

## NEODYUM MIKNATISLI SENKRON GENERATÖRLERDE TASARIM PARAMETRE DEĞİŞİKLİKLERİNİN GENERATÖR VERİMİNE ETKİSİ

Veli TÜRKMEÑOĞLU<sup>1</sup> Serdal ARSLAN<sup>2</sup> Abdullah YUSUFOĞLU<sup>3</sup>

Ahmet FENERCİOĞLU<sup>4</sup> Muharrem ATASORKUN<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Ordu Üniversitesi, 52200, Ordu, TÜRKİYE, turkmen67@hotmail.com

<sup>2</sup> Harran Üniversitesi, 63300, Şanlıurfa, TÜRKİYE, elkserdal@gmail.com

<sup>3</sup> Ordu Üniversitesi, 52200, Ordu, TÜRKİYE, yusufogluabdullah@hotmail.com

<sup>4</sup> Gaziosmanpaşa Üniversitesi, 60250, Tokat, TÜRKİYE, ahmet.fenerciooglu@gop.edu.tr

<sup>5</sup> Ordu Üniversitesi, 52200, Ordu, TÜRKİYE, atasorkun@gmail.com

**Özet-** Dünyada elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu nedenle, mevcut enerji kaynaklarının en iyi şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üreten sistemlerde neodyum mıknatıslı senkron jeneratörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Rüzgar türbinlerinin temel bileşeni olan jeneratörlerin yüksek verimli olarak tasarlanması önem arz etmektedir. Bir senkron jeneratör tasarımı bir çok parametrenin uygun dizilişle olası hale gelmektedir. Tasarımda hayati öneme sahip parametrelerin değiştirilmesi ile jeneratör verimi önemli oranda değişmektedir. Bu çalışmada ANSYS (Maxwell, Rmxprt) elektromekanik ve elektromanyetik tasarım programıyla neodyum mıknatıslı senkron jeneratör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Neodyum mıknatıslı senkron jeneratörün temel parametrelerinin değiştirilmesinin jeneratörün ağırlık ve verimine olan etkisi irdelenmiştir. Tasarım parametrelerinden rotor hava aralığı, kullanılan neodyum mıknatıs türü, stator ve rotorda kullanılan çelik sac türü gibi parametreler birbiriyle uyumlu olacak şekilde değiştirilerek sonuçlar gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler-** Senkron jeneratör, radyal akılı, bilgisayar destekli tasarım, neodyum mıknatıs, ANSYS.

## THE IMPACT OF THE CHANGE IN DESIGN PARAMETERS OF NEODYMIUM MAGNET SYNCHRONOUS GENERATORS ON THE GENERATOR EFFICIENCY

**Abstract-** The global demand for electric power increases day by day, which makes it necessary to use the existing energy sources optimally. Neodymium Magnet Synchronous Generators are widely used in generation electric power from wind power. It is essential that generators, as the main component of wind turbines, be designed as highly efficient. The design of a synchronous generator is created by a proper arrangement of various parameters. Changing parameters that are vitally important in the design changes the efficiency of the generator significantly. In this study, the design

of neodymium magnet synchronous generator was made in ANSYS (Maxwell, Rmxprt) electro-mechanic and electro-magnetic design program. The effect of changing main parameters in Neodymium Magnet Synchronous Generator on the generator's weight and efficiency was scrutinised. The results were observed by changing design parameters harmoniously such as rotor air gap, the type of the neodymium magnet and the type of the steel sheet used in the stator and rotor.

**Key Words-** Synchronous generator, radial flux, computer-assisted design, neodymium magnet, ANSYS.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Dünyada elektrik enerjisine duyulan ihtiyaç giderek artmaktadır. Bu nedenle, mevcut enerji kaynaklarının en iyi şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarından gelen enerjiyi kullanacağımız forma dönüştüren sistem maliyeti ise giderek azalmaktadır. Bunun yanı sıra yenilenebilir enerji kaynaklarından enerji elde etmeye yarayan sistemlerin daha efektif ve modernize edilmesiyle hem verim artışı sağlanacak hem de sistem maliyeti önemli ölçüde azalacaktır. Sabit Miknatıslı Senkron Jeneratörler güvenilirliği nedeniyle yenilenebilir enerji kaynaklarından (rüzgar, su, vb.) elektrik enerjisi üreten sistem uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır.

Yatay eksenli rüzgar türbinleri rüzgarı ön veya arka taraftan almaksızın dönme eksenleri rüzgar yönüne diktir. Bilindiği gibi rüzgarı önden alan sistemlerde türbinin rüzgar yönüne bakması için kuyruk kısımlarına dümen sistemi yerleştirilmektedir. Üç kanatlı türbinler kanat uç hız oranı, güç katsayısının iyi olması ve döndürme momenti düzgün olması nedeniyle tercih edilmektedir. Eşitlik 1 kullanılarak belirli bir rüzgar türbinin üretebileceği teorik güç hesaplanabilir.

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 v^3 \quad (1)$$

Burada;  $\rho$  Hava yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$ ),  $R$  kanat yarıçapı (m),  $v$  Rüzgar hızı (m/s),  $C_p$  Güç katsayısı olarak verilmiştir.

Teorik olarak Betz Limiti  $C_p$ 'nin maksimum değeri 0.59 iken pratikte limit değeri 0,5'dir. Kanat sayısı ve tipine göre bu değer değişmektedir. Üç kanatlı yatay eksenli türbinler için bu değer 0,4 olarak alınabilir. Ayrıca; bu kanat yapısındaki türbinler (6-10) kanat uç hızı (TSR) oranlarına sahiptir. Hava yoğunluğu 25 C derece için  $1,2 \text{ kg/m}^3$  olarak alınabilir. Devir sayısı kanat tipleri ve rüzgar hızına bağlı olarak değişmektedir:

$$n = \frac{60*v*TSR}{2\pi R} \quad (2)$$

Rüzgar enerjisinden elektrik enerjisi üreten sistemlerde neodyum miknatıslı senkron jeneratörler yaygın olarak kullanılmaktadır. Senkron jeneratör tasarımı alanında dünya genelinde birçok araştırma yapılmaktadır. Radyal Akı Sabit Miknatıslı Senkron Jeneratör tasarımında değişik tip rotorlar kullanılmaktadır. Kullanılan bu rotor tiplerinin performansları da birbirinden farklı olmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemiyle sık kullanılan rotor tipleri birbirleriyle karşılaştırılarak indüklenen faz gerilimi- faz açısı ilişkisi yönünden, vuru momentü yönünden, hava aralığındaki akı yönünden, elektriksel açı değişimi verim ilişkisi yönünden incelemesi yapılmış avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur [1]. Yüksek hızlı, yüksek verimli, sabit miknatıslı

senkron jeneratör ve motor sistemi tasarımı çalışmasında farklı rotor tipleri; verdikleri çıkış güçleri yönünden, zık emk oluşturmaları yönünden değerlendirilmiştir. Yine motor ve jeneratör tasarımı rotorda kullanılan farklı manyetik malzemelerin kullanılması ile oluşan çıkış güçleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak yüksek hızlı ve yüksek verimli sabit mıknatıslı senkron jeneratör tasarımı için düşük vuru momentini, yüksek ısı dayanıklılık, düşük rotor kayıpları, jeneratör ağırlığı başına yüksek çıkış gücü, nispeten yüksek frekans ve gerilim, düşük harmonikler gibi kriterlerin olması gerektiğinden bahsedilmiştir [2].

Aynı geometride ve aynı tip sabit mıknatıs ile yapılan çalışmada; içten rotorlu ve dıştan rotorlu sabit mıknatıslı rüzgar jeneratörü performansı karşılaştırılmıştır. Dıştan rotorlu sabit mıknatıslı senkron jeneratör tasarımı küçük hacim, düşük çıkış gücü, düşük verim, yüksek armatür ısı yüklenmesi, yüksek armatür akım yoğunluğu gibi sonuçlar ortaya konulmuştur. İçten rotorlu sabit mıknatıslı senkron jeneratör tasarımı ise yüksek çıkış gücü ve yüksek tork olduğu ortaya konulmuştur [3].

Radyal ve Eksenel akılı sürekli mıknatıslı makine tasarımı vuru momentini oldukça önemli bir unsurdur. Eksenel akılı sürekli mıknatıslı makinelerin statorunun üretim zorluğu ve maliyetlerinin yüksek olması vuru momentini azaltmak için radyal akılı senkron makinelerde kullanılan tekniklerden farklı tekniklere ihtiyaç oluşturur. Eksenel akılı senkron makineler için vuru momentini minimizasyon teknikleri üzerinde durulup alternatif teknikler önerilmiştir. 3 boyutlu sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan analizler sonrası sonuçlar referans motor ile karşılaştırılmıştır [4].

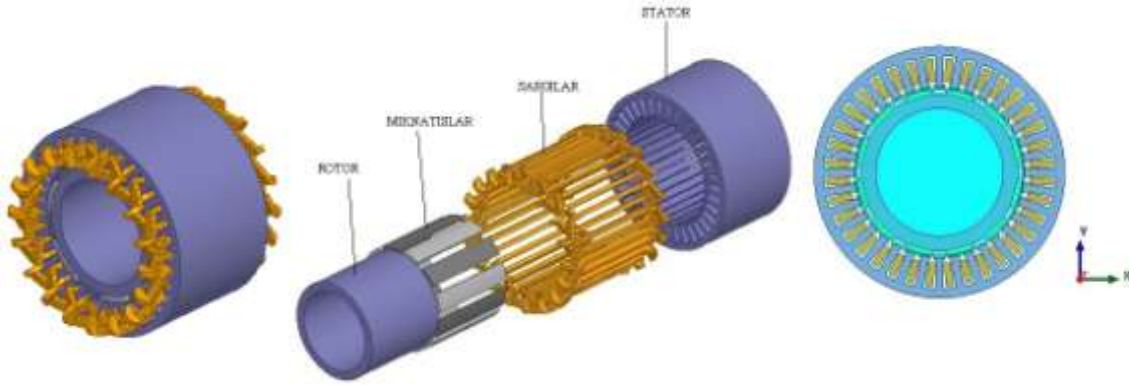
Farklı daimi mıknatıs malzemeler sonlu elemanlar yöntemiyle üretebilecekleri güçleri KW cinsinden incelenmiş. Yine bu mıknatıslar elektriksel açıları göz önüne alınarak hava aralığındaki akı yoğunluğu, indüklenen faz gerilimi, vuru momentini, bir iletkende indüklenen gerilim yönünden incelenmiştir. İnceleme sonucu en iyi tasarımı NDFE türü manyetik malzemenin gösterdiği anlaşılmıştır. Ortaya çıkan sonuçlar jeneratör tasarımı yardımcı olabilecek niteliktedir [8].

Rüzgar türbinleri için teknolojik ve ekonomik bir Çıkık Kutuplu Sabit Mıknatıslı Senkron Makine tasarımı üzerine yapılan çalışmada Çıkık Kutuplu Senkron Makine ile Sabit Mıknatıslı Senkron Makine Eddy akımı, hava aralığındaki akı yoğunluğu ve verim yönünden sonlu elemanlar yöntemiyle karşılaştırılmış, ekonomik olarak analiz edilmiştir. Çıkık Kutuplu Senkron Makine de daimi mıknatıs yerine sargılar kullanılmasının dolayı Sabit Mıknatıslı Senkron Makineye göre daha temiz ve ucuz olduğu sonucuna varılmıştır. Ayrıca çalışmada manyetik malzemelerin maliyet açısından karşılaştırılmasında aynı boyuttaki manyetik malzemelerin % 50 oranında fiyatlarının değişebildiği görülmüştür [9].

Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada 1KW'lık radyal akılı jeneratörün tasarımı amaçlanmıştır. Jeneratörün boyutlandırma hesabı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan bu jeneratör modelinin üç boyutlu yapısı göz önüne alınarak iki boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile sayısal çözümleme yapılmıştır. Bu sayısal veriler elektromanyetik parametrelerinin elde edilmesi ve tasarlanan modelin uygulanabilirliği için bir ön tasarım niteliğindedir.

## **2. RADYAL AKILI SABİT MIKNATISLI JENERATÖR TASARIMI (THE DESIGN OF RADIAL FLUX PERMANENT MAGNET GENERATOR)**

Tasarımı gerçekleştirilecek makinenin 3D-2D görünümü Şekil 1'de verilmiştir:



Şekil 1. Jeneratör 2D-3D görünümü (Generator 2D-3D view)

Sürekli mıknatıslı jeneratör tasarımında kullanılan temel boyutlandırma eşitliği verilmiştir [5,11,12]:

$$S = 11K_{w1} * \bar{B} * Ac * \left(\frac{D}{1000}\right)^2 * \frac{L}{1000} * n \quad (3)$$

Burada  $S$  görünen güç (VA),  $K_{w1}$  sargı faktörü,  $\bar{B}$  manyetik yükleme (T),  $Ac$  elektriksel yükleme (A/m),  $D$  stator iç çapı (m),  $L$  stator derinliği (m),  $n$  devir sayısı (rps). Sargı faktörü 0,866'dan yüksek olan oluk/kutup kombinasyonunun seçilmesi önemlidir. Sürekli mıknatıslı makineler için  $\bar{B}$  manyetik yükleme genellikle 0.45-0.8T, elektriksel yükleme  $Ac$  ise 8000-30000 A/m değerler aralığında alınabilir[11,12,13]. Sürekli mıknatıslı jeneratörlerde tork hacim oranı ( $TRV$ ) 14-42 ( $\text{kN/m}^3$ ) aralığında alınabilir [6].

$$TRV = \frac{T_{out}}{\frac{\pi DL}{4}} \quad (4)$$

Burada  $T_{out}$  çıkış torku (Nm) olarak verilmiştir.  $B_g$  hava aralığı manyetik akı yoğunluğu (T) ve  $B_r$  mıknatıs akı yoğunluğu,  $g$  hava aralığı uzunluğu (m) olmak üzere  $Lpm$  mıknatıs kalınlığı hesaplanabilir (Eşitlik 5). Ayrıca; kaçak akı faktörü Eşitlik 6-7'den hesaplanabilir:

$$\frac{B_g}{B_r} = \frac{1}{1 + \mu_r \frac{g}{Lpm}} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{4}{\pi} \left\{ \frac{B_{s0}}{2g'} \tan^{-1} \left( \frac{B_{s0}}{2g'} \right) - \ln \sqrt{1 + \left( \frac{B_{s0}}{2g'} \right)^2} \right\} \quad (6)$$

$$K_c = \frac{\tau_t}{\tau_t - \gamma g'} \quad (7)$$

$N_s$  oyuk sayısı olmak üzere  $\tau_s$  oyuk adımı (m) hesaplanabilir;

$$\tau_s = \frac{\pi D}{N_s} \quad (8)$$

$m$  faz sayısı olmak üzere;  $V$  anma gerilimi (V) olmak üzere, belirlenen güce göre  $I_{ph}$  faz akımı (A) hesaplanabilir:

$$I_{ph} = \frac{P_{out}}{m V} \quad (9)$$

$J_s$  akım yoğunluğu ( $A/m^2$ ) ve iletken kesit alanı ve iletken çapı Eşitlik 10-11 kullanılarak hesaplanabilir:

$$A_{cu,i} = \frac{I_{ph}}{J_s} \quad (10)$$

$$d_w = \sqrt{\frac{4A_{cu,i}}{\pi}} \quad (11)$$

$H_{s0}$ ,  $H_{s1}$ ,  $H_{s2}$  oyuk yükseklik ve  $T_{cs}$  stator nüve boyunduruk uzunluğu olmak üzere; stator dış çapı Eşitlik 12'den hesaplanabilir. Ayrıca; mıknatıs genişliği  $W_{pm}$ , kutuplar arası boşluk  $W_b$  olmak üzere kutup adımı  $T_{pm}$  Eşitlik 13'den hesaplanabilir.

$$D_o = D + 2 * (H_{s0} + H_{s1} + H_{s2} + T_{cs}) \quad (12)$$

$$T_{pm} = W_{pm} + W_b \quad (13)$$

$P_{cu}$  bakır kaybı,  $P_{core}$  stator ve rotorda meydana gelen demir kayıpların toplamı ve  $P_{fw}$  rüzgar ve sürtünme kayıpları olmak üzere; verim Eşitlik 14 ile hesaplanabilir:

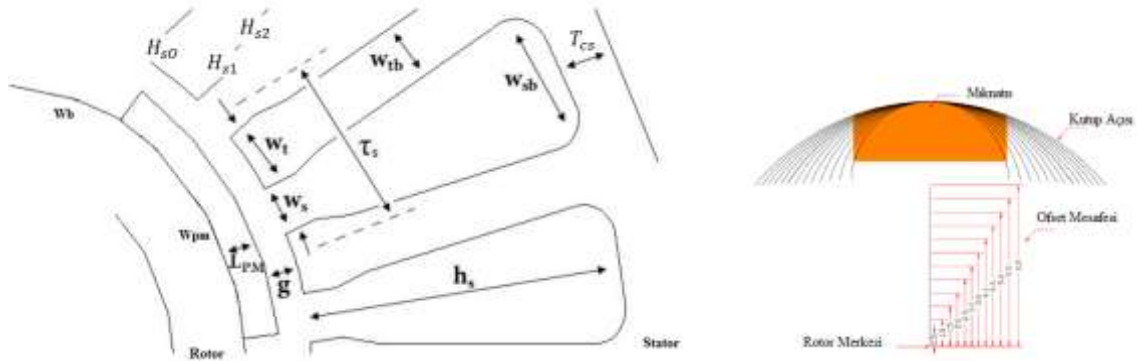
$$Eff = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{cu} + P_{core} + P_{fw}} \quad (14)$$

**Tablo 1.** Tasarımı Yapılan Jeneratör Parametreleri (Design Made Generator Parameters)

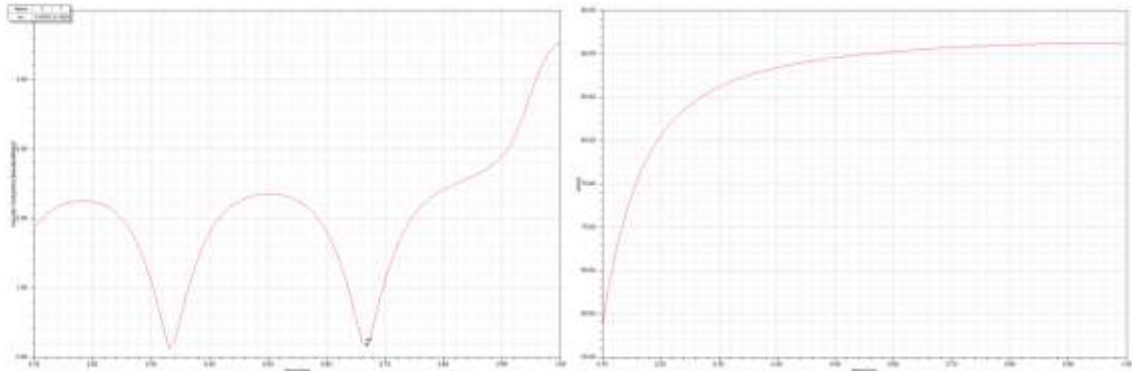
Anma Gücü (kW)	1	Oyuk Sayısı	36
Anma Gerilimi (V)	50	Stator Dış Çap (mm)	177
Anma Akımı (A)	6.6	Stator/Rotor Paket Boyu (mm)	100
Bağlantı Şekli	Wye	Mıknatıs Kalınlığı (mm)	4
Kutup Sayısı	12	Akım Yoğunluğu ( $A/mm^2$ )	3
Anma Hızı (rpm)	500	Verim	0,9
Frekans (Hz)	50	Anma Torku (Nm)	20.94
Hava aralığı (mm)	2	Sargı Doldurma Faktörü	0.5
Stator/Rotor Nüve Materyali	M19-24G	Güç Faktörü/Verim	0.98/0.9
Mıknatıs	NdFe 30	Toplam Ağırlık (kg)	11.49

## 2.1. RMxpirt ile Temel Parametre Değişiminin Etkisinin İncelenmesi (Investigation of the Effect of Exchange Fundamental Parameters with RMxpirt )

Bu çalışmada tasarlanan jeneratörün kutup ofset' i ve kutup adım oranı ( $W_{pm} / T_{pm}$ ) oranı değiştirilerek en küçük vurutu torku ve anma hızında istenen çıkış gücünü vermesi (nüve doyum etkileri göz önünde bulundurulmuştur) amaçlanmıştır. Bu değişimlerin uygulandığı Şekil 2'de verilmiştir:

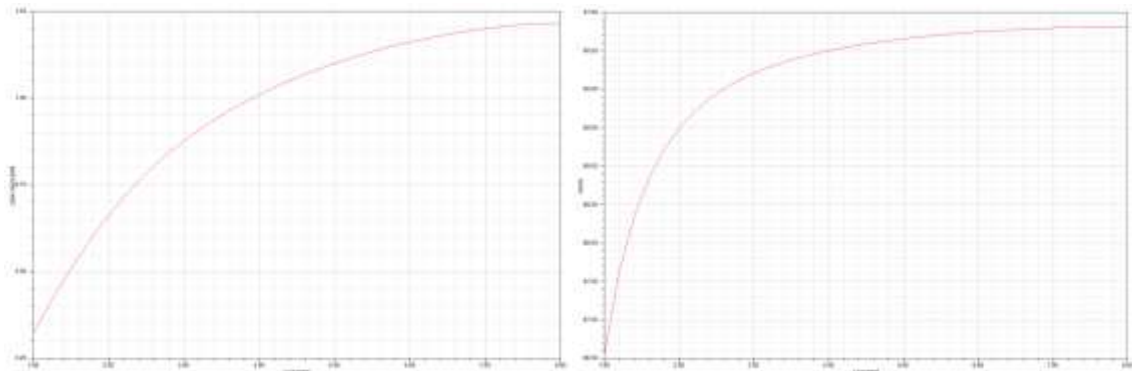


Şekil 2. Kutup adım oranı ( $W_{pm} / T_{pm}$ ) değişimi, Kutup ofset değişimi [13,14] (Pole pitch ratio ( $W_{pm} / T_{pm}$ ) change, Pole offset changes )



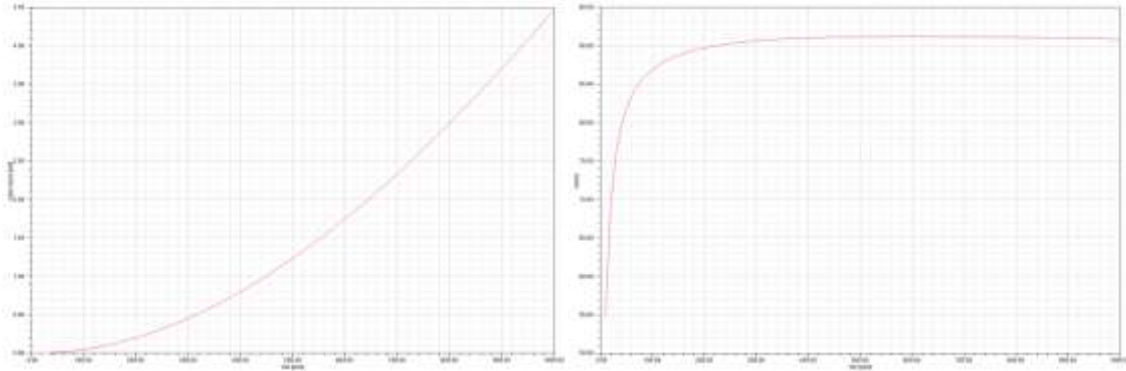
Şekil 3. Kutup adım oranı ( $W_{pm} / T_{pm}$ ) değişimine bağlı olarak vuru kuvveti ve verim değişimi (Pole pitch ratio ( $W_{pm} / T_{pm}$ ) change depending on the strength and efficiency knock exchange )

Şekil 3 incelendiğinde  $W_{pm} / T_{pm}$  oranı 0.6-0.7 aralığında azalmaktadır. Çalışmamızda minimum değeri 0.67 olarak belirlenmiştir. Bu değer kabul edilerek ofset değeri 0-45 aralığında değiştirilerek analizler gerçekleştirilmiştir. Analizlerde ofset değeri 0'da maksimum 1kW alındığı, ancak ofset değerinin artması çıkış gücünü önemli ölçüde azalttığından dolayı grafik olarak verilmemiştir. Ayrıca; hava aralığı manyetik akı yoğunluğunda önemli bir değişime gözlenmez iken verim yaklaşık %2 azalmıştır.



Şekil 5. Mıknatıs kalınlığı ( $L_{pm}$ ) değişimine bağlı olarak çıkış gücü ve verim değişimi (Magnet thickness ( $L_{pm}$ ) change depending on the output power and efficiency change )

Bilindiği gibi senkron jeneratörde hız arttıkça çıkış gücü artmaktadır(Şekil 6). Verim ise belirli bir hız değerine kadar artmakta ve azalmaktadır.



**Şekil 6.** Hızın değişimine bağlı olarak çıkış gücü ve verim değişimi (Depending on the speed change output power and data exchange )

Tablo 2’de RMXprt ile materyal değişiminin ağırlık ve verim üzerindeki değişimi verilmiştir:

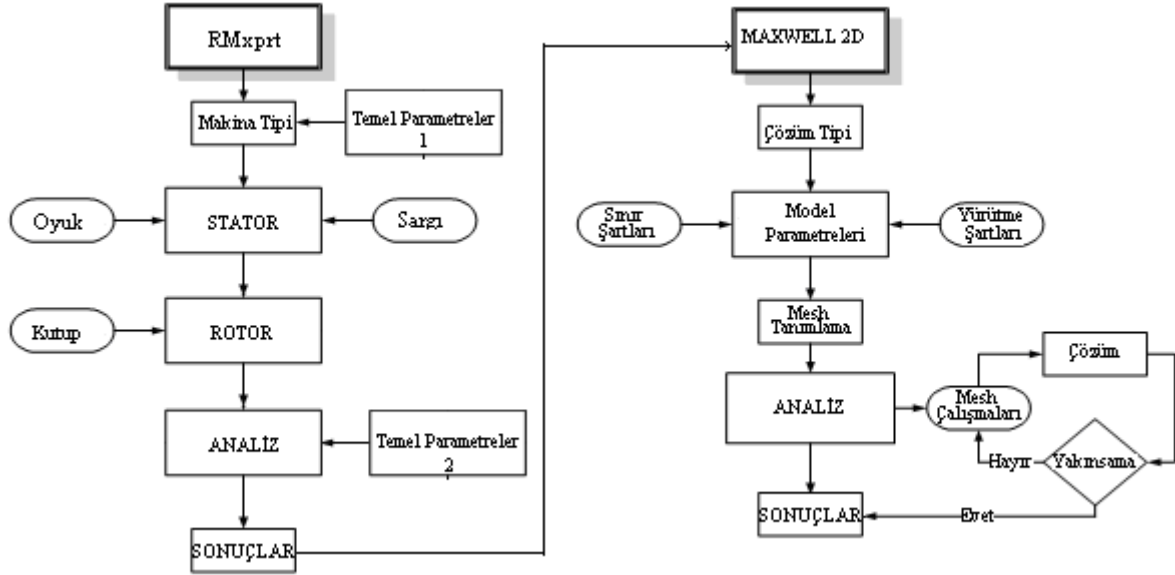
**Tablo 2.** RMXprt ile materyal değişiminin ağırlık ve verim değişimi (Weight and yield variation of material change with rmxprt)

Kullanılan materyaller	Toplam Ağırlık (kg)	Verim
M19-26G/NdFe30	11.451	90.8153
M19-26G/NdFe35	11.4367	91.0894
M19-26G /XG196-96	11.4748	90.3477
M19-26G /SmCo28	11.5223	90.7288
M43-26G/NdFe30	11.5026	90.3574
M43-26G/NdFe35	11.4884	90.6273
M43-26G /XG196-96	11.5264	89.8908
M43-26G /SmCo28	11.574	90.2716
DW315-50/NdFe30	11.3993	90.898
DW315-50/NdFe35	11.385	91.177
DW315-50/XG196-96	11.4231	90.4127
DW315-50/SmCo28	11.4706	90.8082

### 3. RADYAL AKILI SABİT MIKNATISLI JENERATÖRÜN SONLU ELEMANLAR YARDIMI İLE ANALİZİ (FINITE ELEMENT ASSISTED ANALYSIS OF RADIAL FLUX PERMANENT MAGNET GENERATOR)

Sonlu elemanlar yöntemi, gelişen bilgisayar teknolojisiyle birlikte günümüzde elektromanyetik alan problemlerinin çözümünde en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Bu yöntem ile sistemin gerçek üç boyutlu (3D) yapısı dikkate alınır. Ancak; modelin analizi için iki boyutlu (2D) çözüm gerçekleştirilebilirse hem maliyet hem de zamandan tasarruf sağlanmaktadır. Bu nedenle iki boyutlu analizler gerçekleştirilmiştir. Bu analizler ANSYS MAXWELL programının RMXprt modülüne temel boyutlandırma parametreleri girilerek analitik çözümler elde edilmiştir. Şekil 2’de görüldüğü gibi uygun makine tipi, temel parametreler (kutup sayısı, referans hız, sürtünme-rüzgar kaybı, iç rotor ve devre şekli) girilir, Stator ve Rotora ait temel

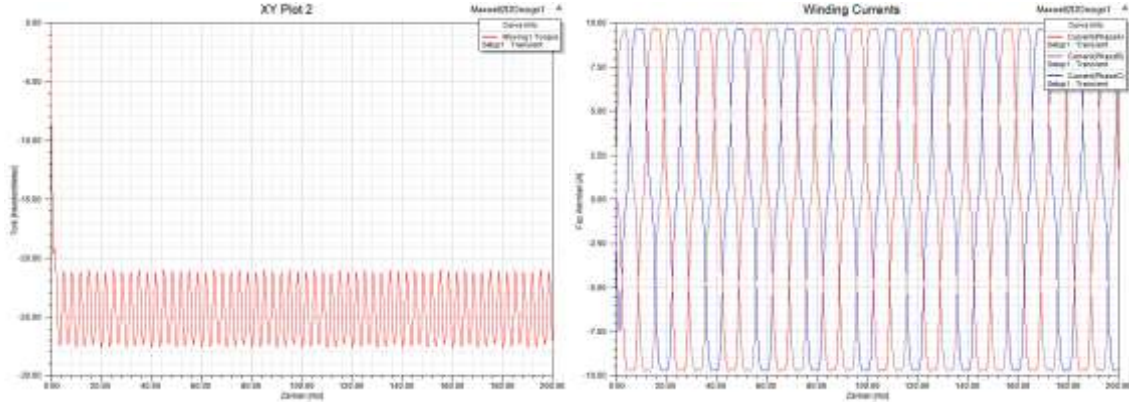
boyutlandırma büyüklükleri girilir. Oyuk, sarım şekli ve rotor kutup şekli belirlenerek jeneratör analize hazır hale getirilir. Ancak; analiz için bazı temel parametrelerin (çalışma şekli, anma gücü, çalışma devri ve sıcaklığı, anma gerilimi) girilmesi gerekmektedir. Nümerik çözümleri gerçekleştirebilmek için analitik olarak belirlenen uygun geometri kullanıcı tarafından otomatik olarak geçici (transient) veya sürekli hal (magnetostatic) Şekil 7’de bu programın çalışma akış diyagramı verilmiştir.



**Şekil 7.** Sonlu elemanlar yönteminin akış diyagramı ( Flow diagram of the finite element method)

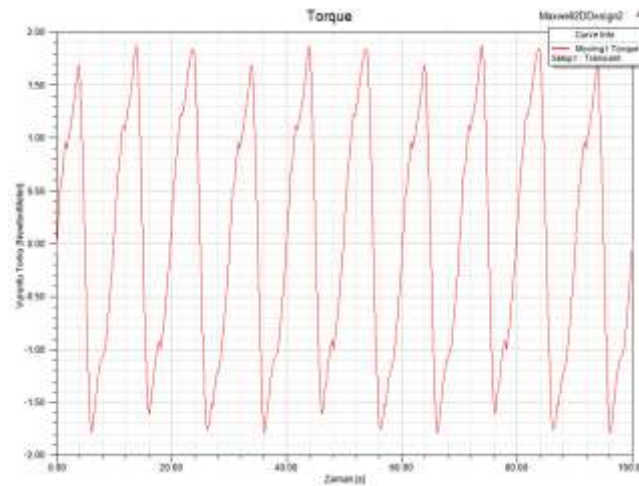
Maxwell 2D’de ise ilk olarak makine geometrisi için tasarlanacak boyut seçilir. Hesaplanan geometri verilerine göre makine geometrisi oluşturulur yada RMxpri tarafından otomatik atanır. Model parametreleri olarak; sınır şartları, sarım sayısı, direnç-endüktans parametreleri (RMxpri tarafından otomatik atanır) verilir. Tasarlanan makine analize hazır hale getirilir. Mesh tanımlama, program algoritmasında küçük gibi görünse de makinanın yeterli çözüm vermesi için çok önemlidir. Her ağ bölgesinde bilinmeyen büyüklükler (potansiyel, elektrik alan, ...) skaler veya vektörel kısmi diferansiyel eşitlikler ile temsil edilir. Analiz algoritmasına göre öncelikle modellenecek sistem dörtyüzlü elemanlara bölünür ve sonlu elemanlar ağı oluşturulur. Çözüm sürecinde iterasyonlarla ağlar iyileştirilerek hata azaltılır. Alan çözümüne başlamadan önce iletkenlerdeki iletim akımının simülasyonu yapılır ve alan çözümü başlar. Sonlu eleman ağındaki her dörtyüzlü elemanın kenarlarının orta noktalarındaki manyetik alan şiddeti (H), akım yoğunluğu kullanılarak hesaplanmaktadır. Manyetik nüve malzemesinin doğrusal olmaması halinde Newton-Raphson yöntemi manyetik alan şiddetini kullanmaktadır. Ayrıca doğrusal olmayan bir problemin çözümünün doğrusal bir yaklaşımla yapılması için, malzemenin B-H eğrisi kullanılır. Bu yaklaşım ile H’nin doğrusal olmayan çözümü için yakın sonuçlar elde edilir. Çözücü tamamladığı çözümü bir dosyaya yazar ve hata analizini icra eder. Çözücü adaptif analiz ile en hatalı dörtyüzlü elemanları küçülterek, belirlenen hata kriteri yerine getirilene kadar çözüme devam eder. Sonuç olarak endüktans değerleri hesaplanır, akım yoğunluğu, manyetik alan şiddeti, manyetik akı yoğunluğu, kuvvetler elde edilir[4].





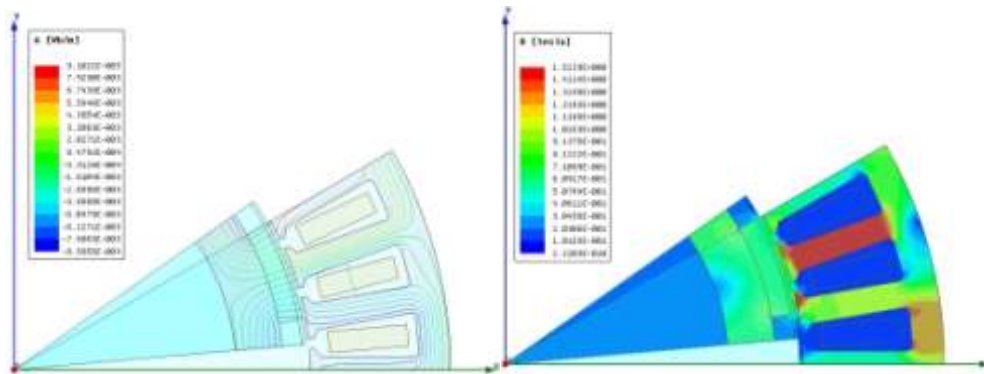
**Şekil 8.** Anma hızında tork ve faz akımlarının değişimi (Change of torque and phase current at rated speed )

Vuruntu torku bilindiği gibi makina güç üretmeksizin stator dişleri ile mıknatıs arasında meydana gelen etkileşimden (çekme) kaynaklı bir torkdur. Bu tork mümkün olduğunca küçük tutulması gerekmektedir. Bu tork anma torkunun %5 ve altındaki değerler için kabul edilebilir sınır arasında kalmaktadır. Sonlu elemanlar yöntemi ile vuruntu torkunu bulabilmek için rotor 1deg/s dönecek şekilde ayarlanır. Uyarım olmaksızın elde edilen tork Şekil 9’da verilmiştir.



**Şekil 9.** Vuruntu torku değişimi (Cogging torque variation)

Şekil 10’da görüldüğü gibi anma hızında nüve diş manyetik akı yoğunluğu 1.5T ve nüve boyunduruk akı yoğunluğu 1.3T civarında kalmıştır. Nüve materyalinin bu değerlerde doyuma ulaşması mümkün değildir.



**Şekil 10.** Manyetik akı çizgileri(Wb/m) ve manyetik akı yoğunluğu değişimi (T) (Magnetic flux lines (Wb / m) and the magnetic flux density change)

#### 4. SONUÇ VE TARTIŞMA (CONCLUSION AND DISCUSSION)

Radyal akılı sürekli mıknatıslı yüzey yerleştirmeli senkron jeneratör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Temel mıknatıs boyut parametreleri değiştirilerek parametrik analizler gerçekleştirilmiştir. Ayrıca; nüve malzemesi ve mıknatıs çeşitleri açısından da değerlendirilmiştir. Vuruntu kuvveti anma torkunun %5 kısıtı altında değerlendirilmiştir. Kutup adımı oranı 0.6-0.7 aralığında seçilmesi vuruntu kuvvetini önemli ölçüde azaltacaktır. Mıknatıs kalınlığının artırılması verim ve çıkış gücünü arttıracaktır ancak nüve dış ve boyunduruğunda manyetik doyumun oluşmaması için bu noktadaki akı yoğunluğu değerlerine dikkat edilmesi gerekmektedir.

**TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT):** Bu çalışma Ordu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Koordinasyon Birimi (ODÜBAP) tarafından TF-1422 numaralı tez projesi kapsamında desteklenmiştir. Katkıları nedeniyle teşekkür ederiz.

#### 5. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. H. Mellah, K. E. Hemsas, Comparative Performances Analysis of Different Rotor Types for PMSG Used in Wind Turbine Application, International Journal of Advances in Power Systems, Vol. 1, No. 1, June 2013.
- [2]. A. S. Nagorny, N. V. Dravid, R. H. Jansen, and B. H. Kenny, Design Aspects Of A High Speed Permanent Magnet Synchronous Motor/Generator For Flywheel Applications, In Proc. IEEE Int. Conf. Elect. Mach. Drives, Pp. 635–641, May 2010.
- [3]. İ. Tarımer, C. Ocak, Performance Comparison of Internal and External Rotor Structured Wind Generators Mounted from Same Permanent Magnets on Same Geometry, Electronics and Electrical Engineering, Vol. 8, Issue. 90, Pp. 67–72, 2009.
- [4]. M. Aydın, Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Elektrik Motorlarında Vuruntu Moment Minimizasyonu, 12. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi ve Fuarı, 14-18 November 2007 (Türkiye).
- [5]. Y. Duan, Method For Design And Optimization Of Surface Mount Permanent Magnet Machines And Induction Machines, Electrical and Computer Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, 2010.
- [6]. J. Y. Choi, S. M. Jang, B. M. Song, Design Of A Direct-Coupled Radial-Flux Permanent Magnet Generator For Wind Turbines, IEEE Power and Energy Society General Meeting, Minneapolis, USA, Pp. 1–6, 2010.
- [7]. C. Y. Hsiao, S. Y. Yeh, J. C. Hwang, Design of High Performance Permanent-Magnet Synchronous Wind Generators, Energies, MDPI, Pp. 7105–7124, 2014.
- [8]. H. Mellah, K. E. Hemsas, Simulations Analysis with Comparative Study of a PMSG Performances for Small WT Application by FEM, International Journal of Energy Engineering, Vol. 3, No 2, Pp. 55–64, 2013.
- [9]. T. Gundogdu, G. Komurgoz, Technological And Economical Analysis Of Salient Pole And Permanent Magnet Synchronous Machines Designed For Wind Turbines, JMMM, Vol. 324, No.17, Pp. 2679–2686, Aug. 2012.
- [10]. Fenercioğlu A., Tarımer İ., Bir Manyetik Sistemin Maxwell 3d Alan Simülatörü İle Statik Manyetik Analizinin Çözüm Süreçleri, Journal of Technical Online, Vol. 6, Number:3, P.p. 221-240, (2007).

- [11]. Tarımer İ., Designing an Efficient Permanent Magnet Generator For Outdoor Utilities, International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT), Volume 3, Issue 3, May 2014
- [12]. O. Gürdal, Designing of Electrical Machines, Atlas–Nobel Publishing, Distribution House, 2001, ISBN: 975–6574–07–0, Ankara Turkey.
- [13]. Soleimani Keshayeh M.J., Asghar Gholamian S., Optimum Design of a Three-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor For Industrial Applications, International Journal of Applied Operational Research Vol. 2, No. 4, Pp. 67-86, 2013
- [14]. Saygın A., Ocak C., Dalcalı A., Gürdal O., Alantar S., Tarhan Y., Influence Of Pole Arc Offset On The Field And Output Parameters Of Brushless Dc Motors Proc. of the Intl. Conf. on Future Trends in Electronics and Electrical Engineering - FTEE 2013 Copyright © Institute of Research Engineers and Doctors. All rights reserved. ISBN: 978-981-07-7021-1 doi:10.3850/ 978-981-07-7021-1\_35