

Kavramsal Hidrolojik Modellerin Farklı Optimizasyon Algoritmaları İle Kalibrasyonu

Mustafa Erkan TURAN^{1*}, Erkan DOĞAN²

¹Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tel: +90 236 2012325, mustafaerkan.turan@cbu.edu.tr

²Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tel: +90 236 2012301, erkan.dogan@cbu.edu.tr

*İletişimden sorumlu yazar

Geliş / Recieved: 11 Eylül (September) 2015

Kabul / Accepted: 14 Aralık (December) 2015

Özet

Mevcut çalışmada kavramsal hidrolojik modellerin optimizasyon metotları yardımıyla kalibrasyonu ele alınmıştır. Sezgiye dayalı yenilikçi optimizasyon algoritmaları doğada var olan olayların matematiksel olarak taklit edildiği çözüm yöntemleridir. Bu tip yöntemler, optimum çözümü araştırırken rastgele ve olasıksal parametreler kullanırlar. Bu yöntemlerden av arama, yapay arı kolonisi ve ateş böceği algoritmaları literatürde yer alan GR4J, GR2M kavramsal hidrolojik modellerinin kalibrasyonu için kullanılmış, farklı gözlem istasyonlarından alınan veriler değerlendirilerek yöntemlerin optimizasyon problemi üzerindeki etkinlikleri araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler— GR4J, GR2M, Kavramsal Hidrolojik Modeller, Kalibrasyon, Av Arama Algoritması, Ateş Böceği Algoritması, Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Calibration of Conceptual Hydrological Model by Different Optimization Algorithms

Abstract

In this study, calibration of conceptual hydrological models is carried out by means of optimization methods. Meta-Heuristic inonative optimization algorithms are the methods in which the natural events have been imitated mathematically. These type of methods use random and probabilistic parameters to investigate optimal solutions. Hunting search, artificial bee colony and firefly algorithms are used for calibration of GR4J, GR2M conceptual hydrological models and the efficiency of the methods on the optimization problems is investigated by evaluating the data from the different gauging stations.

Keywords—GR4J, GR2M, Conceptual Hidrological Model, Calibration, Hunting Search Algorithm, Firefly Algorithm, Artificial Bee Colony Algorithm

1 Giriş

Suyun kullanılması, sudan korunulması ve suyun korunması amacıyla su kaynaklarının planlanması adı altında çeşitli çalışmalamar yapılmaktadır. Bütün bu çalışmaların önemli unsurlarından birini zamanda ve uzayda suyun miktarının bilinmesi oluşturmaktadır.

Hidrolojik ölçümlerin yetersizliği ve hidrojik sürece etki eden unsurlardaki değişikliklerin etkisine bağlı olarak suyun nerede, ne zaman ve ne miktarda bulunacağı belirlemek tam olarak mümkün olmamaktadır. Su kaynakları projelerinin yapımında kullanılacak tahminlerin yapılabilmesi için var olan sistemin benzetimine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla, farklı kıstaslara göre sınıflandırılan hidrolojik modeller ge-

liştirilmiştir. Kavramsal hidrolojik modeller bunlardan biri olup, havzada yağışın akışa dönüşümünü kavramsal olarak ele alarak bu dönüşüm sürecini yüzeyel akış, sızma, yeraltı akışı, depolama gibi bileşenleri basit matematiksel ifadeler içine dahil etmek suretiyle akım miktarını belirlerler. Bu matematiksel ifadeler önceden ölçülemeyen veya belirlenemeyen parametreler içermektedir. Kavramsal modellerin doğru tahminler yapabilmesi için bu parametere değerlerinin çalışılan havzaya göre belirlenmesi gerekmektedir.

Parametre değerlerinin belirlenmesi kalibrasyonu ile yapılmaktadır. Bu işlem, model sonuçları ile ölçülen değerlerin örtüşürecek parametre değerlerinin belirlenmesini sağlayacak bir optimizasyon problemi olarak ele alınabilir. Elle ve otomatik kalibrasyon olmak üzere iki tip kalibrasyon işlemi bulunmaktadır. Elle kalibrasyon zor, zaman alıcı ve uzmana özgü bir işlem olduğu için otomatik kalibrasyon yöntemi geliştirilmiştir. Otomatik kalibrasyon için optimizasyon yöntemleri kullanılmaktadır.

Literatürde bulunan optimizasyon yöntemleri çalışma şekillerine göre farklı kategorilerde değerlendirilmektedir. Bunlardan biri olan stokastik optimizasyon yöntemleri sürü zekâsı, en iyinin hayatta kalması gibi prensipleri sayısal algoritmalar içinde taklit eder. Bu yöntemler isimlerini, üretilme aşamasında esin kaynağı olan doğal fenomenlerden alır. Bu stokastik arama teknikleri amaç fonksiyonu ve sınırlayıcıların türevlerine ihtiyaç duymadığı gibi, deterministik kurallar yerine olasılığa dayalı arama yollarını kullanırlar[1, 2].

Literatürde bu kavramsal hidrolojik modellerin kalibrasyonunda faydalanılan optimizasyon algoritmaları için performans kıyaslaması yapan çalışmalar bulunmaktadır.

Franchini ve ark. [3] çalışmalarında genetik algoritma ile ardışık ikinci derece programlama, desen araştırma ile ardışık ikinci derece programlama ve Shuffled Complex Evolution (SCE) şeklindeki üç optimizasyon algoritmasının performanslarını kıyaslamışlardır. ADM hidrolojik modeli, İtalyada bulunan Sieve havzası ve İngilterede bulunan Redesdale havzası için kalibre edilmiş bu işlem sonucunda SCE yönteminin diğer yöntemlere göre daha iyi sonuç verdiğini gös-

termişlerdir.

Blasone ve ark. [4] Shuffled Complex Evolution yöntemi ve Gauss-Marquard-Levenberg yöntemini MIKE SHE hidrolojik modelini kalibre etmek için kullanmışlardır.

Arsenault ve ark. [5] on farklı stokastik optimizasyon yöntemini üç hidrolojik kavramsal modelin kalibrasyonu için kullanmıştır. Çalışma sonucunda adaptif benzetilmiş tavlama algoritmasının karşılaştırılan yöntemler içinde en iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu çalışmada, Gediz Havzasında bulunan Kayalıoğlu (#509), Topuzdamarı (#515), Acısu (#523) akım gözlem istasyonu havzaları GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier), günlük ve GR2M (modele du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) aylık kavramsal hidrolojik modelleri ile modellenmiştir. Kavramsal hidrolojik modeller av arama, ateşböceği ve yapay arı kolonisi sezgiye dayalı optimizasyon algoritmaları kullanılarak kalibre edilmiş ve optimizasyon algoritmalarının performansları kıyaslanmıştır.

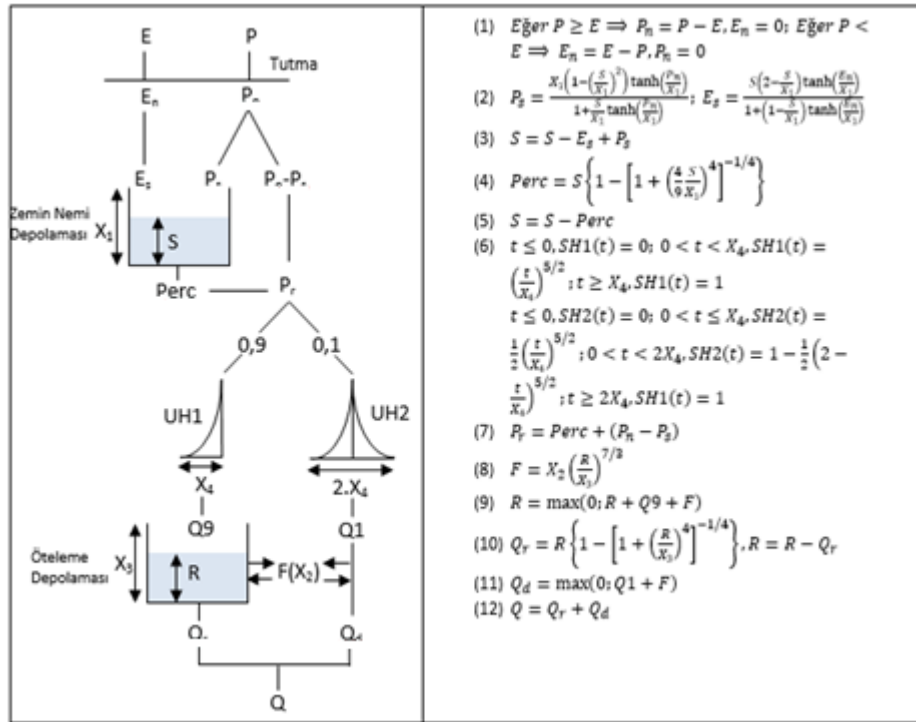
2 Kavramsal Hidrolojik Modeller

2.1 GR4J Günlük Kavramsal Hidrolojik Model

GR4J, Perrin [6] tarafından geliştirilmiş 4 parametrelili toplu günlük bir hidrolojik modeldir.

Model günlük toplam yağış P (mm) ve günlük potansiyel evapotranspirasyon E (mm) değerleri ile günlük toplam akım miktarını (mm) hesaplamaktadır. Modelin sahip olduğu 4 parametre, X1 (mm) zemin nemi depolama kapasitesini, X2 (mm) yeraltısuyu değişimini, X3 (mm) öteleme elemanının depolama kapasitesini, X4 (gün) ise öteleme elemanı birim hidrografının taban genişliğini ifade eden model parametreleridir. Modelin şematik gösterimi ve işlem adımları Şekil 1' de verilmiştir.

Burada; Pn net yağışı, En net evapotranspirasyon kapasitesini, S zemin nemi depolaması seviyesini, Percperkolasyonu, Pr öteleme elemanına giden su miktarını, F yeraltı suyundaki değişimi, R öteleme depolaması seviyesini ve Q ise toplam akımı göstermektedir.



Şekil 1. GR4 Modeli [6]

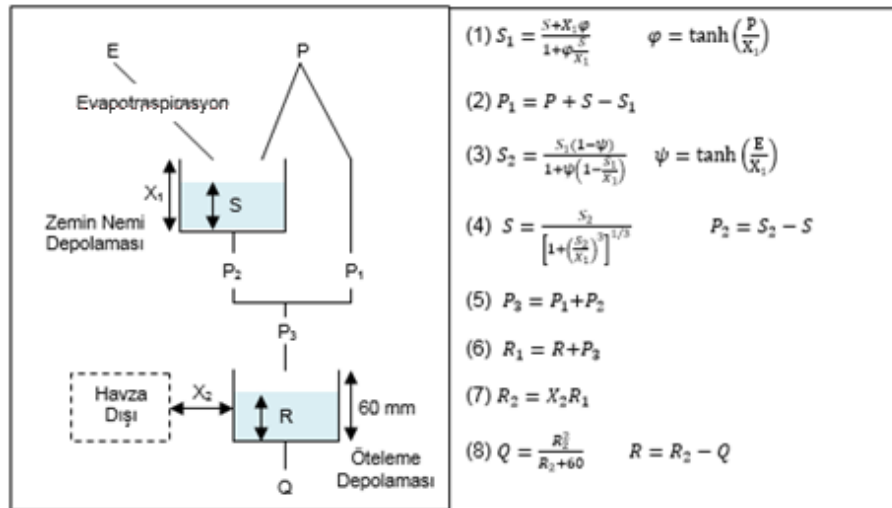
2.2 GR2M Aylık Kavramsal Hidrolojik Model

GR2M, iki parametrelili toplu aylık bir hidrolojik modeldir. Bu çalışmada, Mouelhi [7] tarafından geliştirilen sürümü kullanılmıştır.

Model aylık toplam yağış P (mm) ve aylık potansiyel evapotranspirasyon E (mm) değerleri ile aylık toplam akım miktarını (mm) hesaplamaktadır. Modelin sahip olduğu iki parametre, zemin nemi depolama kapasite-

si X_1 (mm) ve yeraltı suyu değişim katsayısı X_2 dir. Modelin şematik gösterimi ve işlem adımları Şekil 2’de verilmiştir.

Burada; S_1 değerleri zemin nemi seviyesini, P_1 yüzeyel akış miktarını, P_2 perkolasyon miktarını, P_3 toplam efektif yağışı, R_1 öteleme deposu seviyesini, Q ise akım değerini göstermektedir.



Şekil 2. GR2M Modeli [7]

3 Optimizasyon Problemi

Mevcut çalışmada yukarıda detaylı bir şekilde açıklanmış hidrolojik modellerin çeşitli optimizasyon teknikleri kullanılarak kalibrasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu olarak Nash ve Sutcliffe [8] tarafından hidrolojik modeller için önerilen verimlilik katsayısı E kullanılmıştır. Verimlilik katsayısının yanında modellerin performansını değerlendirmek amacıyla determinasyon katsayısı R^2 ve ortalama karesel hatanın karekökü OKHK değerleri de göz önüne alınmıştır. En küçük OKHK ile 1'e yakın R^2 ve E değerlerine sahip modeller en uygun model olarak belirlenmiştir. Bu katsayıları hesaplamak için gerekli denklemler Denklem 1,2 ve 3' te verilmiştir.

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{t=1}^N (Q_g(t) - \bar{Q}_g)(Q_h(t) - \bar{Q}_h)}{\sqrt{\sum_{t=1}^N (Q_g(t) - \bar{Q}_g)^2 \sum_{t=1}^N (Q_h(t) - \bar{Q}_h)^2}} \right]^2 \quad (1)$$

$$OKHK = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^N (Q_g(t) - Q_h(t))^2}{N}} \quad (2)$$

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^N (Q_g(t) - Q_h(t))^2}{\sum_{t=1}^N (Q_g(t) - \bar{Q}_g)^2} \quad (3)$$

Burada, Q_g gözlenen akım değerlerini, Q_h tahmin edilen akım değerlerini, \bar{Q}_g gözlenen akım değerlerinin ortalamasını, \bar{Q}_h tahmin edilen akım değerlerinin ortalamasını ve N veri sayısını göstermektedir.

4 Optimizasyon Algoritmaları

4.1 Av Arama Algoritması

Av arama optimizasyon yöntemi aslan, kurt ve yunus gibi hayvanların gurup olarak avlanmalarından esinlenilerek geliştirilmiştir. Avcı gurubu içinde yer alan avcılar bazı stratejileri kullanarak avlarını çevreler ve yakalarlar. Örneğin kurtlar kendilerinden çok daha büyük ve hızlı hayvanları bu tarz bir avlanma yöntemi ile kolaylıkla yakalayabilirler. İlk olarak bir av seçilir ve daha sonra avlanma grubu ona doğru adım adım yaklaşarak avlanmayı gerçekleştirir. Avcılar kokularının av tarafından fark edilmesi riski nedeniyle rüzgârda durmaktan sakınırlar. Bu avcılardan her biri optimizasyon problemi için aday bir çözüm oluşturur.

Hayvanların av bulup yakalamaları için bir araya gelmeleri işlemine benzer olarak optimum parametre kümesini bulma işlemi optimum çözümü bulmayı hedefler. Tekrarlanan her denemede avcıların pozisyonu güncellenerek amaç fonksiyonunun iyileştirilmesi hedeflenir. Yöntemin işleyişi şu şekilde özetlenebilir: Bir avcı gurubu, gurup boyutunu temsil eden ve önceden belirlenmiş sayıda avcıdan oluşur. Bu amaçla öncelikle grup içindeki her bir avcı için bütün ilk pozisyonlar rastgele başlatma prensibiyle oluşturulur. Bu işlem için değeri 0 ile 1 arasında değişen sayılar içinden rastgele sayı seçme uygulamasından faydalanılır. Daha sonra parametre kümesini temsil eden konum vektörleri kullanılarak bütün avcılar için uyumluluk analizi yapılır ve amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır. Üçüncü adımda lider avcı olarak adlandırılan en iyi avcıya doğru hareket etme prensibine bağlı kalınarak yeni avcıların pozisyonlarının üretilmesi işlemi yapılır. Dördüncü adımda avın daha etkin yapılabilmesi ve daha iyi sonuçların elde edilebilmesi amacıyla avcılar arasında konum güncellemesi ve dayanışması yapılır. Beşinci adım avcı gurubunun yeniden organize edilmesi işlemidir. Bu işlemin yapılmasının amacı avcılarının yerel optimuma yakalanmalarını önlemektir. Bu adımla birlikte avcılara global optimuma ulaşmaları yönünde yeni bir şans daha verilmiş olur. Yöntem Oftadeh ve ark. [9] tarafından geliştirilmiş olup işlem adımları aşağıda verilmiştir.

1. Adım: Bu adımda yöntemin parametreleri belirlenir. Toplam altı adet parametre vardır. Bunlar; av gurubu boyutu (HGS), lidere doğru maksimum hareket (MML), avcı gurubu değerlendirme oranı (HGCR), rastgele hareket yarıçapı değerleri (R_{max} , R_{min}), yakınsama oranı parametreleri α ve β ve her bir devirdeki toplam iterasyon sayısı IE dir.

2. Adım: Guruptaki avcılar (I_i), HGSsayısına bağlı olacak şekilde her bir değişken için değer atamak suretiyle rastgele üretilirler.

$$I_i = INT[I_{min} + r(I_{max} - I_{min})] \quad i = 1, \dots, n \quad (4)$$

Burada, INT 0 ile 1 arasında rastgele bir sayı, I_{min} ve I_{max} ilgili değişkenin minimum ve maksimum değerlerini göstermektedir.

3. Adım: Bu adımda avcılarının yeni pozisyonları (I_i') MML dikkate alınarak üretilir.

$$I_i' = I_i + r(MML)(I_i^l - I_i) \quad i = 1, \dots, n \quad (5)$$

Burada I_i^l lider yani durumu en iyi olan avcının konumudur.

4. Adım: Bu adımda avcılarının birbirleriyle ilişkileri modellenir. Lidere doğru hareketin ardından avcılar daha etkin avlanmak için pozisyonlarını değiştirirler.

$$I_i^{j'} \leftarrow \begin{cases} I_i^{j'} \in \{I_i^1, I_i^2, \dots, I_i^{HGS}\} & \text{HGCR olasılığı ile} \\ INT(I_i^{j'} = I_i^j \pm Ra) & (1 - \text{HGCR}) \text{ olasılığı ile} \end{cases} \quad (6)$$

$$Ra(it) = Ra_{min}(I_{max} - I_{min}) \exp\left(\frac{\ln\left(\frac{Ra_{max}}{Ra_{min}}\right)it}{itm}\right) \quad (7)$$

5. Adım: İterasyon prosesinin her adımında avcılarının yerel optimuma yakalanma ihtimalleri vardır. Bunu engellemek ve global optimuma ulaşma şansını artırmak amacıyla avcılar pozisyonlarını güncellerler.

$$I_i^l = I_i^l \pm r(I_{max} - I_{min}) \alpha \exp(-\beta \times EN) \quad (8)$$

6. Adım: Bu adım iterasyon döngüsünün tamamlanma adımıdır. Süreç maksimum iterasyon sayısı kadar devam ettirildikten sonra sonlandırılır.

4.2 Ateşböceği Algoritması

Bu yöntem ateş böceklerinin sosyal davranışları gözlemlenerek ve taklit edilerek geliştirilmiştir. Ateş böcekleri sahip oldukları bazı hücrelerde yer alan lüsiferin isimli maddenin lüsiferaz enzimiyle reaksiyona girmesi suretiyle eşlerini veya avlarını çekmek için kullandıkları ışığı yanıp söndürürler. Işığın parlaklığı sürüdeki ateş böcekleri için çekici olmaktadır. Çekicilik ışığın parlaklık derecesi ile artmaktadır.

Sürüdeki ateş böceklerin cinsiyetleri aynı kabul edilmektedir. Böylece erkek ve dişi ayrımı olmadığı için bütün ateş böcekleri diğer ateş böcekleri tarafından cezbedilebilir. Bir ateş böceği ne kadar parlak olursa diğer ateş böcekleri için o kadar çekici hale gelmektedir. Ateş böceklerinin aralarındaki mesafe, parlaklığı

azalttığı için cazibeyi de azaltmaktadır. Ortamda bir ateş böceğinden daha parlak ateş böceği varsa, bu ateş böceği parlak olana doğru hareket edecektir. Eğer ortamda daha parlak ateş böceği yoksa rastgele yönlere hareket ederler. Yöntem Yang [10] tarafından geliştirilmiş olup işlem adımları aşağıda verilmiştir.

1. Adım: Bir ateş böceği topluluğu küme boyutunu temsil eden ve önceden belirlenmiş miktarda ateş böceğinden oluşur. Bu amaçla topluluk içindeki ateş böceklerinin başlangıç konumları tanımlanır. Ateş böceklerinin başlangıç konumları x_i^0 ile gösterilmektedir. Her bir ateş böceğinin başlangıç konumu denklem 7'de tanımlanmıştır.

$$x_i^0 = X_{min} + r(X_{max} - X_{min}) \quad (9)$$

Buradaki r değerinin tespiti için 0 ile 1 arasında değişen sayılar içinden rastgele sayı seçme uygulamasından faydalanılır X_{min} ve X_{max} sırasıyla tasarım değişkeni seti içindeki değerlerin minimum ve maksimum olanlarını ifade eder.

2. Adım: Daha sonra tasarım değişkenlerini temsil eden konum vektörleri x_i^t kullanılarak bütün ateş böcekleri için uyumluluk analizi yapılır ve amaç fonksiyonu değerleri $f(x_i^t)$ hesaplanır.

3. Adım: Ateş böceklerinin en iyi değerinin ve topluluk içindeki en iyi ateş böceği değerinin güncellenmesi işlemi yapılır. Bir ateş böceğinin o ana kadar ki en iyi konumu a_i^t (minimum amaç fonksiyonu $f(x_i^t)$ değerine sahip olan en iyi boyutlandırma) ateş böceğinin en iyi değeri olarak kabul edilir ve her bir ateş böceğinin en iyi değeri olarak kaydedilir. Bu işlemin başlangıcından itibaren herhangi bir ateş böceği tarafından elde edilmiş olan en iyi konum ise en iyi global konum a_g^t olarak kaydedilir. Her iterasyon adımında her bir ateş böceği ve topluluğu için en iyi pozisyon değerleri güncellenir.

4. Adım: Her bir ateş böceğinin mevcut konumu, en iyi konumu ve global en iyi konumu dikkate alınarak güncellenir.

5. Adım: Bir önceki adımda güncellenen konum vektörü kullanılarak her bir ateş böceğine ait değişken değeri yenilenir.

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \beta_0 e^{-\gamma r^2} (x_j^t - x_i^t) + \alpha_t e_i^t \quad (10)$$

Buradaki x_i^{t+1} ifadesi i . nci ateş böceğinin $(t + 1)$ nci adımdaki konumunu belirtmektedir.

6 Adım: Algoritmanın son adımı iterasyon döngüsünün tamamlandırılmasıdır. Optimizasyon döngüsü, işleme başlamadan önce belirlenmiş olan maksimum iterasyon sayısı kadar tekrar edilerek durdurulur. Bu adımlar sonunda elde edilen amaç fonksiyonu değeri en iyi parametre kümesini verir.

4.3 Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Karaboğa [11] tarafından geliştirilmiş olan yapay arı kolonisi algoritması arı kolonilerinin davranışlarını temel alarak geliştirilmiş bir optimizasyon algoritmasıdır [12, 13]. Doğal hayatta yer alan bir arı kolonisi içinde mevcut bir düzen ve görev paylaşımı vardır. Arılar koloni içinde üç grup olarak değerlendirilirler [14]. Bunlar;

- Gözcü Arılar: Kovanda bekleyen gözcü arıların görevi diğer arıların besin kaynakları ile ilgili bilgileri dansla paylaştıktan sonra nektarın fazla olduğu besin kaynağına yönelmektir.
- Kâşif Arılar: Kâşif arılar arama sürecinin başlangıcında rastgele dağılarak yiyecek aramaya başlarlar.
- İşçi Arılar: Bir arı kolonisi içinde yer alan İşçi arıların görevi komşuluk prensibine dayanmak suretiyle daha fazla nektarın olduğu besin kaynaklarını araştırmaktır. Her bir besin kaynağında bir işçinin bulunduğu ve dolayısıyla işçi arı sayısını besin kaynağına sayısına eşit olduğu kabul edilir [15].

Arama yapılacak her bir yiyecek kaynağı algoritma tarafından optimize edilmeye çalışılan problem için olası bir çözüm olarak kabul edilir. Bir kaynağın ihtiva ettiği nektar miktarı, o kaynakla eşleştirilmiş olan çözümün kalite değerini belirtmektedir [15]. Algoritmanın işleyişi beş temel adımdan ibarettir [14–15].

1. Adım: Besin kaynağı bölgelerinin ilk değerlerinin belirlenmesi: Aşağıdaki denklem kullanılarak bal alınabilecek kaynakların popülasyon vektörü belirlenir.

$$I_{pi} = INT[I_{min} + r(I_{max} - I_{min})] \quad i = 1, \dots, n \quad p = 1, \dots, np \quad (11)$$

Bu denklemde r , 0 ile 1 arasında bir rasgele sayı I_{min} 1

ve I_{max} ise set içinde yer alan değer sayısını ifade eder.

2. Adım: İşçi arıların belirlenen bal kaynaklarına yönlendirilmesi: Yeni bal kaynakları işçi arılar tarafından denetlenir.

$$v_{pi} = I_{pi} + \varphi_{pi}(I_{pi} - I_{ki}) \quad (12)$$

Yukarıdaki denklemde k rasgele seçilmiş bal kaynağı ve φ_{pi} ise $[-1,1]$ aralığında yer alan bir rasgele sayıdır. Yeni besin kaynaklarının üretilmesini takiben bu kaynaklara ait değer ölçümü gerçekleştirilir. Eğer bu değer I_{pi} den daha iyi ise yeni üretilen bu besin kaynağı eskisinin yerini alır. Besin kaynağının değer ölçümü aşağıdaki denklem ile gerçekleştirilir.

$$fitness(I_p) = \begin{cases} \frac{1}{1+f(I_p)} & \text{eğer } f(I_p) \geq 0 \\ 1 + abs(f(I_p)) & \text{eğer } f(I_p) < 0 \end{cases} \quad (13)$$

3. Adım: Gözcü arılar ve kâşif arılar işsiz arılar olarak gruplandırılır. İşçi arılar besin kaynağı bilgilerini gözcü arılarla paylaşırlar. Gözcü arılar ise besin kaynaklarını her besinin değer ölçüsü dikkate alınarak belirlenen olasılığa bağlı olarak seçerler.

$$P_p = \frac{fitness(I_p)}{\sum_{p=1}^{np} fitness(I_p)} \quad (14)$$

Olasılığa bağlı olarak gözcü arılar için besin kaynağı I_{pi} nin seçilmesinin ardından 9 nolu denklem yardımıyla komşuluk kaynağı belirlenir ve 10 nolu denklemle bu kaynağın değer ölçümü yapılır.

4. Adım: Besin kaynaklarını rastgele seçen işsiz arılar kâşif arılar olarak adlandırılır. Bir işçi arı tarafından üretilen bir çözümün belirli bir sayıdaki tekrarın ardından geliştirilememesi durumunda bu arı kâşif arı halini alır ve ürettiği çözüm saf dışı bırakılır. Bu kâşif yeni bir çözüm bulmak için aramalara başlar.

5. Adım: 2 ve 4 nolu adımlar sonlandırma kriterine ulaşıncaya kadar devam ettirilir.

5 Uygulama

Optimizasyon problemi içinde belirtilmiş olan hidrolojik modeller üç farklı optimizasyon yöntemi kullanılarak kalibre edilmiştir. Bu amaçla DSİ kayıtları problem verileri olarak kabul edilmiş ve optimizasyon sürecine dahil edilmiştir.

5.1 Çalışma Alanı ve Veriler

Çalışma alanı olarak Gediz Havzası seçilmiştir. Gediz Havzası, Ege Bölgesinde, 38° 04' – 39° 13' kuzey enlemleri ile 26° 42' – 29° 45' doğu boylamları arasında yer almaktadır. Havzanın alanı 18.000 km² olup ortalama yıllık akışı 1,95 km³, yıllık ortalama verimi 3,6 l/s/km² 'dir[16].

Gerekli veriler, Medar Çayı üzerinde bulunan Kayalıoğlu (#509), Deliiniş Çayı üzerinde bulunan Topuzdamarı (#515), Gediz Nehri üzerinde bulunan

Acısu (#523) akım gözlem istasyonları ile Akhisar (#17184), Uşak(#17188), Demirci (#17746) Simav(#17748) Gediz(#17750) meteoroloji gözlem istasyonlarına aittir. Bu istasyonlara ait bilgiler Tablo 1' de verilmiştir.

Akım gözlem istasyonları havzalarının hangi meteoroloji istasyonu ile temsil edildiği ve istasyonlara ait bilgiler Tablo 2' de verilmiştir.

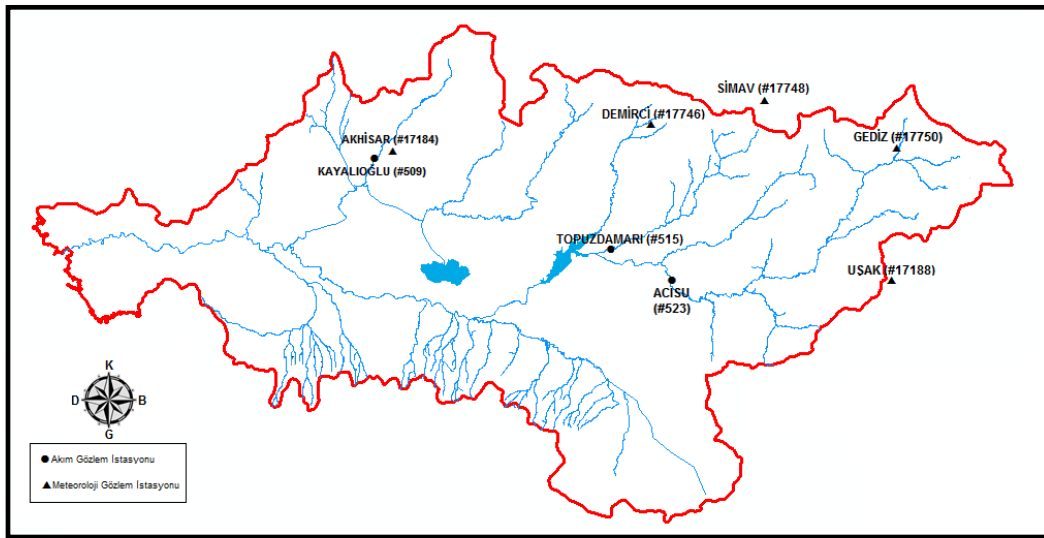
Çalışma alanı ve gözlem istasyonlarının konumları Şekil 3' te verilmiştir.

Tablo 1 Gediz Havzasında Seçilen Akım Gözlem İstasyonları

İstasyon Adı	Bulunduğu Akarsu	Yağış Alanı (km ²)	Kotu (m)	Coğrafi Konumu
Kayalıoğlu (#509)	Medar Çayı	901,6	77	27° 46' 07" D 38° 53' 26" K
Topuzdamarı (#515)	Deliiniş Çayı	739,6	376	28° 33' 17" D 38° 43' 25" K
Acısu (#523)	Gediz Nehri	3272,4	373	28° 43' 11" D 38° 38' 26" K

Tablo 2. Gediz Havzası İçin Belirlenen Meteoroloji Gözlem İstasyonları

İstasyon Adı	İlişkili AGİ	Kot (m)	Coğrafi Konumu
Akhisar (#17184)	Kayalıoğlu (#509)	93	27° 49' 05" D 38° 54' 42" K
Uşak (#17188)	Acısu (#523)	919	29° 23' 35" D 38° 40' 20" K
Demirci (#17746)	Topuzdamarı (#515)	851	28° 39' D 39° 03' K
Simav (#17748)	Topuzdamarı (#515) Acısu (#523)	809	28° 59' 25" D 39° 05' 22" K
Gediz (#17750)	Acısu (#523)	825	29° 23' 40" D 38° 59' 49" K



Şekil 3. Gediz Havzası ve Gözlem İstasyonları

Çalışmada kullanılan GR4J ve GR2M kavramsal hidrolojik modellerinin kalibrasyonu için yağış ve potansiyel evapotranspirasyon ve akım değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Potansiyel evapotranspirasyon değerleri ise Qudin[17] tarafından önerilen yöntemle sadece sıcaklık ve koordinatlara bağlı olarak hesaplanmıştır. Sıcaklık değerleri hesaplanırken, istasyonlarda ölçülen sıcaklık değerlerinin ortalaması, yağış değerleri hesaplanırken ise Thiessen yöntemi kullanılmıştır.

Günlük ve aylık model için aynı tarih aralığındaki veriler ile çalışılmıştır. Kayalıoğlu (#509) AGİ havzası-

nın kalibrasyon aşamasında 01.10.1994 ile 30.09.2000 tarihleri arasındaki, Topuzdamarı (#515) ve Acısu (#523) AGİ havzalarının kalibrasyon aşamasında 01.10.1997 ile 30.09.2003 tarihleri arasındaki 6 yıllık veriler kullanılmıştır. Doğrulama aşamasında ise Kayalıoğlu (#509) AGİ havzası için 01.10.2000 ile 30.09.2003 tarihleri arasındaki, Topuzdamarı (#515) ve Acısu (#523) AGİ havzalarının için 01.10.2003 ile 30.09.2006 tarihleri arasındaki 3 yıllık veriler kullanılmıştır. Kullanılan verilere ait istatistikler Tablo 3 - 5' te verilmiştir.

Tablo 3. Kayalıoğlu (#509) İstasyonu Havzasının Günlük Verilerine Ait İstatistikler

	Kalibrasyon Aşaması			Doğrulama Aşaması		
	Günlük Ortalama Akım (m ³ /s)	Günlük Toplam Yağış (mm)	Günlük Ortalama Sıcaklık (°C)	Günlük Akım (m ³ /s)	Günlük Toplam Yağış (mm)	Günlük Ortalama Sıcaklık (°C)
\bar{x}	2,61	1,72	16,56	2,49	1,60	16,89
S_x	6,35	5,88	8,46	7,81	5,64	8,47
C_{sx}	7,77	5,79	0,02	8,58	5,27	-0,04

Tablo 4. Topuzdamarı (#515) İstasyonu Havzasının Günlük Verilerine Ait İstatistikler

	Kalibrasyon Aşaması			Doğrulama Aşaması		
	Günlük Ortalama Akım (m ³ /s)	Günlük Toplam Yağış (mm)	Günlük Ortalama Sıcaklık (°C)	Günlük Akım (m ³ /s)	Günlük Toplam Yağış (mm)	Günlük Ortalama Sıcaklık (°C)
\bar{x}	3,11	1,90	13,02	2,57	1,85	12,87
S_x	8,93	5,66	8,16	8,24	5,65	8,26
C_{sx}	9,83	5,01	-0,08	9,87	4,61	-0,21

Tablo 5. Acısu (#523) İstasyonu Havzasının Günlük Verilerine Ait İstatistikler

	Kalibrasyon Aşaması			Doğrulama Aşaması		
	Günlük Ortalama Akım (m ³ /s)	Günlük Toplam Yağış (mm)	Günlük Ortalama Sıcaklık (°C)	Günlük Akım (m ³ /s)	Günlük Toplam Yağış (mm)	Günlük Ortalama Sıcaklık (°C)
\bar{x}	9,64	1,71	12,91	6,35	1,50	12,64
S_x	19,02	4,68	8,33	10,87	4,19	8,44
C_{sx}	4,79	5,08	-0,01	4,26	4,80	-0,15

5.2 Modellerin Kalibrasyonu

GR4J ve GR2M modelleri yukarıda belirtilen Gediz havzası verileri ile kombine edilmiş ve optimizasyon yöntemleri yardımıyla kalibre edilmiştir. Problem çözümü aşamasında her bir yöntem optimum çözüm istatistiği açısından bağımsız olarak 10 ar

kez çalıştırılmış ve en iyi çözümler kaydedilmiştir. Kullanılan optimizasyon yöntemlerinin her birinin kendine özel parametreleri bulunmaktadır. Bu parametre değerleri en iyi çözümü bulma ve bu çözüme yakınsama hızını etkilemektedir. Çalışmada seçilen parametreler her optimizasyon algoritması için Tablo 6' da ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 6. Optimizasyon Algoritmaları Parametre Değerleri

Av Arama Algoritması	
Parametre	Parametre Değeri
Avcı sayısı	40
Değişken sayısı	4
Sınırlayıcı sayısı	0
Lidere doğru maksimum ilerleyiş	0,005
Avcı gurubu dikkate alma oranı	0,3
Ra' nın alabileceği maksimum değer	0,01
Ra' nın alabileceği minimum değer	0,0000001
Alfa katsayısı	1,2
Beta katsayısı	0,02
Bir epok içindeki maksimum deneme sayısı	25
Maksimum iterasyon sayısı	25000
Ateş Böceği Algoritması	
Parametre	Parametre Değeri
Ateş böceği sayısı	40
Değişken sayısı	4
Sınırlayıcı sayısı	0
Bmin parametresi	0,2
Beta parametresi	1
Alfa katsayısı	0,01
Gama katsayısı	1
Maksimum iterasyon sayısı	25000
Yapay Arı Kolonisi Algoritması	
Parametre	Parametre Değeri
Koloni sayısı	40
Değişken sayısı	4
Sınırlayıcı sayısı	0
Bir epoktaki maksimum deneme sayısı	10
Maksimum iterasyon sayısı	25000

Tablo 7' de probleme ait analiz sonuçları verilmiştir. Tablo içinde üç farklı teknik ile her hidrolojik model için elde edilen en iyi sonuçlar verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde GR4J modeli için en iyi yaklaşımı Av arama optimizasyon tekniğinin verdiği izlenmiştir. Ayrıca bu model için en iyi yaklaşımın 0,8174381 ile

Acısugözlem istasyonundan elde edilen verilerle üretildiği kaydedilmiştir. GR2M modeli için üretilen sonuçlara göre ise bu model için en iyi yaklaşım yapay arı kolonisi tarafından üretilmiştir. Bu model için en iyi yaklaşım olan 0,9565760 Topuzdamarı gözlem istasyonundan elde edilen verilerle üretilmiştir.

Tablo 7. Optimizasyon Algoritmaları Performans Değerleri

Hidrolojik Model	Gözlem İstasyonu	Optimizasyon Yöntemi		
		Av Arama	Ateş Böceği	Yapay Arı Kolonisi
GR4J	Kayalıoğlu	0,6694883	0,6694873	0,669488
	Topuzdamarı	0,7587641	0,7587211	0,7587640
	Acısu	0,8174381	0,7186710	0,8174379
GR2M	Kayalıoğlu	0,8424520	0,8410358	0,8448147
	Topuzdamarı	0,9532058	0,9475067	0,9565760
	Acısu	0,9377405	0,9352427	0,9379801

Her iki model ve gözlem istasyonu için elde edilen optimum çözümler ile tasarım değişkenleri Tablo 8' de verilmiştir. Tablodaki sonuçlara göre dört değişkenli

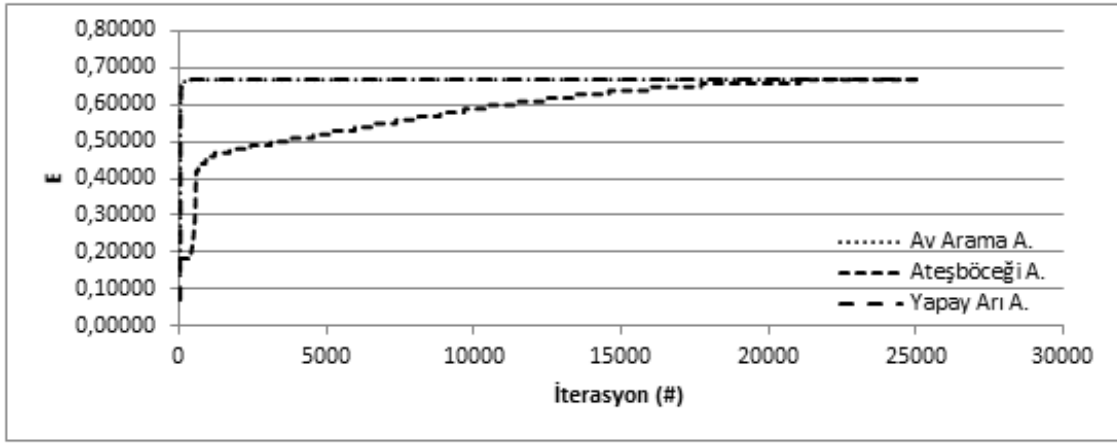
olan GR4J hidrolojik modelinin kalibrasyonunda av arama tekniği etkili olurken, iki değişkenli GR2M hidrolojik modelinin kalibrasyonuna yapay arı kolonisi algoritması hakim olmuştur.

Tablo 8. Optimizasyon Algoritmaları Parametre Değerleri

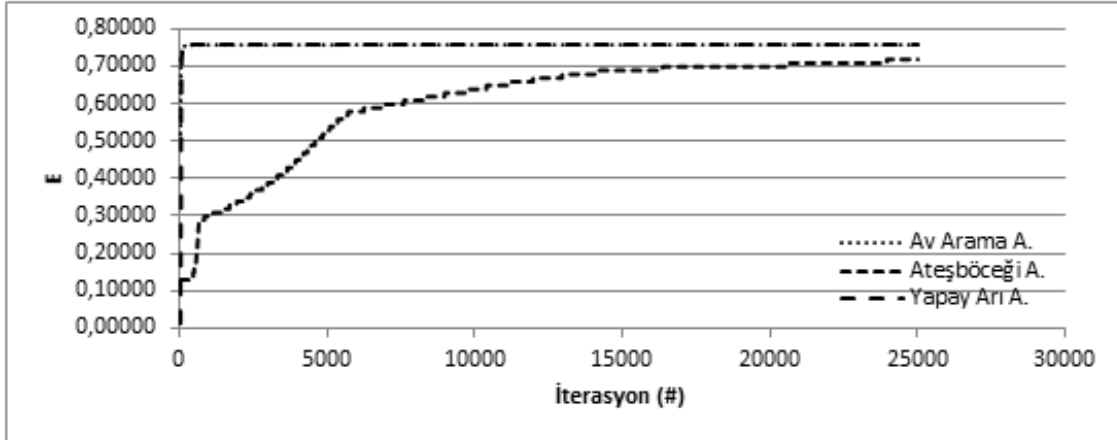
	GR4J			GR2M		
	Av Arama			Yapay Arı Kolonisi		
	Kayalıoğlu	Topuzdamarı	Acısu	Kayalıoğlu	Topuzdamarı	Acısu
X_1	219,0324	270,5456	427,0907	223,8586	387,5597	353,8546
X_2	-13,8489	-13,3268	-3,6011	0,5979	0,8055	0,7618
X_3	86,0235	73,3914	45,3829	-	-	-
X_4	0,2165	0,3475	0,7058	-	-	-
Optimum Çözüm	0,6694883	0,7587641	0,8174381	0,8448147	0,9565760	0,9379801

Şekil 4- a, b ve c de GR4J modeli için her üç optimizasyon metodunun gösterdiği yakınsama performansları gösterilmektedir. Bu grafikten anlaşılacağı üzere

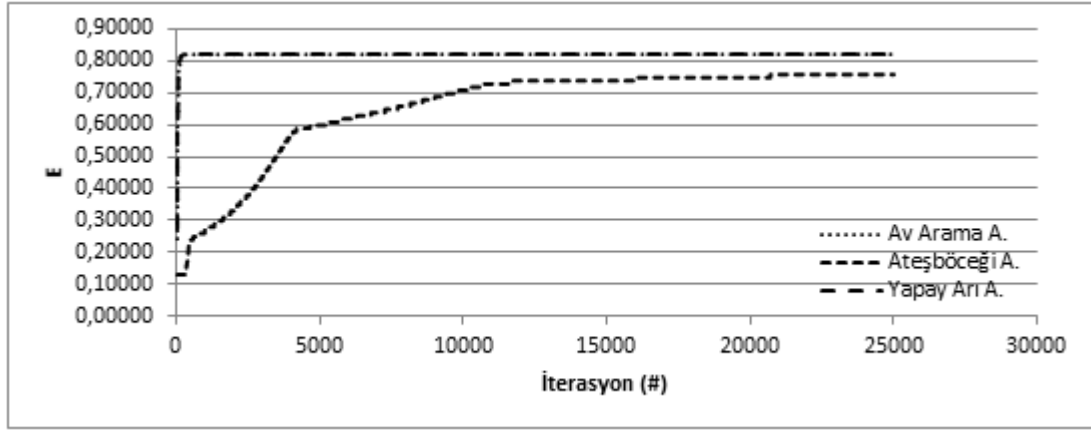
av arama ve yapay arı algoritmaları yaklaşık eşit bir yakınsama göstermiş ve ateş böceği algoritmasına büyük fark atmıştır.



(a) Kayalıoğlu (#509) AGİ



(b) Topuzdamarı (#515) AGİ

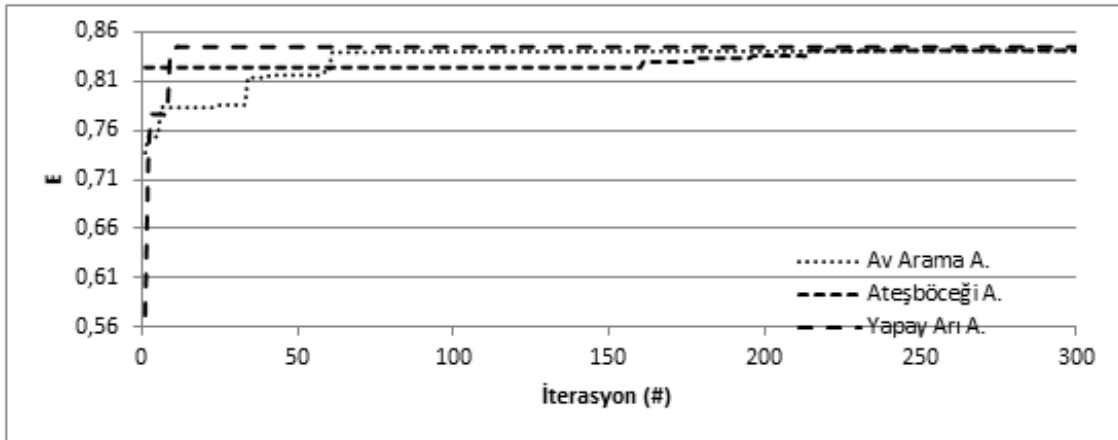


(c) Acısu (#523) AGİ

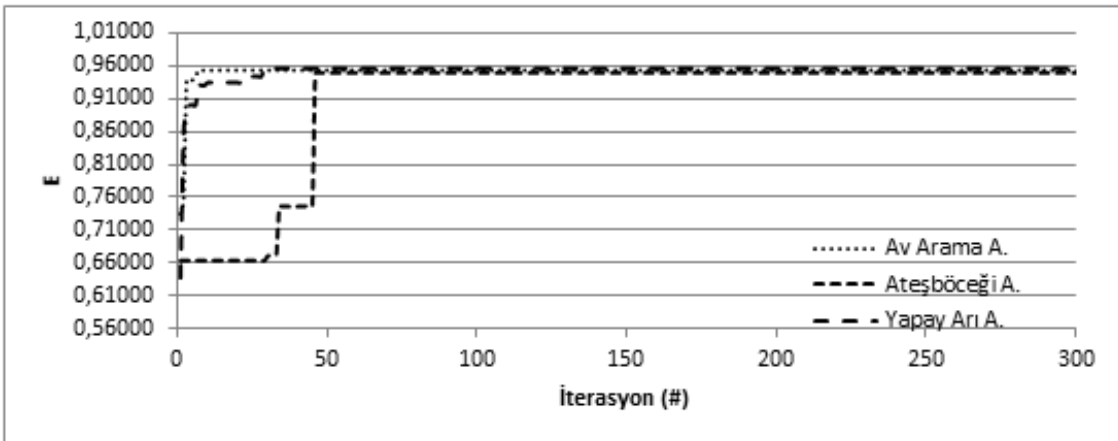
Şekil 4. GR4J modeline ait kalibrasyon süreci yakınsama grafikleri

Şekil 5- a, b ve c de GR2M modeli için her üç optimizasyon metodunun gösterdiği yakınsama performansları gösterilmektedir. Bu grafikten anlaşılacağı üzere

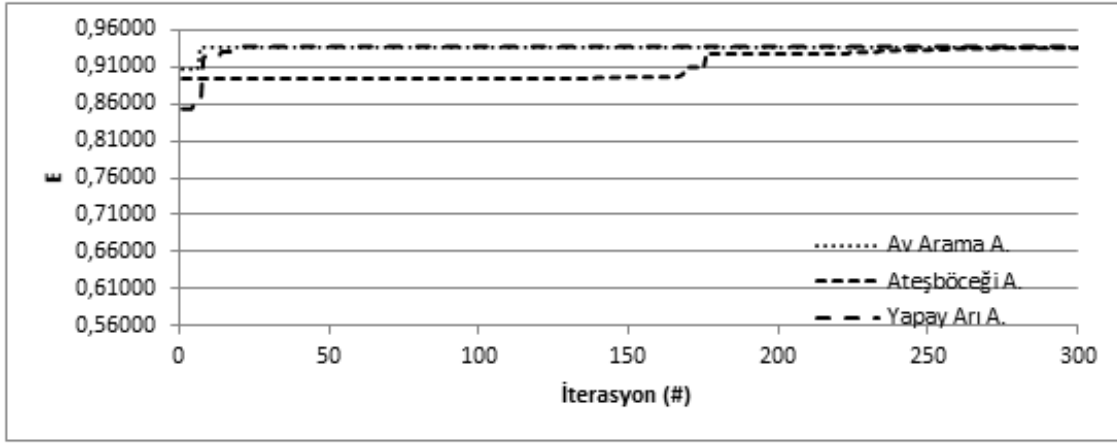
bu model için en iyi yakınsamayı yapay arı kolonisi optimizasyon algoritması sergilemiştir.



(a) Kayaloğlu (#509) AGİ



(b) Topuzdamarı (#515) AGİ



(c) Acısu (#523) AGİ

Şekil 5. GR2M modeline ait kalibrasyon süreci yakınsama grafikleri

6. Sonuçlar

Bu çalışmada, av arama algoritması, ateş böceği algoritması ve yapay arı kolonisi algoritması meta-bulgusaloptimizasyon yöntemlerinin hidrolojik model kalibrasyon probleminin çözümünü bulmadaki performansları karşılaştırılmıştır. Söz konusu modeller GR4J ve GR2M şeklinde adlandırılmakta olup literatürde sıklıkla çalışılan iki farklı hidrolojik model olarak dikkat çekmektedir. Modellerin kalibrasyonu için kullanılan veriler Gediz havzası için kaydedilmiş olan yağış miktarlarıdır ve DSI kayıtlarından alınmıştır. Havzada bulunan üç adet gözlem istasyonunda kaydedilen veriler üç farklı optimizasyon algoritması tarafından iteratif sürece dahil edilmiş ve belirli miktarda iterasyonun ardından nihai yaklaşım değerlerine ulaşılmıştır. Sonuçlar dikkate alındığında geliştirilen optimizasyon algoritmalarının matematiksel açıdan oldukça basit olmalarına rağmen optimum çözümü bulmadaki performansları açısından oldukça etkili oldukları görülmektedir. Özel olarak av arama yönteminin GR4J modeli için ve yapay arı kolonisi yönteminin ise GR2M modelinin kalibrasyonunda diğerlerine üstünlük gösterdiği izlenmiştir. Bu durum algoritmaların problem zorluğu- yakınsama performansı özellikleri açısından bir sonuç ortaya çıkarmaktadır. Modeller incelendiğinde GR4J modelinin dört değişkenli ve GR2M modelinin iki değişkenli olduğu görülmektedir. Hızlı yakınsayan algoritmalarından olan yapay arı kolonisi algoritması bu algoritmaların özelliği gereği az değişkenli problem çözümünde kısa sürede diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuç vermiştir.

7. Referanslar

- [1] Hasançebi, O.; Çarbaş, S.; Doğan, E., Erdal; F., Saka, M.P., Performance evaluation of metaheuristic search techniques in the optimum design of real size pin jointed structures. *Computers and Structures*, 2009; 87(5-6), 284-302.
- [2] Yang, X.S., Firefly Algorithms for Multimodal Optimization. *Stochastic Algorithms: Foundations and Applications. Lecture Notes in Computer Science*, 2009; 5792, 169-178.
- [3] Franchini, M.; Galeati, G.; Saverio, B., Global optimization techniques for the calibration of conceptual rainfallrunoff models. *Hydrological Sciences Journal*, 1998; 43(3), 443-458.
- [4] Blasone, R.S.; Madsen, H.; Rosbjerg, D., Parameter estimation in distributed hydrological modelling: Comparison of global and local optimisation techniques. *Nordic Hydrology*, 2007; 38(4-5), 451-476.
- [5] Arsenault, R.; Poulin, A.; Côté, P.; Brissette, F., Comparison of Stochastic Optimization Algorithms in Hydrological Model Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2014; 19(7), 1374-1384.
- [6] Perrin, C., Vers une amélioration d'un modèle global pluie-débit au travers d'une approche comparative, France: INPG (Grenoble)/Cemagref (Antony), 2000.
- [7] Mouelhi, S.; Michel, C.; Perrin, C.; Andréassian, V., Stepwise Development of a Two-Parameter Monthly Water Balance Model. *Journal of Hydrology*, 2006; 318, 200-214.
- [8] Nash, J.E.; Sutcliffe, J.V., River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 1970; 10(3), 282-290.
- [9] Oftadeh, R.; Mahjoob, M.J.; Shariatpanahi, M., A novel meta-heuristic optimization algorithm inspired by group hunting of animals: Hunting search. *Computers*

- Mathematics with Applications, 2010; 60,2087-2098.
- [10] Yang, X.S., Nature-Inspired Metaheuristic Algorithms, London: Luniver Press, 2008; 116 pp.
- [11] Karaboğa, D., An Idea Based on Honey Bee Swarm For Numerical Optimization. Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, Kayseri, 2005.
- [12] Karaboğa, D.; Baştürk, B., A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm. Journal of Global Optimization, 2007; 39(3), 459-471.
- [13] Marinakis, Y.; Marinaki, M.; Matsatsinis, N., A Hybrid Discrete Artificial Bee Colony-GRASP Algorithm for Clustering, Computers & Industrial Engineering, International Conference on, Troyes, 2009.
- [14] Akay, B., Nümerik optimizasyon problemlerinde yapay arı kolonisi (artificial bee colony) algoritmasının performans analizi. Kayseri: Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Doktora Tezi, 2009.
- [15] Karaboğa, D., Yapay Zekâ Optimizasyon Algoritmaları. İstanbul: Atlas Yayın Dağıtım, 2004; 231pp.
- [16] DSİ, 2011 Yılı Faaliyet Rapor. DSİ, Ankara, 2012.
- [17] Oudin, L.; Hervieu, F.; Michel, C.; Perrin, C.; Andréassian, V.; Anctil F.; Loumagne, C., Which potential evapotranspiration input for a lumped rainfall-runoff model?: Part 2—Towards a simple and efficient potential evapotranspiration model for rainfall-runoff modelling. Journal of hydrology, 2005; 303(1), 290-306.
- [18] Perrin, C.; Michel, C.; Andréassian, V., Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. Journal of Hydrology, 2003; 279(1-4), 275-289.
- [19] Apostolopoulos, T.; Vlachos, A., Application of the firefly algorithm for solving the economic emissions load dispatch problem. Journal of Combinatorics, 2011.
- [20] Farahani, S. M.; Nasiri, B.; Abshouri, A. A.; Meybodi, M. R., An improved firefly algorithm with directed movement, Proceedings of 4th IEEE International Conference on Computer Science and Information Technology, Chengdu, 2011.
- [21] Yang, X. S., Firefly algorithm, Stochastic Test Functions and Design Optimization. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2010; 2(2), 78-84.
- [22] Karaboğa, D., A New Design Method Based on Artificial Bee Colony Algorithm for Digital IIR Filters. Journal of the Franklin Institute, 2009; 346(4), 328-348.