



## PERFORMANCE EVALUATION OF AN INDUCTION MOTOR BY USING FINITE ELEMENT METHOD

A. İhsan ÇANAKOĞLU\*, A. Gökhan YETGİN\*\*, Mustafa TURAN\*\*

\*Dumlupınar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 43100, Kütahya, Türkiye acanakoglu@dumlupinar.edu.tr

\*\*Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, 54187, Sakarya, Türkiye agyetgin@sakarya.edu.tr ve turan@sakarya.edu.tr

Geliş tarihi: 21.05.2008 Kabul tarihi: 10.06.2008

### ABSTRACT

Although induction machines are simple and rugged for operational maintenance purposes, they have indeed somewhat complex stator and rotor slot geometries. Industrial practice demands the maximum efficiency and highest torque values from these machines.

In this study, speed-torque characteristics and torque calculation of a 3 kW squirrel cage induction motor chosen as test machine have been obtained by finite element method. FEMM (Finite Element Method Magnetics) software is utilized for this purpose. On the other hand, no-load and short-circuit experiments are evaluated and compared the results.

**Key Words:** *Induction Motor, FEM, Performance Evaluation*

## SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ KULLANILARAK ASENKRON MOTORUN PERFORMANS DEĞERLENDİRMESİ

### ÖZET

Asenkron makineler basit ve sağlam yapıları ile işletmelerde bakım kolaylığına sahip olmasının yanında, stator ve rotor oluk geometrileri bakımından aslında karmaşık yapıları makinalardır. Sanayide yaygın kullanılmaları sebebiyle tasarımlarının maksimum verim, en iyi performans ve işletme değerlerini verecek şekilde yapılması gerekir.

Bu çalışmada, Sonlu Elemanlar Yöntemi (SEY) kullanılarak, deney makinesi olarak seçilen 3 kW'lık bir sincap kafesli asenkron motorun karakteristikleri elde edilmiştir. Modellemede Finite Element Method Magnetics (FEMM) paket programı kullanılmıştır. Ayrıca asenkron motorun boşta çalışma ve kısa devre çalışma deneyleri yapılarak elde edilen değerlerden performans analizleri yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** *Asenkron Motor, SEY, Performans Değerlendirm*

### 1. GİRİŞ

Elektrik makinalarının tasarımı çok sayıda, karmaşık ve birbiri ile ilişkili mühendislik problemlerinin çözümünü içerir. Bir elektrik makinasının tasarımında elektromanyetik, ısıl ve mekanik problemlerin dikkate alınması gerekir ve bütün özellikleri karşılayan ve ticari olarak uygulanabilecek bir tasarıma ulaşılması için çok sayıda inceleme yapılması gerekmektedir.

Sonlu fark ve sonlu elemanlar gibi yaklaşım yöntemleri ile bilgisayarların kullanımı, makine davranışının yüksek doğrulukta modellenmesine imkan tanır ve alternatif tasarımların kolayca değerlendirilmesi sağlar. Bilgisayar kullanarak fiziksel bir prototipin gerçekleştirilmesine gerek kalmaksızın çok farklı geometrilerin ve çalışma şartlarının analizi mümkündür. Çoğu durumlarda sayısal simülasyon, geometri karmaşıklığı ve

malzemenin doğrusal olmayan davranışlarını gözetmeksizin nominal çalışma aralığında makinanın davranışı hakkında güvenilir ve doğru bilgiyi de vermektedir[1].

Sonlu elemanlar yönteminin ve analitik yöntemlerin kullanılarak asenkron motorun hız-moment eğrisinin ve diğer performans parametrelerinin araştırıldığı birkaç çalışma verilmiştir.

Anton H. ve arkadaşları, Maxwell Stress Tensor (MST) yöntemini kullanarak asenkron motorun rotor pozisyonuna bağlı olarak moment grafiğini çizdirmişlerdir. Ayrıca MTS yöntemini ayrıntılı bir biçimde vererek motorun alan dağılım grafiğini de vermişlerdir[2].

Langraf S. V. ve Chernyshev A. Y., asenkron motorun Moment-Hız karakteristik eğrisini üç farklı analitik yöntem kullanarak elde etmişlerdir[3].

Szabados ve arkadaşları IEEE 112-1978 standardı ve A-D çeviri kullanarak asenkron motorun moment-hız karakteristiklerini incelemiş ve aralarındaki farklılıkları göstermişlerdir[4].

Burow ve arkadaşları ise asenkron motorun hız-moment grafiğini hem analitik olarak hem de sonlu elemanlar yönteminin bir parçası olan mesh modelini kullanarak elde etmişlerdir[5].

Galinda, Fdez, Pinto ve Coimbra, rotor oluk geometri şekillerinin, sonlu elemanlar yöntemini kullanarak asenkron motorun performansı üzerine olan etkisini incelemişlerdir[6].

Lindenmeyer, Dommel, Moshref ve Kundur, asenkron motor eşdeğer devre parametreni hesaplama yöntemlerinden bahsetmişlerdir ve Solnp optimizasyon tekniği ile asenkron motor eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanmasını ve karakteristik eğrilerinin çıkartılmasını gerçekleştirmişlerdir[7].

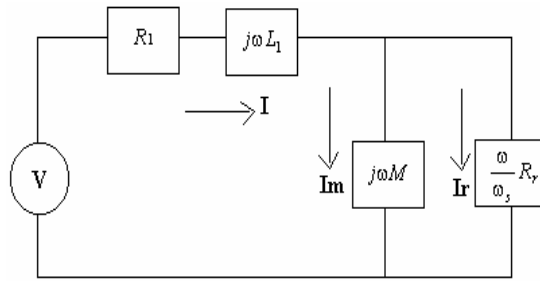
Bu çalışmada ise asenkron motorun performans karakteristiklerinin elde edilebilmesi için iki farklı yöntem kullanılmıştır. Bunlardan birincisi, sayısal çözüm yöntemlerinden olan sonlu elemanlar yöntemidir. İkinci yöntem ise, motorun boşa ve kısa devre çalışma deneyleri yapılarak elde edilen sonuçlara dayalı olarak performansın elde edilmesidir. Ayrıca FEMM programından asenkron motorun manyetik eşvektör potansiyel dağılımı, manyetik akı yoğunluğu, akım yoğunluğu, hava aralığındaki akı değişimi ve potansiyel değişim grafikleri verilmiştir.

## **2. ASENKRON MOTORUN PERFORMANS KARAKTERİSTİKLERİNİN ELDE EDİLMESİNDE KULLANILAN YÖNTEMLER**

Asenkron motorun tasarımı esnasında, önemli işletme karakteristiklerinden olan Hız-Moment karakteristiğinin elde edilmesi, tasarımı yönlendirecek kriterdir. Motorun tam yük, devrilme ve kalkış anı gibi çalışma noktalarındaki moment değerlerinin elde edilmesi tasarım esnasında yeterli olabilir. Ancak motor çalışma söz konusu olduğu için, kaymanın 0-1 aralığında diğer karakteristiklerinin (akım, çıkış gücü, güç faktörü, verim vb) elde edilmesi, tasarımın uygun olup olmadığına karar vermede daha etkilidir[8]. Günümüzde SEY ile aynı karakteristiklerin elde edilmesi, geliştirilen modeller vasıtasıyla daha kolay hale gelmiştir.

### **2.1. SEY İçin Asenkron Makina Modeli**

Asenkron motorun performans analizlerinin ve işletme değerlerinin çıkarılabilmesi için ilk önce motorun eşdeğer devre parametrelerinin elde edilmesi gerekmektedir. Eşdeğer devre parametrelerinin SEY' de elde edilebilmesi için, motorun sürekli hal çalışmasına ait tek fazlı bir devre modeli geliştirilir. Sürekli hal çalışması temel alındığından motorun hızı ve rotor akımlarının açısız frekansı sabittir. Böyle bir eşdeğer devre Şekil 1' de verilmiştir[9].



Şekil 1. Asenkron Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi

Bu eşdeğer devrede bütün kaçak endüktanslar stator tarafındaki  $L_l$  endüktansında toplanmıştır. Stator ile rotorun kuplajı ve rotor akımları  $M$  endüktansında tanımlanmıştır.  $\omega$  uygulanan elektriksel frekansı göstermektedir.  $\omega_s$  rotorun mekanik frekansı ile rotor akımlarının frekansı arasındaki farkı gösterir. Makina  $p$  çift kutup sayısına sahipse,  $\omega_r$  rotor açısal hızını göstermek üzere,  $\omega_s$  aşağıdaki şekilde tanımlanır[9].

$$\omega_s = \omega - p\omega_r \quad (1)$$

### 2.1.2. Asenkron motor empedansı

Model olarak alınan eşdeğer devreye göre bir fazın giriş empedansı aşağıdaki şekilde hesaplanır [10].

$$Z(\omega_s) = R_1 + j\omega \left( L_1 + M \left( \frac{1}{1 + j\tau\omega} \right) \right) \quad (2)$$

Burada  $\tau$ ,  $M/R_r$  'ye eşit, rotor zaman sabitidir.

### 2.1.3. Asenkron motor stator akımı

Kayma frekansına bağlı olarak akım ifadesi aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$i_{phase}(\omega_s) = \frac{V_{phase}}{Z(\omega_s)} \quad (3)$$

### 2.1.4. Akımın fonksiyonu olarak moment

Asenkron motorun hesaplanan eşdeğer devre parametreleri yardımıyla moment ifadesini kolaylıkla elde edebiliriz. Denklem 12' de moment ifadesinin akım, endüktans ve rotor sabiti cinsinden ifadesi verilmiştir[10].

$$T(\omega_s) = 3pMi^2 \left( \frac{\tau\omega_s}{1 + (\tau\omega_s)^2} \right) \quad (4)$$

### 3. KULLANILAN MOTORUN ÖZELLİKLERİ

Deneyler için 3 kW'lık sincap kafesli asenkron motor kullanılmıştır. Motorun özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Motorun stator ve rotorunda Stabolec V 200-50A, soğukta haddelenmiş ve tavlınmamış, 0.5 mm'lik saclar bulunmaktadır. Ayrıca stator olukları trepazoidal, rotor olukları yuvarlak tipte geometriye sahiptir.

**Tablo 1.** Asenkron Motor Parametreleri

Motor Parametreleri	Motor
Nominal Güç [kW]	3
Stator Gerilimi [Volt]	380
Bağlantı Şekli	Yıldız
Frekans [Hz]	50
Faz Sayısı	3
Güç Katsayısı	0.88
Verim	0.78
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu [Tesla]	0.68
Stator Dış Akı Yoğunluğu [Tesla]	1.6
Rotor Dış Akı Yoğunluğu [Tesla]	1.69
Senkron Devir Sayısı [d/d]	3000

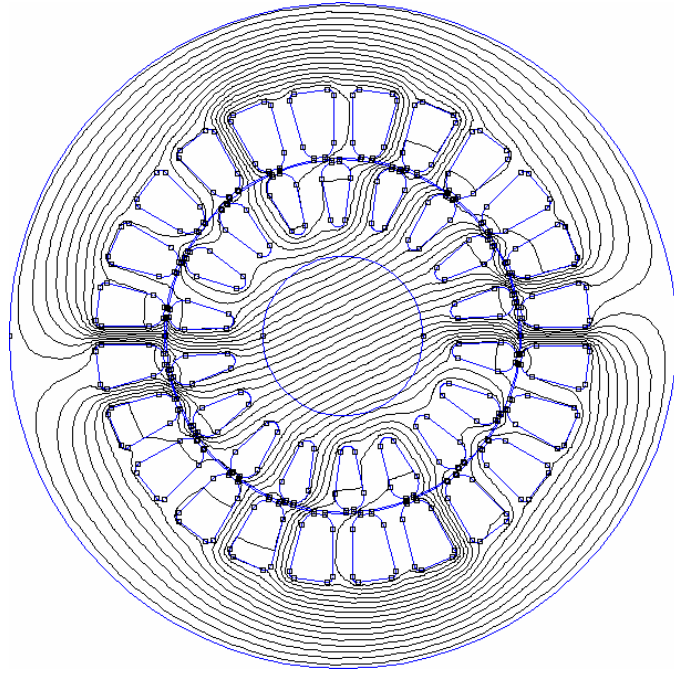
### 4. ELDE EDİLEN SONUÇLAR

3 kW'lık makina için tam yükte elde edilen manyetik alan dağılımı Şekil 2'deki gibidir. Manyetik alan problemlerinde elde edilen alan dağılımı, eşvektör potansiyel noktalarıdır. Problem harmonik alan problemi olduğundan Şekil 2'de manyetik vektör potansiyelin reel kısmının dağılımı verilmiştir. Makinanın çift kutup sayısı 2 olduğundan reel kısmın dağılımına bakıldığında simetrik alan dağılımı görülmektedir.

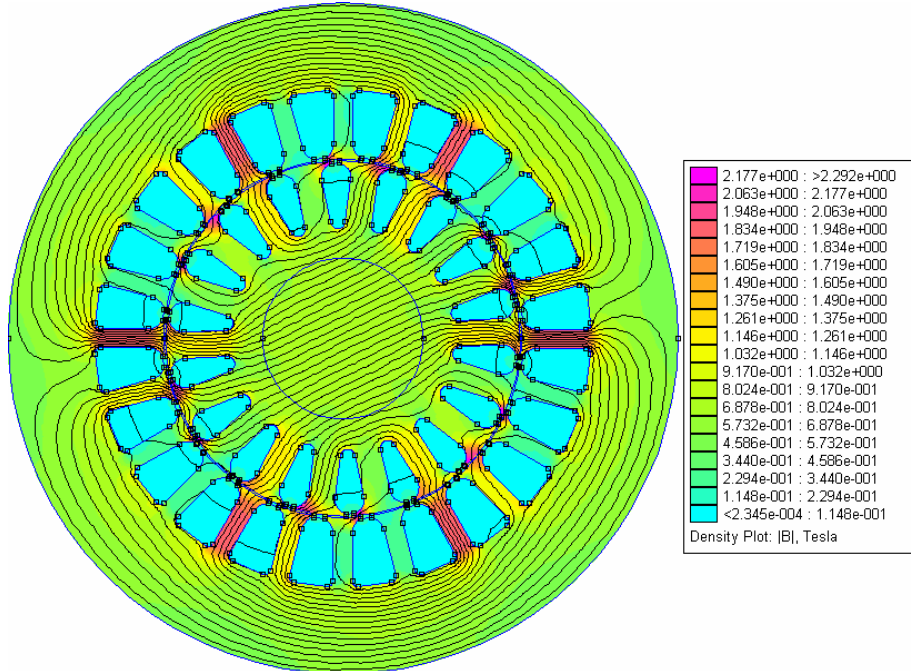
Şekil 3'de ise akı yoğunluğuna ait dağılım görülmektedir. Bu makinanın tasarım aşamasında, stator dışlarında akı yoğunluğu değeri 1.6 T, rotor dışlarında ise 1.69 T seçilmiştir. Çözüm sonucunda elde edilen dağılıma bakıldığında, stator dışlarındaki ortalama akı yoğunluğu değerlerinin 1.261 T ile 1.375 T aralığında değiştiği görülmektedir. Rotor dışlarında ise dip noktalarında 1.9 T'ye kadar artım olduğu, ortalama değerlerin 1.35 T civarında olduğu görülmektedir. FEMM programından bu aşamada elde edilen sonuçlar, modelin doğru kurulduğuna işaret etmektedir. Modelden elde edilen manyetik alan ve akı dağılımlarının düzgün bir şekilde çıkması, asenkron motorun moment, akım vb. işletme değerlerinin ve performans karakteristiklerinin de doğru bir şekilde elde edilmesini sağlamıştır.

Şekil 4'de ise hava aralığında oluşan manyetik akı yoğunluğunun değişim grafiği verilmiştir. Görüldüğü gibi hava aralığındaki akı yoğunluğu değerleri ortalama olarak 0.578 T çıkmıştır. Buda makina performansı için oldukça önemlidir. Şekil 5'de ise hava aralığındaki vektör potansiyel değişimi verilmiştir.

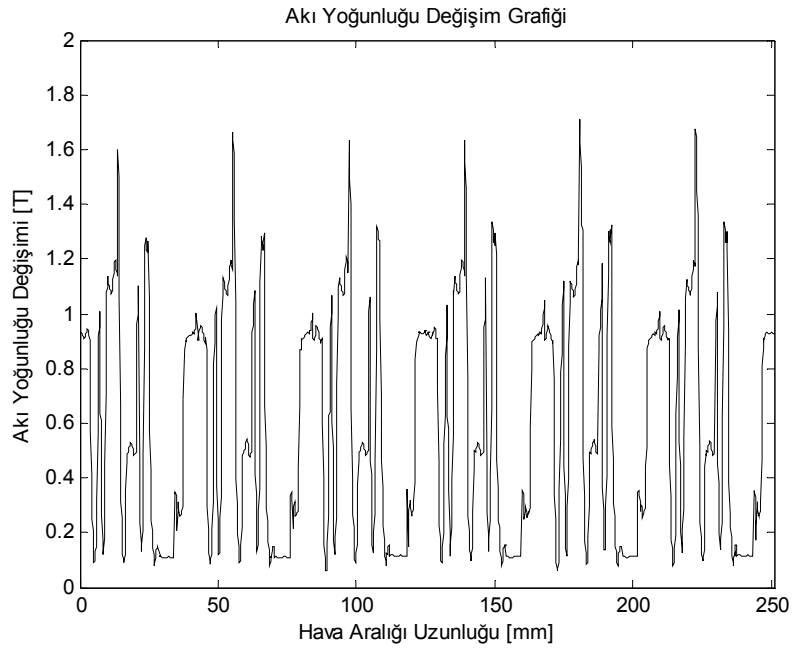
Şekil 6 ve 7'de ise asenkron motorun performans karakteristikleri (moment, akım) SEY ve deneysel veriler yardımıyla elde edilmiştir. Şekillerde 1 numaralı eğri sonlu elemanlar yöntemine ait sonucu, 2 numaralı eğri ise asenkron motorun boşta ve kısa devre deneyleri yapılarak elde edilen sonuçları göstermektedir. Moment grafikleri incelendiğinde motorun yol alma momenti arasında farklılık olmasına rağmen devrilme ve nominal moment değerleri birbirleriyle örtüşmektedir. Akım grafikleri ise birbirine yakın elde edilmiştir.



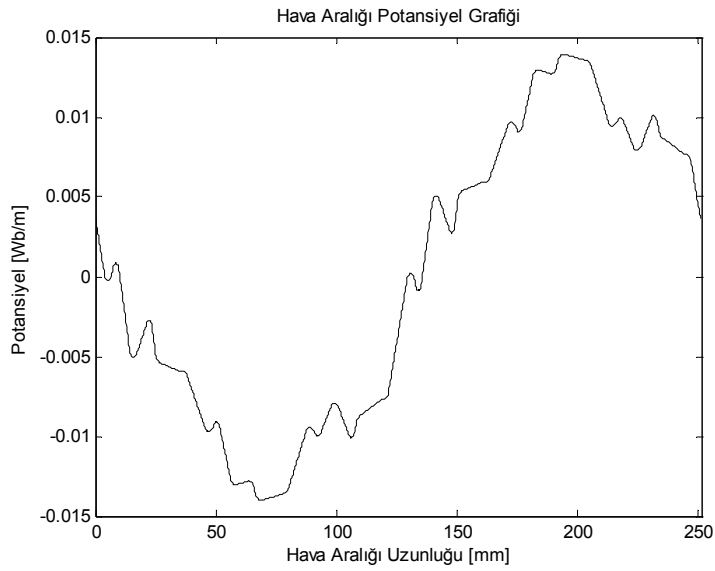
Şekil 2. FEMM Programından Elde Edilen Tam Yük Eşvektör Potansiyel Dağılımı (Reel Kısım)



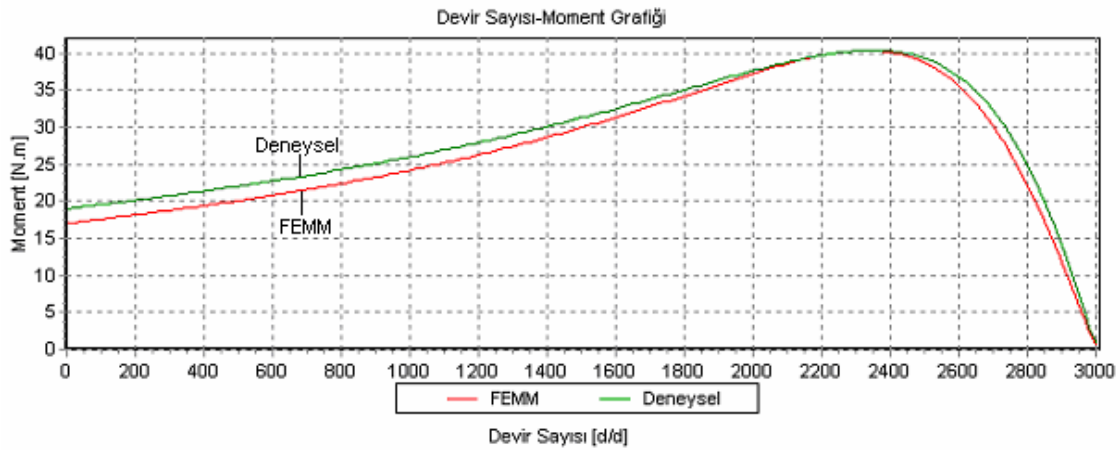
Şekil 3. FEMM Programından Elde Edilen Tam Yük İçin Manyetik Akı Yoğunlukları



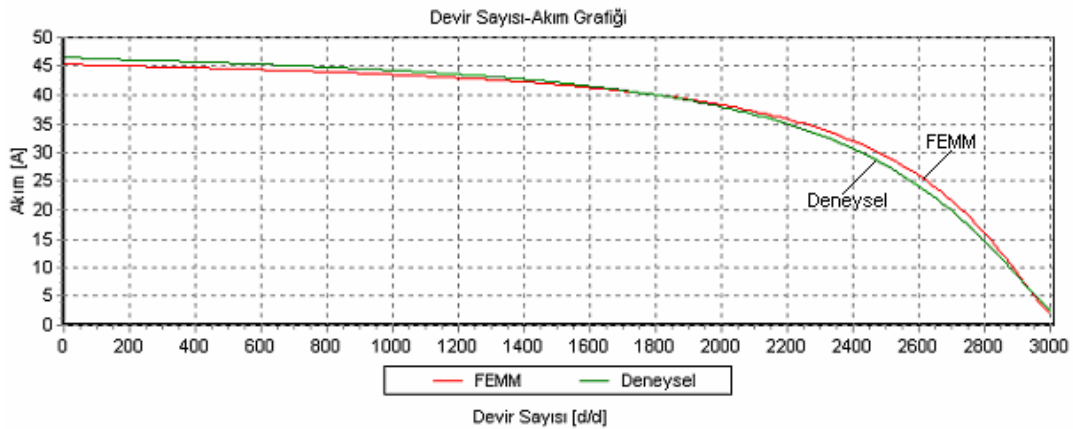
Şekil 4. Hava Aralığı Akı Yoğunluğu Değişimi



Şekil 5. Hava Aralığı Vektör Potansiyel Grafiği



Şekil 6. Devir Sayısı-Moment Grafikleri



Şekil 7. Devir Sayısı-Akım Grafikleri

## 5. SONUÇ

Asenkron motorların tasarımı için izlenen hesaplama yöntemleri analitik çözüm yöntemlerine dayanmaktadır. Motorun nüvesi için seçilen malzemeye ait manyetik değerlerin tasarıma etkisi büyüktür. Tasarım yöntemleri genelde bu malzemelerin lineer olduğunu kabul eden bir yol izler. Motorun nominal çalışma noktasında ve civarında bu kabul geçerli olur. Ancak bütün çalışma bölgeleri ve noktaları göz önüne alındığında doymanın etkisinin performans üzerinde oynadığı rolün bir başka yöntemle araştırılması gerekir. İncelemesi yapılan asenkron motorun, sonlu elemanlar gibi bir yöntemle analiz edilerek değerlerin hedeflenen değerlere ne kadar yaklaştığı ortaya konulmuştur. Bu çerçevede moment eğrilerinde yol alma kısmında küçük farklılık olsa da devrilme ve nominal çalışma bölgesinde eğrilerin birbirlerine yakın olduğu görülmektedir. Sonlu elemanlar yönteminden elde edilen performans grafiklerinin deneysel yolla elde edilen grafikleri desteklediği görülmektedir. Buda sonlu elemanlar yöntemi ile yapılan modellemenin doğru bir şekilde yapıldığını göstermektedir.

## KAYNAKLAR

- [1] Gürdal, O., *Elektrik Makinalarının Tasarımı*, Atlas Yayın Dağıtım, Eylül, 1. Baskı, s514, (2001).
- [2] Anton H., Bozidar H., Matjaz L., Nikola G., *Torque Calculation by Bernstein Bezier's Surfaces* **IEEE Transactions on Magnetics** VOL. 31, NO: 3., pp1885-1887, (MAY 1995).
- [3] Langraf S. V., Cheernyshev A. Y., *The Calculation of Parameters for Equivalent Circuits of Induction Motor on Basis of Catalogue Data*, **Modern Techniques and Technology ( MTT 2001)**, pp 113-114, (2001).
- [4] B. Szabados, J.H. Dableh, G.M. Obermeyer, R.E. Draper, *Measurement of The Torque- Speed Characteristics of induction Motors Using An Improved New Digital Approach*, **IEEE Transactions on Energy Conversion**, Vol. 5, No. 3, pp 565-571, September (1990).
- [5] D. W. Burow, S. J. Salon, C. J. Slavik, M. J. DeBortoli, *Dependence of Torque Calculation on Mesh in Induction Machines*, **IEEE Transactions on Magnetics**, VOL. 31, NO. 6, November, pp 3593-3595, (1995).
- [6] Galinda, V. A., Fdez, X. M. L., Pinto, J. A. D., Coimbra, A. P., *Parametric study of rotor slot shape on a cage induction motor*, **X International Symposium on Electromagnetics Fields, ISEF'2001**, Vol. 1, pp 441-447, (2001).
- [7] Lindermeyer, D., H. W., Dommel, A., Moshref, P.Kundur, *An induction motor parameter estimation method*, **Electrical Power and Energy Systems** 23, pp 251-262, (2001)
- [8] Yetgin, A.G., ve Çanakoğlu, A.İ., *Sonlu elemanlar yöntemini kullanarak asenkron motorun hız-moment karakteristiğinin elde edilmesi*, Fırat Üniversitesi, **Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 17 (4), Elazığ, ss 699-707, (2005).
- [9] Meeker,D. "<http://femm.foster-miller.net>" *Induction Motor Example*, (2002).
- [10] Meeker,D., "<http://femm.foster-miller.net>" *Determination of Induction Motor Operating Point*, (2002).