



A new algorithm for load shifting operation of water pumping stations

Hayri Küçük^{1*}, Mustafa Turan¹, Kadir Yaraşlı¹, Hussein Al-Sanabani², Murat İşkefiyeli²

¹Department of Electrical and Electronics Engineering, Faculty of Engineering, Sakarya University, Sakarya, 54050, Turkey

²Department of Computer Engineering, Faculty of Computer and Information Sciences, Sakarya University, Sakarya, 54050, Turkey

Highlights:

- Pump On-Off frequency is significantly reduced
- Applicable to industrial controllers with low processing power
- An innovative and evolving load shifting algorithm

Keywords:

- Energy efficiency
- Load shifting
- Optimal pumping scheduling
- Optimization Algorithm
- Water distribution system

Article Info:

Research Article
Received: 11.09.2020
Accepted: 06.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.772939

Acknowledgement:

This work was supported by Natura Automation and Software Systems company and Sakarya Water and Sewerage Administration.

Correspondence:

Author: Hayri Küçük
e-mail:
hayrikucuk61@gmail.com
phone: +90 539 340 9434

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a new algorithm (SDPA-simplified dynamic programming algorithm) was used to solve the pumping schedule optimization problem in order to reduce the pumping energy cost. SDPA reconfigures the pumping schedule without any additional investment in pumping stations for water distribution systems. In comparison to the IDPA (Improved dynamic programming algorithm) and CWLC (conventional water level control) approach, simulation results showed that with SDPA, significant energy savings can be achieved.

Table A. Comparison of CWLC, IDPA and SDPA Results

Quality	CWLC	IDPA ¹	IDPA ²	IDPA ³	SDPA
Decision Period (T_o)	1 min	60 min	30 min	15 min	1 min
Computational Time	13.3 μ s	33.7 μ s	107.4 μ s	371.3 μ s	42.9 μ s
# ON/OFF Switches of Pump	23	8	14	27	5
Total Pumped Water Amount	3555 m ³	3726 m ³	3609 m ³	3551 m ³	3543 m ³
Pumping Time (Standard)	412 min	420 min	420 min	420 min	418 min
Pumping Time (On-Peak)	240 min	180 min	150 min	135 min	123 min
Pumping Time (Off-Peak)	264 min	360 min	360 min	360 min	372 min
Pumping Time (Total)	916 min	960 min	930 min	915 min	913 min
Daily Electricity Cost	1832 ₺	1771 ₺	1680 ₺	1634 ₺	1607 ₺
Pumping Cost for each (m ³)	0.5152 ₺	0.4752 ₺	0.4654 ₺	0.4602 ₺	0.4535 ₺
Savings Rate Compared to CWLC	-	7.75 %	9.67 %	10.68 %	11.97 %

Purpose: To reduce the pumping energy cost by optimizing only the pumping schedule without any improvement in equipment and physical conditions in water distribution systems.

Theory and Methods:

Instead of finding the best daily pumping schedule that may occur when the possible number of daily pumping schedules is 2^n , where n is the number of time periods for one day, SDPA tries to reach the desired level values in the transitions between the electricity tariffs.

Results:

The implementation of SDPA in the real environment compared with the currently used CWLC approach, SDPA reduces the number of daily ON/OFF switches of the pump from 23 to 5 and reduced pumping electricity costs from 0.5152 ₺/m³ to 0.4535 ₺/m³, resulting in extend the lifetime of the pump and lower energy costs. SDPA has shown that it can reduce the energy cost used by approximately 11.97%.

Conclusion:

In this study, a new approach, which can significantly shift the load of the on-peak time period to the off-peak time period, by changing only the pumping schedule, without any improvement in the equipment and physical conditions in water distribution systems, is proposed. The implementation of the proposed algorithm shows that the pumping costs in the work area have been reduced by approximately 12%. This means that a monthly saving of 6,560 ₺ and an annual saving of 79,815 ₺ can be achieved for the study area.



Su terfi istasyonlarının yük kaydırmalı işletimi için yeni bir algoritma

Hayri Küçük^{1*}, Mustafa Turan¹, Kadir Yaralı¹, Hussein Al-Sanabani², Murat İskefiyeli²

¹Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 54050, Türkiye

²Sakarya Üniversitesi, Bilgisayar ve Bilişim Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Sakarya, 54050, Türkiye

Ö N E Ç I K A N L A R

- Pompa Açma-Kapama frekansı ciddi oranda azaltılır
- Düşük işlem gücüne sahip endüstriyel kontrolörlere uygulanabilir
- Yenilikçi ve gelişmeye açık bir yük kaydırma algoritması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 11.09.2020

Kabul: 06.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.772939

Anahtar Kelimeler:

Enerji verimliliği,
yük kaydırma,
optimal pompalama
çizelgesi,
optimizasyon algoritması,
su dağıtım sistemi

ÖZ

Su dağıtım sistemlerinin işletilmesindeki en yüksek gider kalemini, pompalama için kullanılan enerji maliyeti oluşturmaktadır. Çok zamanlı elektrik tarifi ve kentsel su talebi ile bağlantılı olarak, su dağıtım sistemlerindeki istasyonlara ait pompalama çizelgesinin optimizasyonu problemi matematiksel olarak modellenilebilir. Bu çalışmada, pompalama enerji maliyetini düşürmeye yönelik olarak, pompalama çizelgesinin optimizasyonu problemini çözmek için yeni bir algoritma (SDPA-sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması) elde edilmiştir. Konvansiyonel su seviyesi kontrolü (CWLC-conventional water level control) yaklaşımının kullanılmasıyla oluşan enerji maliyeti referans alındığında elde edilen simülasyon sonuçları, SDPA'nın geliştirilmiş dinamik programlama algoritması (IDPA-improved dynamic programming algorithm) yaklaşımına kıyasla daha fazla tasarruf elde edebileceğini göstermiştir. Ayrıca SDPA, IDPA yaklaşımında karşılaşılan karar periyodu küçülürken pompa çalışma frekansının artması probleminin de önüne geçerek, pompa açma-kapama karar sayısını oldukça düşük tutmayı başarmıştır. SDPA, Sakarya ilindeki bir su dağıtım sistemine ait bir pompalama istasyonuna uygulanmış ve puant periyodundaki enerji talebini önemli ölçüde gece periyoduna kaydırarak, CWLC yaklaşımına kıyasla enerji maliyetinde yaklaşık %12'lik bir tasarruf sağlamıştır. Su dağıtım sistemlerine ait pompalama istasyonlarında ilave yatırım yapmaksızın, sadece pompalama çizelgesinin yapılandırıldığı bu algoritmanın kullanılmasıyla, önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlanabileceği görülmüştür.

A new algorithm for load shifting operation of water pumping stations

H I G H L I G H T S

- Pump On-Off frequency is significantly reduced
- Applicable to industrial controllers with low processing power
- An innovative and evolving load shifting algorithm

Article Info

Research Article

Received: 11.09.2020

Accepted: 06.04.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.772939

Keywords:

Energy efficiency,
load shifting,
optimal pumping scheduling,
optimization algorithm,
water distribution system

ABSTRACT

The highest cost item in the operation of water distribution systems is the energy cost used for pumping. With regard to Time-of-Use (TOU) electricity tariffs and urban water demand, the optimization of the pumping schedule of the stations in the water distribution systems can be modeled mathematically. In this study, a new algorithm (SDPA- simplified dynamic programming algorithm) was used to solve the pumping schedule optimization problem in order to reduce the pumping energy cost. By shifting the energy demand during the on-peak period to the off-peak period, SDPA was applied to a pumping station belonging to a water distribution system in Sakarya province, a 12% saving on the cost of energy was realized. In comparison to the IDPA (Improved dynamic programming algorithm), and CWLC (conventional water level control) approach, the simulation results showed that SDPA can achieve more savings in energy cost generated. In addition, SDPA managed to keep the count of pump on-off decisions quite small by preventing the problem of increasing pump operating frequency while the decision period getting very smaller than the decision period in IDPA approach. Therefore, we can conclude that using SDPA to reconfigure the pumping schedule without any additional investment in the pumping stations of water distribution systems, can achieve significant energy savings.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Su temini sistemleri ve su dağıtım ağları, endüstriyel toplumun hayati ve kritik altyapı varlıklarından birini temsil etmektedir. Dünyadaki elektrik tüketiminin yaklaşık %2 ila %3'ü su temin sistemleri için kullanılır [1]. Yerel yönetimler, harcadıkları elektriğin yaklaşık %30-40'lık bir kısmını, sahip oldukları içme suyu ve atık su tesislerini işletmek için kullanırlar [2, 3]. İçme suyu tesislerinde tüketilen elektriğin büyük bir kısmı da (yaklaşık %80) pompalama için kullanılan motorlar tarafından harcanmaktadır [2-4]. Artan su ve atık su kapasitesine olan ihtiyacın sürekli olarak artmasıyla oluşan enerji maliyetindeki artışların azaltılmasına yönelik tasarım ve işletme yöntemleri, tasarımcılar ve operatörler tarafından daha fazla dikkate alınmasına neden olmaktadır.

İçme suyu ve atık su tesislerindeki pompalama maliyetlerinin düşürülmesine yönelik; gereksiz pompa çalışmalarını önleyecek uygun bir izleme/kontrol stratejisi kullanma [5], pompalanan su miktarını azaltacak kayıp/kaçakları önleme [6], sabit akış ihtiyacı olan yerlerde gereğinden yüksek akış sağlayan büyük pompaları daha uygun boyuttaki pompalarla değiştirme [7] veya değişken hızlı sürücüler ile sürme [5, 8], pompalama ekipmanlarına düzenli/önleyici bakımlar yapma [5] ve/veya pompaları daha yüksek verimli pompalarla değiştirme [9] yöntemleri ayrı ayrı veya birlikte kullanılarak, harcanan elektrik miktarında önemli ölçüde düşüşler sağlanabilir. Harcanan toplam enerji miktarını düşürmeyi hedefleyen bu yöntemlerin yanında, ihtiyaç duyulan enerji miktarını değiştirmeden, elektrik birim fiyat farklarından yararlanmak için çok zamanlı elektrik tarifeleriyle birlikte yük kaydırma/öteleme (load shifting) yöntemleri kullanılarak harcanan elektriğin birim maliyeti düşürülebilir.

Elektrik güç talebinin günün bazı dönemlerinde (puant) ortalamanın oldukça üzerine çıkması; elektrik dağıtım şirketlerinin, oluşan bu kısa süreli yüksek talebi karşılamakta zorlanmasına [10, 11], kısa süreli oluşan bu talebi engellemek için "Çok Zamanlı Tarife" uygulamalarına (puant zamanı birim fiyatını arttırıp diğer dönem birim fiyatını düşürmesine) sebep olmuştur [12]. Dağıtım şirketleri, çok zamanlı tarifeler uygulayarak, kullanıcıların talep tarafı yönetimine (TTY-demand side management) dolaylı olarak katkıda bulunmalarını hedeflemektedir. Böylece; dağıtım şirketi, karşılamakta zorluk çektiği kısa süreli yük yoğunluğunu düşürürken, TTY'ye katkı sağlayacak yöntemler [12-14] kullanan müşterilerine de elektrik maliyetlerini düşürme imkanı sunabilmektedir.

Birçok alanda elektrik maliyetlerini düşürmeye yönelik, TTY'ye katkı sağlayacak; iş planını puant zamanına göre planlama, puant zamanı harcanacak gücü jeneratörlerden veya önceden şarj edilmiş (yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla veya ucuz tarife zamanında şebekeden) bataryalardan karşılama gibi yük kaydırma/öteleme yöntemleri kullanılabilir [14, 15]. Bu yöntemlerden

ziyade, içme suyu dağıtım sistemlerindeki pompalama maliyetlerinin düşürülmesine yönelik daha önce yapılan akademik çalışmalarda [16-19], içme suyu depo kapasitelerinden faydalanılarak elektrik yüklerinin puant dışına kaydırılması/ötelenmesi yöntemleri kullanılmıştır.

Teorik olarak, yüksekte bulunan içme suyu depoları yeterince büyük tasarlanırsa, pompalama maliyetlerinin düşürülmesi için depolar sadece yoğun olmayan saatlerde doldurularak, tüm zamanlarda su tedarik etmeleri sağlanabilir [16]. Depoların bu şartı sağlayacak şekilde tasarlanması, pompalamanın yük kaydırmaya/ötelemeye yönelik yapılması için geliştirilecek kontrol algoritmasının da oldukça basit bir şekilde oluşturulabilmesini sağlayacaktır. En basit ifade ile en ucuz zaman dilimine girildiğinde tüm depolar azami derecede dolu tutulacak, bu zaman dilimden çıkıldığında tüm pompalar durdurulacaktır. Bu oldukça makul bir çözüm olsa da istenen bu şartı sağlayacak depo kapasitesi, depodan talep edilecek günlük su miktarının yüksek olduğu durumlarda, kolay inşa edilemeyecek büyüklüklere çıkabilir. Ayrıca, depo kapasitesinin çok büyük olduğu durumda, yalnızca en ucuz zaman diliminde pompalama yapabilmek için pompaların ve basma hattının da bu talebi karşılayacak büyüklüklerde olması gerekecektir. Su depolarını bir enerji depolama birimi olarak düşünür ve bir bataryaya benzetsek olursak, batarya en ucuz saatlerde şarj edilecek ve tüm zaman dilimlerinde enerji kullanımına müsaade edecek büyüklükte olmalıdır. Günlük enerji talebi arttıkça da bataryanın kapasitesi artarken, şarj olma süresinin de kısalması gerekecektir. Dolayısıyla talep arttıkça, batarya/şarj ünitesi (depo/pompalama ekipmanları) maliyetleri de hızla artacaktır. Bu durumda fiyat-performans değerlendirmesi yapılarak uygun boyutlandırma yapılabilir.

Su depolarının ve pompalama ekipmanlarının, pompalamanın sadece en ucuz zaman diliminde yapılabilmesine müsaade edecek kadar büyük inşa edilememesi veya hali hazırda kurulu olan pompalama istasyonlarının güncel talep artışından dolayı istenen şartları sağlayamaması (depo/pompalama ekipman kapasiteleri) durumlarında, pompalamanın mevcut depo kapasitesinden azami derecede faydalanmayı sağlayacak şekilde yapılması gerekmektedir. Fiziksel unsurların değişmediği su tedarik sisteminde enerji maliyeti, pompalama zamanları ve elektrik fiyat yapısı ile ilgilidir [20]. Bu durum, pompalama çizelgesinin optimizasyonu problemini ortaya çıkarmakta ve yük kaydırmaya/ötelemeye yönelik geliştirilecek kontrol algoritmasının da daha karmaşık bir hal almasına sebep olmaktadır.

Bu çalışmada; mevcut içme suyu dağıtım sistemlerindeki ekipmanlar ve fiziksel şartlarda herhangi bir iyileştirme yapmadan, son kullanıcıların su ihtiyacını kesintiye uğratmayacak şekilde, enerji tasarrufu yönünden pompalama çizelgesini optimize ederek, yüksekte depolanan suyu stratejik olarak kullanan (depo kapasitelerinden azami derecede faydalanan), pompalama yüklerini azami derecede puant zaman periyodundan gece zaman periyoduna

kaydırır/öteleyen, böylece üç zamanlı elektrik tarifesinin birim fiyat farklarından yararlanmak suretiyle pompalama enerji maliyetini kayda değer ölçüde düşürebilen bir algoritma (SDPA-sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması) geliştirilmiştir. SDPA'nın kullanılması halinde, elektrik maliyetlerini düşürmeye yönelik ne derecede fayda sağlayacağını görebilmek için, Sakarya şehri içme suyu dağıtım sistemine ait bir pompalama istasyonu ve yüksekte bulunan depo çalışma alanı olarak seçilmiştir. Mevcutta kullanılan konvansiyonel su seviye kontrolü (CWLC-conventional water level control) algoritması, daha önce geliştirilmiş dinamik programlama algoritması (IDPA-improved dynamic programming algorithm) [20] ve SDPA'nın çalışma alanına uygulanmaları durumunda elde edilecek sonuçlar karşılaştırılmış, SDPA'nın diğer algoritmalara göre sağladığı avantajlar ortaya konulmuştur.

2. MATERYAL VE METOT (MATERIAL AND METHOD)

2.1. Çalışma Alanının Tanıtımı

(General Information About the Case Study Area)

Sakarya şehrindeki Serdivan ilçesinde bulunan Kazım Paşa Mahallesi sınırları içerisindeki bir yüksek su deposu ve bu depoya su pompalayan Sakarya Üniversitesi kampüsü içerisinde bulunan bir pompalama istasyonu çalışma alanı olarak seçilmiştir. Çalışma alanındaki bu yüksek su deposu yaklaşık 16000 kişilik nüfusun su talebini karşılayarak hizmet vermektedir. Su kaynağında bulunan pompalama istasyonunda bulunan santrifüj pompa ile su yüksekteki depoya pompalanmaktadır. Yüksekte bulunan su deposunun seviyesi bir seviye sensörü ile ölçülmektedir. Kullanıcıların depodan talep ettikleri su miktarı, deponun çıkışında bulunan bir debimetre ile ölçülmektedir.

Depo ve pompa istasyonlarında birer programlanabilir lojik kontrol (PLC-programmable logic controller) kullanılmaktadır. Her iki istasyonda bulunan GSM modemler sayesinde depo ve pompalama istasyonlarında bulunan PLC'ler birbirleri ve merkezde bulunan bir server ile haberleşebilmektedir. Bu sayede, depoda ölçülen seviye değeri pompalama istasyonuna gönderilir ve sabit hızlı santrifüj pompa, seviye değerine göre çalıştırılarak, suyu kaynaktan tepedeki hedef depoya pompalar. Hali hazırda çalışma alanındaki pompalama, konvansiyonel su seviye kontrolü (CWLC-conventional water level control) yöntemi kullanılarak yapılmaktadır. PLC'ler üzerinde toplanan pompa çalışma durumları ve ölçüm değerleri merkezdeki bir server üzerinde sürekli olarak kayıt altına alınmaktadır.

Çalışma alanındaki pompalama istasyonunda üç zamanlı tarife kullanılmakta ve kullanılan elektrik, en yoğun (puant), standart (gündüz) ve yoğun olmayan (gece) süreler boyunca farklı tarifeler üzerinden ücretlendirilmektedir.

2.2. Metot (Method)

Pompalamanın 24 saatlik elektrik maliyeti (Z), örnekleme/açma-kapama karar periyodunun (T_o) dakika

olarak alınması durumunda (örnek sayısı $n = \frac{24 \cdot 60}{T_o}$ adet) Eş. 1 ile hesaplanabilir.

$$Z = \frac{T_o}{60} \cdot E \sum_{i=1}^n d(i) \cdot M(i), \quad \forall i \in [1, n] \quad (1)$$

Burada, E pompanın nominal gücünü; $d(i)$ pompanın çalışma durumunu (pompa çalışırken $d(i) = 1$ ve pompa kapalıyken $d(i) = 0$); $M(i)$ içinde bulunulan zaman periyodundaki elektrik birim fiyatını (₺/kWh) göstermektedir. Pompa gücü ve elektrik birim fiyatları daha önceden belirlenmiş ve sabit değerler olduğundan, Z 'yi etkileyecek tek değişken pompalama çizelgesi $d(i)$ 'dir.

Yük kaydırma için pompalama çizelgesi optimize edilmek istendiğinde; elektrik birim fiyatları, seviye kısıtları ve gün içerisindeki su talep yoğunlukları birlikte dikkate alınmak zorundadır. Pompalama çizelgesini optimize ederken dikkat edeceğimiz L_l deponun asgari seviye yüzdesi ve L_h deponun azami seviye yüzdesi olmak üzere, depo seviye kısıtları Eş. 2'de ifade edilmiştir. L_l ve L_h işletmeci tarafından belirlenen sabit değerlerdir.

$$L_l \leq L_{i+1} \leq L_h, \quad \forall i \in [1, n] \quad (2)$$

Günlük toplam su talebi (C_d) kullanılarak, gün içerisindeki ortalama saatlik tüketim (C_{ort}) Eş. 3 ile hesaplanır.

$$C_{ort} = \frac{C_d}{24} \quad (3)$$

C_{ort} ve içinde bulunulan saatin toplam tüketimi (C_T) kullanılarak, içinde bulunulan saatin tüketim faktörü (C_h) Eş. 4 ile hesaplanır.

$$C_h(i) = \frac{C_{ort}}{C_T(i)}, \quad \forall i \in [1, n] \quad (4)$$

C_{ort} ve $C_h(i)$ değerleri kullanılarak; $Q(i)$, tüketim miktarı Eş. 5 ile hesaplanır.

$$Q(i) = \frac{C_{ort} \cdot C_h(i)}{60}, \quad \forall i \in [1, n] \quad (5)$$

Tüketim miktarı $Q(i)$, depo seviyesinin bir önceki periyot sonundaki yüzdellik değeri $L(i-1)$, sabit olduğunu varsaydığımız ve herhangi bir i periyodunda pompanın terfi ettirdiği su miktarı Q_p ve deponun toplam su tutma kapasitesi C^* değerleri kullanılarak; içinde bulunulan i periyodunun sonunda ulaşılabilecek depo seviyesi $L(i)$ 'nin bir önceki periyotta verilen pompa açma-kapama kararı $d(i-1)$ ile devam edilmesi durumunda nasıl değişeceği Eş. 6 ile hesaplanabilir.

$$L(i) = L(i-1) + \left(\frac{Q_p \cdot d(i-1) - Q(i)}{C^*} \right) \cdot 100, \quad \forall i \in [1, n] \quad (6)$$

Hesaplanan seviye değeri ve enerji kullanım miktarını etkileyecek diğer şartlara göre pompa açma-kapama kararı değiştirilir veya korunur. Dolayısıyla, pant zaman periyodunda yoğunlaşan yükün geceye kaydırılarak

pompalama maliyetinin düşürülmesi için, belirlenmiş seviye sınırlarının dışına çıkmadan pompalama çizelgesinin optimize edilmesi problemi ortaya çıkmaktadır. Depo seviyesi sınır değerleri içinde tutulmak şartıyla, 24 saat boyunca pompa için en iyi açma-kapama kontrol sekansı $d(i)$ bulunursa, puant zamanı yükü (su talebi) azami derecede geceye kaydırılarak pompalama enerji maliyeti en aza indirilir [1, 20].

2.3. Yazılım Dilleri ve Algoritma (Software Languages and Algorithm)

Mevcutta kullanılan CWLC, daha önceki çalışmalarda geliştirilen IDPA ve bu çalışmada geliştirilen SDPA yaklaşımlarının simülasyonları C# dili ile yazılan bir uygulama ile yapılmıştır. Simülasyonların tamamı aynı bilgisayarda (AMD RyzenTM 5 3600, 3.59GHz, 8GB RAM) ve CWLC yaklaşımının gerçekte uygulandığı zaman diliminde SQL (structured query language) veri tabanına kaydedilerek elde edilen gerçek veriler ile gerçekleştirilmiştir. Gerçek uygulamalı çalışmalarda, sahada kontrolör olarak PLC kullanıldığı için merdiven diyagram (ladder diagram) ve yapısal kontrol dili (SCL- structured control language) kullanılmıştır.

Algoritma girişlerinden, kullanılan elektrik tarifesinin kaç zamanlı olduğu I ve her bir tarife boyunca uygulanan fiyatlandırmalar M , işletmeci tarafından belirlenecek olan L_l ve L_n değerlerine göre seçilecek olan her bir tarife sonunda ulaşılmaya hedeflenen yüzde depo seviyeleri $L = \{L_1, L_2, L_3\}$ değerleri bilinecek sabit değerlerdir. Günlük su talebi C_d , deponun toplam su tutma kapasitesi C^* , her bir tarife boyunca gerçekleşen su talebinin günlük su talebine oranı $C = \{C_1, C_2, C_3\}$, her bir tarifede kalınan süreler $T = \{T_1, T_2, T_3\}$, pompa kapasitesi Q_p , sürekli olarak ölçülen depo seviyesinin başlangıçtaki değeri L_0 ve başlangıçtaki pompa çalışma durumu D_0 bilinebilir. Bilinen bu değerler kullanılarak, herhangi bir periyotta, içinde bulunulan tarife sonunda hedeflenen seviyeye ulaşmak için tarife boyunca kaç m^3 su pompalandığı Q_s , kaç m^3 daha su pompalanması gerektiği Q_a , yapılması gereken bu pompalama miktarı için gerekli süre T_g , tarifinin bitmesine kalan süre T_k gibi değişken değerleri kolayca hesaplanabilir. Böylece, tarife sonunda hedeflenen seviyeye ulaşılmasını sağlayacak pompa açma-kapama ($D[i] = 1$ açma, $D[i] = 0$, kapama) kararları kolayca verilerek $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ pompalama çizelgesi oluşturulur.

Algoritmanın çalışma durumlarını belirlemek için bir S değişkeni kullanılır. Her tarifeye başlangıç durumu olan $S = 0$ durumu ile başlanılır ve seviye sınır değerleri aşılmadığı sürece $S = 0$ durumundan çıkılmaz. Şayet tarife boyunca seviye sınır değerleri aşılmaz ise pompalama $T_g = T_k$ şartının sağlanmasıyla başlatılıp, tarife sonunda sonlandırılarak, tarife boyunca pompaya bir kez açma-kapama yaptırılmış olunur. Seviye alt sınırı aşıldığında depo boş durumu olan $S=1$ durumuna geçilerek pompalama başlatılır, seviye üst sınırı aşıldığında depo dolu durumu olan $S = 2$ durumuna geçilerek pompalama durdurulur.

Başlangıç, depo dolu, depo boş durumlarından birine geçildiğinde; algoritma, bulunduğu tarife ve seviye sınır şartlarını göz önünde bulundurarak, mümkün mertebe bulunduğu durumda kalmaya çalışır. Durumlar arasındaki asgari geçiş, pompa açma-kapama sayısının da asgari düzeyde olmasını sağlar. Algoritma, gerekli tüm şartlara bakarak durumlar arasında geçiş yapar ve pompalama çizelgesi D' 'yi oluşturur. Programlanan SDPA'nın akış diyagramı Şekil 1'de gösterilmiştir.

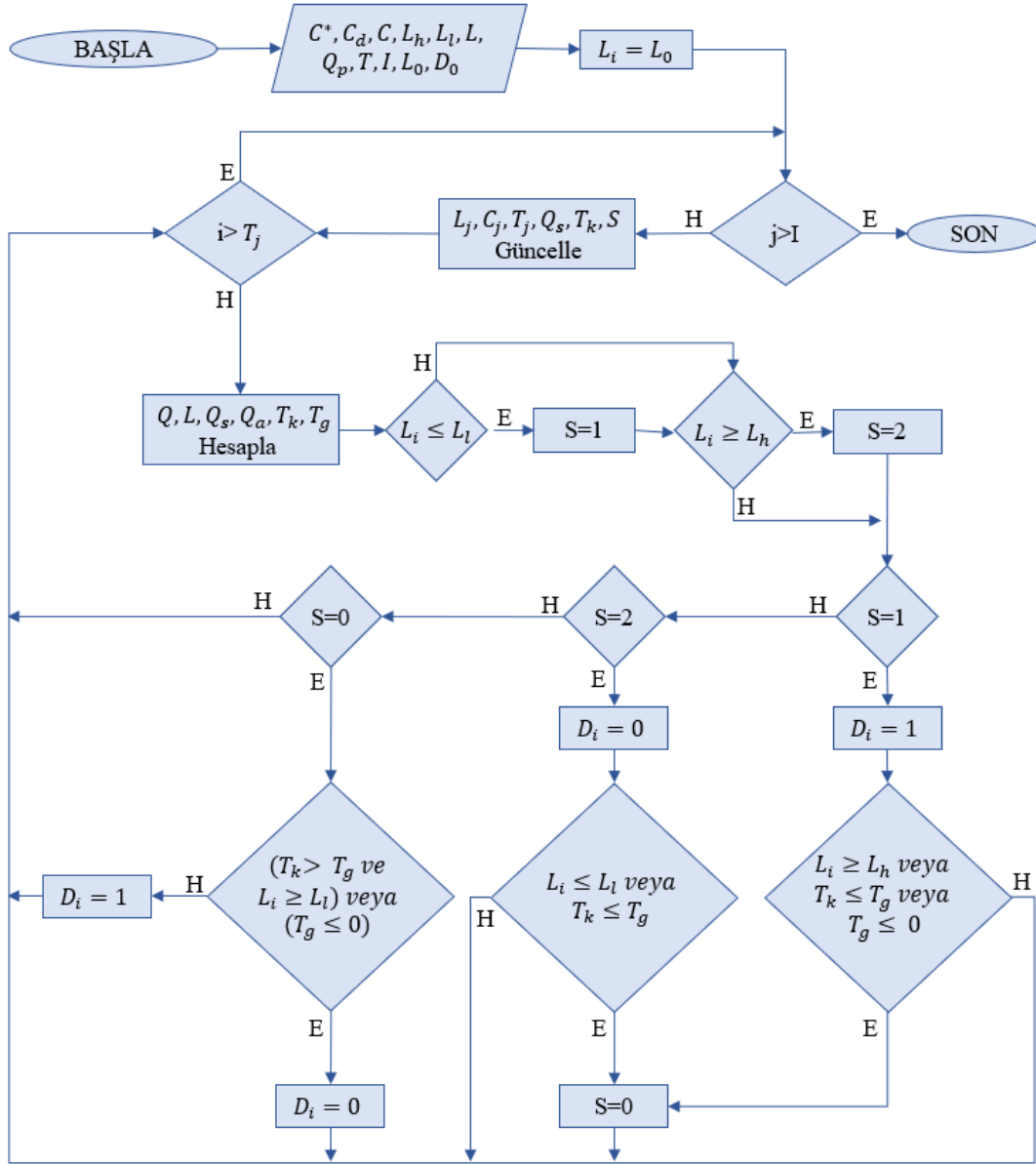
3. UYGULAMALI ÇALIŞMALAR (APPLIED STUDIES)

Birinci bölümünde su kaynağı ve sabit hızlı bir pompanın bulunduğu pompalama istasyonu, ikinci bölümünde suyun terfi ettirildiği ve çıkışında debimetre bulunan yüksek su deposunun bulunduğu çalışma alanı şematik olarak Şekil 2'de gösterilmiştir. Pompa istasyonu ve depoya ait bazı bilgiler Tablo 1'de ve pompalama istasyonunda kullanılan elektrik tarifesine ait birim fiyatlar Tablo 2'de gösterilmiştir.

Çalışma alanındaki içme suyu deposundan talep edilen günlük toplam su miktarı $C_d = 3544 m^3$ 'tür. Şekil 3'teki talep eğrisi, saatlik ortalama talep ile gün içindeki ortalama saatlik talep arasındaki ilişkiyi (tüketim faktörü, C_h) ve günün farklı dönemlerinde farklı su taleplerinin olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, günlük toplam su talebi (C_d) ve gün içindeki saatlik tüketim faktörünün sabit olduğunu varsayıyoruz çünkü bu çalışma, tüketim tahmin modülüne değil optimizasyon algoritmasının çalışma alanındaki şartlar altında en iyi çözümü vermesine odaklanmaktadır.

Bu vaka çalışmasındaki su temin sisteminde, konvansiyonel su seviye kontrolü (CWLC-conventional water level control) yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemde amaç, kullanıcıların taleplerini aksatmamaya yönelik olarak içme suyu depo seviyesini belirlenen üst ve alt değerler arasında tutmaktır. Bu amaca yönelik, içme suyu deposunun seviyesi sürekli olarak ölçülür ve ölçüm değeri çeşitli telemetri yöntemleri kullanılarak pompalama istasyonuna gönderilir. Alınan bu güncel seviye değeri, kullanıcının önceden belirlemiş olduğu üst ve alt sınır seviye değerleri ile kıyaslanarak pompalamanın yapılıp yapılmayacağı kararı verilir. Güncel seviye değeri belirlenmiş alt sınır değerine ulaştığında pompalama işlemi başlatılarak depo şarj edilir, depo şarj edilirken belirlenmiş üst sınır seviye değerine ulaşıldığında pompalama işlemi durdurularak deponun deşarj olması beklenir.

Kullanılan klasik seviye kontrolü yönteminde, pompanın çalışma durumunu etkileyen tek faktör seviye sensörü ile ölçülen deponun su seviyesidir. Tüketim değerleri ve elektrik birim fiyatları dikkate alınmaz, elektrik maliyeti açısından bir optimizasyon söz konusu değildir. Çalışma alanındaki su temin sisteminde kullanılmakta olan CWLC yöntemi için belirlenmiş üst seviye sınır değeri %95, alt seviye sınır değeri %85'tir. CWLC yönteminin kullanılmasıyla oluşan seviye, pompa çalışma durumları ve zamana göre elektrik birim fiyatları Şekil 4'te gösterilmektedir.



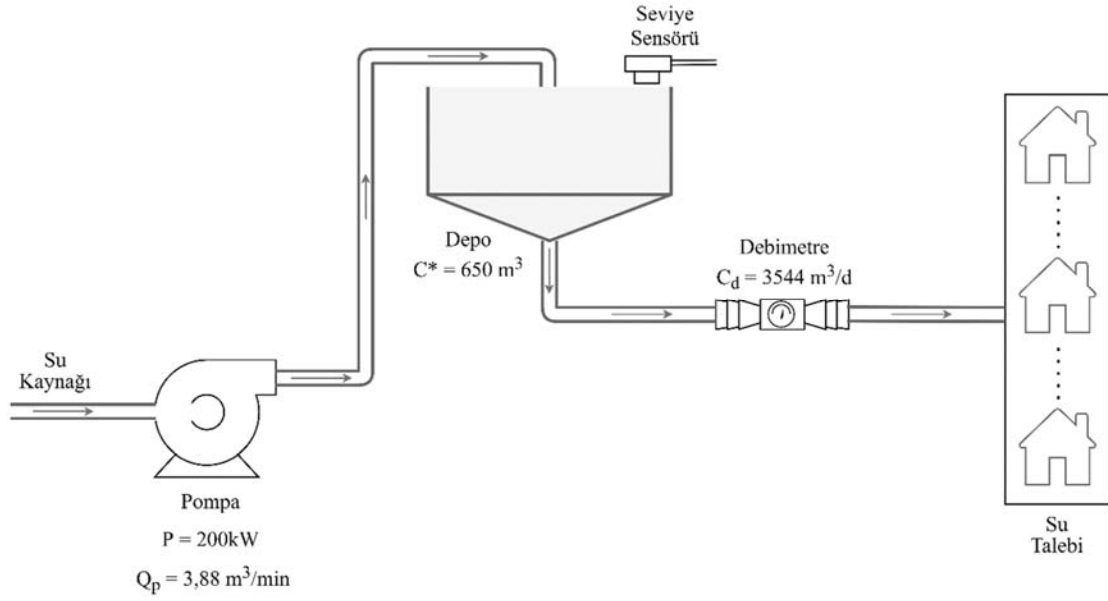
Şekil 1. Akış Diyagramı (Flow Chart)

Bu yöntemde, elektrik birim fiyatları dikkate alınmadığından gece, gündüz ve puant zaman periyotlarındaki pompalama yoğunlukları tüketim yoğunluğuyla orantılı olarak şekillenmiştir. Şekil 4'ten de görülebileceği üzere, su talep yoğunluğu elektrik talep yoğunluğuna paralel bir şekilde değiştiğinden dolayı, gece zaman periyodu boyunca geçen sürenin %55'i, gündüz zaman periyodu boyunca geçen sürenin %62,4'ü, puant zaman periyodu boyunca geçen sürenin %80'i boyunca pompalama yapılmıştır. Yani en yoğun pompalama, elektrik birim fiyatının en yüksek olduğu puant zaman periyodunda yapılmaktadır ve yüksek enerji maliyetine sebep olmaktadır. Enerji maliyetinin düşürülmesi için, seviye değeri ile tüketim değerleri ve elektrik birim fiyatları birlikte dikkate alınarak pompalama çizelgesinin optimize edilmesi gerekmektedir.

4. ÇÖZÜMLER (SOLUTIONS)

4.1. IDPA Yaklaşımı (IDPA Approach)

IDPA, su dağıtım sistemlerinde daha önce kullanılmış olan dal sınır algoritmasında (BABA-branch and bound algorithm) iyileştirmeler yapılarak geliştirilmiş bir dinamik programlama algoritmasıdır. Periyot sayısının (pompa açma-kapama karar sayısının) n olduğu durumda, pompa çizelgesi için 2^n adet ihtimal oluşur. BABA algoritması bu 2^n ihtimalden en iyisini bulmaya çalışırken, örnekleme/açma-kapama karar periyodu T_0 'nun kısalması durumunda çözüm süresi algoritmanın kullanılabilmesini engelleyecek kadar uzayabilir. IDPA yaklaşımı, 2^n ihtimal sayısını $n + 1$ 'e düşürerek, BABA algoritmasına kıyasla problemin çözüm



Şekil 2. Çalışma Alanının Şematik Gösterimi (Schematic Representation of the Study Area)

Tablo 1. Pompa ve Depoya Ait Bilgiler (Information About the Pump and Tank)

Nitelik	Simge	Değer	Birim
Deponun Azami Su Tutuma Kapasitesi (%100)	C^*	650	m^3
Günlük Su Talebi	C_d	3544	m^3
Pompanın Nominal Gücü	P	200	kW
Pompa Akış Kapasitesi	Q_p	3,88	m^3/min



Şekil 3. Tüketim Faktörü (Consumption Factor)

süresini kayda değer bir ölçüde düşürmeyi başarmasına rağmen, aynı karar periyotlarında aynı sonucu vermektedir.

Tablo 2. Elektrik Birim Fiyatları (Electricity Unit Prices)

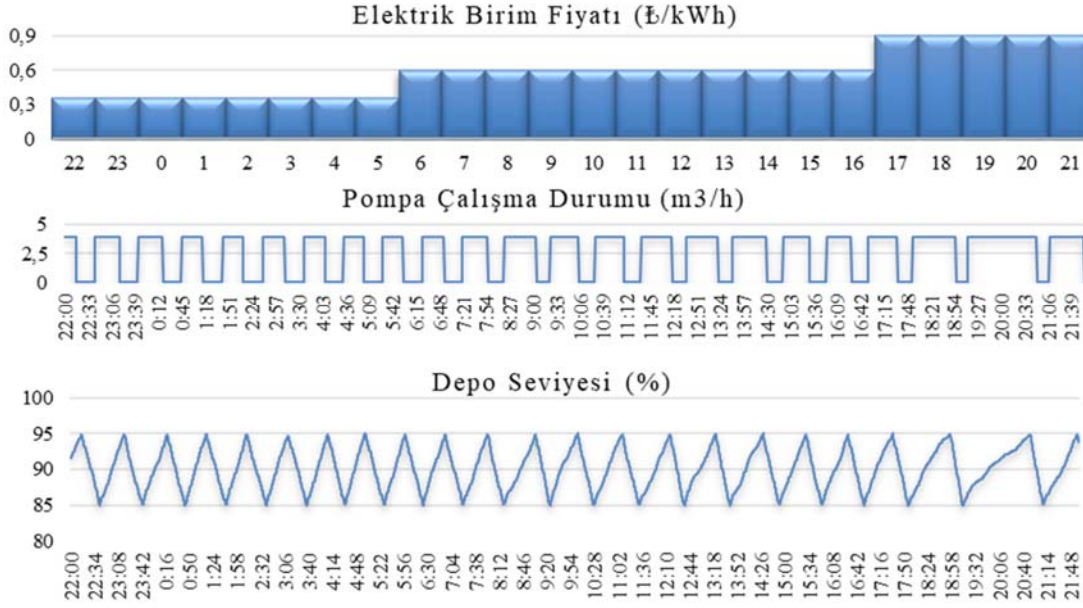
Tarife Adı	Süre	Birim Fiyat (₺/kWh)
Puant	17:00-22:00	0,9119
Gündüz	06:00-17:00	0,5904
Gece	22:00-06:00	0,3309

Optimizasyon açısından bakıldığında, T_o değeri ne kadar küçük olursa optimizasyon o kadar iyi olur. Eğer T_o çok küçükse, pompa çalışma frekansı (açma-kapama sayısı) büyük olabilir, bu da pompaların kullanım ömrünü kısaltır ve

başlangıç maliyetini artırır. IDPA yaklaşımında, T_o yeterince büyük (60 dakika veya 30 dakika) seçildiği için bu maliyetler göz ardı edilebilir olarak görülmüştür.

4.2. SDPA Yaklaşımı (SDPA Approach)

Pompalama çizelgesinin optimize edilmesi probleminde T_o değeri küçüldükçe daha iyi sonuçlar elde edilebilir olmasına karşın, IDPA yaklaşımında pompa açma-kapama sıklığının kabul edilebilir bir seviyede kalması için T_o yeterince büyük (en küçük 30 dakika seçilmiştir) seçilerek sınırlandırılmalıdır. IDPA yaklaşımı teorik olarak depo kapasitesinden azami derece faydalanabilir gözükse dahi T_o



Şekil 4. CWLC Yaklaşımı, Seviye ve Pompa Çalışma Durumları (CWLC Approach, Level and Pump Operating States)

sınırlanmasından dolayı, pratikte elde edilebilecek en iyi sonuca ulaşamaz.

IDPA için karar periyodunun 30 dakika olduğu durumda, pompa çalıştığındaki seviyenin %10 arttığını, pompa durduğunda seviyenin %15 düştüğünü (çalışma alanımız için değerler geçerli) ve depo seviyesinin yüzdelik üst sınır değeri $L_h = 100$ olduğunu varsayalım. En ucuz birim fiyatın olduğu gece tarifesinden gündüz tarifesine geçmeye 1 periyot kala seviye değeri %90-%100 arasında ise algoritma pompa çalıştığındaki seviyenin %100'ü geçeceği yönünde bir hesap yapacağı için pompayı son periyotta çalıştırmama kararı verecek ve pompa çalışmadığında istenilen %100 dolulukta epeyce uzaklaşılarak en ucuz tarifeden %75-%85 dolulukla çıkılacaktır. Benzer problemler gündüzden puanta, puanttan geceye geçişlerde de yaşanacaktır.

En büyük yük kaydırmayı yapabilmek için; en ucuz elektrik birim fiyatının uygulandığı gece tarifesinden çıkmak üzereyken depo seviyesinin üst sınır değerine (L_h), en pahalı elektrik birim fiyatının uygulandığı puant tarifesinden çıkmak üzereyken depo seviyesinin alt sınır değerine (L_l) en yakın değerde olması gerekliliği tartışılmaz bir gerçektir. Ayrıca çalışma alanımızdaki depoda olduğu gibi; kullanılan depo kapasitesi, puant periyoduna tam dolu girilse dahi puantta hiç pompalama yapılmamasını sağlayamayacak kadar küçük ise, gündüz tarifesinden puant tarifesine geçişte de depo seviyesinin üst sınır değerine yakın olması gerekecektir.

Bu vaka çalışmasında çoklu tarifemizin üç farklı kullanım zamanına ($I = 3$) sahip olduğu ve her bir tarife boyunca uygulanan fiyatlandırmalar; gündüz, puant, gece, periyotları için sırasıyla 0,5904 ₺/kWh, 0,9119 ₺/kWh, 0,3309 ₺/kWh olduğu bilinmektedir. İşletmeci tarafından deponun asgari seviye yüzdesi $L_l = 20$, azami seviye yüzdesi $L_h = 100$

olarak belirlenmiştir. Dolayısıyla, bilinen tarife birim fiyatları ve işletmeci tarafından belirlenen sınır değerleri göz önüne alınarak her bir tarife sonunda ulaşılması hedeflenen seviyelerinin yüzdelik değerleri $L = \{L_1, L_2, L_3\}$ olmak üzere, $L_1 = 100$, $L_2 = 20$, $L_3 = 100$ olarak belirlenmiştir.

Günlük su talebi $C_d = 3544 m^3$, deponun toplam su tutma kapasitesi $C^* = 650 m^3$, her bir tarife boyunca gerçekleşen su talebinin günlük su talebine oranı $C = \{C_1, C_2, C_3\}$, olmak üzere; $C_1 = 0,45$, $C_2 = 0,25$, $C_3 = 0,3$, her bir tarifede kalınan süreler $T = \{T_1, T_2, T_3\}$, olmak üzere; $T_1 = 660 min$, $T_2 = 300 min$, $T_3 = 480 min$, pompa kapasitesi $Q_p = 3,88 m^3/min$, sürekli olarak ölçülen depo seviyesinin başlangıçtaki değeri L_0 ve başlangıçtaki pompa çalışma durumu D_0 bilinmektedir. Algoritma girişleri olan ve bilinen bu değerler kullanılarak tarife sonunda hedeflenen seviyeye ulaşılmasını sağlayacak pompa açma-kapama ($D[i] = 1$ açma, $D[i] = 0$, kapama) kararları kolayca verilir ve enerji optimizasyonu açısından en uygun $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ pompalama çizelgesi oluşturulur.

Dolayısıyla SDPA, IDPA yaklaşımında olduğu gibi büyük bir açma-kapama karar periyodu kullanıp 2^n ihtimalden en iyisini bulmaya çalışmak yerine; oldukça küçük bir açma-kapama karar periyodu kullanıp, tarifeler arası geçişte istenen seviye değerlerine ulaşmayı hedefler. SDPA bu hedefini gerçekleştirirken aynı zamanda, pompa çalışma veya durma kararlarını mümkün olduğunca art arda getirerek pompa açma-kapama sıklığının da artmasına engel olur. SDPA, pompa çalışma frekansını arttırmadan açma-kapama karar periyodu T_o 'nun 1 dakikaya kadar düşürülmesine imkan verirken, pompalama çizelgesini optimize ederek; mevcut depo kapasitesinden azami derecede faydalanılmasını, dolayısıyla azami derecede yük kaydırma ve enerji tasarrufu yapılmasını sağlar.

5. UYGULAMALI ÇALIŞMA SONUÇLARI (APPLIED STUDY RESULTS)

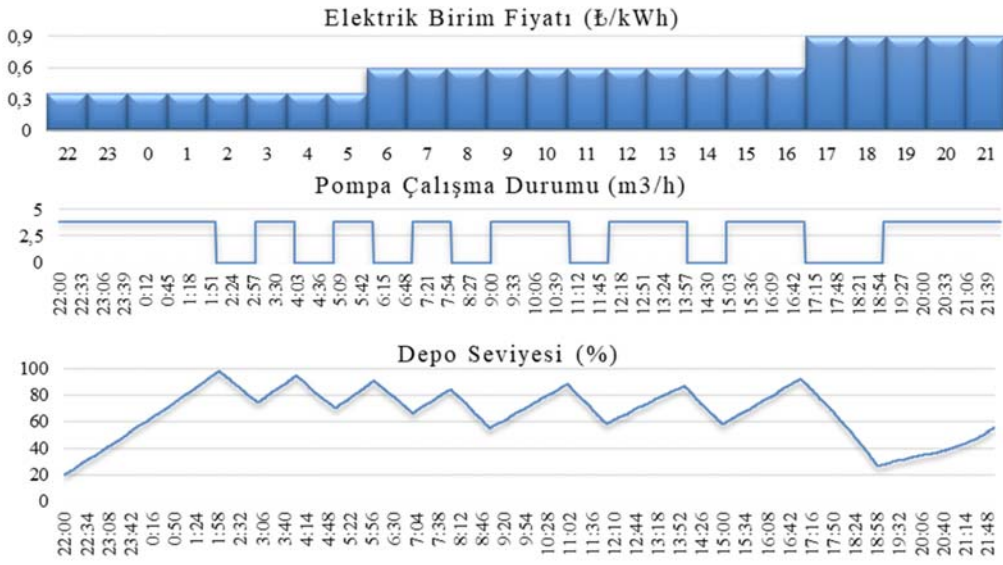
Çalışma alanında, bir gün boyunca konvansiyonel su seviye kontrolü (CWLC) yönteminin kullanılmasıyla oluşan seviye ve pompa çalışma durumları Şekil 4'te gösterilmiştir. Aynı güne ait veriler alınarak, IDPA ve SDPA algoritmaları için simülasyonlar yapılmıştır. Tüm simülasyonlarda seviye sınır değerleri $L_l = 20$ ve $L_h = 100$ olarak alınmıştır.

5.1. IDPA'nın Simülasyonu ve Sonuçları (Simulation and Results of IDPA)

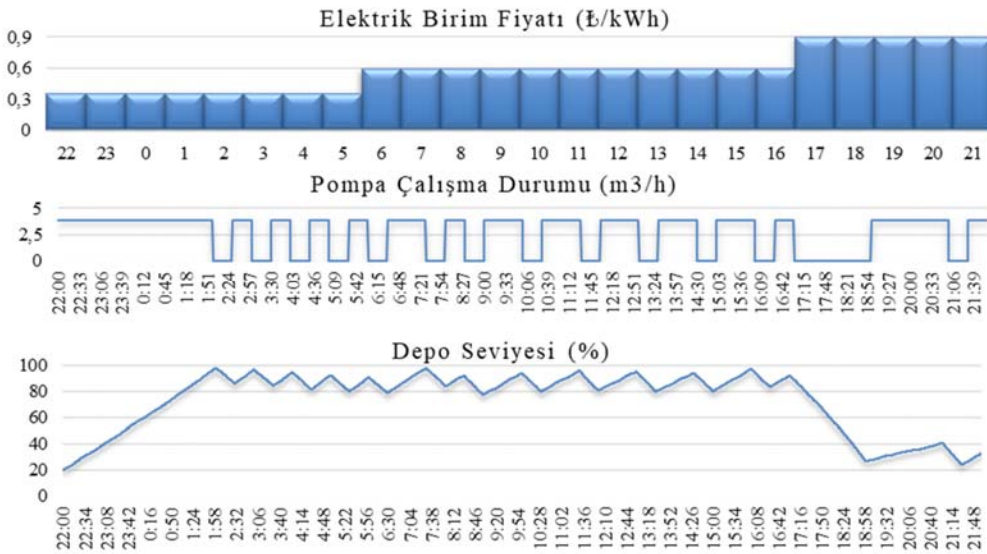
IDPA algoritmasının, üç farklı T_o değeri için simülasyonu gerçekleştirilmiştir. Karar periyodu T_o , 60-30-15 dakika

olarak alındığında, gün boyunca ortaya çıkan seviye ve pompa çalışma durumları sırasıyla Şekil 5, Şekil 6 ve Şekil 7'de gösterilmiştir.

Karar periyodu 60 dakika olduğunda hesaplama süresi 0,0337 milisaniyedir. Tarife geçişlerindeki depo seviyelerinin, sınır değerlerinin oldukça uzağında kaldığı görülmektedir. Karar periyodu 30 dakika olduğunda hesaplama süresi önemsenmeyecek kadar artmıştır ve 0,1074 milisaniyedir. Tarife geçişlerindeki depo seviyelerinin, sınır değerlerine yakınsama göstermesine rağmen yine de uzağında kaldığı görülmektedir. Ayrıca pompa açma-kapama sayısı 8'den 14'e yükselmiştir. Karar periyodu 15 dakika olduğunda hesaplama süresi yine önemsenmeyecek



Şekil 5. IDPA Yaklaşımı, $T_o=60$ min, Seviye ve Pompa Çalışma Durumları
(IDPA Approach, $T_o=60$ min, Level and Pump Operating States)



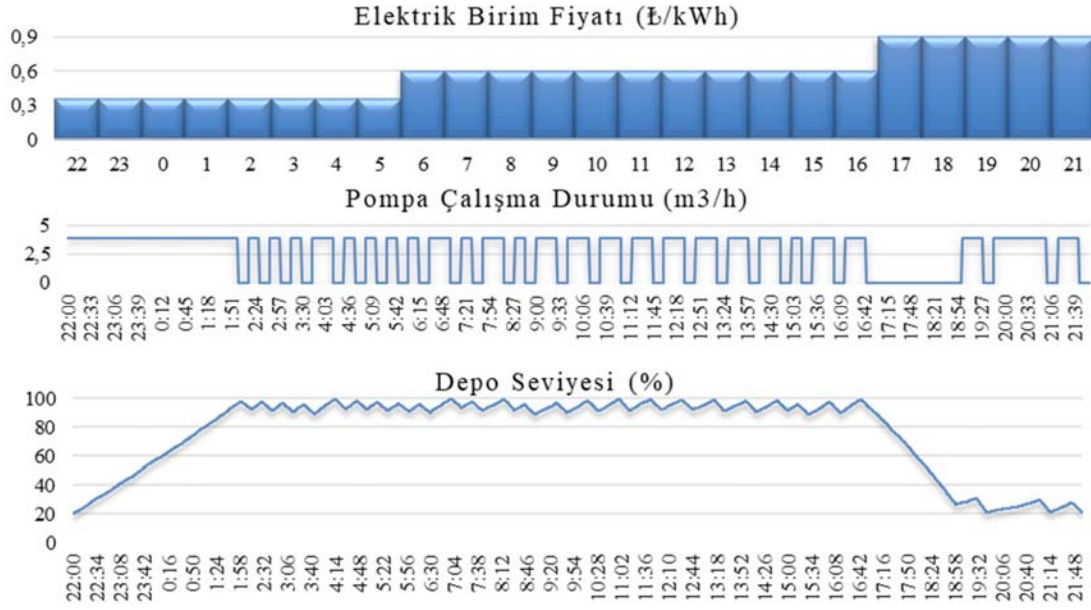
Şekil 6. IDPA Yaklaşımı, $T_o=30$ min, Seviye ve Pompa Çalışma Durumları
(IDPA Approach, $T_o=30$ min, Level and Pump Operating States)

kadar artmıştır ve 0,3713 milisaniyedir. Tarife geçişlerindeki depo seviyeleri, sınır değerlerine oldukça yaklaşmıştır fakat, pompa açma-kapama sayısı 27'ye yükselmiştir.

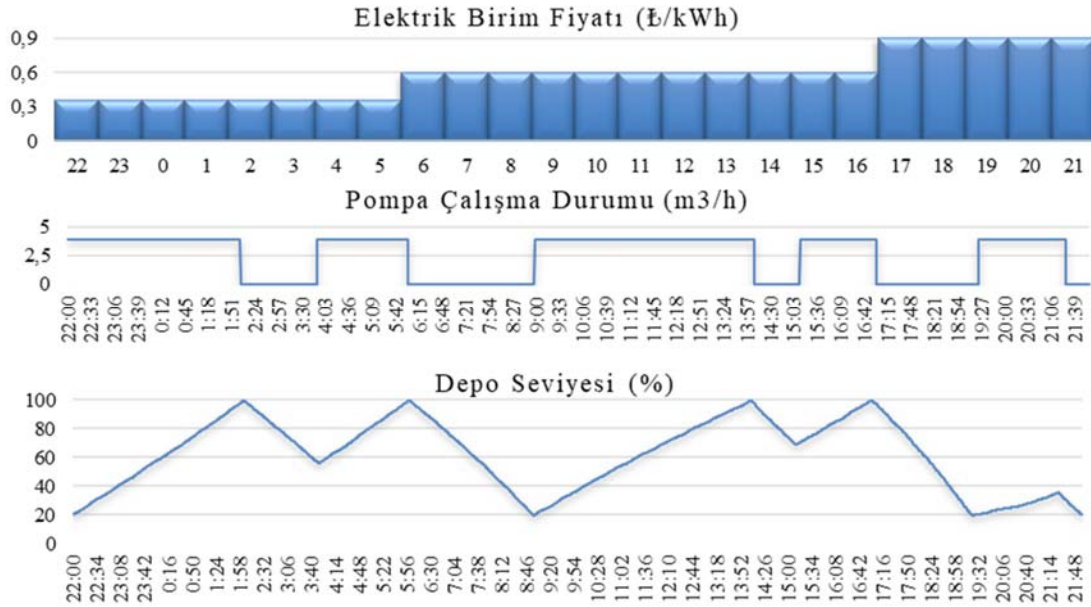
IDPA yaklaşımında T_0 değerinin düşürülmesi ile depo kapasitesinden daha fazla faydalanabileceği, fakat pompa çalışma frekansının da giderek artacağı görülmektedir. Pompa çalışma frekansının aşırı derecede artmasıyla oluşacak olumsuzluklardan asgari düzeyde etkilenmek için T_0 değerini daha fazla düşürmek doğru bir çözüm olmayacaktır.

5.2. SDPA'nın Simülasyonu ve Sonuçları (Simulation and Results of SDPA)

SDPA algoritmasının simülasyonu, karar periyodu T_0 , 1 dakika alınarak gerçekleştirilmiştir. SDPA'nın kullanılmasıyla, gün boyunca ortaya çıkan seviye ve pompa çalışma durumları Şekil 8'de gösterilmiştir. Karar periyodu 1 dakika olduğunda hesaplama süresi 0,0429 milisaniyedir. Tarife geçişlerindeki depo seviyelerinin, sınır değerlerine ulaştığı görülmektedir. Ayrıca pompa açma-kapama sayısı 5'tir.



Şekil 7. IDPA Yaklaşımı, $T_0=15$ min, Seviye ve Pompa Çalışma Durumları
(IDPA Approach, $T_0=15$ min, Level and Pump Operating States)



Şekil 8. SDPA Yaklaşımı, $T_0=1$ min, Seviye ve Pompa Çalışma Durumları
(SDPA Approach, $T_0=1$ min, Level and Pump Operating States)

SDPA yaklaşımında, T_o değerinin 1 dakika gibi küçük bir süreye düşürülmesiyle, depo kapasitesinden azami derecede faydalanabileceği, ayrıca pompa çalışma frekansında herhangi bir artışın olmadığı, aksine pompalama frekansının da mümkün olduğunca düşürüldüğü görülmektedir.

5.3. CWLC, IDPA ve SDPA'nın Karşılaştırılması (Comparison of CWLC, IDPA and SDPA)

CWLC, IDPA ve SDPA yaklaşımlarının aynı şartlar altında uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar Tablo 3'te sıralanmıştır. CWLC, IDPA ve SDPA yaklaşımlarının tümü için uygulanma süresi 1 milisaniyenin altında olduğu için bu açıdan birbirlerine üstünlük sağlamadıklarını söyleyebiliriz.

SDPA'nın kullanılması, IDPA yaklaşımında karşılaşılan ve kısmen göz ardı edilen, karar periyodu küçülürken pompa çalışma frekansının artması problemini çözmüştür. SDPA, çalışma frekansının artmasını engelleyerek, mali kazancını hesaplayamadığımız fakat pompaların kullanım ömrünü kısaltacak ve başlangıç maliyetini arttıracak bir etkiden kaçınmayı sağlamıştır.

Tüm yaklaşımlar, yaklaşık olarak aynı miktardaki suyu pompalamak için aynı süredeki pompalamayı farklı zaman aralıklarında yaparak, su teminini sağlayabilmektedir. Ancak, çok zamanlı elektrik tarifesine ait fiyatlandırma göz önüne alındığında; IDPA yaklaşımı, puant periyodu yükünün bir kısmını gece periyoduna kaydırırken; SDPA yaklaşımı, puanttan geceye kaydırılabilecek tüm yükleri kaydırabilmektedir.

Mevcutta kullanılan CWLC yaklaşımı referans alındığında; IDPA'ya kıyasla SDPA, günlük açma-kapama sayısını 23'ten 5'e düşürerek daha düşük pompa çalışma frekansı ve pompalama elektrik maliyetini 0,5152 $\text{₺}/\text{m}^3$ 'ten 0,4535 $\text{₺}/\text{m}^3$ 'e düşürerek daha düşük enerji maliyeti sağlamıştır. SDPA, kullanılan birim enerji maliyetini yaklaşık %11,97

oranında azaltabildiğini ve vaka çalışmamızda elde edebileceğimiz en iyi optimizasyonu sağladığını bize gösteriyor.

Çalışma alanındaki şartlar (depo kapasitesi, su talebi, kullanılan pompa kapasitesi) ve güncel elektrik birim fiyat tarifesi göz önüne alındığında; günlük ortalama su talebi $C_d = 3544 \text{ m}^3$ olduğundan, SDPA yaklaşımı kullanılarak pompalanan suyun elektrik maliyetinin 0,5152 $\text{₺}/\text{m}^3$ 'ten 0,4535 $\text{₺}/\text{m}^3$ 'e düşürülmesiyle, elektriğe ödenen bedelde günlük $3544 \cdot (0,5152 - 0,4535) = 218,67 \text{ ₺}$ olmak üzere, aylık 6.560 ₺ , yıllık 79.815 ₺ tasarruf sağlanabilir. CWLC yöntemine kıyasla pompalama maliyetini düşürmeye yönelik olarak, SDPA yaklaşımının ve farklı T_o periyotları için IDPA yaklaşımının çalışma alanında uygulanması durumlarında oluşabilecek günlük, aylık ve yıllık tasarruf miktarları Tablo 4'te verilmiştir.

5.4. SDPA'nın Uygulanması (Implementation of SDPA)

Bu çalışmada geliştirilen algoritma, çalışma alanına başarıyla uygulanmıştır. Çalışma alanındaki pompalama için gerekli otomasyon sistemi, mikroişlemci tabanlı programlanabilir lojik kontrolörler (PLC-programmable logic controller) tarafından yönetilmektedir. SDPA, pompalama sistemini yöneten PLC'lerde oluşturulabilecek formata dönüştürülerek uygulanmış ve çalışma alanındaki pompalama sistemini bir ay (1 fatura dönemi) boyunca başarıyla yönetmiştir. SDPA'nın kullanıldığı dönem ve SDPA'nın kullanılmadığı bir önceki döneme ait faturalara yansayan tüketim bilgileri Tablo 5'te özetlenmiştir.

Her iki ayda pompalanan su miktarı birbirine yakın olsa da eşit olmayacağından toplam enerji tüketim miktarları da eşit değildir fakat SDPA'nın puant yüklerini geceye kaydırmış olduğu açıkça görülmektedir. Kullanılan enerjilerin birim maliyetleri hesaplanır ise CWLC'nin kullanıldığı aya kıyasla SDPA, enerji birim maliyetini 0,5938 $\text{₺}'den 0,5235 \text{ ₺}'ye$

Tablo 3. CWLC, IDPA ve SDPA Sonuçlarının Karşılaştırılması (Comparison of CWLC, IDPA and SDPA Results)

Nitelik	CWLC	IDPA ¹	IDPA ²	IDPA ³	SDPA
Karar Periyodu (T_o)	1 min	60 min	30 min	15 min	1 min
Uygulama Süresi	13,3 μs	33,7 μs	107,4 μs	371,3 μs	42,9 μs
#Pompa Çalış/Dur Sayısı	23	8	14	27	5
Toplam Pompalanan Su Miktarı	3555 m^3	3726 m^3	3609 m^3	3551 m^3	3543 m^3
Pompalama Süresi (Gündüz)	412 min	420 min	420 min	420 min	418 min
Pompalama Süresi (Puant)	240 min	180 min	150 min	135 min	123 min
Pompalama Süresi (Gece)	264 min	360 min	360 min	360 min	372 min
Pompalama Süresi (Toplam)	916 min	960 min	930 min	915 min	913 min
Günlük Elektrik Maliyeti	1832 ₺	1771 ₺	1680 ₺	1634 ₺	1607 ₺
Birim (m^3) Pompalama Maliyeti	0,5152 ₺	0,4752 ₺	0,4654 ₺	0,4602 ₺	0,4535 ₺
CWLC'ye Kıyasla Tasarruf Oranı	-	%7,75	%9,67	%10,68	%11,97

Tablo 4. Tasarruf Miktarlarının Karşılaştırılması (Comparison of Savings Amounts)

Süre	IDPA ¹ ($T_o = 60 \text{ min}$)	IDPA ² ($T_o = 30 \text{ min}$)	IDPA ³ ($T_o = 15 \text{ min}$)	SDPA
Günlük	141,76 ₺	176,49 ₺	194,92 ₺	218,67 ₺
Aylık	4.252 ₺	5.295 ₺	5.847 ₺	6.560 ₺
Yıllık	51.742 ₺	64.419 ₺	71.146 ₺	79.815 ₺

Tablo 5. Uygulama Sonuçları (Implementing Results)

Nitelik	CWLC	SDPA
Enerji Tüketimi (Gündüz)	35.018,72 kWh	36.573,36 kWh
Enerji Tüketimi (Puant)	17.672,96 kWh	9.115,44 kWh
Enerji Tüketimi (Gece)	20.926,96 kWh	31.068,80 kWh
Enerji Tüketimi (Toplam)	73.618,64 kWh	76.757,60 kWh
Enerji Tüketim Bedeli (Toplam)	43.715 ₺	40.185 ₺
Enerji Birim (kWh) Maliyeti	0,5938 ₺	0,5235 ₺

düşürmüştür. SDPA, simülasyon deney sonuçlarında hesaplanan değere (%11,97) yakın bir tasarruf oranına ulaşabilmiş ve çalışma alanındaki enerji maliyetinde %11,85'lik bir tasarruf sağlamayı başarmıştır.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (CONCLUSIONS AND DISCUSSIONS)

Birçok alanda elektrik maliyetlerini düşürmeye yönelik, TTY'ye katkı sağlayacak yük kaydırma/öteleme yöntemleri kullanılmaktadır. Bu çalışmada, mevcut içme suyu dağıtım sistemlerindeki ekipmanlar ve fiziksel şartlarda herhangi bir iyileştirme yapmadan, yalnızca pompalama çizelgesinin değiştirilmesiyle puant yüklerinin geceye kaydırılmasını sağlayacak yeni bir yaklaşım olan SDPA önerilmiştir.

Çalışma alanı üzerinde yapılan simülasyon ve uygulama sonuçları, SDPA yaklaşımının CWLC ve IDPA yaklaşımlarına göre daha düşük pompa çalışma frekansı ve daha düşük pompalama maliyeti sağladığını ortaya koymuştur. SDPA'nın kullanılmasıyla, yalnızca pompalama çizelgesinin optimizasyonu ile elde edilebilecek en iyi tasarruf miktarı elde edilmiştir. Yalnızca pompalama çizelgesinin optimizasyonu ile elde edilebilecek en iyi tasarruf miktarının simülasyon ortamında %11,97 olduğu görülmüş ve çalışma alanına uygulandığında SDPA'nın bu miktara oldukça yaklaşarak %11,85 oranında tasarruf sağladığı elektrik faturalarına da yansımıştır.

SDPA'nın kullanılmasıyla, IDPA yaklaşımında karşılaşılan, karar periyodu küçülürken pompa çalışma frekansının artması probleminin önüne geçilmiş ve mevcut pompa açma-kapama karar sayısı %78 azaltılabilmektedir. Pompa dur kalk sayısının azaltılmasıyla oluşan faydalar; pompa-motor ömrünün uzaması, bakım periyotlarının uzaması, kalkış esnasında çekilen yüksek akımlardan (demeraj akımı) kaçınılması, demeraj akımı sebebiyle nominal güce oranla harcanan fazla enerji kullanımının azalması şeklinde sıralanabilir.

Geliştirilen SDPA, bilgisayar tabanlı bir cihazın sahip olduğu kadar yoğun bir veri saklama alanı, işlem gücü ve program hafızasına ihtiyaç duymayacağından kolayca bir PLC içerisinde koşturulabilir. Tüm istasyonlar için merkezdeki bir sunucuda program koşturularak pompalama komutlarının sahadaki cihazlara iletilmesinden, programın sahada kullanılan PLC'lerde lokal olarak koşturulması, merkez sunucuda veya haberleşme ağında oluşacak olası bir aksilikten pompalamanın etkilenmemesini sağlar. Uzaktan

izleme ve kontrol (SCADA/PLC) sistemine sahip alanlara uygulanması için ekstra bir ekipman maliyeti gerektirmez.

Kademeli yapıdaki terfi merkezlerinde, en uçtaki terfi merkezinde uygulanması halinde SDPA, uçtaki terfi merkezinin enerji tüketiminde tasarruf sağlamanın yanı sıra suyun ana kaynağına kadar olan önceki terfi merkezlerinin enerji tüketimlerinde de tasarruf sağlayabilir. Kullanılan depo kapasitesi, puant zaman periyodunda hiç pompalama yapılmamasına müsaade edecek kadar büyük olduğu durumlarda; en iyi tasarruf oranına ulaşabilmek için tarifeler arası geçişte hedeflenen seviye değerlerinin hesaplanması ihtiyacı ortaya çıkabilir. Yazarlar bu konuları gelecekteki çalışma hedefleri olarak belirlemişlerdir.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Çalışma alanı belirleme ve ilgili çalışma alanına ait bilgi edinme konusunda, yardımlarını esirgemeyen Sakarya Büyükşehir Belediyesi, SASKİ SCADA Şube Müdürü, İsa Çomaklı ve SCADA Şube Müdürlüğü çalışanlarına teşekkür ederiz.

Ayrıca, Natura Otomasyon ve Yazılım Şirketi'ne ait kaynakların kullanılmasını, bu çalışmanın maddi ve manevi açıdan desteklenmesini sağlayan şirket müdürü T. Bahadır Taşkiran'a teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sarbu I., A Study of Energy Optimisation of Urban Water Distribution Systems Using Potential Elements, Water, 8 (12), 593-611, 2016.
2. Copeland C., Carter N.T., Congressional Research Service. Energy-Water Nexus: The Water Sector's Energy Use. <https://crsreports.congress.gov/product/pdf/R/R43200>. Yayın tarihi Ocak 24, 2017. Erişim tarihi Temmuz 11, 2020.
3. Güneş S.T., Sarptaş H., Özdağlar D., Su ve Atıksu Tesislerinde Enerji Verimliliği için Stratejiler, Uluslararası Kentsel Su ve Atıksu Yönetimi Sempozyumu, Malatya-Türkiye, 1153-1159, 26-28 Ekim, 2016.
4. Moreira D.F., ve Ramos H.M., Energy Cost Optimization in a Water Supply System Case Study, J. Energy, 2013 (5), 1-9, 2013.
5. Hasanbeigi, A., Price, L., Energy-efficiency improvement opportunities in pumping systems, Industrial Energy Audit Guidebook: Guidelines for

- Conducting an Energy Audit in Industrial Facilities, Berkeley National Laboratory, California, A.B.D., 23-44, 2010.
6. Araujo L.S., Ramos H., Coelho S.T., Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management, *Water Resour. Manage.*, 20 (1), 133-149, 2006.
 7. Hydraulic Institute, Europump, ve D.E.O., Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems. New Jersey, USA, 2001.
 8. Menke R., Abraham E., Stoianov I., Modeling Variable Speed Pumps for Optimal Pump Scheduling, 16th World Environmental and Water Resources Congress 2016, Florida-A.B.D., 199-209, 22-26 Mayıs, 2016.
 9. Waide P., Brunner C.U., International Energy Agency. Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems. https://www.oecd-ilibrary.org/energy/iea-energy-papers_20792581. Yayın tarihi Mayıs 1, 2011. Erişim tarihi Temmuz 11, 2020.
 10. Tör O.B., Cebeci M.E., Koç M., Güven A.N., Dynamic optimization of long term primary electric distribution network investments based on planning metrics, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (1), 227-237, 2018.
 11. Tör O.B., Cebeci M.E., Kaş N., Göktepe M., Kalkan E., Yılmaz S.C., Gündoğdu A., Güven A.N., Implementation of low voltage express feeder (LVEF) to reduce of no-load losses of distribution transformers which suffer high seasonal load deviation, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (3), 979-994, 2018.
 12. Palensky P., Dietrich D., Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads, *IEEE Trans. Ind. Inf.*, 7 (3), 381-388, 2011.
 13. Selamoğulları U.S., Elma O., A smart transformer application for voltage controlled home energy management system, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 33 (4), 1543-1556, 2018.
 14. Chiu W., Sun H., Poor H.V., Demand-side energy storage system management in smart grid, 2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Tainan-Taiwan, 73-78, 5-8 Kasım, 2012.
 15. Conteh A., Lotfy M.E., Kipnetich K.M., Senjyu T., Mandal P., Chakraborty S., An Economic Analysis of Demand Side Management Considering Interruptible Load and Renewable Energy Integration: A Case Study of Freetown Sierra Leone, *Sustainability*, 11 (10), 2828-2846, 2019.
 16. Alighalehbakhani F., McElmurry S., Miller C.J., Abkenar S.M.S., A case study of energy cost optimization in Monroe water distribution system, 2013 International Green Computing Conference Proceedings, Virginia-A.B.D., 1-5, 27-29 Haziran, 2013.
 17. Zhuan X., Li W., Yang F., Optimal Operation Scheduling of a Pumping Station in East Route of South-to-north Water Diversion Project, *Energy Procedia*, 105 (5), 3031-3037, 2017.
 18. Zhuan X., Zhang L., Li W., Yang F., Efficient operation of the fourth Huaian pumping station in east route of South-to-North Water Diversion Project, *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 98 (6), 399-408, 2018.
 19. Menke R., Abraham E., Parpas P., Stoianov I., Approximation of System Components for Pump Scheduling Optimisation, *Procedia Eng.*, 119, 1059-1068, 2015.
 20. Zheng G., Huang Q., Energy Optimization Study of Rural Deep Well Two-Stage Water Supply Pumping Station, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 24 (4), 1308-1316, 2016.

