



# Havai Rüzgâr Enerji Sistemleri için Sürekli Mıknatıslı Senkron Generator Tasarım ve Optimizasyonu

Esra Çelik\*, Muhammet Garip

<sup>1</sup>\*Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Mekatronik Bölümü, İstanbul, Türkiye, (ORCID: 0000-0002-8416-0524), [f6817006@std.yildiz.edu.tr](mailto:f6817006@std.yildiz.edu.tr)

<sup>2</sup>Yıldız Teknik Üniversitesi, Makina Fakültesi, Mekatronik Bölümü, İstanbul, Türkiye (ORCID: 0000-0001-6315-8540), [mgarip@yildiz.edu.tr](mailto:mgarip@yildiz.edu.tr)

(İlk Geliş Tarihi 24 Aralık 2021 ve Kabul Tarihi 22 Ocak 2022)

(DOI: 10.31590/ejosat.1041238)

**ATIF/REFERENCE:** Çelik E., Garip M., (2022). Havai Rüzgâr Enerji Sistemleri için Sürekli Mıknatıslı Generator Tasarım ve Optimizasyonu *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (33), 154-160.

## Öz

Havai rüzgâr enerjisi sistemleri (Airborne Wind Energy Systems), geleneksel rüzgâr türbinlerine oranla yüksek rüzgâr hızlarına ulaşabilmeleri ve daha az malzemeye gereksinim duymaları nedeniyle son yirmi yılda geleneksel rüzgâr türbinlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. Genellikle elektrik generatörünün konumuna göre tümleşik (on-board) veya yerde şeklinde sınıflandırılırlar ve her iki tipte de kule yerine kabloyu taşıyan bir halat bulunur. Bu makale, bir havai rüzgâr enerjisi sistemi için sürekli mıknatıslı radyal tip elektrik generatörünün (pmsm) elektromanyetik tasarımını ve optimizasyonunu sunmaktadır. 44kW bir sistem için ünite ve güç sayısı değiştirilerek uygun güç-ağırlık (P/W) oranını ve makinenin verimini sağlayan optimal parametreler araştırılmıştır. Analitik modeli elde edilen makinenin optimizasyonu genetik algoritma yöntemi ile Matlab yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tasarım sonuçlarının doğrulanması için sonlu elemanlar analizi yöntemi Ansys-Maxwell programında uygulanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Rüzgâr Enerjisi, Sürekli Mıknatıslı Makina, Genetik Algoritma, Optimizasyon, Sonlu Elemanlar, Airborne Wind Energy Systems

## Permanent Magnet Synchronous Generator Design and Optimization for Airborne Wind Energy Systems

### Abstract

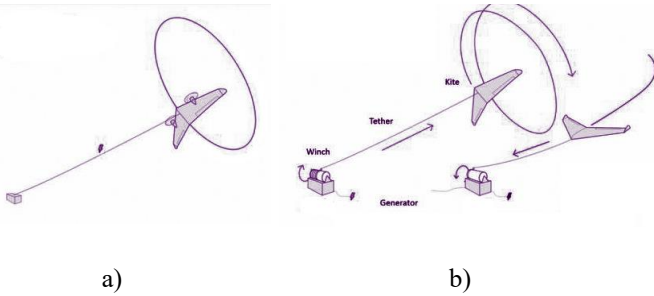
Airborne wind energy systems have been developed as an alternative to conventional wind turbines in the last two decades since they can reach higher wind speeds and require less material than conventional wind turbines. They are generally classified as on-board or ground based depending on the location of the electric generator, and both types have a tether carrying the cable instead of the tower. This article presents the electromagnetic design and optimization of a permanent magnet synchronous generator (radial type) for an airborne wind power system. For a 44kW system, the optimal parameters that provide the appropriate power-to-weight (P/W) ratio and the efficiency of the machine were investigated by adjusting the number of units and power. The optimization of the machine, whose analytical model was obtained, was carried out using Matlab software utilizing the genetic algorithm method. Three-dimensional finite element analysis method was used to verify the design results with the Ansys-Maxwell program.

**Keywords:** Wind Energy, Permanent Magnet Machine, Genetic Algorithm, Finite Elements, Airborne Wind Energy Systems.

\* Sorumlu Yazar: [f6817006@std.yildiz.edu.tr](mailto:f6817006@std.yildiz.edu.tr)

## 1. Giriş

Geleneksel rüzgâr türbini teknolojilerinin teknik ve ekonomik açıdan uygulanabilirlik sınırlarına ulaşması, 50-100m yüksekliklerde verimli rüzgâr sahalarının halihazırda kullanıyor olması, rüzgârdan elektrik elde edilmesinde yeni tasarımları kaçınılmaz kılmıştır. Bu bağlamda alternatif bir tasarım olarak Loyd'un 1980'de ortaya koyduğu (Loyd 1980), bir hava aracının (daha çok hafif veya rijit uçurtma tipi) 300-500m ve daha fazla irtifada halatla bağlı olduğu makarada dönüş yaratarak yerdeki generatörü tahrik ettiği veya hava aracının üzerinde üretim yaparak kablo ile elektriğin iletiildiği kulesiz uçurtma tabanlı Havai veya Yüksek İrtifa Rüzgâr Enerji Sistemleri, 2000'lerin başında ilgi görmeye başlamış, günümüze kadar pek çok akademik çalışma grubunda farklı tasarımlar birkaç kW mertebelerinden 100kW ve üzeri seviyelerine kadar gelişme göstermiştir (Cherubini, Papini, Vertechy, ve Fontana, 2015). Şekil 1, onboard (tümleşik) ve uçurtmalı konseptlerin temel çalışma şekilleri göstermektedir.



Şekil 1. Havai rüzgâr enerji sistemlerini a) Tümleşik b) Yerde üretim konseptlerinin gösterimi (Airborne Wind Europe,2021) (Figure1. Concept illustration of airborne wind energy systems. a) onboard b) onground)

Havai Rüzgâr Enerji sistemleri yeni bir konsept olması sebebiyle geleneksel rüzgâr türbinlerine nazaran literatürde daha az yer bulmaktadır. Ayrıca sistemler üretim şekillerine göre farklılık göstermekte olduğundan çalışmalar pek çok ayrı kategoriye ayrılmış durumdadır. Örneğin; rijit uçak modeli veya yamaç paraşütü kullanan modeller kontrol zorluğuna rağmen yatırım maliyeti düşüklüğü sebebiyle akademik çalışmalar ve girişim şirketlerince daha çok tercih edilmektedir. Ancak otonom iniş/kalkış kabiliyetine haiz olmamaları sistem güvenilirliği açısından handikap yaratmaktadır. Örneğin fırtına veya yıldırımlı havalarda sistemin güvenli yere inebilmesi önem arz etmektedir. Tümleşik (onboard) hava aracına akuple edilen tasarımda ise generatörlerin motor olarak çalıştırılması avantajı bulunmakta, bu da sistemin iniş/kalkış problemini elimine etmektedir.

Türkçe literatürde henüz yerini almamış bu sistem için doğrudan tercüme karşılığı "havada", "hava kaynaklı", "hava araçlı" tabirleri yerine yalın haliyle kavramı karşıladığını düşündüğümüz "havai" ifadesini önermekteyiz.

Literatürde benzer sistemler için generator tasarımı oldukça az olmakla birlikte yapılan çalışmada (Subotic, Gammeter, Tüysüz ve Kolar, 2015) tarafından yapılan çalışmada 1km yükseklikte 100kW güç üreten hava araçlı rüzgâr enerji sistemi için eksenel akılı sürekli mıknatıslı makinenin elektromanyetik, termal ve yapısal analitik modelleriyle optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimal sonuç arama algoritması olarak herhangi bir amaç

fonksiyonuna bağlı kalmaksızın tüm çalışma uzayını tarayan doğrudan ızgara arama algoritması kullanılmıştır. Çalışma sonucunda kütesel güç yoğunluğu 6.4 kW/kg, nominal hız 3200 rpm ve verim %95 olarak bulunmuştur. Bir diğer çalışmada ise (Gammeter, Drapela, Tüysüz ve Kolar, 2015) ise, 1km yükseklikte 100kW hava araçlı rüzgâr türbini için verim kısıtı altında ağırlık optimizasyonu yaptıkları çalışmada radyal ve eksenel akılı makine topolojilerini, elektromanyetik ve termal modellerini kullanmışlardır. Optimizasyon metodu için maliyet fonksiyonu olmaksızın doğrudan arama metodu uygulanmıştır. Çeşitli radyal ve eksenel akılı topolojiler arasında dahili rotorlu Hallbach radyal akılı makinenin en iyi sonuçları verdiği tespit edilmiştir. Güç ağırlık oranı 6.2kW/kg ve %96 verim elde edildiği raporlanmıştır.

Bu çalışmada 44 kW bir havai rüzgâr enerji sistemi için radyal tipli sürekli mıknatıslı generatörün farklı ünite ve güç sayılarında ağırlık/kütle (P/W) oranı ve verim değerleri elde edilmiştir. Makinenin analitik modeli çıkarılarak, belirlenen değişkenlere göre Matlab Genetik Algoritma çözücüsü ile optimize edilmiştir. Elde edilen tasarımlar Ansys-Maxwell sonlu elemanlar programı ile analiz edilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

### 2.1. Tasarım Gereksinimlerinin Belirlenmesi

Havai rüzgâr enerji sistemleri, geleneksel rüzgâr türbinlerine kıyasla iki önemli avantaja sahiptir. Bunlardan ilki karasal türbinlerin erişemeyeceği yüksekliklere ulaşmak; diğeri ise hava aracının rüzgâra karşı gerçekleştirdiği hareket sonucu türbinlerin bağlı hıza maruz kalmasıdır. Yüksek rüzgâr hızı sayesinde türbin rotorları eşdeğer karasal türbin rotolarla oranla belirgin oranda daha küçük olmaktadır. İdeal rüzgâr enerjisi formülü Denklem 1 ile ifade edilmektedir (Aull, Stough ve Cohen, 2020).

$$P_{max} \leq \frac{8}{27} \rho A_{rot} V_a^3 \quad (1)$$

Burada  $P_{max}$ , elde edilebilecek maksimum güç (kW),  $\rho$  hava yoğunluğu (kg/m<sup>3</sup>),  $A_{rot}$  türbin rotorlarının toplam alanı (m<sup>2</sup>) ve  $V_a$  bağıl hızı (m/s) ifade eder. Denklem 2'de ise türbinin güç katsayısı ile üretilebilecek mekanik gücün ifadesi verilmiştir. Denklemde  $C_p$  ve  $\rho$  sırasıyla güç katsayısını ve hava yoğunluğuna karşılık gelmektedir.

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \rho A_{rot} V_a^3 \quad (2)$$

Türbin güç katsayısı ( $C_p$ ) katsayısının 2 kanat kullanması kabulü ile 0,2 olarak uygulanmıştır (Rancourt, Bolduc-Teasdale, Bouchard, Anderson ve Mavris, 2016).

$$w_m = \frac{\lambda u_w}{R} \quad (3)$$

$$\lambda_{opt} = \frac{4 \times \pi}{2} \quad (4)$$

Denklem 3,  $w_m$  (rad/s) olarak açısal hızın ifadesidir. Açısal hız kanat-uç hız oranı (TSR- tip speed ratio) ve türbinin maruz kaldığı rüzgâr hızına (m/s) bağlıdır. Denklem 4'te ise optimum kanat uç hız oranını kanat sayısına bağlı olarak elde edilişi gösterilmektedir (Carlos, Bulmaro, Honorato, ve Amparo, 2010).

Türbin verimi 0.7 kabul edildiğinde rüzgârdan alınacak mekanik güç 62,857 kW olarak kabul edilebilir. Bu kapasiteye göre;  $V_a$

maksimum 40 m/s (Aull, Stough ve Cohen, 2020),  $C_p$  0,2 ve  $\rho$  hava yoğunluğu 1,225 kg/m<sup>3</sup> olmak üzere ünite sayısına göre kapasite, kanat çapı ve dönüş hızları Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 2.Farklı ünite sayıları ile geliştirilen sistem örnekleri (Windlift,2021), (Kitekraft,2021) (Figure2. Examples of systems developed with different unit numbers)

Ünite Sayısı	Güç (kW)	Kanat Çapı (m)	Açısal Hız (rad/s)	Dönüş Hızı (rpm)
2	22	1.146	217,11	2073 ~ 2200
4	11	0.81	307	2931 ~ 3000
8	5.5	0.57	436.3	4166 ~ 4200

Tablo 1.Farklı ünite sayısı ve güçler için hesaplanan dönüş hızları (Table 1. Calculated rotational speeds for different number of units and Powers)

## 2.2. Generatörün Analitik Modelinin Elde Edilmesi

Bu bölümde makine tasarımı için gerekli denklem seti elde edilmiştir. Kalıcı mıknatıslı generatörün hava aralığında hesaplanan elektromanyetik güç denklemi Denklem 5 ile ifade edilmektedir. Denklemde,  $E_1$  yüksüz ters elektro-motor kuvvet (V),  $I_1$  etkin faz akımı (A) ve  $P_{em}$  elektromanyetik güç (W) değerlerini göstermektedir.

$$P_{em} = 3E_1I_1 \quad (5)$$

$N_a$ , (faz başına) sarım sayısı,  $K_{dp1}$  sarım faktörü,  $B_{\delta 1}$  hava aralığı akı yoğunluğunun birinci harmoniği-temel bileşeni (T),  $L$  makinenin eksenel uzunluğu (m) ve  $n$  rpm cinsinden optimal hız olmak üzere  $E_1$  back-EMF Denklem 6 ile elde edilir.

$$E_1 = \frac{\pi}{30} N_a K_{dp1} B_{\delta 1} D_{si} L n \quad (6)$$

Makinenin boyutlarını azaltma ve güç yoğunluğunu artırma olanağından ötürü,  $t$  makine periyodu ve  $N_s$  oluk sayısı olmak üzere  $2p = N_s \pm 2t$  oluk/kutup kombinasyonu seçilmiştir (Seo et al., 2013). Oluk/kutup 24/20 veya 48/40 kombinasyonları için sarım faktörü  $K_{dp1}$  tek katmanlı sarım şekli için 0.966 ve aynı kombinasyonda çift katmanlı sargıda 0.933 olarak belirlenmiştir (Emetor, 2021).

$B_{\delta}$ , hava aralığı akı yoğunluğu radyal bileşeninin analitik olarak elde edilmesi için, yüzey mıknatıslı oluksuz sürekli mıknatıslı makine için türetilen Denklem 7 kullanılmıştır (Zhu, Howe, Bolte, ve Ackermann,1993). Bu denklemde  $B_{\delta i}$ ,  $B_r$  ve  $\alpha_p$  sırasıyla hava aralığı akı yoğunluğunun i. harmoniği, kalıcı mıknatısın remenans değeri, kutup-yay kutup-adım oranı değerini temsil eder.

$$B_{\delta}(\theta) = \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} B_{\delta i}(\theta) = \sum_{i=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4 B_r}{i\pi \mu_r} \sin \frac{i\pi \alpha_p}{2} \frac{ip}{(ip)^2 - 1} \cdot \left\{ \frac{(ip - 1) + 2 \left(\frac{D_r}{D_m}\right)^{ip+1} - (ip + 1) \left(\frac{D_r}{D_m}\right)^{2ip}}{\frac{\mu_{r+1}}{\mu_r} \left[1 - \left(\frac{D_r}{D_{si}}\right)^{2ip}\right] - \frac{\mu_r - 1}{\mu_r} \left[\left(\frac{D_m}{D_{si}}\right)^{2ip} - \left(\frac{D_r}{D_m}\right)^{2ip}\right]} \right\} \quad (7)$$

Makinenin ikincil parametreleri olan  $b_{sy}$  stator boyunduruğu kalınlığı,  $b_{ry}$  rotor çekirdek kalınlığı ve  $b_{st}$  stator dış genişliği kalınlığı hava aralığı akı yoğunluğuna bağlı olarak Denklem 8’de gösterildiği gibi hesaplanmaktadır (Zhang, Li, Zhang, 2020). Denklemde  $D_{\delta}$  hava aralığı ortalama çevresel uzunluğu,  $D_m$  rotor dış çapını (mıknatıs dahil),  $D_r$  rotor çekirdeğinin dış çapını,  $B_{sm}$  stator maksimum akı yoğunluğunu,  $B_{rm}$  rotor maksimum akı yoğunluğu,  $\gamma_s$  oluk açısı,  $\tau$  kutup açısını,  $p$  kutup çifti sayısını ve  $q$  kutup başına oluk sayısını ifade etmektedir.

$$b_{st} = \frac{D_{\delta}}{2B_{sm}} \int_{-\frac{\gamma_s}{2}}^{\frac{\gamma_s}{2}} B_{\delta}(\theta) d\theta$$

$$\begin{cases} b_{sy} = \frac{D_{\delta}}{4B_{sm}} \int_{-\frac{\gamma_s}{2}}^{\frac{\gamma_s}{2}} B_{\delta}(\theta) d\theta & q \leq 1.5 \\ b_{sy} = \frac{D_{\delta}}{4B_{sm}} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} B_{\delta}(\theta) d\theta & q > 1.5 \end{cases} \quad (8)$$

$$b_{ry} = \frac{D_{\delta}}{4B_{rm}} \int_{-\frac{\tau}{2}}^{\frac{\tau}{2}} B_{\delta}(\theta) d\theta$$

Elde edilen kesitlere göre  $A_s$  oluk alanı hesabı makina geometrisinde elde edilmektedir.

$$A_s = \frac{\pi}{4N_s} (D_{so}^2 - D_{si}^2) - \frac{\pi}{4N_s} \left[ D_{so}^2 - (D_{so} - 2b_{sy})^2 \right] - b_{st} (D_{so} - 2b_{sy} - D_{si}) \quad (9)$$

Makine verimliliğinde büyük önem taşıyan ve iletkenin akım taşıma kapasitesi ile sınırlanan  $J$  akım yoğunluğu (A/mm<sup>2</sup>) değeri Denklem 10 ile ifade edilir.  $K_{cu}$  oluk alanının doluluk oranını  $N_s$  ise toplam oluk sayısını gösterir.

$$J_{cu} = \frac{6N_a I_1}{K_{cu} N_s A_s} \quad (10)$$

Toplam sargı kütlesini tespit edebilmek için sargı sonralarının doğru şekilde hesaplanması önem arz etmektedir. Denklem 11’de  $y_q$  bobin adımını temsil etmektedir oluk ve kutup sayısı oranının en yakın tam sayı değeri olarak hesaplanır. Stator dışının yarı yüksekliğinde ölçülen oluk aralığı  $p'_s$ , Denklem 12’de gösterildiği şekilde hesaplanmaktadır. Burada  $h_t$  oluk yüksekliği olup tasarım boyunca Denklem 8 ile üretilen  $b_{st}$  stator dış kalınlığının iki katı kabul edilmiştir.  $L_{ew}$  sargı sonu uzunluğu nihai olarak Denklem 13 ile elde edilir ve sargı kütlesinin hesabında eksenel uzunluğa ilave edilerek kullanılır (Bianchi, Bolognani, ve Frare, 2006).

$$y_q = \text{Int} \left( \frac{N_s}{2p} \right) \quad (11)$$

$$p'_s = \pi (D_{si} + h_t) / N_s \quad (12)$$

$$L_{ew} = \frac{\pi p'_s + b_{st}}{2} \quad (13)$$

Makinenin aktif malzeme kütlesi Denklem 14 ile gösterilmiştir. Makine geometrisinden yararlanılarak elde edilen kütle değerleri Denklem 15-18 takımıyla bulunur. Sırasıyla  $m_{sc}$  stator,  $m_{ry}$  rotor,  $m_{mag}$  mıknatıslar,  $m_{cu}$  bakır sargıların ağırlıklarının karşılığıdır.

$$m_{toplam} = m_{sc} + m_{ry} + m_{mag} + m_{cu} \quad (14)$$

$$m_{sc} = \rho_{sc}L \left[ \frac{\pi}{4} (D_{so}^2 - D_{si}^2) - N_s A_s \right] \quad (15)$$

$$m_{ry} = \frac{\pi}{4} \rho_{ry}L \left[ D_r^2 - (D_r - 2b_{ry})^2 \right] \quad (16)$$

$$m_{cu} = \rho_{cu} A_s K_{cu} N_s (L + l_{ew}) \quad (17)$$

$$m_{mag} = \frac{\pi}{4} \alpha_p \rho_{mag} L (D_m^2 - D_r^2) \quad (18)$$

Generatörün verimi bakır ve demir kayıpları ile hesaplanmıştır.  $P_{cu}$  bakır kaybı Denklem 19'da gösterildiği şekilde  $I_{ph}$  faz akımı ve  $R_{ph}$  bir faz direnci ile elde edilebildiği gibi  $J_{cu}$  akım yoğunluğu ve sargıların hacmine bağlı olarak ifade edilebilir (Adhikari, Panda, 2015). Analitik modelde akım yoğunluğu üzerinden bakır kaybı elde edilmiştir. Bakırın iletkenlik değeri  $\sigma_{cu}$  58,7M Siemens/m alınmıştır. Denklem 20'de ise demir kayıplarının bileşenleri gösterilmiştir. Histerezis ve nüve kayıp katsayıları;  $K_h$  histerezis kayıp katsayısı,  $K_c$  girdap akımları kayıp katsayısı,  $K_e$  ek girdap kayıp katsayısı olmak üzere statorda kullanılan M19 elektriksel çelik malzemesi için sırasıyla 164,2, 2,5, 1,79322 kabul edilmiştir (Tarımer, Arslan ve Güven, 2012). Ayrıca  $B_{max}$ , statordaki maksimum akı yoğunluğunu,  $f$  Hz cinsinden makina frekansını ve  $V_{sc}$  stator demir hacimini  $m^3$  olmak üzere temsil etmektedir.

$$P_{cu} = 3I_{ph}^2 R_{ph} = J_{cu}^2 V_{cu} / \sigma_{cu} \quad (19)$$

$$P_{ir} = (K_h B_{max}^2 f + K_c (B_{max} f)^2 + K_e B_{max}^2 f^2) V_{sc} \quad (20)$$

$$P_{kayıp} = P_{cu} + P_{ir} \quad (21)$$

Giriş gücü kayıpların  $P_{em}$  güce ilave edilmesi ile Denklem 22'de gösterildiği gibi bulunur ve Generator verimi  $\eta_g$ , hesabı giriş gücün çıkışa oranıyla Denklem 23'teki gibi hesaplanır. Nihai güç/ağırlık oranı ( $P/W$ ) ise Denklem 24'te gösterilmiştir.

$$P_{giris} = P_{em} + P_{kayıp} \quad (22)$$

$$\eta_g = \left( \frac{P_{giris}}{P_{em}} \right) \times 100 \quad (23)$$

$$P/W = \frac{P_{em}}{m_{toplam}} \quad (24)$$

Analitik modelde seçilen malzemelere ait karakteristik bilgiler Tablo 2'de yer almaktadır.

Kısım	Malzeme	Kütle Yoğunluğu (kg/m <sup>3</sup> )
Stator	M19-29	7650
Rotor	M19-29	7650
Mıknatıs	NdFe35	7400
Sargı	Bakır	8900

Tablo 2. Seçilen malzemeler ve özellikleri (Table 2. Selected materials and their properties)

## 2.3. Optimizasyon

Üretilen analitik model Matlab yazılımında Genetik Algoritma Çok Amaçlı Optimizasyon çözücüsü ile optimize edilmiştir. Tasarım kriterleri Tablo 3'te gösterildiği gibidir. Modelde  $R_{si}$  stator iç yarıçapı,  $g$  hava aralığı yüksekliği,  $h_m$  mıknatıs kalınlığı ve  $L$  makinenin aksel uzunluğu değişken olarak belirlenmiştir. Denklem seti toplam kütle minimize ederken verimliliği maksimize edecek şekilde çok amaçlı bir optimizasyon problemi elde edilmiştir.

Generatör Tasarım Parametreleri			
Ünite Sayısı	Güç (kW)	Gerilim (V)	Devir Sayısı (rpm)
2	22	300	2200
4	11	300	3000
8	5.5	300	4200

Tablo 3. Tasarım kriterleri (Table 3. Design criteria)

Ayrıca optimizasyonda akım yoğunluğu  $J_{cu}$ , tasarımın doğal soğutmalı olması sebebiyle kısıt olarak uygulanmıştır. Değişkenlere ve kısıta dair sınır değerleri Tablo 4'te gösterilmiştir.

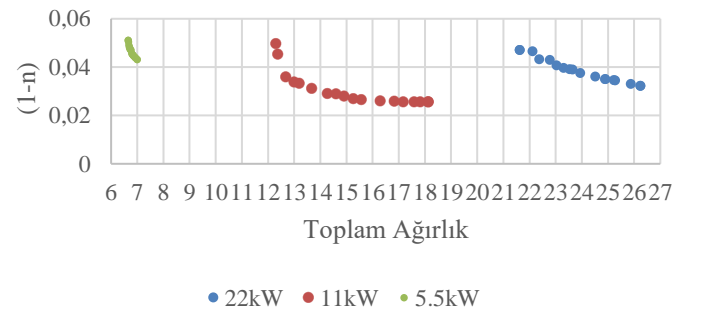
Değişken	Alt sınır	Üst Sınır	Birim
$R_{si}$	10	300	mm
$h_m$	2	8	mm
$g$	0,1	1,5	mm
$L$	10	60	mm
Kısıt			
$J_{cu}$	3	5.5	A/mm <sup>2</sup>

Tablo 4. Optimizasyon değişken ve kısıt sınırları (Table 4. Optimization variable and constraint limits)

Çok amaçlı optimizasyon ile Şekil 3'te yer alan pareto-front çözüm kümeleri elde edilmiştir. Amaç fonksiyonunda verim (1-n) ile ifade edilerek sonuç minimize edilerek verim (n) değerinin maksimize edilmesi sağlanmıştır. Her üç generator için de güç-ağırlık oranını yaklaşık 1kW/kg ve verimin %94-95 civarında olduğu gözlemlenmiştir.

Optimum değişken değerlerinin analitik denklem setinde uygulanması ile belirlenen generatör kesitleri Tablo 5'te gösterilmiştir. Analitik çözüm sonucu oluşan kütle ve verim değerleri Ansys-Maxwell 3D programı ile analiz edilerek sonuçlar çalışmanın bulgular bölümünde tartışılmıştır.

### Pareto-Front Çözümleri



Şekil 3. Pareto-Front çözüm sonuçları (Figure 3. Pareto-Front solution results)

## 2.4. Elektromanyetik Sonlu Elemanlar Analizi

Elektrik makinalarında kullanılan malzemelerin doğrusal olmayan yapısal özellikleri sebebiyle analitik işlemlerle bulunan tasarım kesitleri sonlu elemanlar analizi yardımıyla gerçeğe en yakın şekilde modellenerek makine performansı analiz edilir. Bu çalışmada da optimizasyonun analitik model üzerinden ürettiği kesitlerle oluşan üç farklı güçteki generatör Ansys-Maxwell 3D yazılımı ile analiz edilmiştir. Şekil 4 sonlu elemanlar analizi ile elde edilen akı ve akım yoğunluğu sonuçları göstermektedir.

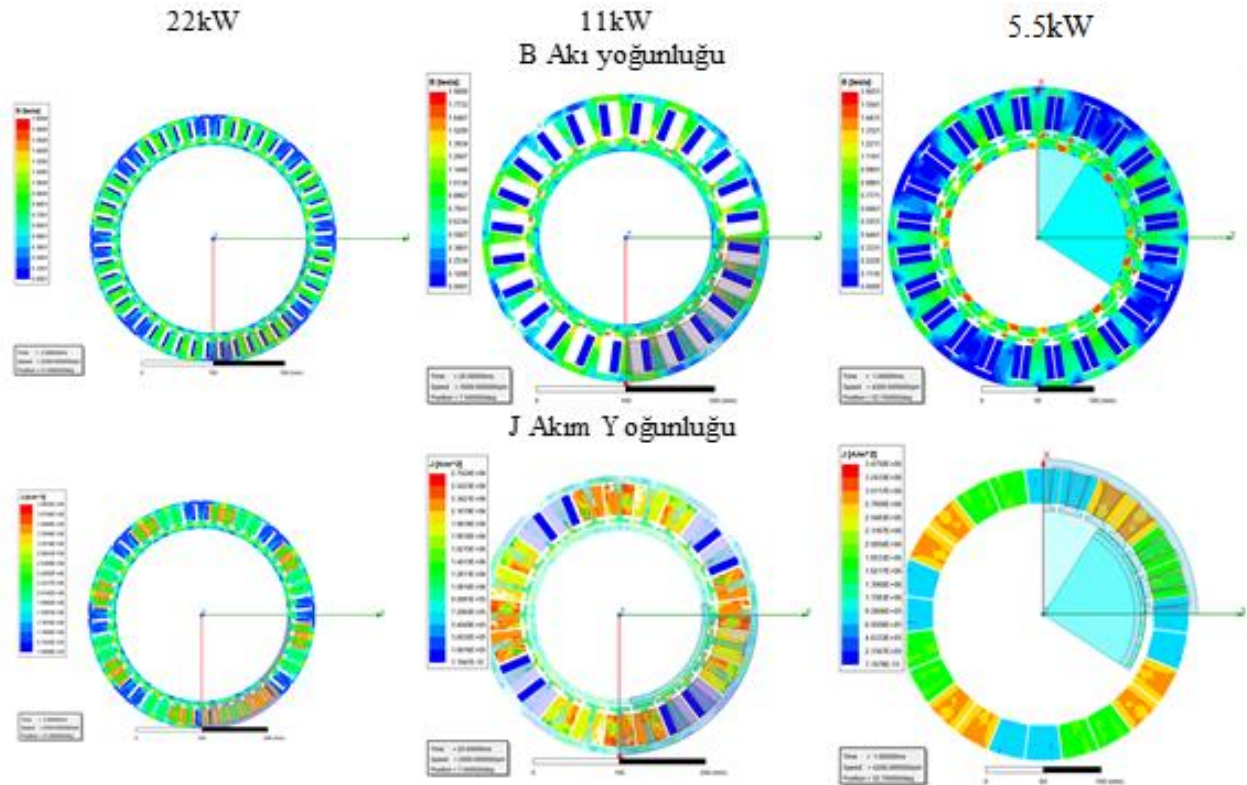
Şekil 4 incelendiğinde 22 ve 11 kW güçlerdeki generatörlerde stator dişleri haricinde optimizasyon ile belirlenen stator ve rotor boyunduruklarında doyum olmadığı görülmektedir. Bununla

birlikte 5.5kW'lık generatörde stator dişlerinin yanı sıra rotor boyunduruğunda dahi doyum gözlemlenmiştir. Analitik optimizasyon modelinin 22 ve 11 kW ölçekli generatörlerde daha doğru sonuç verdiği sonucuna varılmıştır. Aynı şekilde tasarlanan generatörlerin verim tayini için program ile kayıplar tespit edilmiştir. Şekil 5 demir kayıplarını Şekil 6 ise bakır kayıplarını göstermektedir.

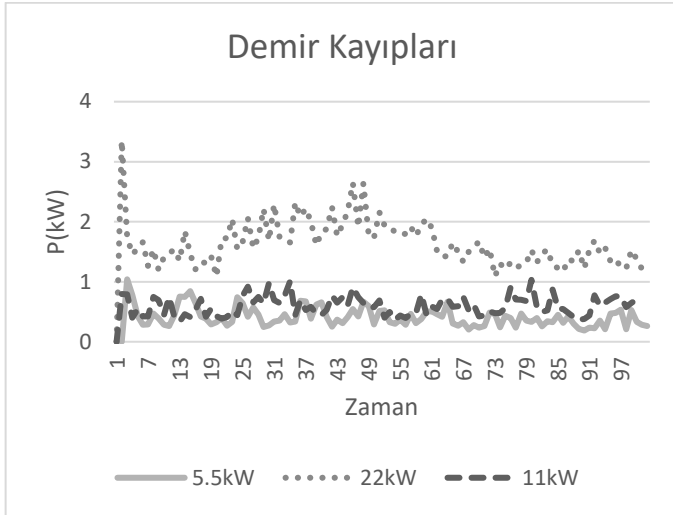
Generatörlerin dönüş hızlarının yüksek olması demir kayıplarını baskın hale getirmiştir. Kayıpların büyük çoğunluğunu her üç generatörde de demir kayıpları oluşturmaktadır. Ancak analitik çözümler, sonlu elemanlar analizi sonucuna göre büyük oranda sapmaktadır. Bu durum kayıp modelinin daha detaylı irdelenmesi ve modellenmesinin gerektiğini göstermektedir.

Simge	Kesit	Units	22kW	11kW	5kW	Simge	Kesit	Units	22kW	11kW	5kW
D <sub>so</sub>	Stator dış çapı	mm	525,4	326,3	207,8	N <sub>s</sub>	Oluk sayısı	mm	48	24	24
D <sub>si</sub>	Stator iç çapı	mm	416,7	216,9	134,9	P	Kutup sayısı	mm	20	20	20
D <sub>m</sub>	Rotor dış çapı	mm	414,7	215,6	134,1	b <sub>st</sub>	Stator diş kalınlığı	mm	15,5	15,6	12,9
D <sub>ri</sub>	Rotor iç çapı	mm	396,5	195,9	117,9	b <sub>ry</sub>	Rotor boyunduruk kalınlığı	mm	6,7	6,8	5,6
L	Eksenel uzunluk	mm	34,1	32,9	38,8	b <sub>sy</sub>	Stator boyunduruk kalınlığı	mm	7,8	7,8	6,4
h <sub>m</sub>	Mıknatıs yüksekliği	mm	2,5	3	3,6	h <sub>t</sub>	Oluk yüksekliği	mm	38,8	46,9	26
g	Hava aralığı yüksekliği	mm	0,98	0,65	1,1894	w <sub>t</sub>	Oluk genişliği	mm	14,8	25,8	15,7

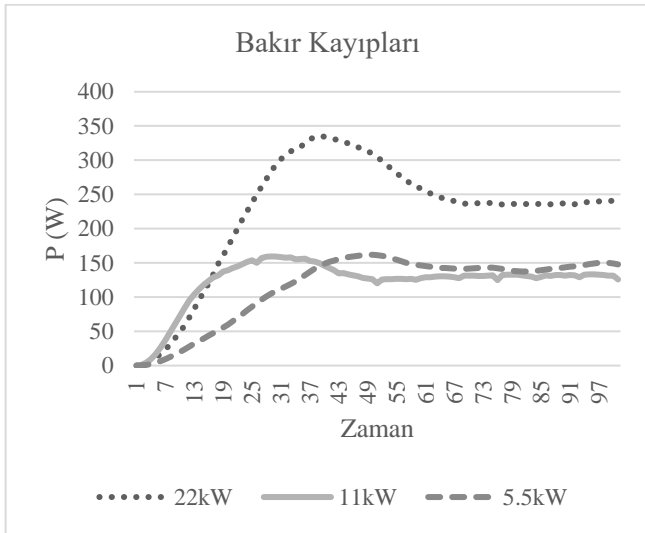
Tablo 5. Optimizasyon sonucu elde edilen kesit değerleri (Table 5. Cross-section values obtained as a result of optimization)



Şekil 4. Farklı güçlerde tasarlanan generatörlerin SEA sonuçları (Figure 4. FEA results of generators designed at different powers)



Şekil 5. Demir kayıpları (Figure 5. Iron Losses)



Şekil 6. Bakır kayıpları (Figure 6. Copper Losses)

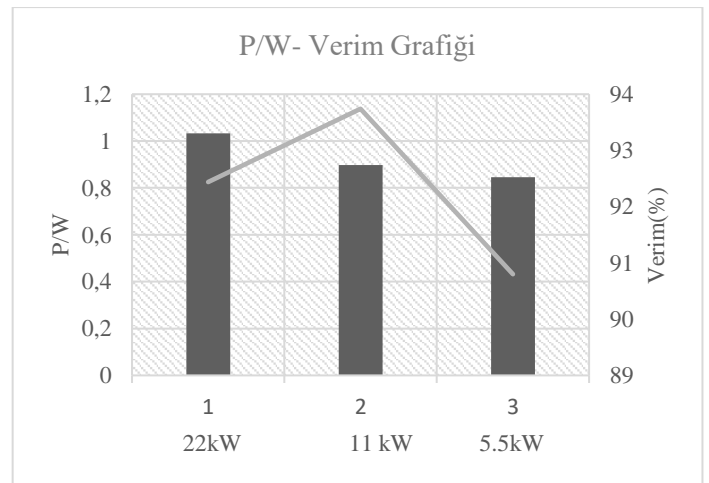
### 3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

Bu bölümde analitik çözümler ve sonlu elemanlar analiziyle bulunan sonuçlar arasındaki sapmalar irdelenmiştir. Her üç generatör için de ağırlık hesaplamaları toplamalarında %5'i geçmemiştir. Aynı şekilde verim hesaplamalarındaki sapma da 5.5kW'ta maksimum %4.71 olduğu görülmüştür. Fakat kayıp değerleri özellikle demir kayıplarında makul sınırların dışında kalmıştır. Sapmaların kaynakları araştırılarak analitik modelde kayıpların tayininde kullanılan katsayılar ile kesitlerin hesaplanmasında kullanılan denklemler irdelenerek güncellenmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Çalışmanın son aşamasında elde edilen üç farklı generatörün nihai ağırlık-güç oranı ve verim karşılaştırılması yapılmıştır. Şekil 7'de yer alan sonuçlara göre P/W oranında en yüksek değer 22kW'lık generatöre aitken verim açısından en başarılı 11kW'lık generatör olmuştur.

22 kW			
	Analitik	Maxwell 3D	Sapma (%)
$m_{sc}$	12,33	13,13	6,11
$m_{ry}$	2,20	2,18	1,06
$m_{Cu}$	6,45	5,33	20,95
$m_{mag}$	0,64	0,65	1,60
$m_{toplam}$	21,63	21,30	1,53
$P_{Cu}$	332,22	240,00	38,43
$P_{ir}$	753,32	1560,00	51,71
Toplam Kayıp	1085,50	1800,00	39,69
Verim	95,30	92,44	3,10
11 kW			
$m_{sc}$	5,66	5,54	2,14
$m_{ry}$	1,09	1,10	0,55
$m_{Cu}$	5,23	5,22	0,23
$m_{mag}$	0,39	0,39	0,85
$m_{toplam}$	12,38	12,25	1,04
$P_{Cu}$	192,82	133,33	48,32
$P_{ir}$	329,51	598,80	44,97
Toplam Kayıp	522,33	727,50	28,20
Verim	95,47	93,79	1,79
5,5 kW			
$m_{sc}$	3,41	3,51	2,75
$m_{ry}$	0,57	0,54	5,96
$m_{Cu}$	2,40	2,20	8,98
$m_{mag}$	0,28	0,25	13,29
$m_{toplam}$	6,67	6,50	2,56
$P_{Cu}$	105,74	143,85	26,50
$P_{ir}$	178,93	410,30	56,39
Toplam Kayıp	284,66	554,15	48,63
Verim	95,08	90,80	4,71

Tablo 6. Analitik ve sonlu elemanlar çözümleri karşılaştırılması (Table 6. Comparison of analytical and finite element solutions)



Şekil 7. P/W ve verim karşılaştırması (Figure 7. P/W- efficiency comparison)

## 4. Sonuç

Bu çalışmada yeni bir konsept olan havai rüzgâr enerji sistemleri için 44kW gücün üç farklı güçteki generatör ile karşılanması durumunda oluşacak ağırlık-güç oranı ve verimler irdelenmiştir. Matlab ortamında optimize edilen analitik model sonucu üretilen tasarımlar sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Ansys Maxwell 3D yazılımı ile analiz edilmiştir. Sonuç olarak güç/ağırlık (P/W) oranları; 22kW için 1.03 kW/kg 11kW için 0.89 kW/kg ve 5.5kW içinse 0.84 kW/kg, verim değerleri ise sırasıyla %92,44, %93,79, %90 olarak bulunmuştur. Generatörlerin hava aracına aerodinamik etkileri ve sistem güvenliği gibi parametreler ihmal edildiğinde yüksek güçlü generatörün verimli ve gücüne göre daha hafif olması sebebiyle tercih edilebilir olduğu sonucuna varılmıştır.

## Kaynakça

- Adhikari, J., & Panda S. K. (2015). Generation and Transmission of Electrical Energy in High-Altitude Wind Power Generating System. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 3 (2). <https://doi.org/10.1109/JESTPE.2015.2388702>
- Airborne Wind Europe. (2021, November 12). About Airborne Wind Energy. <https://airbornewindeurope.org/about-airborne-wind-energy/>
- Aull, M., Stough, A., & Cohen K. (2020). Design Optimization and Sizing for Fly-Gen Airborne Wind Energy Systems. *Automation*, 1 (1),1–16. <https://doi.org/10.3390/automation1010001>
- Bianchi, N., Bolognani, S., & Frare P. (2006). Design criteria for high-efficiency SPM synchronous motors. *IEEE Trans. Energy Conversion*, 21 (2), 396–404. <https://doi.org/10.1109/TEC.2005.853720>
- Carlos, G. G., Bulmaro, M. G., Honorato, A. C., & Amparo, P. M. (2010). Design of a 3.5 meters rotor two bladed horizontal axis wind turbine. *Proc. 20th Int. Conf. on Electronics, Communications and Computer (CONIELECOMP 2010)*, 247–251. doi: 10.1109/CONIELECOMP.2010.5440758
- Cherubini, A., Papini, A., Vertechy, R., & Fontana, M. (2015). Airborne Wind Energy Systems: A review of the technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, pp. 1461-1476. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.053>
- Emotor. (2021, September 10). Electric motor winding calculator. <https://www.emotor.com/windings/>
- Gammeter, C., Drapela, Y., Tüysüz A., & Kolar J.W. (2015). Weight optimization of a machine for airborne wind turbines. *IECON 2014- 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. <https://doi.org/10.1109/IECON.2014.7048616>
- Kitekraft. (2021, November 12). <https://www.kitekraft.de/>
- Loyd, M. L., (1980). Crosswind kite power. *J. Energy*, 4 (3), 106–111.
- Rancourt, D., Bolduc-Teasdale, F., Bouchard E.D., Anderson, M. J., & Mavris, D. N. (2016). Design space exploration of gyrocopter-type airborne wind turbines. *Wind Energy*, 19 (5), 895–909. <https://doi.org/10.1002/WE.1873>.
- Seo, U.-J., Chun, Y.-D., Choi, J.-H., Chung, S.-U., Han, P.-W., & Koo, D.-H. (2013). General characteristic of fractional slot double layer concentrated winding synchronous machine. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, 8(2), 282–287. <https://doi.org/10.5370/jeet.2013.8.2.282>

- Subotic, I., Gammeter, C., Tüysüz, A., & Kolar J. W. (2016). Weight optimization of an axial-flux PM machine for airborne wind turbines. *IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. <https://doi.org/10.1109/PEDES.2016.7914327>
- Tarimer, İ., Arslan, S., & Güven, M. E. (2012). Investigation for Losses of M19 and Amorphous Core Materials Asynchronous Motor by Finite Elements Methods. *Elektronika Ir Elektrotehnika*, 18 (9). <https://doi.org/10.5755/j01.eee.18.9.2797>
- Windlift. (2021, November 12). Airborne Power Generators. <https://windlift.com/>
- Zhang, X., Li, L., & Zhang, C. (2020). Mass Optimization Method of a Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor Based on a Lightweight Structure. *IEEE-Access*, 8, 40431-40444. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2974908>
- Zhu, Z. Q., Howe, D., Bolte, E., & Ackermann B. (1993). Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. I. Open-circuit field. *IEEE Trans. Magn.*, 29 (1), 124-135. <https://doi.org/10.1109/20.195559>