

# Bilgisayar Destekli Asenkron Motor Tasarımı

İlhan TARIMER  
Muğla Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi  
Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü  
48000 MUĞLA

## ÖZET

Bilgisayar destekli elektromekanik tasarım araçları modüllerinin (BDTAM) elektrik makinelerinin davranışlarını düzgün tahmin etmedeki kullanımı, makina tasarımcılarına tasarım performanslarını iyileştirmede üstünlükler sağlar. Bu makalede, bilgisayar destekli elektromekanik tasarım araçları modülü kullanılarak asenkron motor tasarımları yapılmıştır. 3-fazlı ve 1-fazlı asenkron motorlar analiz edilerek ağ örüntüsü, manyetik akı dağılımları ve performans eğrileri elde edilmiştir. Bu motorlara sürme devresi ekleyerek motor performansları incelenmiştir. 3-fazlı ve 1-fazlı asenkron motorların RMxpirt, EMSS ve EM<sub>pulse</sub> ile yapılan tasarımlarından elde edilen motor performansları karşılaştırılmıştır.

**Anahtar Kelimeler :** Bilgisayar destekli tasarım, elektromanyetik sistem simülasyonu, indüksiyon motoru, performans

# Computer Aided Design of Induction Motor

## ABSTRACT

A more accurate prediction of the behavior of electrical machines by using CAD modules allows to machine designers to optimize the higher performance for new designs. In this paper, using computer aided design toolset design and analysis of induction motor have been done. By analyzing of 1-phase and 3-phase induction motors, magnetic flux distributions, meshing and performance characteristics have been obtained. Adding drive circuits to the analyzed motors, the performance characteristics have been examined. 1-phase and 3-phase motor performances obtained from RMxpirt, EMSS and EM<sub>pulse</sub> designs have been compared.

**Keywords :** Computer aided design, electromagnetic system simulation, induction motor, performance

## 1. GİRİŞ

Elektrik motorları tasarlanırken bilgisayar destekli tasarım araçları modülüyle ayrıntılı elektromanyetik, elektromekanik ve ısı analizleri yapılmakta; öngörülen elektrik makinasının sanal prototipi oluşturulmaktadır. Değişik tip elektrik motorlarının üretimden önceki elektrik, manyetik, mekanik ve ısı değerleri tasarım programı çözümleriyle belirlenerek üreticilerin çok sayıda modeller arasında optimum seçimlerini yapmaları sağlanır. Elektrik makinası üreticileri, endüstrideki çoğu üreticiler gibi makina tasarımlarını optimum ve düşük maliyetli yaparak onları kısa sürede pazara sürme arzusunda (1, 9). Bu nedenle simülasyon yazılımları ile makina tasarım performansını tahmin etme yeteneği, üretici firmaların piyasalardaki üstünlüğünü arttırabilir.

Elektrik makina performansını tahmin etmede klasik kapalı form analizi, sonlu eleman analizinden çıkartılmış tanımlamaya bağlı kümelenendirilmiş parametre modelleri ve lineer-olmayan zaman-bazlı sonlu eleman analizi gibi çeşitli hesaplama ve sayısal simülasyon teknikleri vardır. Her yöntemin üstünlük ve sakıncaları bulunmakla birlikte doğruluk ve hesaplama zamanının kısalığı gibi ölçütler, elektrik makina analizinde performans simülasyonu için dikkate alınabilir (10).

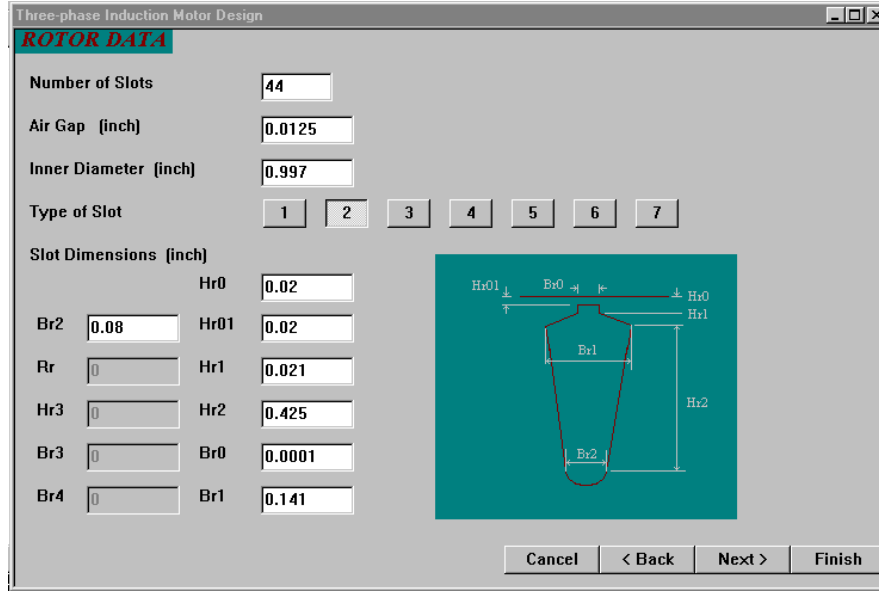
Zhou ve arkadaşları bir fazlı asenkron motoru, zaman bazlı EM<sub>pulse</sub>'de analiz etmişlerdir (11). Hwang ve Chang, elektrikli taşıtlar için yüksek verimli sabit miktatsız bir DA motorunu sonlu eleman alan analizi ile tasarlamışlardır (12). Chan ve Chau, elektrik makinelarının tasarımında görsel ve etkileşimli bir yaklaşımla elektromanyetik hesaplama ile görsel değerlendirilmeyi birleştirmişlerdir (13).

Bu makalede CAD yazılımlarından yararlanarak 1 fazlı ve 3 fazlı asenkron motor tasarımları yapılmıştır. Tasarım anında esneklik ve süreklilik elde etmek için ihtiyaç duyulan sayısal teknikler, teknik bilgiler şeklinde kullanılmıştır.

Motor tasarımları için RMxpirt bilgisayar destekli tasarım modülü (BDTAM) kullanılarak manyetik devre ile ilişkili klasik ve ampirik eşitlik parametrelerini, motor sac paket görünümünü, motor sargı yapısını ve motor eşdeğer devresi elde edilebilir. Bu program ile analiz edilen motorların olası tasarımlarından seçilenler, motor simülasyonu geçici rejimleri için lineer-olmayan, zamana-bağımlı sonlu eleman analizini kullanan EM<sub>pulse</sub> programı ile analiz edilir. Bu analizin sonuçları kararlı-durum sonlu eleman analizini kullanan sistem düzeyli EMSS programına aktarılır. EMSS

programı da doyum ve dış yüzey etkilerini kapsayan eşdeğer devre parametrelerini hesaplar. Bu eşdeğer

doğruluğu sağlanır ve hem de performans parametreleri iyileştirilir. Optimal motor tasarım değerlerini bulmada



Şekil 1. Rotor veri girişinin yapıldığı RMxprt program penceresi

devre modelleri, elektronik kontrol devreleri ve diğer sistem model etkilerini değerlendirerek sistem modellemesi yapar. Belirtilen bu ileri motor tasarım yazılımı, elektrik makinalarının bir çoğuna uygulanırsa da bu makalede, yalnızca asenkron motorların tasarımına bir örnek verilmiştir.

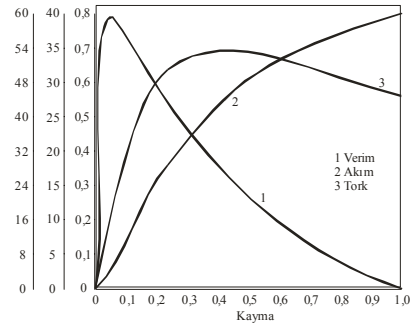
## 2. RMxprt, EMSS ve EMPulse MODÜLLERİ İLE ELEKTRİK MOTORU TASARIMI

### RMxprt İle Tasarım :

RMxprt tasarım programı, motorların işletim gerilimi, rotor – stator sac paket boyutları, sargı yapısı, malzeme yapısı, devir sayısı gibi temel parametrelerini girme olanağını verir. Şekil 1.'de bir asenkron motorun tasarımı için rotor verilerinin girildiği RMxprt program penceresi görülmektedir. Veriler girilerek program işletildiğinde RMxprt otomatik olarak bir motorun iki boyutlu geometrik modelini çıkarır ve manyetik devrelere bağlı kapalı form analitik metotları kullanarak motor performansını hesaplar. Program çıktıları; akım, tork, hız, akı yoğunluğu, giriş gücü, stator akımı, güç katsayısı, çıkış gücü ve verim değerleri ile dalga şekilleridir. Şekil 2.'de RMxprt ile tasarlanan asenkron motor için elde edilen performans eğrileri verilmiştir. Tasarım esnasında herhangi bir parametreyi değiştirmek mümkün olduğundan motor çıkış performansındaki olası değişimler izlenebilir. Böylece performans eğilimleri ortaya konularak hangi tasarım biçiminin, istenen özellikleri daha iyi karşılayacağı saptanabilir.

Tasarım sürerken yapılan parametre değişiklikleri, tasarım biçiminin türü ve performans tahmini için önemlidir. Bunun ardından sonlu eleman metodu RMxprt'nin ürettiği seçilmiş tasarım biçimine uygulanır. Böylece, hem performans tahminlerinin

RMxprt tasarımı, ilk adım olarak uygulanmış olup ardından sonlu eleman çözücüsü EMSS kullanılarak geliştirilen model iyileştirilmiştir.



Şekil 2. RMxprt'nin hesapladığı performans eğrileri.

### EMSS (Elektromekanik Sistem Simülâtörü) İle Tasarım :

EMSS, yüksek düzeyli toplu parametre modelleri ile sonlu eleman analizinin bileşimine dayalı bir hesaplamadır. Bu simülasyon tekniği, tasarımcıya motor performansını hesaplamada kontrol devreleri ile veya onlar olmadan performans tahmini yapabilme olanağını sağlar. Bu programda yapılan analizle, yüksek doğrulukta fakat daha kısa bir hesaplama zamanında eşdeğer devre parametreleri üretilir.

EMSS, motor performansını simüle etmek için parametrik sonlu eleman analizini kullanır. Brauer, sonlu eleman analizinin uzun zamandan beri düzgün elektromanyetik alanları hesaplamak için kullanıldığını bildirmiştir (2). EMSS'nin verileri analiz etme zamanı çok kısa olup AA relüktans motorlarını, senkron generatörleri, daimi mıknatıslı senkron motorları ve üç fazlı asenkron motorları da analiz edebilir (3, 4, 5).

Üç fazlı asenkron motorların tasarımında hem doyum hem de rotorda indüklenen akımların etkileri hesaba katılır. Motora uç geriliminin uygulandığı varsayımıyla stator akımları, faz başına eşdeğer devreden sonlu eleman alan hesaplamasına giriş olarak elde edilir. Faz sargısında indüklenen gerilim ve rotor çubuklarındaki toplam güç kaybı, alan çözümlerinin çıktılarında ve yüke bağlı parametrelerin güncellenmesi ve yenilenmesi için eşdeğer devreye giriş olarak verilir. EMSS bütün kayma frekansını kapsayacak şekilde aşağıdaki işlemleri yapar (6) :

- Adım 1 : Tasarımcı uç gerilimini ( $V_t$ ), frekansı ( $f_s$ ) ve stator sargısı kalkınma akımını ( $I_1$ ) RMxprt'den girer.
- Adım 2 : Kilitli rotor durumundan başlayarak (kayma=1) lineer olmayan sonlu eleman analizinden indüklenme gerilimini ( $E_1$ ) hesaplar.
- Adım 3 : Kirchhoff yasalarını kullanarak tahmin edilen uç gerilimini ( $V_e$ ) hesaplar.  $V_e$  ile  $V_t$  dengeleninceye kadar  $I_1$ 'i değiştirir.
- Adım 4 : Tüm elemanlardaki geçirgenliği dondurur ve kayma frekansının sıfır olması halinde lineer bir alan çözümünü hesaplar.
- Adım 5 : Lineer sonlu eleman çözümünden mıknatıslama reaktansını ( $X_m$ ) hesaplar.
- Adım 6 : Bu özel kayma frekansında tüm eşdeğer devre parametrelerini hesaplar.
- Adım 7 : Bir sonraki kayma frekansında stator akımının başlangıç tahminini yaparak 2 ile 7. adımları tekrarlar. Kayma frekansı da kilitli rotor halinden senkron hıza kadar değişir.
- Adım 8 : Herhangi bir kayma değerinde motorun mıknatıslama akımı, stator akımı, tork, giriş gücü, güç katsayısı ve verimden oluşan performans eğrilerini çizdirir.

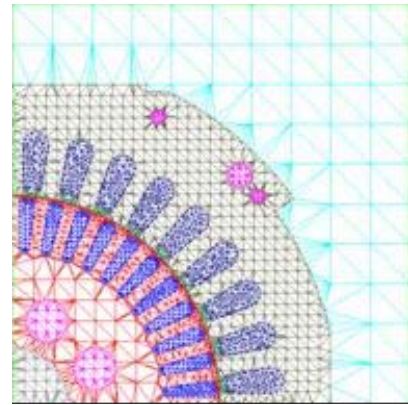
Üç boyutlu etkileri de kapsamı için yukarıdaki adımlardan elde edilen rotor parametreleri, performans değerlendirmelerinden önce uçlardaki bileziklerin reaktans ve direncini kapsayacak şekilde değiştirilir. Bilezik, rotor nüvesinin dışında yerleşik olduğundan rotor parametrelerine olan katkısı, yüke bağlı değildir. Rotordaki çarpıklık, klasik vida katsayısı kullanılarak modele eklenir.

Yukarıdaki işlem adımlarından, alan bağımlı dinamik parametrelerin elde edilebilirliği, motor performans tahminini doğru yapmak için çalışma zemini sağlar. Tork, değişik akım bileşenleri, güç katsayısı ve verim gibi kararlı durum performans eğrilerinin tümü, faz başına eşdeğer devreye benzer analize bağımlı herhangi bir çalışma durumunda hazır olarak elde edilir. Nüve kaybı, sürtünme ve rüzgar kayıp miktarları, motorun performansında dikkate değer bir etki bırakacaktır.

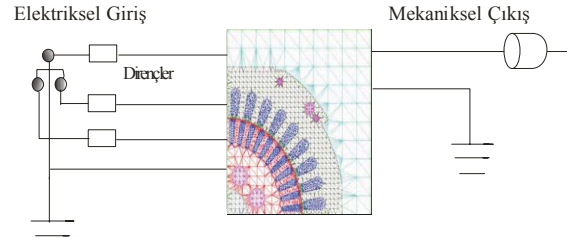
RMxprt, sonlu eleman geometrisini ve EMSS için gerekli bilgiyi sağladığından analizin yapılması

kolaylaşır, çözüm hızlanır. EMSS, en küçük – en büyük ve anma tork değerlerini bilmek şartıyla sonlu eleman destekli geçici rejim performans parametrelerini ve  $d-q$  eşdeğer devre modelini üretir. Bu modele sürme devresi eklenerek ve sürme sistem konfigürasyonları değiştirilerek sürme sisteminin performansı artırılabilir (15, 16).

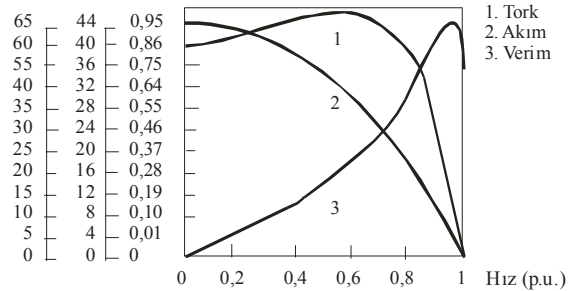
Şekil 3'de EMSS ile analiz edilen 3 HP, 380 V, 4 kutuplu 50 Hz, 3 fazlı bir asenkron motorun ağ örüntüsü (üçgen elemanlar) görülmektedir. Bu motorun rotoru 44 çubuklu ve statoru 36 olukludur. Şekil 4'de, elde edilen bu ağ yapısına EMSS'de sürme devresinin eklenmesi görülmektedir. Şekil 5'de ise bu motor için EMSS'nin ürettiği performans eğrileri verilmiştir.



Şekil 3. EMSS tarafından üretilen ağ örüntüsü (üçgen elemanlar)



Şekil 4. EMSS'deki şematik görünümü



Şekil 5. EMSS'nin geliştirdiği performans eğrileri

#### EM<sub>pulse</sub> İle Tasarım :

Elektrik makina performanslarını simüle etmede güvenilir ve doğru başka bir metot, zaman bazlı modellemeyi kullanmaktır. Bu çözüm metodunda lineer olmayan zaman-bağımlı sonlu eleman analizi, kombine elektrik devresi – manyetik alan – hareket problemini

çözmede kullanılır. Motorun analizi sonunda olası doyum, eddy akımları, oluklar, rotor hareket etkileri, zaman ve alan sorunları doğrulukla giderilir.

$EM_{pulse}$  lineer olmayan, zaman-bağımlı sonlu eleman analizini devre uyarıtımı, yükler ve rotor hareketi ile birleştirir. Bu program, fırçasız DA motorları, üniversal motorlar, bir fazlı ve üç fazlı asenkron motorlar, anahtarlamalı relüktans motorlar, daimi mıknatıslı senkron motorlar ve generatörleri analiz edebilir (7, 8). RMxprt ile üretilen model, hem EMSS hem de  $EM_{pulse}$  tarafından kullanılır ve analiz edilebilir.

Programın içinde bir modül olan Maxwell zaman bazlı çözücüsü,  $EM_{pulse}$ 'den girilen elektriksel giriş değerlerini kullanarak elektromanyetik alan eşitliklerini elde eder. Elde ettiği eşitlikleri de aşağıda verilen elektromekanik eşitlikle birleştirir.

$$T_{em} + T_{uyg} = J_{mek} \times \frac{d\omega}{dt} + \lambda\omega$$

Burada ;

$T_{em}$  : Elektromanyetik tork,

$T_{uyg}$  : Uygulanan mekaniksel tork,

$J_{mek}$  : Mekaniksel atalet momenti,

$\lambda$  : Sürtünme ve rüzgar katsayısı,

$\omega$  : Mekaniksel hızdır.

AA giriş geriliminin her periyodu boyunca zaman geçmekte ve bu süre içinde analiz sürdürülmektedir.  $EM_{pulse}$  rotor hareketini hesaplamada etkili bir teknik kullandığından, simülasyonun herhangi bir anında modelin akı dağılımını yeniden çıkartmaya gerek duymaz ve değişik rotor hız değerlerini girerek sürekli analiz yaptırır.  $EM_{pulse}$ 'e zaman fonksiyonları veya sabitler şeklindeki parametreler girilir. Bu fonksiyonlar cebirsel ve trigonometrik türden olup kapasiteler ve herhangi bir yük torkuna ait çalışma durumlarını modellerken tasarımcıya esneklik verir ve destekler. Bu program fırçalı tip motorlarda dinamik sargı konfigürasyonları komütasyonunu da modelleyebilir.

Analizi yapılan motor 3 HP, 2 kutuplu, 1 fazlı, çift kondansatörlü ve yardımcı sargılıdır. Şekil 6'da anılan motorun akı dağılımı verilmiştir. Şekil 7, 0 d/d ile 3600 d/d arasındaki değerlerde yükün zamana bağlı olarak hız grafiğini, Şekil 8 ise zamanın bir fonksiyonu olarak tork – hız grafiğini göstermektedir. Şekil 7'den anılan motorun 0,1 s sonra hızının sabit olacağı ve Şekil 8'den bu motorun 150 rad/s hızda, yük torkunun 2 Nm olacağı görülür.

Şekil 9 ve Şekil 10'da üç fazlı asenkron motorun RMxprt, EMSS ve  $EM_{pulse}$  ile elde edilen akım – hız ve tork – hız grafiği ve Tablo 1'de bu motor için üretici firma tork değeri (14) ile programdan hesaplanan tork

değerleri, Tablo 2'de üretici firma akım değeri (14) ile programdan hesaplanan akım değerleri verilmiştir.

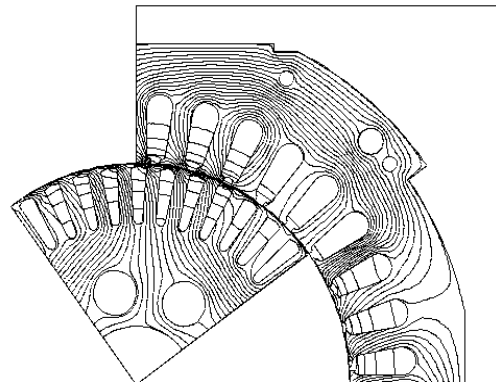
Tablo 1. 3 fazlı motorun tork değerleri

Üretici Firma Tork (Nm)	Hesaplanan Tork (Nm)	Hız Değerleri (p.u.)
50	50	0
52	52	0,1
53	55	0,2
54	58	0,3
56	62	0,4
58	65	0,5
57	61	0,6
55	58	0,7
48	51	0,8

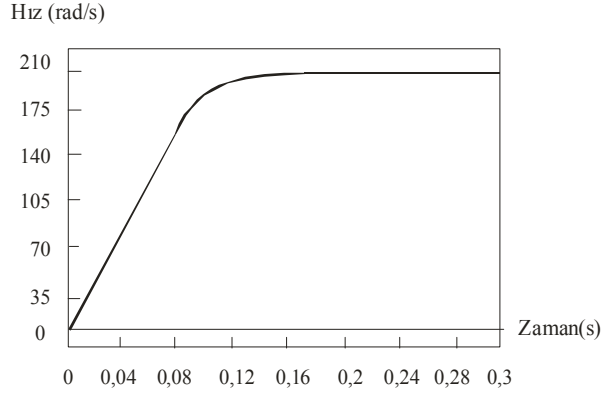
Tablo 2. 3 fazlı motorun akım değerleri

Üretici Firma Akım (A)	Hesaplanan Akım (Nm)	Hız Değerleri (p.u.)
0	0	0
4	4,3	0,1
3,8	4,2	0,2
3,6	4	0,3
3,5	3,9	0,4
3,3	3,8	0,5
3	3,3	0,6
2	2,3	0,7
1,3	0,8	0,8

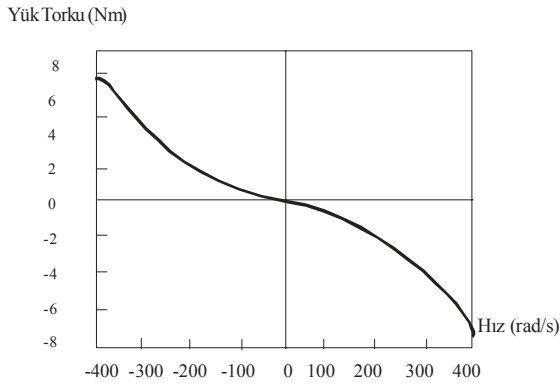
Tablo 1'den 0 d/d ve 1445 d/d hızlarda hesaplanmış ortalama tork değerleri sırasıyla 5 ve 6,5 Nm'dir. Üretici tork değerleri de sırasıyla 5 ve 5,8 Nm'dir. Tablo 2'den aynı devir sayılarındaki hesaplanmış ana sargı akımları sırasıyla 0 ve 3,3'dür. Üretici firma akım değerleri sırasıyla 0 ve 3,8 A'dir. Tablo 1 ve 2'den, tasarlanan 3 fazlı asenkron motorun performans tahmini hesabında doğruluk oranının  $\frac{3,3 \times 100}{3,8} = 86,84$  (% 87) olduğu görülür.



Şekil 6. Bir fazlı asenkron motorun manyetik akı dağılımı

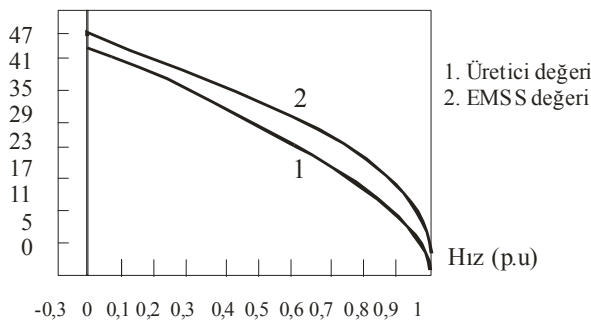


Şekil 7. Hız - zaman grafiği

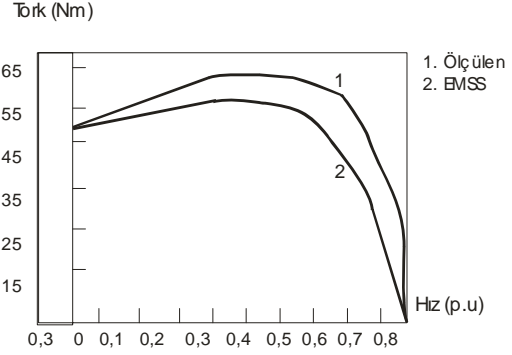


Şekil 8. Tork - zaman grafiği

Stator Hat Akımı



Şekil 9. 3 fazlı asenkron motorun RMxpirt, EMSS ve EM\_pulse'den alınan akım - hız grafiği



Şekil 10. 3 fazlı asenkron motorun RMxpirt, EMSS ve EM\_pulse'den alınan tork - hız grafiği

### 3. SONUÇ

Bu makalede BDTAM ile sanal asenkron motor prototipleri oluşturulmuş ve bunların analizleri yapılmıştır. Analizler, motor performans tahminlerini ortaya koyarak doğruluk testinin yapılmasına imkan vermiştir. Bir fazlı ve üç fazlı bir asenkron motor RMxpirt, EMSS ve EM\_pulse ile analiz edilerek akı dağılımları, hız - zaman grafiği, tork - zaman grafiği, akım - hız grafiği ve tork - hız grafikleri elde edilmiştir. Üretici firma akım değerleri ve tork değerleri, analiz sonucu alınan değerler ile karşılaştırıldığında tasarlanan 3 fazlı asenkron motorun performansı % 87 oranında doğru tahmin edilmiştir.

Bu çalışmada her ne kadar asenkron motor analizleri yapılmış olsa da kullanılan yazılımla daimi mıknatıslı senkron motorlar, DA fırçalı tip motorlar, DA daimi mıknatıslı motorlar, üniversal motorlar ve senkron generatörler gibi elektrik makinalarının bir çok tipleri de analiz edilebilir. Böylece tasarımcının hem çok yönlü ve çeşitli tasarımları yapabilmesi hem de üretim maliyetlerini azaltarak elektrik makinaları pazarında ekonomik kazançlar elde edebilmesi mümkündür.

### 4. KAYNAKLAR

1. Gürdal O., "Elektrik Makinalarının Tasarımı", Nobel Yayın Dağıtım, Ankara, 2001, s. 97-158.
2. Brauer J. R., "Finite element software aids motor design," Small Motor Manufacturing Association Annual Meeting, Zephyr Hills, FL, 1985, s. 74-100.
3. Ansoft application notes on: "Induction motor simulation,"
4. "Permanent magnet synchronous motor simulation," "Synchronous generator simulation," "Reluctance motor simulation," available from Ansoft Corporation, 4 Station Square, Suite 660, Pittsburgh, PA 15219, USA, 2002.
5. Ebben R. N., Brauer J. R., Lizalek G. C., and Cendes Z. J., "Performance curves of a series DC motor predicted using parametric finite element analysis," IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, Tucson, AZ, 1998, s. 1294-1297.

6. Ebben R. N., Brauer J. R., Cendes Z. J., and Demerdash N. A., "Prediction of performance parameters of a universal motor using parametric finite element analysis," submitted to IEEE IEMDC, 1999, Technical Sessions.
7. Zhou P., Gilmore J., Badics Z., and Cendes Z., "Finite element analysis of induction motors based on computing detailed equivalent circuit parameters, " IEEE Trans. Magnetics, Sept. 1998, pp. 3499-3502
8. Zhou P., Stanton S., and Cendes Z., "Dynamic modeling of electric machines," Naval Electric Machines Conference, 1998, s. 65.
9. Zhou P., Brauer J., Stanton S., Cendes Z., and Ebben R., "Dynamic modeling of universal motors," submitted to IEEE IEMDC, 1999, s. 522-528.
9. Pichler P., Ebner P., Weiss H., "Comparison Of Analytical And FEA Calculation Software As A Tool For Designing A High Efficient Induction Machine", Department of Electrical Engineering, University of Leoben, Franz-Josef-Straße 18 A-8700 Leoben, Austria, 20/05/2003.
10. Ebner P., Pichler P., Weiss H., "Simulation of an Inverter fed Induction Machine in a scalable Traction Drive", EPE - PEMC proceedings Vol.7, Kosice, 2000, s. 103.
11. Zhou P., Stanton S., and Cendes Z., "Dynamic modeling of three phase and single phase induction motors," submitted to IEEE IEMDC, 1999, s. 11.
12. Hwang C.C., Chang J.J., "Design and analysis of a high power density and high efficiency permanent magnet DC motor", Journal of Magnetism and Magnetic Materials 209 (234 – 236), 2000.
13. Chan C. C., Chau K. T., "Design of electrical machines by the finite element method using distributed computing", Computers in Industry Elsevier Volume 17, Issue 4, Pages 317-432 (December 1991).
14. Siemens Low Voltage Motors, Catalog M11 – 2000, Order Nr. : E86060 - K1711 - A101 - A1 - 7600, [www.siemens.de](http://www.siemens.de), Siemens AG 2000.
15. F.Weizhongang, Uwe K., Stanton S., Lin D., "A Complete Solution for Electromechanical System Design" Ansoft Corporation, China and USA, Ansoft Related Articles, [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com), December 2002.
16. Product Review SIMPLORER® 6.0, Ansoft Corporation [www.ansoft.com](http://www.ansoft.com), USA, November 2002.