belirlenebilmesi için deneysel olarak elde edilen  $P_0=f(V_0)$  eğrisinden faydalanılmıştır.

Motorun değişik kısımlarındaki sıcaklık artışını belirlemek üzere sensör olarak K tipi ısı çifti kullanılmaktadır. Sensörlerin oluk sargıları ve sargı başlarına yerleştirilebilmesi için motor yeniden sarılmış, oluk içlerine toplam 8 adet, sargı başlarına iki adet sensör yerleştirilmiştir. Boyunduruk sıcaklığı gövde üzerinde uygun derinlikte açılmış iki yuvaya yerleştirilmiş sensörlerle ölçülmüştür. Mil ve gövde sıcaklıklarının ölçümü için infrared termometre, soğutucu hava hızının belirlenebilmesi için anemometre kullanılmıştır. Modelde hava hızı değeri olarak motor dış yüzeyindeki 36 adet soğutma kanalının giriş ve çıkışlarında ölçülen değerlerin ortalaması kullanılmıştır. Farklı yük durumları için motor sabit yük altında son sıcaklığına ulaşmaya dek çeşitli noktalardaki sıcaklık değerleri sıcaklık veri kaydedici ile ölçülerek kaydedilmiştir.



Şekil 1: Asenkron motorun ısı devresinin elektriksel eşdeğeri

### 3. Ölçüm ve Benzeşim Sonuçları

Ölçüm sonuçları, ısı modelden elde edilen sonuçlar ve sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlarla kıyaslanarak modelin doğruluğu sınanmıştır. Sonlu elemanlar analizi için FEMM 4.2. yazılımı kullanılmıştır. Matlab ortamında oluşturulan tasarım programından elde edilen elektriksel ve mekanik kayıp yoğunlukları, SEA için ısı kaynağı olarak kullanılmıştır. Sonlu eleman analizinde motor dış yüzeyinde Dirichlet, x ve y eksenleri doğrultusunda motor kesitini sınırlayan diğer iki yüzeyde 2.dereceden homojen sınır koşulu kullanılmıştır. Isıl eşdeğer modelde hava aralığı ve stator-karkas temas yüzeyindeki ısı aktarımının taşınım yoluyla olduğu kabul edilirken, SEA'nde aynı bölgelerdeki ısınm iletim yoluyla aktarıldığı kabul edilmiştir. Dolayısıyla ısı eşdeğer devrede kullanılan  $h_{2r}$  ve  $h_c$  taşınım film katsayıları yerine, eşdeğer ısı iletkenlik katsayısı kullanılmıştır. Tablo 1' de motorun anma yükü, Tablo 2'de ise yüksüz durum için, ölçüm ve ısı model ve sonlu elemanlar analizi kullanılarak elde edilen değerler gösterilmiştir.

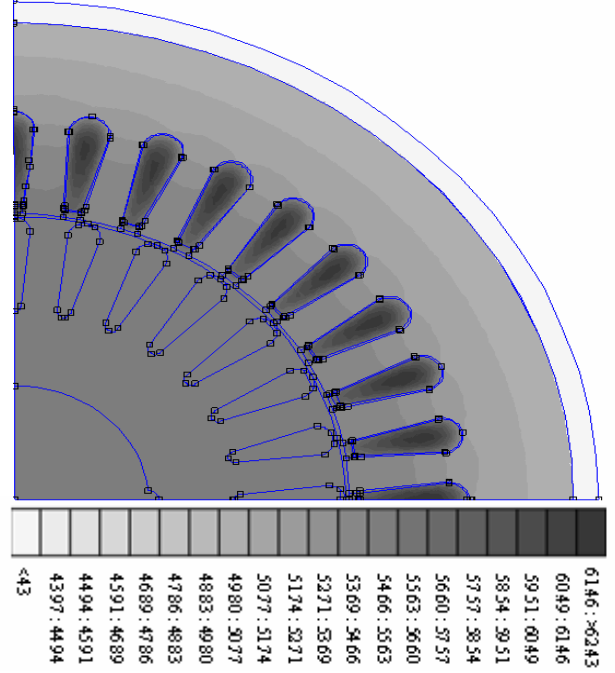
Tablo 1: Anma yükü için elde edilen sonuçlar

| ANMA YÜKÜ              |                 |              |          |
|------------------------|-----------------|--------------|----------|
|                        | Isıl Model (°C) | Ölçülen (°C) | SEA (°C) |
| Gövde                  | 80.49           | 79           | 79       |
| Stator boyunduruğu     | 94.9            | 95.4         | 94.67    |
| Stator dişleri         | 97.244          | -            | 101      |
| Stator oluk sargısı    | 113.59          | 112.16       | 113.57   |
| Stator sargı başı      | 122.46          | 123.34       |          |
| Rotor kısadevre kafesi | 151.74          | -            | 154.94   |
| Rotor boyunduruğu      | 150.57          |              | 154.94   |

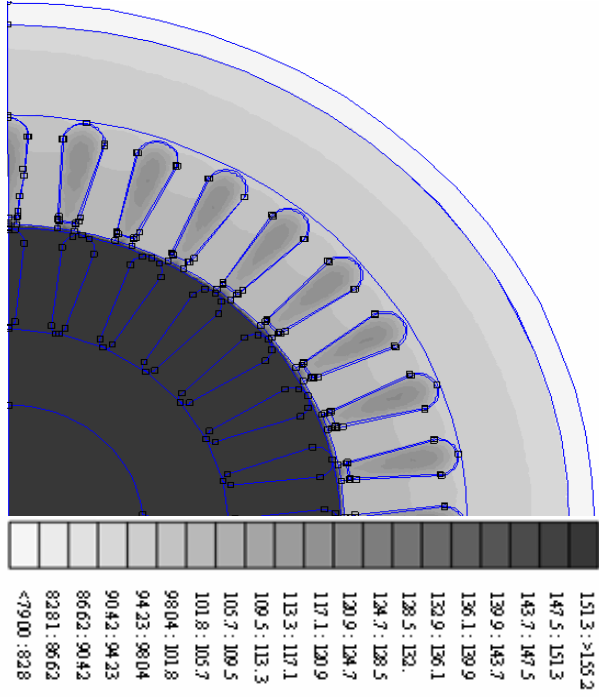
Tablo 2: Yüksüz durum için elde edilen sonuçlar

| BOŞTA ÇALIŞMA          |                 |              |          |
|------------------------|-----------------|--------------|----------|
|                        | Isıl Model (°C) | Ölçülen (°C) | SEA (°C) |
| Gövde                  | 43.38           | 43           | 43       |
| Stator boyunduruğu     | 51.28           | 51           | 50.49    |
| Stator dişleri         | 52.05           | -            | 52.58    |
| Stator oluk sargısı    | 58.01           | 58.03        | 58.78    |
| Stator sargı başı      | 60.95           | 60.67        | -        |
| Rotor kısadevre kafesi | 56.26           | -            | 55.56    |
| Rotor boyunduruğu      | 56.22           | -            | 55.56    |

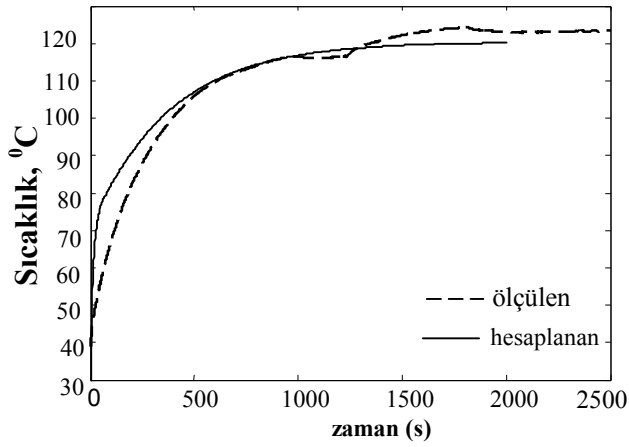
Şekil 1 ve 2'de sürekli hal için 2 boyutlu sonlu elemanlara analizi ile elde edilen sıcaklık dağılımları yüksüz durum ve anma çalışması için verilmiştir. Şekil 3 ve 4'de motorun anma yükünde, Şekil 5 ve 6'da ise boşta çalışmada stator boyunduruğu, stator oluk içi sargısı ve stator sargı başı için hesap yoluyla elde edilen ısı geçici rejim davranışları gösterilmekte ve bu sonuçlar deneysel çalışma sonuçlarıyla kıyaslanmaktadır.



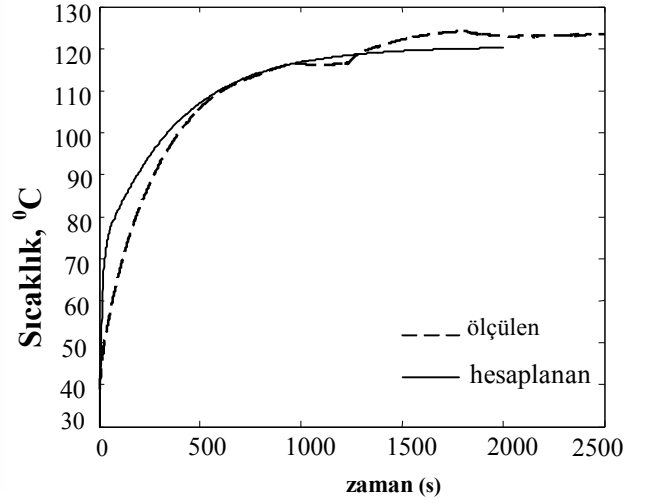
Şekil 1: Yüksüz durumda sıcaklık dağılımı



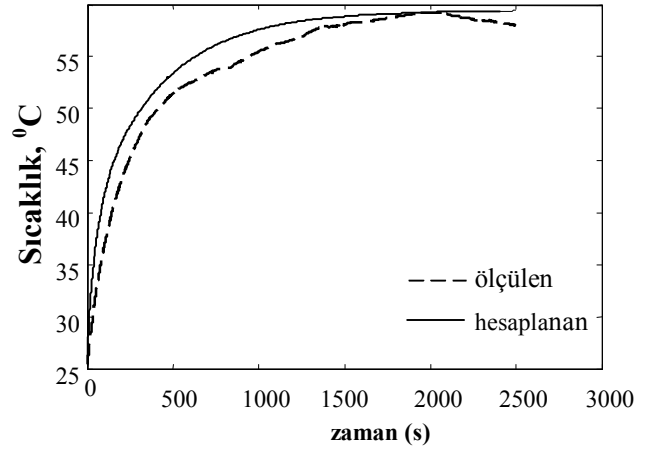
Şekil 2: Anma yükünde sıcaklık dağılımı



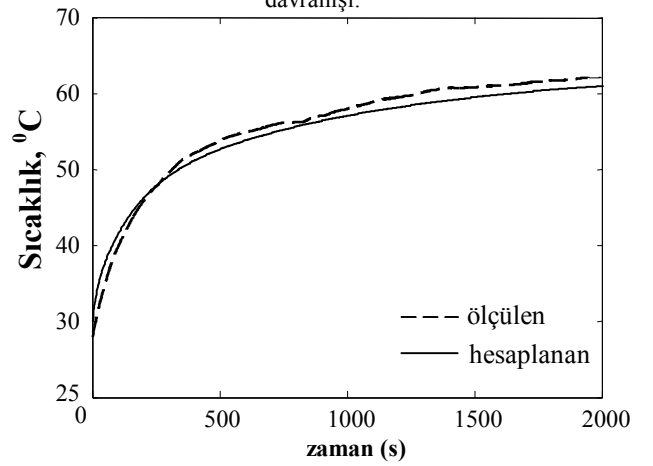
Şekil 3: Anma yükünde stator sargısının ısı geçici rejim davranışı.



Şekil 4: Anma yükünde stator sargı başının ısı geçici rejim davranışı.



Şekil 5:Boşta çalışma için stator sargısının ısı geçici rejim davranışı.



Şekil 6. Boşta çalışma için stator sargı başının ısı geçici rejim davranışı.

#### 4. Sonuçlar

—Farklı yük durumları için motorun sıcaklık artışı ve dağılımının belirlemek üzere, az sayıda işlem gerektiren basit ama doğruluğu yüksek bir model oluşturulmuştur. Model motorun tasarımı aşamasında kullanılabilecek kadar kapsamlı olmakla beraber, motor koruma işlemlerinde kullanılabilecek kadar da hızlı sonuç vermektedir.

— Toplu parametrelili sürekli ısıl modelden elde edilen veriler deneysel sonuçlarla kıyaslanmış ve uyumlu oldukları görülmüştür. İncelenen noktalarda ölçülen değerle hesaplanan değer arasındaki fark % 4 den küçüktür. Literatürdeki benzer çalışmalarla kıyaslandığında, modelin yüksek doğrulukta olduğu görülmektedir [2,6,7].

— Toplu parametrelili sürekli ısıl modelden elde edilen veriler sonlu elemanlar analizinden elde edilen sonuçlarla kıyaslanmış ve uyumlu oldukları görülmüştür.

— Sıcaklığın zamanla değişimi deneysel çalışma ve hesap yoluyla elde edilmiştir. Anma çalışmasında stator oluk sargısı ile sargı baş, boşta çalışmada ise sargı baş sıcaklıklarının zamana göre değişimi gösteren deneysel eğrilerle hesap sonucu elde edilen eğrilerin başlangıç bölgesinde fark grlmekler beraber, nihai sıcaklığa oturma süreleri uyumludur.

#### 5. Kaynakça

- [1] Boglietti A., Cavagnino A., "Evaluation of radiation thermal resistances in industrial motors", *IEEE Transaction On Industry Applications*, 42(9), 688-693, 2006.
- [2] Mellor P.H., Roberts D., Turner D.R., "Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design", *Iee Proceedings B*, **138**(5), 205-218, 1991.
- [3] Bousbaine A., "Thermal Modelling Of Induction Machines based On Accurate Loss Density Distribution", *Electric Machines and Power Systems*, 27, 311–324, 1999.
- [4] Yoon M.K., Kauh S. K., "Thermal analysis of a small, totally enclosed, fan-cooled motor", *Heat Transfer Engineering*, 26(4), 77-86, 2005.
- [5] Boglietti A., Cavagnino A., Stanton D.A., Lazarri M., Pastorelli M., "A Simplified Thermal Model for Variable Speed Self-Cooled Industrial Induction Motors", *IEEE Trans. On Ind. Appl.*, 39(4), 945–952, 2005.
- [6] Benamrouche N., Haddad S.A., "Thermal model for a TEFC induction motor-Development and sensivity analysis", *Electric Power Components And Systems*, 34, 259-269, 2006.
- [7] Okoro O., "Steady and Transient Thermal Analysis of an 7.5 kW Squirrel Cage Induction Motor at Rated-Load Operation", *IEEE Trans. On En. Con.*, 20(4), 730-736, 2005.