

# HELİSEL YAPILI ANAHTARLAMALI RELÜKTANS MOTORUN (HY-ARM) BİLGİSAYAR DESTEKLİ 3 BOYUTLU STATİK MANYETİK ANALİZİ

**Osman GÜRDAL ve Ahmet FENERCİOĞLU**

Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniv., Teknikokullar, 06500, Ankara  
Teknik Programlar-Elektrik Bölümü, Turhal MYO, Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Tokat  
[ogurdal@gazi.edu.tr](mailto:ogurdal@gazi.edu.tr), [af@gop.edu.tr](mailto:af@gop.edu.tr)

(Geliş/Received:06.03.2006; Kabul/Accepted:13.11.2006)

## ÖZET

Bu çalışmada, geleneksel Anahtarlama Relüktans Motorunun (ARM) rotor ve statorunun ikisine birden helisel yapı (HY) verilmiştir. Burada rotorun kendisi bir doğrudan tahrik uygulamasında eyleyici görevi yapmaktadır. HY-ARM'nin analitik ve sonlu elemanlar metodu (Ansoft Maxwell 3D) ile tahmin edilen tasarımından elde edilen indüktans, verim, rotor üzerine etkiyen kuvvetler, statoru ovalleştirici kuvvetler ve üretilen torklar gibi elektriksel ve manyetik büyüklükleri aynı ölçüdeki rotor ve statoru düz geleneksel ARM ile karşılaştırılmıştır. Düz ARM için geliştirilmiş geleneksel bazı eşitlikler helisel dikkate alınarak yeniden düzenlenmiştir. HY-ARM'de akustik gürültüye neden olan statoru ovalleştirici kuvvetler bir avantaj olarak azalırken, helisel yapının verimi bir sakınca olarak düşmektedir. Örneğin, 15 A'lık faz uyarımında statoru ovalleştirmeye çalışan ve akustik gürültüye neden olan kuvvetin genliği,  $F_x$  düz ARM'de 4017 N iken  $\beta_h = 45^\circ$  'lik HY-ARM'de 3647 N değerine düşmüş ve ayrıca 2 kW'lık bir düz ARM'nin verimi %94 iken  $\beta_h = 45^\circ$  'lik bir HY-ARM'de verim %88'e düşmüştür. Rotorun kendisinin özellikle bir eyleyici olduğu doğrudan tahrik uygulamasında (tasarım üzerinde AR-GE çalışmaları devam ederken) HY-ARM ayrıca bir sürücü motorun, kaplinlerin ve devir ayarlama elemanlarının kullanılmaması üstünlüğü ile cazip bir seçim olarak gözükmektedir.

**Anahtar kelimeler:** ARM, helisel yapı ARM, çarpıtma, doğrudan tahrik.

## COMPUTER AIDED THREE DIMENSIONAL MAGNETOSTATIC ANALYSIS OF HELICALLY STRUCTURED SWITCHED RELUCTANCE MOTOR (HS-SRM)

### ABSTRACT

In this study, both rotor and stator of traditional Switched Reluctance Motor (SRM) have been helically structured (HS). Here, the rotor itself is the actuator of a direct drive application. Electrical and magnetic quantities like inductance, efficiency, forces acting on the rotor, ovalising forces acting on the stator and generated torques of the HS-SRM obtained from analytical and predicted by finite element method (Ansoft Maxwell 3D) have been compared to the traditional straight rotor and stator SRM with same size. The traditional equations developed for the straight SRM have been modified by considering the helicity. While the ovalising forces causing acoustic noise in HS-SRM have been reduced as an advantage, the efficiency of the helical structure has been reduced as a disadvantage. For example, the magnitude of the force,  $F_x$  tending to ovalise the stator and causing noise has reduced from 4017 N for straight SRM to 3647 N for  $\beta_h = 45^\circ$  HS-SRM with 15 A phase excitation and also 2 kW straight SRM has 94% efficiency, while the HS-SRM with  $\beta_h = 45^\circ$  has a reduced efficiency of 88%. Where the rotor itself is considered as a direct drive actuator application (while R-D works on the design are being carried on), HS-SRM looks an attractive choice with a superiority of eliminating a separate driver motor, couplings and gear boxes.

**Keywords:** SRM, helically structured SRM, skewing, direct drive.

## 1. GİRİŞ

Orijini 1824 [1] yılına dayanan anahtarlamalı relüktans motor (ARM) ilk olarak 1838 yılında İskoçya'da Davidson tarafından bir lokomotifin tahrikinde kullanılmıştır [2]. 1972 yılında patenti [3] alınmış olmasına rağmen araştırma ve geliştirme ortamına 1980 yılından sonra girmiş ve günümüzde indüksiyon motorları kadar yoğun olmasa da ticari alanda gittikçe artan uygulamalar bulmaktadır. Ticari ortamda yavaş yer almasının nedeni; motorun karşılıklı stator kutuplarının oluşturduğu radyal kuvvetlerin meydana getirdiği ovalleştirme etkisi sonucu doğal gürültüsü-titreşimi [4-7] ve bir sürücü devresi ile çoğu durumlarda bir rotor konumu algılayıcısı kullanıma zorunluluğundan kaynaklanmaktadır [2]. Mevcut durumda, güç elektroniği alanındaki gelişmeler ile ekonomik motor sürme devreleri geliştirilmekte [8] ve gürültü azaltıcı tekniklerin sürme devrelerine [9] ve motorun tasarımına uygulanması [10] ile motorun kullanımı gittikçe yaygınlaşmaktadır. Bu çalışmaların tamamında rotorun örtüşen konumda kilitlenmesini engelleyecek ve torktaki dalgalılığı az miktarda azaltmaya yönelik, rotordaki bir kaç derecelik çarpıklık dışında stator ve rotor mil eksenine paralel yani düz olarak yapılmaktadır [11-12]. Rotor ve statorun ikisinin birden belirli bir açıya kadar çarpık yapıldığı bir uygulama henüz literatüre girmemiş ve sadece patenti alınmış bir fikirde [13] böyle bir uygulamanın radyal kuvvetleri ve dolayısıyla statoru ovalleştirici kuvvetleri azaltarak gürültüyü azaltabileceği ve ayrıca rotorun kendisinin bir eyleyici [14] olarak kullanılabilmesi önerilmiştir. Patenti alınan fikirlerden habersiz olarak başlıca yazarın 1998 yılında başlattığı bu çalışmada, rotor ve stator uygulama yerinin özelliğinden dolayı, özellikle belirli bir çarpıklık açısında yapılmıştır. Helisel (veya vida) yapılı ARM (HY-ARM) olarak adlandırılan bu tasarımın detayları sonraki bölümde verilmiştir. Bu tasarımda amaç rotor ve statorun ikisinin birden çarpık olduğu durumun incelenmesinin yanında rotorun kendisinin eyleyici olduğu bir doğrudan tahrik eyleyicisinin tamamının tasarlanmasıdır. HY-ARM üzerinde ticari uygulamalı AR-GE çalışmaları devam ettiğinden çalışmanın kullanım yeri özellikle belirtilmemiş ve sadece böyle bir tasarıma uyan ARM'nin analitik ve Ansoft Maxwell 3D [15] ile bilgisayar destekli simülasyonlarla tahmin edilen tasarımından elde edilen indüktansı, verimi, ovalleştirici kuvvetleri ve üretilen torkları gibi elektriksel ve manyetik büyüklükleri üzerinde yorumlar yoğunlaştırılmış ve sonuçlar aynı ölçüdeki rotor ve statoru düz ARM ile karşılaştırılmıştır.

## 2. HY-ARM'İN YAPISI

Bilinen anahtarlamalı relüktans motorunun mil eksenine paralel (düz) stator ve rotoru aynı açı değeriyle çarpıtılarak helisel bir yapı verilmiştir. Rotor kilitlenmesini engellemek için genellikle rotor kutup yayı stator kutup yayından birkaç derece büyük

yapılır. Çalışma prensibi temelde aynı kalmasına rağmen bu yapı düz ARM'ye göre HY-ARM'nin karakteristiklerini değiştirmiştir. Uygulama yerinin özelliğine göre, karakteristikleri tahmin edilmeye çalışılan 6/4 düz ve HY-ARM'nin rotor ve statorunun 0-45° helisel tur açılarında ( $\beta_h$ ) örtüşen ve örtüşmeyen konumlarına ait görüntüleri ve boyut değişkenleri şekil 1'de verilmiştir. Yapılan tasarımlarda rotor ve statora  $\beta_h$ 'nin 0°-9°-18°-28,8°-36°-45° değerlerinde helisel yapılar kazandırılmıştır. Çizelge 1'de uygulaması yapılan ARM'nin boyutları verilmiştir.

**Çizelge 1.** 3 boyutlu statik manyetik analizi ve simülasyonu yapılan düz ARM modelinin boyutları.

Mil yarı çapı, $R_{sh}$	0,0150 m
Rotor iç yarı çapı, $R_{ri}$	0,0300 m
Rotor dış yarı çapı, $R_{ro}$	0,0400 m
Stator kutup yarı çapı, $R_s$	0,0405 m
Stator iç yarı çapı, $R_{si}$	0,0600 m
Stator uzunluğu, $L_{stk}$	0,1500 m
Stator dış yarı çapı, $R_{so}$	0,0750 m
Hava aralığı, $g$	0,0005 m
Stator kutup yayı, $\beta_s$	0,5233 rad
Rotor kutup yayı, $\beta_r$	0,5582 rad

### 2.1. Helisel tur ve çarpıklık açıları

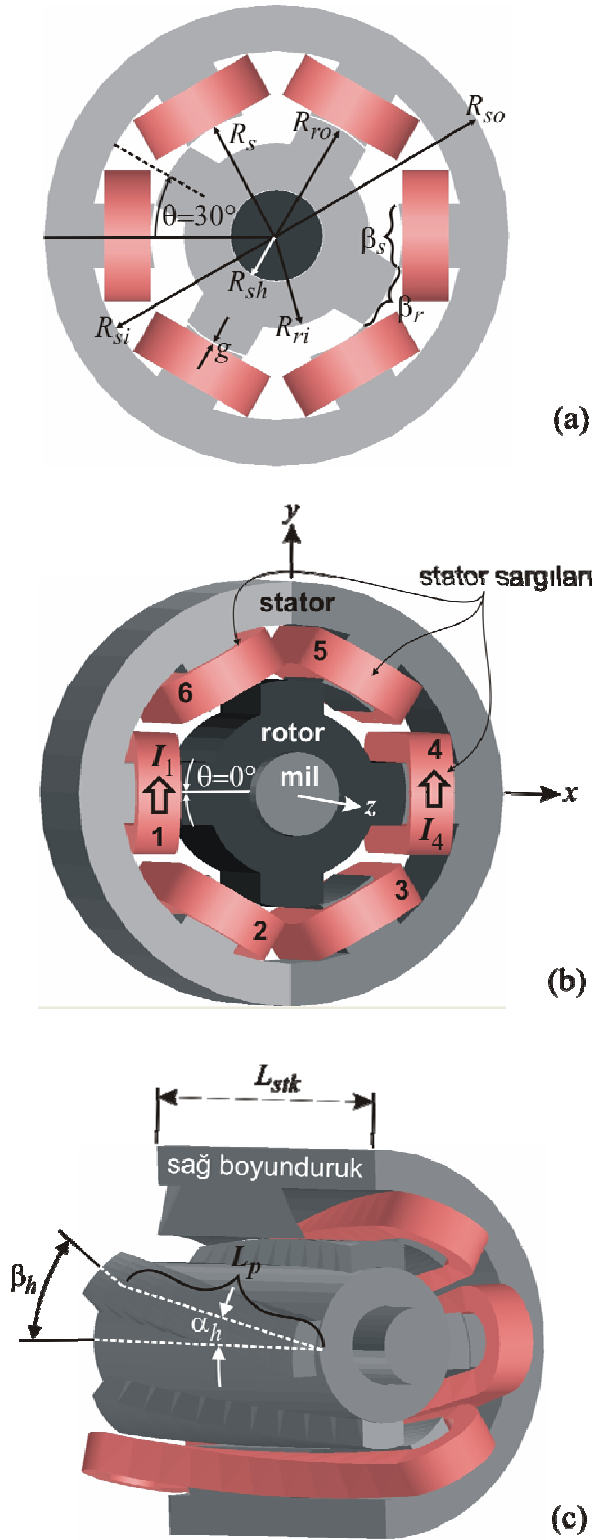
Düz ARM'ye helisel yapı verilmesiyle yeni geometrik büyüklükler ortaya çıkmıştır [16]. Rotor ve statorun helisel yapıyı oluşturmak için yapmış olduğu tur sayısı açısal olarak helisel tur açısı,  $\beta_h$  ile ifade edilir ve bu açı rotor ve stator boyutlarına göre değişmez. Başka bir ifade ile  $\beta_h = 45^\circ$  olan bir HY-ARM'de rotor ve stator helisel yapıyı oluştururken bir uçta sabitlenmiş olarak diğer uçta ( $45^\circ/360^\circ =$ ) 1/8 tur döner. Çarpıklık açısı ( $\alpha_h$ ) ise çarpık rotor veya stator kutup ekseninin mil eksenine ile yapmış olduğu açıdır ve (1) eşitliğine göre,  $L$ ,  $R_r$  ve  $\beta_h$ 'ya göre değişir (Şekil 1c).

$$\alpha_h = \tan^{-1} \left( \frac{\pi \beta_h R_{ro}}{180 L_{stk}} \right) \quad (1)$$

Rotor ve statorun çarpık yapılmasından dolayı aksel rotor boyuna ( $L_{stk}$ ) göre kutup boyu ( $L_p$ ) uzamaktadır.  $\alpha_h$  büyüdükçe kutup boyu ile beraber stator sargı boyu ve iletken boyu da aynı oranda uzamaktadır. Analizlerde dikkate alınan modellerin  $\beta_h$ 'ya göre  $\alpha_h$  değerleri ve uzamış kutup boyları ( $L_p$ ) Çizelge 2'de verilmiştir.

**Çizelge 2.**  $\beta_h$  ve  $\alpha_h$  ile bunlara karşılık gelen uzamış kutup boyları,  $L_p$

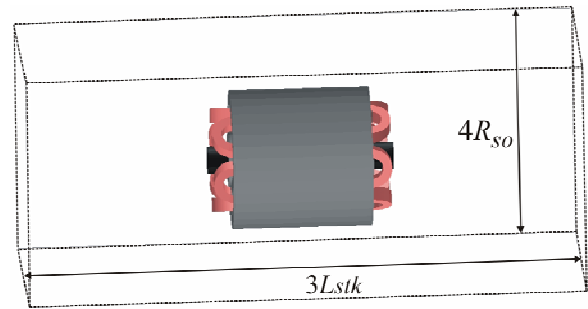
Sıra	$\beta_h$ °	$\alpha_h$ °	$L_p$ (m)
1	00,00	00,00	0,15000
2	09,00	02,40	0,15013
3	18,00	04,79	0,15053
4	28,80	07,63	0,15134
5	36,00	09,51	0,15209
6	45,00	11,82	0,15325



**Şekil 1.** (a) Örtüşmeyen konumda 6/4 düz ARM'nin tasarım boyutlarının parametreleri, (b) örtüşen konumdaki ARM'nin sargı, akım ve koordinat düzlemi ilişkileri ile 3 boyutlu görüntüsü ve (c) rotoru ve statoru  $\beta_h = 45^\circ$  ile ARM'nin sol stator boyunduruğu alınmış ve helisel yapı sonucu yeni parametreleri ( $\beta_h$ ,  $\alpha_h$  ve  $L_p$ ) ile örtüşen konumda 3 boyutlu görüntüsü.

### 3. HY-ARM'İN ANALİTİK VE NÜMERİK HESAPLAMALARI

HY-ARM'nin düz ARM'den tek farkı helisel yapı kazandırılmış olmasıdır ve düz ARM için geçerli indüktans, kuvvet ve tork gibi elektriksel ve manyetik büyüklükler için geliştirilmiş eşitliklerin [1,2,8] modifikasyonu gerekmiştir. Rotorun dönüşü süresince konuma bağlı büyüklüklerin belirlenmesi için helisel yapıdan dolayı iki boyut yerine üç boyutlu manyetik alan analizi kullanılmıştır. Ansoft Maxwell 3D ile üç boyutlu manyetik simülasyonlar yapılmış ve buradan alınan sonuçlar düz ARM'ye ait analitik ve (sargı uc etkilerinin de dikkate alındığı) 3D simülasyon ile elde edilen büyüklükler ile karşılaştırılmıştır. 3 boyutlu simülasyon ile sadece 1. ve 4. sargılara (Şekil 1) uygun akımlar verilerek Şekil 2'de görüldüğü gibi stator dış çapının 2 katı ve stator paket uzunluğunun 3 katı büyüklüğünde bir bölgenin en dış kenar yüzeylerine Dirichlet sınır koşulu atanmıştır [17-18]. Yaklaşık %1'lik bir çözüm hassasiyetinde, bölge içindeki sonlu elemanların [19] sayısı ortalama 250000'e karşılık gelmektedir. Sargılara uygulanan bir akım değerinde,  $\beta_h$  ve rotor konumunun ( $\theta$ )  $0-45^\circ$  arası  $5^\circ$ 'er derecelik konumlarına karşılık gelen ve herbiri P4 işlemcili bir bilgisayarla, ortalama 660 dakika süren en az 60 adet simülasyon yapılmıştır. Modelde, rotor ve stator için kullanılan manyetik malzemenin  $BH$  eğrisi Şekil 3'te verilmiştir. Analitik hesaplamalarda manyetik malzemenin bağıl manyetik geçirgenliği ( $\mu_r$ ) sabit alınmıştır. Rotorun  $\beta_h = 45^\circ$  ve  $\theta = 0^\circ$  konumunda, 15 A'lik faz akımında rotor ve stator nüvesindeki manyetik akı yoğunluğu dağılımı Şekil 4'te görülmektedir.



#### Dirichlet sınır koşulu

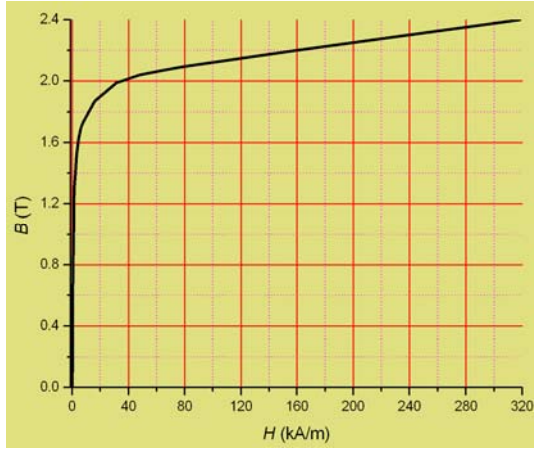
**Şekil 2.** HY-ARM'nin alan çözümü için Dirichlet sınır koşulu.

#### 3.1. HY-ARM indüktansı

3D simülasyon ile düz ve HY-ARM nin örtüşen, örtüşmeyen ve ara konumlarına karşılık gelen indüktans değerleri, bütün sargıların enerjili olduğu varsayımı ile aşağıdaki eşitlikte verilmiştir:

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ L_3 \\ L_4 \\ L_5 \\ L_6 \end{bmatrix} = T_p^2 \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & L_{13} & L_{14} & L_{15} & L_{16} \\ L_{21} & L_{22} & L_{23} & L_{24} & L_{25} & L_{26} \\ L_{31} & L_{32} & L_{33} & L_{34} & L_{35} & L_{36} \\ L_{41} & L_{42} & L_{43} & L_{44} & L_{45} & L_{46} \\ L_{51} & L_{52} & L_{53} & L_{54} & L_{55} & L_{56} \\ L_{61} & L_{62} & L_{63} & L_{64} & L_{65} & L_{66} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Matrisin  $L_{11}, L_{22}, \dots$  gibi çapraz elemanları sargıların öz indüktanslarını, diğer elemanlar ise sargıların birbirlerine olan karşılıklı indüktanslarını vermektedir. Bir faz indüktansının ( $L_{f1} = L_1 + L_4$ ) bulunması için matris elemanları sarım sayısının karesi,  $T_p^2$  ile çarpılarak uyarılmış olan karşılıklı iki sargının ( $L_1$  ve  $L_4$ ) öz indüktansları ( $L_{11}$  ve  $L_{44}$ ) ve bu iki sargının birbirlerine olan karşılıklı indüktansları ( $L_{14}$  ve  $L_{41}$ ) toplanır. Üzerinde çalışılan modelde  $T_p = 50$  ve sargı iletken kesiti  $2 \text{ mm}^2$  'dir.



Şekil 3. Rotor ve stator nüvesi olarak kullanılan malzemenin (steel 1010) BH eğrisi.

HY-ARM'de akı yolu ve sargı boyu  $\beta_h$ 'ye göre uzamakta ve düz ARM'nin analitik yolla hesaplanan faz indüktansı,  $L_{f1}$  ile HY-ARM'nin faz indüktansı,  $L_{f1h}$  arasında aşağıdaki gibi yarı analitik (3 boyutlu simülasyon sonuçlarından yararlanarak)

$$L_{f1h}(\theta) = \frac{L_p}{L_{stk}} L_{f1}(\theta) = \frac{L_{f1}(\theta)}{\cos \alpha_h} \quad (3)$$

eşitliği geliştirilmiştir. Eşitliğe göre HY-ARM'nin indüktansı düz ARM'ye göre artış göstermektedir. Düz ARM'nin ara rotor konumlarındaki faz indüktanslarını bulmak için örtüşen konumdaki maksimum ( $L_a$ ) ve örtüşmeyen konumdaki minimum indüktans ( $L_u$ ) değerleri kullanılarak yarı analitik metotla

$$L_{f1}(\theta) = \frac{(L_a + L_u)}{2} + \frac{(L_a - L_u)}{2} \cos(P_r \theta) \quad (4)$$

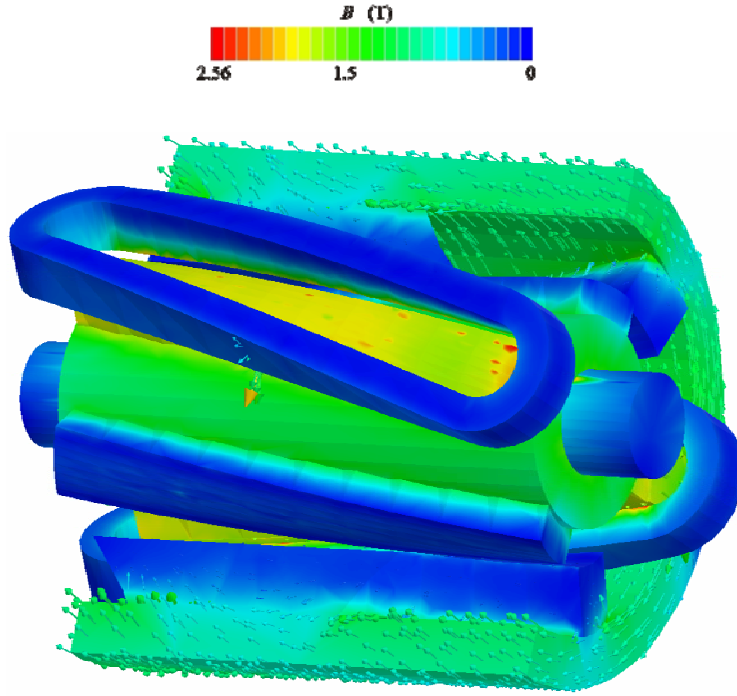
eşitliği geliştirilmiştir [16]. Burada,  $P_r$  rotor kutup sayısıdır. Rotor ve stator kutup yüzeylerinin çakışmasının gittikçe azaldığı örtüşmeyen konumlarda, indüktans değişimi örtüşen konumlardaki kadar hızlı değişim göstermediğinden kosinüse bağlı bu eşitlikler rotorun konumunun  $0^\circ$ - $30^\circ$  arası için geçerlidir.  $\theta$ 'nin bu konumları aynı zamanda motorun bir fazının normal çalışma bölgesini tanımlamakta ve  $30^\circ$  'den sonra 1. fazın enerjisinin kesilip diğer fazın enerjilendirilmesi gerekmekte fakat analiz amaçları için bu açı  $45^\circ$  'ye kadar çıkartılmıştır.

Rotor konumuna bağlı olarak,  $-30 \leq \theta \leq 30^\circ$  ve  $0 \leq \beta_h \leq 45^\circ$  için düz ( $\beta_h = 0^\circ$ ) ve HY-ARM ( $\beta_h \leq 45^\circ$ ) indüktanslarının yarı analitik ve 3 boyutlu simülasyon çözümleri  $10 \text{ A}$ 'lik uyarım altında şekil 5'te verilmiştir. Burada rotorun  $0^\circ$  konumu örtüşen konumdur ve  $-30^\circ$  ve  $30^\circ$  konumları örtüşmenin başlangıç ve bitiş konumlarıdır. ARM rotorunun  $-30^\circ$  ile  $0^\circ$  arası motor çalışma durumu ve  $0^\circ$  ile  $30^\circ$  arası generatör çalışma bölgesidir. Düz ARM'ye helisel yapı verildikçe, yani  $\beta_h$  artırıldıkça kutup ve sargı boyu uzadığı için halka akısının artması nedeniyle faz indüktanslarının artışı şekilde açıkça görülmektedir. Şekildeki grafik sabit  $10 \text{ A}$ 'lik faz uyarımında elde edilmiş ve manyetik nüvenin bazı kısımları, kullanılan malzemenin BH karakteristiğine bağlı olarak doyuma gitmekte yani manyetik geçirgenlik ( $\mu_r$ ) azaldığından indüktans azalmaktadır. Bu durum, aynı zamanda analitik ve simülasyon sonuçları arasındaki farkın nedenini açıklarken, HY-ARM'nin  $\mu_r$ 'nin sabit değerleri ile hesaplanmış analitik indüktans hesabı yerine gerçek indüktansının bulunması için bir nümerik metodun kullanılmasını da zorunlu hale getirmektedir. Motorun muhtelif kısımlarındaki bazı gözlem çizgileri üzerinde, 3 boyutlu simülasyon ile elde edilen  $\mu_r$  değişimleri, faz akımına bağlı olarak indüktans profilleri ve sargı ucu etkileri ilgili referansta ayrıntılı olarak verilmektedir [16].

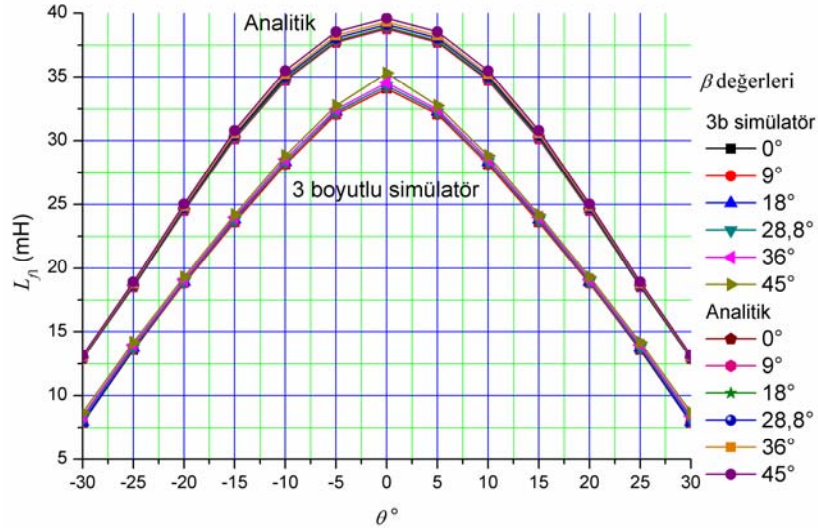
### 3.2. HY-ARM torku ve gücü

Düz ARM'de rotor üzerindeki radyal kuvvetlerin etkisi sonucu torkun sadece mil ekseninde ( $z$ ) bileşeni,  $T_z$  oluşurken [20], HY-ARM'de sargılar ve rotor çarpık olduğu için (HY-ARM'de koenerji düz ARM'ye göre daha yüksek olduğu halde) torkun mil eksenini dışında radyal yönlerde de bileşenleri oluşmaktadır [16]. Bir faz sargısının  $10 \text{ A}$ 'lik uyarımı altında,  $0 \leq \theta \leq 45^\circ$  ve  $0 \leq \beta_h \leq 45^\circ$  için 3D simülasyon ile elde edilen  $T_z(\theta)$  grafikleri şekil 6'da verilmiştir. Düz ARM'nin ürettiği tork,  $T(\theta)$  ile  $T_z(\theta)$  yarı analitik metotla elde edilen

$$T_z(\theta) = T(\theta) \cos \alpha_h \quad (5)$$



**Şekil 4.** Rotorun  $\beta_h = 45^\circ$  iken  $\theta = 0^\circ$  konumunda, 15 A'lık faz akımında, (şekilde sol stator boyunduruğu alınmış olarak) rotor ve stator nüvesindeki manyetik akı yoğunluğu ( $B$ ) dağılımı ve vektörleri. Stator nüvesi yüzeyinde  $B$ 'nin yoğun olduğu bölgelerde akı yoğunluğu en fazla 2,56 T iken rotor yüzeyi üzerinde bu 2,06 T'dir.

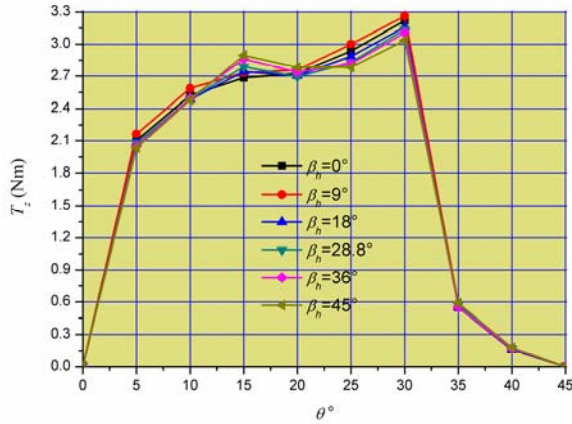


**Şekil 5.** 10 A'lık faz uyarıtımı altında,  $-30 \leq \theta \leq 30^\circ$  ve  $0 \leq \beta_h \leq 45^\circ$  için düz ( $\beta_h = 0^\circ$ ) ve HY-ARM ( $\beta_h \leq 45^\circ$ )'nin yarı analitik ve 3 boyutlu simülasyon ile elde edilen faz indüktanslarının karşılaştırılması.

değişimini göstermektedir. Torkun  $z$  eksenini dışındaki  $T_r(\theta) = T(\theta)(1 - \cos \alpha_h)$  ile ifade edilen diğer (radyal) bileşenleri ise mil üzerinde yatakları zorlayıcı etkiler meydana getirmektedir. Elektrik makinelerinde mil ekseninde üretilen torkun genel ifadesi

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{2\pi \frac{N_r}{60}} \quad (\text{Nm}) \quad (6)$$

ile verilir. Düz ARM için de geçerli olan bu eşitlik HY-ARM'nin milinden ( $z$  eksenini) aynı torkun alınabilmesi için HY-ARM'ye düz ARM'den daha fazla güç verilmesi anlamına gelmektedir. Diğer kayıplarla beraber bunun irdelenmesi ilerleyen kısımlarda yapılacaktır.



Şekil 6. 10 A'lik faz uyarımında  $\theta$  ve  $\beta_h$ 'ye göre  $T_z(\theta)$ 'nin değişim grafikleri

### 3.3. HY-ARM faz direnci, kayıplar ve verim

HY-ARM'nin helisel yapısından dolayı sargı boyu uzamakta ve sargı direnci de bu uzama miktarı kadar artış göstermektedir. Karşılıklı kutupların seri bağlanmasıyla oda sıcaklığındaki faz direnci,

$$R_{f1h} = \frac{T_p \rho l_h}{A_i} = \frac{T_p \rho v_s}{A_c^2} \quad \Omega \quad (7)$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir. Burada  $\rho$  özdirenç,  $A_i$  sargı iletkeni kesit alanı,  $A_c$  sargı kesit alanı,  $v_s$  sargının kapladığı hacim ve  $l_h$  ise ortalama sargı uzunluğu olup

$$l_h = 2 \left[ \frac{L_{stk}}{\cos \alpha_h} + \pi(r_c + k/2) \right] \quad (8)$$

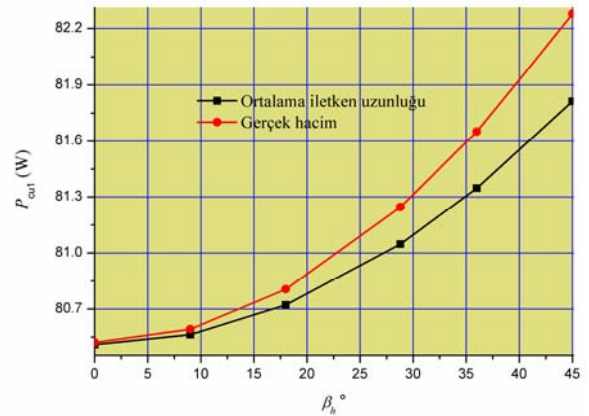
eşitliği ile analitik yoldan hesaplanabilir. Burada  $r_c$  stator nüvesinin dışında kalan sargı ucu iç yayının kutup eksenine göre yarıçapı ve  $k$  ise sargı kesit genişliğidir. 15 A'lik faz uyarımı altında,  $\beta_h$ 'ye bağlı olarak faz direncinin,  $R_{f1h}$  3D simülatör ile elde edilen sargının gerçek hacmi ve ortalama iletken uzunluğu,  $l_h$  ile hesaplanmış değerleri dikkate alınarak hesaplanmış bakır kayıpları ( $I^2 R$ ) Şekil 7'de görülmektedir. Sargının gerçek hacmi ve ortalama iletken boyu ile hesaplanan direnç değerlerinden kaynaklanan bakır kayıpları arasında  $\beta_h$ 'ye bağlı olarak az miktarda bir fark meydana gelmekte ve motorun heliselliğinin artırılması bakır kayıplarını artırıcı etki meydana getirerek verimi düşürmektedir.

HY-ARM'de statik koşullarda hesaplanan bakır kayıplarına ek olarak dinamik koşullarda oluşan eddy akımı ve histerezis kayıpları da mevcuttur. Burada yüksek hızlı motor sargılarında deri etkisi sonucu oluşan kayıplar dikkate alınmamıştır. Bu kayıpların aynı ölçüdeki düz ARM ile aynı olduğu varsayılarak, üzerinde çalışılan motor için 18 W eddy akımı kayıpları, 14 W histerezis kayıpları toplam 32 W nüve

kayıpları söz konusudur [8]. Dönüş başına enerji dönüşüm döngülerinin sayısından belirlenen ortalama tork,  $T_{ort}$  düz ARM için geliştirilmiştir

$$T_{ort} = \frac{\delta W_m P_s P_r}{4\pi} = \frac{\delta W_m q P_r}{2\pi} \quad (\text{Nm}) \quad (9)$$

eşitliği ile hesaplanabilmektedir [8]. Bu eşitlikte,  $P_r$  rotor kutup sayısı,  $P_s$  stator kutup sayısı,  $q$  faz sayısı ve  $\delta W_m$  örtüşen ve örtüşmeyen konumlardaki koenerji,  $W_c = \int_i \lambda di$  farkıdır. Koenerji, indüktansın yüksek olmasından dolayı HY-ARM'de daha yüksek olmasına rağmen üretilen tork  $x$  ve  $y$  bileşenlerine de sahip olduğundan milden ( $z$  eksen) alınan tork daha az olmaktadır (Şekil 8). Bütün kayıplar dikkate alındığında, Şekil 9'da görüldüğü gibi HY-ARM'ye daha fazla giriş gücü verilmesine karşın çıkıştan daha az güç alınmaktadır. Bu durum HY-ARM'nin veriminin düz ARM'ye göre daha düşük olduğu anlamına gelmektedir (Şekil 10).



Şekil 7. 15 A'lik faz uyarımı altında,  $\beta_h$ 'ye bağlı olarak faz direncinin sargının gerçek hacmi ve ortalama iletken uzunluğu ile hesaplanmış değerlerinden hesaplanmış bakır kayıpları,  $P_{cu1}$ .

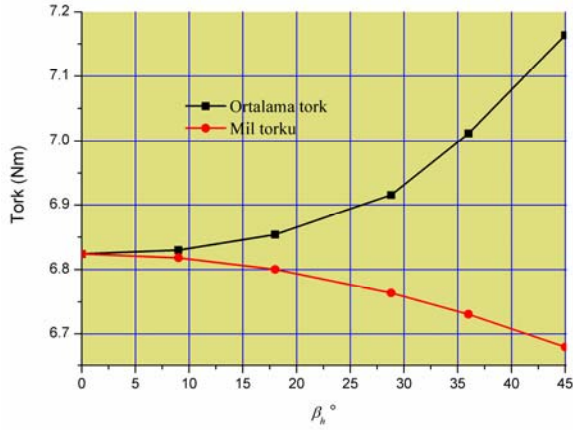
Hesaplamalarda kolaylıkla dikkate alınabilen bakır ve nüve kayıplarının yanında HY-ARM'de mil ekseninin dışında oluşan torklar yataklarda sürtünmelere ve ekstra mekanik kayıplara neden olacaktır. Sayılan bütün kayıplar dikkate alındığında HY-ARM'nin giriş gücü,

$$P_i = P_g + P_{cu} + P_{co} + P_m \quad (10)$$

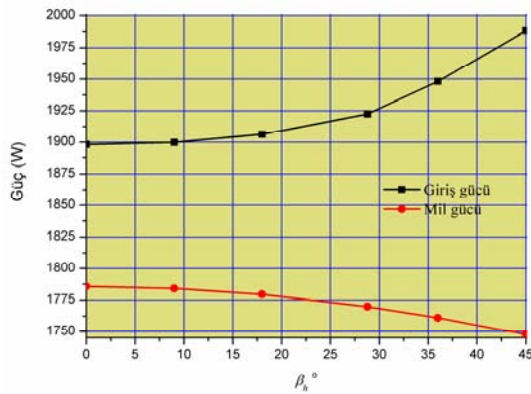
ile ifade edilir. Burada  $P_i$  giriş gücü,  $P_g$  hava aralığı gücü,  $P_{cu}$  bakır kayıpları,  $P_{co}$  nüve kayıpları ve  $P_m$  toplam mekanik kayıplardır. Ventilasyon kayıpları da mekanik kayıplar içerisinde dâhil edilmiştir.

### 3.4. HY-ARM'nin rotorundaki kuvvetler

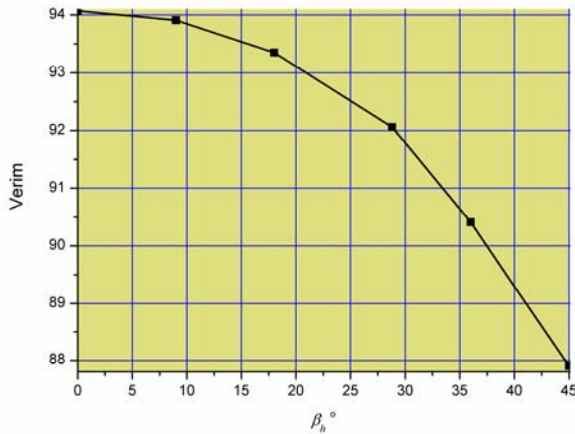
Düz ARM'nin rotorunda, mil eksenindeki kuvvet ideal olarak sıfırdır ve radyal ( $x, y$ ) yönlerdeki kuvvet bileşenlerinin tamamı mil ekseninden alınan torka,  $T_z$  dönüşürken HY-ARM'nin rotorunda genliği azalmış radyal kuvvetlerin yanı sıra mil ekseninde ( $z$ ) de



Şekil 8.  $\beta_h$ 'ye bağlı olarak üretilen ortalama tork ve mil torku.



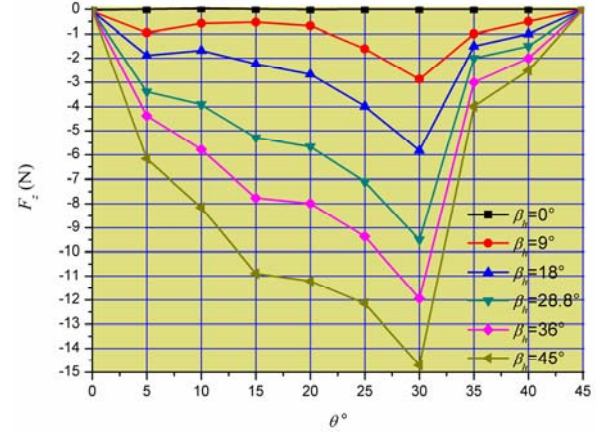
Şekil 9.  $\beta_h$ 'ye bağlı olarak giriş gücüne göre çıkış gücünün değişimi.



Şekil 10.  $\beta_h$ 'ye bağlı olarak HY-ARM'nin verimi

kuvvetler oluşmaktadır [16]. Şekil 11'de 10 A'lık faz uyarımı altında  $\theta$  ve  $\beta_h$ 'ye bağlı olarak rotor üzerindeki 3 boyutlu simülasyon ile elde edilen  $F_z$  kuvvetleri verilmiştir.  $F_z$  örtüşmenin başladığı konumda ( $\theta = 30^\circ$ ) maksimum olmakta, tam örtüşen ( $\theta = 0^\circ$ ) ve tam örtüşmeyen ( $\theta = 45^\circ$ ) konumda ise sıfır değerindedir. Motorun çalışma bölgesi  $0 \leq \theta \leq 30^\circ$  olduğundan bu kuvvetler mil ekseninde tork oluşturma yerine rotoru yataklarından statorun dışına fırlatma eğilimindedir. HY-ARM rotorunun kendisinin eyleyici

olduğu geometrik bir düzenlemede bu kuvvetlerin etkisi dikkate alınarak bu durum; özel bir yataklama sisteminin kullanılmasını gerektirmektedir. Doğrudan tahrik, vb. gibi uygulama yerine bağlı olarak HY-ARM'nin verimi ile  $\beta_h$  arasında optimum bir nokta belirlenmesi gerekir ki bu  $\beta_h$ 'nin olabildiğince düşük tutulması anlamına gelmektedir.



Şekil 11.  $\theta$  ve  $\beta_h$ 'ye bağlı olarak rotordaki  $F_z$  kuvvetleri.

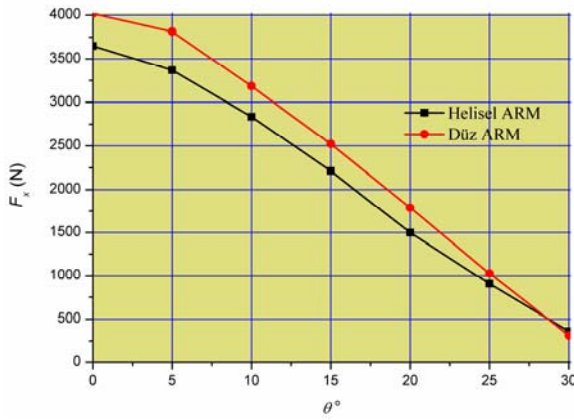
### 3.5. HY-ARM'nin statorundaki kuvvetler

Rotor ve statorun çakıştığı konumlarda en fazla olmak üzere, örneğin  $x$  eksenindeki (Şekil 1b) kuvvetler [21-23] statorun yapısını ovalleştirmeye çalışarak akustik gürültüye neden olmaktadır. Analiz amaçları için 3 boyutlu simülasyonda stator iki parçalı olarak yapılmış (Şekil 1c) bir parçası üzerindeki kuvvet ( $F_x$ ) sonuçları alınmıştır. Şekil 12'de görüldüğü gibi, 15 A'lık faz uyarımında rotorun elektromanyetik olarak kilitlendiği örtüşen konumda ( $\theta = 0$ ), statordaki  $F_x$  kuvveti düz ARM'de 4017 N iken HY-ARM'de 3647 N değerine düşmüştür. Statoru ovalleştirmeye çalışan ve akustik gürültüye neden bu kuvvetin genliğinin düşmesi, HY-ARM'nin kayıplı özelliğinin yanında bir avantaj olarak görülebilir.

## 4. SONUÇ

Geleneksel motor amaçları içinde, düz ARM'ye helisel yapının kazandırılması çeşitli olumsuzluklara neden olmaktadır. Çarpıklık arttıkça indüktans, faz direnci ve rotor milindeki torka dönüşmeyen elektromanyetik kuvvetler artmakta ve bu aynı güçteki düz ARM'ye göre kayıpların artmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda çarpıklıktan dolayı motorun tork karakteristiği değiştiğinden mil torku azalmakta ve yatakları zorlayıcı ve sürtünmeyi artırıcı elektromanyetik kuvvetler oluşmaktadır. Düz ARM'ye göre HY-ARM tork ve verim açısından avantajlı değildir. Örneğin 2 kW'lık bir düz ARM'nin verimi %94 iken  $\beta_h = 45^\circ$  lik bir HY-ARM'de verim %88'e düşmektedir. HY-ARM'de akustik gürültüye neden olan statoru ovalleştirici kuvvetlerin düz ARM'ye göre düşük olması ise bir üstünlük olarak ortaya çıkmakta-

dir. 15 A'lık faz uyarımında statoru ovalleştirmeye çalışan ve akustik gürültüye neden olan kuvvetin genliği,  $F_x$  düz ARM'de 4017 N iken  $\beta_h = 45^\circ$ 'lik HY-ARM'de 3647 N değerine düşmektedir. Geleneksel motor amaçları dışında, HY-ARM'nin helisel yapı rotorunun kendisinin bir eyleyici olduğu bir doğrudan tahrik uygulamasında, ayrıca bir sürücü motor, kaplinler ve devir ayarlama elemanları kullanılmadığından, bu elemanlardaki kayıpların olmaması bir üstünlük olarak gözükmektedir. HY-ARM'de rotoru stator dışına çıkarma eğiliminde rotor milinde oluşan ve ayrıca statoru ovalleştirici kuvvetlerin eliminasyonu ve verim faktörleri dikkate alınarak en uygun eyleyicilik veya çarpıklık açısına uygun rotor geometrisi üzerinde ticari uygulamalı AR-GE çalışmaları başka bir çalışmada rapor edilecektir.



Şekil 12. 15 A'lık faz uyarımında  $\theta$ 'ya bağlı olarak düz ve  $\beta = 45^\circ$  HY-ARM statorundaki  $F_x$  kuvvetleri

## KAYNAKLAR

1. Miller, T.J.E., **Electronics Control of Switched Reluctance Machines**, Newnes PES, Oxford, 2001.
2. Miller, T.J.E., **Switched Reluctance Motors and Their Control**, Magna Physics Publishing, Oxford, 1993.
3. Bedford, B. D.: USA Patents Nos. 3678352 ve 3679953 1972.
4. Srinivas, K.N., Arumugam, R., "Static and dynamic vibration analyses of switched reluctance motors including bearings, housing, rotor dynamics, and applied loads", **IEEE Transactions on Magnetics**, Volume 40, Issue 4, Part 1, 1911-1919, 2004.
5. Pillay, P., Cai, W., "An investigation into vibration in switched reluctance motors", **IEEE Transactions on Industry Applications**, Volume 35, Issue 3, 589 – 596, May-June 1999.
6. Zhangjun Tang, Pillay, P., Omekanda, A.M., "Vibration prediction in switched reluctance motors with transfer function identification from shaker and force hammer tests", **IEEE Transactions on Industry Applications**, Volume 39, Issue 4, 978 – 985, July-Aug. 2003.
7. Cameron, D.E., Lang, J.H., Umans, S.D., "The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance motors", **IEEE Transactions on Industry Applications**, Volume 28, Issue 6, 1250 – 1255, Nov.-Dec. 1992.
8. Krishnan, R., **Switched Reluctance Motor Drives**, CRC Press, Florida, 2001.
9. Bin-Yen Ma, Tian-Hua Liu, Wu-Shiung Feng, "Modeling and torque pulsation reduction for a switched reluctance motor drive system", **IEEE IECON 22nd International Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation**, 1996, Volume 1, 72 - 77 vol.1, 5-10 Aug. 1996
10. Rasmussen, P.O., Blaabjerg, F., Pedersen, J.K., Jensen, F., "Switched reluctance-shark machines-more torque and less acoustic noise", **IEEE Industry Applications Conference**, Volume 1, 8-12 Oct. 2000 Page(s):93 – 98, vol.1.
11. Moallem, M., Ong, C.M., Unnewehr, L.E., "Effect of Rotor Profiles on the Torque of a Switched Reluctance Motor", **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol.28, No. 2 March/April 1992.
12. Davis, R.M., "A comparison of switched reluctance rotor structures", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Volume 35, Issue 4, 524- 529, Nov. 1988.
13. Stanley, M.L., "Skewing of pole laminations of a switched reluctance machine to reduce acoustic noise", USA Patent No. 5266859 1993.
14. Gizaw, D., "Pumping motor with skewed rotor laminations", USA Patent No. 0057800 A1 2003
15. <http://www.ansoft.com/products/em/max3d/>
16. Fenercioğlu A., **Helisel Yapılı Anahtarlama Relüktans Motorun Tasarımı ve Analizi**, Doktora Tezi, Gazi Üniv, FBE-Elektrik Eğitimi ABD, Eylül 2006.
17. Hamayer, K., Belmans, R., **Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices**, Wit Press Boston, 1999.
18. Bastos, J.P.A., **Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods**, Marcel Dekker, New York, 2003.
19. Jianning, J., **The Finite Element Method in Electromagnetics**, John Wiley&Sons Inc., New York, 1993.
20. Benhama, A., Williamson, A.C., Reece, A.B.J., "SRM torque computation from 3D finite element field solutions", **Eighth International Conference on Electrical Machines and Drives**, 1997 (Conf. Publ. No. 444), 59 – 63, 1-3 Sept. 1997.
21. Garrigan, N.R., Soong, W.L., Stephens, C.M., Storage, A., Lipo, T.A., "Radial force characteristics of a switched reluctance machine", **IEEE Industry Applications Conference** 1999, Volume 4, 2250-2258 vol.4, 3-7 Oct. 1999.
22. Edrington, C.S., Kaluvagunta, D.C., Joddar, J. Fahimi, B., "Investigation of Electromagnetics Force Components in SRM Under Single and Multiphase Excitation", **IEEE transactions on industry applications**, Vol.41, No.4, August 2005.
23. Husain, I., Radun, A. Narius, J., "Unbalanced Force Calculation in Switched-Reluctance Machines", **IEEE transactions on magnetics**, Vol.36, No.1, January 2000.