

# Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Anahtarlamalı Relüktans Motorun Moment ve Endüktans Eğrilerinin Elde Edilmesi

## Torque and Inductance Curves of Switched Reluctance Motor Obtained From The Finite Element Method

Mehmet POLAT<sup>1</sup>, Hasan KÜRÜM<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mekatronik Mühendisliği Bölümü

Fırat Üniversitesi

mpolat@firat.edu.tr

<sup>2</sup> Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Fırat Üniversitesi

hkurum@firat.edu.tr

### Özet

*Bu çalışmada 4 fazlı 8/6 kutuplu Anahtarlamalı Relüktans Motorun (ARM) moment ve endüktans eğrileri doymalı ve doymasız durum için incelenmiştir. ARM'nin en önemli parametrelerinden biri endüktans eğrileridir. Moment dalgalılığını azaltmak ve geliştirilen momenti arttırmak için tetikleme açılarının düzgün seçilmesi gerekmektedir. Bu nedenle endüktans eğrilerinin her durumunun (akım ve açığa göre) doğru bir şekilde tespiti gerekmektedir. Bu eğrilerin çıkarılmasında Sonlu Elemanlar Yöntemini (SEY) kullanarak analiz yapan ANSYS 10.0 paket programı kullanılmıştır.*

### Abstract

*In this study, 4 phase 8/6 poles Switched Reluctance Motor's (SRM) torque and inductance curves are investigated to both un-saturation and saturation situation. One of the most important parameters of SRM is inductance curves. Trigger angles should be selected properly to reduce torque ripples and increase developed torque. Therefore, each state (based on current and angle) of inductance curves must correct detection. ANSYS 10.0 package program was used for the removal of these curves. This program has been analyzed using finite element method (FEM).*

### 1. Giriş

Anahtarlamalı Relüktans Motor (ARM), stator ve rotoru çıkık kutuptan oluşmuş ve rotorunda sargı olmayan basit yapıları bir elektrik makinasıdır. ARM 1960'lı yılların öncesinde "Değişken Relüktanslı Motor" olarak isimlendirilmiştir. Ancak daha sonraları dönme hareketi oluşturmak için fazların anahtarlamak suretiyle uyarılmasından dolayı ARM adını almıştır.

ARM'lerde temel olarak iki sorun vardır. İlki ARM çalışırken momentteki dalgalanmalar ve radyal kuvvetlerden dolayı oluşan gürültü, diğeri ise doğru fazın tetiklenmesi için motor konumunun (stator kutuplarının rotor kutuplarına göre pozisyonları) tespitidir. Momentteki dalgalılık hem tasarım aşamasında hemde ARM üzerinde yapılacak kontrol yöntemleriyle azaltılabilmektedir. Literatürde her ikisi üzerinde yapılan çalışmalar mevcuttur. Tasarım aşamasında, farklı kutup/faz sayısındaki motor konfigürasyonları, farklı stator ve rotor kutup yapıları gibi birçok çalışma yapılmıştır. Bunların yetersiz kaldığı hassas hız/moment kontrolü gerektiren çalışmalar da ise elektronik kontrol devresinin donanımı ve yazılımı geliştirilip yeni kontrol tekniklerinin kullanılmasıyla moment dalgalılığı daha da azaltılabılır.

Cameron D.E. ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda, gürültü kaynaklarını ortaya atıp hangi gürültü kaynağının ne kadar etkili olduğunu incelemişlerdir [1-2]. Başlıca gürültü kaynakları olarak, akımın karesinin harmonikleri ile stator rezonans frekansının harmoniklerinin çakıştığı besleme durumu, radyal kuvvetler ve moment dalgalılığını söylemişlerdir. Ancak asıl gürültü kaynağının radyal kuvvetler olduğunu söyleyip bu kuvvetlerle statordaki ovalleşmenin özellikle stator rezonans frekansında büyük değerlerde olduğunu deneylerle göstermişlerdir. Iqbal ve Ehsani, ARM'nin moment dalgalılığının azaltılması üzerinde yaptıkları çalışmada özellikle düşük hızlarda iyi bir sonuç veren yeni bir PWM akım kontrol tekniğini ortaya attılar [3]. Ohdachi, Y., dinamik SEY'i kullanarak ARM'nin optimum tasarımını yapmıştır [4]. Çalışmada 3 fazlı 6/8 ARM kullanılmıştır. Çalışmada kutup şekilleri optimize ederek (stator ve rotor kutup genişlikleri) moment dalgalanması minimize edilmiştir. Koibuchi K. ve arkadaşları, iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi kullanarak ARM'nin temel tasarımını gerçekleştirmişlerdir [5]. Bu çalışmada 6/4 ARM'nin hem

nümerik hemde SEY ile analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada klasik iki anahtarlı sürme devresi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan biri stator kutup yayının genişlemesi ile, moment dalgalılığının azalması ve moment değerinin artmasıdır. Pillay ve arkadaşları, ARM'deki titreşimi incelemişlerdir [6]. Bu incelemeyi stator yüzeyinin yuvarlak ve çıkıntılı olması durumu için gerçekleştirdiler. Çıkıntılı statorda titreşimlerin daha fazla olduğunu gösterdiler. Kosaka, T., ve arkadaşları ARM'nin moment dalgalılığı üzerinde durmuşlardır [7]. Çalışmada 3 fazlı 6/8 ARM kullanılmıştır. İlk etapta ARM'nin d-q modeli elde edilip endüktans ve ortak endüktans değerlerinin deneysel sonuçları verilmiştir. Moment dalgalılığının azaltılmasında ise iki yöntem kullanılmıştır. Bunlar akım kontrolü diğeri ise dışbükey rotor şeklindedir. Her iki yöntemde de endüktans ve moment eğrilerinde ki değişimler incelenmiştir.

## 2. Sonlu Elemanlar Yöntemi

Sonlu elemanlar yöntemi Laplace (Denklem 1) ve Poisson (Denklem 2) tipi kısmi türevli diferansiyel denklemlerin çözümlerinde kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, elemanlar içinde tanımlanan potansiyel fonksiyonu sonsuz terimler içeremeyeceği için bir kesme hatası meydana gelir. Sonlu elemanlar yönteminde Laplace denklemini direk çözmek yerine, enerji denklemini minimum yapan potansiyel çözümleri bulmak yoluna gidilir. Bölge içinde enerjiyi minimum yapan potansiyel çözüm aynı zamanda Laplace denklemini sağlayan potansiyel çözümdür. Sonlu elemanlar yöntemini eğrisel sınırlara uydurmak kolaydır. Ayrıca belirlenen çözüm bölgesinde eleman sayısını bazı gelişmiş algoritmalar kullanarak arttırabiliriz [8].

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} = f(x, y) \quad (2)$$

Bu yöntemde, deneme fonksiyonu aramada temel olarak dört yöntem kullanılmaktadır. Bunlar;

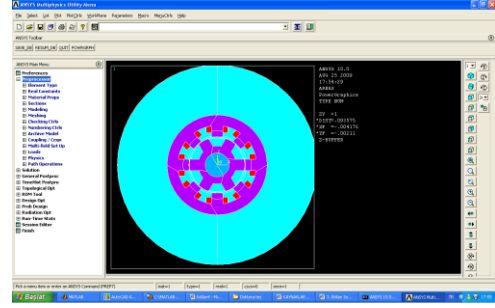
1. Rayleigh – Ritz yöntemi
2. Galarkin yöntemi
3. En Küçük Kareler yöntemi
4. Ağırlık artıkları yöntemi

Bunlardan en yaygın olarak kullanılanı, Reigleih – Ritz ve Galarkin yöntemidir..

### 2.1. ANSYS Paket Programı

ANSYS programı, Sonlu Elemanlar Yöntemini kullanan bir analiz ve tasarım programıdır. ANSYS genel amaçlı bir paket program olup, bu program ile elde edilmek istenen bir modelin çalışma şartları altında hangi tür tepkiler vereceği bulunabilir. Şekil 1'de ANSYS 10.0 sürümünün program penceresi gösterilmiştir. ANSYS programı elektrik, inşaat ve makine mühendisliği başta olmak üzere birçok mühendislik dalına hitap eden bir programdır. Elektrik mühendisliği dalında, SEY ile iki ve üç boyutlu manyetik ve elektrik alan problemlerinin,

inşaat mühendisliğinde yapı ve makine mühendisliğinde de ısı ve akışkan problemlerinin çözümleri mümkündür.



Şekil 1: ANSYS 10.0 program penceresi [9]

ANSYS programına başlamadan önce hangi tür bir problemin çözümünde kullanılacak ise ona göre gerekli seçimleri yapmak gerekir. ANSYS'de bir problemin çözümünü dört aşamada gerçekleştirebiliriz [9]. Bunlar;

- Hangi disipline göre hangi tür SEY çözümü yapılacağına seçimi, bu kısmı "Preferences" kısmından yapılmaktadır.

- İncelenen geometrinin ölçülere uygun olarak ANSYS ortamına aktarılması, geometriyi oluşturan malzemelere ait özelliklerin modelde tanımlanması ve bölmelendirme ikinci kısmı oluşturmaktadır. Bu kısımda eleman tipi, meteryal tipi tanımlanıp, malzeme sabitleri ve doğrusal olmayan yapı (B-H eğrisi gibi) varsa verilir. Bu tür işlemleri "Preprocessor" bölümünde gerçekleştirilir.

- Üçüncü aşama, analiz tipinin tanımlanması ve yüklerin verilmesi kısımlarının bulunduğu çözüm "Solution" kısmıdır.

- Alan dağılımının gösterilmesi, elektromanyetik moment, manyetik kuvvet, akı, endüktans ve enerji gibi bilgilerin hesaplanması "General Postproc" menüsünden yapılır ve bu bölümde temel bir çözüm için son aşamayı oluşturur.

Bunların dışında yer alan menülerden biri "File" menüsüdür. Bu menüden, yapılan çalışmanın kaydedilmesi veya kayıtlı çalışmanın tekrar ekrana getirilmesi gibi dosya işlemleri gerçekleştirilir. "Plot" menüsünden geometrik şekle ait düğüm, çizgi, alan ve bölmelendirmelerin ekranda görüntülenmesi sağlanır. "PlotCtrls" menüsünden düğüm, çizgi ve alanların numaralarının görüntülenmesi sağlanabilir. Ayrıca şeklin görünüşünün büyütülmesi veya küçültülmesi, sağa veya sola kaydırılması gibi işlemleri gerçekleştirilir. "WorkPlane" menüsü geometrik şekli çizerken kartezyen veya silindirik koordinat sisteminden birini seçme, eksen kaydırma imkânı sağlar. "Help" menüsünden ANSYS programının teorisi ve kullanımı ile ilgili örnekleriyle birlikte her türlü yardım desteği almak mümkündür.

Bu çalışmada iki boyutlu bir elektromagnetik problemin çözümü yapıldığından ANSYS programında iki boyutlu alan çözümü anlamına gelen "Emag 2D" seçimi yapılmıştır. Eleman tipi ise PLANE53 seçilmiştir. Bu eleman 2-boyutlu manyetik analizler için kullanılan 8 düğümlü bir elemandır. Bu elemanın düğüm noktaları için çeşitli serbestlik dereceleri tanımlanır. Ayrıca stator ve rotoru oluşturan saç malzemenin mıknatıslanma eğrisi de modele uygulanmıştır.

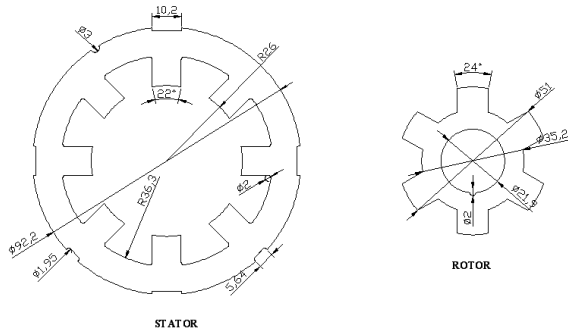
ANSYS programında, SEY çözümünde ortaya çıkan doğrusal olmayan cebrik denklemlerin sayısal çözümünde Newton Raphson yöntemi, kuvvet ve momentlerin hesabında ise Maxwell Stress Tensor yöntemi kullanılmıştır. Sınır koşulu olarak homojen Dirichlet sınır koşulu alınmıştır.

### 3. Anahtarlamalı Relüktans Motorun Moment ve Endüktans Eğrilerinin Elde Edilmesi

Moment ve Endüktans Eğrilerinin çıkartılacağı ARM 'nin Temel boyutları Çizelge 1'de verilmiş ve Şekil 2'de ARM'nin verilen ölçülerle birlikte çizimi gösterilmiştir. Bu eğrilerin çıkartılmasında ANSY 10.0 paket programı kullanılmıştır.

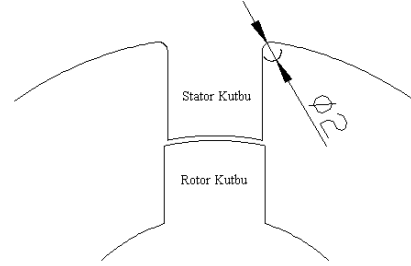
Çizelge 1: İncelenecek ARM'lerin büyüklükleri [10]

Stator kutup sayısı ( $N_s$ )	8
Rotor kutup sayısı ( $N_r$ )	6
Stator kutup yayı uzunluğu ( $\beta_s$ )	$22^\circ$
Rotor kutup yayı uzunluğu ( $\beta_r$ )	$24^\circ$
Stator kutup genişliği	9.98 mm
Rotor kutup genişliği	10.9mm
Stator kutup adımı ( $\alpha_s$ )	$45^\circ$
Rotor kutup adımı ( $\alpha_r$ )	$60^\circ$
Hava aralığı	0.5 mm
Stator dış çapı	92.2 mm
Stator iç çapı	52 mm
Stator paket uzunluğu	180 mm
Mil çapı	22 mm
Rotor dış çapı	51 mm
Stator kutup uzunluğu	10.1 mm
Rotor kutup uzunluğu	7.9 mm
Bir fazın sarım sayısı	108
İletken çapı	0.75 mm
Nominal akım	12 A

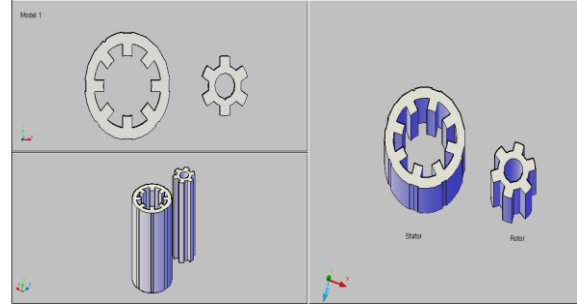


Şekil 2: 8/6 kutuplu ARM'nin ön görünüşü (Ölçüler mm cinsindedir)

Seçilen standart tip 8/6 bir ARM'de sadece stator sarğı oluğu, sarğı yerleşiminden maksimum seviyede yararlanmak ve o bölgede boşluk kalmaması için ovalleştirilmiştir. Bu durum Şekil 3'de gösterilmiştir. Şekil 4'te ARM'nin çeşitli yönlerden üç boyutlu görünüşleri verilmiştir.



Şekil 3: ARM'in stator ve rotor kutup şekilleri

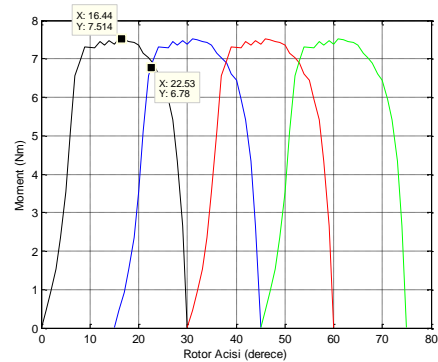


Şekil 4: ARM'in üç boyutlu çeşitli açılardan görünüşü

Şekil 5'te ARM'in moment- rotor açısı eğrisi görülmektedir. Bu eğri çakışık olmayan konumdan çakışık konuma kadar rotor  $1^\circ$ lik açılarla kaydırılarak elde edilmiştir. Bu eğriden moment dalgalılığını tespit edebilmek için, herhangi bir faza ait moment eğrisinin almış olduğu en büyük değer ( $T_{max}$ ) ile bir fazdan diğer faza geçerken moment eğrilerinin kesiştiği değer ( $T_{min}$ ) elde edilir.  $T_{max}$  ve  $T_{min}$  değerleri Denklem 3'te yerine konularak momentteki dalgalılık hesaplanabilir [11].

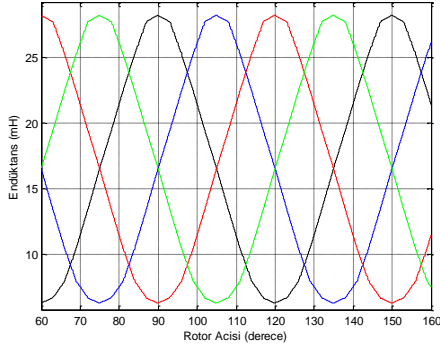
$$\%T_d = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{max} + T_{min}} * 100 \quad (3)$$

Denklem 3'ü Şekil 5'e uygularsak dalgalılık oranı yaklaşık olarak %5.13 olarak hesaplanmaktadır. Standart tip üç fazlı bir ARM'de bu oran %36 'lar civarındadır [11].



Şekil 5: ARM'in Moment-Rotor açısı eğrisi

Şekil 6'da model 1'in endüktans-rotor açısı eğrisi verilmiştir. Bu eğriden  $L_{min}=6.333$  mH ve  $L_{max}=28.17$  mH olarak hesaplanmıştır.

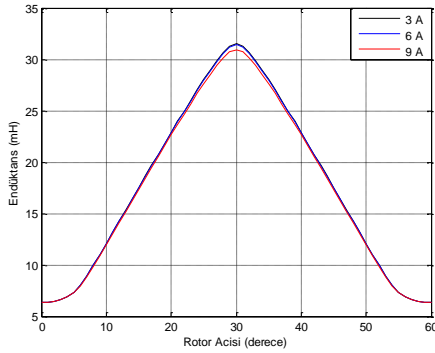


Şekil 6: ARM'in Endüktans-Rotor açısı eğrisi

### 3.1. Doymasız Durumdaki Çalışma Karakteristikleri

Doymasız çalışmada ARM'nin mıknatıslanma eğrisinin doğrusal kısmı kullanılır. Bunun içinde motor, nominal akımının altındaki değerlerde çalıştırılır. Aşağıdaki sonuçlarda rotor, çakışık olmayan konumdan çakışık konuma kadar 1°er derece aralıkla sabit akım uyarımları altında kaydırılmıştır. Akım 3, 6 ve 9 A olarak alınmıştır.

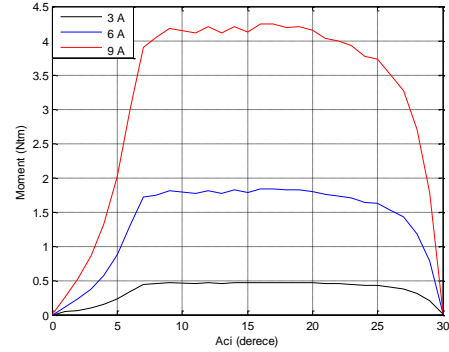
Şekil 7'de ARM endüktansının, doymasız durumdaki akımlara ve rotor konumuna göre değişimleri verilmiştir. ARM'in endüktans eğrileri hemen hemen aynı eğimde yükselip düşmüştür. Bu sonuçlar ARM'nin verimli çalışması ve istenilen momenti geliştirmesi için sürme devresinin işaretleri oluşturulurken dikkate alınmalıdır.



Şekil 7: Endüktans-Rotor açısı eğrileri

Şekil 8'de ARM'de geliştirilen momentlerin, doymasız durumdaki akımlara ve rotor konumuna göre değişimleri verilmiştir. Faz geçişleri sırasında momentte oluşan dalgalanmaların azalması için, moment eğrisi bir sonraki faz momenti devreye girinceye kadar değerini korusa ve/veya bir sonraki moment eğrisi bir önceki moment eğrisi yüksek değerinde iken hızlı olarak yükselmesi gerekir. Bu durumlar sağlanırsa faz geçişleri arasındaki moment düşüşü fazla olmayacaktır. Şekiller dikkatli incelenirse bilindiği gibi ARM'lerde moment, akımın karesine bağlı olarak değiştiği için akım artırıldıkça momentin de buna bağlı olarak arttığı görülmüştür. ARM'deki moment eğrileri incelenirse moment eğrilerinin 0°den yükselmeye başladığını 7°ye kadar

yükselişin hızlı bir şekilde devam ettiği, bu dereceden sonrada dalgalanmalarla tepe değerlerinde dolaştığı ve düşüşün ise akıma göre çok fazla değişmeyip 25°-26°den başlayıp 30°de sonlandığı görülmüştür.

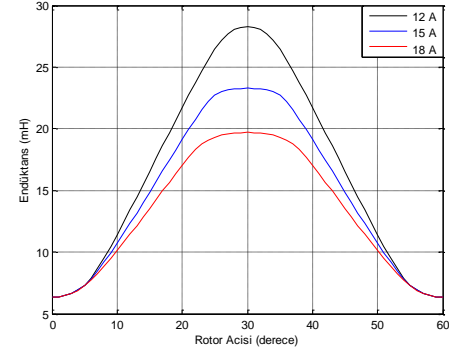


Şekil 7: Moment-Rotor açısı eğrileri

### 3.2. Doyma Durumdaki Çalışma Karakteristikleri

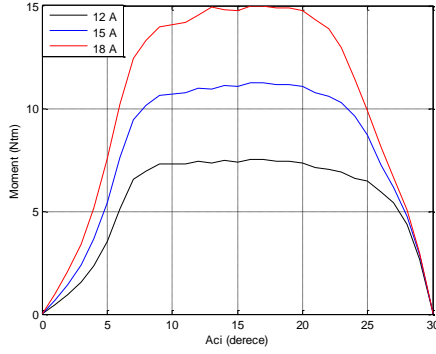
Bunun için ARM nominal akım ve üstündeki değerlerde çalıştırılarak doyma bölgesine geçilmiştir. Yine doymasız çalışmada olduğu gibi aşağıdaki sonuçlarda rotor, çakışık olmayan konumdan çakışık konuma kadar 1°er derece aralıkla sabit akım uyarımları altında kaydırılmıştır. Akımlar anma akım ve üstündeki 12, 15 ve 18 A olarak alınmıştır.

Şekil 8 incelenirse doğrusal bölgenin aksine doymanın olduğu çalışma bölgesinde, endüktans hem faz hemde rotor akımına bağlı değiştiği için , akım arttıkça azalan bir eğilim göstermektedir. Bu durum doyma bölgesinde endüktansın, hem sargı akımının hemde rotor açısının bir fonksiyonu olduğunu göstermektedir. Diğer bir sonuçta, endüktans eğrileri akıma göre farklı eğimde yükselip düşmüştür.



Şekil 8: Endüktans-Rotor açısı eğrileri

Şekil 9'da ARM'de geliştirilen momentlerin, doymalı durumdaki akımlara ve rotor konumuna göre değişimleri verilmiştir. Şekiller incelendiğinde doğrusal bölgede olduğu gibi akım değeri arttıkça momentinde buna bağlı olarak arttığı görülmüştür. ARM'nin moment eğrileri incelenirse, eğrilerinin 0°den yükselmeye başladığını 9°ye kadar yükselişin hızlı bir şekilde devam ettiği, bu dereceden sonrada dalgalanmalarla tepe değerlerinde dolaştığı ve düşüşün ise 12, 15 ve 18 A akım değerlerine göre sırasıyla 25°, 23° ve 20°'de başlayıp 30°de sonlandığı görülmüştür.



Şekil 9: Moment-Rotor açısı eğrileri

#### 4. Sonuç

Bu çalışmanın sonucunda tetikleme açılarını doğru seçebilmek için 4 fazlı 8/6 kutuplu Anahtarlama Relüktans Motorun endüktans eğrileri doymalı ve doymasız durum için elde edilmiştir. Doymasız durumda hemen hemen aynı eğimle yükselip düşerken doymalı durumda ise farklı eğimleri takip ettikleri gözlenmiştir. Bu grafikler dikkate alınarak tetikleme açıları seçilmelidir. Yanlış seçilen tetikleme açısı ARM nin hem verimini düşürür hemde daha fazla gürültülü çalışmasına neden olabilir. Bununla birlikte moment eğrileri de incelenmiştir. Öncelikle momentteki dalgalılık oranı hesaplanmış ve doymalı ve doymasız durumdaki moment dalga şekillerinin akım ve konuma göre değişimleri gösterilmiştir.

#### 5. Kaynakça

- [1] Cameron D.E, Lang J.H., Umans S.D., "The Origin Of Acoustic Noise In Variable-Reluctance Motors", Proc. IEEE IAS Annual Meeting, 108-115, October,1989.
- [2] Cameron D.E, Lang J.H., Umans S.D., "The Origin And Reduction Of Acoustic Noise In Doubly Salient Variable-Reluctance Motors", Proc. IEEE IAS Annual Meeting, p. 108-115, October,1989.
- [3] Iqbal, H., Ehsani, M., "Torque Ripple Minimization In Switched Reluctance Motor Drives By PWM Current Control", IEEE Transaction On Power Electronics, Vol. 11, No. 1, p. 83– 88, January, 1996.
- [4] Ohdachi, Y., "Optimum Design Of Switched Reluctance Motors Using Dynamic Finite Element Analysis", IEEE Transaction On Magnetics, Vol. 33, No. 2, p.2033 – 2036, March, 1997.
- [5] Koibuchi, K., Onho, T., Sawa K., "A Basic Study For Optimal Design Of Switched Reluctance Motor By Finite Element Method", IEEE Transaction On agnetics, Vol. 33, No. 2 ,p. 2077–2080, March,1997.
- [6] Pillay, P., Cai, W., "A Investigation into Vibration in Switched Reluctance Motors", IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. 35, No. 3,p.589– 596, May/June,1999.
- [7] Sanada, M., Morimoto, S., Takeda Y.,Matsui, N., "Novel Rotor Pole Design of Switched Reluctance Motors to Reduce the Acoustic Noise", IEEE, 107-113, 2000.
- [8] Polat, M., "Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizin Nesnel Tabanlı Bir Programlama Dili ile Gerçekleştirilmesi ve

bir Transformatörün Manyetik Büyüklüklerinin Hesabı", Doktora Semineri, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2005.

- [9] Polat, M., "Anahtarlama Relüktans Motorda Algılayıcısız Konum Kontrolü ve Moment Dalgalılığının azaltılması", Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 2010.
- [10] Polat, M., Kürüm, H., "8/6 Dalgıç Pompa Tipi Anahtarlama Relüktans Motor Boyutlarının Analitik Olarak Tasarlanması", e-journal of New Word Science Academy, Volume 6, Number 1, 2011.
- [11] Özoğlu, Y., "Anahtarlama Relüktans Motorunda Kutup Başlarına Şekil Vererek Moment Dalgalanmasının Azaltılması", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 1999.