



**OPTIMIZATION OF ROTOR STRUCTURE FOR PROVIDING MINIMUM
COGGING MOMENT BY USING OPEN SLOT METHOD IN AXIAL FLUX
PERMANENT MAGNET MOTORS**

Engin AYÇİÇEK*, Nur BEKİROĞLU, İbrahim ŞENOL

Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Esenler-İSTANBUL

Received/Geliş: 16.12.2011 Revised/Düzelme: 02.01.2012 Accepted/Kabul: 04.01.2012

ABSTRACT

Depending on high efficiency high power density and the ability of providing high torque at low speeds, axial flux motors became an important field of late years. However this motor has acoustic noise and stroke vibration because of its structure. Throughout this study the ways of lowering cogging moment in axial flux permanent magnet motors has been explored. Open slot structure in stator and different magnet structure and skew methods in rotor has been studied. Effects of different skew angled fan, triangle and elliptical shaped magnets on motor performance has been tested by using 3D finite element analyzing method. Results compared with 140 degree fan type reference motor and improvements in cogging torque component has been showed.

Keywords: Permanent magnet, axial flux motors, cogging torque optimization.

**EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI MOTORLARDA AÇIK OLUK YAPISI KULLANARAK
MİNİMUM VURUNTU MOMENTİ İÇİN ROTOR YAPISININ OPTİMİZASYONU**

ÖZET

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorlar yüksek verim, yüksek güç yoğunluğu ve düşük hızda yüksek moment sağlayabilme özelliklerinden dolayı son yıllarda üzerinde çalışılan önemli bir konu haline gelmiştir. Ancak bu motorların en önemli dezavantajı akustik gürültü ve titreşime neden olan vuruntu momentidir. Bu çalışmada eksenel akılı sürekli mıknatıslı motorlarda vuruntu momentini azaltıcı yöntemler araştırılmıştır. Statorda açık oluk yapısı, rotorda ise farklı mıknatıs yapıları ve kaykık yöntemleri üzerine çalışılmıştır. Farklı kaykık açalarına sahip fan, üçgen ve oval yapıdaki mıknatısların motor performansına etkisi, 3D sonlu elemanlar analizi kullanılarak test edilmiştir. Sonuçlar 140° fan tipi referans motor ile karşılaştırılmış ve vuruntu momenti bileşenindeki iyileşmeler gösterilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Sürekli mıknatıs, eksenel akılı motorlar, vuruntu momenti optimizasyonu.

1. GİRİŞ

Eksenel akılı sürekli mıknatıslı senkron motorlar yapılarından kaynaklanan avantajlarından dolayı son yıllarda üzerine artan oranda çalışmalar yapılan önemli bir konu haline gelmiştir. Özellikle NdFeB ve SmCo gibi yüksek manyetik akı sağlayan mıknatısların bulunması ve üretim

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: e-mail/e-ileti: eaycicek@yildiz.edu.tr, tel: (212) 383 58 42

maliyetlerindeki düşmeler 1980'lerden itibaren sürekli mıknatıslı motorların gelişimine yardımcı olmuştur. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı disk motorları, askeri cihazlar, elektrikli otomobiller gibibir çok uygulamada yüksek verim, düşük kayıplar, küçük hacim ve ağırlık, yüksek güç ve moment yoğunluğu ile yüksek ağırlık/moment oranı gibi avantajlar nedeniyle günümüzde sıkça kullanılan bir motor türü haline gelmiştir. [1-3]

Sürekli mıknatıslı motorların performansı çıkış momentinin kalitesi ile doğrudan orantılıdır ve motorun tasarımında dikkat edilmesi gereken önemli bir konudur. Elektrik motorlarında moment dalgalanmalarının; vuru mu momenti, PWM akım harmonikleri, ideal olmayan zıt EMK dalga şekli ve DC baradaki dalgalanmalar gibi birçok kaynağı mevcuttur. Yüksek hızlarda moment dalgalanmaları sistemin eylemsizliği sayesinde süzülebilir. Ancak, düşük hızlarda moment dalgalanmaları kabul edilemez boyutlarda hız değişimlerine, titreşime ve akustik gürültüye neden olur. Sürekli mıknatıslı motorlarda moment dalgalanmasının en önemli nedenlerinden birisi olan ve düşük hızlı hassas uygulamalarda ciddi sorunlar oluşturan vuru mu momentinin en aza indirilmesi oldukça önemlidir. Sistem eylemsizliğinin büyük olduğu vinç vb. uygulamalarda bu ciddi bir sorun oluşturmayabilir ancak hassas kontrol gerektiren askeri uygulamalar ve elektrikli taşıt uygulamaları gibi uygulamalarda moment dalgalanmasının etkisi motor performansına direkt olarak yansır. İslam vd.[4]

Literatür incelendiğine radyal akılı sürekli mıknatıslı senkron motorlarda (RASM) vuru mu momentini azaltmak için stator oluklarına ya da mıknatıslara eğim verilmesi, mıknatıslara özel şekiller verilmesi ve kaydırılması, yardımcı olukların ya da dişlerin kullanılması, mıknatıs kutbunun optimizasyonu, kesirli sargıların kullanılması gibi birçok teknik uygulanmıştır. Bu tekniklerin bazıları direkt olarak EASM motorlara uygulanabilir. Fakat bu tekniklerin EASM motorlara maliyet yönünden etkisi büyüktür. Literatürde EASM motorlarda stator tarafında vuru mu tuyu azaltıcı önemli çalışmalar teklif edilmesine rağmen bu yapıdaki motorlar, hem üretim zorluğu hem de yüksek maliyeti nedeniyle endüstriyel alanda kendine yer bulamamıştır. [5-7]

Bu nedenle çalışmamızda; üretim kolaylığı ve düşük maliyete öncelik verilerek EASM motorlara uygulanabilir ve endüstriyel uygulamalarda kabul edilebilir sınır olan %2-5 seviyelerine indirilmiş vuru mu momenti azaltıcı yapı üzerinde durulmuştur. Bu yapı, rotor tarafından mıknatıs üzerinde yapılabilecek değişikliklerle beraber, maliyeti düşürecek açık oluk yapısında stator kullanılmasıyla sağlanacaktır.

2. VURUNTU MOMENTİNİN KAYNAĞI VE HESAPLANMASI

Sürekli mıknatıslı motorlarda vuru mu momenti, rotor yüzeyine ya da içine monte edilen mıknatıslarla, stator olukları arasındaki etkileşimin ortaya çıkardığı ve ortalama moment üzerinde olumsuz etkisi olan bir bileşendir. Daha ayrıntılı bir şekilde açıklamak gerekirse, vuru mu momenti rotordaki mıknatısların hareketinden kaynaklanan manyetik alandaki değişim nedeniyle ortaya çıkar.

Vuru mu momenti hesabı için üç aşama vardır. Birinci aşamada, ideal oluksuz yapı için hava aralığındaki akı dağılımı formüle edilir. İkinci aşama da hava aralığı magnetik iletkenliği hesaba katılarak modifiye edilmiş hava aralığı akı yoğunluğu hesaplanır. Üçüncü ve son aşamada ise modifiye edilmiş hava aralığı akı yoğunluğundan vuru mu momenti hesaplanır. Böylece ideal oluksuz makinenin stator yüzeyindeki akı yoğunluğu ifadesi aşağıdaki gibidir.

$$B_{rt}(\theta) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} 2 \frac{\mu_0 M_n}{\mu_r} \frac{np}{(np)^2 - 1} \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{np+1} \cdot \left(\frac{(np-1) + 2 \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{np+1} - (np+1) \left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{2np}}{\frac{\mu_r + 1}{\mu_r} \left[1 - \left(\frac{R_r}{R_s} \right)^{2np} \right] - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \left[\left(\frac{R_m}{R_s} \right)^{2np} - \left(\frac{R_r}{R_m} \right)^{2np} \right]} \right) \cos(np\theta) \quad (1)$$

$$\text{Burada } M_n = 2 \left(\frac{B_r}{\mu_0} \right) \alpha_p \frac{\sin \left(\frac{n\pi\alpha_p}{2} \right)}{\frac{n\pi\alpha_p}{2}},$$

R_m mıknatısın dış yarıçapı, R_s stator dış yarıçapı, R_r rotor yarıçapı, p çift kutup sayısıdır, α_p kutup adımıdır.

Oluk etkisini hesaba katmak için permanans hesaplanır.

$$\lambda_{\text{rel}} = \frac{g + \frac{l_m}{\mu_r}}{g + \frac{\pi}{2} w_1 + \frac{l_m}{\mu_r}} \quad (2)$$

Son olarak vuru mu momenti,

$$T_{\text{cog}}(\theta_1) = \frac{L}{2\mu_0} \sum_{m=1}^{N_s} \left[\int_0^{\frac{w_s}{2}} B_{PM}^2(w_1)(R_s + w_1) dw_1 - \int_{\frac{w_s}{2}}^{w_s} B_{PM}^2(w_2)(R_s + w_2) dw_2 \right] \quad (3)$$

Eşitlik 3'deki integral çözümlürse,

$$T_{\text{cog}}(\theta_1) = \frac{\pi L R_s}{2\mu_0 N} \sum_{m=1}^N \left[B_{PM}^2 \left(\frac{2\pi}{N} m + \theta_1 \right) (R_M + g_a) \text{ssg} \right] \quad (4)$$

elde edilir [12].

3. REFERANS SEÇİLEN MOTOR YAPISI

Bu çalışmada ki analizlerde [11] numaralı kaynaktaki detayları verilen 24 oluklu, 8 kutuplu, 2 rotor - 1 statorlu, aksel akılı, statoru silisli lamineli, rotoru ise bir disk ve yüzeye yerleştirilmiş fan tipi mıknatıslardan oluşan sürekli mıknatıslı motor referans olarak kullanılmıştır. Bu yapıda vuru mu momentini azaltmak için herhangi bir teknik uygulanmamıştır. Ancak rotor tarafında uygulanacak teknikler için motor yapısında, [11] numaralı kaynaktan farklı olarak statorda açık oluk yapısı üzerine çalışılmıştır. Motor yapısında oluk açıklığının artması ile ortaya çıkan vuru mu momentinin 2,5 kat arttığı görülmüştür.

Motor performansı 3D SEY yazılımı olan Maxwell kullanılarak analiz edilmiştir. Tasarlanan motorun mıknatısları için programın kendi kütüphanesinde bulunan NdFe35 mıknatıs yapısı seçilmiştir. Seçilen mıknatıs özellikleri Çizelge 1'de verilmiştir. Bu mıknatıs güçlü çekim gücüne sahip nadir element adı verilen Neodium Iron Boron (NdFeB) türü mıknatıslardandır.

Çizelge 1. NdFe35 mıknatıs yapısının datası

Geçirgenliği	1.0997785406
İletkenliği	6.25e+005 siemens/metre
Artık mıknatıslanma (Hc)	-8.9e+005 amper/metre
Mıknatıs akı yoğunluğu (Br)	1.23 Tesla

Çalışmada kullanılan referans motorun parametreleri Çizelge 2'de verilmiştir

Çizelge 2. EASM referans motorun parametreleri

Stator dış yarıçapı	89mm	
Stator iç yarıçapı	50mm	
Mıknatis kalınlığı	7.2mm	
Stator aksel kalınlığı	22mm	
Oluk / kutup / faz	1	
Kutup sayısı	8	
Hava aralığı	0.8mm	
Faz sayısı	3	
Oluk sayısı	24	
Oluk Açıklığı	Stator çalışmaları için	3 mm
	Rotor çalışmaları için	7 mm

4. EKSENEL AKILI SÜREKLİ MIKNATISLI MOTORLARDA VURUNTU MOMENTİNİ AZALTMA YÖNTEMLERİ

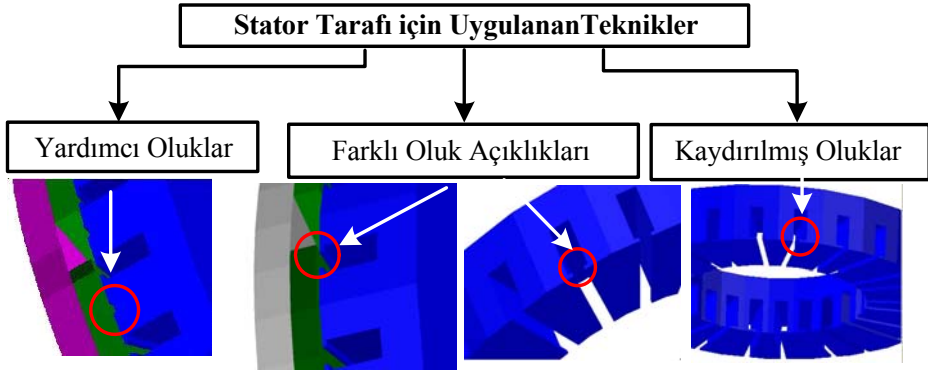
Vuruntu momenti minimizasyon teknikleri sürekli mıknatıslı motorlarda stator ve rotor tarafında yapılan değişiklikler olmak üzere iki ana grupta özetlenebilir.

4.1. Stator Tarafında Uygulanan Teknikler

Bu çalışmada stator tarafında; farklı oluk açıklıkları, yardımcı oluk eklenmesi ve kaydırılmış oluk yapıları denenmiştir. Stator tarafında üzerine çalışma yapılan teknikler Şekil 1’de verilmiştir.

Maxwell yazılım programı kullanılarak yapılan çalışmalarda, Çizelge 2’de parametreleri verilen referans motorda 3mm olan stator oluk açıklıkları, önce 2 mm ve 4 mm olarak denenmiş sonra da yardımcı oluk ekleme ve oluk kaydırma teknikleri kullanılarak sonuçlar alınmıştır. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar Çizelge 3’de ve grafik olarak toplu gösterilmesi ise Şekil 2’de verilmiştir. Elde edilen değerlere göre en büyük değişim % 50,94 ile 2 mm’lik oluk açıklığının denendiği modelde elde edilmiştir. Beklendiği gibi oluk açıklığı azaltıldıkça vuruntudaki azalma yüksek olmaktadır. Çünkü bu şekilde relüktans (manyetik direnç), etkisi azaltılmaktadır.

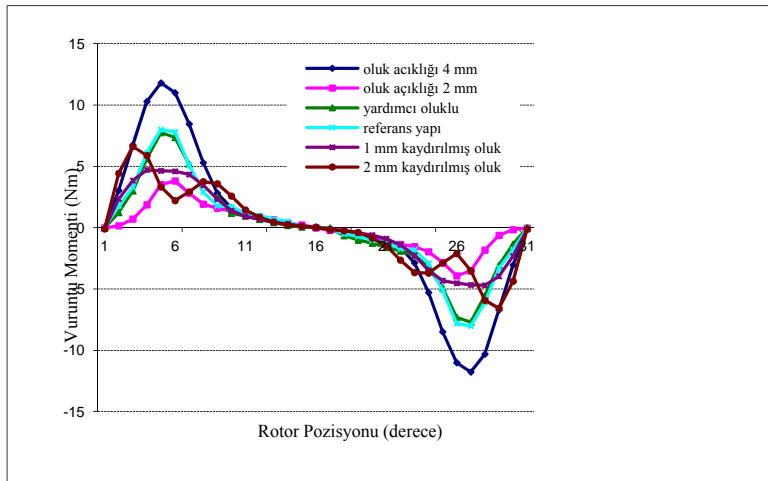
Stator tarafında yapılan çalışmaların sonuçları referans motorun vuruntu değerleri ile karşılaştırıldığında, uygulanabilirlik açısından kabul edilebilir olmasına karşın bu yöntemlerin stator tarafındaki yapı değişikliğinden kaynaklanan üretim zorluğu ve maliyetinden dolayı tercih edilmemiştir. Bundan dolayı çalışmamızda açık oluk yapısı ile rotor tarafında uygulanacak düşük maliyetli teknikler üzerinde yoğunlaşmıştır.



Şekil 1. Stator tarafında uygulanan teknikler

Çizelge 3. Stator tarafında uygulanan teknikler

Stator tarafında kullanılan teknikler	Vuruntu tepe değeri [Nm]	Referans motora göre değişim
Oluk açıklığı 2 mm	3,9	% 50,94 düşüş
Oluk açıklığı 4 mm	11,81	% 47,6 artış
Yardımcı oluk ekleme	7,75	% 3,1 düşüş
1 mm kaydırılmış oluk açıklığı	4,7	% 41,25 düşüş
2 mm kaydırılmış oluk açıklığı	6,6	% 16,98 düşüş
Referans motor	8	Stator teknikleri için referans yapısı



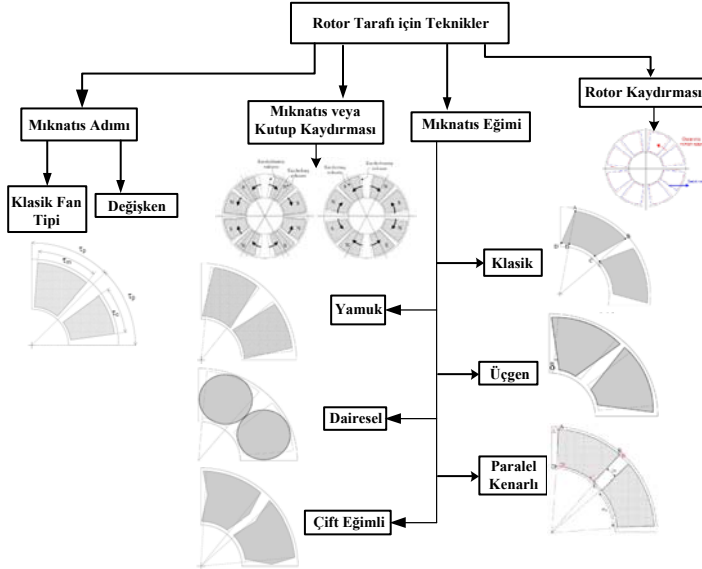
Şekil 2. Stator tarafında uygulanan tekniklerin sonuçları

4.2. Rotor Tarafından Uygulanabilecek Teknikler

EASM motorlarda vuruğu momentini azaltmak için stator tarafında yapılan düzenlemeler hem üretim zorluğu hem de yüksek maliyeti nedeniyle endüstriyel alanda kendine yer bulamamıştır. Bu sebeple bu tür motorlar üzerine yapılan çalışmalar daha çok rotor tarafında yapılan iyileştirmelere yoğunlaşmıştır. EASM motorlarda rotor tarafından uygulanabilecek teknikler aşağıda özetlenmiştir.

EASM motorlarda vuruğu momentini azaltmak için en yaygın kullanılan metotlardan birisi mıknatıs adımının kutup adımına oranının uygun bir değerde seçilmesidir. Bilindiği gibi, vuruğu momenti, mıknatıs kutuplarının kenarları ile stator olukları arasındaki etkileşimden oluşur. Bu nedenle, gerek vuruğu momenti dalga şekli, gerekse tepe değeri mıknatıs adımına bağlıdır. Mıknatıs adımı azaltılarak mıknatıs kaçak akısı da azaltılabilir. Fakat mıknatıs akısı, dolayısıyla ortalama moment de azalmış olur. Bu nedenle uygun seçilecek bir mıknatıs adımıyla vuruğu momenti istenilen seviyelere düşürülürken ortalama momentte de ciddi bir düşüşe sebep olmamalıdır.

Klasik kaykık sürekli mıknatıslı motorlarda sıkça kullanılan basit ve etkili vuruğu moment azaltma yöntemlerinden biridir. Sürekli mıknatıslı motorlarda kaykık, stator olukları ya da rotor mıknatısları olmak üzere iki şekilde gerçekleştirilir. Rotor mıknatıslarına kaykık vermek düzlemsel mıknatıs yüzeyinden dolayı stator oluklarına göre çok daha basit ve ucuz bir yöntemdir. Bu nedenle rotor mıknatıslarının kaykısı EASM motorlarda sıkça kullanılmaktadır.



Şekil 3. Rotor tarafında uygulanabilecek teknikler, Yolacan vd.[11]

Vuruğu moment minimizasyonu için başka bir etkili metot bitişik mıknatısları birbirine göre kaydırmaktır. Ancak mıknatıslar simetrik konumlarından kaydırıldığında mıknatısın bir tarafındaki kaçak akı artarken diğer tarafındaki kaçak akı azalacaktır. Bu yöntemin başka bir dezavantajı ise zıt EMK dalga şeklinin bozulması ve moment dalgalanmasına neden olmasıdır.

Vuruğu momentin fazı ve tepe değeri mıknatıs adımı ile değişkenlik gösterir. Bu nedenle bitişik mıknatıslarda farklı mıknatıs adımları kullanılarak EASM motorlarda vuruğu momenti daha fazla düşürülebilir. Bu metodun en büyük dezavantajı ise farklı mıknatıs adımları

için farklı kalıplar oluşturularak iki farklı mıknatis seti yaratmaktadır. Bu da üretim maliyetinin artması anlamına gelmektedir.

Çift hava aralıklı EASM motorlarda vuruğu momenti, her bir hava aralığındaki vuruğu momentlerin toplamına eşittir. Bundan dolayı rotorların biri diğerine göre ötelenirse her bir hava aralığındaki vuruğu momentlerinin toplamı toplam vuruğu momentini vereceğinden, toplam vuruğunun tepe değeri aşağıya çekilebilir. Bu tekniklerin gösterimi Şekil 3'de verilmiştir. [7-10] Rotor tarafında yapılan çalışmaların detayları ve sonuçları Bölüm 5'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

5. ÜZERİNE ÇALIŞILAN MIKNATIS YAPILARI VE SONUÇLARI

Fan tipi, üçgen tip ve oval tip mıknatislar için değişik mıknatis adımları kullanılarak SEY ile alınan sonuçlar Çizelge 4 - 6 arasında verilmiştir. Bu sonuçlara göre; referans olarak alınan 140 derece fan tipi yapı için vuruğu momenti tepe değeri 19,518 Nm olarak elde edilmiş ve referans motora göre fan tipi mıknatisli modeller arasından 126 derecede % 92,51 ile maksimum düşüm gözlenmiştir. Bu açı değerinde fan tipi mıknatisli motorda optimum değer olan 1,462 Nm. moment elde edilmiştir. Üçgen tipi mıknatisli modeller arasından 162 derecede % 85,3 ile maksimum düşüm gözlenmiştir. Bu açı değerinde üçgen tipi mıknatisli motorda optimum değer olan 2,58 Nm. moment elde edilmiştir. Oval tipli mıknatisli modeller arasından 137 derecede % 89,527 ile maksimum düşüm gözlenmiştir. Bu açı değerinde oval tip mıknatisli motorda optimum değer olan 2,044 Nm. moment elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların grafik olarak gösterilmesi Şekil 4-7 arasında verilmiştir.

Çizelge 4. Fan tipli mıknatis yapılarının vuruğu momenti değerlerinin referans motorla kıyaslanması

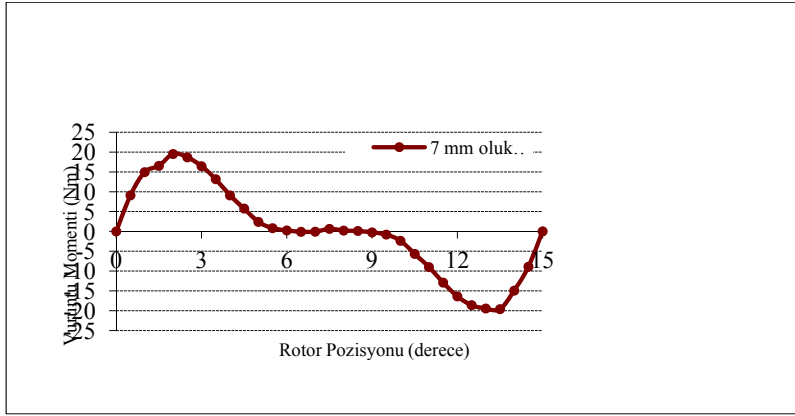
Mıknatis Adımı	Vuruğu tepe değeri [Nm]	Referans motora göre değişim
100	24,802	% 27,06 artış
120	12,51	% 35,89 düşüş
122	8,18	% 58,88 düşüş
125	2,976	% 84,75 düşüş
125,5	2,28	% 88,31 düşüş
126	1,462	% 92,51 düşüş
126,5	2,26	% 88,4 düşüş
128	5,28	% 73,94 düşüş
130	9,044	% 53,66 düşüş
140	19,518	Referans Motor

Çizelge 5. Üçgen tipli mıknatis yapıların vuruğu momenti değerlerinin referans motorla kıyaslanması

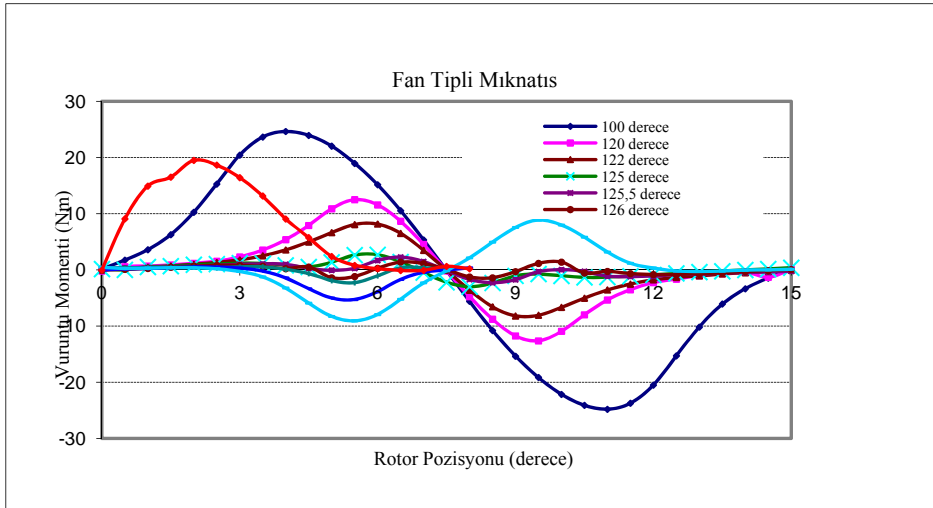
Mıknatis Adımı	Vuruğu tepe değeri [Nm]	Referans motora göre değişim
152	3,62	% 84,31 düşüş
156	3,056	% 84,96 düşüş
160	2,934	% 84,96 düşüş
162	2,868	% 85,3 düşüş
164	3,104	% 84,09 düşüş
168	3,3	% 82,99 düşüş
170	3,514	% 81,99 düşüş
172	3,964	% 79,69 düşüş
180	5,206	% 73,32 düşüş

Çizelge 6. Oval tipli mıknatis yapıların vuruntu momenti değerlerinin referans motorla kıyaslanması

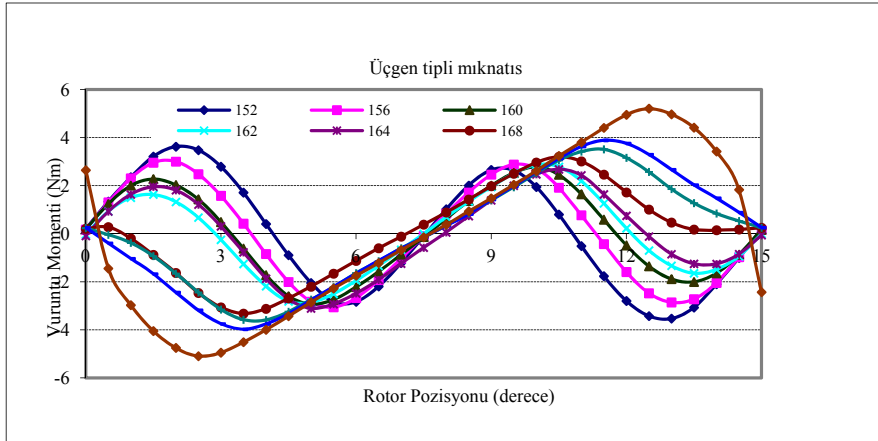
Mıknatis Adımı	Vuruntu tepe değeri [Nm]	Referans motora göre değişim
130	8,538	% 56,25 düşüş
135	3,1	% 84,117 düşüş
137	2,044	% 89,527 düşüş
138	2,736	% 85,98 düşüş
139	2,738	% 85,971 düşüş
141	3,926	% 79,8 düşüş
154	7,628	% 60,91 düşüş



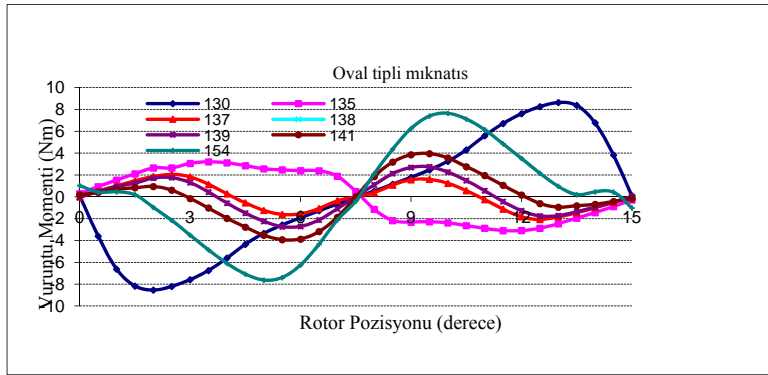
Şekil 4. Rotor tarafında uygulanan teknikler için referans seçilen motorun vuruntu momenti eğrisi



Şekil 5. Fan tipli mıknatis için vuruntu momenti eğrileri



Şekil 6. Üçgen tipli mıknatis için vuruğu momenti eğrileri



Şekil 7. Oval tipli mıknatis için vuruğu momenti eğrileri

6. SONUÇLAR

Bu çalışmada EASM motorlarda stator ve rotor yapılarındaki düzenlemelerle vuruğu momenti azaltma yöntemleri incelenmiştir. Çift rotor-tek statorlu 140° fan tipi EASM motor referans motor olarak kullanılmıştır.

Stator tarafında farklı oluk açıklıkları, yardımcı oluk ekleme ve kaydırılmış oluk açıklıkları yöntemleri denenerek vuruğu momenti değerleri tespit edilmiştir. Rotorda ise farklı mıknatis yapıları ve bu yapılara ait farklı mıknatis adımları için vuruğu momenti değerleri belirlenmiştir. Stator tarafında yapılan çalışmaların sonuçları kabul edilebilir olmasına karşın, stator tarafındaki yapı değişikliğinden kaynaklanan üretim zorluğu ve yüksek maliyetten dolayı bu düzenlemeler tercih edilmemiştir.

Rotor tarafında yapılan çalışmalarda, fan, üçgen ve oval mıknatis yapıları için farklı mıknatis adımları 3D sonlu elemanlar yöntemi ile modellenip, analiz edilmiştir. Çalışmada, 126° fan tipindeki rotor yapısında vuruğu momenti referans motorun vuruğu momenti değerine göre % 92,51 oranında düşürülmüştür.

Stator ve rotor tarafında uygulanan her bir tekniğin birbirlerine göre vuruğu momenti, ortalama moment ve maliyet açısından avantaj ve dezavantajları mevcuttur. Optimum sonuçlar

için çalışmaların ortalama moment üzerindeki etkilerine de bakılmalı ve motor üretimi yapılarak deneysel sonuçlar ile SEY sonuçlarının karşılaştırılması gerçekleştirilmelidir.

REFERENCES / KAYNAKLAR

- [1] González D. A., Tapia J. A., and Letelier A., Bettancourt "Design Consideration to Reduce Cogging Torque in Axial Flux Permanent-Magnet Machines" *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 43, No. 8, August 2007.
- [2] Hwang C.C., Wu M.H., Cheng S.P., "Influence of pole and slot combinations on cogging torque in fractional slot PM motors" *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 304 (2006).
- [3] Hüner E., ve Aküner C., "Eksenel Akıllı Motorlarda Uygulanan Kontrol Yöntemlerine İlişkin Bir İnceleme" 5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), 13-15 Mayıs 2009, Karabük, Türkiye.
- [4] İslam R., , Husain I., Fardoun A.,and McLaughlin K., "Permanent-Magnet Synchronous Motor Magnet Designs With Skewing for Torque Ripple and Cogging Torque Reduction" *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 45, No. 1, January/February 2009.
- [5] Aydın M., Qu, R., and Lipo T. A., "Cogging torque minimization technique for multiple-rotor, axial-flux, surface-mounted-PM machines: alternating magnet polearcs in facing rotors," *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, pp.555-561, 2003.
- [6] Zhu, Z. Q., Ruangsinchaiwanich S., Schofield N., and Howe D., "Reduction of Cogging Torque in Interior-Magnet Brushless Machines" *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 39, No. 5, September 2003.
- [7] Aydın, M., Zhu, Z., Lipo Q., and Howe D., "Minimization of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines: Design Concepts" *IEEE Transactions On Magnetics*, Vol. 43, No. 9, September, 2007.
- [8] Zhu Z. Q., Ruangsinchaiwanich S., and Howe D., "Synthesis of cogging torque from a single stator slot in permanent magnet machines," *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol.42, No.3, pp.650-657, 2006.
- [9] Letelier A., Tapia J. A., Wallace R., and Valenzuela A., "Cogging torque reduction in an axial-flux PM machine with extended speed range," *IEEE International Electrical Machines and Drive Conference*, pp.1261-1267, 2005.
- [10] Zhu Z.Q., Ruangsinchaiwanich S., Chen Y., and Howe D., "Evaluation of superimposition technique for calculating cogging torque in permanent magnet brushless machines," *IEEE Trans. Magnetics*, vol.42, no.3, pp.1597-1603, 2006.
- [11] Yolacan E., Ozyurt E., and Aydın M., "Magnet Shape Optimization of A Slotted Surface-Mounted Axial Gap PM Motor For Reducing Cogging Torque" *XIX International Conference on Electrical Machines – ICEM, Rome, 2010*.
- [12] G. Sooriyakumar, R. Perryman ve S. J. Dodds, (2007). "Improved Cogging Calculation Methods For Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors", *Advances in Computing and Technology, The School of Computing and Technology 2nd Annual Conference University of East London, 222-227*.