

# FARKLI YÖNTEMLER KULLANILARAK ASENKRON MOTORUN EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASI

A. Gökhan YETGİN<sup>1</sup>

A. İhsan ÇANAKOĞLU<sup>2</sup>

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Mühendislik Fakültesi

Dumlupınar Üniversitesi Tavşanlı Yolu 43100 Kütahya

<sup>1</sup>e-posta: [agyetgin@dumlupinar.edu.tr](mailto:agyetgin@dumlupinar.edu.tr)

<sup>2</sup>e-posta: [acanakoglu@dumlupinar.edu.tr](mailto:acanakoglu@dumlupinar.edu.tr)

*Anahtar sözcükler: Asenkron Motor, Bilgisayar Programı, Kararlı Hal Analizi, Eşdeğer Devre Parametresi*

## ABSTRACT

In this paper, three different methods were introduced for calculating equivalent circuit parameters of an induction motor. In first method, magnetic circuit properties are used for calculating. For this, a computer program was developed for design and circuit parameter calculations. In second method, stator and rotor dimensions were used. Dimension of stator and rotor slots were used for calculations. In last method, no load and blocked rotor test results were used. Results are obtained for 3 kW squirrel-cage induction motor and results are presented comparatively in the form of table.

## 1. GİRİŞ

Motor tasarımındaki amaç, istenilen karakteristiklere sahip yüksek verimli ve düşük maliyetli motor üretebilmektir. Makina mühendisliği alanında yapısal optimizasyon fikirleri 1960' lı yılların başında tanımlanmıştır[1]. Petrol krizinden sonra enerji fiyatlarının artmasıyla Buschart ve Diamant gibi bazı araştırmacılar, asenkron motorlarının optimizasyonu ve parametrenin tayini hakkında daha fazla çalışmaya başlamışlardır. Neural Network, Fuzzy Logic, Genetik Algoritma gibi yöntemleri asenkron motorların tasarım optimizasyonunda kullanmışlardır[2].

Genel olarak, asenkron motor parametrelerinin hesaplanmasında mevcut verilere bağlı olarak beş farklı yöntem kullanılmaktadır[8].

### 1. Motor konstrüksiyon verilerinden parametre hesaplamak

Bu yöntem, makina konstrüksiyonunda stator ve rotor geometrileri ve malzeme parametreleri gibi detaylı bir bilgi birikimi gerektirir. Fiziksel gerçeklerle ilişkisi oldukça yakın olduğundan en doğru sonuç veren ancak aynı zamanda, sonlu elemanlar yöntemi gibi sayısal çözüm yöntemlerine bağlı olduğu için en pahalı olan yöntemdir[12, 13].

### 2. Kararlı Hal motor modeline bağlı olarak parametre hesaplamak

Bu yöntemde ise asenkron motorun kararlı hal eşitliklerine dayanarak iteratif çözümler kullanılır[10]. Genellikle motor verilerinin kolay elde edilebilir olmasından dolayı en yaygın kullanılan parametre hesaplama yöntemidir[8].

### 3. Frekans domeninde parametre hesaplamak

Motorun, sükunet durumundayken elde edilen frekans cevabına dayalı bir yöntemdir. Motor parametreleri elde edilen transfer fonksiyonu kullanılarak hesaplanır [9].

### 4. Zaman domeninde parametre hesaplamak

Zaman domeninde motor ölçümleri yapılır ve model parametreleri ölçüm değerleri ile uyuşacak şekilde ayarlanır. Bu yöntemde, bütün parametrelerin ölçüm miktarlarını gözlemek mümkün olmadığından dolayı motor modelini basitleştirmek gerekmektedir[11]. Yöntemin dezavantajı maliyetinin yüksek olması ve hesaplamalar için kullanılacak verilerin elde edilememesidir[8].

### 5. Gerçek zamanda parametre hesaplamak

Bu model basitleştirilmiş asenkron motor modelini kullanarak gerçek zamanlı parametre tahmin tekniği gerektirir. Bu yöntemle motor parametrelerinin devamlı güncelleştirilmesi yeterli derecede hızlıdır. Bu yöntemde asenkron motorun sürücü sisteminin kontrolörlerini ayarlayarak parametre tayini yapılır [3].

Bu çalışmada ise, asenkron motor modelindeki parametrelerin hesaplanması için yeterli doğruluğu verecek gerekli veriler mevcut olduğundan eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması için en uygun yöntem olarak birinci ve ikinci yöntem tercih edilmiştir. Bu iki yöntemle ilaveten asenkron motorun stator ve rotor oluk geometrilerinden faydalanılarak eşdeğer devre parametre hesabı yapılmıştır. Her üç yöntemden elde edilmiş değerler

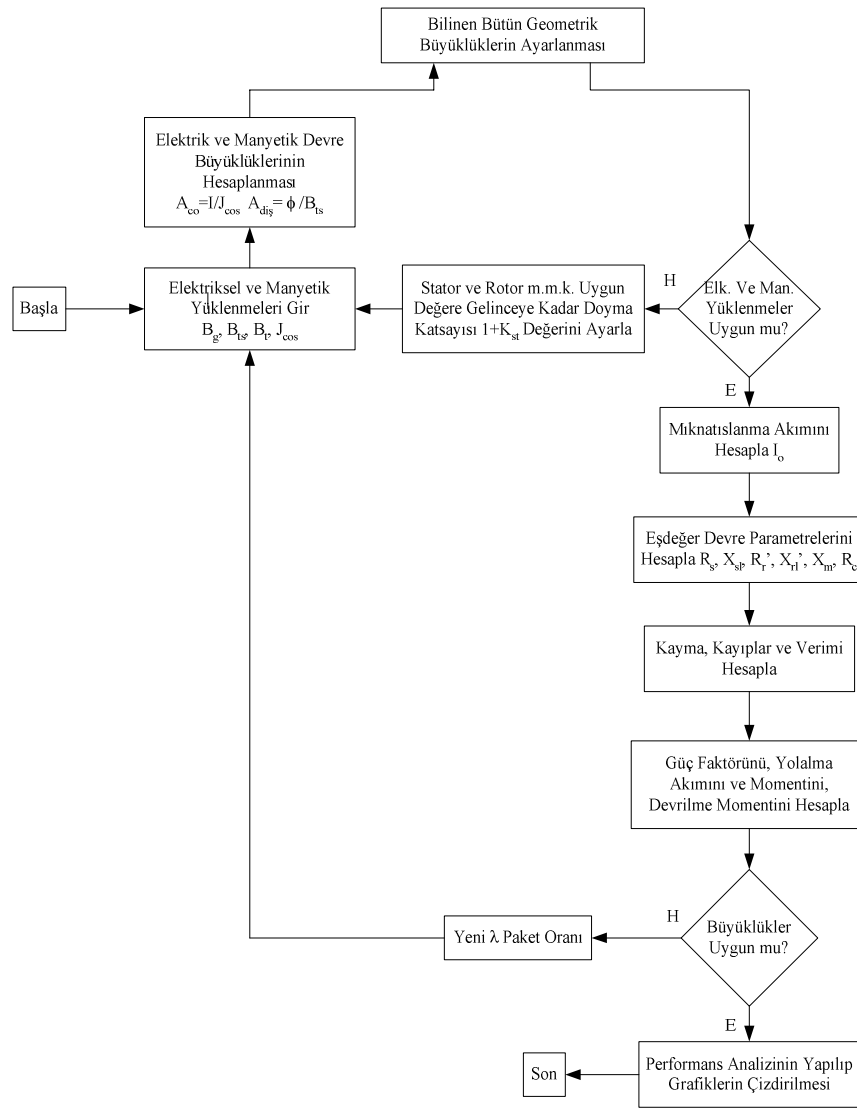
karşılaştırmalı olarak tablo halinde gösterilmiştir. Deneyle yapılan asenkron motorun özellikleri ise Tablo 1’ de verilmiştir.

## 2. ASENKRON MOTORUN EŞDEĞER DEVRE PARAMETRELERİNİN HESAPLANMASINDA KULLANILAN PROGRAMIN TANITILMASI VE KULLANILAN YÖNTEMLER

Küçük ya da orta güçlü asenkron motorların ayırımında sınır değer gücü olarak 100 kW düşünülür. Gücü 100 kW’ın altındaki motorlar, tek stator ve rotor paketinden oluşur[6]. Küçük güçlü motorlarda, stator sac paketi tek tek sac levhalardan kesilip daha sonra birleştirilir. Rotor sac paketi de aynı şekilde sac levhalardan kesilerek paketlenir ve

rotor çubukları döküm yoluyla oluklara yerleştirilir [7].

Bu çalışmada, 100 kW gücüne kadar olan motorların tasarımını yapan bir bilgisayar programı geliştirilmiştir. Yazılan bilgisayar programında, bir çok açıdan motor için önem taşıyan parametrelerin sürekli olarak kontrolü sağlanmıştır. Stator, rotor ve hava aralığı magnetomotorkuvvetleri, stator ve rotor sargı akım yoğunluk değerleri, kayıplar ve verim program içinde kontrolü yapılan önemli değerlerdir[5].



Şekil 1. Tasarım ve Eşdeğer Devre Parametrelerinin Hesaplanmasında Kullanılan Algoritma

Programa giriş değerleri olarak en başta, tasarımı yapılmak istenen motorun etiket değerleri (güç, gerilim, akım, güç katsayısı, verim, devir sayısı ve frekans gibi nominal değerler) verilir. Stator ve rotor nüvesinde kullanılacak manyetik malzemelere ait B-H ve manyetik kayıp karakteristiği, programın iteratif hesap bölümlerinde kullanılmak üzere programa girilir. Şekil 1’ de asenkron motorun tasarımı için kullanılan akış diyagramı görülmektedir. Bu akış diyagramına göre, motora ait bütün konstrüksiyon bilgileri (stator ve rotor boyu, iç ve dış çaplar ile stator ve rotor oluklarına ait ölçüler) programdan elde edilir. Program içinde manyetik ve elektrik yük değerleri kontrol edilir. Eğer bu değerler eşit veya birbirine yakın değerde değilse tasarım birinci adıma geri döner ve bütün değerler tekrar hesaplanır. Bütün basamaklar başarıyla tamamlanırsa,  $I_o$  mıknatıslanma akımı, eşdeğer devre parametreleri, kayıplar ve verim gibi değerler hesaplanır. Performans değerleri kontrol edilir ve hedeflenen değerlerden çok farklı bulunursa, birinci adımdan itibaren yeni akım yoğunluğu ve yeni  $\lambda$  paket oranı kullanılarak hesaplama tekrar başlar. Bütün değerler uygun ise motorun işletme karakteristik eğrileri çizilir ve nominal çalışma noktaları bulunur.

## 2.1. Makina Manyetik Alanına Bağlı Olarak Eşdeğer Devre Parametrelerinin Hesaplanması

Bu yöntemde eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanması için yukarıda bahsedilen bilgisayar programından faydalanılır. Asenkron motorlarda manyetik alana bağlı olarak Şekil 4’ deki eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanmasında aşağıdaki formüller kullanılır [6].

Stator faz direnç değeri  $R_1$  ;

$$R_1 = \rho \frac{l w_1}{A_{co} a_1} \quad (1)$$

Burada  $\rho$  özdirenç değerini,  $l$  bobin uzunluğunu,  $A_{co}$  tel kesit alanını ifade etmektedir.

Rotor faz direnci  $R_2$  ;

$$R_2 = \frac{4m}{N_r} (w_1 k_{w1})^2 R_{be} \quad (2)$$

(2) ifadesinde yer alan  $m$  faz sayısını,  $k_{w1}$  stator sargı faktörünü,  $R_{be}$  rotor kısa devre halkası direncini ifade etmektedir.

Stator kaçak reaktans değeri  $X_1$  ;

$$X_1 = 2\mu w_1 l \frac{w_1^2}{pq} (\lambda_s + \lambda_{ds} + \lambda_{ec}) \quad (3)$$

$\lambda_s, \lambda_{ds}, \lambda_{ec}$  farklı oluk geometrilerine bağlı permeans, kısa devre halkası permeans ve bobin başı özel geometrik permeans değerleridir.

Rotor kaçak reaktansı  $X_2$  ;

$$X_2 = \frac{4m}{N_r} (w_1 k_{w1})^2 X_{be} \quad (4)$$

Formül (4)’ deki ifadede  $X_{be}$  rotor kısa devre halkası kaçak reaktans değeridir. Mıknatıslanma reaktans değeri  $X_m$ ,  $I_o$  mıknatıslanma akımına bağlı olarak aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$X_m = \sqrt{\left(\frac{V}{I_o}\right)^2 - R_1 - X_1} \quad (5)$$

## 2.2. Motorun Oluk Geometrilerinden Faydalanarak Eşdeğer Devre Parametrelerinin Hesaplanması

Asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerini hesaplama yöntemlerinden birisi de, motorun stator ve rotor oluk geometrileri ile diğer boyutsal büyüklüklerinden yararlanılarak eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanmasıdır.

Bu yöntemde stator direnç değeri (1) formülünde olduğu gibi hesaplanır. Rotor direncini hesap etmek için ise kısa devre halkasının bazı boyut değerlerinin, kesit alanı ve iç çap gibi parametrelerin bilinmesi gerekmektedir. Burada kullanılan  $k_{dr}$  ve  $k_{pr}$  ifadeleri sırasıyla rotor dağıtım katsayısı ve rotor adım faktörleridir.

$$R_r = 1.169 \times 10^{-6} \left( \frac{k_{w1} W_1}{k_{dr} k_{pr}} \right)^2 \left[ \frac{l}{N_r A_b} + \frac{2}{\pi} \frac{D_{er}}{p^2 A_{er}} \right] \quad (6)$$

Stator kaçak reaktans değeri  $X_1$  ve rotor kaçak reaktansı  $X_2$  ise aşağıdaki gibi hesaplanır. Formüllerden de anlaşılacağı üzere stator kaçak reaktans değeri ve rotor kaçak reaktansı tamamen asenkron motorun Şekil 3’ de verilen oluk geometri değerleri kullanılarak hesaplanmaktadır[4].

$$X_1 = k_1 \left[ \frac{h_{s1} + h_{w1} - \left( \frac{b_{s2}}{8} + \frac{b_{s1}}{9} \right)}{32 \frac{b_{s1}}{3}} \right] + k_2 \left[ 1.05 \left( \frac{b_{s1}}{3b_{os1}} \right)^{1/3} - 0.475 + \frac{h_{os}}{b_{os1}} \right] \quad (7)$$

$$X_2 = 0.5 + 0.07 \left( \frac{d_1}{b_{or}} \right) + \frac{h_{or}}{b_{or}} + \frac{h_r + \left( \frac{d_1 + d_2}{3} - \left( \frac{d_1}{7} + \frac{d_2}{4} \right) \right)}{3d_1} \quad (8)$$

Yukarıdaki (7)' nolu ifade de yer alan  $h_{s1}$  stator oluk yüksekliğini,  $h_{w1}$  kama yüksekliğini,  $h_{os}$  oluk ağız yüksekliğini,  $b_{s1}$  oluk alt genişliğini,  $b_{s2}$  oluk üst genişliğini,  $b_{os}$  oluk ağız genişliğini ifade etmektedir. İfade (8)' deki  $h_r$  rotor oluk yüksekliğini,  $h_{or}$  oluk ağız yüksekliğini,  $b_{or}$  oluk ağız genişliğini,  $d_1$  oluk üst çapını,  $d_2$  oluk alt çapını ifade etmektedir.

Asenkron motorun mıknatıslanma reaktans değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$X_m = \omega \frac{\pi \left( \frac{W_1 k_{w1} N_s}{a_1 m} \right)^2}{\frac{2.4 p_1 g}{\mu \pi D_{is} l}} \quad (9)$$

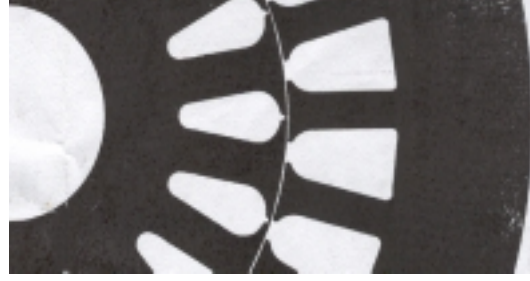
$$= 1.6713 \times 10^{-7} \left( \frac{f D_{is} l}{p_1 g} \right) \left( \frac{W_1 k_{w1} N_s}{a_1 m} \right)^2$$

(9)' nolu ifadede yer alan  $D_{is}$  stator iç çapını,  $g$  hava aralığı uzunluğunu,  $a_1$  paralel kol sayısını,  $N_s$  stator oluk sayısını,  $p_1$  tek kutup sayısını ifade etmektedir.

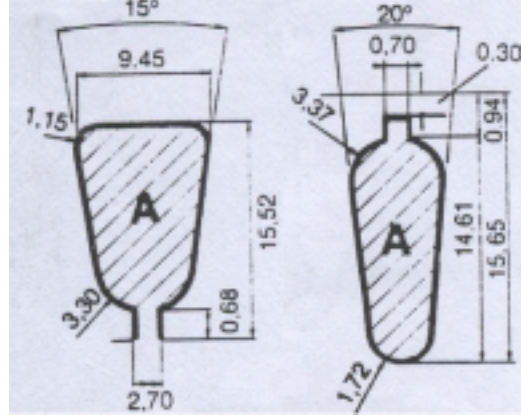
Demir direnci ise gerilime ve demir kayıplarına bağlı olarak aşağıdaki şekilde elde edilir.

$$R_c = \frac{E_1^2}{3P_c} \quad (10)$$

Şekil 1' de verilen tasarım algoritması sayesinde 3 kW' lık motor için Şekil 2' de görülen iki boyutlu motor kesiti elde edilmiştir. Burada görülen kesitteki iç-dış çap, stator ve rotor oluk geometri şekilleri vb büyüklükler yazılan bilgisayar programından tasarım sonucu elde edilen değerlerdir. Şekil 3' de ise Şekil 2' deki motor kesitindeki stator ve rotor oluk geometri parametrelerinin değerlerini göstermektedir. Oluk geometrisinden faydalanılarak eşdeğer devre parametrelerinin hesaplanmasında Şekil 3' de verilen stator ve rotor oluk geometrileri büyüklüklerinden faydalanılmıştır. Buradaki büyüklükler mm cinsinden verilmiştir.



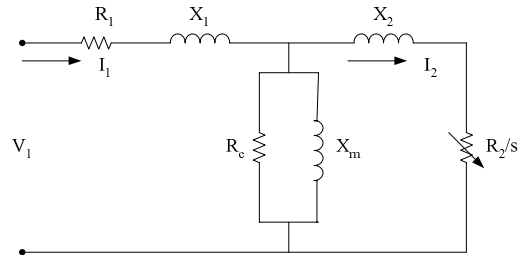
Şekil 2. Asenkron Motorun İki Boyutlu Kesiti



Şekil 3. 3 kW' lık Motorun Stator ve Rotor oluk Geometri Şekilleri ve Boyutları

### 2.3. Kararlı Hal Motor Modeline Bağlı Olarak Eşdeğer Devre Parametrelerinin Hesaplanması

Şekil 4' de verilen üç fazlı asenkron motorun bir faz eşdeğer devre parametreleri, boşa çalışma ve kısa devre deneyleri yapılarak hesaplanabilir [14]. Bu yöntem ile hesaplanan parametreler sabittir. Fakat  $R_2$  ve  $X_2$  gibi rotor parametreleri rotor akım frekansına bağlı olarak değişir [15]. Bu durumda çift oluklu veya derin çubuk oluklu motorlarda rotor akımı önem kazanır. Çok iyi bilinen bir durum ise, her bir iletkenin direnç değerinin, iletkenin malzemesine bağlı olarak sıcaklık artışıyla artmasıdır. Dolayısıyla sıcaklık değişimi ile parametrelerin değerleri değişmiş olur [16].



Şekil 4. Üç Fazlı Asenkron Motorun Bir Faz Eşdeğer Devresi

Kararlı hal yönteminde kullanılan bazı formüller aşağıda verilmiştir[5].

Stator faz direnci  $R_1$  yıldız bağlı durum için;

$$R_1 = \frac{1.05 V_{dc}}{2 I_{dc}} \quad (11)$$

Eşdeğer toplam direnci  $R_{kd}$  ;

$$R_{kd} = \frac{P_k}{I_{kd}^2} \quad (12)$$

Eşdeğer toplam empedansı  $Z_{kd}$  ;

$$Z_{kd} = \frac{V_{kd}}{I_{kd}} \quad (13)$$

Eşdeğer toplam reaktansı  $X_{kd}$  ;

$$X_{kd} = \sqrt{Z_{kd}^2 - R_{kd}^2} \quad (14)$$

Burada  $V_{dc}$  ve  $I_{dc}$  motor sargılarındaki DC gerilimi ve akımı,  $P_k$  kısa devre gücünü,  $V_{kd}$  ve  $I_{kd}$  kısa devre gerilimini ve akımını ifade etmektedir.

### 3. TASARIMDA VE DENEYLERDE KULLANILAN MOTORUN ÖZELLİKLERİ

Tasarım için 3 kW' lık sincap kafesli asenkron motor seçilmiştir. Motorun etiket değerleri ve tasarım için seçilen büyüklükler Tablo 1' de verilmiştir. Bu değerler tasarım programının da giriş değerleridir. Motorun stator ve rotor oluk geometrisi için yuvarlak oluk biçimi kullanılmıştır.

Tablo 1. Asenkron Motor Parametreleri

Motor Parametreleri	Motor 1
Nominal Güç [kW]	3
Stator Gerilimi [Volt]	380
Bağlantı Şekli	Yıldız
Frekans [Hz]	50
Faz Sayısı	3
Güç Katsayısı	0.88
Verim	0.78
Senkron Devir Sayısı [d/d]	3000
Rotor Devir Sayısı [d/d]	2844
Stator Oluk Sayısı	24
Rotor Oluk Sayısı	18
Hava Aralığı Akı Yoğunluğu [Tesla]	0.68
Stator Dış Akı Yoğunluğu [Tesla]	1.66
Rotor Dış Akı Yoğunluğu [Tesla]	1.69
Stator İletkenleri Akım Yoğunluğu [A/mm <sup>2</sup> ]	3.49
Rotor İletkenleri Akım Yoğunluğu [A/mm <sup>2</sup> ]	4.0
Mil Çapı [mm]	28
Stator Oluk Geometrisi	Yuvarlak
Rotor Oluk Geometrisi	Yuvarlak

### 4. ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Tablo 2' de verilen yöntem 1 makina manyetik alanına bağlı olarak elde edilen sonuçları, yöntem 2 asenkron motorun oluk geometrilerine bağlı olarak elde edilen sonuçları, yöntem 3 ise yapılan deneylerden elde edilen sonuçları ifade etmektedir.

Tablo 2. 3 kW' lık Motora Ait Eşdeğer Devre Parametre Değerleri

	Yöntem 1	Yöntem 2	Yöntem 3
$R_1$ [ $\Omega$ ]	1.145	1.17	1.141
$R_2$ [ $\Omega$ ]	0.983	0.827	1.057
$X_1$ [ $\Omega$ ]	1.4	1.6	1,56
$X_2$ [ $\Omega$ ]	2.93	3.2	3.09
$X_m$ [ $\Omega$ ]	80.65	83.24	78.41
$R_c$ [ $\Omega$ ]	231.44	236	242

### 5. SONUÇ

Bu çalışmada, asenkron motor tasarımı yapan bir bilgisayar programından ve asenkron motorun eşdeğer devre parametrelerini hesaplayan üç farklı yöntemden bahsedilmiş ve elde edilen sonuçlar tablo halinde karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. Tasarım için bir algoritma hazırlanmış ve bu algoritma kullanılarak ilk önce asenkron motorun bütün fiziksel parametre değerleri (İç dış çap, boy, stator ve rotor oluk geometrileri vs) hesaplanarak bir tasarım gerçekleştirilmiş ve elde edilen tasarım büyüklükleri ile asenkron motorun eşdeğer devre parametreleri hesaplanmıştır. Elde edilen bu değerler deney yolu ile bulunan değerlerle karşılaştırılmıştır. Asenkron motorun stator ve statora indirgenmiş rotor direnç değerleri incelendiğinde elde edilen üç sonucunda birbirine çok yakın olduğu gözükmemektedir. Aynı şekilde kaçak reaktans değerleri de birbirini desteklemektedir. Demir direnci ve mıknatıslanma reaktansı da çok küçük hatalarla birbiriyle örtüşmektedir.

Bu sonuçlardan yola çıkılarak elde edilen değerlere göre her üç yöntemde başarıyla uygulandığını göstermektedir.

### KAYNAKLAR

- [1] S., Palko, T., Jokinen, "Optimization of Squirrel Cage Induction Motors Using Finite Element Method and Genetic Algorithms", Conference Publication No.444 IEEE, EMD 97 1-3, pp21-25, Sempenter, 1997.
- [2] M., R., Feyzi, H., V., Kalankesh, "Optimization of Induction Motor Design by Using the Finite Element Method", pp 845-850.
- [3] J., Stephan, M. Bodson, J. Chiasson, "Real Time Estimation of the Parameters and Fluxes of Induction Motors", IEEE

- Transactions on Industry Applications, 30(3), pp 746-759, 1994.
- [4] J., J., Cathey, Electric machines analysis and design applying matlab, Mc Graw-Hill, Singapore, pp 317-420, 2001.
- [5] A., G., Yetgin, Üç fazlı asenkron makina tasarımı ve sonlu elemanlar yöntemi ile analizi, DPU Fen bilimleri enstitüsü, Yüksek lisans tezi, ss 139, 2004.
- [6] I., S., Boldea, A., Nasar, "The Induction Machine Handbook", CRC Pres LLC, Washington, D.C., 2002, pp 133-159
- [7] O., Gürdal, "Elektrik Makinalarının Tasarımı", 1. Baskı, Atlas Yayın Dağıtım, ss 97-129, 2001.
- [8] D., Lindermeier, H., W., Dommel, A., Moshref, P., Kundur, "An Induction Motor Parameter Estimation Method ", Electrical Power and Energy Systems 23, pp 251-262, 2001.
- [9] J., R., Willis, G., J., Brock, J., S., Edmonds, "Derivation of Induction Motor Models from Standstill Frequency Response Test", IEEE Transactions on Power Energy Conversion, 4 (4), pp 608-615, 1989.
- [10] B., K., Johnson, J., R., Willis, "Tailoring Induction Motor Analytical Models to fit Known Motor Performance Characteristics and Satisfy Particular Study Needs", IEEE Transactions on Power Systems, 6(3), pp 965-969, 1991.
- [11] P., Ju, E., Handschin, Z., N., Wei, U., Schluucking, "Sequential Parameter Estimation of a Simplified Induction Motor Load Model", IEEE Transactions on Power Energy Conversion, 11(1), pp 319-324, 1996.
- [12] R., Belmans, "Magnetic Field Analysis in Squirrel Cage Induction Motors", IEEE Transactions on Magnetics, 28(2), pp1367-1370, 1992.
- [13] D., Dolinar, G., Stumberger, B., Grear, "Calculation of the Linear Induction Motor Model Parameters Using Finite Elements", IEEE Transactions on Magnetics, 34(5), pp 3640-3643, 1998.
- [14] C., Grantham, D., Seyoum, D., Indyk, D., Mckinnon, "Calculation of the Parameters and Parameter Variations of an Induction Motor and the Effect of Measurement Error"
- [15] E., J., Brown, C., Grantham, "Determination of The Parameters and Parameter Variations of a 3-Phase Induction Motor Having a Current Displacement Rotor", Proc. IEEE, 122, No.9, pp 919-921, 1975.
- [16] C., Grantham, H., Y., Tabatabaei, "Rapid Parameter Determination for use in the Control High Performance Induction Motor Drives", IEEE 1999 International Conference on Power Electronics and Drive Systems, PEDS'99, Hong Kong, pp 267-272, July 1999.