

Çok Amaçlı Genetik Algoritma Yöntemi Kullanılarak Enine Laminasyonlu Senkron Relüktans Motor Optimizasyonu

Hasan ÇAMCI^{1*}, Onur Özdal MENGI², Serdal ARSLAN³

Öz

Senkron relüktans motor (SynRM), asenkron motor ile aynı gövde yapısına sahip olmasına rağmen rotor yapıları farklıdır. Rotorunda sargı, bakır veya alüminyum çubuklar bulundurmadığından rotor kayıpları azalmakta ve verimleri artmaktadır. Ancak SynRM'nin tork dalgalanması önemli bir problemdir ve motor performansını düşürmeden tork dalgalanmasının azaltılması elzemdir. Bu amaç doğrultusunda çalışmada, 4 KW gücündeki senkron relüktans motor dikkate alınmıştır. Motora ait tüm elektriksel ve mekaniksel veriler Ansys Maxwell programında tanımlanarak motorun analizi gerçekleştirilmiştir. Çok amaçlı genetik algoritma (MOGA) yöntemi kullanılarak motor performansı artışı için tanımlanan amaç fonksiyonları doğrultusunda optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Rotor boyutlandırma parametreleri giriş değişkenleri, çıkış büyüklükleri ise çıkış gücü, verim, tork, tork dalgalanması, çıkıntı oranı olarak tanımlanmıştır. Bariyer sayısı sırasıyla 3, 4 ve 5 için beş amaç fonksiyonu MOGA ile sınanmıştır. Ele alınan amaç fonksiyonlarından elde edilen sonuçlar referans motor verileri ile karşılaştırılmıştır. Amaç fonksiyonu 1'in dışında diğer amaç fonksiyonları referans motorun verim, çıkış gücü, tork dalgalanması bakımından karşılayamamaktadır. 4 bariyerli amaç fonksiyonu 1'den elde edilen verimde değişim gözlenmezken çıkış gücünde % 0,31 artış, tork dalgalanmasında %31,71 azalma görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Senkron Relüktans Motor, Çok amaçlı genetik algoritma, Ansys Maxwell, Optimizasyon.

Optimization of Transverse-Laminated Synchronous Reluctance Motor by Using Multi-Purpose Genetic Algorithm Method

Abstract

Although the synchronous reluctance motor (SynRM) has the same body structure as the induction motor, the rotor structures are different. Since the rotor does not contain any copper or aluminum rods in the winding, rotor losses are reduced and efficiency is increased. However, SynRM's torque ripple is a major problem and reducing torque ripple without degrading engine performance is essential. For this purpose, 4 kW synchronous reluctance motor was considered in the study. All electrical and mechanical data of the motor were defined in the Ansys Maxwell program and the analysis of the motor was carried out. Optimization studies were carried out using the multi-objective genetic algorithm (MOGA) method in line with the defined objective functions to increase the engine performance. Rotor sizing parameters are defined as input variables and output sizes as output power, efficiency, torque, torque ripple, saliency ratio. Five objective functions were tested with MOGA for barrier numbers 3, 4 and 5, respectively. The results obtained from the considered objective functions were compared with the reference motor data. Except for objective function 1, other objective functions cannot meet the reference motor in terms of efficiency, output power, torque fluctuation. While no change was observed in the efficiency obtained from the 4-barrier objective function 1, an increase of 0.31% in output power and a decrease of 31.71% in torque fluctuation were observed.

Keywords: Synchronous Reluctance Motor, Multi-objective Genetic Algorithm, Ansys Maxwell, Optimization.

¹Giresun Üniversitesi, Tirebolu Mehmet Bayrak MYO Elektrik ve Enerji Bölümü, Giresun, Türkiye, hasan.camci@giresun.edu.tr

²Giresun Üniversite, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği, Giresun, Türkiye, onur.ozdal.mengi@giresun.edu.tr

³Harran Üniversitesi, Organize Sanayi Bölgesi MYO Elektrik Programı, Şanlıurfa, Türkiye, serdalarslan@harran.edu.tr

¹<https://orcid.org/0000-0002-0193-9509>

²<https://orcid.org/0000-0001-5669-0766>

³<https://orcid.org/0000-0002-1187-5633>

1. Giriş

Elektrik enerjisi tüketim miktarları bakımından elektrik motorları; endüstriyel, ticari ve konut alanlarında en yüksek tüketime sahip elektrikli cihazlar arasında bulunduğu bilinmektedir. Elektrik motorları içinde ise asenkron motorlar oldukça yüksek enerji kayıplarına sahiptir. Yapılan bir araştırmaya göre bu motorların verimlerinde %1'lik bir iyileştirme yapıldığında bile yıllık 20 milyar kWh'lik enerji kazanımı elde edilmesi mümkün olmaktadır (Özçelik, 2016).

Yıllardır kullanılan asenkron motorlar, sağlam mekanik yapısı, düşük maliyeti ve az bakım gerektirmesi gibi nedenlerle yaygın olarak kullanılmaktadır (Tarımer ve ark., 2012; Arslan, 2016; Arslan ve ark., 2016). Son yıllarda asenkron motor verimliliğinin artışı üzerine çalışmalar gerçekleştirilmiştir (Tarımer ve ark., 2012; Arslan ve ark., 2016). Fakat rotorda bulunan sargılar, bakır ya da alüminyum çubuklar asenkron motorlarda birçok dezavantaja yol açmaktadır. Özellikle elektriksel kayıplar motor veriminin düşmesine de neden olmaktadır. Ayrıca rotor sıcaklığının yükselmesiyle rulmanlarda arızalar görülebilir. Bu durumun yanı sıra, asenkron motorun rotor çubuklarında mekanik arızalarda görülebilir, bu da motorun güvenilirliğini azaltmaktadır (Heidari ve ark., 2021).

Senkron relüktans motorların rotorunda sargı ya da çubuklar bulunmadığından rotorlarında ısınma olmaz ve soğuk çalışırlar. Bu durum rotor bakır kayıplarının olmayacağı ve verimlerinin yüksek olacağı anlamını taşımaktadır. SynRM'ler asenkron makineler ile aynı stator yapısına sahip olmalarından dolayı aynı üretim bandında üretilmeleri mümkündür. Bu açıdan maliyeti düşüren etkilerden birisidir. Senkron relüktans motorların bazı olumsuzlukları olmakla birlikte rotor tasarımı, manyetik çelik türü, stator sarım konfigürasyonlarında yapılacak iyileştirmelerle daha verimli bir yapının oluşturulması mümkündür (Tawfiq ve ark., 2021).

SynRM'lerin icadından bu yana yüzyıla yakın zaman geçmesine rağmen, kullanılan malzeme açısından önemli değişiklik göstermemektedir. Ayrıca güç elektroniği devrelerinin ortaya çıkmasıyla birlikte SynRM'ler büyük ilgi görmeye başlamıştır. Özellikle son on yılda, piyasanın önde gelen üreticileri yeni tasarladıkları SynRM sistemlerini piyasaya sürmüşlerdir (Heidari ve ark., 2021). Motor asenkron motorun stator yapısına sahip olmasına karşın rotorda kanallar açılmış çıkıntılı yapıya sahiptir. Bu açıdan SynRM'ler, sinüzoidal akım tarafından uyarılan ve hava aralığına sahip geleneksel alternatif akım makineleridir. d ekseni ve q ekseni arasındaki endüktans farkından dolayı elektromanyetik tork üretirler (Zhang, 2021).

SynRM'nin performansını geliştirmek üzere, akı bariyerlerine ilişkin optimal geometrilerin bulunmasına yönelik çok sayıda araştırma yapılmıştır. Palmier ve ark., Wang ve ark. akı bariyerlerinin ve stator oluklarının sayısının SynRM'nin optimal tasarımındaki etkisini incelemişlerdir. Tork dalgalanmasının en yüksek iki akı bariyeri ile elde edildiği kanıtlanmıştır

(Palmieri ve ark., 2014; Wang ve ark., 2015). Sanada ve ark., SynRM performansının daha da geliştirilmesi için asimetrik bir akı bariyeri (rotor olukları arasındaki açıklığın eşit olmadığı) tasarımı önermiştir. Önerilen tasarımdaki tork dalgalanması, simetrik tasarıma kıyasla yaklaşık %80 oranında azalmıştır. Bununla birlikte, ortalama tork değerinde değişme olmamıştır (Sanada ve ark., 2004). Bacco ve Bianchi, ortalama torku düşürmeden tork dalgalanmasını minimize ederek akı bariyerinin konumunun belirlenebileceği analitik bir yöntem önermişlerdir (Bacco ve Bianchi, 2018). Babetto ve ark., SynRM'lerin yüksek hızlardaki performansının optimizasyonunda kırışlerin kalınlığı, akı bariyerlerinin konumları ve uçları gibi rotor geometrilerini incelemişlerdir (Babetto ve ark., 2018).

Tasarımı analitik modellere dayandıranlar da dahil olmak üzere, literatürdeki çoğu yazar SynRM'lerin tasarımında sonlu elemanlar yönteminin (SEY) kullanımını belirtmektedir (Lovelace ve ark., 2022; Sizov ve ark., 2011). Sonlu elemanlar yöntemi ve çok amaçlı optimizasyon algoritmalarının birlikte kullanıldığı etkin bir optimizasyon için; rotor geometrisinin tanımının olabildiğince basitleştirilmesi, aday çözümlerin SEY değerlendirme süresini en aza indirmesi, zaman ve doğruluk arasında bir denge sağlamak için MOGA'yı ve ayarlarını doğru şekilde seçmek gerekmektedir. Cupertino ve ark. SynRM'lerin rotor geometrisinin otomatik tasarımı için SEY ve MOGA kullanmışlardır. Özellikle popüler olan üç MOGA'nın performansı, nihai tasarımın kalitesi ve hesaplama süresi açısından analiz edilmiş ve karşılaştırılmıştır. Çalışmada çok amaçlı genetik algoritma (MOGA), çok amaçlı diferansiyel evrim (MODE) ve çok amaçlı benzetilmiş tavlama (MOSA) SynRM'nin rotorunun optimizasyonuna uygulanmıştır (Cupertino ve ark., 2014).

SynRM'nin performansını düşürmeden tork dalgalanmasının azaltılması elzemdir. Bu durumu ele alan literatürde verilen çalışmalarda yaygın olarak optimizasyon yöntemleri karşılaştırmaları gerçekleştirilmesine rağmen MOGA özelinde ise bir veya iki amaç fonksiyonu üzerinden en uygun şekle sokma gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmada diğer çalışmalara benzer olarak SEY ile analiz ve en uygun rotor boyutlandırma parametrelerinin tespiti için çok amaçlı genetik algoritma yöntemi tercih edilmiştir. Ancak diğer çalışmalardan farklı olarak farklı amaç fonksiyonlarının SynRM'nin rotor bariyer sayısının değişimine bağlı olarak en uygun rotor geometrisinin elde edilmesine odaklanılmıştır. Referans motorun temel boyutlandırma ölçüleri hali hazırda imalatı yapılan motordan alınmıştır. Bu motorun stator verileri sabit tutularak motor performans parametrelerini içeren amaç fonksiyonları çok amaçlı genetik algoritma yöntemi ile farklı rotor bariyer sayıları için sınanmıştır. En uygun rotor verileri için elde edilen performans sonuçları referans motor ile karşılaştırılmıştır. Birinci olarak verilen amaç fonksiyonu ile en iyi boyutlandırma verileri elde edilmiştir.

2. Materyal ve Metot

2.1 SynRM İçin Matematiksel İfadeler

SynRM'lerin performans parametreleri arasında tork, tork dalgalanması, güç faktörü, çıkış gücü, kayıplar ve verim değerleri verilebilir. Makine tasarımı yapılırken tüm bu parametrelerin optimum değerlerini bulmak zor olduğundan dolayı tasarımda bazı parametrelere öncelik verilmektedir. Burada tasarımcının amacı yüksek tork, yüksek verim, yüksek güç ya da düşük tork dalgalanması, düşük kayıp gibi parametreler olabilir. Aynı zamanda SynRM'da performans parametrelerini etkileyen değerlerden ikisi L_d , L_q endüktansları ve çıkıntı oranıdır. Bu iki değer SynRM için önemli performans parametrelerinden biri olan moment değerini de doğrudan etkilediği Denklem (1) ve Denklem (3)'de (Solak, 2021) açıkça gösterilmektedir.

$$T = \frac{3p}{2} (L_d - L_q) i_d i_q \quad (1)$$

$$\xi = \frac{L_d}{L_q} \quad (2)$$

Burada T tork (Nm), p kutup sayısı, L_d d eksenli endüktansı (H), L_q q eksenli endüktansı (H), i_d ve i_q sırasıyla d ve q eksenli akımlarını (A) ifade etmektedir.

Tork ifadesini Denklem (2)'de (Solak, 2021) verilen çıkıntı oranı (ξ) cinsinden yazdığımızda Denklem (3) elde edilmiş olur.

$$T = \frac{3p}{2} L_d \left(1 - \frac{1}{\xi}\right) i_d i_q \quad (3)$$

Aynı zamanda tork ifadesi Denklem (4)'de (Solak, 2021) olduğu gibi d ve q eksenli arasındaki akımın faz açısı cinsinden de ifade edilebilir.

$$T = \frac{3p}{2} (L_d - L_q) I_s^2 \sin(2\theta) \quad (4)$$

Burada I_s stator akımını (A), θ akım açısını ($^\circ$) simgelemektedir.

Tork ifadesinden sonra motorun düşük hızda döndüğünü varsayarsak ve demir kayıpları ihmal edilerek verim ifadesi Denklem (5)'te (Solak, 2021) verilmiştir.

$$\eta = \left(1 + \frac{P_{loss}}{P_{out}}\right)^{-1} \quad (5)$$

Denklem (6)'da (Solak, 2021) görüldüğü üzere demir kayıpları ihmal edildiğinden dolayı P_{loss} ifadesi bakır kayıplarına eşit olmaktadır.

$$P_{loss} = P_{Cu} = 3R_s I_s^2 \quad (6)$$

SynRM'nin verimi tüm motorlarda olduğu gibi Denklem (7) ile de tanımlanabilir.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{in} - P_{loss}}{P_{in}} \quad (7)$$

Denklem (7)'de verilen P_{out} çıkış gücü (W) Denklem (8), P_{in} giriş gücü (W) ise Denklem (9)'daki (Özdil ve Uzun, 2021) gibi ifade edilmektedir.

$$P_{out} = \omega T \quad (8)$$

$$P_{in} = 3V_s I_s \cos(\varphi) \quad (9)$$

$$PF = \cos(\varphi) \quad (10)$$

Burada ω açısal hız (rad/sn) cinsinden rotor hızı, V_s faz gerilimi (V), I_s faz akımı (A), PF güç faktörü, (φ) faz gerilimi ile faz akımı arasındaki faz açısını ($^\circ$) ifade etmektedir.

Son olarak SynRM'lerde performansı etkileyen ve azaltılması istenen tork dalgalanması ifadesi temel olarak Denklem (11)'de (Özdil ve Uzun, 2021) olduğu gibi ifade edilebilir.

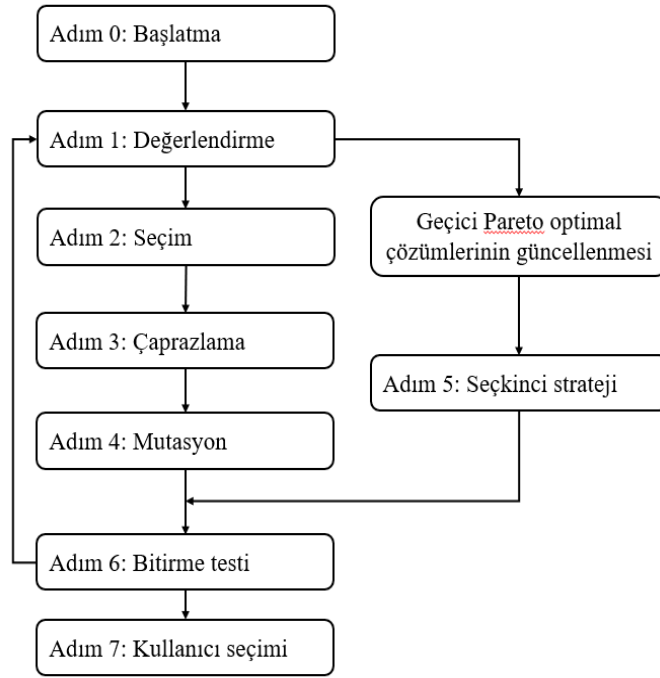
$$T_{rip}(\%) = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{avg}} \quad (11)$$

Burada T_{rip} dalgalanma oranı, T_{max} (Nm) olarak kalıcı hal durumundaki maksimum tork değeri, T_{min} (Nm) olarak kalıcı hal durumundaki minimum tork değeri, T_{avg} (Nm) olarak kalıcı hal durumundaki ortalama tork değeri olarak verilmiştir.

2.2 Motorun Ansys Maxwell ile Modellenmesi ve Optimizasyon Süreci

Sonlu elemanlar yöntemi, günümüzde karmaşık elektromanyetik alan problemlerinin çözülmesinde en çok tercih edilen yöntemlerden biridir. Günümüzde bu yöntemi kullanan Ansys Maxwell vb. yazılımlar kullanılmaktadır. Çalışmanın tasarım aşaması; hali hazırda ticari olarak üretilen SynRM'nin geometrik büyüklükleri sonlu elemanlar yöntemi kullanan bir yazılım (Ansys Maxwell) içerisinde tanımlanmış ve 2D nümerik analizi gerçekleştirilmiştir. Burada elde edilen motor verileri analitik olarak hesaplanan değerler olduğundan dolayı önemli bir hata değerine sahiptir (Arslan, 2016). Bu açıdan model tasarımının 2 boyutlu veya 3 boyutlu olarak Ansys Maxwell'de analizinin yapılması gerekir. 3 boyutlu analiz yerine 2 boyutlu analiz hem analiz zamanını kısaltmakta ve kabul edilebilir hata kriterine sahiptir. Sonlu elemanlar yöntemi ile tasarımı gerçekleştirilen motorun belirlenen amaç fonksiyonları altında çok amaçlı genetik algoritma yöntemi kullanılarak çok kriterli optimizasyon tekniği ile çözüm gerçekleştirilir. Kullanılan yazılım içeriğinde optimizasyon modülü altında çok amaçlı genetik algoritma yöntemi mevcuttur.

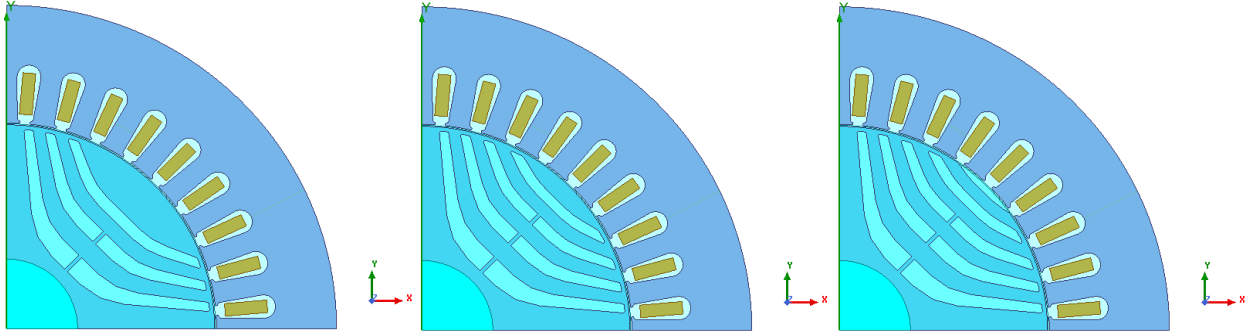
Genetik Algoritma esas olarak doğadaki doğal seçim temeline dayanmaktadır ve tek amaçlı optimizasyon problemlerine uygulanmıştır. Ancak birçok gerçek dünya probleminin birden çok amaç fonksiyonu vardır. Bu amaç fonksiyonları, tek amaçlı bir genetik algoritma tarafından ele alınabilmesi için bir skaler uygunluk fonksiyonunda birleştirilmelidir. Burada çok amaçlı optimizasyon problemlerinin amacı, genellikle birbiriyle çelişen çok amaçlı işlevler arasında olası tüm dengeleri bulmaktır. Bu açıdan SynRM ve diğer elektrik makinalarında performans çözümü için kullanılabilir. Karar verici ile yinelemeli etkileşim olmaksızın çok amaçlı bir performans içeren optimizasyon problemi için tek bir çözüm seçmek zor olduğundan, genel bir yaklaşım karar vericiye Pareto optimal çözümler kümesini göstermektir. Daha sonra tercihe bağlı olarak Pareto optimal çözümlerden biri seçilebilir. Genetik algoritmalar ile tüm Pareto optimal çözümlerini bulmak için, her nesilde bireylerin çeşitliliği korunmalıdır (Murata ve Ishibuchi, 1995). Şekil 1'de çok amaçlı genetik algoritmanın blok şeması verilmiştir.



Şekil 1. Çok Amaçlı Genetik Algoritmanın blok şeması (Murata ve Ishibuchi, 1995).

Elektrik motorunun optimizasyonunda ele alınan genel ölçüler (Aktif çap, Aktif uzunluk, Dış çap/İç Çap vb.) ve diğer genel parametreler (faz sayısı, çalışma frekansı, güç, hız, kutup sayısı, vb.) dikkate alındığında yüksek tork, yüksek verim ve düşük tork dalgalanması istenir. Bu çalışmada, referans motor olarak hali hazırda ticari ürün olarak üretilmekte olan 3 faz, 50 Hz, 4 KW gücünde 1500 rpm devir sayısına sahip senkron relüktans motor ele alınmıştır. Bu motor 165mm/104mm stator dış çap/rotor dış çap oranı ve 135 mm paket boyuna sahiptir. Stator ölçüleri, stator ve rotor için kullanılan materyaller ve hava aralığı ele alınan modeller için eşit alınmıştır. Paket boyu sabit tutularak sadece rotor büyüklüklerinin optimizasyonu ele alınmıştır. Şekil 1'de verilen motorun;

Tablo 1’de verilen veriler doğrultusunda sayısal çözümleri gerçekleştirilmiştir. Tablo 2’de verilenler ve tanımlanan beş amaç fonksiyonu bariyer sayısı dikkate alınarak optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Analizler sonucunda en uygun büyüklükler elde edilmiştir. Daha sonra referans motorun stator büyüklükleri aynı kalmak şartıyla hesaplanan optimum boyutlandırma sonuçları referans makine ile karşılaştırılarak geometrideki değişim, tork, tork dalgalanması ve verimde ne kadarlık değişim oluşturduğu incelenmiştir.



Şekil 2. Referans motor için sabit stator büyüklükleri altında rotor bariyer değişimi (soldan sağa doğru 3-4-5 olarak verilmiştir).

Şekil 2’de yer alan modellerin oluşturulmasında kullanılan rotor büyüklüklerinin (Bariyer sayısı, H , W , R , B_0 , R_b , Y_0 , R_0) ölçüleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Rotor Tasarımı İçin Referans Büyüklükler.

Rotor Boyutlandırma Büyüklükleri	Değeri	Birimi	Rotor
Bariyer Sayısı	3-4-5	-	
Bariyer uç köprü kalınlığı (H)	1	mm	
Bariyer köprü genişliği (W)	1	mm	
Bariyer uç yarıçapı (R)	0,5	mm	
Bariyer köprü yüksekliği (B_0)	5	mm	
Akı bariyeri başlama yarı çapı (R_b)	21	mm	
Akı bariyeri demir genişliği (Y_0)	5	mm	
Akı bariyeri köşe demir yarıçapı (R_0)	18	mm	

Rotora ait Bariyer sayısı, H , W , R , B_0 , R_b , Y_0 , R_0 değişkenler minimum ve maksimum aralıkları Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. Rotor Tasarımı Giriş Değişkenleri ve Sınırları.

Rotor Boyutlandırma Büyüklükleri	Değeri	Birimi	Minimum Değeri	Maksimum Değer
Bariyer Sayısı	3-4-5			
H	1	mm	0,5	2
W	1	mm	0	2
R	0,5	mm	0	2
Rb	18	mm	18	19
B ₀	5	mm	2,5	5
Y ₀	5	mm	2,5	5
R ₀	18	mm	0	36

Aşağıda verilen amaç fonksiyonları doğrultusunda optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon yöntemi olarak çok amaçlı genetik algoritma yöntemi (MOGA) seçilmiştir. Maksimum iterasyon sayısı 500 olarak sınırlandırılmıştır. Seçilen optimizasyon yöntemi için A.F.1’de her bir optimize edilecek büyüklük için maksimum ve minimum operatör seçilememektedir. Bu nedenle sınır değerleri girilmiştir. Önerilen amaç fonksiyonlarının benzer tanımlamaları farklı motor ve jeneratörler için önerilmiştir. Örneğin hat başlatmalı sürekli mıknatıslı motor için maliyet ve ağırlık içeren optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir (Topaloğlu ve ark., 2014), yine benzer bir yaklaşım tüp tipi doğrusal jeneratör için tepki yüzeyi metodolojisi ve MOGA ile optimizasyon gerçekleştirilmiştir (Arslan ve ark., 2022). Burada ele alınan amaç fonksiyonları referanslarda belirtilen maliyet ve ağırlık yerine tork dalgalanması olarak ele alınmıştır.

Tablo 3. MOGA için tanımlanan amaç fonksiyonları.

Amaç Fonksiyonu	Amaç Fonksiyonu Açıklama	Amaç Fonksiyonu Tanımlamaları	Operatör	Değeri	Ağırlık	Birimi
Amaç fonksiyonu 1 (A.F.1)	Ulaşılmaması hedeflenen tork, tork dalgalanması ve verim değeri tanımlanmıştır. Her üç senkron relüktans motor için tasarımsal açıdan eşit ağırlık ile tanımlanmıştır.	<i>Tork</i>	\geq	34	1	<i>Nm</i>
		<i>Tork Dalgalanması</i>	=	0	1	<i>Nm</i>
		<i>Verim</i>	=	1	1	-
Amaç fonksiyonu 2 (A.F.2)	A.F.1 için verilen üç büyüklük tek bir formülle ifade edilerek genel performans artırımı amaçlanmıştır. Üç büyüklük için negatif tam sayılı ifade olmadığından dolayı ifadeyi maksimum yapacak en uygun boyutlandırma verisi aranmıştır.	$\frac{Tork * Verim}{Tork Dalgalanması}$	Maksimize	-		
Amaç fonksiyonu 3 (A.F.3)	Tork ve verimi yükseltecek boyutlandırma büyüklüğünün bulunması hedeflenmiştir.	<i>Tork * Verim</i>	Maksimize	-		
Amaç fonksiyonu 4 (A.F.4)	Motor veriminin artması beklenirken aynı zamanda tork dalgalanmasını küçülten boyutlandırma büyüklüğünün bulunması hedeflenmiştir.	$\frac{Verim}{Tork Dalgalanması}$	Maksimize	-		

Amaç fonksiyonu 5 (A.F.5)	Sadece verimi yükseltecek boyutlandırma büyüklüğünün bulunması hedeflenmiştir.	Verim	Maksimize	-
---------------------------	--	-------	-----------	---

3. Bulgular ve Tartışma

Tablo 3'te verilen amaç fonksiyonlarına göre Tablo 4 ve Tablo 5'te sırasıyla optimizasyon sonuçları verilmiştir. Burada bariyer sayısının ve rotor boyutlandırma büyüklüklerinin değişimi Tablo 5'te görüldüğü üzere motor performansını önemli ölçüde değiştirmektedir.

Tablo 4. MOGA'da amaç fonksiyonlarına göre elde edilen en uygun rotor boyutlandırma büyüklükleri.

	Bariyer Sayısı	B ₀ (mm)	H (mm)	R ₀ (mm)	R _b (mm)	R (mm)	W (mm)	Y ₀ (mm)
Amaç Fonksiyonu 1	3	4,513	0,5739	31,56	18,1	0,5386	0,07065	2,987
	4	4,319	0,613	12,56	18,2	0,711	0,327	3,933
	5	4,15	1,302	18,86	18,28	0,1491	0,03317	2,992
Amaç Fonksiyonu 2	3	2,688	1,821	33,89	18,27	0,0488	0,5027	3,679
	4	2,521	1,344	10,06	18	1,32	0,2361	2,51
	5	3,068	1,534	7,534	18,36	0,4241	1,786	4,266
Amaç Fonksiyonu 3	3	4,839	0,5882	10,13	18,58	0,04814	0,03183	4,164
	4	4,966	0,5412	34,08	18,93	0,05477	0,03232	4,747
	5	4,913	0,5338	21,31	18,74	0,5548	0,03469	3,373
Amaç Fonksiyonu 4	3	2,895	1,928	8,631	18,13	0,3405	0,5736	3,452
	4	2,509	1,785	0,413	18	0,00572	0,9521	2,515
	5	2,812	1,833	25,17	18,84	0,6245	1,866	4,268
Amaç Fonksiyonu 5	3	4,895	0,5173	33,62	18,68	1,652	0,1664	4,524
	4	4,211	0,524	34,1	18,37	0,9546	0,08756	2,874
	5	4,979	0,5427	20,2	18,38	1,689	0,126	3,578

Tablo 5'te verilen optimizasyon sonuçları incelendiğinde; motor performansını artırmaya yönelik tanımlanan fonksiyonlar içerisinde en iyi sonuçlar A.F.1 ile elde edilmiştir. Diğer optimizasyon sonuçları incelendiğinde ele alınan amaç fonksiyonuna göre çıkış performansı değişmiştir. Örneğin; A.F. 2 ve A.F. 4 düşük tork dalgalanması sunmasına karşın çıkış gücü ve tork büyüklüğü açısından uygun değildir. Özellikle performansın yüksek olmasına karşın tork dalgalanmasının yüksekliği nedeniyle A.F. 3 ve A.F. 5 sonuçları uygun değildir. A.F.1'de 4 ve 5

bariyerli sonuçlar çıkış gücü, tork, verim ve özellikle düşük tork dalgalanması açısından en uygun sonuç olduğu söylenebilir. Buradaki 4 ve 5 bariyerli tasarımlar için mekanik ve sıcaklık analizleri gerçekleştirildikten sonra imal edilerek testleri gerçekleştirilebilir.

Tablo 5. MOGA’da amaç fonksiyonlarına göre elde edilen en uygun rotor verileri.

Tanımlamalar	Bariyer Sayısı	Çıkış gücü (W)	Verim	Tork (Nm)	Tork Dalgalanması	Tork/Tork Dalgalanması Oranı	Faz Akımı (A)	Çıkıntı Oranı (Ld/Lq)	İterasyon Numarası	Maliyet
A.F.1	3	4491,4580	0,9612	27,8283	7,7590	3,586583	10,7812	4,8106	456	100,6
	4	5474,2546	0,9624	34,0128	4,9986	6,804465	12,3316	6,2181	415	27,804
	5	5635,6102	0,9594	34,8051	5,1703	6,731737	12,8445	6,0104	390	27,979
A.F.2	3	2239,5512	0,9226	13,6391	1,2253	11,13123	7,1850	2,7936	423	-10,077
	4	2851,7826	0,9347	17,3379	1,7932	9,668693	8,0090	3,3715	444	-10,035
	5	3383,9965	0,9444	20,0271	2,3715	8,444908	8,5995	3,8452	413	-7,1902
A.F.3	3	5103,1384	0,9693	31,7673	18,2952	1,736373	11,7749	5,4868	447	-30,762
	4	6864,1267	0,9659	42,9709	19,8276	2,167226	15,1702	7,9063	462	-41,408
	5	7709,4621	0,9774	48,3838	23,6928	2,042131	16,8787	8,7402	435	-47,216
A.F.4	3	2183,6832	0,9204	13,1738	1,1568	11,38814	7,1042	2,7339	431	-0,73057
	4	2421,7312	0,9224	14,4847	1,3179	10,99074	7,4155	2,9061	423	-0,77432
	5	2814,7021	0,9335	16,2469	1,8288	8,883913	7,7330	3,2531	439	-0,44251
A.F.5	3	5141,2492	0,9757	31,9277	15,9860	1,997229	11,6096	5,7166	439	-0,98387
	4	5506,2068	0,9778	34,2493	11,0018	3,113063	12,3943	5,9276	449	-0,98452
	5	7449,7885	0,9828	46,6130	23,8347	1,955678	16,0849	8,5289	464	-0,98459
REFERANS MOTOR	3	4708,68	0,955	29,976	5,49	5,460109	11,44	5,38	-	-
	4	5457,2916	0,9619	34,74	7,32	4,745902	12,64	6,25	-	-
	5	5873,14	0,972	37,389	8,99	4,158954	12,73	6,702	-	-

Tablo 6. A.F.1 ile referans motorun karşılaştırılması (4 bariyer).

	Çıkış gücü (W)	Verim	Tork (Nm)	Tork Dalgalanması	Faz Akımı (A)	Çıkıntı Oranı (Ld/Lq)
Referans motor	5457,2916	0,9619	34,74	7,32	12,64	6,25
A.F.1	5474,2546	0,9624	34,0128	4,9986	12,3316	6,2181
Performans değişimi (%)	+0,31	+0,05	-2,09	-31,71	-2,44	-0,51

Tablo 7. A.F.1 ile referans motorun karşılaştırılması (5 bariyer).

	Çıkış gücü (W)	Verim	Tork (Nm)	Tork Dalgalanması	Faz Akımı (A)	Çıkıntı Oranı (Ld/Lq)
Referans motor	5873,14	0,972	37,389	8,99	12,73	6,702
A.F.1	5635,6102	0,9594	34,8051	5,1703	12,8445	6,0104
Performans değişimi (%)	-4,04	-1,30	-6,91	-42,49	+0,90	-10,32

4. Sonuçlar ve Öneriler

Bu çalışmada çok amaçlı genetik algoritma (MOGA) yöntemi kullanılarak motor performansının artırılmasına ilişkin amaç fonksiyonları tanımlanmıştır. Bu amaç fonksiyonlarının çıkış büyüklükleri ve referans motorun çıkış büyüklükleri incelenmiştir. Tork, verim ve tork dalgalanması parametreleri başlı başına hedef olarak optimizasyon sürecine dahil edilmemelidir. Bu büyüklükleri içeren amaç fonksiyonları ile motor performansı artırılabilir. Çalışmada motor performansı artarken aynı zamanda tork dalgalanmasının artması uygun motor tasarımından uzaklaştırır. Amaç fonksiyonlarının farklı bariyer sayılarındaki optimizasyon sonuçları incelendiğinde bariyer sayısının artışı motor performansını arttırdığını göstermiştir. Amaç fonksiyonu 1 ile gerçekleştirilen optimizasyon sonuçları incelendiğinde, referans motorun performans sonuçlarından daha iyi olduğu görülmüştür. Ayrıca diğer amaç fonksiyonları Elektrik motoru çalışmaları için ele alınan amaç fonksiyonları kullanılabilir ve motor performansının artırımı açısından incelenebilir. Literatürde yer alan farklı amaç fonksiyonları çok amaçlı genetik algoritma (MOGA) yöntemi kullanılarak analizler yapılabilir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Bu çalışma birinci yazarın yüksek lisans tez çalışması kapsamında ikinci ve üçüncü yazarın danışmanlığında gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Kaynaklar

- Arslan, S. (2016). Dalgıç Motorun Analitik, Sayısal, Performans Sonuçlarının Karşılaştırılması. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 4(2), 403-415.
- Arslan Serdal, Akkaya Oy Sibel, Tören Murat (2016). Amorphous Nüveli Dalgıç Motorun ve Üç Fazlı Amorf Nüveli Transformatörün Demir Kayıplarının Sonlu Elemanlar Yöntemi ile İncelenmesi. 1. International Academic Research Congress
- Arslan, S., Gurdal, O., Akkaya Oy, S. (2020). Design and optimization of tubular linear permanent-magnet generator with performance improvement using response surface methodology and multi-objective genetic algorithm. *Scientia Iranica*, 27(6), 3053-3065.
- Babetto, C., Bacco, G., & Bianchi, N. (2018). Synchronous reluctance machine optimization for high-speed applications. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 33(3), 1266-1273.
- Bacco, G., & Bianchi, N. (2018). Design criteria of flux-barriers in synchronous reluctance machines. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 55(3), 2490-2498.
- Cupertino, F., Pellegrino, G., & Gerada, C. (2014). Design of synchronous reluctance motors with multiobjective optimization algorithms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 50(6), 3617-3627.
- Heidari, H., Rassölkın, A., Kallaste, A., Vaimann, T., Andriushchenko, E., Belahcen, A., & Lukichev, D. V. (2021). A review of synchronous reluctance motor-drive advancements. *Sustainability*, 13(2), 729.
- Lovelace, E. C., Jahns, T. M., & Lang, J. H. (2002). A saturating lumped-parameter model for an interior PM synchronous machine. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 38(3), 645-650.
- Murata, T., & Ishibuchi, H. (1995, November). MOGA: multi-objective genetic algorithms. In *IEEE international conference on evolutionary computation* (Vol. 1, pp. 289-294). Piscataway, NJ, USA: IEEE.
- Özçelik, N. G., (2016). IE4 verim sınıfı senkron relüktans motor tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Özdil, A., & Uzun, Y. (2021). Design and Analysis of a Rotor for a 22 kW Transversally Laminated Anisotropic Synchronous Reluctance Motor. *Elektronika ir Elektrotehnika*, 27(6), 17-24.
- Palmieri, M., Perta, M., Cupertino, F., & Pellegrino, G. (2014, May). Effect of the numbers of slots and barriers on the optimal design of synchronous reluctance machines. In *2014 international conference on optimization of electrical and electronic equipment (OPTIM)* (pp. 260-267). IEEE.
- Sanada, M., Hiramoto, K., Morimoto, S., & Takeda, Y. (2004). Torque ripple improvement for synchronous reluctance motor using an asymmetric flux barrier arrangement. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(4), 1076-1082.
- Sizov, G. Y., Ionel, D. M., & Demerdash, N. A. (2011, May). Multi-objective optimization of PM AC machines using computationally efficient-FEA and differential evolution. In *2011 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)* (pp. 1528-1533). IEEE.
- Solak, B., (2021). Senkron Relüktans Motorda Moment Dalgalanmasının Azaltılması. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Tarımer, 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), 15-18.
- Tawfiq, K. B., Ibrahim, M. N., El-Kholy, E. E., & Sergeant, P. (2021). Performance Improvement of Synchronous Reluctance Machines—A Review Research. *IEEE Transactions on Magnetics*.
- Topaloglu, I., Mamur, H., Korkmaz, F., & Cakir, M. F. (2014, October). Design and optimization of surface mounted line start permanent magnet synchronous motor using electromagnetic design tool. In *2014 International Conference on Renewable Energy Research and Application (ICRERA)* (pp. 87-90). IEEE.
- Wang, K., Zhu, Z. Q., Ombach, G., Koch, M., Zhang, S., & Xu, J. (2015). Torque ripple reduction of synchronous reluctance machines: using asymmetric flux-barrier. *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*.
- Zhang, Z. (2021, May). Advanced non-permanent-magnet reluctance machines for traction applications: A review. In *2021 IEEE 12th Energy Conversion Congress & Exposition-Asia (ECCE-Asia)* (pp. 2052-2058). IEEE.