

Armoni Arama Algoritması ile Daha Düşük Dereceden Sistem Modelleme

Lower Order System Modelling with Harmony Search Algorithm

Bircan KAMIŞLIOĞLU¹, Nurhan KARABOĞA¹

¹Mühendislik Fakültesi
Erciyes Üniversitesi

bkamislioglu@erciyes.edu.tr, nurhan_k@erciyes.edu.tr

Özet

Modellemede, sisteme ait parametrelerin önerilen modelle en az hata ile tahmin edilmesi amaçlanır. Sistem model parametrelerinin belirlenmesinde sezgisel yöntemler hızlı ve etkili sonuçlar sunabilmektedirler. Bu çalışmada literatürde bulunan beşinci dereceden sayısal bir IIR (sonsuz darbe tepkili-Infinite Impulse Response) süzgeç; üçüncü ve dördüncü dereceden daha düşük IIR süzgeçlerle modellenmiştir. Yüksek dereceden bir sistemi daha düşük derecelerden süzgeçlerle modellemek için sezgisel yöntemler içerisinde değerlendirilen ve son zamanlarda oldukça popüler olan Armoni Arama (AA-Harmony Search-HS) Algoritması kullanılmıştır.

Abstract

In modeling, the parameters of the system is intended to estimate the proposed model with minimum error. Heuristic methods can provide fast and effective results to determine the model parameters. In this study a fifth-order digital IIR (Infinite Impulse Response) filter has been modeled with lower IIR filters which is third and fourth order. Harmony Search (Harmony Search HS) algorithm which is one of the quite popular heuristic methods has been used to model a high order system in the lower order filters.

1. Giriş

Sistem modelleme sistemin sahip olduğu giriş-çıkış verileri yardımıyla matematiksel tanımının elde edilmesidir [1]. Modellemede en önemli amaç oluşturulan matematik tanımının sistem üzerindeki yapılacak diğer çalışmalarda da güvenle kullanılabilmesidir. Modelleme işlemini gerçekleştirebilmek için algoritmalara ihtiyaç duyulmuştur.

Sezgisel algoritmalar, herhangi bir amacı gerçekleştirmek veya hedefe varmak için doğal fenomenlerden esinlenen algoritmalar. Büyük boyutlu optimizasyon problemlerinde optimuma yakın çözümler verebilen sezgisel algoritmalar çözüme yakınsama özelliğine sahip olmalarına rağmen kesin çözümü garanti edememekte bu kesin çözümün yakınlarında bir çözüm bulabilmektedirler. Genel amaçlı sezgisel optimizasyon algoritmaları biyoloji, fizik, sürü, sosyal, müzik ve kimya tabanlı olmak üzere altı farklı grupta değerlendirilmektedir [2].

Müzik tabanlı bir algoritma olan Armoni Arama (AA-Harmony Search-HS) Algoritması, 2001 yılında Geem tarafından önerilmiş, müzisyenlerin çaldıkları notaları simule eden sezgisel bir algoritmadır [3]. Sezgisel yöntemlerle farklı özellikteki sistemlerin, daha düşük dereceden sistemlerle modellenmesi ile ilgili çalışmalar literatürde oldukça fazladır. Nagar ve Singh yaptıkları çalışmada parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO- Particle Swarm Optimization) algoritması kullanarak yüksek mertebeli doğrusal çok değişkenli sistemleri düşük dereceli model yardımıyla ifade etmiştir [4]. Gytman ve arkadaşları yüksek mertebeli sistemleri ikinci dereceden model kullanarak PSO ile modellemişlerdir [5]. Mukherjee ve arkadaşları yaptıkları çalışmalarda, yüksek mertebeli sistemlerin modellenmesinde üçüncü dereceden bir model kullanılmasının sağlayacağı yararları incelemiş ve zamanla değişmeyen doğrusal sistemleri indirgenmiş model yardımıyla modellemişlerdir [6,7]. AA algoritması, su dağıtım şebekelerinin optimum tasarımı, taşkın modellemesi, çevresel ekonomik güç dağıtım problemlerinin çözümü, kafes sistemlerin optimum tasarımı, enerji talebi modellemesi ve su dağıtım şebekelerinin optimizasyonunu gibi çeşitli mühendislik problemlerinin çözümüne uygulanmıştır [8-14]. Yüksek dereceli sistemlerin, daha fazla hesaplama karmaşası gerektirmesi ve gerçekleştirilmesinde karşılaşılan zorluklar sebebiyle düşük dereceden sistemlere göre tasarlanması zordur. Uygulama aşamasında yüksek dereceden sistemler, karmaşık bir yapı gerektirmesinin yanı sıra maliyetli olması sebebiyle de tercih edilmemektedirler [15].

Bu çalışmada, son zamanlarda birçok alanda kullanılan Armoni Arama Algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma ile beşinci dereceden bir IIR sistemin daha düşük dereceden IIR süzgeçlerle modellenmesi uygulaması gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın ikinci bölümünde IIR süzgeç, üçüncü bölümde Armoni Arama algoritması dördüncü bölümünde sistem modelleme hakkında bilgi verildikten sonra beşinci bölümünde gerçekleştirilen uygulama örneklerle anlatılmıştır.

2. IIR Süzgeç

Sonsuz dürtü tepkisine sahip süzgeçler ile sonlu dürtü tepkisine sahip süzgeçler arasındaki en temel fark, geri

besleme katıdır. IIR süzgeçler geri beslemeli yapıda oldukları için dürtü tepkileri sonsuz uzunluktadır. IIR süzgeç için sabit katsayılı doğrusal fark eşitliği Eşitlik 1 ile verilmektedir.

$$y(n) = a_0x(n) + \dots + a_mx(n-M) - b_1y(n-1) - \dots - b_Ny(n-N) \quad (1)$$

Eşitlik 1'de a ve b süzgeç katsayılarını; $x(n)$, $y(n)$ sırasıyla giriş ve çıkış işaretlerini, N ve M süzgecin derecesini tanımlamaktadır. Sabit katsayılı doğrusal fark eşitliğinin z dönüşümü alındığında, $Y(z)$ 'nin $X(z)$ 'ye oranı süzgecin transfer fonksiyonunu vermektedir. Doğrudan (direct) yapıda gerçekleştirilmiş IIR süzgecin transfer fonksiyonu, Eşitlik 1'de $a_0 = 1$ alındığında Eşitlik 2 ile tanımlanmaktadır.

$$H(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_Mz^{-M}}{1 + a_1z^{-1} + \dots + a_Nz^{-N}} \quad (2)$$

Transfer fonksiyonunda pay polinomunun kökleri süzgecin sıfırları, payda polinomunun kökleri ise süzgecin kutupları olarak adlandırılır. Bir IIR süzgecin kararlı olabilmesi için tüm kutuplarının karmaşık düzlemde birim daire içerisinde olması gerekir.

3. Armoni Arama Algoritması

2001 yılında Geem tarafından önerilen Armoni Arama algoritması, müzisyenlerin çaldıkları notaları simule eden sezgisel bir algoritmadır [3]. Bir orkestradaki müzisyenlerin çaldıkları notalar ile armonik açıdan en iyi melodiye ulaşılması prensibine dayanmaktadır. Karar değişkenleri için özel başlangıç çözümü gerektirmemesi, birden fazla çözümle optimizasyon işlemini gerçekleştirme sebebiyle birçok farklı yönde küresel optimumu arayarak bölgesel optimum çözümlerden kurtulması, optimizasyon işlemlerinde hem sürekli hem de ayrık değişkenler için kullanılması algoritmanın avantajları olarak ortaya çıkmaktadır. Optimizasyon işleminde en iyi çözüm, amaç fonksiyonu küresel çözüme yaklaştıkça elde edilir [13]. Armoni Arama Algoritmasının işlem adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1. Problemin kurulması ve çözüm parametrelerin oluşturulması:

İlk adımda, problem Eşitlik 3'de verildiği gibi bir optimizasyon problemi olarak tanımlanmaktadır.

$$z = \min \{ f(x) \} \quad x_i \in X_i = 1, 2, 3, \dots, N \quad (3)$$

Burada $f(x)$ minimize edilecek amaç fonksiyonunu, x_i karar değişkenlerini, X_i her karar değişkeni için kullanılan çözüm uzayını, N ise toplam karar değişkeni sayısını göstermektedir. Armoni Algoritması tekniğine ait çözüm parametreleri; Armoni belleği kapasitesi (HMS, Harmony Memory Size), Armoni belleğini dikkate alma oranı (HMCR, Harmony Memory Consideration Rate) ve ton ayarlama oranıdır (PAR, Pitch Adjustment Rate).

Adım 2. Armoni hafızasının oluşturulması

$$\begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_N^1 \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_N^2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_N^{HMS} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(x^1) \\ f(x^2) \\ \vdots \\ f(x^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

İkinci adımda, tanımlanan çözüm uzayı içerisinde rastgele üretilmiş karar değişkenleri ile bir armoni belleği oluşturulur (Eşitlik 4'ün sol tarafı). Algoritmada her bir çözüme karşılık gelen amaç fonksiyonu değerleri Eşitlik 4'e göre hesaplanır:

Adım 3. Yeni armoni geliştirilmesi

HMCR, bir karar değişkeninin değerinin mevcut armoni belleğinden seçilme olasılığını gösterir. (1-HMCR), oluşturulan yeni karar değişkeninin mevcut çözüm uzayı içerisinde rastgele olarak seçilmesini temsil etmektedir. Seçim işleminin nasıl yapılacağı Eşitlik 5'de verilmiştir.

$$x_i' = \begin{cases} x_i \in \{x_i^1, x_i^2, x_i^3, \dots, x_i^{HMS}\} & \text{HMCR olasılığı durumu} \\ x_i \in X_i & \text{Diğer durum} \end{cases} \quad (5)$$

Bu aşamadan sonra, ton ayarlama işleminin gerekli olup olmadığının belirlenmesi için her karar değişkeninin değerlendirilmesi gerçekleştirilmektedir. Bu işlem ise ton ayarlama oranı olan PAR parametresi ile Eşitlik 6 göz önüne alınarak belirlenmektedir. Yeni armoni vektörü $x' = (x_1', x_2', x_3', \dots, x_N')$, armoni belleğinde bulunan ve tamamen rastgele seçilen tonlara göre üretilmektedir. Armoni belleğinde bulunan tonlara göre yeni armoni vektörüne ait ilk karar değişkeni x_1' , mevcut armoni belleği $(x_1^1, x_1^2, x_1^3, \dots, x_1^{HMS})$ içerisindeki bir değerden rastgele olarak seçilmektedir. Diğer karar değişkenlerinin $(x_2', x_3', \dots, x_N')$ seçilmesi de aynı şekilde yapılmaktadır. Değişkenlerin armoni belleğinden seçilip seçilmeyeceğinin belirlenmesi, 0 ile 1 arasında değer alan HMCR oranına göre yapılmaktadır.

$$x_i' = \begin{cases} x_i \pm Rnd(0;1) * bw & \text{PAR olasılığı durumu} \\ x_i & \text{Diğer durum} \end{cases} \quad (6)$$

Eşitlik 6'da, bw rastgele seçilmiş bant genişliğini; $Rnd(0;1)$, 0 ile 1 arasında üretilmiş rastgele sayıyı temsil etmektedir. Eşitlikten anlaşılacağı gibi PAR olasılığının gerçekleşmesi durumunda x_i' karar değişkeni $x_i \mp Rnd(0;1) * bw$ ile değiştirilmekte; (1-PAR) olması durumunda ise hiçbir şey yapılmamaktadır.

Adım 4. Armoni hafızasının güncellenmesi

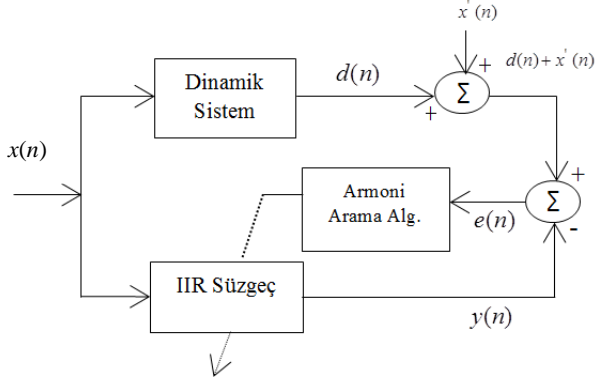
Bu adımda yeni oluşturulan armoni $x' = (x_1', x_2', x_3', \dots, x_N')$ ile bellekteki en kötü armoni arasında amaç fonksiyonlarının değerleri bakımından karşılaştırma işlemi yapılmaktadır. Yeni oluşturulan armoni vektörü, en kötü armoniden daha iyi ise en kötü armoni vektörü bellekten çıkarılır ve yeni armoni vektörü onun yerine atanır.

Adım 5. Bitirme kriteri kontrolü

Bu adımda verilen durma koşulu kontrol edilir. Koşulun sağlanmaması durumunda, Adım 3 ile 5 arasındaki işlemler istenen koşul sağlanıncaya kadar tekrar edilir.

4. Sistem Modelleme

Sistem modellemede, ya modellenecek olan dinamik sistem ile bu sistemi modelleyecek olan süzgecin aynı dereceden olması ya da yüksek dereceli dinamik bir sistemin daha düşük dereceden bir süzgeç ile modellenmesi gerçekleştirilir. Şekil 1'de sistem modellemenin blok diyagramı gösterilmektedir.



Şekil 1: Sistem modelleme blok diyagramı

Şekil 1'de verilen modele göre $x(n)$ sistem girişini, $d(n)$ uygulanan girişe sistemin verdiği cevabı, $x'(n)$ gürültü sinyalini temsil etmektedir. $y(n)$ süzgeç çıkışı, $e(n)$ istenen sinyalle süzgeç çıkışı arasındaki farktır. Bu fark Armoni Arama algoritması ile sürekli olarak minimize edilmektedir.

5. Armoni Arama ile Sistem Modelleme Uygulaması

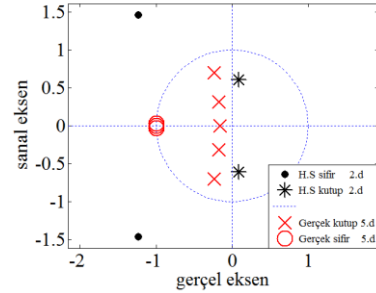
Armoni Arama algoritması ile sistem modelleme uygulaması üç farklı örnek üzerinde gösterilmiştir. Literatürden seçilen 5. dereceden bir sistem Örnek 1'de 2. dereceden, Örnek 2'de 3. dereceden, Örnek 3'de ise 4. dereceden sayısal IIR süzgeçle modellenmiştir. Her örnek için algoritma 25 kere koşturulmuş ve elde edilen en iyi değerlere ait grafikler çizdirilmiştir. Algoritmanın HMCR, HMS, PAR değerleri ortalama karesel hatayı minimum yapacak şekilde literatürde verilen parametre değerleri test edilerek belirlenmiştir [13]. Parametre değerleri için HMCR=0.95, HMS=50, PAR=0.006 ve maksimum iterasyon sayısı 1000 olarak alınmıştır. Simülasyonlar, Intel Core 2Duo CPU E7400 2.80 GHz, 1GB RAM özelliklerine sahip bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

Örnek 1: Bu çalışmada ilk olarak Eşitlik 7 ile verilen beşinci dereceden sistem, Eşitlik 8 ile verilen ikinci dereceden IIR bir süzgeçle tasarlanmıştır.

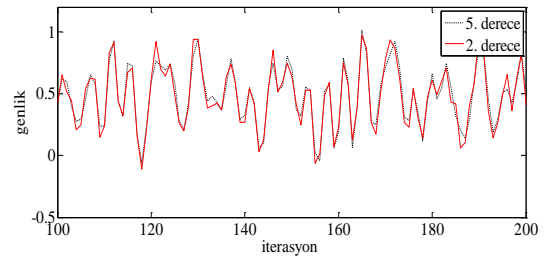
$$H_D(z) = \frac{0.1084 + 0.5419z^{-1} + 1.0837z^{-2} + 1.0837z^{-3} + 0.5419z^{-4} + 0.1084z^{-5}}{1 + 0.9853z^{-1} + 0.9738z^{-2} + 0.3864z^{-3} + 0.112z^{-4} + 0.0113z^{-5}} \quad (7)$$

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2}} \quad (8)$$

Şekil 2'de AA algoritması ile tasarlanan sistemin sıfır kutup gösterimi verilmektedir. Şekilde ikinci derece sistemin tüm kutuplarının birim çember içinde olduğu yani tasarlanan sistemin kararlı olduğu görülmektedir.



Şekil 2: AA algoritması ile tasarlanan ikinci dereceden sistemin sıfır kutup gösterimi



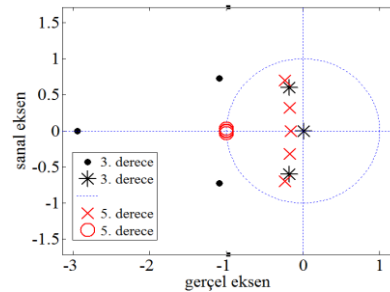
Şekil 3: Beşinci dereceden sistemin ikinci dereceden sistemle modellenmesi durumunda elde edilen sonuçlar

Şekil 3'de 1000 iterasyon için koşturulan algoritmanın en iyi elde ettiği sonuca ilişkin 100-200 iterasyon arasındaki kısmı verilmiştir. Şekil incelendiğinde ikinci dereceden tasarlanan sistemin, beşinci dereceden sistemin cevabına oldukça yaklaştığı görülmektedir.

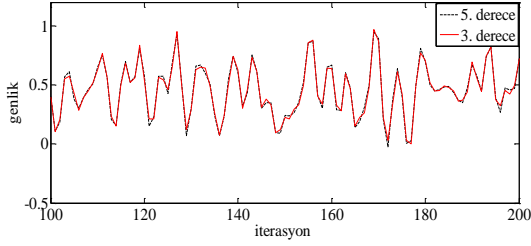
Örnek 2: İkinci olarak aynı sistem, Eşitlik 9'daki gibi üçüncü dereceden IIR bir süzgeçle tasarlanmıştır.

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3}} \quad (9)$$

Şekil 4'de AA algoritması ile tasarlanan sistemin sıfır kutup gösterimi verilmektedir. Şekilden, AA algoritması ile kararlı bir sistem elde edildiği görülmektedir.



Şekil 4: AA algoritması ile tasarlanan üçüncü dereceden sistemin sıfır kutup gösterimi



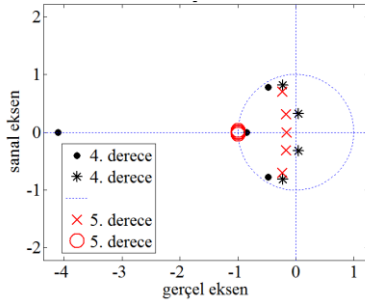
Şekil 5: Beşinci dereceden sistemin üçüncü dereceden sistemle modellenmesi durumunda elde edilen sonuçlar

Şekil 5’de 1000 iterasyon sonucu elde edilen grafiğin 100-200 iterasyon arasındaki kısmı verilmiştir. Şekil 5 incelendiğinde üçüncü dereceden tasarlanan sistemin, beşinci dereceden sistemin cevabına oldukça yaklaştığı görülmektedir.

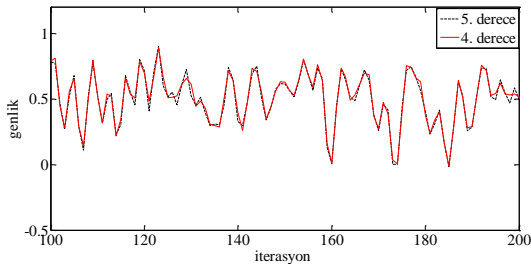
Örnek 3: Son olarak beşinci dereceden bir sistem Eşitlik 10 ile verilen dördüncü dereceden IIR süzgeçle tasarlanmıştır.

$$H(z) = \frac{b_0 + b_1z^{-1} + b_2z^{-2} + b_3z^{-3} + b_4z^{-4}}{1 + a_1z^{-1} + a_2z^{-2} + a_3z^{-3} + a_4z^{-4}} \quad (10)$$

Şekil 6’da Eşitlik 7 ile verilen beşinci dereceden sistemin, dördüncü dereceden bir süzgeçle tasarlandığı durumda elde edilen sıfır kutup gösterimi verilmektedir. Şekilden anlaşılacağı gibi tasarlanan sistem kararlıdır.



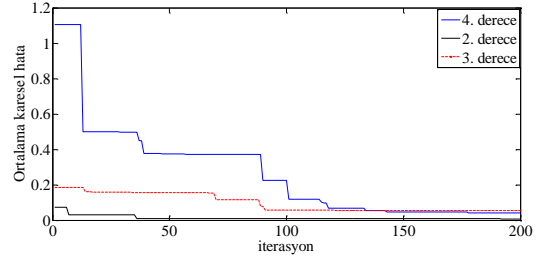
Şekil 6: AA algoritması ile tasarlanan dördüncü dereceden sistemin sıfır kutup gösterimi



Şekil 7: Beşinci dereceden sistemin dördüncü dereceden sistemle modellenmesi durumunda elde edilen sonuçlar

Şekil 7’den algoritmanın performansının istenen beşinci dereceden sistem performansına çok yakın olduğu görülmektedir. Şekil 8’de algoritmanın mse (mean square error-ortalama karesel hata) grafiği 200 iterasyon için verilmiştir. Şekil 8 incelendiğinde 4. dereceden sistemin 3. dereceden sisteme göre daha hızlı yakınsadığı görülmektedir.

Ayrıca 2. dereceden sistemin daha düşük hata değerlerinden başladığı ve çok daha çabuk yakınsadığı şekilden gözlenmektedir.



Şekil 8: Modellenen sistemlere ait ortalama karesel hatanın iterasyona bağlı değişimi

Çizelge 1’de gerçek sisteme ait a ve b katsayı değerleriyle modellenen 2., 3. ve 4. derece süzgeçlerin AA algoritması ile bulunan katsayıları verilmiştir.

Çizelge 1: Gerçek sistemin ve farklı derecelerden modellenen süzgeçlerin katsayıları

Katsayılar	Sistem	2. derece süzgeç	3. derece süzgeç	4. derece süzgeç
b_0	0.1084	0.2887	0.0822	0.1296
b_1	0.5419	0.3241	0.4781	0.4816
b_2	1.0837	0.5439	0.8871	0.7751
b_3	1.0837	-	0.1194	0.4811
b_4	0.5419	-	-	-0.0125
b_5	0.1084	-	-	-
a_0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
a_1	0.9853	-0.2267	0.5858	0.3882
a_2	0.9738	0.4140	0.6201	0.4397
a_3	0.3864	-	0.0919	0.0247
a_4	0.1112	-	-	-0.0057
a_5	0.0113	-	-	-

Çizelge 2: AA algoritmasıyla elde edilen sonuçlar

Örnek	İterasyon	mse	std	zaman (s)
Örnek 1	500	0.0062	0.0780	14.13
	1000	0.0037	0.0600	27.68
Örnek 2	500	0.067	0.0666	13.27
	1000	5.4806e-006	0.0234	26.22
Örnek 3	500	0.0027	0.0514	14.60
	1000	7.0818e-004	0.0257	27.36

Her bir örnek için algoritma 500 ve 1000 iterasyon koşturulmuştur. Elde edilen en iyi değerlere ait mse, std (standart sapma) ve zaman değerleri Çizelge 2’de verilmektedir. Çizelgeden beşinci dereceden sistemin, üçüncü ve dördüncü derecelerden sistemlerle tasarlanması durumunda mse değerinin, ikinci dereceden tasarlanan sisteme göre çok daha düşük olduğu ve iterasyon sayısı arttıkça mse’nin düştüğü görülmektedir.

5. Sonuçlar

Karmaşık bir yapı gerektirmesi ve tasarım aşamasında karşılaşılan zorluklar sebebiyle yüksek dereceli sistemlerin daha düşük dereceden sistemlerle modellenmesi istenir. Bu çalışmada yüksek dereceden sistemlerin daha düşük dereceden sistemlerle modellenmesi için sezgisel bir araştırma algoritması olan AA algoritmasının kullanımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımla beşinci dereceden bir sistem; ikinci, üçüncü ve dördüncü dereceden sistemlerle modellenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, sistemin derecesinin artmasıyla standart sapmanın düştüğü ve algoritmanın daha düşük dereceden sistemlerin hepsini yaklaşık aynı sürede tasarladığı görülmüştür. AA algoritmasının başarımı iterasyon sayısının artmasıyla paralellik göstermiş ve tasarlanan tüm sistemlerin kararlı bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Böylece, optimal çözümlerin bulunmasında küresel araştırma yeteneğine sahip AA algoritmasının, düşük dereceden sistemlerin modellenmesinde etkili bir şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir.

7. Kaynaklar

- [1] Ljung, L., "System Identification: Theory for The User", Prentice Hall, 1987.
- [2] Akyol, S. ve Alataş, B., "Güncel Sürü Zekası Optimizasyon Algoritmaları", Nevşehir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 1, pp. 36-50, 2012.
- [3] Geem, Z.W. ve Kim, J-H, Loganathan, G.V., "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search", Simulation, Vol. 76, No. 2, pp. 60-68, 2001.
- [4] Nagar, S. K., ve Singh S. K., "An algorithmic approach for system decomposition and balanced realized model reduction", Journal of Franklin Inst., Vol. 341, pp. 615-630, 2004.
- [5] Gytman P. O., Mannnerfelt C.F., ve Molander P., "Contributions to the model reduction problem", IEEE Trans. Automat. Control, Vol. AC-27, No. 2, pp. 454-455, 1982.
- [6] Mukherjee S., Satakshi and Mittal R. C., "Model order reduction using response-matching tecnigue", Journal of Franklin Ins., Vol. 342, pp. 503-519, 2005.
- [7] Mukherjee S., Satakshi and Mittal R. C., "Linear time invariant system order reduction using multipoint step responce matching", International Journal of systems Science, Vol. 38, No. 3, pp. 211-217, 2007.
- [8] Kim J. H., Geem Z. W., Kim E. S. "Parameter Estimation of the Nonlinear Muskingum Model using Harmony Search", Journal of the American Water Resources Association 37 (5), s. 1131-1138, 2001.
- [9] Geem Z. W. "Optimal Cost Design of Water Distribution Networks Using Harmony Search", Engineering Optimization 38 (3), s. 259-280, 2006.
- [10] Özyön S., Yaşar C. Ve Temurtaş Hasan, "Harmoni Arama Algoritmasının Çevresel Ekonomik Güç Dağıtım Problemlerine Uygulanması", Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, C. 26, S. 2, ss. 63-74, Aralık 2011.
- [11] Saka M. P. , "Optimum Design of Steel Sway Frames to BS5950 Using Harmony Search Algorithm", J. of Constr. Steel Research 65 (1), s. 36-43, 2009.
- [12] Ceylan H., Ceylan H., Haldenbilen S., Baskan O. "Transport Energy Modeling with Meta-Heuristic Harmony Search Algorithm, an Application to Turkey", Energy Policy 36, s. 2527-2535, 2008.
- [13] Ayvaz, M.T., Karahan, H. ve Gürarlan, G. "Su Dağıtım Şebekelerinin Armoni Araştırması Optimizasyon Tekniği ile Optimum Tasarımı", 5. Kentsel Altyapı Ulusal Sempozyumu, 2007.
- [14] Durmuş B., Gün A. "Parameter Identification using Particle Swarm Optimization" 6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), pp.188-192, 16-18 May 2011.
- [15] S.N Deepa,, G Sugumaran, "A Modified Particle Swarm Optimization for Lower Order Model Formulation of Linear Time Invariant Continuous Systems", Innovative Computing Technologies (ICICT), pp.1-5, 2010.