



Araştırma Makalesi

Journal of Innovative Engineering
and Natural Science

(Yenilikçi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Dergisi)

<https://dergipark.org.tr/en/pub/jieng>

Genetik algoritma optimizasyonu kullanılarak senkron makine tasarımı ve uygunluk parametrelerinin belirlenmesi

Nihat Pamuk^{a,*}^a Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Zonguldak 67100, Türkiye.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Geçmişi:

Geliş 16 Kasım 2023

Düzeltilme 19 Ocak 2024

Kabul 24 Şubat 2024

Çevrimiçi mevcut

Anahtar Kelimeler:

Senkron makine
Elektromanyetik tork
Genetik algoritma
Optimizasyon

ÖZET

Eksenel alanlı kalıcı mıknatıslı senkron makineler yüksek güç yoğunluğu ve karmaşık yapısı nedeniyle elektrik sistemlerinde önemli avantajlar sunmaktadır ve bu nedenlerle birçok uygulama alanı bulunmaktadır. Senkron makine tasarım sürecinin özü, makine özelliklerinin hızlı, esnek ve doğru hesaplanmasına bağlıdır. Tahrik gereksinimlerini karşılamak ve doğrulamasını gerçekleştirebilmek için elektromanyetik tork analizinin yapılması gerekmektedir. Elektromanyetik tork analizi için birçok farklı yöntem kullanılmaktadır. Bu çalışmada, genetik algoritma teorisi kullanılarak, eksenel alanlı kalıcı mıknatıslı senkron makinenin optimal tasarımı ve analizi gerçekleştirilmiştir. Eksenel alanlı kalıcı mıknatıslı senkron makinenin optimal tasarımı için gerekli olan matematiksel model yapısı oluşturulmuştur. Matematiksel model yapısı eksenel alanlı kalıcı mıknatıslı senkron makine tasarımındaki kritik değerlerin tespitine yönelik belirlenmiş ve beş adet optimizasyon değişkenine bağlı olarak gerçekleştirilmiştir. Genetik algoritma sonuçları sonlu elemanlar yöntemi ile birleştirilerek toplam motor kayıpları hesaplanmıştır. Tasarım aşamasında stator çekirdeği için kullanılacak olan bakır ve demirin hacmi küçültülerek, sistemde oluşacak olan motor kayıpları başlangıç değerlerine göre önemli ölçüde minimize edilmiştir. Kullanılan optimizasyon yöntemi ile, eksenel alanlı kalıcı mıknatıslı senkron makinenin matematiksel modelinin tasarım için yeterli olduğu kanıtlanmış ve rekabetçi bir makine model yapısı oluşturulmuştur. Çalışma ile, genetik algoritma sonuçları kullanılarak senkron makinenin optimal tasarımında kullanılan kritik değerlerin daha kolay belirlenebileceği gösterilmiştir.

Synchronous Machine Design and Fitness Parameters Determination Using Genetic Algorithm Optimization

ARTICLE INFO

Article history:

Received 16 Nov 2023

Received in revised form 19 Jan 2024

Accepted 24 Feb 2024

Available online

Keywords:

Synchronous machine
Electromagnetic torque
Genetic algorithm
Optimization

ABSTRACT

Axial-field permanent magnet synchronous machines offer significant advantages in electrical systems due to their high-power density and complex structure, and thus have many applications. The essence of the machine design process depends on fast, flexible, and accurate calculation of machine characteristics. Electromagnetic torque analysis is required to meet and validate the drive requirements. Many different methods are used for electromagnetic torque analysis. In this study, the optimal design and analysis of an axial-field permanent magnet synchronous machine is performed using genetic algorithm theory. The mathematical model structure required for the optimal design of the axial field permanent magnet synchronous machine is established. The mathematical model structure was determined to determine the critical values in the design of the axial field permanent magnet synchronous machine and was carried out depending on five optimization variables. The results of the genetic algorithm are combined with the finite element method to calculate the total motor losses. By reducing the volume of copper and iron to be used for the stator core at the design stage, the motor losses that will occur in the system are significantly minimized compared to the initial values. With the optimization method used, the mathematical model of the synchronous machine proved to be sufficient for the design and created a competitive machine model structure. The study shows that the critical values used in the optimal design of the synchronous machine can be determined more easily by using genetic algorithm results.

I. GİRİŞ

Son yıllarda artan enerji ihtiyacı nedeniyle elektrikli makinelerin tasarım ve optimizasyonu büyük ilgi görmektedir. Elektrikli makinelerin optimal tasarımı için birçok istatistiksel ve matematiksel yöntem kullanılmaktadır [1, 2]. Elektrikli makinelerdeki optimal tasarım çalışmaları doğrusal olmayan, kısıtlı ve çok değişkenli karmaşık bir yapı şeklindedir [3]. Optimal tasarım yöntemlerini kullanan araştırmacılar, global optimum değerinin nasıl bulunacağı, sayısız değişkenlerle nasıl başa çıkılacağı ve amaç fonksiyonu ile kısıtlama fonksiyonlarına ait diferansiyel denklemlerin nasıl hesaplanacağı gibi birbirinden farklı problemle karşı karşıya kalmaktadırlar [4]. Genetik algoritma optimizasyon metodu amaç fonksiyonunun veya kısıtlama fonksiyonlarının herhangi bir diferansiyel denkleme ihtiyaç duymama nedeniyle ilk iki problemi rahatlıkla çözülebilmekte ve üçüncü problemi ise ortadan kaldırılmaktadır [5]. Genetik algoritma metodunun yazılım algoritması olarak kullanılmasından dolayı birbirinden farklı kullanım alanları mevcuttur. Genetik algoritmalar sistemde karşılaşılan karmaşık problemlerin optimal çözümünde kullanılan ve güçlü bir yapıya sahip olan bir optimizasyon tekniğidir [6].

Genetik algoritmalar doğal seçim ve doğal genetiğe dayanan, evrimsel arama algoritmasını en basit şekliyle uygulayan yöntemlerdir. Evrimsel arama algoritmalarındaki temel amaç, güçlü olan bireyin hayatta kalması ve yaşamını devam ettirmesi kavramıdır [7]. Genetik algoritmadaki bir çözümün üreme başarısı, değerlendirme sırasında atanan uygunluk değerine doğrudan bağlıdır. Doğru uygunluk değeri kullanılarak stokastik süreçteki optimal çözümün yeniden üretilme şansı minimum seviyede olurken, genetik algoritma uygulamalarındaki optimal çözümün yeniden üretilme şansı maksimum seviyelere ulaşmaktadır. Genetik algoritmadaki arama aşaması, kromozomları temsil eden dizilerin rastgele oluşturulmuş bir popülasyonundan başlanarak gerçekleştirilir. Belirli sayıda genetik işlem adımından sonra optimal nesil elde edilerek çözüme ulaşırlar [8]. Şekil 1'de genetik optimizasyon algoritmasının çalışma adımları gösterilmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde senkron makine tasarımında farklı algoritmalar ve yöntemler kullanıldığı gözlemlenmiştir. Genetik algoritmanın tercih sebebi tasarım uzayının geniş ve karmaşık olduğu senkron makine tasarımı gibi problemlerde avantaj sağlamasıdır. Genetik algoritma, çeşitli tasarım parametrelerini bir arada optimize edebilmekte ve bir dizi olası çözümü paralel olarak değerlendirme yeteneğine sahip olmaktadır. Genetik algoritmalar, hızlı ve hesaplamalı olarak daha düşük maliyetli çözümler bulabilmektedir. Senkron makinenin 3 boyutlu bir FEM modeli ile analiz edilmesi çok fazla zaman ve çaba gerektirir. Bu sorunun üstesinden gelmek için, Lim v.d az sayıda fonksiyon çağırısı ile doğru ve iyi dağıtılmış bir Pareto ön kümesi gerçekleştirebilen ve motor tasarım sürecinde çeşitli tasarım değişkenlerini dikkate alan bir vekil destekli çok amaçlı optimizasyon algoritması ile senkron makine tasarımı gerçekleştirmiştir. Bu algoritmanın üstün performansı, bir test fonksiyonunda geleneksel çok amaçlı optimizasyon algoritmalarıyla karşılaştırılarak doğrulanmıştır [9].

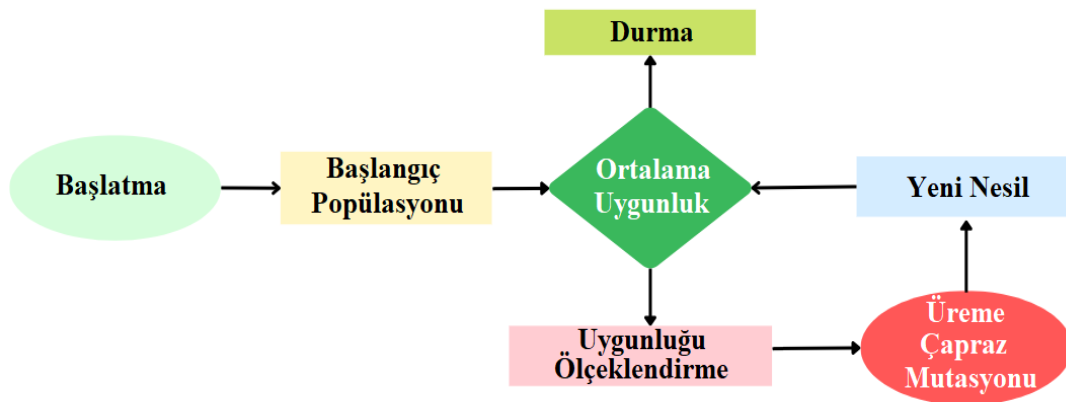
Rostami vd. tarafından, Genetik algoritma (GA) kullanılarak eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron jeneratör için optimum tasarım sunulmuş ve minimum aktif malzeme maliyeti koşulu çıkarılmıştır. GA sonuçlarına dayanan bilgisayar destekli bir tasarım prosedürü önerilmiştir. Tasarım prosedüründe, optimizasyon algoritmasında kullanılan nesne fonksiyonu için bazı kısıtlamalar olarak pratik ve performans özellikleri dikkate alınmıştır. Geliştirilen program kullanılarak iki paralel bağlı stator ve rotor yüzeyi PM'lerine sahip 30 kW'lık bir senkron makine tasarlanmış ve ardından tasarım prosedürünü doğrulamak için 3 boyutlu sonlu eleman analizleri gerçekleştirilmiştir [10].

Virtic vd. tarafından çekirdeksiz statorlu ve çift dış rotorlu bir eksenel akılı sabit mıknatıslı senkron makinenin tasarım optimizasyonu, genetik algoritma ile evrimsel optimizasyon ve amaç fonksiyonlarının analitik bir değerlendirmesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sekiz değişken geometri parametresi temelinde, maksimum hacim tork yoğunluğunu ve ağırlık tork yoğunluğunu, Newton-metre başına minimum sabit mıknatıs hacmini ve ağırlığını ve Newton-metre başına minimum makine fiyatını belirlemek için beş amaç fonksiyonu optimize edilmiştir. Newton-metre başına minimum makine fiyatı için geometrik parametrelere dayanarak, nominal tork için bir prototip oluşturulmuştur. Amaç fonksiyonlarının analitik olarak değerlendirildiği evrimsel optimizasyon, FEM ile karşılaştırıldığında tasarım optimizasyonu için gereken hesaplama süresini önemli ölçüde kısaltmaktadır [11].

Benlamin vd. bir otomotiv uygulaması için bir motoru optimize etmek üzere bir genetik algoritma kullanılmıştır. Bu motor çift statorlu eksenel sabit mıknatıslı (PM) bir makinedir ve optimizasyonda basitleştirilmiş bir analitik model kullanılmıştır. Araç ile elde edilen çözüm, modelin geçerliliğini doğrulamak için üç boyutlu sonlu elemanlar yöntemi ile karşılaştırılmıştır [12].

Mahmoudi vd. tarafından, genetik algoritma (tabanlı boyutlandırma denklemi ve sonlu elemanlar analizi ile optimize edilmiş bir eksenel akılı sabit mıknatıslı motor sunulmaktadır. GA ve FEA sonuçlarına dayanarak, bir aday motor tasarımı tanıtılmış ve motor tasarımının yeniden optimizasyonu ve sonlandırılması için Sonlu elemanlar analizine tabi tutulmuştur. Sargı konfigürasyonunun değiştirilmesi ve sabit mıknatıs eğriltme gibi teknikler, en sinüzoidal geri-EMF dalga formunu ve torkunu elde etmek için araştırılmıştır. FEA ve GA simülasyon sonuçları karşılaştırılmış ve yüksüz durumda tasarlanan motorun çeşitli bölgelerindeki akı yoğunluğu ile iyi bir uyum göstermiştir. Tasarlanan son motor (1 kW, 50 Hz, dört kutuplu) imal edilmiş ve test edilmiştir. Deneysel sonuçlar simülasyon sonuçları ile uyumludur ve her ikisi de istenen teknik özellikleri karşılamaktadır [13].

Kurt vd. tarafından Eksenel Akılı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makineler için bir tasarım metodolojisi tanıtılmaktadır. Eksenel Akılı Makineler, hafif ve kompakt tasarımları nedeniyle yenilenebilir enerji sistemlerinde çok popülerdir. Tanıtılan algoritma Taguchi yaklaşımı ile Deneysel Tasarımdır. Bu yöntemler, ortogonal deneysel tasarım ve analiz tekniklerini kullanarak, endüstriyel bir sürecin yalnızca az sayıda deneyle optimize edilmesini sağlar [14].



Şekil 1. Genetik algoritma çalışma adımları

II. GENETİK ALGORİTMANIN TEMEL PRENSİPLERİ VE ÇALIŞMA ADIMLARI

Genetik algoritmalar, gerçek sayı vektörlerinin popülasyon adımlarını işleyerek çalışırlar. Bu nedenle, genetik algoritmaların birincil yapısının bir vektör popülasyonu olması gerekmektedir [15]. Algoritma yapısı genlerden oluşmaktadır. Genetik algoritmanın her bir genindeki kodlanan diziye kromozom adı verilir. Algoritmada kullanılan amaç fonksiyonunun maksimize veya minimize edildiği değerlere ise uygunluk adı verilir [16]. Bir genetik algoritmanın arama sürecinde yer alan üç temel çalışma durumu bulunmaktadır. Bu durumlar genlerin çoğaltılması, çaprazlanması ve mutasyonudur [17].

Algoritma yapısında kullanılan farklı çalışma durumları ile genlerin hayatta kalma şansları artırılır ve daha iyi gen dizilimleri oluşturularak yeni nesillerin üretilmesi sağlanır. Genetik algoritmalar ile optimizasyon çalışmaları başlatılmadan önce optimizasyonun çalışma parametrelerinin, sınır koşullarının, uygunluk ölçüsünün ve durdurma kriterinin belirlenmesi gerekmektedir [18]. Genetik algoritmanın sınır koşullarının belirlenmesi adımı, kayan noktalı sayı vektörü biçimindeki tasarım değişkenleri kullanılır. Kromozomların kodlanması, genetik algoritmanın performansını doğrudan etkileyen çok önemli bir kavramdır. Kromozomların kodlanması kullanıcı sayısına ve problem türüne göre değişkenlik gösterir.

Uygunluğun ölçeklendirilmesi adımı, arama uzayındaki her nokta benzersiz yapıdaki kromozomlar ile eşleştirilir. Optimal değişkenler kayan noktalı sayıların birer vektörü ile kodlanabilir. Optimizasyon aşamasında çeşitli değişkenler için farklı vektör uzunlukları kullanılabilir. Optimizasyonun amaç fonksiyonunda uygulanan kurallar diğer tüm değişkenler içinde kullanılabilir. Uygunluk ölçüsü, bireyin ne kadar başarılı olduğunun bir göstergesidir. Birey kodu çözülmüş kromozomları temsil ettiği için uygunluk ölçüsü kromozomlara atanır. Evrim sırasında var olan her kromozom değerlendirilir ve uygunluk ölçüsü hesaplanır. Genetik algoritma ile çevre popülasyonu arasındaki ilişki hakkında bilgi veren tek kavram uygunluk ölçüsüdür [19].

Çevre, tasarım optimizasyonunda amaç fonksiyonunu belirtir. Amaç fonksiyonunun dönüş değeri doğrudan kullanılabilir veya belirlenen bir fonksiyondan geçirilerek uygunluk ölçüsünü tanımlamaktadır. Uygunluk ölçütünün bileşenleri kullanıcıya ve problem türüne göre değişkenlik göstermektedir. Genetik algoritmada arama aşaması süresiz olarak çalışabilir. Bu nedenle algoritma yapısında durdurma kuralı kullanılarak durdurma zamanının belirlenmesi gerekmektedir [20]. Durdurma kriteri kullanıcıya ve problem türüne bağlı olarak birçok farklı yolla gerçekleştirilir. Olası yöntemlerden bazıları, kuşak sayısını sabitlemek ve tüm kuşakların en iyi bireyini kullanarak optimum sonuç elde etmektir. Bu aşamada tüm popülasyonun bir miktar hata payı ile ortalama bir uygunluğa yakınsaması hedeflenmektedir.

2.1 Üreme Operatörü

Tüm popülasyon üzerinde çalışan üreme operatörü, eski nesilden yeni bir nesil oluşturmak amacıyla kullanılır. Üreme operatörü, bir bireyin uyum ölçüsüne ve popülasyonun ortalama uygunluğuna bağlı olarak, belirli bir bireyin bir sonraki nesilde sahip olacağı kopya sayısını belirlemektedir. Üreme operatörünü tasarılmanın başlıca nedeni, daha yüksek uyumluluğa sahip bir bireyin sonraki nesilleri temsil edilebilmesi için yeni bir şans verilmesidir [21]. Bu durum dizi uygunluk değerleri ile orantılı olarak ağırlıklandırılmış doğrusal arama yöntemleri kullanılarak yapılmaktadır.

2.2 Uygunluk Ölçeklendirme

Uygunluk ölçeklendirmesinin amacı, bir popülasyondaki en uygun kromozomların üreme şanslarını ortaya çıkarmaktır. Bireylerin uygunluğu, ortalama ve en iyi uygunluk değerleri arasındaki farkın daha belirgin hale gelmesi için ölçeklendirme yapılmasıdır. Uygunluk ölçeklendirmesi yakınsama oranını artırır. Faydalı bir ölçeklendirme aşamasında doğrusal ölçeklendirme kullanılır. Doğrusal ölçeklendirme formülasyonu Eş. 1'de gösterilmiştir.

$$f' = af + b \quad (1)$$

Eş. 1'de f' ölçeklendirilmiş uygunluk değerini, f ise ham uygunluk değerini göstermektedir. Eş. 1'deki a ve b katsayıları farklı şekillerde seçilerek Eş. 2 elde edilmektedir. Eş. 2 kullanılarak, mevcut neslin maksimum ve ortalama uygunluk değerleri belirlenerek her yeni nesil için hesaplamalar yapılmaktadır. Eş. 2'deki C değişkeninin sabit değerleri 1.2 ile 2.0 arasında seçilmektedir.

$$a = \frac{(C-1) \cdot f_{avg}}{f_{max} - f_{avg}}, \quad b = \frac{f_{avg} \cdot (f_{max} - C \cdot f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}} \quad (2)$$

2.3 Sütun Temelli Çaprazlama

İki ebeveynden yeni bir kromozom oluşturan genetik algoritmaların merkezi bir özelliği çaprazlamadır. Biyolojik çaprazlamaya karşılık gelen yazılım sürümü, ebeveynlerin sayı vektörlerindeki parçanın değiştirildiği bir noktayı rastgele seçerek ebeveyn çiftini birleştirir. Yer değiştirme adımı, basit çaprazlamayı kullanmak yerine iki adet x_1 ve x_2 vektörünün doğrusal bir kombinasyonu olarak tanımlanan aritmetik çaprazlama ile gerçekleştirilir [22]. Sütun temelli çaprazlama aşamasından sonra Eş. 3 kullanılarak yavru bireyler elde edilir.

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= a \cdot x_1 + (1-a) \cdot x_2 \\ \dot{x}_2 &= a \cdot x_2 + (1-a) \cdot x_1 \end{aligned} \quad (3)$$

Eş. 3'te a değişkeni, 0 ile 1 arasında herhangi bir sayısal değer almakta ve bu durumda sabit bir sayı olarak kabul görmektedir. Sabit sayı olarak kabul edilen bu tür çaprazlamaya düzgün aritmetik çaprazlama ismi verilir [23]. Düzgün aritmetik çaprazlamada yeni ebeveyn değerleri her zaman sabit bir etki altında olacaktır. Şekil 2'de ikili kodlar ve bu kodların geçişleri ile temsil edilen ikili A ve B dizisi gösterilmektedir. İkili dizideki çapraz operatörün sağ tarafındaki 0 ve 1 sayılarının kendi aralarında değiştirilmesi ile çapraz sütundaki $c = 5$ ikili koduna sahip A ve B dizileri elde edilmiştir.

$$A = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array}$$

$$B = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

$$A' = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ \hline \end{array}$$

$$B' = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \hline \end{array}$$

Şekil 2. İkili kodlara sahip ikili A ve B dizileri ve bunların çaprazlanması

2.4 Mutasyon Operatörü

Üremedeki önemli adımlardan bir tanesi, yeni popülasyon nüfusunun üst ve alt sınır alanlarında seçilen bir değişken değerinin rasgele sayı üretimini içerecek şekilde mutasyona uğramasıdır. Mutasyonun birincil amacı popülasyon değerine varyasyon ilavesi yapmaktır [24]. Bu işlem rastgele seçilen bir dizide parça parça yapılmaktadır. Şekil 3'te, ikili temsilin bir örneği olarak yedinci bölgede yapılan mutasyon işlemi gösterilmiştir.

$$C = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

$$C' = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ \hline \end{array}$$

Şekil 3. İkili temsil için yedinci bölgede yapılan mutasyon örneği

2.5 Popülasyon Yenileme

Tüm çalışma operatörleri görevlerini yerine getirdikten sonra yeni nesil üyeler oluşmaktadır. Ana kromozomun sahip olduğu en iyi özellikler çiftler arasında değiştirme adımları uygulanarak gelecek nesillere aktarılmakta ve yeni bilgilere sahip kromozomlar oluşmaktadır.

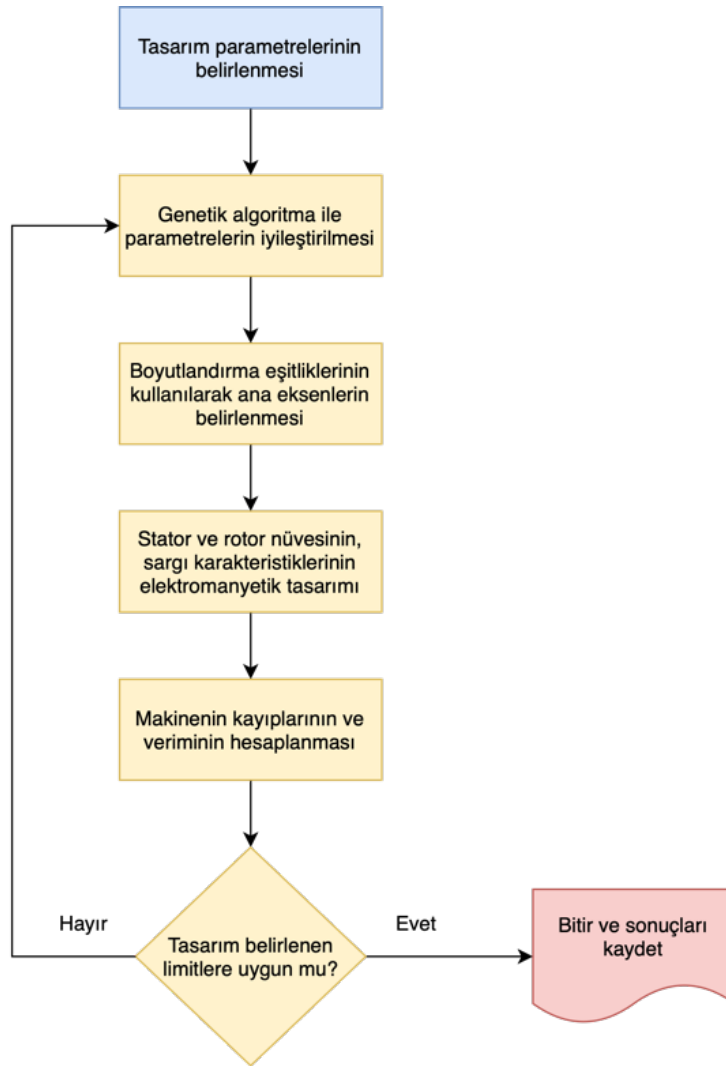
III. KALICI MIKNATISLI EKSENEL ALANLI SENKRON MAKİNEİNİN OPTİMAL TASARIMINDA GENETİK ALGORİTMALARIN UYGULANMASI

Genetik algoritmaları diğer optimizasyon yöntemlerine göre üstün kılan en önemli üç özellik aşağıda verilmiştir.

Bu özellikler:

- Genetik algoritmalar arama uzayında sadece bir bölgede değil, diğer tüm bölge popülasyonları üzerinde eş zamanlı olarak çalışma sağlarlar.
- Genetik algoritmalar kullanılacak olan parametrelerin kendileri ile değil, bu parametreleri temsil eden kodlanmış bir dizi ile çalışırlar.

- Genetik algoritmalar türevleri veya başka herhangi bir ek bilgi kullanarak değil, amaç fonksiyonunun kendisini kullanarak çalışırlar.



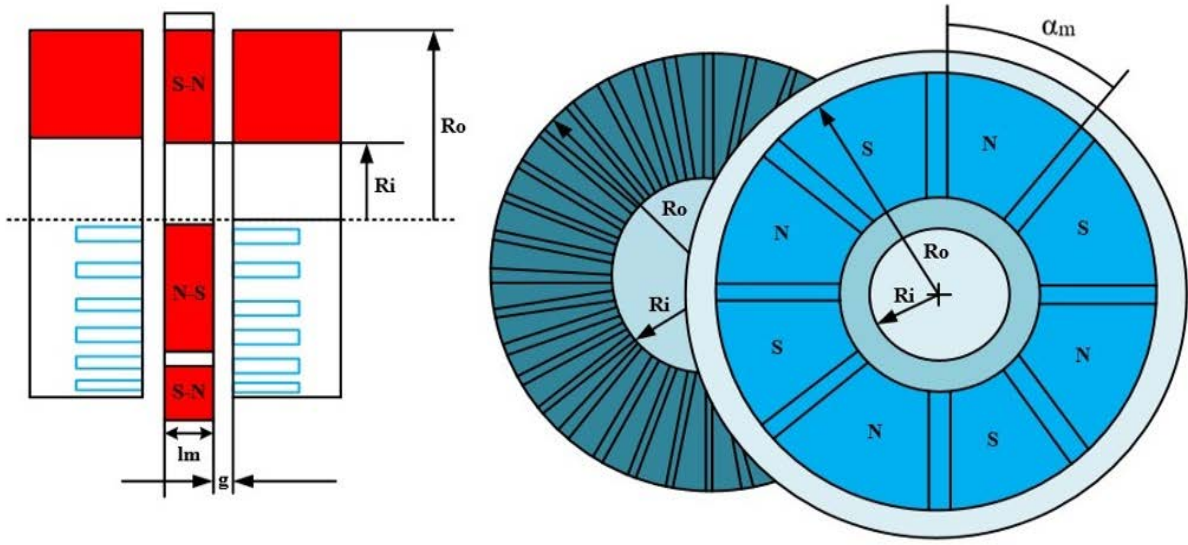
Şekil 4. Sistemin tasarım sürecinin akış diyagramı

Bu üç ana özellik, genetik algoritmaları elektrik makinelerinin optimize edilmesi için kullanımında oldukça etkili bir yöntem haline getirmektedir. Son yıllarda kullanılan sezgisel algoritma yöntemlerinden biri olan genetik algoritmalar sayesinde, optimal sistem tasarımlarında artışlar gözlenmektedir. Çalışmada, genetik algoritma yöntemi Sonlu Elemanlar Yöntemi [25] ile birleştirilerek doğrudan bir elektrikli makinenin optimal tasarımında kullanılmıştır. Şekil 4'te senkron makine tasarımının GA ile yapılan akış diyagramı gösterilmiştir. Şekil 5'te genetik algoritmaların elektrik makinelerinin optimal tasarım çalışmalarında kullanılması ile elde edilmiş olan 45 Nm tork gücünde, 220 V gerilim seviyesinde, 50 Hz frekans değerinde ve 750 rpm hızındaki sabit mıknatıslı bir aksenal alanlı senkron makinenin optimize edilmiş şekli gösterilmiştir. Sabit mıknatıslı aksenal alanlı senkron makinenin tasarım özelliklerine göre optimal değişken olarak seçilen tasarım parametreleri; sabit mıknatısın ve stator çekirdeklerinin iç yarıçapı R_i , dış yarıçapı R_o , mıknatıs fraksiyonu α_m , mıknatıs uzunluğu l_m , hava boşluğu g

olarak verilmiştir. Kalıcı mıknatıslı aksenal alanlı senkron makinenin verimi amaç fonksiyonu olarak alınıp, optimal tasarım süreci amaç fonksiyonunun bir maksimizasyon problemi olarak tanımlanması Eş. 4 elde edilir.

$$\eta = f(R_i, R_o, \alpha_m, I_m, g) \quad , \quad \eta = \frac{T \cdot \omega_m}{T \cdot \omega_m + P_{Cu} + P_{Fe} + P_S} \quad (4)$$

Eş. 4'te T anma torku, ω_m anma hızı, P_{Cu} bakır kaybı, P_{Fe} çekirdek kaybı ve P_S diğer sabit kayıplardır. P_{Cu} bakır kaybı Eş. 5'te verilmiştir.



Şekil 5. Sabit mıknatıslı bir aksenal alanlı senkron makinenin optimize edilmiş şekli

$$P_{Cu} = N_{ph} \cdot I_{ph}^2 \cdot R_{ph} = N_{ph} \cdot I_{ph}^2 \cdot 2N_{sp} (R_{sl} + R_{et}) \quad (5)$$

Eş. 5'te N_{ph} faz sayısı, I_{ph} faz akımı, N_{sp} faz başına yuva sayısı, R_{sl} oluk direnci ve R_{et} dönüş sonu direncidir. Optimizasyon değişkenlerine göre oluk direnci Eş. 6'da verilmiştir.

$$R_{sl} = \frac{\rho \cdot n_s^2 \cdot (R_o - R_i)}{k_{cp} \cdot A_{sl}} = \frac{\rho \cdot n_s^2 \cdot (R_o - R_i)}{k_{cp} \cdot w_{sb} \cdot d_3} \quad (6)$$

Eş. 6'da k_{cp} iletken paketleme faktörü, ρ iletken öz direnç katsayısı, w_{sb} oluk alt ve üst genişliği, d_3 iletken oluk derinliği, A_{sl} oluk alanı ve n_s oluk başına dönüş sayısıdır. Oluk başına düşen dönüş sayısı Eş. 7'de verilmiştir.

$$n_s = \text{int} \left(\frac{E_{\max}}{N_m \cdot k_d \cdot k_p \cdot k_s \cdot B_g \cdot N_{spp} \cdot (R_o^2 - R_i^2) \cdot w_m} \right) \tag{7}$$

Eş. 7’de E_{\max} , nominal hızda ve geri yöndeki maksimum elektromotor kuvveti, N_m , kutup sayısı, k_d dağıtım faktörü, k_p yükseklik faktörü, k_s eğrilik faktörü, B_g hava aralığındaki akı yoğunluğu, N_{spp} , faz başına düşen oluk sayısıdır. Faz başına düşen oluk sayısı Eş. 8’de tanımlanmıştır.

$$N_{spp} = \frac{N_s}{N_{ph} \cdot N_m} \tag{8}$$

Eş. 8’de N_s , statora ait oluk sayısı, N_{ph} , fazların sayısıdır. Hava aralığına ait akı yoğunluk denklemi Eş. 9 ile tanımlanmıştır.

$$B_g = \frac{C_\phi}{1 + \mu_R \cdot \left[1 - \frac{1}{\frac{\tau_{si}}{w_s} \cdot \left(5 \cdot \frac{g_c = \left(2g + \frac{l_m}{\mu_R} \right)}{w_s} + 1 \right)} \right]} \cdot \frac{1}{k_{ml} = \left(1 + \frac{2l_m \cdot N_m}{\pi^2 \cdot \mu_R \cdot \alpha_m \cdot (R_o + R_i)} \cdot \ln \left(1 + \frac{\pi g}{\tau_f = (\tau_{pi} - \alpha_m \cdot \tau_{pi}) = (R_i \cdot \theta_p) - \alpha_m \cdot (R_i \cdot \theta_p)} \right) \right)} \cdot P_c = \left(\frac{-B_m}{\mu_o \cdot H_m} \right) = \left(\frac{l_m \cdot A_g}{g \cdot A_m} \right) = \left(\frac{l_m}{2g \cdot \left(\frac{2\alpha_m}{1 + \alpha_m} \right)} \right)} \cdot B_r \tag{9}$$

Eş. 9’da, C_ϕ akı konsantrasyon faktörü, B_r mıknatıs kalıntısı, μ_r mıknatıs geri itme geçirgenliği, k_c karter katsayısı, w_s oluk açıklığı, P_c geçirgenlik katsayısı, g_c karter katsayısı için boşluktaki etkin hava değeri, k_{ml} mıknatısın kaçak faktörü, τ_f mıknatıs ayırıcı genişliği, τ_π rotor mıknatıslarının iç kutup aralığıdır. Stator sargılarındaki uç dönüşlerin direnç değerleri Eş. 10 ile tanımlanmıştır.

$$R_{ed} = \frac{\rho \cdot n_s^2 \cdot \pi \cdot (\tau_{co} + \tau_{ci}) = \rho \cdot n_s^2 \cdot \pi \cdot ((\alpha_{cp} \cdot \tau_{po}) + (\alpha_{cp} \cdot \tau_{pi})) = \rho \cdot n_s^2 \cdot \pi \cdot \left(\alpha_{cp} \cdot R_o \cdot \theta_p = \left[\alpha_{cp} \cdot R_o \cdot \left[\frac{2\pi}{N_m} \right] \right] + (\alpha_{cp} \cdot \tau_{pi}) \right)}{4 \cdot \alpha_{cp} \cdot A_s = 4 \cdot \frac{\tau_c}{\tau_p} \cdot A_s = 4 \cdot \frac{\text{int}(N_{spp})}{N_{spp}} \cdot A_s} \tag{10}$$

Eş. 10'da, τ_{co} stator sargılarının dış nüvesinin adım uzunluğu, τ_{ci} stator sargılarının iç nüvesinin adım uzunluğu, α_{cp} nüve kutup fraksiyonu, τ_{po} rotor sargılarının dış nüvesinin adım uzunluğu, θ_p açılmal rotor sargılarının kutup aralığıdır. Çekirdek kayıpları Eş. 11 ile tanımlanmıştır.

$$P_{Fe} = \rho_{bi} \cdot V_{st} \cdot \Gamma(B_{max}, f) \quad (11)$$

Eş. 11'de, ρ_{bi} çelik nüve kütle yoğunluğunu, $\tau(B_{max}, f)$ çelik nüve kayıp yoğunluğu ve frekansını, V_{st} beş adet optimizasyon değişkeni ile doğrudan ilişkili stator hacmini göstermektedir. Stator çekirdek hacmi stator dışlarının hacminden oluşmaktadır. Oluşacak olan bu hacim değeri Eş. 12 ile tanımlanmıştır.

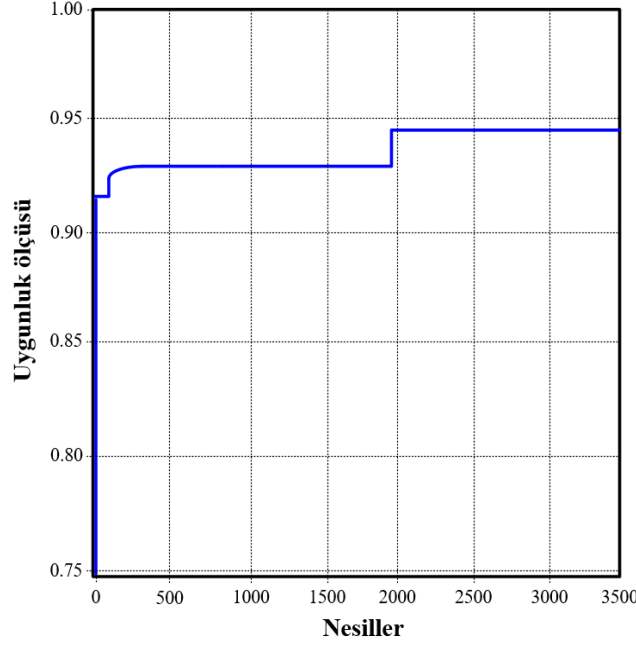
$$V_{st} = 2 \cdot k_{st} \cdot \left[\pi \cdot (R_0^2 - R_i^2) \cdot (w_{bi} + d_s) - (N_s \cdot A_s \cdot (R_0 - R_i)) \right] \quad (12)$$

$$V_{st} = 2 \cdot k_{st} \cdot \left[\pi \cdot (R_0^2 - R_i^2) \cdot \left(\frac{B_g \cdot \tau_{po}}{2 \cdot B_{max} \cdot k_{st}} + d_s \right) - (N_s \cdot A_s \cdot (R_0 - R_i)) \right]$$

Eş. 12'de, d_s toplam yuva derinliği, k_{st} laminasyon istifleme faktörü, B_{max} statorda izin verilen maksimum akı yoğunluğudur.

Bu çalışmada kalıcı mıknatıslı aksenal alanlı senkron makinenin optimal tasarım için gerekli olan matematiksel model yapısı beş adet optimizasyon değişkenine bağımlı olarak yapılmış ve toplam motor kayıpları söz konusu optimizasyon değişkenlerine bağlı olarak hesaplanmıştır. Kalıcı mıknatıslı aksenal alanlı senkron makinenin çıkış gücü sabit olduğundan dolayı sistem kayıpları ile bakır kaybı ve çekirdek kaybı optimizasyon değişkenlerine bağlı olmakta ve motorun verimini de etkilemektedir. Bu nedenle motor verimleri maksimum yapılarak, motordaki kayıplar minimuma indirilmekte ve güç/ağırlık oranı arttırılmaktadır.

Genetik algoritma için nüfus büyüklüğü 10 ebeveynden oluşmaktadır ve algoritmanın durdurma kuralı olarak 3500 nesil seçilmiştir. Algoritmadaki geçiş ve mutasyon olasılıkları ise sırasıyla 0.8 ve 0.04 olarak ayarlanmıştır. Uygunluk ölçeklendirmesi için C katsayısı 1.8 olarak seçilmiştir. Şekil 6'da 3500 nesil için nesiller boyunca kullanılacak olan maksimum uygunluk değişimi gösterilmiştir. 3500 nesilden sonra, amaç fonksiyonunun optimal uygunluk değeri $\eta = 0,9454$ değeri ile belirlenmiştir. Bu değer optimal çözüm için etkinlik değerinin % 94.54'üne karşılık gelmektedir.



Şekil 6. Nesiller boyunca değişen maksimum uygunluk grafiği

Tablo 1'de kalıcı mıknatıslı aksenal alanlı senkron makinenin optimizasyon sürecinde kullanılan tasarım değişkenlerinin aralıkları ve bunların optimal sonuçları gösterilmiştir. Tablo 2'de ise tasarım değişkenlerine bağlı başlangıç ve optimal sonuçları gösterilmiştir.

Tablo 1. Optimizasyonda kullanılan tasarım değişkenleri, limit aralıkları ve optimal sonuçları

Tasarım Değişkenleri	Limit Aralığı (m)	Optimal Sonuçlar (m)
R_i	0.040 – 0.072	0.072
R_o	0.085 – 0.500	0.103
α_m	0.100 – 0.950	0.559
l_m	0.005 – 0.015	0.013
g	0.001 – 0.003	0.002

Tablo 2. Tasarım değişkenlerine bağlı başlangıç ve optimal sonuç değerleri

Tasarım Değişkenleri	Başlangıç Değerleri (m)	Optimal Sonuç Değerleri (m)
R_i	0.072	0.072
R_o	0.133	0.103
α_m	0.941	0.559
l_m	0.010	0.013
g	0.002	0.002

Tablo 2'den kalıcı mıknatıslı aksenal alanlı senkron makine tasarımında önemli bir gelişmenin sağlandığı görülmektedir. Tasarım aşamasında stator çekirdeği için kullanılan bakır ve demirin hacmi önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu durum sistemde oluşacak olan kayıpların azalmasına neden olmuştur. Bu iyileştirmeler neticesinde özellikle kalıcı mıknatıslı aksenal alanlı senkron makinelerin elektrikli araçlar için oldukça rekabetçi

çözümler sunmaktadır. Kalıcı mıknatıslı aksenal alanlı senkron makinenin optimal tasarımında, gerilim, mekanik hız, tork, akım yoğunluğu, mıknatısların kalıcı akı yoğunluğu, rotor kutup sayısı, stator sayısı gibi kullanılan malzemelerin belirlenen tüm katsayıları kullanılmıştır. Prototip amaçlı kalıcı mıknatıslı aksenal alanlı senkron makinenin farklı malzeme türlerindeki optimal çalışmaları için genetik algoritma başarılı bir şekilde kullanılmıştır. Genetik algoritma uygulaması ile en iyi çözüm seçilmiş ve optimal çözümlerin sayısı analiz edilmiştir.

IV. SONUÇLAR

Bu çalışmada aksenal alanlı kalıcı mıknatıslı senkron makinelerin tasarım optimizasyonunda kullanılan, yüksek düzeyde doğruluk sağlayan ve birçok farklı optimizasyon problemlerine uyum sağlayabilme yeteneği olan bir algoritma yapısı kullanılmıştır. Genetik algoritma optimizasyonunda sadece uygunluk değeri kullanıldığı için, amaç fonksiyonu hakkında herhangi bir ek bilgiye ihtiyaç duyulmaz. Bu durum algoritma kullanımını kolay ve her soruna uyarlanabilir bir hale dönüştürmektedir. Genetik algoritmalarından elde edilen yeni nesil bireyler her zaman etki alanı içerisinde kalmaktadır. Bu nedenle erken yakınsama olasılığını azaltan tek biçimli aritmetik çaprazlama ve doğrusal ölçekleme adı verilen bir çaprazlama yapısı uygulanmaktadır. Çalışma ile aksenal alanlı kalıcı mıknatıslı senkron makine yapısındaki tüm değişkenler hesaba katılarak makine tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tüm değişkenleri hesaba katmak için aksenal alanlı kalıcı mıknatıslı senkron makinenin uygun matematiksel modellenmesi yapılmıştır. Optimal tasarım sürecinde kullanılması gereken değişken ve limit değerleri, genetik algoritma optimizasyon yapısı kullanılarak elde edilmiştir. Bu güçlü optimizasyon yöntemi, aksenal alanlı kalıcı mıknatıslı senkron makinenin matematiksel modelinin yeterli olduğunu kanıtlamış ve rekabetçi bir makine model yapısı oluşturmuştur.

KAYNAKLAR

1. Lei G, Zhu J, Guo Y, Liu C, Ma B (2017) A review of design optimization methods for electrical machines. *Energies* 10:1962.
2. Duan Y, Ionel DM (2013) A review of recent developments in electrical machine design optimization methods with a permanent-magnet synchronous motor benchmark study. *IEEE Transactions on Industry Applications* 49:1268-1275.
3. Orosz T, Rassölkin A, Kallaste A, Arsénio P, Pánek D, Kaska J, Karban P (2020) Robust design optimization and emerging technologies for electrical machines: Challenges and open problems. *Applied Sciences* 10:6653.
4. Pamuk N (2023) Performance analysis of different optimization algorithms for MPPT control techniques under complex partial shading conditions in PV systems. *Energies* 16:3358.
5. Pal S, Halder S (2020) Optimization of drilling parameters for composite laminate using genetic algorithm. *Data-Driven Optimization of Manufacturing Processes*, ss 194-216.
6. Mirjalili S, Song Dong J, Sadiq AS, Faris H (2020) Genetic algorithm: Theory, literature review, and application in image reconstruction. *Nature-Inspired Optimizers: Theories, Literature Reviews and Applications*, ss 69-85.
7. Mirjalili S (2019) Genetic algorithm. *Evolutionary Algorithms and Neural Networks: Theory and Applications*, ss 43-55.
8. Katoch S, Chauhan SS, Kumar V (2021) A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications* 80:8091-8126.
9. Lim, Dong-Kuk (2015) Optimal design of an axial flux permanent magnet synchronous motor for the electric bicycle." *IEEE Transactions on Magnetics* 52:1-4.
10. Rostami, N., Feyzi, M. R., Pyrhonen, J., Parviainen, A., Behjat, V. (2012) Genetic algorithm approach for improved design of a variable speed axial-flux permanent-magnet synchronous generator. *IEEE Transactions on Magnetics*, 48:4860-4865.

11. Vrtič, P., Vražić, M., Papa, G. (2015). Design of an axial flux permanent magnet synchronous machine using analytical method and evolutionary optimization. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 31:150-158.
12. Benlamine, R., Dubas, F., Randi, S. A., Lhotellier, D., Espanet, C. (2013). Design by optimization of an axial-flux permanent-magnet synchronous motor using genetic algorithms. *Elektrik makineleri ve sistemleri sempozyumu (ICEMS)* (ss. 13-17). IEEE.
13. Mahmoudi, A., Kahourzade, S., Abd Rahim, N., Hew, W. P. (2012). Design, analysis, and prototyping of an axial-flux permanent magnet motor based on genetic algorithm and finite-element analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49:1479-1492.
14. Kurt, Ü., Önbilgin, G. (2006) Eksenel Akıllı Sürekli Mıknatıslı Senkron Makina Tasarımında Taguchi Yönteminin Kullanılması, *Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu*, ss 6–9.
15. Omara FA, Arafa MM (2010) Genetic algorithms for task scheduling problem. *Journal of Parallel and Distributed computing* 70:13-22.
16. Che ZG, Chiang TA, Che ZH (2011) Feed-forward neural networks training: a comparison between genetic algorithm and back-propagation learning algorithm. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control* 7:5839-5850.
17. Oreski S, Oreski G (2014) Genetic algorithm-based heuristic for feature selection in credit risk assessment. *Expert systems with applications* 41:2052-2064.
18. Tuhus-Dubrow D, Krarti M (2010) Genetic-algorithm based approach to optimize building envelope design for residential buildings. *Building and Environment* 45:1574-1581.
19. Pizzuti C (2011) A multi-objective genetic algorithm to find communities in complex networks. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 16:418-430.
20. Kramer O (2017) *Genetic algorithms*. Springer International Publishing, ss 11-19.
21. Deekshatulu BL, Chandra P (2013) Classification of heart disease using k-nearest neighbor and genetic algorithm. *Procedia Technology* 10:85-94.
22. Van Peteghem V, Vanhoucke M (2010) A genetic algorithm for the preemptive and non-preemptive multi-mode resource-constrained project scheduling problem. *European Journal of Operational Research* 201:409-418.
23. Uğuz H (2011) A two-stage feature selection method for text categorization by using information gain, principal component analysis and genetic algorithm. *Knowledge-Based Systems* 24:1024-1032.
24. Pamuk N (2010) Genetik algoritma kullanılarak orta ve yüksek gerilim şalt cihazları üretiminin tasarlanması. *Bilimde Modern Yöntemler Sempozyumu, Diyarbakır*, 14-16 Ekim 2010, ss 1494-1509.
25. Mahmoudi A, Kahourzade S, Abd Rahim N, Hew WP (2012) Design, analysis, and prototyping of an axial-flux permanent magnet motor based on genetic algorithm and finite-element analysis. *IEEE Transactions on Magnetics* 49:1479-1492.