

# KÜÇÜK GÜÇLÜ RÜZGAR TÜRBİNLERİ İÇİN 3D SEY PROGRAMI İLE IPMS ALTERNATÖRÜN ELEKTROMANYETİK TASARIMI VE ANALİZİ

Engin HÜNER<sup>1\*</sup>, Yekta ATAÖZDEN<sup>2</sup>

[engin.huner@klu.edu.tr](mailto:engin.huner@klu.edu.tr), [ataozdenyekta@gmail.com](mailto:ataozdenyekta@gmail.com)

<sup>1</sup>Kirkkareli Üniversitesi Teknoloji Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği, Kirkkareli

<sup>2</sup>Hisar Eğitim Vakfı Okulları, Kemerburgaz İstanbul

## Özet

Yapılan bu çalışmada mikro güce sahip rüzgar türbinleri için içten rotorlu sabit mıknatıslı senkron (İRSMS) alternatörün elektromanyetik tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bunun için ANSYS firmasının sonlu elemanlar yöntemini (SEY) kullanan elektromanyetik tasarım programı kullanılmıştır. Tasarlanan İRSMS alternatör radyal akılıdır. Rotor 12 adet mıknatıstan, stator ise 36 adet oluktan oluşmuştur. Rotor mıknatısları yüzey yerleştirmeli yapılmıştır. Tasarımın oluk yapısı ve kutup ölçüleri 3d maxwell programında analiz edilerek optimize edilmiştir. Yapılan manyetik analizler sonucunda oluk açıklığı ve hava aralığı değerleri vuru moment ve ortalama manyetik akı yoğunluğu açısından incelenerek optimum değerleri belirlenmiştir.

**Anahtar Kelime:** Mikro Rüzgar Türbini, Radyal Akılı Alternatör, Sabit Mıknatıs, Elektromanyetik Analiz

## ELECTROMAGNETIC DESIGN AND ANALYSIS OF AN IPMS ALTERNATOR FOR MICRO WIND TURBINE VIA 3D FEA PROGRAM

### Abstract

In this study, the electromagnetic design of the Internal Permanent Magnet Synchronous (IPMS) Alternator of the micro powered wind turbines. For this the electromagnetic design program of ANSYS company that uses finite element method (FEM). The designed IPMS alternator has radial flux. The rotor is made out of 12 magnets while the stator is made out of 36 slots. Rotor magnets are made to stick to the surface. Upon the magnetic analyses, the optimum value was determined after investigating the slot opening and air gaps for the cogging moment and overall magnetic flux.

**Keywords:** Micro Wind Turbine, Radial Flux Alternator, Permanent Magnet, Electromagnetic Analysis

Sorumlu Yazar: Engin HÜNER\* 0288 214 20 83, e-posta: [engin.huner@klu.edu.tr](mailto:engin.huner@klu.edu.tr)

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda yüksek manyetik akıya sahip neodyum mıknatıslardaki gelişmeler sabit mıknatıslı alternatörler üzerine yapılan çalışmaları arttırmıştır[1]. Bununla birlikte ekonomik olarak özellikle yurtdışından çok sayıda sabit mıknatıslı küçük güçlü rüzgar türbini ithal edilmiştir. Bunların birçoğu düşük performanslıdır. Ayrıca sabit mıknatıslı radyal akılı alternatörler üzerine de hem prototip hem ticari üretimler görülmektedir. Bu alternatörlerin en büyük avantajı uyarımın sabit mıknatıs tarafından sağlanmasından dolayı verimlerinin klasik yabancı uyarımlı alternatörlere göre daha yüksek olmasıdır[2, 3]. Literatürde prototip çalışmaların yanı sıra güneş enerjisi sistemleri ile hibrid sistemleri oluşturulması ile ilgili olarak da yapılan çalışmalar mevcuttur. Özellikle kırsal bölgeler ya da enerji hatlarına ulaşmanın zor olduğu noktalarda küçük rüzgar türbinleriyle oluşturulan hibrid sistemlerinde önemi vurgulanmaktadır[4]. Dolayısıyla küçük güçlü rüzgar türbinleri için yüksek verimli alternatörlerin geliştirilmesi önem kazanmaktadır. Sabit mıknatıslı alternatör tasarımında SEY kullanan programlar öne çıkmaktadır. SEY kullanan programlardan biri de ANSYS firmasının maxwell programıdır. Sabit mıknatıslı alternatör geliştirilmesi aşamasında birçok çalışmada ANSYS firmasının maxwell programı ile manyetik analizler gerçekleştirilmiştir. Manyetik analizleri maxwell ile gerçekleştirilerek yapılan çalışmalarda programın geçerliliği ortaya konmuştur[5, 6, 7, 8, 9].

Bu çalışmada içten rotorlu sabit mıknatıslı senkron alternatörün manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle küçük güçlü ithal edilmiş bir alternatör baz alınarak manyetik analizleri gerçekleştirilmiştir. Manyetik analizler ışığında hava aralığı ve oluk büyüklükleri optimize edilmiştir. Yapılan bu çalışma sonrası optimize edilmiş değerlere göre İRSMS alternatörün üretiminin yapılması amaçlanarak hem manyetik analiz programının üstünlüğü ortaya konulacak hem de program ile optimize edilen parametrelerin deneysel verileri ispat edilecektir.

## 2. METARYEL VE METOD

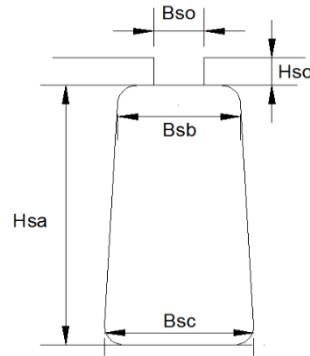
### 2.1.İRSMS Alternatörün Tasarım Parametreleri

İRSMS alternatörün öncelikle mekaniksel parametrelerine göre 3d tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarımda kullanılan mekaniksel ve elektriksel parametreleri tablo 1 'de verilmiştir.

**Tablo 1.** İRSMS Alternatörün Mekaniksel ve Elektriksel Parametreleri

Stator Ölçüleri		Rotor Ölçüleri	
Dış çap (mm)	134	Dış çap (mm)	84
İç çap (mm)	94	Mil çap (mm)	20
Nüve uzunluk (mm)	14	Hava aralığı (mm)	8
Oluk Sayısı	36	Mıknatis Tipi	Neodyum N35
İletken Çapı (mm)	1	Kutup Sayısı	12
P (watt)	600	Mıknatis ölçüsü (mm)	20 x 14 x 5
Gerilim (V)	12	N (d/dk)	500

İRSMS alternatörün tablo 1.'de verilen mekaniksel ve elektriksel parametrelerinde özellikle hava aralığı çok yüksek bir değer seçilmiştir. Alternatör tasarım parametrelerinin en önemlilerinden biride hava aralığıdır. Bu değer minimum vuru momentini karşılayacak şekilde seçilmesi gerekmektedir. Yoksa tasarlanan alternatörün elektriksel parametreleri zayıf olacaktır. Bu çalışmada değerlendirilen ikinci parametre oluk ağzı açıklığıdır. Bu parametrede hava aralığı relüktansını etkileyeceği için vuru momentine etkisi ve hava aralığı manyetik akısına etkisi olacaktır. Bu da elektriksel parametrelerin değişmesine neden olacaktır. Aşağıdaki şekilde İRSMS alternatörün bir oluşunun şekli verilmiştir.



**Şekil 1.** İRSMS Alternatörün Stator Oluğu

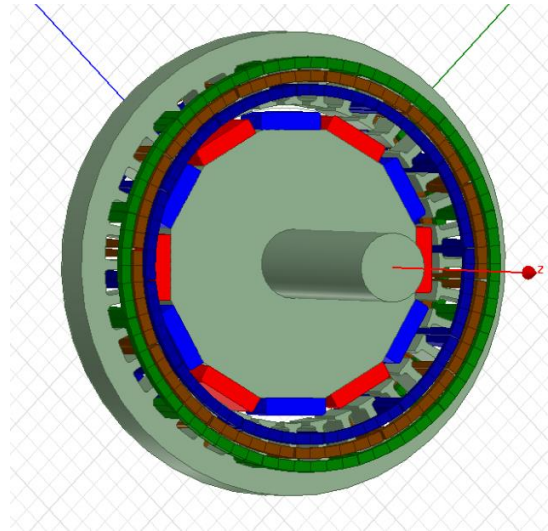
Şekil 1'de verilen oluk yapısında köşe pah kırımlarının yarıçapı 1mm'dir. Bunun dışındaki

diğer parametreleri tablo 2’de verilmiştir. ANSYS maxwell ile yapılan manyetik analizlerde en önemli parametrelerden biri olan Bso’ın değışimi üzerine durulmuştur. Diğer oluk yapısı parametreleri daha çok oluklara yerleştirilecek iletken sayısına etki eden parametrelerdir. Tasarım ve oluk ölçüleri incelendiğinde bu ölçülerin maksimum iletken sayısına göre belirlendiği görülmektedir. Ayrıca ANSYS maxwell programında değışken parametre sayısı arttırıldıkça değışken sayılarının çarpımı kadar program hesaplama yapmaktadır. Dolayısıyla hesaplama yapılan bilgisayar daha yüksek işlem kapasitesine sahip olmalıdır. Bununla birlikte bunun yerine daha önemli parametrelerin birbirleri ile olan ilişkilerini hesaplatmak zaman ve yapılabirlik açısından daha önemlidir.

**Tablo 2.** İRSMS Alternatörün Stator Oluğunun Ölçüleri

Bso (mm)	2.5
Bsb (mm)	6
Bsc (mm)	7.5
Hso (mm)	1.5
Hsa (mm)	14

Tablo 1-2 ve şekil 1’e göre İRSMS alternatörün 3d modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan 3d model şekil 2’de verilmiştir.

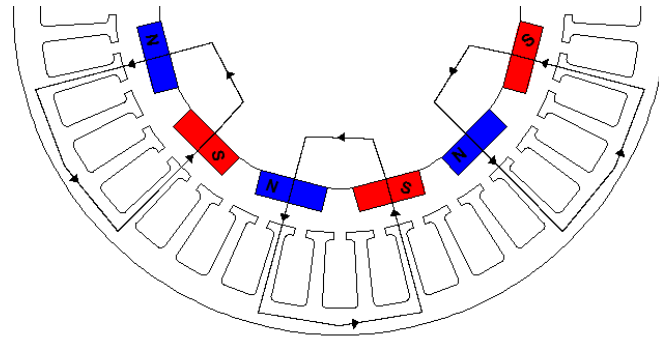


**Şekil 2.** İRSMS Alternatörün 3d Modeli

Şekil 2’de verilen 3d model de mavi-kahverengi-yeşil renkler ile verilen İRSM alternatörün sargılarıdır. Her katta 3 faza ait sargılar mevcuttur. Sargılardan geçen akım yönleri üretilen akımın bir “t” zamanı için sabit alınmıştır.

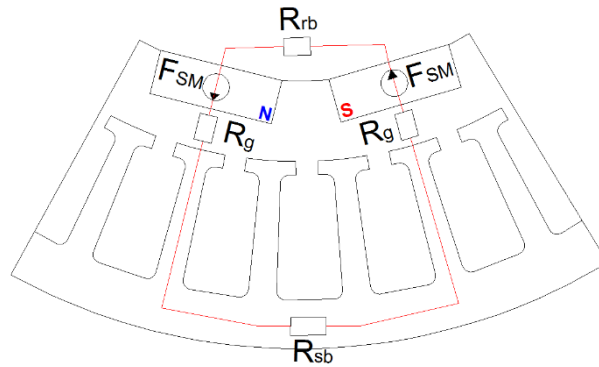
## 2.2.İRSMS Alternatörün Manyetik Eşdeğer Devresi

İçten rotorlu sabit mıknatıslı senkron alternatörde uyarım sargılarının oluşturduğu ana manyetik alanı sabit mıknatıslar yapmaktadır. Manyetik alan dağılımı radyal olarak yani içten dışa ve yarıçapa bağlı olarak bir yol izlemektedir. Şekil 3’de görüldüğü gibi N kutbundan çıkan manyetik akı stator dişine oradan stator boyunduruğuna geçmekte oradan da tekrar S kutbuna girerek rotorun boyunduruğundan devresini tamamlamaktadır.



Şekil 3. İRSMS Alternatörün Manyetik Akı Yolu (1/2 Model)

İRSMS alternatörün manyetik eşdeğer devresi şekil 3 göz önünde tutularak şekil 4’de gösterildiği gibi verilmiştir.



Şekil 4. İRSMS Alternatörün Manyetik Eşdeğer Devresi (N-S Kutbu için)

Şekil 4 manyetik eşdeğer devresine formül 1 ile verilen amper kanunu uygulanarak manyetik alan şiddeti hesaplanır. H manyetik alan şiddetini verir ve birimi AT/m’dir(metre başına amper sarım). I<sub>t</sub> toplam akım değerini l ise toplam uzunluğu ifade eder.

$$\oint H \cdot dl = I_T \quad (1)$$

Manyetik alan şiddeti amper kanununa göre kapalı bir yol boyunca devresini tamamlarsa ve

kaçak akılar göz ardı edilirse formül 2 olarak düzenlenir.

$$H \cdot l_k = N \cdot i \quad (2)$$

Formül 3'de relüktansın genel formülü verilmiştir. Formül 3'de "l" manyetik devrenin uzunluğunu "μ" manyetik geçirgenliği ve "A" kesit alanı ifade etmektedir.

$$\mathcal{R} = \frac{l_k}{\mu \cdot A} = \frac{l_k}{\mu_r \cdot \mu_0 \cdot A} \quad (3)$$

Sırasıyla formül 4,5,6 ve 7 hava aralığı, rotor boyunduruğu, stator boyunduruğu ve neodyum mıknatısın relüktansını ifade etmektedir.

$$\mathcal{R}_g = \frac{l_g}{\mu_0 \cdot A_g} \quad (4)$$

$$\mathcal{R}_{rb} = \frac{l_{rb}}{\mu_{rb} \cdot \mu_0 \cdot A_{rb}} \quad (5)$$

$$\mathcal{R}_{sb} = \frac{l_{sb}}{\mu_{sb} \cdot \mu_0 \cdot A_{sb}} \quad (6)$$

$$\mathcal{R}_{SM} = \frac{l_{SM}}{\mu_{SM} \cdot \mu_0 \cdot A_{SM}} \quad (7)$$

Formül 8'de manyetik eşdeğer devreye göre hava aralığındaki maksimum manyetik akı yoğunluğu verilmektedir. Mıknatısın manyetik akı yoğunluğu 1,2 Tesla düzeyinde alınırsa eşdeğer relüktansın mıknatıs relüktansına oranından hava aralığındaki maksimum manyetik akı yoğunluğu bulunur. Formül 9'da rotor ve stator boyunduruğundaki demir nüvenin geçirgenliğinin havaya göre çok yüksek olmasından dolayı hesaplamada ihmal edilmiştir. formül 9'a göre hesaplandığında maksimum hava aralığı manyetik akı yoğunluğu 0,996 tesla düzeyindedir.

$$B_{g,max} = B_r \cdot \left( \frac{2 \cdot \mathcal{R}_{SM}}{2 \mathcal{R}_{SM} + 2 \mathcal{R}_g + \mathcal{R}_{rb} + \mathcal{R}_{sb}} \right) \quad (8)$$

$$B_{g,max} = B_r \cdot \left( \frac{2 \cdot \mathcal{R}_{SM}}{2 \mathcal{R}_{SM} + 2 \mathcal{R}_g} \right) \quad (9)$$

### 3. SONUÇLAR

İRSMS alternatörün elektromanyetik modeli ANSYS firmasının maxwell programı ile 3 boyutlu olarak oluşturulmuştur. Maxwell programı elektrik makinelerinin manyetik ve transient analizlerinde kullanılmaktadır. Programda öncelikle şekil 2'de verilen 3d model oluşturulmaktadır. İkinci adımda modeldeki her bir malzeme programın kütüphanesinden tanımlanmaktadır. Bir sonraki adımda sargı uyarımları ve analiz ayarlamaları yapılarak analiz başlatılmaktadır.

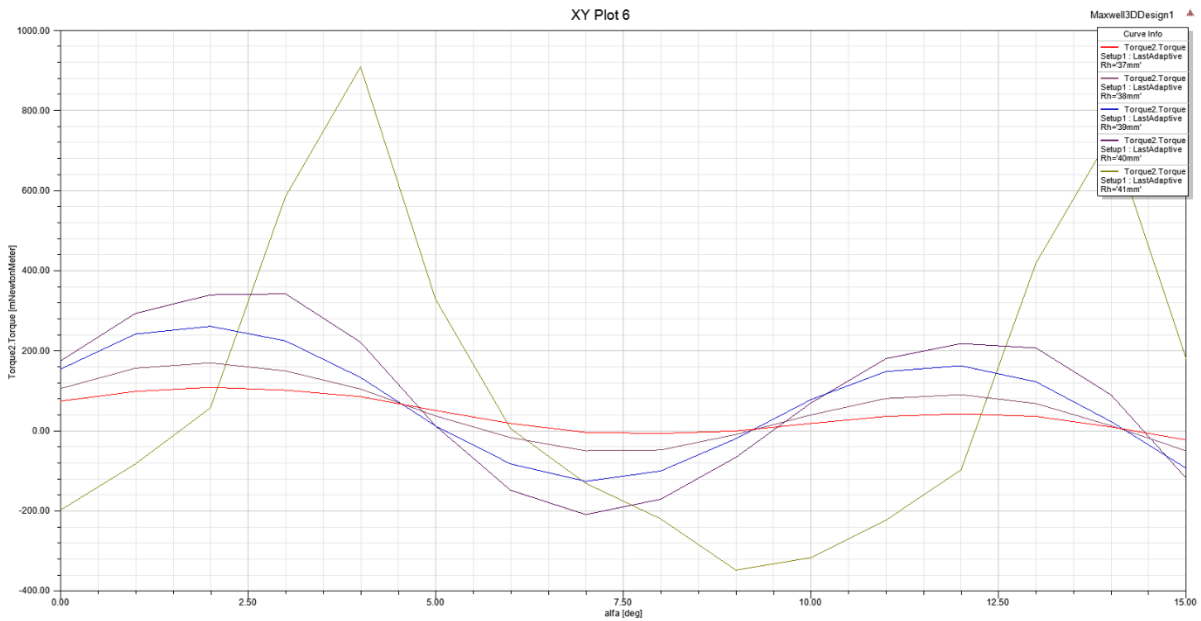
3d Modeli çıkartılan İRSMS alternatör için öncelikle hava aralığının vuru momentine olan

etkisi incelenmiştir. Bunun için modelde tablo 1’de verilen rotor nüvesinin yarıçap değeri “Rh” hava aralığı 1mm’den 5 mm’ye kadar olacak değerler için ayarlanmıştır.

**Tablo 3.** İRSMS Alternatörün Hava Aralığı Değerleri

Rotor Nüvesinin Yarıçapı		Hava Aralığı
Rh (mm)	37	5
	38	4
	39	3
	40	2
	41	1

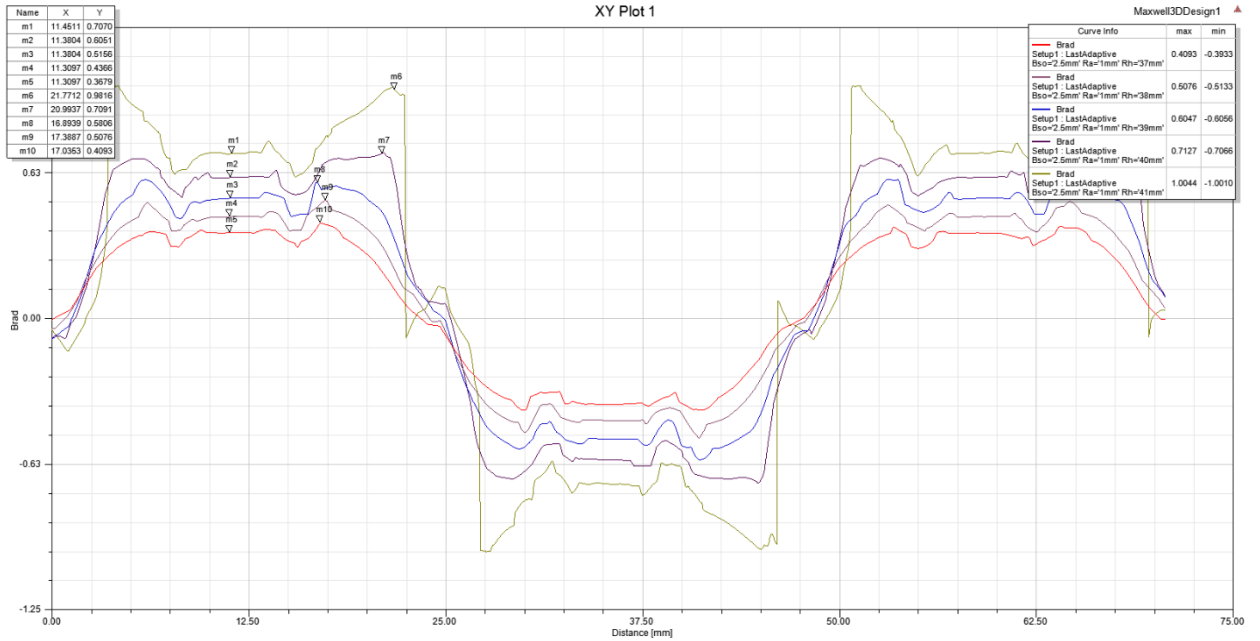
Manyetik analiz sonucunda mile etkiyen vuru mu momenti şekil 5’de verilmiştir. Minimum vuru mu momenti 5mm hava aralığı için elde edilmiştir. 1mm hava aralığında vuru mu momenti değeri 5mm’ye göre 7,6 kat daha fazladır. 2mm hava aralığı için 3 kat, 3mm hava aralığı için 2,33 kat, 4mm hava aralığı için 1,33 kat daha yüksek vuru mu momenti değerine sahiptir. Dolayısıyla hem yüksek hava aralığı manyetik akısı için küçük hava aralığı seçilmeli hem de en uygun vuru mu momentine karar verilmelidir.



**Şekil 5.** İRSMS Alternatörün Vuru mu Momenti

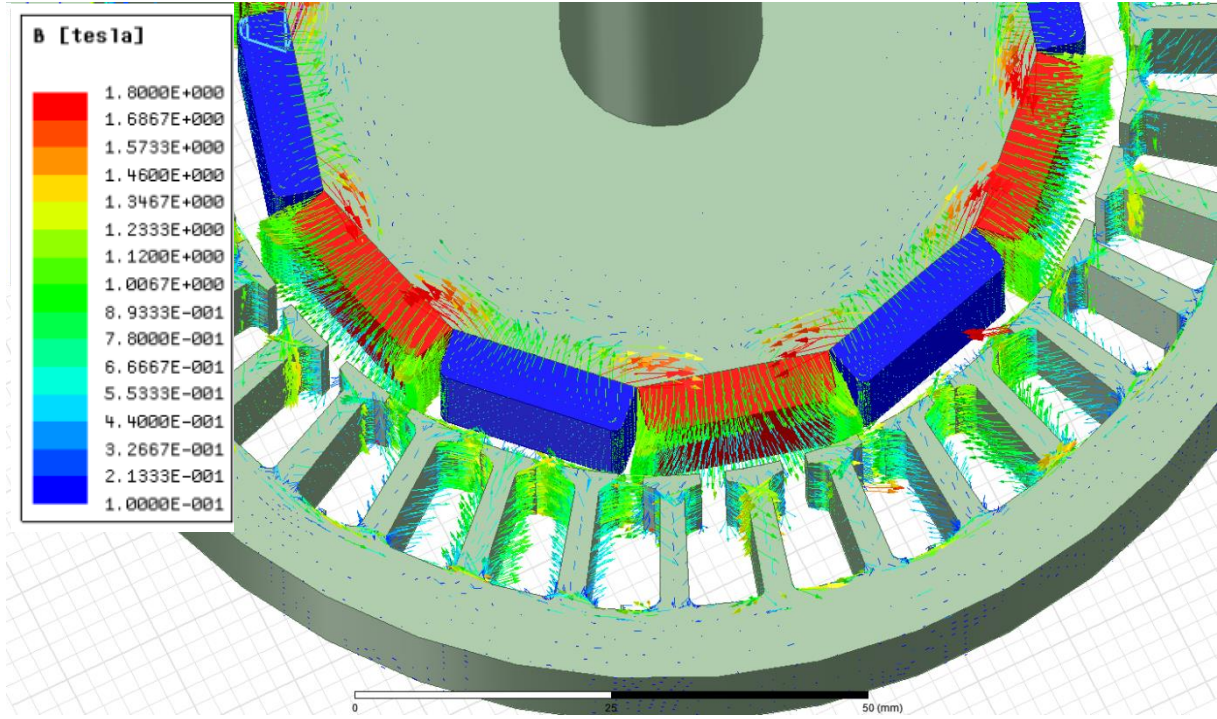


Sırasıyla 1-2-3-4 ve 5mm hava aralığı değerleri için hava aralığındaki manyetik akı yoğunluğu değişimi sonucunda elde edilen veriler şekil 6’da verilmiştir. Her bir hava aralığı için şekil 6 üzerinde maksimum ve minimum noktalar verilmiştir. Görüldüğü gibi 1mm hava aralığı için uç noktalardaki manyetik akı yoğunluğu çok yüksektir. Bu durumda hem vuru mu momentinin değerinin yükselmesine hem de stator nüvesinin uç kısımlarda doyuma giderek performansının düşmesine neden olmaktadır. Özellikle şekil 6 üzerinde verilen m1,m2,m3,m4,m5 noktaları ortalama manyetik akı değeri için bizi bilgilendirir. Tam değerleri bulmak için maxwell programının 3d manyetik analiz sonuçları üzerinden programın araçları ile hesap yapılmaktadır.



Şekil 6. İRSMS Alternatörün Kutup Altında Manyetik Akı Dağılımı

İRSMS alternatörün nüve yüzeyinde ortalama manyetik akı değerinin hesabı için manyetik analizler sonucunda program araçları ile ortalama manyetik akı değeri hesaplatılır. Şekil 7’de 5mm için manyetik akı dağılımı 3d olarak verilmiştir.



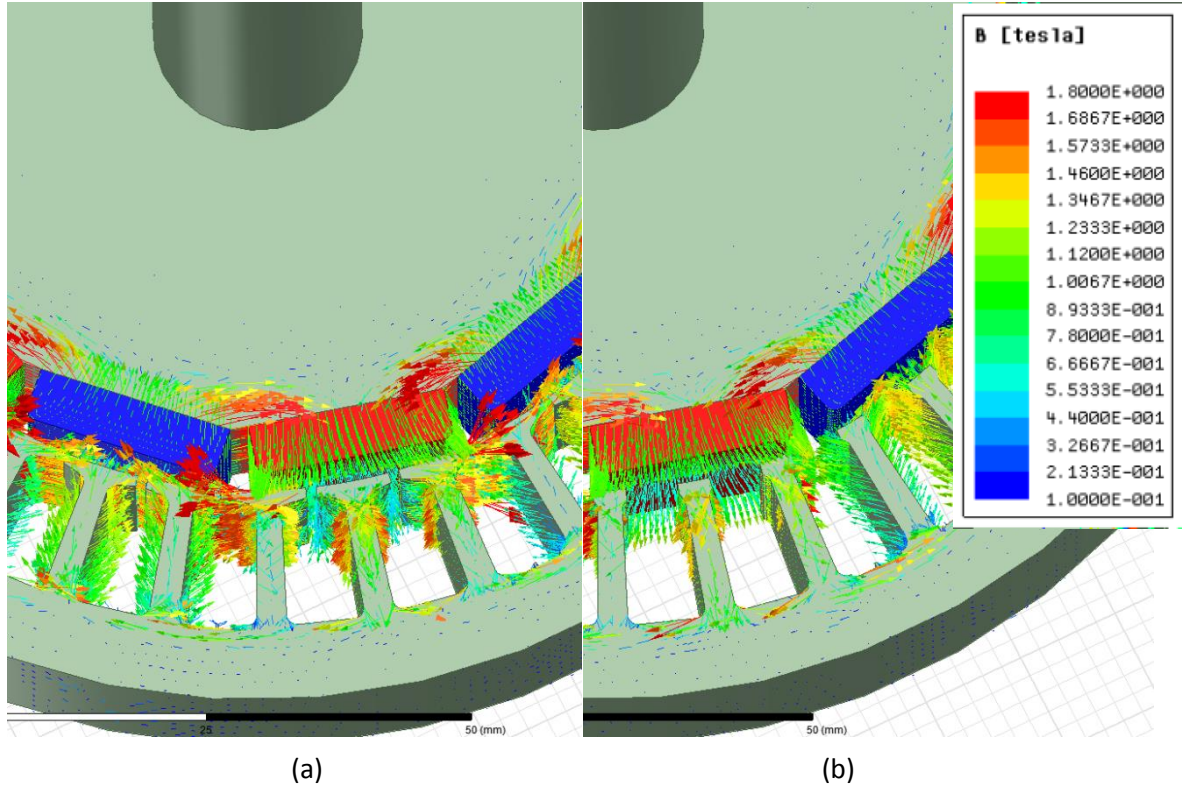
Şekil 7. İRSMS Alternatörün Manyetik Akı Dağılımı (5mm Hava Aralığı İçin)

Tablo 4’de 1,2,3,4 ve 5mm için ortalama manyetik akı değerleri verilmiştir. 1mm hava aralığında 5mm’ye göre ortalama manyetik akı değeri 1,9 katıdır. 2mm hava aralığı için 5mm’ye göre manyetik akı değeri 1,6 katıdır. 3mm hava aralığı için 5mm’ye göre manyetik akı değeri 1,36 katıdır.

**Tablo 4.** İRSMS Alternatörün Ortalama Manyetik Akı Değerleri

Hava Aralığı (mm)	Ortalama Manyetik Akı Değeri (Tesla)
1	0.617943293055892
2	0.51835160883215
3	0.44716183314597
4	0.377622725161037
5	0.324529376279862

Yapılan manyetik analizlerde alınan diğer bir değişken oluk açıklığıdır. Oluk açıklığı nüve yüzeyindeki relüktansı değiştireceği için manyetik analizde değişken bir parametre olarak alınmıştır. Oluk aralığı 1-1,5-2-2,5-3-3,5-4-4,5 ve 5mm olarak alınmıştır. Her bir değer için stator nüvesinin manyetik akı yoğunluğu hesaplatılmıştır.



**Şekil 8.** İRSMS Alternatörün Oluk Açıklığı-Manyetik Akı Dağılımı

a)Bso=1mm, b)Bso=5mm

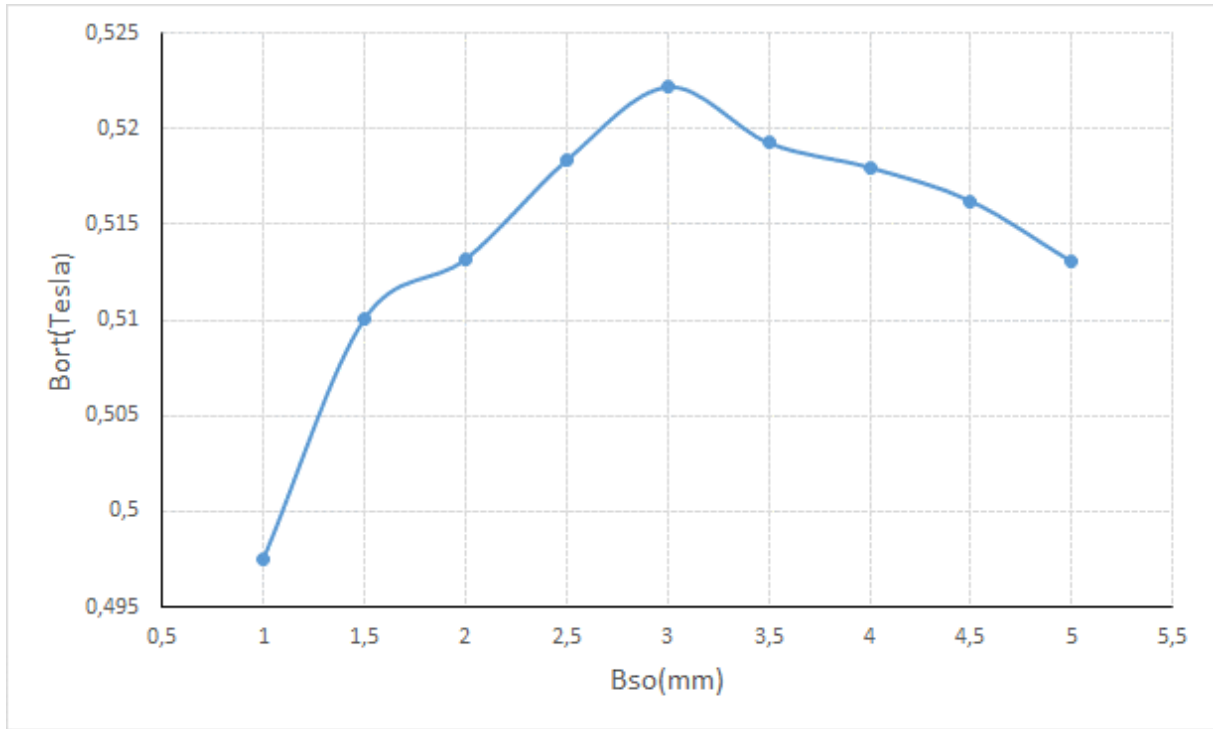
Şekil 8’de Bso=1mm ve Bso=5mm oluk açıklığı için statordaki manyetik akı yoğunluğu dağılımı verilmiştir. Bso=1mm’den 5mm’ye kadar olan ortalama manyetik akı yoğunluğu dağılımlarının değerleri ise tablo 5’de verilmiştir. Tablo 5 incelendiğinde en uygun değer 3mm olduğu görülmektedir.

**Tablo 5.** İRSMS Alternatörün Oluk Açıklığı-Manyetik Akı Dağılımı Değerleri

Oluk Açıklığı Bso (mm)	Ortalama Manyetik Akı Yoğunluğu (Tesla)
1	0.497513625608596
1,5	0.510057308784103
2	0.513190107864249
2,5	0.51835160883215
3	0.522184362871834
3,5	0.519270694550592

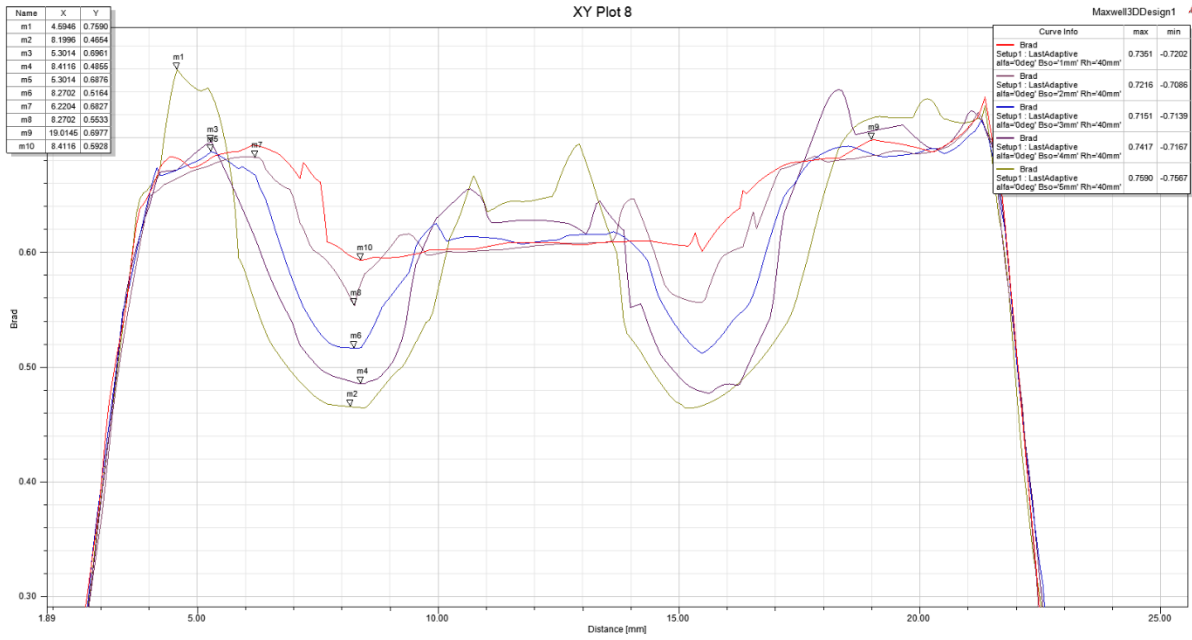
4	0.517979880605255
4,5	0.516228182818103
5	0.513051163726427

Tablo 5'e g6re oluk açıklığına bağlı olarak hesaplanan değerler Şekil 9'daki gibi grafiksel olarak ifade edildiğinde de en y6ksek ortalama manyetik akı yoğunluğu değeri için 3mm'lik oluk aıklığıнын uygun olduğu g6r6lmektedir.



**Şekil 9.** İRSMS Alternat6r6n Oluk Açıklığı-Manyetik Akı Dağılımı Eğrisi

Stator n6vesinin oluk açıklığına bağlı olarak bir kutup altında ki manyetik alan dağılımı Şekil 10'da verilmiştir. Şekil 10'da g6r6ld6ėu gibi oluk açıklığı arttıkça rel6ktansın deėiŐimine bağlı olarak manyetik akı yoğunluğu da deėiŐmektedir. Bu da vuru mu momentini arttırıcı bir etkidir. Manyetik analizde 1-2-3-4 ve 5mm oluk açıklıkları alınmıştır. Her bir oluk açıklığı değerinde maksimum ve minimum noktaların farkı en d6Őuk oluk aıklığıнын değeri baz alınarak karŐılaŐtırılmıŐtır. 5mm açıklıkta 2,79 kat, 4mm açıklıkta 2 kat, 3mm açıklıkta 1,63 kat ve 2 mm açıklıkta 1,23 kat fark vardır.



Şekil 10. İRSMS Alternatörün Kutup Altında Oluk Açıklığına Bağlı Manyetik Akı Dağılımı

#### 4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada piyasada üretilen bir İRSMS alternatör için manyetik analizler gerçekleştirilerek parametreler optimize edilmiştir. Bunun için sırasıyla hava aralığına bağlı vurutu momenti değerleri, hava aralığına bağlı olarak kutup altında manyetik akı yoğunluğu değişimi, hava aralığına bağlı olarak ortalama manyetik akı dağılımı, oluk açıklığına bağlı olarak manyetik akı yoğunluğu dağılımı ve oluk açıklığına bağlı olarak kutup altındaki manyetik akı yoğunluğu değişimi analiz edilmiştir. ANSYS maxwell ile yapılan manyetik analizler sonucunda vurutu momenti için 2mm ve 3mm hava aralığı 5mm ye göre sırasıyla 3 kat ve 2,33 kat daha fazladır. Stator nüvesindeki ortalama manyetik akı yoğunluğu değeri 2mm ve 3mm için 5mm'ye göre sırasıyla 1,6 kat ve 1,36 kat daha fazladır. Farklı oluk açıklığı değerlerinde en yüksek ortalama manyetik akı yoğunluğu 3mm'de 0,5221 tesla olarak analiz edilmiştir. Farklı oluk açıklıklarında maksimum ve minimum değerler arasındaki farkın en düşük oluk açıklığına göre 2mm ve 3mm'de sırasıyla 1,23 kat ve 1,63 kat olarak analiz edilmiştir. Dolayısıyla hava aralığı açısından 2mm ve oluk aralığı açısından vurutu momentini de bir miktar katkı sağlamak için iki değerlerin orta noktası olan 2,5mm değeri seçilerek optimizasyon sağlanır.

## KAYNAKLAR

- [1] Sezenoğlu, C., Balıkçı, A., Aydınlı, F., Küçük Rüzgar Türbinleri için Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Üreteç Uygulaması Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Makineler Tasarım Analitik Model, Elektrik Mühendisleri Odası EMO.
- [2] Kaynaklı, M., Uysal, A., Koçak, E., Bayır, R., Rüzgar Enerjisinden Elektrik Üretiminde Kullanılan Sabit Mıknatıslı Alternatörlerin Arızalarının Tespiti İçin Bilgisayar Destekli Test Standı Üretimi, Rüzgar Enerjisi Sempozyumu, Vol.2, 95-99, 2009.
- [3] Onur, C., Önbilgin, G., Yel Enerjisi Dönüşüm Sistemleri İçin Uygun Generatör Türlerinin Değerlendirilmesi, EMO, 2008.
- [4] Sinha, S., Chandel, S.S., Prospects of solar photovoltaic – micro-wind based hybrid power systems in western Himalayan state of Himachal Pradesh in India, Energy Convers. Manag., 1340–1351, 2015.
- [5] Kurt, Ü., Önbilgin, G., Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina Tasarımında Taguchi Yönteminin Kullanılması, Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Vol.8, 6–9, 2006.
- [6] Upadhyay, P.R., Rajagopal, K.R., FE analysis and computer-aided design of a sandwiched axial-flux permanent magnet brushless DC motor, *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.42, No.10, 3401–3403, 2006.
- [7] Hüner, E., Aküner, M.C., Demir, U., A new approach in application and design of toroidal axial-flux permanent magnet open-slotted NN type (TAFPMOS-NN) motor, Teh. Vjesn. - Tech. Gaz., Vol.22, No.5, 1193–1199, 2015.
- [8] Ayçiçek, E., Bekiroğlu, N., Şenol, İ., Optimizatiön of Rotor Structure For Providing Minimum Cogging Moment By Using Open Slot Method In Axial Flux Permanent Magnet Motors, Journal of Engineering and Natural Sciences, No.212, 392–401, 2012.
- [9] Huner, E., Akuner, M.C., Axial-flux synchronous machines compared with different stator structures for use in working, Prz. Elektrotechniczny, Vol.88, No.11, 174–177, 2012.