SU TEMİN SİSTEMLERİNDE YAPAY ARI KOLONİSİ ALGORİTMASI İLE ENERJİ VERİMLİLİĞİ OPTİMİZASYONU

Ufuk SEKMEN*, Mehmet YILMAZ, Özgür ÖZDEMİR*, Derviş KARABOĞA***, Rıfat KURBAN****, Ömer Faruk YILDIZ*******
* KASKİ Genel Müdürlüğü İlçe Hizmetleri Dairesi Başkanı
38090 Kocasinan, Kayseri, ufuks@kaski.gov.tr
** İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü
44280 Malatya, m.yilmaz@inonu.edu.tr
*KASKİ Genel Müdürlüğü Genel Müdür
38090 Kocasinan, Kayseri, ozgurozdemir@kaski.gov.tr
*** Erciyes Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü
38039 Melikgazi, Kayseri, karaboga@erciyes.edu.tr
****Kayseri Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Teknolojileri Bölümü
38280 Talas, Kayseri, rifatkurban@kayseri.edu.tr
***** Yatırım İzleme ve Koordinasyon Başkanlığı
27100 Şehitkamil, Gaziantep, farukmakina@hotmail.com

Özet: Küresel ısınma, mevsimsel değişiklikler ve yağış rejminin değişmesinin yanısıra bilinçsiz tüketim içme suyu kaynaklarının son yıllarda ciddi ölçüde azalmasına sebep olmuştur. Ülkemizde içme suyunun temini ve kullanıcılara kadar ulaştırılması yerel idarelerin sorumluluğuna girmektedir. Yerel idareler şehrin içme suyu ihtiyacını, bulunduğu coğrafyanın imkanları doğrultusunda göllerden, barajlardan, doğal kaynaklardan veya yeraltı sularından temin etmektedirler. Tüm temin yöntemlerinde içme suyunun kaynağından temini ve nihai kullanıcıya ulaştırılmasında en önemli unsur enerjidir. Yer altından içme suyu temin edilen sistemlerde kullanılan dalgıç pompaların ilk yatırım maliyeti önemli olmakla birlikte, pompaların tükettiği enerji miktarı göz önüne alındığında işletme maliyeti çok daha önemli görünmektedir. Bu durum pompaların işletme maliyetini azaltacak yöntemlerin önemini açığa çıkarmaktadır. Aynı depoyu dolduran birden fazla derin kuyunun bulunduğu havzalardaki pompaların işletilmesinde enerji verimliliği optimizasyonu gittikçe artan bir önem kazanmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, yeni bir yöntem olan Yapay Arı Koloni (Artificial Bee Colony, ABC) algoritması kullanarak su temin sistemlerinde enerji verimliliği optimizasyonu yapmaktır. Optimizasyon çalışması, Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'nün (KASKİ) sorumluluğunda bulunan Germiraltı içme suyu havzası için yapılmıştır. Merkez ilçe nüfusunun %10'una hitap eden ve yıllık 2.5 milyon kWh'tan fazla enerji tüketerek yaklaşık 11.5 milyon m³ su üretilen Germiraltı içme suyu havzasında 16 adet dalgıç tip pompa bulunmaktadır. Toplama deposunun seviyesine göre anlık su ihtiyacı için en verimli pompanın seçilmesi ve frekans optimizasyonuna dayanan yapay arı koloni algoritması oluşturulmuştur. Havzadaki dalgıç pompalar bir yıl yapay arı koloni algoritması ile çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir. Pompalar yapay arı kolonisi algoritması yöntemi kullanılarak işletildiğinde, SCADA sistemi kullanılarak verim esaslı izleme ile işletim yöntemine göre enerji verimliliğinde önemli kazanımlar elde edilmiştir.
Anahtar Kelimeler: Su temin sistemleri, İçme suyu, Dalgıç pompa, Yapay Arı Kolonisi algoritması, Optimizasyon, Enerji verimliliği.

ENERGY EFFICIENCY OPTIMIZATION IN WATER SUPPLY SYSTEMS BY ARTIFICIAL BEE COLONY ALGORITHM

Abstract: Global warming, seasonal changes and changes in the precipitation regime, as well as unconscious consumption, have led to a serious decrease in drinking water resources in recent years. In our country, the supply of drinking water and its delivery to the users are the responsibility of local administrations. Local administrations supply the city's drinking water need from lakes, dams, natural springs or underground waters in line with the possibilities of its geography. In all supply methods, the most important factor in supplying drinking water from its source and delivering it to the end user is energy. Although the initial investment cost of submersible pumps used in underground drinking water supply systems is important, the operating cost seems to be much more important when

the amount of energy consumed by the pumps is taken into account. This situation reveals the importance of methods to reduce the operating costs of pumps. Energy efficiency optimization is gaining increasing importance in the operation of pumps in basins where there is more than one deep well filling the same tank.

The aim of this study is to make energy efficiency optimization in water supply systems by using the Artificial Bee Colony (ABC) algorithm, which is a new method. The optimization study was carried out for the Germiraltı drinking water basin, which is under the responsibility of the General Directorate of Kayseri Water and Sewerage Administration (KASKİ). There are 16 submersible pumps in the Germiraltı drinking water basin, which appeals to 10% of the population of the central district and produces approximately 11.5 million m³ of water by consuming more than 2.5 million kWh of energy annually. An artificial bee colony algorithm based on frequency optimization and selection of the most efficient pump for the instantaneous water requirement according to the level of the collection tank was created. Submersible pumps in the basin were operated by artificial bee colony algorithm for one year and the results were evaluated. When the pumps are operated using the artificial bee colony algorithm method, significant gains have been achieved in energy efficiency compared to operating method with the principle of efficiency-based monitoring using the SCADA system.
Keywords: Water supply systems, Drinking water, Submersible pump, Artificial Bee Colony algorithm, Optimization, Energy efficiency.

GİRİŞ

Su ve enerji toplumların refahı için vazgeçilmez unsurlardır. Dünyada su dağıtımı için tüketilen enerji, küresel enerji tüketiminin yaklaşık %7'sidir. Sürdürülebilir kalkınma için Su Temini Sistemlerinde (Water Supply Systems, WSS) enerji verimliliğinin iyileştirilmesi büyük önem taşımaktadır. WSS'de enerji verimliliğindeki iyileştirmeler, kaçak kontrolü için basit izleme operasyonlarından tüketim analizleri, pompa sistemleri optimizasyonu, depolama/üretim rezervuar sistemleri optimizasyonu ve gerçek zamanlı operasyonlar gibi daha karmaşık operasyonlara kadar değişmektedir. Sayısal modelleme, WSS'deki bu çok karmaşık enerji verimliliği çalışmaları için önemli bir yardımcı araç haline gelmiştir (Coelho, 2016).

İçilebilir su, artan küresel tehditler nedeniyle gelecekte stratejik bir kaynak olacak; aşırı su kullanımı ve yüksek kayıp oranları sosyal, ekonomik, kültürel ve politik sonuçlar doğuracaktır. Kaynağından musluğa kadar yol alan içilebilir suyun bu süreçteki maliyeti daha da önemli hale gelecektir (Cabrera vd., 2010). İçme suyu temin ve dağıtım sistemlerinin amacı, nüfusa kaliteli ve yeterli miktarda sürekli su sağlamaktır. Genel olarak, bir WSS dört ana bölümden oluşur (Swamee ve Sharma, 2008):

(i) Su kaynakları ve çıkarım yapıları intake works: Çıkarım yapıları ve pompa istasyonları tarafından su çıkarılır.
(ii) Arıtma işleri ve depolama,
(iii) İletim şebekesi (pompalama ve/veya yerçekimi): Su, arıtma tesislerine ve ardından depolama rezervuarlarına taşınır.
(iv) Dağıtım şebekesi: Servis bağlantıları aracılığıyla tüketicilere su sağlar.

Enerji maliyetleri, WSS'nin işletme maliyetlerinin ana bileşenini oluşturur. En önemli enerji miktarı genellikle su pompalama istasyonları tarafından tüketilir. Pompalama sistemleri, elektrik motorları tarafından kullanılan dünya enerjisinin yaklaşık %20'sini ve bazı endüstrilerde gerekli olan toplam elektrik enerjisinin %25 ila %50'sini kullanmaktadır (Europump and Hydraulic Institute, 2004). Watergy'ye (2009) göre, dünya çapındaki elektrik tüketiminin yaklaşık % 2 ila% 3'ü WSS'de pompalama için kullanılırken, bu tüketimin% 80-90'ı motorlu pompa setleri tarafından karşılanmaktadır (Sarbu, 2016). Vilanova ve Balestieri'ye (2014) göre, su dağıtımından kaynaklanan elektrik tüketiminin% 80-90'ı pompa istasyonlarının çalışmasından kaynaklanmaktadır. Belirli bir pompa istasyonuyla ilişkili toplam işletme maliyeti pompalar, dağıtım sistemi, pompa sürücüleri ve enerji tüketim programlaması vb. faktörlere bağlıdır. Tüm bunlar pompa istasyonları ilgili süreçlerde verimlilik artışının önemini vurgulamaktadır.

Nüfusun ve endüstrinin artan su talebinin gecikmeden karşılanması gerektiğinden optimizasyon kullanılmadan WSS'nin geliştirilmesi, optimal olmayan yapıların ortaya çıkmasına neden olur. Bu optimal olmayan yapılar, tasarım ve işletim açısından verimli olmayan sistemlere dönüşür. Bu nedenlerden dolayı WSS'de optimizasyon araçlarının kullanımı çok önemlidir. Optimizasyon sorunları, geleneksel deneme yanılma yöntemleri veya daha etkili optimizasyon yöntemleri kullanılarak çözülebilir (Abiodun and Ismail, 2013; Bolognesi vd., 2014; Georgescu ve Georgescu, 2014; Mala-Jetmarova et al., 2017; Luna et al., 2019). Ancak su temin sistemlerinde deneme yanılma yoluyla optimizasyon işlemi, bu sistemlerin karmaşıklığından dolayı zorluklar ortaya çıkarabilir: birden çok pompa, vanalar ve rezervuarlar, yük kayıpları, basınç değerlerinde büyük değişiklikler, çeşitli talep yükleri vb. Bu nedenle, yenilikçi doğrusal olmayan optimizasyon algoritmaları, su temini sistemlerinin optimizasyon süreçlerinde gittikçe daha yaygın olarak kullanılmaktadır (Coelho, 2016).

Doğrusal olmayan optimizasyon algoritmaları genel olarak klasik algoritmalar ve sezgisel algoritmalar olmak üzere iki genel sınıfa ayrılmaktadır. Klasik algoritmalar temel olarak amaç fonksiyonu gradyanı ve/veya fonksiyon değerlendirmelerinin hesaplanmasını temel alır. Sezgisel algoritmalar ise esas olarak keşifsel

aramadan oluşan ve genellikle doğada meydana gelen fenomenlere veya hatta yapay zekaya dayanan algoritmalardır (Coelho ve Andrade-Campos, 2012).

WSS optimizasyonunda uygulanan klasik algoritmalar şunlardır: Lineer Programlama (LP), Lineer Olmayan Programlama (NLP), Tam Sayılı Lineer Olmayan Programlama ve Dinamik Programlama. Bu tür algoritmalar, optimal çözümün tam konumunu bulmayı sağlar. Ancak, genellikle küresel optimum olamayacak yerel optimal çözümlere yakınsarlar. Ek olarak, türev değerlendirmelerine duyulan ihtiyaç, bazı durumlarda optimizasyon sürecini daha karmaşık hale getirebilir (Coelho, 2016).

Sezgisel algoritmalar grubundan, çoğunlukla Genetik Algoritmaları (Genetic Algorithms, GA) ve Evrimsel Algoritmaları (Evolutionary Algorithms, EA) uygulayan çalışmalar bulmak olağandır. Bununla birlikte, Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimisation, PSO), Tabu Araştırma (Tabu Search, TS), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (Ant Colony Optimisation, ACO), Simüle Edilmiş Isıl İşlem (Simulated Annealing, SA), Karıştırılmış Kompleks Evrim (Shuffled Complex Evolution, SCE) ve Uyum Arama (Harmony Search, HS) gibi başka teknikler de kullanılmaktadır. Bu teknikler, türev hesaplamaları gerektirmemesi ve başlangıç karar değişkenlerine güvenmeme gibi avantajlar sağlar. Sezgisel algoritmaların keşfedici doğası nedeniyle, bu ileri teknikleri kullanarak global optimal çözümler bulma olasılığı daha yüksektir. Öte yandan, bu yöntemlerin temel dezavantajı, daha yüksek hesaplama çabası gerektirmesidir (Coelho ve Andrade-Campos, 2012, 2014; Coelho, 2016).

2005 yılında, Derviş Karaboğa tarafından geliştirilen Yapay Arı Kolonisi (Artificial Bee Colony, ABC) optimizasyon algoritması (Karaboga, 2005), son zamanlarda oldukça sık kullanılmaktadır. Kullanılan alanların çoğunda da başarılı sonuçlar göstermiştir. Doğadaki arıların yiyecek arama davranışlarından esinlenilerek geliştirilmiş olan bu yöntem, optimum çözüme hızlı bir şekilde yaklaşması ile dikkat çekmektedir. ABC algoritması, nümerik problemler (Karaboga ve Basturk, 2008), kablosuz sensör ağları (Karaboga vd., 2012), güç sistem denetleyicisi tasarımı (Eke vd., 2011), fuzzy veri kümeleme (Karaboga ve Ozturk, 2011) ve görüntü analizi (Hancer vd., 2012; Ozturk, vd., 2014) gibi alanlarda başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

Bu çalışmada ABC algoritması kullanılarak su temin sistemlerinde enerji verimliliği optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon çalışması, Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'nün (KASKİ) sorumluluğunda bulunan ve 16 adet dalgıç tip pompa içeren Germiraltı içme suyu havzası için yapılmıştır. Toplama deposunun seviyesine göre anlık su ihtiyacı için en verimli pompanın seçilmesi ve frekans optimizasyonuna dayanan yapay arı koloni algoritması oluşturulmuştur. Havzadaki dalgıç pompalar bir yıl yapay arı koloni algoritması ile çalıştırılmış ve elde edilen sonuçlar verim esaslı izleme yöntemi kullanıldığında bulunan sonuçlar ile karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE METOD

Materyal

Bu çalışmada; Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'nün (KASKİ) sorumluluk alanında bulunan Germiraltı içme suyu havzası pilot bölge olarak seçilmiştir. Kayseri ili merkez Melikgazi ilçesinde bulunan Germiraltı tesisi, Kayseri ilinin su ihtiyacının karşılanması için kullanılan 12 büyük tesisten biridir. KASKİ Germiraltı havzasının görünümü Şekil 1'de gösterilmiştir. Havzada 16'sı aktif, ikisi yedek olmak üzere 18 kuyu bulunmaktadır. Kuyuların yanı sıra havzada su depolama tankları, terfi istasyonu ve rezervuar bulunmaktadır. KASKI Germiraltı havzasında bulunan kuyuların teknik özellikleri Tablo 1'de, pompaların teknik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Melikgazi ilçesi ve çevresinin su ihtiyacının önemli bir kısmı (yaklaşık %11'i) bu havzadan karşılanmaktadır. Kayseri'deki diğer havzaların içinde su temini için enerji yoğunluğu ve enerji maliyeti en yüksek havzalardan biridir.

KASKİ faaliyet sahasında bulunan Germiraltı su temin havzasındaki tüm kuyularda endüstriyel pompa kontrol ve su sistemleri izleme cihazları bulunmaktadır. Bu cihazlarda endüstriyel 3G GSM Router, PLC kontrolör ve giriş/çıkış üniteleri bulunmaktadır (Kurban vd., 2020). Kuyulardaki pompaların üretmiş oldukları su miktarı elektromanyetik debimetre ile pompa ve motorun tükettiği enerji miktarı ise enerji analizörü ile ölçülmektedir. Ölçülen bu veriler her 10 saniyede bir 3G GSM Router üzerinden endüstriyel haberleşme protokolleri vasıtasıyla KASKİ bilgi işlem merkezinde bulunan Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) yazılımına aktarılmaktadır. Tüm kuyularda bulunan değişken hız kontrol sürücüleri, pompa kontrol cihazlarına bağlantılı olup, SCADA üzerinden motorların frekansları adaptif olarak ayarlanabilmektedir.

Tablo 1. KASKİ Germiraltı havzasındaki kuyuların teknik özellikleri.

Parametre	**Değer**
Toplam Kuyu Sayısı	18
Statik Seviye	30 m
En Düşük Dinamik Seviye	45 m
Kuyu Çapı	30 cm



Şekil 1. KASKI Germiraltı tesisinin hava fotoğrafı.

Tablo 2. KASKI Germiraltı havzasındaki dalgıç pompaların teknik özellikleri.

Pompa	Derinlik (m) - Çap (mm)	Pompa	Tipi	Çapı (")	Debi (m^3/h)	H_m (m)	Motor	Güç (kW)
P1	**YEDEK KUYU**							
P2	63 - 150	VANSAN	VSP.75/6	6	84	64	GRUNDFOS	22
P3	45 - 100	VANSAN	VSP.30/9	6	34	53	VANSAN	11
P4	54 - 150	ÜSTÜNEL	S95/5	7	85	59	MUTLU	30
P5	42 - 150	ÜSTÜNEL	S200/2	10	183	47	ÜSTÜNEL	45
P6	48 - 150	GRUNDFOS	SP.160/4A	8	173	56	GRUNDFOS	45
P7	54 - 200	VANSAN	VSP.95/5	7	105	48	VANSAN	37
P8	51 - 150	ÜSTÜNEL	S95/4	7	72	60	VANSAN	18,5
P9	45 - 125	GRUNDFOS	SP.125/3	8	126	53	İMPO	37
P10	**YEDEK KUYU**							
P11	45 - 150	GRUNDFOS	SP.77/4	6	66	53	İMPO	18,5
P12	51 - 150	GRUNDFOS	SP.95/4	6	82	54	GRUNDFOS	18,5
P13	54 - 150	NEMUTLU	NMP.160/3	6	162	55	NEMUTLU	45
P14	54 - 150	GRUNDFOS	SP.160/4	8	201	58	ÜSTÜNEL	55
P15	78 - 150	ÜSTÜNEL	S135/4	8	129	77	ÜSTÜNEL	45
P16	60 - 150	VANSAN	VSP.75/6	6	72	65	VANSAN	22
P17	78 - 150	ÜSTÜNEL	S135/4	8	129	78	ÜSTÜNEL	45
P18	66 - 150	GRUNDFOS	SP.95/5	6	90	62	ÜSTÜNEL	22

KASKİ bilgi işlem merkezinde bulunan SCADA sistemi aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- İçme suyu temin bileşenlerinin yönetimi (derin kuyu, terfi pompa merkezleri, su dağıtım depoları),
- İçme suyu dağıtım bileşenlerinin yönetimi (su şebekeleri, izole alt bölgeler (DMA) ve basınç kontrol vana (BKV) odaları),
- Klor dozajlama ve bakiye klor ölçüm istasyonları yönetimi,
- Katodik koruma redresörleri ve ölçü kutuları yönetimi,
- Atık su arıtma tesisleri yönetimi,
- Kanal atık su terfi sistemleri yönetimi.

Web tabanlı olarak çalışan SCADA sistemi KASKİ faaliyet alanında bulunan yaklaşık 1300 su istasyonunu tek bir merkezden yönetebilmektedir. Tüm saha cihazlarında bulunan 3G GSM Router'ler KASKİ APN sistemine dâhil olup güvenlik amacıyla KASKİ ağı dışından erişime kapalıdır. Modbus, Siemens, FINS, NJ vb. haberleşme protokollerine sahip pek çok farklı PLC/RTU cihazından elde edilen veriler OPC sunucusuna aktarılmakta ve buradan da SQL veri tabanı sunucusuna gönderilmektedir. Kullanıcı komutları da

yine benzer şekilde OPC sunucusu üzerinden saha cihazlarına aktarılmaktadır (Kurban vd., 2020).

Metod

Havzada bulunan sondaj kuyularından 30 yılı aşkın bir süredir su üretilmektedir. 2015 yılından itibaren SCADA personeli tarafından izle ve müdahale et yöntemi uygulanarak işletilmiştir. 2019 yılında havzada enerji verimliliği sağlamak amacıyla Yapay Arı Algoritması (ABC) kullanılmasına karar verilmiş ve 2020 yılı mart ayı itibariyle bölge yapay zeka algoritması ile optimizasyon esasına dayanan işletme yöntemi ile işletilmeye başlanmıştır.

Bu bölümde yapay arı koloni algoritması (*Artificial Bee Colony Algorithm - ABC*) tanıtılmış ve işlem basamakları verilmiştir. Akabinde ABC Algoritmasının havzadaki pompa sistemine uygulanma süreci detaylandırılmıştır.

ABC algoritması

ABC, sayısal optimizasyon problemleri için sürü zekası tabanlı bir algoritmadır. Algoritma, bal arısı sürüsünün akıllı yiyecek arama davranışlarından esinlenmiştir (Karaboga ve Basturk, 2007). Algoritmanın temel adımları aşağıda verilmiştir:

1. Tüm işçi arılar için olası çözümleri temsil eden ilk besin kaynaklarını üret.
2. Gereksinimler karşılanana kadar aşağıdaki adımları tekrarla:
    a. Her işçi arı bir besin kaynağına gider ve bir komşu kaynağı belirler, ardından nektar miktarını (çözeltinin kalitesi) değerlendirir.
    b. Her gözcü arı, işçi arıları izler ve birini seçer. Seçilen kaynağın etrafından bir komşu seçildikten sonra nektar miktarı da değerlendirilir.
    c. Bazı besin kaynakları terk edilmiş olarak işaretlenir ve bunların yerini kâşif arıların keşfettiği yeni besin kaynakları almıştır.
    d. Bulunan en iyi besin kaynağı hafızada kaydedilir.

Algoritmada, bir besin kaynağının konumu, probleme olası bir çözümü temsil eder ve bir besin kaynağının nektar miktarı, bu çözümün kalitesine (uygunluğuna) karşılık gelir. Çözüm sayısı, popülasyonda istihdam edilen işçi arı sayısına eşittir. Adım 1'de, homojen olarak dağıtılmış rastgele bir ilk popülasyon (besin kaynağı pozisyonları) üretilir. 2. adımda, popülasyon, sırasıyla işçi, gözcü ve kaşif arıların arama süreçlerinin döngülerini tekrarlamak için değerlendirilir. Gözcü bir arı, aşağıdaki denklemin olasılığı ile bir besin kaynağı (i) seçer:

$$p_i = \frac{fitness_i}{\sum_n^N fitness_n} \quad (1)$$

İşçi bir arı, aşağıdaki denklemi kullanarak kaynak konumunu değiştirir ve yeni bir besin kaynağı konumunu keşfeder:

$$v_{ij} = x_{ij} + rand(0,1)(x_{ij} - x_{kj}) \quad (2)$$

burada x mevcut yiyecek kaynakları, v yeni tespit edilen yiyecek kaynağı, $k \in (1,2, \dots, N)$ ve $j \in (1, 2, ..., D)$ olmak üzere rasgele indis sayıları, N yiyecek kaynağı sayısı ve D problemin boyutudur.

Yeni kaynağın nektar miktarı öncekinden daha yüksekse, yeni kaynak konumu hafızaya alınır. Tüm işçi arılar arama sürecini tamamladıktan sonra kaynakların konum bilgileri izleyenlerle paylaşılır. Gözcü arılar, işçi arılardan aldıkları nektar bilgilerini değerlendirir ve kaynakların nektar miktarlarına bağlı olarak bir besin kaynağı seçerler. Limit parametresi ile belirlenen bazı kaynaklar terk edilerek kâşif arılar tarafından rastgele yeni kaynaklar üretilir (Aslantas ve Kurban, 2010).

Pompa gruplarının ABC algoritması ile enerji verimliliği odaklı optimizasyonu

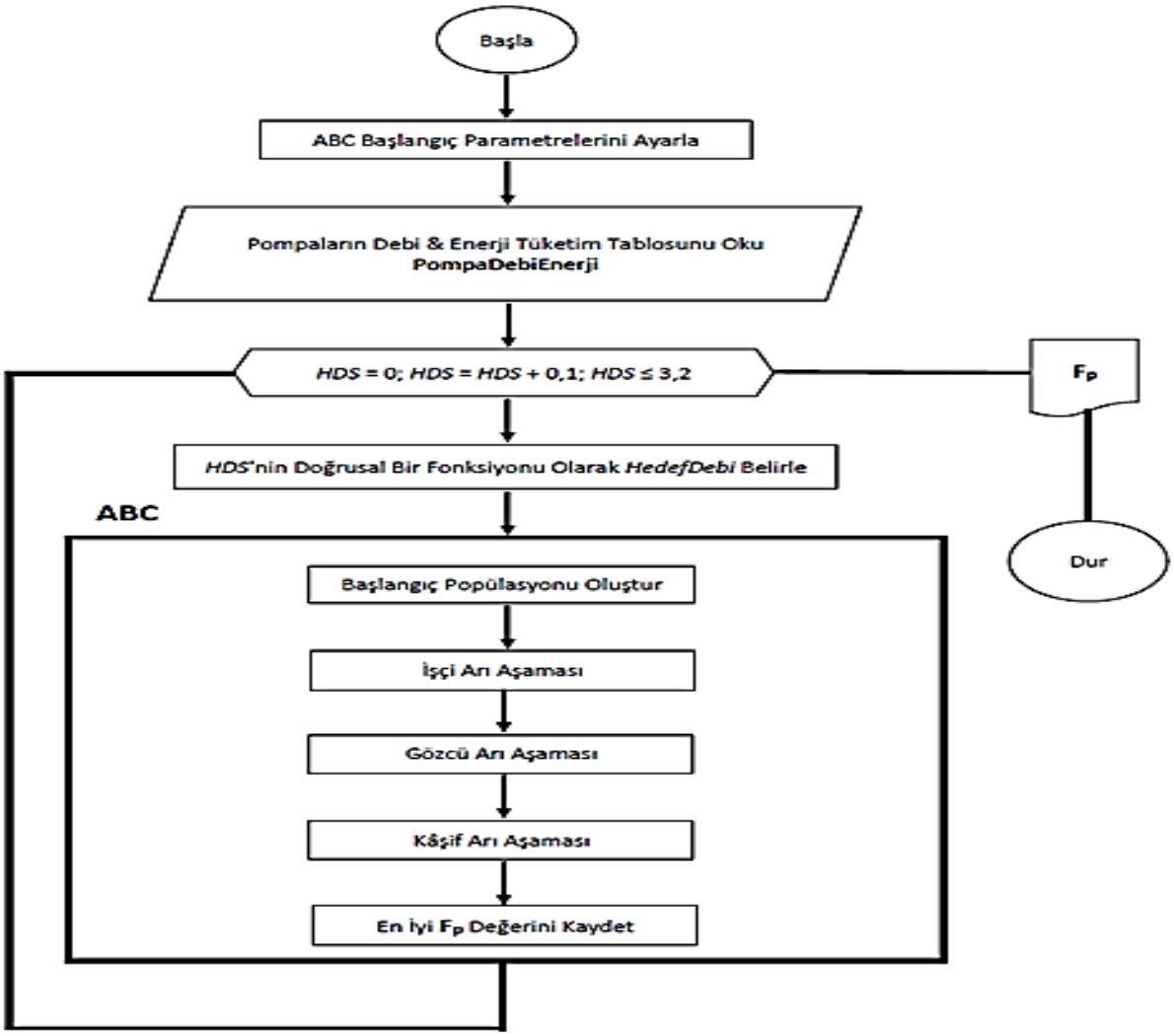
Birden fazla derin kuyu pompası ile su temini yapılan kaptaj alanlarında pompa çalışma düzeninin enerji verimliği odaklı yapılabilmesi amacıyla sistem bir minimizasyon problemi olarak tasarlanmalıdır. Kaptaj alanlarından su temininde birinci öncelik pompaların suyu bastığı deponun seviyesinin halkın su ihtiyacı da gözetilerek mümkün olduğunca dolu tutulmasıdır. İkinci öncelik ise birinci işlemi yaparken pompaları enerji tüketimi açısından en verimli noktalarda işletmektir. Burada, $\mathbf{F_P}=x$ optimize edilecek olan ve 16 adet pompanın çalışma frekanslarını ifade eden parametre vektörü, *DS* hedef depo seviyesi, **PompaDebiEnerji** pompaların hangi frekansta hangi miktarda su üretimi ve enerji tüketimini gösterir veri matrisi, *HedefDebi* ise hedeflenen toplam su debisi olmak üzere minimize edilecek uygunluk fonksiyonu değeri

$$(UFD): arg\,min\{UFD = mf(F_D)\} \quad (3)$$

olarak tanımlanmıştır.

Şekil 2'de gösterilen ABC tabanlı optimizasyon yönteminin adımları şu şekildedir:

1. ABC algoritmasının başlangıç parametrelerini ayarla. (N=40, *limit*=200, *maxcycle*=1000, D=16, *ub*=55, *lb*=35).
2. Gruptaki pompaların 1-60 Hz arası debi ve güç tablolarını oku (**PompaDebiEnerji**).
3. *HedefDebi*'yi hedef depo seviyesinin doğrusal bir fonksiyonu olarak belirle.



Şekil 2. ABC tabanlı optimizasyon yöntemi akış şeması.

4. Hedef deponun 0 m'den 3.2 m'ye kadar 0.1m aralıklar ile tüm seviye (*DS*) kombinasyonları için aşağıdaki adımları tekrarla:
    a. Başlangıç popülasyonunu oluştur ve *maxcycle* kadar b-e adımlarını tekrarla.
    b. İşçi arı aşamasını gerçekleştir (çözümlerin kalitesini maliyet fonksiyonu *mf* ile ölç).
    c. Olasılıkları hesapla.
    d. Gözcü aşamasını gerçekleştir (en iyi çözümü hafızada tut).
    e. Kâşif aşamasını gerçekleştir.
    f. Maliyet fonksiyonuna göre optimize edilen en iyi $\mathbf{F_p}$ değerini kaydet.
5. 0 m'den 3.2 m'ye kadar 0.1 m aralıklar *DS* için $\mathbf{F_p}$ değerlerine göre pompa gruplarını çalıştıracak tabloyu oluştur ve SCADA sisteminde işletilmesini sağla.

Pompaların çalışma/frekans bilgileri ve toplama deposunun su seviyesini parametre olarak alan maliyet fonksiyonu *mf* şu şekilde hesaplanmaktadır:

1. Üretilmesi gereken toplam su debisini (*HedefDebi*) toplama deposunun hedef seviyesinin (*DS*) doğrusal bir fonksiyonu olarak belirle.
2. ABC'nin ürettiği her bir $\mathbf{F_p}$ değeri için **PompaDebiEnerji** veri matrisini kullanarak hangi pompaların açık kapalı olduğunu (**PompaAcikKapali**) belirle, açık olan pompalar kullanılarak toplamda ne kadar su üretilebileceği (*AnlikTopDebi*), bu suyu üretirken ne kadar enerji tüketileceğini belirle (*AnlikTopEnerji*).
3. Ortalama birim su üretim maliyetini hesapla (*OrtBirimMaliyet=AnlikTopDebi/AnlikTopEnerji*).
4. $Penaltı = |HedefDebi - AnlikTopDebi|$
5. $DB = \begin{cases} 0 & Eğer\ Penaltı <= HedefDebi * 0.20 \\ Penaltı & değilse \end{cases}$
6. $EB = OrtBirimMaliyet$
7. $UFD = EB + DB$

burada *UFD* minimize edilmek istenen uygunluk fonksiyonu değeri, *DB* depo doldurma bileşeni, *EB* ise enerji verimliliği bileşenidir.

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile Enerji Verimliliği Optimizasyonu Sonuçları

Tablo 3'de hedef depo seviyesi (DS)'ne bağlı olarak 16 pompa için ABC algoritması ile elde edilen optimum pompa çalışma frekansları verilmiştir. Tamamen durdurulması gereken pompalar 0 Hz ile ifade edilmiştir. Tablodan görüleceği üzere depo seviyesi 0 m olması durumunda tüm pompalar olabilecek en yüksek frekanslarda çalışırken, depo seviyesi yükseldikçe pompalar sistem tarafından durdurulmakta ve/veya daha uygun frekanslarda çalıştırılmaktadır. ABC algoritması ile elde edilen ve Tablo 3'de verilen Germiraltı su temin kaptajı için optimum işletim tablosunun gerçek-zamanlı olarak çalışabilmesini sağlamak amacıyla bir veri tabanı prosedürü oluşturulmuş ve bu prosedürün her 2 dakikalık periyotlarda mevcut depo seviyesinin güncel değerine göre çalışıp optimum çalışma frekanslarını saha cihazlarına göndermesi sağlanmıştır.

Tablo 4'de ABC ile 0.1 m'lik depo seviyeleri için elde edilen optimum çalışma frekansları kullanıldığında Enerji Bileşeni (*EB*), Depo Doldurma Bileşeni (*DB*), Ortalama Birim Maliyet (*OrtBirimMaliyet*), Anlık Toplam Debi (*AnlikToplamDebi*), Anlık Toplam Enerji (*AnlikToplamEnerji*) ve çalışan toplam pompa sayısı gibi sistem değişkenlerinin algoritma içinde hesaplanan değerleri verilmiştir. Tablo 4'den görüleceği üzere depo seviyesi 0 m iken yani depo tamamen boşken ortalama birim maliyet 0.260 kW/m³ olarak hesaplanırken hedef deponun tam dolu olduğu 3.2 m. seviyesinde 0.188 kW/m³ olduğu görülmektedir. Depo seviyesi arttıkça toplam üretilmesi gereken su debisi de azalmaktadır. Depo seviyesi 0 - 2.1 m aralığında tüm pompalar çalışmaktayken, 2.1 m'den sonra pompalar verimsizden verimliye doğru durdurulmaktadır. 0 – 2.1 m aralığında tüm pompalar çalışıyor olsa da seviyeye göre motor çalışma frekansları da optimize edildiğinden dolayı birim su üretim maliyeti 0 m'de 0.260 kW/m³'den 2.1 m'de 0.231 kW/m³'e kadar düşmektedir.

Tablo 3. ABC ile hesaplanan hedef depo seviyesine göre optimum pompa çalışma frekansları.

DS	**F_P (Hz)**															
(m)	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15	P16
0	49	49	50	50	50	50	49	50	50	48	50	50	49	48	48	49
0.1	49	50	47	50	48	49	50	49	50	46	50	50	49	50	49	50
0.2	49	49	46	50	50	49	49	50	48	48	49	50	50	49	46	49
0.3	49	49	48	50	50	48	48	47	50	48	50	50	47	48	49	48
0.4	50	49	48	50	49	49	50	50	50	44	49	50	46	49	46	47
0.5	49	49	42	50	49	50	49	50	49	48	49	50	44	49	46	49
0.6	49	49	44	49	50	49	49	49	49	46	50	43	49	47	48	50
0.7	49	46	46	49	48	46	49	49	50	45	50	46	46	48	49	49
0.8	49	45	47	50	50	46	49	46	48	48	49	48	48	48	44	46
0.9	50	49	44	49	50	49	48	48	49	49	49	47	44	44	44	50
1	49	45	42	49	50	50	49	46	50	46	49	47	46	45	45	45
1.1	45	49	44	49	46	46	48	46	50	45	49	48	47	47	46	48
1.2	50	47	42	49	47	46	49	46	48	49	50	49	43	43	47	44
1.3	44	45	42	49	48	50	48	49	48	48	50	45	46	46	43	45
1.4	48	49	44	49	47	45	49	46	50	45	49	47	47	39	43	47
1.5	49	41	44	49	48	44	48	46	48	46	50	43	47	45	42	46
1.6	48	46	40	49	46	46	48	46	49	43	50	48	46	44	41	44
1.7	44	43	44	49	45	44	48	49	48	45	48	46	45	43	42	49
1.8	46	43	42	49	48	47	48	50	49	42	49	43	39	48	40	48
1.9	44	43	42	49	45	41	48	50	49	45	49	45	44	48	40	44
2	44	49	42	50	45	49	49	47	49	43	49	39	40	48	38	48
2.1	44	41	42	49	48	42	48	46	45	39	46	39	40	43	37	48
2.2	44	0	42	49	40	39	49	46	50	40	46	39	41	39	42	0
2.3	44	0	40	49	40	38	47	46	44	39	44	38	37	39	40	0
2.4	44	0	0	49	40	38	0	46	44	39	45	38	38	39	39	0
2.5	0	0	0	49	40	38	0	43	44	38	44	38	37	39	36	0
2.6	0	0	0	49	40	0	0	43	43	38	44	38	37	39	0	0
2.7	0	0	0	49	0	0	0	45	44	39	0	38	37	39	36	0
2.8	0	0	0	49	0	0	0	43	0	38	0	39	37	39	0	0
2.9	0	0	0	49	0	0	0	43	0	39	0	37	0	0	0	0
3	0	0	0	49	0	0	0	43	0	0	0	37	0	0	0	0
3.1	0	0	0	0	0	0	0	43	0	0	0	37	0	0	0	0

3.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	0	0	0	0

Tablo 4. Optimum çalışma frekanslarında değişkenlerin durumu.

DS (m)	Enerji Bileşeni (*EB*)	Depo Doldurma Bileşeni (*DB*)	Ortalama Birim Maliyet (*OrtBirimMaliyet*)	Anlık Toplam Debi (*AnlikTopDebi*) (m^3/h)	Anlık Toplam Enerji (*AnlikTopEnerji*) (kWh)	Çalışan Pompa Sayısı
0.0	0.26	0	0.260	1840	479	16
0.1	0.26	0	0.259	1827	473	16
0.2	0.26	0	0.257	1813	466	16
0.3	0.26	0	0.256	1800	462	16
0.4	0.25	0	0.255	1786	455	16
0.5	0.25	0	0.252	1773	447	16
0.6	0.25	0	0.252	1760	444	16
0.7	0.25	0	0.251	1747	438	16
0.8	0.25	0	0.250	1733	434	16
0.9	0.25	0	0.249	1719	428	16
1.0	0.25	0	0.246	1705	420	16
1.1	0.25	0	0.246	1692	417	16
1.2	0.25	0	0.246	1679	413	16
1.3	0.25	0	0.245	1667	409	16
1.4	0.24	0	0.243	1654	402	16
1.5	0.24	0	0.241	1638	395	16
1.6	0.24	0	0.241	1625	392	16
1.7	0.24	0	0.241	1611	388	16
1.8	0.24	0	0.239	1598	382	16
1.9	0.24	0	0.238	1584	378	16
2.0	0.24	0	0.237	1561	369	16
2.1	0.23	0	0.231	1437	332	16
2.2	0.23	0	0.225	1313	296	14
2.3	0.22	0	0.221	1195	264	14
2.4	0.22	0	0.217	1069	232	12
2.5	0.21	0	0.214	954	204	11
2.6	0.21	0	0.212	835	177	9
2.7	0.21	0	0.209	698	146	8
2.8	0.21	0	0.206	580	119	6
2.9	0.20	0	0.200	450	90	4
3.0	0.20	0	0.197	391	77	3
3.1	0.19	0	0.189	214	41	2
3.2	0.19	0	0.188	117	22	1

Enerji Verimliliğinin Karşılaştırılması

SCADA sistemi tarafından kayıt altına alınan verilerin izlenmesi ile pilot bölge için uygulanan 2 farklı yönetim modelinin her biri için birim enerji maliyeti incelenmiştir. Bu yönetim modelleri şunlardır:

- SCADA sistemi ile izlenen pompalara verim esaslı müdahale yöntemi,
- Yapay Arı Kolonisi Algoritması yöntemi.

Kuyular, SCADA üzerinden kişisel olarak izlenerek, verim esası mantığına göre çalıştırıldığı (ihtiyaca göre en verimli pompa veya pompaların önceliklendirildiği) durumda işletildiğinde elde edilen yıllık maliyetler Tablo 5'de verilmiştir. Bu yöntemde kuyular Mart 2019 – Mart 2020 arasında 1 yıllık süre boyunca çalıştırılmıştır. Bu 12 aylık veriye göre su üretim miktarları (m^3) ve tüketilen enerji miktarları (kWh) üzerinden ortalama birim maliyet (kWh/m^3) hesaplanmıştır. Tablodan görüldüğü gibi yıllık 11 058

848 m³ su üretilmiş ve 2 777 687 kWh enerji harcanmıştır. Verim esaslı izleme yöntemine göre işletildiğinde ortalama birim maliyetin 0.251 kWh/m³ olduğu görülmektedir.

Tablo 5. SCADA sistemi ile izleme sonucu elde edilen yıllık maliyet raporu (Mart 2019 - Mart 2020).

Kuyu	Su Üretim (m³)	Elektrik Tüketim (kWh)	Birim Maliyet (kWh/m³)
P2	515,604	127,147	0.247
P3	216,752	76,994	0.355
P4	504,993	131,826	0.261
P5	1,419,473	331,255	0.233
P6	1,006,066	256,553	0.255
P7	551,077	148,598	0.270
P8	454,528	129,243	0.284
P9	980,708	224,467	0.229
P11	501,884	127,269	0.254
P12	637,822	158,201	0.248
P13	1,042,199	246,107	0.236
P14	794,930	208,023	0.262
P15	301,834	85,727	0.284
P16	837,825	227,489	0.272
P17	1,288,625	297,574	0.231
P18	4,529	1,216	0.268
Toplam	**11,058,848**	**2,777,687**	**0.251**

Tablo 6. ABC algoritması Yöntemine göre yıllık maliyet raporu (Mart 2020 - Mart 2021).

Kuyu	Su Üretim (m³)	Elektrik Tüketim (kWh)	Birim Maliyet (kWh/m³)
P2	524,774	137,638	0.262
P3	159,403	39,276	0.246
P4	535,001	156,903	0.293
P5	1,377,222	296,974	0.216
P6	1,005,952	257,963	0.256
P7	545,776	142,404	0.261
P8	405,799	107,950	0.266
P9	942,070	194,846	0.207
P11	440,106	101,709	0.231
P12	539,262	124,728	0.231
P13	1,165,458	277,097	0.238
P14	807,740	203,779	0.252
P15	496,683	132,676	0.267
P16	742,220	181,952	0.245
P17	1,240,763	260,577	0.21
P18	380,035	93,784	0.247
Toplam	**11,308,272**	**2,710,263**	**0.240**

Kuyular, yapay arı kolonisi algoritması tabanlı optimizasyon kullanılarak işletildiğinde elde edilen yıllık maliyetler Tablo 6'da verilmiştir. Bu yöntemde de kuyular Mart 2020 – Mart 2021 arasında 12 ay çalıştırılmıştır. Bu 12 aylık veriye göre su üretim miktarları (m³) ve tüketilen enerji miktarları (kWh) üzerinden ortalama birim maliyet (kWh/m³) hesaplanmış ve ortalama birim maliyetin 0.240 kWh/m³ olduğu görülmüştür.

Pilot bölge için uygulanan 2 farklı yöntemin her biri için hesaplanan birim enerji ve birim maliyetleri ile oluşan tasarruf oranlarının karşılaştırması Tablo 7'de verilmiştir. Birim enerji, verim esaslı izleme ve ABC algoritması yöntemleri için sırasıyla 0.251 kWh/m³ ve 0.240 kWh/m³ olarak bulunmuştur. Birim maliyet verim esaslı izleme ve ABC algoritması yöntemleri için sırasıyla 0.1882 kWh/m³ ve 0.1800 kWh/m³ olarak bulunmuştur. Sonuçlar en düşük birim enerjinin ve birim maliyetin kuyular ABC algoritması yöntemi kullanıldığında elde edildiğini göstermektedir. ABC algoritması yöntemi verim esaslı izleme yöntemine göre %4.36 tasarruf sağlamaktadır.

Tablo 7. Enerji, maliyet ve tasarruf miktarlarının karşılaştırılması.

Yöntem	Birim Enerji (kWh/m³)	Birim Maliyet* (TL/m³)	Tasarruf (%)
Verim Esaslı İzleme	0.251	0.1882	-
Yapay Zeka - ABC Algoritması	0.240	0.1800	4.38

*Yerel elektrik tarife fiyatı 0.75 TL/kWh alınmıştır.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, yeni bir yöntem olan Yapay Arı Koloni (Artificial Bee Colony, ABC) algoritması kullanılarak su temin sistemlerinde enerji verimliliği optimizasyonu yapılmıştır. Optimizasyon çalışması, Kayseri Su ve Kanalizasyon İdaresi Genel Müdürlüğü'nün (KASKİ) sorumluluğunda bulunan Germiraltı içme suyu havzası için yapılmıştır. Toplama deposunun seviyesine göre anlık su ihtiyacı için en verimli pompanın seçilmesi ve frekans optimizasyonuna dayanan yapay arı koloni algoritması oluşturulmuştur. Germiraltı tesislerinde içme suyu temininde kullanılan sondaj kuyularının SCADA sistemi ile verim esaslı izleme yöntemi ve yapay zekâ - ABC algoritması olmak üzere 2 farklı işletme yöntemi ile çalıştırılması durumunda oluşan birim enerji ve birim maliyetler incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen bulgular şöyle özetlenebilir:

(a) Pompalar SCADA sistemi kullanılarak verim esaslı izleme ile işletim yöntemine göre işletildiğinde yıllık 11 058 848 m³ su üretilmiş ve 2 777 687 kWh enerji harcanmıştır. Ortalama birim maliyet 0.251 kWh/m³ olmuştur.

(b) Mekanik ve fiziksel hiçbir yenileme yapmadan sadece yapay zeka algoritma tabanlı optimizasyon yöntemi olan ABC algoritması kullanılarak optimizasyon yapılmıştır. ABC algoritması kullanılarak optimum pompa çalışma frekansları belirlenmiştir.

(c) Pompalar, yapay arı kolonisi algoritması tabanlı optimizasyon kullanılarak işletildiğinde yıllık 11 308 272 m³ su üretilmiş ve 2 710 263 kWh enerji harcanmıştır. Ortalama birim maliyet 0.240 TL/m³ olmuştur.
(d) Pompalar, yapay arı kolonisi algoritması tabanlı optimizasyon kullanılarak işletildiğinde SCADA sistemi ile verim esaslı izleme yöntemine göre % 4.38 oranında tasarruf elde edilmiştir.
(e) Germiraltı havzasındaki yıllık toplam tüketilen enerji göz önüne alındığında önemli miktarda enerji tasarrufu oluşacağı ortaya çıkmıştır.
(f) Bu çalışmada pilot bölge olarak seçilen Germiraltı kaptaj alanı için yapay arı kolonisi algoritması tabanlı optimizasyon kullanılarak pompalar işletildiğinde önemli enerji tasarrufu elde edilmiştir.
(g) Kayseri il merkezinde KASKİ sorumluluğunda 12 adet içme suyu kaptaj alanı bulunmaktadır. Kayseri ilinde yıllık 96 622 443 m^3 su terfi ettirilmiş ve 21 720 354 kWh enerji tüketilmiştir (01 Ocak 2019 – 31 Aralık 2019 arası).
(h) Kayseri ilindeki Germiraltı kaptaj alanı dışındaki diğer 11 kaptaj alanındaki pompalar da yapay arı kolonisi algoritması tabanlı optimizasyon kullanılarak işletildiğinde çok yüksek miktarda kazanımlar elde edilecektir.

KAYNAKLAR

Abiodun F. T. and Ismail F. S., 2013, Pump Scheduling Optimization Model for Water Supply System Using AWGA, *2013 IEEE Symposium on Computers & Informatics (ISCI)*, 12-17.

Aslantas V. and Kurban R., 2010, Multi-focus Image Fusion in Spatial Domain Using Artificial Bee Colony Optimization Algorithm, *In International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications, Kayseri, Turkey.*

Bolognesi A., Bragalli C., Lenzi C. and Artina S., 2014, Energy Efficiency Optimization in Water Distribution Systems, *Procedia Engineering*, 70, 181-190.

Cabrera E., Pardo M. A. and Arregui F. J., 2010, Measuring the Energy Efficiency of Water Utilities, *Pipelines, Climbing New Peaks to Infrastructure Reliability—Renew, Rehab, and Reinvest*, 669-680.

Coelho B., 2016, *Energy Efficiency of Water Supply Systems Using Optimisation Techniques and Micro-hydro Turbines*, Ph.D. Thesis, Universidade de Aveiro, Departamento de Engenharia Mecânica, Portugal.

Coelho B. and Andrade-Campos A, 2012, Using Different Strategies for Improving Efficiency in Water Supply Systems, *In Proceedings of the First Eccomas Young Investigators Conference on Computational Methods in Applied Sciences.*

Coelho B. and Andrade-Campos, A., 2014, Efficiency Achievement in Water Supply Systems - A Review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30, 59–84.

Eke I., Taplamacioglu M. C. and Kocaarslan I., 2011, Design of Robust Power System Stabilizer Based On Artifical Bee Colony Algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 26(3), 683-690.

Europump and Hydraulic Institute, 2004, Variable Speed Pumping – A Guide to Successful Applications, *Elsevier Advanced Technology*, Retrieved from https://www1.eere.energy.gov/manufacturing/tech_assistance/pdfs/variable_speed_pumping.pdf (Executive Summary).

Georgescu S. C. and Georgescu A. M., 2014, Application of HBMOA to Pumping Stations Scheduling for a Water Distribution Network with Multiple Tanks, *Procedia Eng.*, 70, 715–723.

Hancer E., Ozturk C. and Karaboga D., 2012, Artificial Bee Colony Based Image Clustering Method, *IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC2012)*, Brisbane, Australia, 1-5.

Karaboga D., 2005, An Idea Based on Honey Bee Swarm for Numerical Optimization, Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.

Karaboga D. and Basturk B., 2007, A Powerful and Efficient Algorithm for Numerical Function Optimization: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459-471.

Karaboga D. and Basturk B., 2008, On the Performance of Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, *Applied Soft Computing*, 8(1), 687- 697.

Karaboga D., Okdem S. and Ozturk C., 2012, Cluster Based Wireless Sensor Network Routing Using Artificial Bee Colony Algorithm, *Wireless Networks*, 18(7), 847-860.

Karaboga D. and Ozturk C., 2011, A Novel Clustering Approach: Artificial Bee Colony (ABC) Algorithm, *Applied Soft Computing*, 11(1), 652-657.

Kurban R., Güner M., Kütük A., 2020, İçme Suyu Temin Sistemlerinin SCADA Sistemleri ile Uzaktan Kontrolü ve Pompaların Hidrolik Analizi, *10. Pompa, Vana ve Kompresör Kongresi, Ankara*, 113-117.

Luna T., Ribau J., Figueiredo D. and Alves R., 2019, Improving Energy Efficiency in Water Supply Systems with Pump Scheduling Optimization, *Journal of Cleaner Production*, 213, 342-356.

Mala-Jetmarova H., Sultanova N. and Savic D., 2017, Lost in Optimisation of Water Distribution Systems? A Literature Review of System Operation, *Environ. Model. Software*, 93, 209-254.

Ozturk C., Hancer E. and Karaboga, D., 2014, Improved Clustering Criterion for Image Clustering with Artificial Bee Colony Algorithm, *Pattern Analysis and Applications*, 18(3), 587-599.

Sarbu I., 2016, A Study of Energy Optimisation of Urban Water Distribution Systems Using Potential Elements, *Water*, 8, 593.

Swamee P. K. and Sharma A. K., 2008, Design of Water Supply Pipe Networks, *JohnWiley & Sons*.

Vilanova M. R. N. and Balestieri, J. A. P., 2014, Energy and Hydraulic Efficiency in Conventional Water Supply Systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30(10), 701–714.

Watergy, 2009, http://www.watergy.net/-overview/why.php.