



## GA ve PSO ile Kontrol Parametrelerinin Optimizasyonu

### *Control Parameters Optimization with GA and PSO*

Hüseyin Oktay Erkol

Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

#### Öz

Endüstride en yaygın kullanılan kontrolcü türü PID kontrolcüdür. PID kontrolcünün parametreleri, kontrolcü karakteristiğini doğrudan etkilemektedir ve iyi bir kontrol için optimum parametrelerin ayarlanması gerekir. Günümüzde bu amaçla geliştirilmiş birçok optimizasyon algoritması kullanılmaktadır. Bu sayede kontrolcü parametreleri için optimum değerler daha kısa zamanda ve daha az tecrübeyle ayarlanabilmektedir. Bu çalışmada Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) kullanılarak PID kontrolcünün parametreleri için optimum değerler belirlenmiştir. PID kontrolcü ile Sabit Mıknatıslı DC Motorun hız kontrolü yapılmış ve simülasyon ortamında incelenmiştir. Her iki yöntem de klasik yöntemlerden daha iyi sonuç vermiştir. GA ve PSO iki farklı amaç fonksiyon ile denenmiş ve karşılaştırmalı olarak sonuçları verilmiştir. PSO ile daha yüksek performans elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** DC motor, Genetik algoritma, Hız kontrolü, Parçacık sürüsü optimizasyonu, PID

#### Abstract

PID controllers are popular in industry. The characteristic of PID controller is effected the controller coefficients and optimum parameters must be tuned for a good control. Today, there are a lot of optimization algorithms to tune controller parameters. Optimum controller parameters can be found with less experience in a short time by using the optimization algorithms. In this study, optimum parameters are determined for a PID controller using Genetic Algorithm (GA) and Particle Swarm Optimization (PSO). The PID controller is designed as speed controller for Permanent Magnet DC Motor and simulated. Both of the optimization methods give better results than classical methods. Two different objective functions are used with GA and PSO for comparison. It is achieved more effective results with PSO.

**Keywords:** DC motor, Genetic algorithm, Speed controller, Particle swarm optimization, PID

### 1. Giriş

Günümüzde pek çok sistemin kontrolü için kapalı çevrim kontrol sistemleri kullanılmaktadır. Bu sistemler temel olarak kontrolcü, kontrol edilecek sistem ve kontrol edilecek değişkenleri ölçen sensörden oluşmaktadır. Böylece sistemin maruz kaldığı dış etkiler veya iç dinamiklerin sistem çıkışı üzerindeki bozucu etkisi minimuma indirilmekte ve sistem çıkışının, uygulama için uygun sürede, istenen değere ulaşması sağlanmaktadır. Uygulamada kullanılan çok sayıda kontrol yöntemi mevcuttur. Bunlar Bulanık Mantık (Fuzzy-Logic), Lineer Kuadratik Regülatör (LQR), Geri Adımlamalı Kontrolcü (Back Stepping Controller) ve benzerleridir. Yaygın olarak kullanılan kontrol algoritmalarının başında

PID (Proportional-Integral-Derivative, Oransal-İntegral-Türevsel) gelmektedir (Panda et al. 2004). PID kontrolcü ile sistemin uygun şekilde denetlenebilmesi, kontrolcüye ait özel parametrelerin doğru belirlenmesi ile mümkündür. Bu parametrelerin belirlenmesi için klasik yöntemlerin yanında yapay zeka teknikleri de yaygın olarak kullanılmaktadır (Kishnani et al. 2014, Huang 2015, Huang 2013).

PID parametrelerinin ayarlanmasında kullanılan klasik yöntem Ziegler-Nichols yöntemidir (Ziegler ve Nichols 1993). Bu yöntem ilk defa 1942 yılında Ziegler-Nichols tarafından önerilmiştir. Bu yöntemde PID parametreleri deneysel yöntemler sonucunda elde edilen sistem çıktıları ve önceden tanımlanmış tablolar yardımıyla hesaplanır. Bu yöntem ile hesaplanan parametreler kontrolcü için optimum parametreler olmayabilir. Bu durumda referans maksimum sapma miktarını veya çıkışın referans değere oturma zamanını iyileştirmek için elde edilen PID

\*Sorumlu yazarın e-posta adresi: oktayerkol@karabuk.edu.tr

parametreleri deneysel olarak değiştirilmek suretiyle kontrolcü performansı artırılabilir. Ancak bu işlemler hem zaman almakta hem de kontrolcü için en iyi parametrelerin elde edileceği garanti edilememektedir.

Bu problemin üstesinden gelebilmek için kullanılan yöntemlerden biri de sezgisel optimizasyon teknikleridir. Sezgisel optimizasyon tekniklerinde en optimum çözümün bulunacağı garanti edilemez ancak yöntem yetenekleri dahilinde ideal sonuca yaklaşır. Sezgisel yöntemler daha kısa sürede uygun sonuçlar üretebilmekte ve zaman kısıtı olan problemler yada online parametre optimizasyonu yapılan uygulamalarda tercih edilmektedirler.

Bu çalışmada Genetik Algoritma (GA) ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) kullanılarak PID parametreleri ayarlanmış ve sonuçlar karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir.

## 2. Gereç ve Yöntem

### 2.1. PID Denetleyici

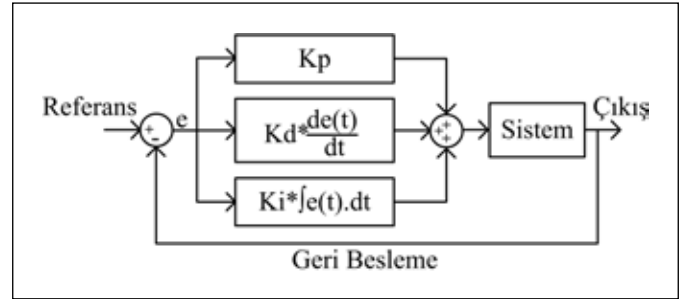
PID yaygın olarak kullanılan geri beslemeli bir kontrol yöntemidir. Kontrolcü ve sistemin genel yapısı Şekil 1'de verilmiştir. Denetlenecek sistemin çıkışı ile kontrolcünün girişi olan referans değer farkı hata olarak hesaplanır. Hata  $K_p$  parametresiyle, hatanın türevi  $K_d$  parametresiyle, hatanın integrali  $K_i$  parametresiyle çarpılarak elde edilen değerlerin toplamı sisteme giriş olarak uygulanır. Sistemin çıkışı tekrar referans değer ile karşılaştırılarak yeni bir hata değeri hesaplanır ve kontrolcünün üreteceği yeni çıkış sisteme giriş olarak uygulanır. Bu işlemler hata sıfır olana kadar devam eder. Kontrolcünün  $K_p$ - $K_d$ - $K_i$  parametreleri sisteme özeldir ve bu parametreleri belirlemek için birçok yöntem geliştirilmiştir. Kullanılan en klasik yöntem Ziegler-Nichols yöntemidir (Ziegler ve Nichols 1993).

### 2.2. Genetik Algoritma

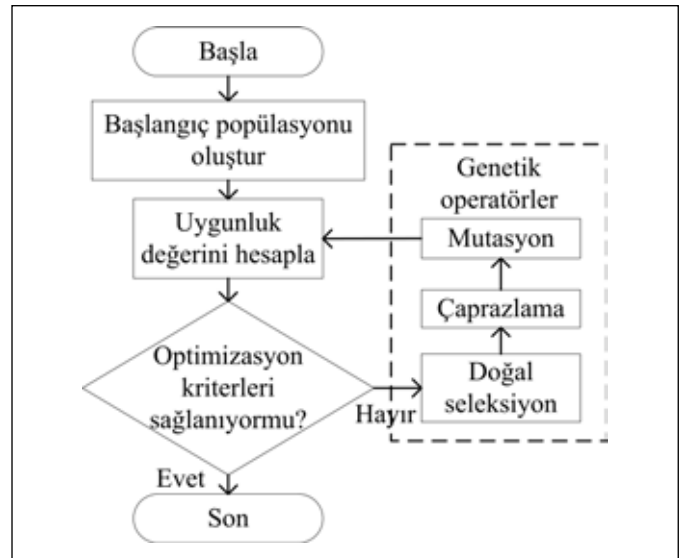
Doğada canlılar yaşam süreleri boyunca edindikleri bir takım fiziksel, biyolojik özellikleri yada yetenekleri genler vasıtasıyla bir sonraki nesle aktarırlar. Böylece her nesil, yaşam ortamına adaptasyon açısından, önceki nesillere göre daha üstün hale gelmiş olur. Yeni bireylerin meydana gelmesi sırasında rastgele iki bireyden (bir erkek bir dişi olarak düşünülebilir) alınan genler birleşerek yeni bir gen yapısı ve yeni bir birey meydana getirir. Yeni birey, kendini meydana getiren bireylere ait özelliklerinin tesadüfi bir karışımını ihtiva eder. Bu karışım genlerin birleşmesi sırasındaki çaprazlama işleminden kaynaklanır. Yeni birey hem olumlu hem de olumsuz özelliklere sahip olabilir. Olumsuz özelliklere sahip olan birey doğada yaşamını

sürdüremez ve yok olur. Bu duruma doğal seleksiyon denir. Olumlu özellikleri taşıyan birey ise yaşamını sürdürür ve bu sırada değişim geçirecek yeni özellikler de kazanır, buna mutasyon denir. Kendini geliştiren bu bireyler tekrar üreyerek yeni nesle hem atalarından gelen olumlu özellikleri hem de yeni kazandıkları olumlu özellikleri aktarır. Böylece nesil kendini geliştirerek var olmaya devam eder ve yeniden ürer. Bu döngü canlılar hayatta kalabildiği sürece devam eder.

Genetik algoritma bahsedilen bu döngüden esinlenilerek 1975 yılında J. Holland ve Goldberg tarafından geliştirilmiştir (Goldberg ve Holland 1988). Bir çok optimizasyon problemde başarıyla uygulanmıştır (Tasan ve Tunali 2008, Mohanta ve Sethi 2007, Weile ve Michielssen 1997). Genetik algoritmanın genel blok diyagramı Şekil 2'de verilmiştir (Tavakolpour et al. 2010). Başlangıçta rastgele bir başlangıç popülasyonu oluşturulup uygunluk değerleri kontrol edilir. Popülasyon içerisinde çözümü sağlayan bir gen varsa işlem son bulur, yoksa genetik operatörler işletilerek yeni bir po-



Şekil 1. PID kontrolcünün genel yapısı.



Şekil 2. Genetik algoritmanın genel yapısı.

pülasyon oluşturulur ve uygunluk değerleri yeniden hesaplanır. Uygun çözüm bulunana kadar bu işlem devam eder.

### 2.3. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) 1995 yılında J. Kennedy ve R. C. Eberhart tarafından geliştirilmiştir (Marini ve Walczak 2015). Kuş sürülerinin davranışlarından esinlenerek oluşturulmuş sezgisel bir algoritmadır. Kuşlar yiyecek ararken yiyeceğe en yakın olduğu düşünülen kuşu (lider) takip ederler. Lider yiyeceğin aranması sırasında değişebilir. Yiyeceği gören yeni kuş lider seçilir ve sürüdeki tüm kuşlar yeni lidere yönelerek yiyecek arayışına devam ederler. Lideri belirlemek için kendi aralarında iletişim kurarlar.

Sürüdeki her bir kuş parçacık olarak adlandırılır ve bir çözümü ifade eder. Her bir kuşun o anki pozisyonu çözümü aranan fonksiyon için bir giriştir. Dolayısı ile kuş hareket ederken her bir pozisyonunu fonksiyona iletir ve o anki pozisyon için çözüm üretilir. Elde edilen çözüm değerlendirilerek o çözümün uygunluk değeri elde edilir. Uygunluk değeri sonuca ulaşıp ulaşılmadığının bir ölçüsüdür. Kriterler doğrultusunda uygun sonuç bulunmuşsa arama sona erer. Uygun sonuç bulunamamışsa kuşlar arama uzayında dolaşmaya devam ederler. PSO'nun genel bir blok diyagramı Şekil 3'de verilmiştir (Coello ve Reyes-Sierra 2006). Algoritma işletilmeye başlamadan bir sürü oluşturulur, hız ve pozisyon gibi başlangıç değerleri atanır. Oluşturulan sürünün lideri belirlenir. Kuşlar belirlenen hızda uçmakta ve her iterasyonda pozisyonları değişmektedir. Hız sabit olabileceği gibi değişkende olabilir. Her yeni pozisyonda, tüm kuşlar için, fonksiyon değerlendirilir ve yeni lider belirlenir. Lider çözüme en yakın olan kuştur. Her yeni lider belirlendiğinde, liderin temsil ettiği pozisyonun optimizasyon kriterlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilir. Kriterler sağlanıyorsa algoritma sona erer, sağlanmıyorsa kuşlar arama uzayında uçmaya devam ederler. PSO'yu klasik optimizasyon algoritmalarından ayıran en önemli özellik ayarlanacak parametre sayısının az olması ve türev bilgisine ihtiyaç duymaması nedeniyle daha basit bir yapıya sahip olmasıdır.

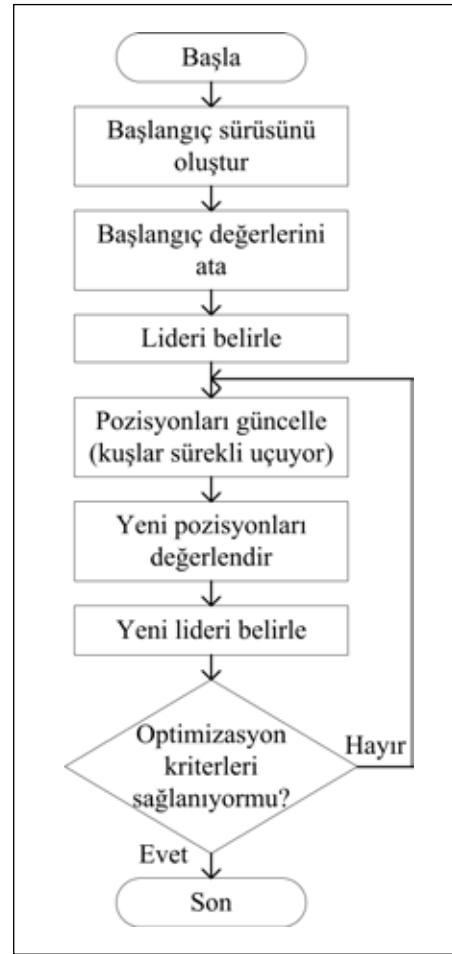
### 2.4. Hedef Sistemin Modellenmesi ve Optimizasyonu

Bu çalışmada hız kontrolü yapılan bir DC motor için PID parametreleri GA ve PSO ile belirlenmiştir. DC motor ve PID kontrolcü Matlab kullanılarak modellenmiş ve çalışma simülasyon ortamında yapılmıştır. Ayrıca fikir vermesi açısından PID parametreleri Ziegler-Nichols yöntemi ile de ayarlanmış ve yorumlanmıştır.

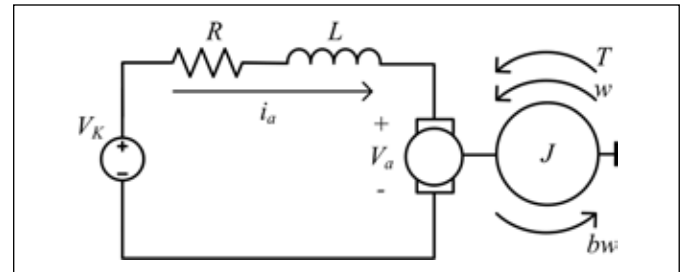
Modellenen DC motorun eşdeğer devresi Şekil 4'de verilmiştir.  $R$ ,  $L$ ,  $i_a$  ve  $V_a$  sırayla armatür direnci, endüktansı, akımı ve gerilimidir.  $J$  rotor atalet momenti,  $T$  tork,  $b$  ise sürtünme sabitidir.  $V_K$  kaynak gerilimidir. Sistemin diferansiyel eşitlikleri denklem 1 ve denklem 2'de, motor parametreleri Çizelge 1'de verilmiştir (El-Gammal ve El-Samahy 2009).

$$j \frac{dw}{dt} + bw = Ki_a - T \quad (1)$$

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = V_a - Kw \quad (2)$$



Şekil 3. PSO'nun genel yapısı.



Şekil 4. DC Motor eşdeğer devresi.

**Çizelge 1.** Motor parametreleri.

Armatür direnci (R)	2.45 $\Omega$
Armatür endüktansı (L)	0.035 H
Ters EMK katsayısı (K)	1.2 V.s/rad
Atalet momenti (J)	0.022 kg.m <sup>2</sup>
Sürtünme sabiti (B)	0.5.10 <sup>-3</sup> Nm.s/rad

Oluşturulan model üzerinde öncelikle Ziegler-Nichols yöntemi kullanılarak PID parametreleri belirlenmiştir. Bu yöntem uygulanırken öncelikle Ki ve Kd katsayıları sıfırlanır ve Kp için küçük bir değer belirlenir. Kp değeri sistem çıkışı osilasyona girene kadar düzenli şekilde artırılır. Sistem çıkışında osilasyona neden olan Kp değeri Ku olarak adlandırılır. Sistem çıkış sinyali periyodik şekilde dalgalanmaktadır ve bu dalganın periyodu Pu olarak adlandırılır. PID denetleyici için yeni değerler; Kp=Ku/1.7, Ki=Pu/2 ve Kd=Pu/8 olarak belirlenir. Yöntem ile ilgili daha fazla bilgi için (Basilio ve Matos 2002, Montiel et al. 2007) kaynakları incelenebilir. Bu çalışmada kontrol edilecek sistem için Ku=20 ve Pu=0.06 olarak belirlenmiştir. PID parametreleri olan Kp=11.76, Kd=0.03 ve Ki=0.0075 olarak hesaplanmıştır. Tasarlanan sistemin birim basamak cevabı Şekil 5'de verilmiştir. Sistem çıkışında 9.28%'lik bir kalıcı hata meydana gelmekle birlikte, en fazla aşma miktarı 104% ve oturma zamanı 0,8sn olarak ölçülmüştür.

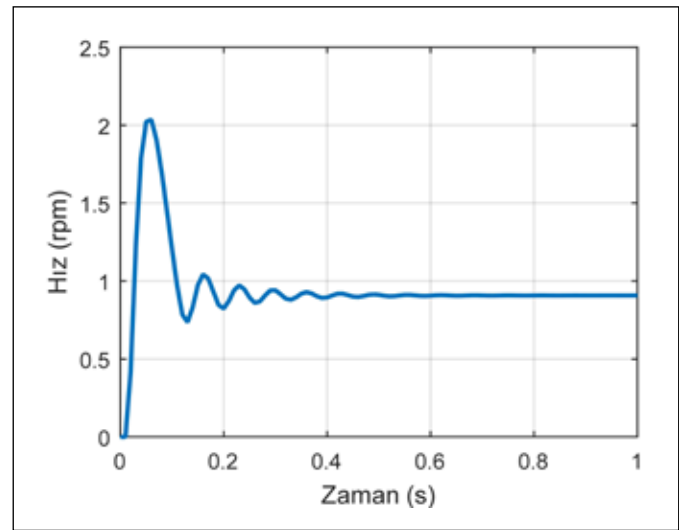
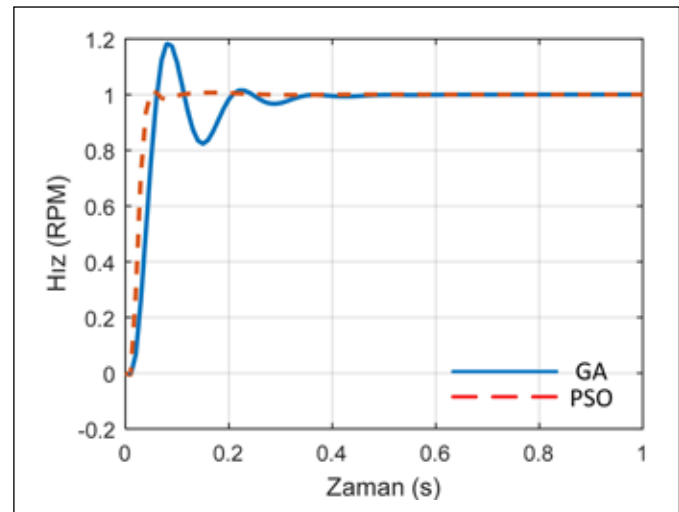
Tasarlanan sistem için PID parametreleri ayrıca GA ve PSO ile optimize edilmiştir. GA ve PSO gibi optimizasyon algoritmaları tanımlanan optimizasyon problemini minimize etmek için gerekli parametreleri belirlerler. Dolayısı ile PID parametrelerinin optimizasyonu için bir fonksiyon tanımlamak gereklidir, bu fonksiyona "amaç fonksiyon" (objective function) denir. PID algoritmaların optimizasyonu için literatürde mutlak hatanın toplamı (Integral Absolute Error (IAE)), hata karelerinin toplamı (Integral Squared Error (ISE)), zaman ağırlıklı hata karelerinin toplamı (Integral Time-weighted Squared Error (ITSE)) gibi fonksiyonlar önerilmiştir (Campo 2012). Bu fonksiyonların hepsi zaman ile meydana gelen hatanın büyüklüğünü vermektedir ve optimizasyon probleminde bu fonksiyonun minimize edilmesi, PID parametrelerinin en az hatayı verecek şekilde ayarlanması anlamına gelmektedir. Bu çalışmada amaç fonksiyon olarak IAE (hataların mutlak değerleri toplamı) ve ISE (hataların kareleri toplamı) kullanılmıştır (Maiti et al. 2008, Campo 2012). Kullanılan amaç fonksiyonlar denklem 3 ve denklem 4'de verilmiştir. İki farklı amaç fonksiyonunun kullanılma amacı, bu fonksiyonların optimizasyon probleminde etkisini görmek ve karşılaştırma yapabilmektir.

siyonun kullanılma amacı, bu fonksiyonların optimizasyon probleminde etkisini görmek ve karşılaştırma yapabilmektir.

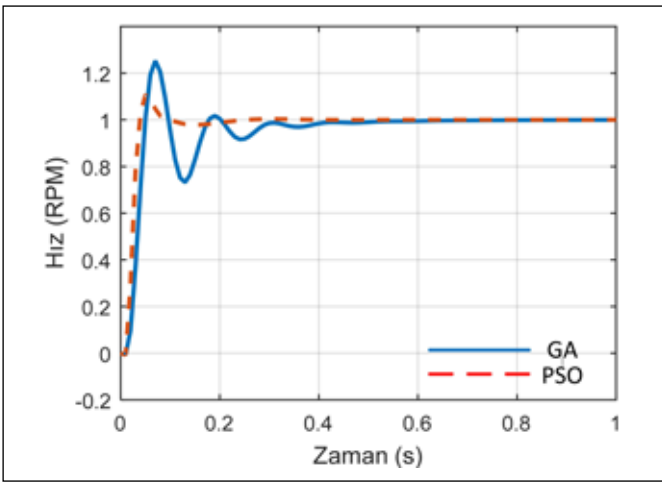
$$f_{ISE} = \int_0^T (e(t))^2 dt \quad (3)$$

$$f_{IAE} = \int_0^T |e(t)| dt \quad (4)$$

Sistem öncelikle IAE fonksiyonu kullanılarak GA ve PSO ile optimize edilmiştir. Optimize edilen sistemin birim basamak cevapları Şekil 6'da verilmiş ve elde edilen ölçümler Çizelge 2'de özetlenmiştir. Her iki yöntemde de kalıcı hata meydana gelmemektedir. Bu fonksiyon ile PSO daha iyi sonuç vermektedir. PSO'da en fazla aşma 1.2% iken

**Şekil 5.** Ziegler-Nichols yöntemi uygulanan sistemin birim basamak cevabı.**Şekil 6.** IAE fonksiyonu ile optimize edilen sistemin birim basamak cevabı.

GA'da 18% olmaktadır. Ayrıca oturma zamanı açısından değerlendirildiğinde PSO ile optimize edilen sistem GA ile optimize edilenden 0.16s daha kısa sürede referans değere oturmaktadır. Amaç fonksiyon olarak ISE kullanıldığında yine kalıcı hata oluşmamaktadır. PSO'da en fazla aşma 11% iken GA'da 25% olmaktadır. Oturma zamanı açısından değerlendirildiğinde PSO ile optimize edilen sistem 0.38sn'de, GA ile optimize edilenden ise 0.77sn'de oturmakta ve PSO ile GA'dan 0.36sn daha iyi oturma zamanı elde edilmektedir. Bununla birlikte genel bir değerlendirme yaparsak IAE fonksiyonu ile ISE fonksiyonundan daha iyi sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 7. ISE fonksiyonu ile optimize edilen sistemin birim basamak cevabı.

Sistemin birim basamak cevapları yanı sıra dinamik davranışı da incelenmiştir. Bunun için simülasyon ortamında 100 rpm hızında dönen motorun hızı birinci saniyede 200 rpm'e çıkartılmış, ikinci saniyede ise motora yük (12.5N) bindirilmiş ve sistem davranışı analiz edilmiştir. IAE fonksiyonu kullanılarak elde edilen sistem cevabı Şekil 8'de verilmiştir. Hız değişimine verilen tepki açısından bu grafik incelendiğinde PSO'nun GA'dan 0.32sn daha iyi oturma zamanına ve yaklaşık 4 kat daha iyi aşma miktarına sahip olduğu görülmektedir. İkinci saniyede meydana gelen yük değişimine bakıldığında ise GA'da aşma sıfır iken PSO'da 5.5% olarak ölçülmüş ve GA daha iyi sonuç vermiştir. Oturma zamanı açısından değerlendirildiğinde PSO'nun 0.2sn daha iyi bir süreye sahip olduğu görülmektedir. Yapılan ölçümler Çizelge 3'de özetlenmiştir.

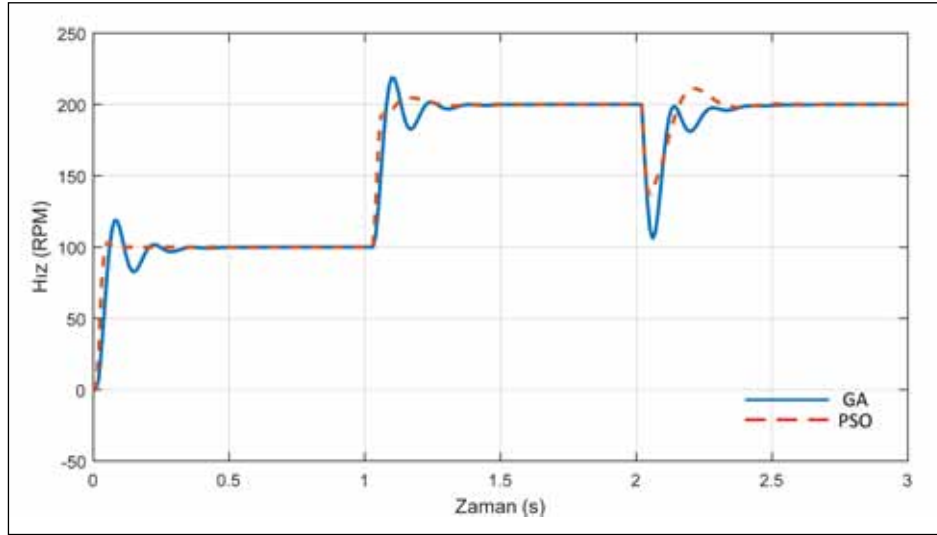
ISE fonksiyonu kullanılarak elde edilen sistem cevabı Şekil 9'da verilmiştir. Hız değişimine verilen tepki açısından bu grafik incelendiğinde PSO'nun GA'dan 0.35sn daha iyi oturma zamanına ve yaklaşık 10 kat daha iyi aşma miktarına sahip olduğu görülmektedir. İkinci saniyede meydana gelen yük değişimine bakıldığında ise GA'da aşma sıfır iken PSO'da 4.2% olarak ölçülmüş ve GA yine iyi sonuç vermiştir. Oturma zamanı açısından değerlendirildiğinde PSO'nun 0.23sn daha iyi bir süreye sahip olduğu görülmektedir. Yapılan ölçümler Çizelge 3'de özetlenmiştir. Amaç fonksiyon bağlı olarak yapılan değerlendirmeler benzer olmakla birlikte IAE fonksiyonu her iki optimizasyon algoritmasında da ISE fonksiyonundan daha iyi sonuçlar vermiştir.

Çizelge 2. Birim basamak cevaplarından elde edilen sonuçlar.

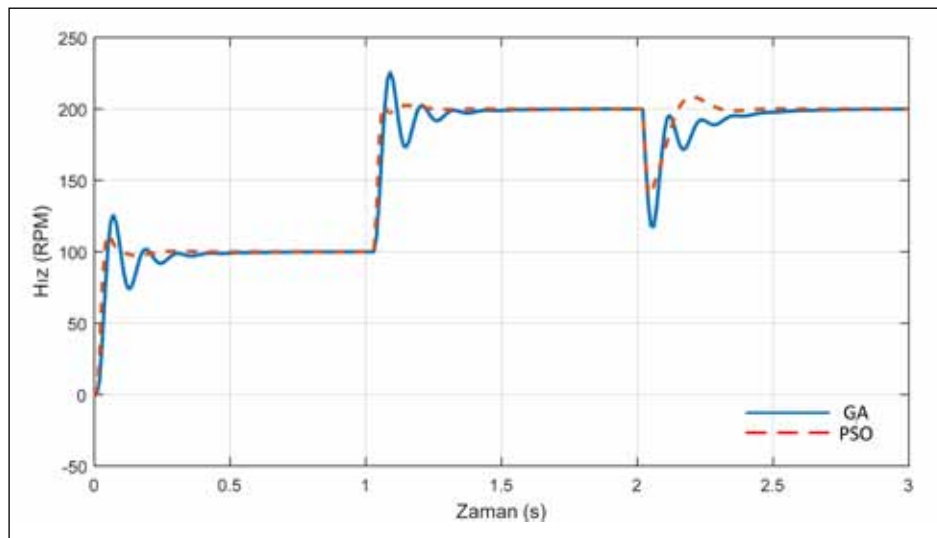
Yöntem	Amaç Fonksiyon	Maksimum aşma (%)	Oturma zamanı (sn)	Kalıcı Hata (%)
Ziegler-Nichols	-	104	0.8	9.28
GA	IAE	18	0.49	0
PSO	IAE	1.2	0.33	0
GA	ISE	25	0.77	0
PSO	ISE	11	0.38	0

Çizelge 3. Dinamik davranış sırasında yapılan ölçümler.

Yöntem	Amaç Fonksiyon	Hız değişimi		Yük değişimi	
		Maksimum aşma (%)	Oturma zamanı (sn)	Maksimum aşma (%)	Oturma zamanı (sn)
GA	IAE	9.5	0.65	0	0.68
PSO	IAE	2.25	0.33	5.5	0.48
GA	ISE	11.5	0.67	0	0.70
PSO	ISE	1.21	0.32	4.2	0.47



Şekil 8. IAE-PSO-GA ile sistemin dinamik testi.



Şekil 9. ISE-PSO-GA ile sistemin dinamik testi.

### 3. Sonuçlar

Bu çalışmada DC motorun hız kontrolünü yapan PID kontrolcünün parametreleri GA ve PSO ile iki ayrı amaç fonksiyon (IAE ve ISE) kullanılarak belirlenmiştir. Karşılaştırma yapmak amacıyla Ziegler-Nichols yöntemi ile de parametre ayarı yapılmış ve sonuçlar incelenmiştir. Her iki optimizasyon algoritması da Ziegler-Nichols yönteminden daha iyi sonuç vermiştir. Ziegler-Nichols yönteminde tasarımcı tarafından yapılacak denemeler ile sonucun iyileştirilmesi mümkündür ancak bu hem çok zaman almakta hemde optimum sonucun elde edileceğine dair bir garanti bulunmamaktadır. Diğer iki yöntemde ise tasarımcının yapacağı tekrarlı deneyler algoritma tarafından

otomatik yapılmakta, dolayısı ile tasarımcıya zaman kazandırmaktadır. Ayrıca optimizasyon algoritmaları ile en mükemmel sonucun bulunacağı garanti edilemese bile en optimum çözümlerden birinin bulunacağını kesindir. Dolayısı ile tasarımcı daha kısa zamanda daha iyi bir kontrolcü karakteristiği elde etmektedir. Sonuçlar genel olarak değerlendirildiğinde PSO ile elde edilen sonuçlar GA'dan daha az aşma miktarına ve daha kısa oturma zamanına sahiptir. Ayrıca bu çalışmada sunulan sistem için IAE amaç fonksiyonu ISE'den daha kısa oturma zamanı ve daha az maksimum aşma elde edilmesini sağlamıştır. İleride PSO, GA ve benzeri optimizasyon algoritmaları ile online parametre ayarlaması üzerine çalışmalar planlanmaktadır.

#### 4. Kaynaklar

- Basilio, J.C., Matos, S.R. 2002.** Design of PI and PID Controllers With Transient Performance Specification. *IEEE Trans. Edu.*, 45(4): 364–370.
- Campo, A.B. 2012.** PID Control Design. In *MATLAB - A Fundamental Tool for Scientific Computing and Engineering Applications*, Intech, 1: 3–18.
- Coello Coello, C.A., Reyes-Sierra, M. 2006.** Multi-Objective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State-of-the-Art. *Int. J. Comput. Int. Sys.*, 2(3): 287–308.
- El-Gammal Adel, A.A., El-Samahy Adel, A. 2009.** A Modified Design of PID Controller for DC Motor Drives Using Particle Swarm Optimization PSO. *International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*, s 419–424, Lisbon.
- Goldberg, D., Holland, J. 1988.** Genetic Algorithms and Machine Learning. *Mach. Learn.*, 3(2-3): 95–99.
- Huang, H.C. 2015.** Intelligent Motion Control for Four-Wheeled Holonomic Mobile Robots Using FPGA-Based Artificial Immune System Algorithm. *Adv. Mech. Eng.*, 5: 589510–589510.
- Huang, H.C. 2013.** Intelligent Motion Control For Omnidirectional Mobile Robots Using Ant Colony Optimization. *Appl. Artificial Intell.*, 27(3): 151–169.
- Kishnani, M., Pareek, S., Gupta, R. 2014.** Optimal tuning of DC Motor Via Simulated Annealing. *IEEE International Conference on Advances in Engineering and Technology Research*, s. 1–5, Unnao.
- Maiti, D., Acharya, A., Chakraborty, M., Konar, A., Janarthanan, R. 2008.** Tuning PID and Fractional PID Controllers using the Integral Time Absolute Error Criterion. *4th IEE International Conference on Information and Automation for Sustainability*, s. 457–462, Sri Lanka.
- Marini, F., Walczak, B. 2015.** Particle Swarm Optimization (PSO) A tutorial. *Chemometric. Intell. Lab. Syst.*, 149:153–165.
- Mohanta, R.K., Sethi, B. 2007.** A Review of Genetic Algorithm application for Image Segmentation. *Int.J.Comput. Tech. App.*, 3(2): 720–723.
- Montiel, O., Sepúlveda, R., Melin, P., Castillo, O., Porta, M. 2007.** Performance of a Simple Tuned Fuzzy Controller and a PID Controller on a DC Motor. *IEEE Symposium on Foundations of Computational Intelligence*, s.531–537, Oahu.
- Panda, R.C., Yu, C., Huang, H. 2004.** PID Tuning Rules for SOPDT Systems: Review and Some New Results. *ISA Trans.*, 43(2): 283–295.
- Tasan, S.O., Tunali, S. 2008.** A Review of The Current Applications of Genetic Algorithms in Assembly Line Balancing. *J. Intell. Manuf.*, 19(1): 49–69.
- Tavakolpour, A., R., Mat Darus, I.Z., Tokhi, O., Mailah, M. 2010.** Genetic Algorithm-Based Identification of Transfer Function Parameters for a Rectangular Flexible Plate System. *Eng. Appl. Artif. Intel.*, 23(8): 1388–1397.
- Weile, D.S., Michielssen, E. 1997.** Genetic Algorithm Optimization Applied to Electromagnetics: A Review. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 45(3): 343–353.
- Ziegler, J.G., Nichols, N.B. 1993.** Optimum Settings for Automatic Controllers. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 115(2B): 759–765.