



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Otomatik gerilim regülatörü için hibrit bir denetleyici tasarımı

Design of hybrid controller for automatic voltage regulator

Yazar(lar) (Author(s)): Güngör BAL¹, Nihat ÖZTÜRK², Selim ÖNCÜ³, Kenan ÜNAL⁴

ORCID¹: 0000-0002-0564-5903

ORCID²: 0000-0002-0607-1868

ORCID³: 0000-0001-6432-0634

ORCID⁴: 0000-0002-2660-8386

To cite to this article: Bal G., Öztürk N., Öncü S. ve Ünal K., “Otomatik gerilim regülatörü için hibrit bir denetleyici tasarımı”, *Journal of Polytechnic*, 26(1): 199-207, (2023).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Bal G., Öztürk N., Öncü S. ve Ünal K., “Otomatik gerilim regülatörü için hibrit bir denetleyici tasarımı”, *Politeknik Dergisi*, 26(1): 199-207, (2023).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.957276

Otomatik Gerilim Regülatörü için Hibrit Bir Denetleyici Tasarımı

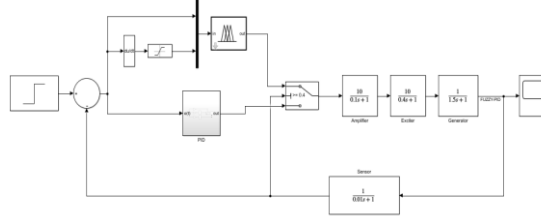
Design of Hybrid Controller for Automatic Voltage Regulator

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Otomatik Gerilim Regülatörü / Automatic Voltage Regulator
- ❖ Hibrit Denetleyici Sistemi / Hybrid Controller System
- ❖ Yapay Arı Kolonisi Algoritması / Artificial Bee Colony Algorithm
- ❖ TOPSIS metodu / TOPSIS method

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Senkron generatörlerde kullanılan otomatik gerilim regülatörleri için hibrit bir denetleyici yapısı önerilmiş ve farklı denetleyicilerle karşılaştırılmıştır.



Şekil. Önerilen Hibrit Denetleyici Yapısı/ **Figure.** Proposed Hybrid Controller Structure

Amaç (Aim)

Otomatik gerilim regülatörleri için düşük % maksimum aşımaya sahip hibrit bir denetleyici tasarlamak. / To design a hybrid controller with low % maximum overshoot for automatic voltage regulators.

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Hibrit denetleyici tasarımında MATLAB/Simulink kullanılmıştır. / MATLAB/Simulink is used in hybrid controller design

Özgünlük (Originality)

Otomatik gerilim regülatörü için bulanık mantık denetleyici ve PID denetleyiciden oluşan bir hibrit denetleyici tasarlanmıştır. / A hybrid controller consisting of fuzzy logic controller and PID controller is designed for automatic voltage regulator.

Bulgular (Findings)

Tasarlanan hibrit denetleyicinin birim basamak cevabı %0,85 maksimum aşım, 314,392 ms yükselme zamanı ve 0,821 oturma zamanına sahiptir. / The unit step response of the designed hybrid controller has a maximum overshoot of 0.85%, a rise time of 314.392 ms and a settling time of 0.821.

Sonuç (Conclusion)

Tasarlanan hibrit denetleyici farklı denetleyicilerle karşılaştırılmıştır. Diğer denetleyicilerden elde edilen sonuçlar yükselme zamanı, oturma zamanı ve % maksimum aşım kriterlerine göre TOPSIS metoduyla karşılaştırılmıştır. Önerilen hibrit denetleyici sistemin % maksimum aşımı diğer denetleyicilere göre daha iyi performans göstermiştir. / The designed hybrid controller is compared with different controllers. The results obtained from other controllers were compared with the TOPSIS method according to the criteria of rise time, settling time and % maximum overshoot. The % maximum overshoot of the proposed hybrid controller system performed better than other controllers.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this study do not require ethical committee permission and/or legal-special permission.

Otomatik Gerilim Regülatörü için Hibrit Bir Denetleyici Tasarımı

Araştırma Makalesi / Research Article

Güngör BAL¹, Nihat ÖZTÜRK², Selim ÖNCÜ³, Kenan ÜNAL^{4*}

¹İstanbul Topkapı Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

²Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Karabük Türkiye

⁴Gazi Üniversitesi, TUSAŞ Kazan Meslek Yüksekokulu, Motorlu Araçlar ve Ulaştırma Teknolojileri Bölümü, Ankara, Türkiye

(Geliş/Received : 24.06.2021 ; Kabul/Accepted : 16.09.2021 ; Erken Görünüm/Early View : 28.10.2021)

ÖZ

Senkron generatörler elektrik enerjisinin üretiminde temel makina olma görevini sürdürmektedir. Senkron generatörlerin çıkış gerilimi ve frekansı uyartım akımı ve devir sayısı değiştirilerek kolayca ayarlanabilmektedir. Genellikle senkron generatörler şebekeye bağlı olarak çalıştıkları için çıkış gerilimi ve frekansının sabit olması gerekmektedir. Gerilimin ayarlanması için kullanılan Otomatik Gerilim Regülatörlerinde çeşitli denetleyici sistemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada MATLAB/Simulink programında bulanık mantık tabanlı anahtarlamalı bir hibrit denetleyici yapısı önerilmiştir. Önerilen hibrit denetleyici, Yapay Arı Kolonisi Algoritması kullanılarak optimize edilen PID denetleyiciyle ve Ziegler-Nichols yöntemine dayalı farklı denetleyicilerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma kriterleri maksimum aşım miktarı, yükselme zamanı ve oturma zamanı olarak belirlenmiştir. Karşılaştırmanın sonuçları da çok kriterli karar verme tekniklerinden biri olan TOPSIS metodu ile analiz edilerek değerlendirilmiş ve sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Senkron generatör, otomatik gerilim regülatörü, bulanık mantık denetleyici, yapay arı kolonisi algoritması, çok kriterli karar verme, TOPSIS.

Design of Hybrid Controller for Automatic Voltage Regulator

ABSTRACT

Synchronous generators are still the main machines in the production of electrical energy. Changing the excitation current and the rotation speed easily adjust their output voltage and frequency. Since synchronous generators are operated with the grid, the output voltage and frequency must be fixed. Various control systems are used in Automatic Voltage Regulators for adjusting the voltage. In this study, a hybrid controller structure proposed and it operates in MATLAB / Simulink program. The simulation results of the proposed AVR is compared with PID adjusted by Artificial Bee Colonies algorithm and Ziegler-Nichols based different controllers. The comparison was made on maximum overshoot, rise and settling time. According to the comparison made, it was seen that the proposed hybrid controller has better response than the other controllers in terms of maximum overshoot, rise and settling time.

Keywords: Synchronous generator, automatic voltage regulator, fuzzy logic controller, artificial bee colony algorithm, multi-criteria decision making, TOPSIS

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Senkron generatörler hidroelektrik santralleri, doğal gaz çevrim santralleri, termik santralleri ve nükleer santraller gibi elektrik üretiminin büyük oranda gerçekleştirildiği elektromekanik enerji dönüşümünde kullanılmaktadır. Bu generatörlerin temel görevi, miline uygulanan mekanik büyüklüğü elektriksel büyüklüğe dönüştürmektir. Senkron generatörlerin çalışma ilkesi, alan sargısına uygulanan doğru akım uyartımı ile oluşturulan rotor manyetik alanı içinde rotorun bir tahrik mekanizması sayesinde döndürülmesi neticesinde endüvi sargılarında üç fazlı gerilimin indüklenmesidir [1]. Elektrik enerjisinin üretiminin yapıldığı tesislerin başlıca amacı üretim ve yük dengesini sağlamaktır. Bunu ;

üretilen alternatif gerilimin frekansının ve genliğinin sabit tutulması gerekliliklerini, gerçekleştirerek yapmak zorundadır [2], [3]. Generatörlerin çıkış gücündeki yüke ve diğer dış etkenlere bağlı olarak çıkış geriliminin genliği ve frekansında salınımlar oluşabilir [4], [5]. Bu iki işlevin kararlı bir şekilde yerine getirilmesi için denetim ve koruma sistemlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Denetim sistemlerinden birisi Otomatik Gerilim Regülatörü (OGR) sistemleridir. Bu sistemler bir tür kapalı döngü kontrol sistemidir ve yük değişimlerine göre generatörün uyartım gerilimini değiştirerek çıkış gerilimini sabit tutarlar [3], [6]. Bu denetimi gerçekleştirmek için kullanılan yöntemlerden biri yarı iletken tabanlı kontrollü doğrultucu kullanmaktır [3]. Kontrollü doğrultucularda da kapalı döngü kontrol sisteminin sonucunda elde edilen açılı değerine göre doğrultucu tetiklenerek kontrollü bir doğrultma işlemi

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : kenanunal@gazi.edu.tr

gerçekleşir. Bir diğer yöntem ise DA-DA güç dönüştürücülerinin kullanılmasıdır [3], [5]. Her iki devre yapısında da generatör çıkış gerilimini ayarlamak için bir kapalı döngü denetleyici kullanımı gerekmektedir. Generatörün çıkış geriliminin kontrol edilebilmesi için referans değeri ile gerçek değer arasındaki fark alınarak elde edilen hata değeri denetleyiciye uygulanır. Literatürde, elde edilen bu hata değeri ile işlem yaparak çıkış geriliminin ayarlanması için gereken değerleri üreten çeşitli denetleyici tasarımları mevcuttur. Bunlar PID, Bulanık Mantık, Genetik Algoritmalar ve çeşitli optimizasyon teknikleridir [6]–[10]. Aynı zamanda bu yöntemlerden bir veya birkaçının birleştirilmesi ile elde edilen hibrit denetleyici tasarımları da bulunmaktadır [11], [12].

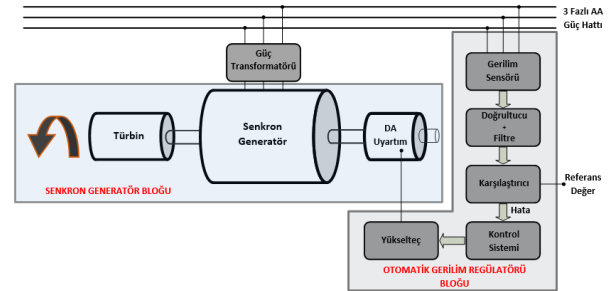
Literatürde kullanılan hibrit denetleyici yapılarından genetik algoritma (GA) tabanlı olanlar, oransal, integral ve türev kazanç katsayılarının ayarlandığı genetik algoritma tabanlı hibrit sistemlerdir [2], [13], [14]. Genetik algoritmalar, rastgele arama yöntemlerine kıyasla daha etkili ve verimli bir teknik olarak kabul edilir [15]. Genetik algoritmaların hibrit sistemlerde kullanılmasının en büyük avantajı doğal seçim mekanizmasıdır. Kazanç parametrelerinin belirlenmesinde bir diğer hibrit denetleyici sistemi olan Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (PSO) kullanılmaktadır [8], [16]. OGR sistemlerinde genetik algoritmanın çalışma hızından kaynaklanan dezavantajın etkisini azaltmak için Parçacık Sürüşü Optimizasyonu ile genetik algoritmanın birleşiminden elde edilen Hibrit Genetik Algoritmali Parçacık Sürüşü Optimizasyonu (HGAPSO) yöntemi de bulunmaktadır [9]. Alternatif olarak bir başka yapay zekâ tabanlı algoritma yapısı olan Bulanık Mantık Denetleyicileri (BMD) de hibrit denetleyici yapılarında OGR sistemleri için kullanılmaktadır. Hem PID denetleyici hem de BMD sistemi aynı anda çalışan hibrit denetleyici yapılarında BMD çıkışından oransal, türev ve integral kazanç katsayıları elde edilir ve PID denetleyiciye iletilir [4], [17].

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) metodu çeşitli alternatif metodlardan belirli kriterlere göre elde edilen sonuçlar ile en uygun alternatifi matematiksel olarak tespit edebilmek amacıyla kullanılan çok kriterli karar verme tekniklerinden biridir [18]–[20]. TOPSIS yönteminde alternatiflerin satırlara yazılması ile kriterlerin sütunlara yazılmasıyla karar matrisi oluşturulmaktadır. Karar matrisinin oluşturulmasının ardından sırasıyla normalize karar matrisinin oluşturulması ve ağırlıklandırılmış normalize karar matrisinin oluşturulması işlemleri takip etmektedir [20], [21]. Elde edilen ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi ile ideal ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi ve ayırım ölçütlerinin hesaplanması işlemlerinden sonra alternatiflerin ideal çözüme yakınlığı hesaplanarak sonuçlar değerlendirilir [20].

Bu çalışmada Anahtarlamalı Bulanık-PID hibrit denetleyici tasarlanarak senkron generatörün çıkış gerilimi kontrol edilmiştir. Aynı zamanda Yapay Arı Kolonisi (ABC) Algoritması ile optimize edilen PID denetleyici parametreleri ve Ziegler-Nichols yöntemi ile Klasik PID, Pessen Integration Rule ve No Overshoot gibi denetleyicilerin sonuçlarına ait benzetim çalışması sonuçları grafikler ve çizelgeler ile çeşitli kriterlere göre sunulmuştur. Sunulan denetleyici alternatifleri % maksimum aşım, yükselme zamanı ve oturma zamanı kriterleri kullanılarak çok kriterli karar verme tekniklerinden biri olan TOPSIS metodu ile hesaplanarak iki farklı durum oluşturulmuştur. İlgili durumlar değerlendirilerek her iki durum için de en iyi performansa sahip denetleyiciler belirlenmiştir.

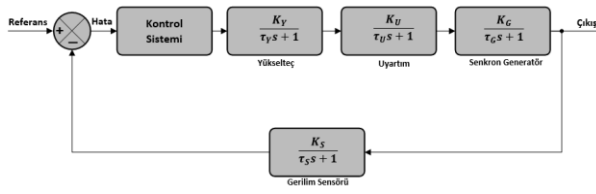
2. OTOMATİK GERİLİM REGÜLATÖRÜ (AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR)

Bir senkron generatör sistemi blok şeması Şekil 1’de gösterilmiştir [22], [23]. Burada generatörün bağlı bulunduğu üç fazlı hat üzerinden alınan gerilim geri besleme sinyali ilk olarak doğrultulur. Daha sonra bir karşılaştırıcı vasıtasıyla referans gerilim değeri ile karşılaştırılarak hata sinyali elde edilir. Elde edilen bu hata sinyali tasarımı gerçekleştirilen denetleyiciye aktarılır.



Şekil 1. Senkron generatör sistemi blok şeması (Synchronous generator system block diagram)

Hata sinyalini sıfıra indirmek amacıyla tasarlanmış olan denetleyici bir çıkış sinyali üreterek yükselteç vasıtasıyla generatör için gerekli uyarımı gerçekleştirir. OGR temel kontrol mekanizmasıdır. OGR sisteminin temel görevi çıkış gerilimini belirlenen değerde sabit tutmak ve aynı zamanda reaktif güç dengesini sağlamaktır [1], [24]. Bu sayede güç sisteminin kararlı ve güvenilir bir şekilde çalışması sağlanır. Bir OGR sisteminin temel parçaları Şekil 2’de görülen doğrusal hale getirilmiş blok diyagramla açıklanabilir [24], [25]. OGR sistemini oluşturan kısımlar: yükselteç, uyarım, senkron generatör, gerilim sensörü, karşılaştırıcı ve bir kontrol sistemi bloğundan oluşmaktadır [16], [24].



Şekil 2. OGR sistemi blok diyagramı (AVR system block diagram)

Yükselteç: OGR sisteminde kullanılan yükselteçler manyetik, döner veya elektronik yükselteçler olarak ayrılırlar [22]. Bu modelin transfer fonksiyonundaki K_Y kazancı, τ_Y ise genellikle ihmal edilebilecek derecede küçük bir değere sahip olan zaman sabitini ifade etmektedir [16].

Uyartım: DA, AA ve Statik uyarma sistemleri olmak üzere üç grupta sınıflandırılabilir [22], [26]. DA uyarma sistemleri; uyarma gücü kaynağı olarak komütatörlü bir doğru akım jeneratörü kullanır. AA uyarma sistemleri;

senkron jeneratör alan sargısı için gerekli olan DA akımın üretilmesinde duran veya dönen doğrultuculu alternatör kullanırlar. Statik uyarma sistemleri ise uyarma gücü kaynağı olarak transformatörleri veya yardımcı jeneratör sargıları ve doğrultucuları kullanırlar.

Senkron generatör: Generatör uçlarındaki gerilim yüke bağlıdır ve bu blokta üretilen elektromanyetik kuvvet, makinenin mıknatıslanma eğrisinin bir fonksiyonu olarak ifade edilir [22]. Doğrusallaştırılmış transfer fonksiyonundaki K_G kazancı, τ_G ise zaman sabitini ifade etmektedir [17]. Bu sabitler generatörün yüküne göre değişiklik göstermektedir [9], [25].

Gerilim Sensörü: Gerilim sensörü ile generatör çıkış gerilimi AA'dan DA'ya dönüştürülerek karşılaştırıcıya iletilir ve hata sinyali üretilir [13]. Birinci derece transfer fonksiyonundaki K_S kazancı ve çok küçük bir değere sahip olan τ_S ise zaman sabitini ifade etmektedir [9], [13]. Şekil 2'de verilen bloklara ait kazanç parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir [25].

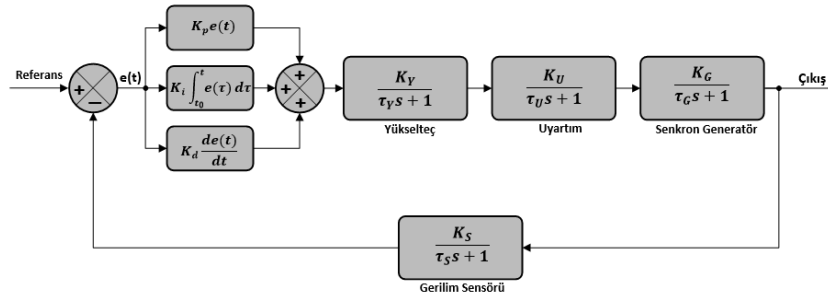
Çizelge 1. OGR bileşenlerinin parametreleri (Parameters of AVR components)

| Model Tipi | Transfer Fonksiyonu | Parametre Sınırı | Seçilen Değerler |
|--------------------------|----------------------------|----------------------------------------------------------|--------------------------|
| Yükselteç | $\frac{K_Y}{\tau_Y s + 1}$ | $10 \leq K_Y \leq 40$ $0,02 \leq \tau_Y \leq 0,1$ | $K_Y=10$ $\tau_Y=0,1$ |
| Uyartım | $\frac{K_U}{\tau_U s + 1}$ | $1 \leq K_U \leq 10$ $0,4 \leq \tau_U \leq 1$ | $K_U=10$ $\tau_U=0,4$ |
| Senkron Generatör | $\frac{K_G}{\tau_G s + 1}$ | $0,7 \leq K_G \leq 1$ $1 \leq \tau_G \leq 2$ | $K_G=1$ $\tau_G=1,50$ |
| Gerilim Sensörü | $\frac{K_S}{\tau_S s + 1}$ | $0,9 \leq K_S \leq 1,1$ $0,001 \leq \tau_S \leq 0,06$ | $K_S=1$ $\tau_S=0,01$ |

2.1. PID DENETLEYİCİ (PID CONTROLLER)

PID denetleyiciler basit ve kolay bir şekilde sisteme uyarlanabilmesi açısından günümüzde sıklıkla tercih edilmektedir [27]. PID denetleyici ile kontrol edilen generatör sisteminin blok şeması Şekil 3'de sunulmuştur [24]. Burada K_p , K_i ve K_d ifadeleri sırasıyla oransal, integral ve türevsel kazançları ifade etmektedir. Şekil 3'de görülen $e(t)$ ifadesi ise hatayı temsil etmektedir. PID

denetleyici tasarımı yapılırken sistemin matematiksel modelinin bilinmesi gerekir [28]. PID denetleyicisinin çıkış ifadesi Eşitlik 1'deki gibi olmaktadır [13], [24], [29]. PID denetleyicideki P terimi ile generatör çıkışındaki gerilimin yükselme zamanını etkileyen oransal ifade, I terimi sistem cevabının referans değeri ilk aştığı zamandan sonra generatör geriliminin yerleşim zamanını etkileyen integral ifadesi ve D terimi ise sistemin geçici durum cevabını iyileştirme ifadesi olarak kullanılmaktadır.



Şekil 3. PID denetleyici ile kontrol edilen generatör sisteminin blok diyagramı (Block diagram of generator system controlled by PID controller)

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_{t_0}^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Tasarlanacak olan denetleyicideki K_p , K_i ve K_d kazanç değerlerini belirlemek için kavramsal olarak sezgisel bir yöntem olan Ziegler-Nichols yöntemi kullanılabilir [9], [30]. Ziegler-Nichols yöntemi ile kazanç ifadelerinin elde edilmesi Çizelge 2’de sunulduğu gibi yapılmaktadır [31]. Bu ifadelerde görülen K_u değeri; K_i ve K_d kazançları sıfıra ayarlanıp, K_p parametresi ile sıfırdan itibaren artırılarak sistem çıkışının sabit genlikli osilasyona girmesi ile kaydedilen oransal kazanç ifadesidir. T_u değeri ise bu osilasyonlu çıkışın periyodudur [32].

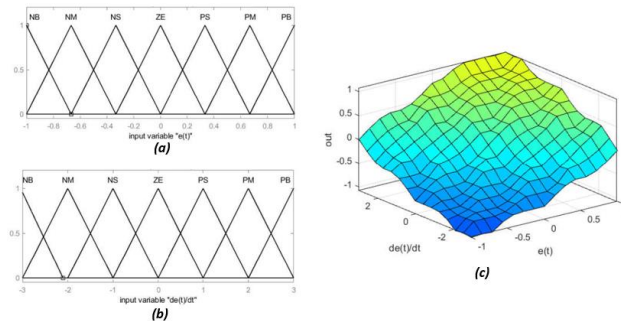
Çizelge 2. Ziegler-Nichols Yöntemi (Ziegler-Nichols Method)

| Denetleyici Tipi | K_p | K_i | K_d |
|-------------------------|----------|---------------|----------------|
| Klasik PID | $0,6K_u$ | $1,2K_u/T_u$ | $0,075K_u T_u$ |
| Pessen Integration Rule | $0,7K_u$ | $1,75K_u/T_u$ | $0,105K_u T_u$ |
| No Overshoot | $K_u/5$ | $0,4K_u/T_u$ | $K_u T_u/15$ |

2.2. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ (FUZZY LOGIC CONTROLLER)

Bulanık mantık denetleyici temelde insan gibi düşünme ve sezgisel ifadelerle dayanan sözel karşılaştırma ifadeleri ile değişimleri değerlendiren bir denetleyici yapısıdır [17]. Bulanık mantık denetleyici matematiğin gerçek dünyaya uygulanması olarak da ifade edilebilir. PID denetleyicinin aksine bulanık mantık denetleyici tasarlanırken sistemin matematiksel modelinin bilinmesi gerekmez [33].

Genel olarak dört ana kısımdan meydana gelen bulanık mantık denetleyici içerisinde Bulanıklaştırma, Bilgi Tabanı, Çıkarım Motoru ve Durulaştırma bölümleri bulunmaktadır [17]. Bulanıklaştırma bölümü denetleyicinin ilk aşaması olup görevi, Şekil 4-a ve Şekil 4-b’de gösterilen üyelik fonksiyonları yardımıyla keskin değerleri bulanık değerlerine dönüştürmektir. Bilgi tabanı dilsel kontrol tanımlamaları içinde barındıran bir veri tabanı sağlar [33]. Çıkarım motoru bir bulanık mantık denetleyicisinin temel parçasıdır [34]. Burada insan gibi karar vermeyi benzetebilmek için Çizelge 3’de görülen dilsel ifadeler kullanılır. Bu dilsel ifadeler insan tecrübesine dayanır [17].



Şekil 4. Bulanık mantık denetleyici parametreleri, (a) hata sinyalinin bulanık küme değişkenleri, (b) hata değişimi sinyalinin bulanık küme değişkeni, (c) Bulanık mantık kural yüzeyi (Fuzzy logic controller parameters, (a) fuzzy set variables of error signal, (b) fuzzy set variable of error change signal, (c) fuzzy logic rule surface)

Durulaştırma bölümü ise çıktı ifadelerine karşılık gelen değer dilsel ifadelerle dönüştüren ve ölçekleyen bölümdür [34]. Bu dönüşüm de başlangıçta kullanıcı tarafından belirlenen üyelik işlevleri ile belirlenir.

Çizelge 3. Bulanık mantık denetleyici kural tablosu (Fuzzy logic controller rule table)

| $\frac{de(t)}{dt}$ e(t) | NB | NM | NS | ZE | PS | PM | PB |
|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB | NB | NB | NM | NM | NS | NS | ZE |
| NM | NB | NM | NM | NS | NS | ZE | PS |
| NS | NM | NM | NS | NS | ZE | PS | PS |
| ZE | NM | NS | NS | ZE | PS | PS | PB |
| PS | NM | NS | ZE | PS | PS | PM | PM |
| PM | NS | ZE | PS | PS | PM | PM | PB |
| PB | ZE | PS | PS | PM | PM | PB | PB |

2.3. YAPAY ARI KOLONOSİ (YAK) ALGORİTMASI (ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITHM)

Yapay Arı kolonisi Algoritması, arıların davranışından esinlenerek üretilmiş popüler optimizasyon algoritmalarından biridir. 2006 yılında Karaboğa tarafından literatüre kazandırılmıştır [35]. Bu algoritmada yiyecek arama işlemi esnasında arılar bir iş bölümü yapmaktadır [35], [36]. Bu sayede kovandaki işler de aksama olmadan dengeli bir şekilde yürümektedir. Algoritmada temel olarak kaşif arılar, işçi arılar ve gözcü arılar olmak üzere üç arı tipi bulunmaktadır [37], [38]. ABC algoritmasının sözde kod yapısı aşağıdaki gibi olmaktadır.

1. $x_{i,j}$ çözümlerinin popülasyon değerleri başlatılır.
2. Popülasyon değerlendirilir.
3. Döngü=1
4. Tekrarla
5. $v_{i,j} = x_{i,j} + \varphi_{ij}(x_{i,j} + x_{k,j})$ (k, i komşuluğunda bir çözümdür. φ değeri (-1,+1) arasında değişen rastgele bir sayıdır.) ve değerlendirilir.
6. x_i ve v_i arasında -açgözlü- seçim uygulanır.
7. Denklem (2) uygulanarak x_i değerleri için olasılık değeri (P_i) hesaplanır.

$$P_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i} \quad (2)$$

Çözümün uygunluk değerinin hesaplanması için de Denklem (3) kullanılır. P_i değerleri (0-1) arasında normalleştirilir.

$$fit_i = \begin{cases} \frac{1}{1 + f_i}, & \text{eğer } f_i \geq 0 \\ \frac{1}{1 + |f_i|}, & \text{eğer } f_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

8. P_i 'ye bağlı olarak x_i den yeni çözümler (v_i) üretilir ve değerlendirilir.
9. x_i ve v_i arasındaki izleyiciler için açgözlü seçim uygulanır.
10. Eğer terk edilen çözüm (kaynak) varsa belirlenir ve Denklem (4) kullanılarak keşif için rastgele üretilmiş yeni bir çözüm ile x_i değiştirilir.

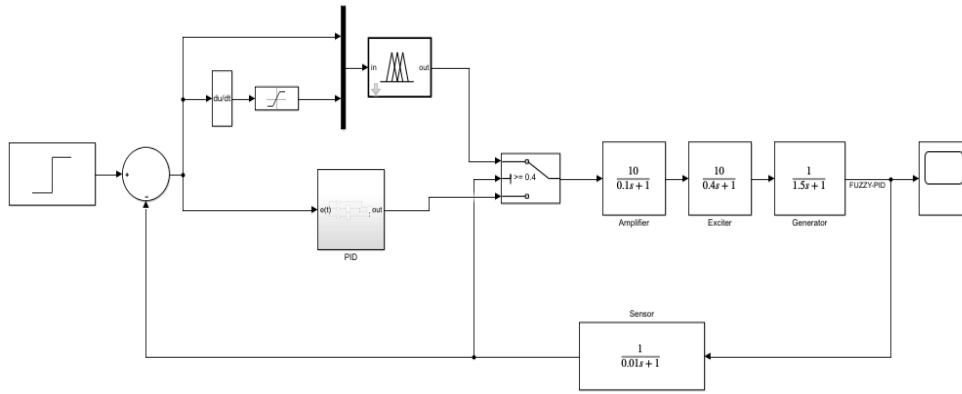
$$x_{i,j} = min_j + rand(0,1) * (max_j - min_j) \quad (4)$$

11. Şimdiye kadar elde edilen en iyi besin konumu (çözüm) hafızaya alınır.
12. İterasyon=iterasyon+1 ve Döngü=Döngü+1 yapılır.
13. Maksimum iterasyona veya durdurma kriterine kadar tekrar edilir.

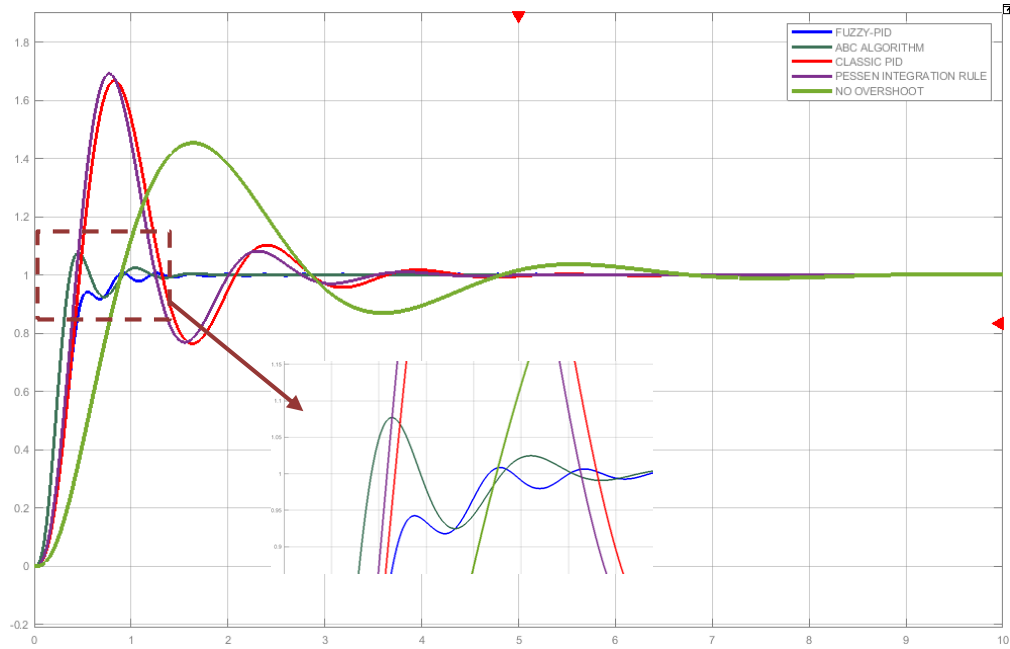
2.4. HİBRİT DENETLEYİCİ SİSTEMİ (HYBRID CONTROLLER SYSTEM)

Senkron generatörün çıkış gerilimini sabit tutabilmek için önerilen denetleyici hem bulanık mantık hem de PID denetleyiciyi içeren hibrit bir yapıya sahiptir (Şekil 5). Bu anahtarlama denetleyicinin çalışma stratejisi ise en iyi sonuçların elde edildiği geri besleme sinyalinin referans değerinin %40'ın altında olduğu zaman PID denetleyici, %40'ın üstünde olduğu zaman da bulanık mantık denetleyicinin çalıştırılmasıdır. Sistemin çalışmasında ilk çalışma esnasında PID denetleyicinin yükselme zamanındaki hızlı performansından yararlanılarak PID denetleyici Ziegler-Nichols yöntemi ile elde edilen klasik PID parametreleri kullanılmıştır.

Önerilen sistemin bulanık mantık kural çizelgesi ise Çizelge 3'de verilmiştir. Benzetim çalışması gerçekleştirilen bu sistemde Ziegler-Nichols yöntemi ile elde edilen denetleyici parametreleri kullanılmıştır. Belirtilen bu üç duruma ait karşılaştırmalı sonuçlar Şekil 6'da gösterilmektedir. İlgili denetleyicilerden en iyi performans gösteren ikisi yaklaştırılarak Şekil 6'da sunulmuştur. Sonraki bölümlerde çok kriterli karar verme tekniklerinden biri olan TOPSIS metodu ve bu metoda göre yapılan performans değerlendirmeleri sunulacaktır.



Şekil 5. Önerilen hibrit denetleyici yapısı (Proposed hybrid controller structure)



Şekil 6. Birim basamak sistem cevabı (Unit step system response)

3. SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ (EVALUATION OF RESULTS)

Önerilen hibrit denetleyici, ABC algoritması ile optimize edilen PID denetleyici ve Ziegler-Nichols yöntemi ile elde edilen klasik PID, Pessen Integration Rule ve No

Overshoot denetleyicilerine ait sonuçlar Çizelge 4'de sunulmuştur. Denetleyici alternatifleri ve kriterler bu bölümde TOPSIS metoduna göre değerlendirilecektir. Değerlendirme sırasında % maksimum aşım ve yükselme zamanı değerlerinin ağırlıkları temel alınarak iki durum belirlenmiştir

Çizelge 4. Denetleyicilerin karşılaştırılması (Comparison of controllers)

| Denetleyici Alternatifleri | Kriterler | Maksimum Aşım (%) | Yükselme Zamanı (ms) | Oturma Zamanı (s) |
|----------------------------|-----------|-------------------|----------------------|-------------------|
| Fuzzy-PID | | 0,85 | 314,392 | 0,821 |
| ABC Algoritması | | 7,704 | 214,759 | 1,099 |
| Klasik PID | | 66,82 | 271,503 | 3,476 |
| Pessen Integration Rule | | 69,20 | 252,944 | 3,279 |
| No Overshoot | | 45,40 | 559,435 | 6,247 |

Birinci durumda kullanılan ağırlıklandırma matrisinde % maksimum aşımın ağırlık değeri en yüksek seviyede tutulmuştur. Ağırlık matrisinde karşılaştırma kriterlerinin ağırlık değerleri toplamının 1 olması gerekmektedir. Bu ağırlıklandırma değerlerine göre elde edilen sonuçlar Çizelge 5’de sunulmuştur.

$$w_n = \begin{cases} \%MaksimumAşım, w_1 = 0,7020 \\ YükselmeZamanı, w_2 = 0,2424 \\ OturmaZamanı, w_3 = 0,0556 \end{cases}$$

Çizelge 5. Birinci Durum Sonuçları (First Case Results)

| Denetleyici Alternatifleri | G_i^+ | En iyi Alternatif Sıralaması |
|----------------------------|-------------|------------------------------|
| Fuzzy-PID | 0,936052581 | 1 |
| ABC Algoritması | 0,903033989 | 2 |
| Klasik PID | 0,177347764 | 5 |
| Pessen Integration Rule | 0,179371629 | 4 |
| No Overshoot | 0,332244948 | 3 |

İkinci durumda ise ağırlık matrisinde ise yükselme zamanının ağırlık değeri artırılmıştır. İkinci duruma ait ağırlıklandırma değerlerine göre elde edilen sonuçlar Çizelge 6’da sunulmuştur

$$w_n = \begin{cases} \%MaksimumAşım, w_1 = 0,5490 \\ YükselmeZamanı, w_2 = 0,3655 \\ OturmaZamanı, w_3 = 0,0855 \end{cases}$$

Çizelge 6. İkinci Durum Sonuçları (Second Case Results)

| Denetleyici Alternatifleri | G_i^+ | En iyi Alternatif Sıralaması |
|----------------------------|-------------|------------------------------|
| Fuzzy-PID | 0,888228148 | 2 |
| ABC Algoritması | 0,910547318 | 1 |
| Klasik PID | 0,290705541 | 5 |
| Pessen Integration Rule | 0,296086566 | 4 |
| No Overshoot | 0,298855868 | 3 |

Her iki durumda elde edilen ağırlık hesaplamaları dikkate alındığı zaman birinci duruma göre önerilen hibrit denetleyici yapısı, ikinci duruma göre de ABC algoritması ile optimize edilen PID denetleyici yapısı en iyi denetleyici olarak belirlenmiştir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada senkron generatöründe kullanılan Otomatik Gerilim Regülatörleri için Bulanık-PID denetleyicisi içeren bir hibrit sistem tasarlanmıştır. Hibrit yapı hata sinyalini ve türevini girdi olarak alan bulanık mantık denetleyicisi ve Ziegler-Nichols yöntemi ile elde edilen klasik PID denetleyicinin birlikte kullanılmasıyla

elde edilmiştir. Tasarlanan bu denetleyicinin çalışma prensibi, referans değerinin %40’ına ulaşana kadar PID denetleyicisi, referans değerinin %40’ından sonra ise bulanık mantık denetleyicisini aktif eden bir yapıdır. Yapılan bu çalışmada aynı zamanda ABC algoritması ile optimize edilen bir PID denetleyici de tasarlanmıştır. Hibrit denetleyiciden elde edilen sonuçlar ABC algoritması ile optimize edilen PID denetleyici, Klasik PID, Pessen Integration Rule ve No Overshoot gibi farklı denetleyiciler ile karşılaştırılarak sonuçlar çizelge halinde sunulmuştur. Denetleyicilere ait yükselme zamanı, % maksimum aşım ve oturma zamanı kriterleri TOPSIS metodu ile analiz edilerek iki farklı

ağırlıklandırma durumuna göre karşılaştırılmıştır. Yapılan karşılaştırmada % maksimum aşımın daha önemli olarak ağırlıklandırıldığı birinci durumda önerilen anahtarlamalı Bulanık-PID en iyi denetleyici olarak sonuçlanmıştır. İkinci durumda ise yükselme zamanının ağırlığı artırılmış ve ABC algoritması ile optimize edilen denetleyici en iyi denetleyici olarak belirlenmiştir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazar(lar)ı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Güngör BAL: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. Benzetim çalışması sonuçlarını analiz etmiştir.

Nihat Öztürk: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. Benzetim çalışması sonuçlarını analiz etmiştir.

Selim ÖNCÜ: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. Benzetim çalışması sonuçlarını analiz etmiştir.

Kenan ÜNAL: Makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir. Benzetim çalışmasını gerçekleştirmiştir.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] J Chapman, S. Electric machinery fundamentals. McGraw-hill, (2004).
- [2] V. Yarlagadda and R. Gnanendar, "Dynamic Stability Improvement Using Genetic Algorithm Tuned Controllers Embedded in Generator Control Loops" *2020 Fourth International Conference on Computing Methodologies and Communication (ICCMC)*, Erode, India, 561–565, (2020).
- [3] Ghamri, L. Y., Awadh, H., Al Shamsi, N., AlKhatari, S., Khurram, A., & Rehman, H., "Robust AVR design for the synchronous generator" *The Journal of Engineering*, 2019(17), 4111-4115, (2019).
- [4] Farouk, N., & Sheng, L., "Design and Implementation of a Fuzzy Logic Controller for Synchronous Generator" *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 4(20), 4126-4131, (2012).
- [5] Bayram, M. B., Sefa, I., & Balci, S., "A static exciter with interleaved buck converter for synchronous generators" *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(28), 17760-17770, (2017).
- [6] Elumalai, K., & Sumathi, S. (2017, March). "Behavior modification of PID controller for AVR system using particle swarm optimization" *2017 Conference on Emerging Devices and Smart Systems (ICEDSS)*, Mallasamudram, India, 190-195, (2017).
- [7] Ataşlar-Ayyıldız, B., & Karahan, O. "Controller Tuning Approach With TLBO Algorithm For The Automatic Voltage Regulator System" *Anadolu University of Sciences & Technology-A: Applied Sciences & Engineering*, 21(1), (2020).
- [8] Ercan, K. Ö. S. E., & Coşkun, S., "Time-delay AVR system analysis using PSO-based PID controller", *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 981-991, (2020)..
- [9] Aboura, F., "Tuning PID controller using hybrid genetic algorithm particle swarm optimization method for AVR system" *International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP) & 2019 International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, Istanbul, Turkey, 570-574, (2019) .
- [10] Çelik, E., & Öztürk, N. "A hybrid symbiotic organisms search and simulated annealing technique applied to efficient design of PID controller for automatic voltage regulator" *Soft Computing*, 22(23), 8011-8024, (2018).
- [11] Mitra, P., Maulik, S., Chowdhury, S. P., & Chowdhury, S. "ANFIS based automatic voltage regulator with hybrid learning algorithm", *42nd International Universities Power Engineering Conference*, Brighton, UK, 397-401 (2007).
- [12] Mitra, P., Chowdhury, S. P., Chowdhury, S., Pal, S. K., & Crossley, P. A., "Intelligent AVR and PSS with Adaptive hybrid learning algorithm" *IEEE Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, PA, USA, 1-7, (2008).
- [13] Yegireddy, Narendra Kumar, and Sidhartha Panda. "Design and performance analysis of pid controller for an avr system using multi-objective non-dominated shorting genetic algorithm-ii." *2014 International Conference on Smart Electric Grid (ISEG)*, Guntur, India, 1-7, (2014).
- [14] Mohammed, Naeim Farouk, et al. "Tuning of PID controller of synchronous generators using genetic algorithm" *2014 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Tianjin, China, 1544-1548, (2014).
- [15] Al Gizi, A. J., Mustafa, M. W., Al-geelani, N. A., & Alsaedi, M. A., "Sugeno fuzzy PID tuning, by genetic-neutral for AVR in electrical power generation" *Applied Soft Computing*, 28: 226-236. (2015).
- [16] Gaing, Z. L., "A particle swarm optimization approach for optimum design of PID controller in AVR system" *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 19(2), 384-391, (2004).
- [17] Farouk, N., & Bingqi, T. "Application of self-tuning fuzzy PID controller on the AVR system" *IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Chengdu, China, 2510-2514, (2012).
- [18] Odu, G. O. "Weighting methods for multi-criteria decision making technique" *Journal of Applied Sciences and Environmental Management*, 23(8), 1449-1457, (2019).
- [19] Li, Wu, Yonggang Chen, and Yang Chen. "Generalizing TOPSIS for multi-criteria group decision-making with weighted ordinal preferences." *7th World Congress on*

- Intelligent Control and Automation*, Chongqing, China, 7505-7508, (2008).
- [20] Özçalıcı, M. "Matlab ile çok kriterli karar verme teknikleri" Nobel Akademik Yayıncılık, Ankara, (2017).
- [21] Özdemir, M. "TOPSIS", Operasyonel Yönetim ve Stratejik Problemlerin Çözümünde Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri, Dora Yayınevi, İstanbul, (2014)
- [22] Özdemir, M. T., & Çelik, V. "Stability analysis of the automatic voltage regulation system with PI controller" *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(4), 698-705, (2017).
- [23] Ekinci, S., Demiroren, A., Zeynelgil, H., & Hekimoğlu, B., "An opposition-based atom search optimization algorithm for automatic voltage regulator system" *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ.*, 35, 1141-1158, (2020).
- [24] Bayram, M. Baha, et al. "Matlab/GUI based basic design principles of PID controller in AVR." *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. Istanbul, Turkey, 1017-1022, (2013).
- [25] Devaraj, D., & Selvabala, B., "Real-coded genetic algorithm and fuzzy logic approach for real-time tuning of proportional-integral-derivative controller in automatic voltage regulator system" *IET Generation, Transmission & Distribution*, 3(7), 641-649, (2009).
- [26] Eke, İ., Taplamacıoğlu, M. C., & Kocaarslan, İ., "Yapay Arı Kolonisi Algoritması Tabanlı Kararlı Güç Sistemi Dengeleyicisi Tasarımı" *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 26(3), (2011).
- [27] B. Özgenç, M. Ş. Ayas, and İ. H. Altaş, "Optimally Tuned PID Controller Design for an AVR System: A Comparison Study," *Int. J. Multidiscip. Stud. Innov. Technol.*, 3(2), 157-161, (2019).
- [28] Ang, K. H., & Chong, G. Yun li., "PID control system analysis, design, and technology" *IEEE Transaction on Control Systems Technology*, 13(4), 559-576, (2005).
- [29] Köse, E., "Optimal Control of AVR System With Tree Seed Algorithm-Based PID Controller" *IEEE Access*, 8, 89457-89467, (2020).
- [30] Chao, C. T., Sutarna, N., Chiou, J. S., & Wang, C. J., "An optimal fuzzy PID controller design based on conventional PID control and nonlinear factors" *Applied Sciences*, 9(6), 1224, (2019).
- [31] McCormack, A. S., & Godfrey, K. R. "Rule-based autotuning based on frequency domain identification" *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 6(1), 43-61, (1998).
- [32] Tzafestas, S., & Papanikolopoulos, N. P., "Incremental fuzzy expert PID control" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 37(5), 365-371, (1990).
- [33] Elmas, Ç., "Yapay Zeka Uygulamaları", Seçkin Yayıncılık, (2018).
- [34] Gupta, Tripti, and D. K. Sambariya. "Optimal design of fuzzy logic controller for automatic voltage regulator." *2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC)*, Indore, India, 1-6, (2017).
- [35] Torun, Y., Ergül, Z., & Aksöz, "A. Optimum Enerji Verimliliğini Hedefleyen Rastgele Ağaçlar ve Yapay Arı Kolonisi Yöntemi ile Otonom Robotlarda Yol Planlama Algoritması" *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 7(4), 903-915, (2019).
- [36] Öztürk, S. & Öztürk, N., "Yapay Arı Koloni Algoritması Kullanılarak Görüntü İyileştirme Yönteminin Geliştirilmesi" *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 4 (4), 173-183, (2016).
- [37] Karaboga, D., and Gorkemli, B., "A combinatorial artificial bee colony algorithm for traveling salesman problem." *2011 International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications*, Istanbul, Turkey, pp. 50-53, (2011).
- [38] Karaboga, D., & Akay, B., "A comparative study of artificial bee colony algorithm" *Applied Mathematics And Computation*, 214(1), 108-132. (2009).