



A new approach for optimum operation of multi-stage water pump stations

Hüseyin Alsanabani¹, Murat İskefiyeli¹, Kadir Yaralı², Hayri Küçük^{2*}, Mustafa Turan²

¹Sakarya University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Computer Engineering, 54050, Sakarya, Türkiye

²Sakarya University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical and Electronics Engineering, 54050, Sakarya, Türkiye

Highlights:

- Applicable to multi-stage pump stations
- Provide a wider usage area
- Helps reduce the peak values of the city's electricity consumption

Keywords:

- Multistage pumping stations
- Optimum operation of pumping stations
- Load shifting
- Dynamic programming
- Optimization algorithm

Article Info:

Research Article

Received: 11.08.2022

Accepted: 18.06.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1160729

Acknowledgement:

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

Correspondence:

Author: Hayri Küçük
e-mail: hayri.kucuk1@ogr.sakarya.edu.tr
phone: +90 539 340 94 34

Graphical/Tabular Abstract

In this study, a new algorithm (Optimal Simplified Dynamic Programming Algorithm (OSDPA)) is developed by optimizing the previously developed Simplified Dynamic Programming Algorithm (SDPA) approach. While the SDPA approach may work best for simple systems with one pump and one tank, the OSDPA approach proposes a method that can be used to optimize a complex pumping system as a whole by dividing multistage pumping systems into subsystems and optimizing each subsystem separately. The savings achieved by SDPA and OSDPA methods compared to CWLC are shown in Table A.

Table A. Comparison of Savings Amounts

Saving	SDPA Pump C	OSDPA Pump C	SDPA Pump B	OSDPA Pump B	SDPA Pump A	OSDPA Pump A	SDPA Total	OSDPA Total
Daily	18.76 ₺	40.89 ₺	47.36 ₺	87.88 ₺	211.06 ₺	261.90 ₺	277.18 ₺	390.67 ₺
Monthly	564 ₺	1,227 ₺	1,421 ₺	2,636 ₺	6,332 ₺	7,857 ₺	8,315 ₺	11,720 ₺
Yearly	6,847 ₺	14,925 ₺	17,286 ₺	32,076 ₺	77,037 ₺	95,594 ₺	101,171 ₺	142,595 ₺

Purpose:

To optimize pumping in water distribution systems by making use of electricity unit price differences and minimizing the cost of electricity used for pumping.

Theory and Methods:

OSDPA automatically calculates the desired optimum level values when switching from the cheapest electricity tariff to the most expensive one to reach this optimal value when switching between tariffs. It can also optimize an entire complex pumping system by optimizing each subsystem individually.

Results:

Compared to the currently used CWLC approach, the implementation of SDPA reduces the unit pumping cost from 0.6331 ₺/m³ to 0.5194 ₺/m³, 1.2948 ₺/m³ to 1.0112 ₺/m³ and 0.7378 ₺/m³ to 0.5983 ₺/m³ for pumps C, B, and A respectively. Implementing OSDPA showed that the unit pumping cost could be reduced to 0.3853 ₺/m³, 0.7686 ₺/m³ and 0.5647 ₺/m³ for pumps C, B, and A respectively.

Conclusion:

When compared with the conventional water level control (CWLC) approach, SDPA saves about 18% for pump C in the second stage, 22% for pump B in the second stage, and 19% for pump A in the first stage. However, with OSDPA savings of 39%, 41% and 24% for pumps C, B and A respectively were achieved. Considering all the pumping stations in the work area, SDPA could save around 101,000 ₺ per year, while OSDPA could save around 142,000 ₺ per year.



Çok aşamalı su terfi istasyonlarının enerji maliyeti yönünden optimum işletimi için yeni bir yaklaşım

Hüseyin Alsanabani¹, Murat İskefiyeli¹, Kadir Yaralı², Hayri Küçük^{2*}, Mustafa Turan²

¹Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya, Türkiye

²Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 54050, Sakarya, Türkiye

ÖNEÇIKANLAR

- Çok aşamalı terfi istasyonlarına da uygulanabilir
- Daha geniş bir kullanım alanı sağlayabilir
- Şehrin elektrik tüketiminde oluşan pik değerlerini düşürmeye yardımcı olabilir

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 11.08.2022

Kabul: 18.06.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1160729

Anahtar Kelimeler:

Çok aşamalı pompalama istasyonları, terfi istasyonlarının optimum işletimi, yük öteleme, enerji verimliliği, dinamik programlama, optimizasyon algoritması

ÖZ

Su terfi istasyonlarının enerji maliyeti yönünden optimum işletimi için yapılacak iyileştirmelerin, enerji maliyetlerini düşürürken su talebinin de sürekli olarak karşılanabilmesi önemlidir. Bu makalede, daha önceden geliştirilmiş olan SDPA (sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması) yaklaşımı optimize edilerek, daha geniş bir kullanım alanı sağlayan yeni bir algoritma (OSDPA-optimal sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması) geliştirilmiştir. SDPA yaklaşımı, birer pompa ve depoya sahip basit sistemler için en iyi sonucu elde edebilir. OSDPA yaklaşımı ise tek aşamalı pompalama sistemlerini optimize etmenin yanı sıra çok aşamalı (kaskad) pompalama sistemlerini alt sistemlere bölüp, ayrı ayrı optimize ederek, karmaşık bir pompalama sisteminin tümünü optimize etmek için de kullanılabilir bir yöntemdir. Türkiye'deki Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ) bünyesindeki çok aşamalı yapıya sahip bir su temin sistemi vaka çalışması olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, OSDPA yaklaşımının birim fiyatın pahalı olduğu zaman dilimindeki (puant) yüklerin birim fiyatın daha ucuz olduğu zaman periyodlarına (gece ve gündüz) ötelenmesinde oldukça başarılı olabildiğini göstermiştir. Konvansiyonel su seviyesi kontrolü (CWLC-conventional water level control) yaklaşımı ile kıyaslandığında; SDPA, pompalama maliyetlerinde ikinci aşamadaki C pompası için yaklaşık %18, B pompası için yaklaşık %22, birinci aşamadaki A pompası için yaklaşık %19 oranında tasarruf sağlarken; OSDPA C pompası için %39, B pompası için %41, A pompası için %24 oranında tasarruf sağlamıştır.

A new approach for optimum operation of multi-stage water pump stations

HIGHLIGHTS

- Applicable to multi-stage pump stations
- Provide a wider usage area
- Helps reduce the peak values of the city's electricity consumption

Article Info

Research Article

Received: 11.08.2022

Accepted: 18.06.2023

DOI:

10.17341/gazimmfd.1160729

Keywords:

Multistage pumping stations, optimum operation of pumping stations, load shifting, energy efficiency, dynamic programming, optimization algorithm

ABSTRACT

It is important to make improvements for the optimum operation of water pumping stations in order to reduce energy costs while meeting water demand continuously. In this article, a new algorithm (OSDPA-optimal simplified dynamic programming algorithm) has been developed by optimizing the previously developed SDPA (simplified dynamic programming algorithm) approach. The SDPA approach is most effective with straightforward systems, whereas the OSDPA approach is versatile, suitable for optimizing both simple and multi-stage, complex pumping systems. A water supply system with a multi-stage structure for Sakarya Water and Sewerage Administration (SASKİ) in Turkey has been used as a case study. The results show that the OSDPA approach can be quite successful in shifting the loads in the time period (peak) where the unit price is expensive to the time periods (night and day) where the unit price is cheaper. When compared with the conventional water level control (CWLC) approach, while SDPA saves about 18% for pump C in the second stage, about 22% for pump B, and about 19% for pump A in the first stage; OSDPA saved 39% for C pump, 41% for B pump and 24% for A pump.

*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : hussein.sanabani@ogr.sakarya.edu.tr, miskef@sakarya.edu.tr, kadir.yarali2@ogr.sakarya.edu.tr, *hayri.kucuk1@ogr.sakarya.edu.tr, turan@sakarya.edu.tr / Tel: +90 539 340 94 34

1. Giriş (Introduction)

İklimlendirme sistemlerinden petrol-gaz boru hattı taşımacılığı, tarımsal sulama ve atık su arıtımına kadar birçok alanda kullanılan pompalar, insan hayatının en temel ihtiyacı olan suyun temin edildiği sistemlerde de oldukça yoğun bir şekilde kullanılmaktadır [1]. Su temin ve arıtma sistemlerinde kullanılan enerjinin %90'ından daha fazlası pompalar tarafından kullanıldığı için bu sistemlerde kullanılan enerji miktarı ulusal düzeyde önem taşımaktadır [2].

Dünyadaki elektrik ihtiyacının yaklaşık %20'sini pompalama sistemleri oluşturmaktadır [3]. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki su temin ve arıtma sistemlerinin kullandıkları elektrik miktarı, ülkenin yıllık elektrik kullanımının yaklaşık %3-4'ünü oluşturmaktadır [4]. Suyun son kullanıcıya iletilmesine kadar geçen süreçteki toplam maliyetinin yaklaşık %30-50'sini, suyun iletim ve dağıtım için kullanılan elektrik maliyeti oluşturmaktadır. Dolayısıyla, su pompalamada kullanılan elektrik maliyetlerini azaltmak ve bunun hangi yöntem ile yapılacağını belirlemek oldukça önemlidir. Ayrıca pompalamada kullanılan elektrik maliyetlerini azaltmak yalnızca su idarelerine ekonomik katkı sağlamakla kalmaz, ulusal enerji yoğunluğunu da düşürür [5]. Su temin sistemlerindeki pompalama elektrik maliyetinin azaltılması, enerji verimliliği ve yük yönetimi olarak iki farklı kategoride ele alınabilir. Enerji verimliliğinde, mevcut ekipmanların daha verimli yeni ekipmanlarla değiştirilmesi veya mevcut ekipmanların verimini arttıracak yönde çalışmalarla, tüketilen enerji miktarının azaltılması hedeflenir. Yük yönetiminde ise tüketilen enerji miktarı değişmezken, mevcut yüklerin enerji maliyeti yönünden uygun zaman aralıklarına kaydırılması hedeflenir. Su temin sistemlerinde, herhangi bir altyapı veya ekipman değişikliği yapılmadan, elektrik tüketimi ve birim fiyat yapısı (çok zamanlı tarife) göz önüne alınarak pompa işletimi optimize edilir ve uygun zamanlarda pompalama yapılırsa elektrik maliyetinde oldukça makul bir azalma meydana gelebilir [6, 7].

Yük öteleme en yaygın kullanılan yük yönetim şeklidir [8]. Yük öteleme için birim fiyatın da talebin de yüksek olduğu zaman aralığındaki yükler, mümkün mertebe birim fiyatın da talebin de daha az olduğu zaman aralıklarına kaydırılır [9,10]. Böylece aynı miktarda enerji kullanımına karşın daha düşük bir maliyet elde edilir.

Yük öteleme yönteminde, su depolarının kapasitesi ve çoklu birim fiyat farklarından faydalanılarak, pompalama çizelgesinin optimize edilmesi için bir strateji geliştirilir. Farklı elektrik birim fiyatlarının uygulandığı sistemlerde yapılacak yük öteleme işlemi, su talebini karşılayacak şekilde pompa çalışma durumunun ve su talebi miktarının kontrol edilmesini ve enerji maliyetinin azami derecede indirilmesini birlikte sağlamalıdır. Kullanılan depolar oluşan talebe oranla yeterince büyük dizayn edilmiş ise teorik olarak, zaman koordinasyon kontrolü yapmak için daha esnek davranılabilir ve böylece pompalamanın ve pompalanmış suyun kullanımının stratejik bir şekilde yapılması sağlanabilir [11]. Başka bir deyişle, elektrik tarifesinin en pahalı zaman aralığında asgari derecede pompalama yapılırken, en ucuz zaman aralığında azami derece de pompalama yapılarak aynı miktarda elektrik kullanımına karşın toplam elektrik maliyetinde azalma sağlanır.

Yük öteleme yöntemi kullanılırken dikkat edilmesi gereken bir başka husus da pompanın çalışma frekansıdır. Pompa çalışma frekansı küçüldükçe daha iyi bir optimizasyon sağlanırken, pompanın çok sık çalışması ve durması neticesinde mekanik yıpranmalar artacağından, ekipmanların ömürleri kısılır ve bakım maliyetleri artar [12]. Dolayısıyla, kullanılan sistemin şartlarına göre bir denge noktası aramak ve uygun bir pompa çalışma frekansı belirlemek oldukça önemlidir [7].

Çalışma alanı olarak seçilen, konvansiyonel su seviye kontrolü (CWLC-conventional water level control) yaklaşımı kullanılarak

işletilmekte olan, Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ) bünyesindeki çok aşamalı yapıya sahip bir su temin sistemine, sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması (SDPA) ve optimal sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması (OSDPA) yaklaşımları uygulanmıştır. Mevcutta kullanılan CWLC yaklaşımı referans alındığında, SDPA ve geliştirilen OSDPA'nın sistemde kullanılan enerji maliyetinin düşürülmesinde ne ölçüde fayda sağlayacakları incelenmiştir. Bu üç yöntemin de çalışma alanına uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, OSDPA'nın diğer yaklaşımlara üstünlüğü ortaya konulmuştur.

2. Literatür Araştırması (Literature Research)

Gong ve Cheng, Cheng vd. çalışmalarında [13–15], DDPA (Decomposition–Dynamic Programming Aggregation, ayrıştırma-dinamik programlama çözüm birleştirilmesi) algoritmasını geliştirmişlerdir. DDPA algoritması, büyük ölçekli su sistemlerinde ardışık karar problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. DDPA algoritmasındaki strateji; büyük ölçekli sistemlerin optimizasyon problemleri için, problemi alt problemlere ayırmak, ilişkili parametreler ve her alt problemin optimal değeriyle olan ilişkiye dayanarak alt problemlere ait çözümleri toplamak daha sonra ilişkili değişkenin global optimal çözümü ve buna karşılık gelen optimal değerin elde edilmesidir.

Zhang vd. çalışmalarında [8], çalışma yaptıkları su terfi istasyonunu çok aşamalı (kaskad) bir sistem olarak modellemişlerdir. Hali hazırda kullanılan pompalama düzenini de dikkate alıp, farklı kademeleri sınıflandırmışlardır. Kademeler, aynı giriş çıkış hatlarını kullanan birbirleriyle ilişkili bir veya daha fazla pompa veya pompalardan oluşabilmektedir.

Su dağıtım çalışmalarının hedefi, suyun arz talep probleminin çözülmesi ve su kaynaklarının optimum şekilde yönetilebilmesidir. Çok aşamalı (kaskad) pompa istasyonları (CPSs, Cascade Pumping Stations), suyu ilk kaynaktan itibaren en yüksekteki kullanıcıya kadar ulaştırmayı sağlarken arada bulunan kullanıcıların da taleplerini karşılamak veya en yüksekteki kullanıcılara suyun tek seferde pompalanamayacağı durumlar için suyu birden fazla terfi istasyonu kullanarak terfi ettiren sistemlerdir. Zhang vd. çalışmalarında [16], su kanalı kullanılan iletim sistemlerindeki çok aşamalı pompalama istasyonlarını optimize etmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri yöntemde, bazı ara terfi istasyonlarını es geçmeye dayalı bir optimize edilmiş programlama algoritması kullanmışlardır.

Zheng ve Huang çalışmalarında [7], çok aşamalı bir su dağıtım sistemi örneğini incelemişlerdir. Kırsal alandaki su talebini ve elektrik tarife birim fiyatlarını göz önünde bulundurarak IDPA'yı (Improved Dynamic Programming Algorithm, dinamik programlama algoritması) geliştirmiş ve pompalama elektrik maliyeti azaltmak için bu algoritmayı önermişlerdir.

Küçük vd. [10] içme suyu dağıtım sistemlerindeki pompalama maliyetini azaltma amacıyla, SDPA'yı (Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması) geliştirmişlerdir. SDPA, pompalama çizelgesi optimizasyonunu sağlayarak pompalama enerji maliyetini düşürmeyi başarmıştır.

3. Materyal ve Metot (Material and Method)

3.1. Çalışma Alanının Tanıtımı

(General Information About the Case Study Area)

SASKİ (Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi) bünyesinde bulunan, üç adet yüksek su deposu ve pompalama istasyonlarından oluşan,

kademeli içme suyu temin sistemi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Birinci kademede bulunan santrifüj pompa ile su kaynağından yüksekteki bir depoya pompalanan suyun bir bölümü bu depodan kullanıcılara iletilirken, aynı zaman da iki farklı pompalama istasyonu aracılığı ile iki farklı ikinci kademede yüksek su deposuna pompalanmaktadır. Yüksek su depolarının seviyeleri birer hidrostatik seviye sensörü aracılığı ile ölçülmekte ve sürekli olarak izlenebilmektedir. Kullanıcıların depolardan talep ettikleri su miktarları, depoların çıkışında bulunan birer elektromanyetik debimetre ile ölçülmekte ve sürekli olarak izlenebilmektedir.

Her bir depo ve pompa istasyonunda birer adet programlanabilir lojik kontrolör (PLC-programmable logic controller) bulunmaktadır. İstasyondaki enstrümanlara ait bilgiler PLC'ler üzerinde toplanıp, bir radyo link aracılığı ile merkezdeki bir sunucuya iletilmektedir ve sürekli olarak kayıt altına alınmaktadır. Aynı zamanda her depoda ölçülen seviye değerleri de ilgili pompalama istasyonuna gönderilmektedir. Böylece, her pompalama istasyonu ilgili depo seviyesini referans alarak, santrifüj pompa aracılığı ile suyu buldukları noktadan bir üst noktadaki depoya pompalar. Mevcutta, pompalama istasyonlarında konvansiyonel su seviye kontrolü (CWLC-conventional water level control) yöntemi kullanılmaktadır. Pompalama istasyonlarının her birinde, birim fiyatları farklı olan, üç zamanlı ulusal tarife (gece, gündüz, puant) kullanılmaktadır.

3.2. Metot (Method)

Bu tarz yük öteleme problemleri, optimal zamanlama (tamsayı programlama) problemi olarak tanınır [17]. Daha önceden geliştirilmiş olan SDPA ve bu çalışmada SDPA'nın optimize edilmesiyle ortaya çıkan OSDPA da birer dinamik programlama optimizasyon tekniğidir.

SDPA'ya göre [10], 24 saatlik pompalamanın elektrik maliyeti (Z), pompa çalışma-durma periyodunun (T_o) dakika olarak kullanılması durumunda ($n = \frac{24 \cdot 60}{T_o}$ örnek sayısı) Eş. 1 ile hesaplanabilir ve Z 'yi etkileyebilecek değişken yalnızca pompa çalışma kararı olan d 'dir.

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

E : Pompa gücü, d : Pompa durumu (çalışma $d = 1$, durma $d = 0$), M : Birim fiyat (₺/kWh)

Pompalama çizelgesi optimize edilirken, depo çıkışındaki hat basıncının belirli bir değer altına düşmemesi için veya pompalamanın olası bir arızadan dolayı aksaması durumunda ihtiyatlı davranmak için bir minimum seviye değeri, depodaki suyun tahliye edilmemesi (taşmaması) için bir maksimum seviye değeri belirlenir. Belirlenen bu değerler seviye kısıtlarımızı ortaya koyar ve sürekli olarak Eş. 2 durumu sağlanmalıdır.

$$L_l \leq L_i \leq L_h, \forall i \in [1, n] \quad (2)$$

L_l : Minimum seviye değeri, L_h : Maximum seviye değeri, L_i : i . Periyodun sonundaki seviye değeri

Günlük su talebi kullanılarak, saatlik tüketimin ortalaması Eş. 3 ile hesaplanır.

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

C_{ort} : Ortalama saatlik tüketim, C_d : Günlük su talebi

İçinde bulunulan saate ait tüketim kullanılarak, içinde bulunulan saate ait tüketim faktörü Eş. 4 ile hesaplanır.

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

C_h : Saatlik tüketim faktörü, C_T : Saatlik toplam tüketim

C_{ort} ve $C_h(i)$ değerleri hesaplandıktan sonra $Q(i)$, içinde bulunan periyottaki tüketim miktarı Eş. 5 ile hesaplanır.

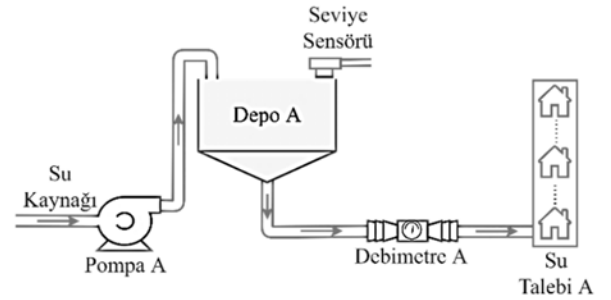
$$Q(i) = \frac{C_{ort} \cdot C_h(i)}{60}, \forall i \in [1, n] \quad (5)$$

Pompalanan su miktarı, tüketim miktarı, depo kapasitesi ve depo seviyesinin mevcut değeri kullanılarak; önceki periyotta verilen pompa açma/kapama kararı ile devam edilmesi halinde, mevcut periyot sonunda ulaşılabilecek seviye değeri Eş. 6 ile hesaplanır.

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

L : Periyot sonundaki depo seviyesi, Q : Tüketim miktarı, Q_p : Pompanın bir periyotta terfi ettirdiği su miktarı, d : Pompa açma/kapama kararı, C^* : Deponun su tutma kapasitesi

SDPA yaklaşımının uygulandığı, Şekil 1'deki gibi tek aşamalı, bir pompa ve bir depo olan basit sistemlerde; pompa çalıştırma-durdurma kararlarının verilmesiyle oluşacak seviye değişimi Eş. 6 kontrol edilerek, depo seviyesinin istenen limitler arasında tutulması sağlanır [10].



Şekil 1. Tek Aşamalı Pompa İstasyonu (Single Stage Pumping Station)

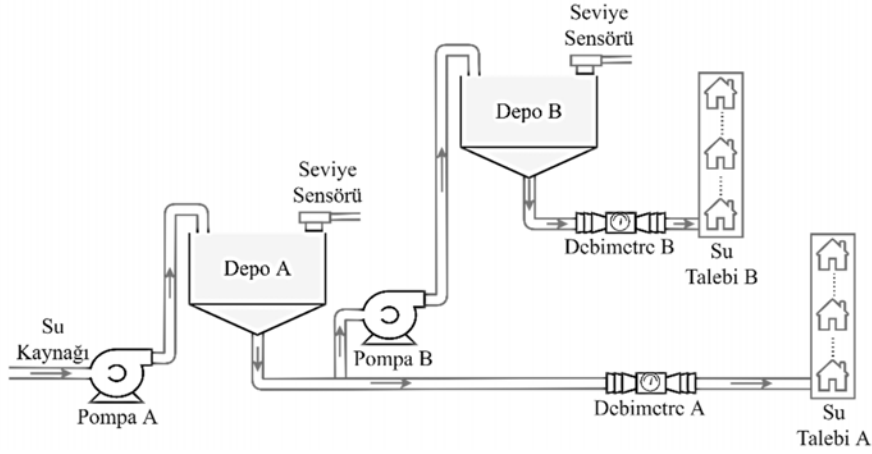
Ancak, Şekil 2'deki gibi suyun birden fazla aşamaya terfi ettirildiği çok aşamalı (kaskad) bir yapıda, depodan kullanıcılar tarafından tüketilen su miktarı ve depoya pompalanan su miktarının yanı sıra bir üst aşamaya su terfi ettiren pompanın çalışma durumu da seviye değişimini etkileyecektir.

Su ikinci kez terfi ettirildiğinde depo seviyesinin değişimi için Eş. 6 kullanılamayacağından, çok aşamalı yapıdaki depoların seviye değişimleri depodan su alan pompanın çalışma durumunun da hesaba katıldığı Eş.7 ile hesaplanabilir.

$$L(i) = L(i-1) + \left(\frac{Q_{px} \cdot d_x(i) - (Q_{py} \cdot d_y(i) + Q(i))}{C^*} \right) \cdot 100, \forall i \in [1, n] \quad (7)$$

L : Periyot sonundaki depo seviyesi, Q : Tüketim miktarı, Q_{px} : Depoya su basan pompanın bir periyotta terfi ettirdiği su miktarı, d_x : Depoya su basan pompanın açma/kapama kararı, Q_{py} : Depodan su alan pompanın bir periyotta terfi ettirdiği su miktarı, d_y : Depodan su alan pompanın açma/kapama kararı, C^* : Deponun su tutma kapasitesi

Çalışma alanındaki su temin sistemi alt sistemlere bölünerek, su talepleri ve elektrik birim fiyatları göz önünde bulundurularak, bu çalışmada önerilen OSDPA yaklaşımıyla tüm sistemin optimize edilmesi sağlanabilir.



Şekil 2. Çok Aşamalı Pompa İstasyonu (Multistage Pumping Station)

Dolayısıyla, çok aşamalı pompa sistemlerindeki zamanlama probleminin çözümü için, sistem alt sistemlere ayrılır ve OSDPA en üst aşamadan en alt aşamaya kadar tüm alt sistemlere uygulanarak tüm sistemin optimize edilmesi sağlanır. Belirlenen kısıtları sağlayacak şekilde en iyi pompalama çizelgesi $d(i)$ öncelikle en üst kademede pompa ve depo ikilisi için bulunur, daha sonra elde edilen üst kademede pompalama çizelgesi de göz önünde bulundurularak alt kademede pompa ve depo ikilisi için en iyi pompalama çizelgesi bulunur ise; puant dönemi yükleri azami derecede diğer dönemlere kaydırılır [7, 16].

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

Hali hazırda kullanılmakta olan CWLC, daha önce geliştirilmiş SDPA ve bu çalışmada geliştirilen OSDPA yaklaşımlarına ait simülasyonlar C# dili kullanılarak yazılan bir uygulamayla gerçekleştirilmiştir. Simülasyonların tamamında, aynı özellikteki bir bilgisayar ve CWLC yaklaşımının gerçekte uygulanmasıyla elde edilerek SQL (structured query language) veri tabanına kaydedilmiş gerçek veriler kullanılmıştır. Her terfi istasyonunun optimizasyon hesabı 1 saniyenin altında gerçekleştirilmiştir. Çalışma alanındaki tüm depo ve pompalama istasyonlarında kontrolör olarak birer PLC kullanılmaktadır. PLC yazılımlarının geliştirilmesi için, yapısal kontrol dili (SCL- structured control language) ve merdiven diyagram (ladder diagram) kullanılmıştır.

SDPA yaklaşımında olduğu gibi, OSDPA yaklaşımında da elektrik tarife sayısı, günlük su talebi, her bir tarifeye ait fiyatlandırma, belirlenmiş seviye kısıtları, tarifeler sonunda hedeflenen depo seviyeleri, depo kapasitesi, tarifeler süresince gerçekleşen su talep oranı, tarifelerde kalınan süreler ve pompanın su basma kapasitesi bilinen değerlerdir. Bilinen bu değerler ve elde edilen eşitlikler kullanılarak tarifelerin sonunda hedeflenen seviye değerlerine ulaşmayı sağlayacak pompalama çizelgesi $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ kolayca oluşturulur [10]. Ancak, kaskad sistemlerin de optimize edilebilmesi için OSDPA yaklaşımında, depo seviyesindeki değişim, Eş. 6 yerine Eş. 7 kullanılarak hesaplanır. OSDPA'nın akış diyagramı Şekil 3'te gösterilmiştir.

4. Uygulamalı Çalışmalar (Applied Studies)

SASKİ (Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi) bünyesinde bulunan su dağıtım sistemine ait, üç adet yüksek su deposu ve bu depolara su pompalayan üç adet pompalama istasyonundan oluşan, çok aşamalı bir parçası uygulama alanı olarak seçilmiştir. Şekil 4'te gösterilen uygulama alanının, ilk aşamasında su kaynağında bulunan A

pompasıyla A deposu beslenmektedir. A deposunda bulunan B pompasıyla B deposu, C pompasıyla C deposu ve her depodan cazibeye ilgili depoya ait son kullanıcılar beslenmektedir. Her depoda oluşan kullanıcı taleplerinin anlık ve toplam değerlerinin hesaplanabilmesi için depo çıkışlarında birer debimetre bulunmaktadır. Su kaynağının sürekli dolu tutulan bir ana depo olması sebebiyle kaynağın sınırsız olduğu varsayılmaktadır.

Çalışma alanındaki A, B, C pompalarına ait bilgiler Tablo 1'de; A, B, C depolarına ait bilgiler Tablo 2'de; tüm istasyonlarda kullanılan elektrik tarifesine göre birim fiyatlar Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 1. A, B, C Pompalarına Ait Bilgiler (Information of A, B, C Pumps)

Pompa	P, Nominal Güç (kW)	Q_p , Su Basma Kapasitesi (m^3/min)
A	90	6,07
B	37	0,95
C	11	0,57

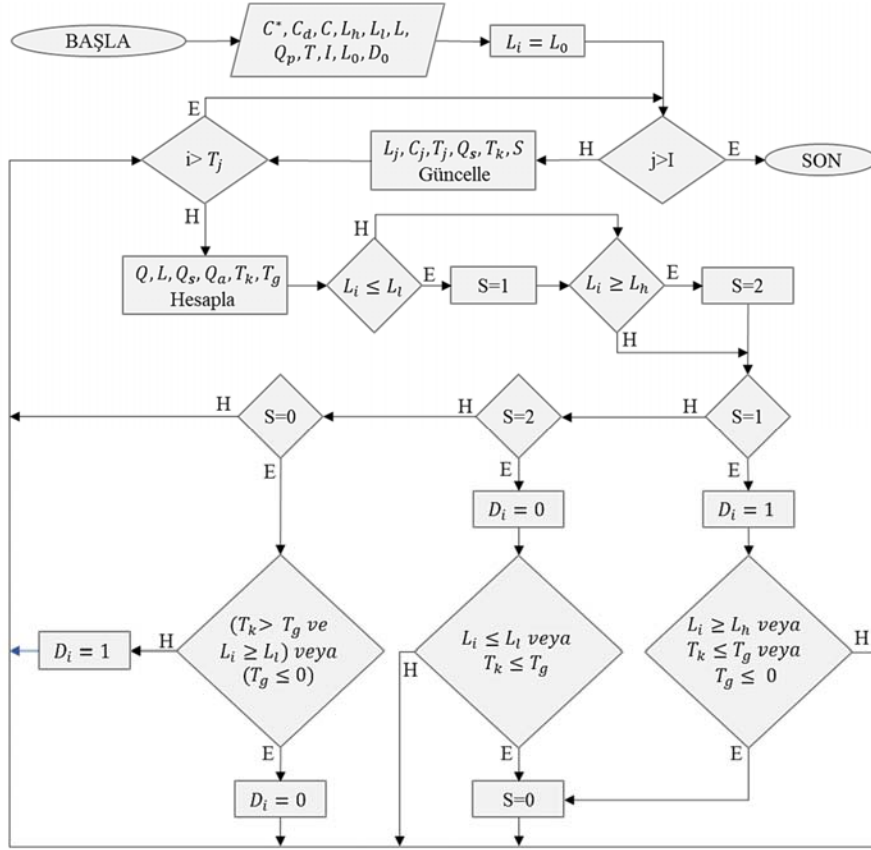
Tablo 2. A, B, C Depolarına Ait Bilgiler (Information of A, B, C Water Tanks)

Depo	C^* , Azami (%100) Su Tutma Kapasitesi (m^3)	C_d , Günlük Su Talebi (m^3)
A	328	1164
B	308	167
C	192	165

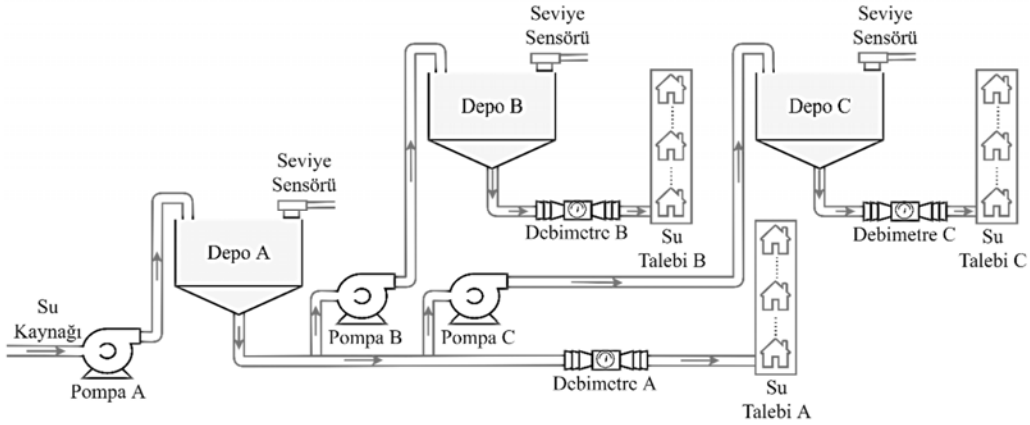
Tablo 3. Üç Zamanlı Elektrik Tarife Fiyatlandırması (Three Rate Electricity Tariff Pricing)

Tarife Adı	Süre	Periyot Uzunluğu (min)	Birim Fiyat (₺/kWh)
Puant	17:00-22:00	480	2,879227
Gündüz	06:00-17:00	660	1,937409
Gece	22:00-06:00	300	1,177270

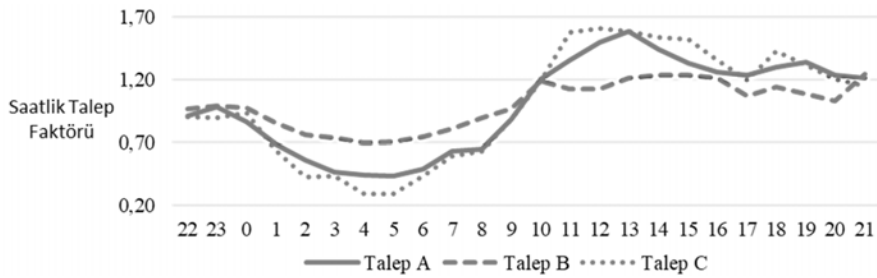
Çalışma alanında üç adet talep düğümü vardır ve bu talep düğümlerinin gün içerisindeki talep modeli ve su depolarına ait başlangıç seviyeleri bilinmektedir. Günlük olarak A talebi toplamı 1164 m³, B talebi toplamı 167 m³ ve olan C talebi toplamı 165 m³'tür. Düğümlere ait gün içerisindeki talep modelleri (saatlik talep faktörü (C_h)) Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 3. OSDPA Algoritması (OSDPA Algorithm)



Şekil 4. Uygulama Alanı (Study Area)



Şekil 5. Saatlik Talep Faktörü (Hourly Demand Factor)

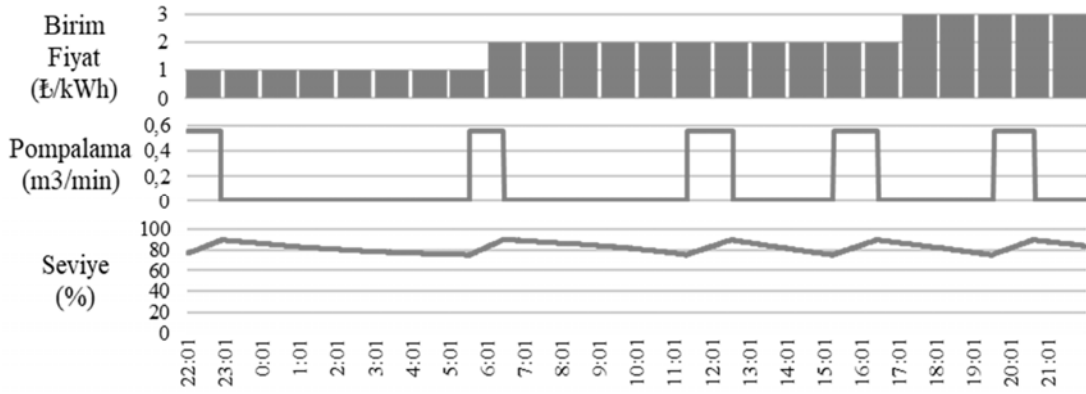
Çalışma alanındaki tüm pompalar, ilgili depo seviyelerinin belirlenmiş maksimum ve minimum değerler arasında tutulmasını hedefleyen, CWLC yaklaşımı ile çalışmaktadır. Mevcutta kullanılan bu yöntemde, pompa çalışma-durma kararları verilirken, su talebi ve elektrik tarifesinin birim fiyatları dikkate alınmadan, yalnızca ilgili depo seviyesi referans alındığı için elektrik maliyetinin optimize edilebilmesi mümkün değildir.

A, B ve C depo ve pompa ikilileri, mevcutta kullanılan CWLC yöntemi için Tablo 4'te belirtilen maksimum ve minimum depo seviye değerlerine göre çalıştırılmaktadır. Pompaların CWLC yöntemi ile çalıştırılmasıyla oluşan sonuçlar; C depo ve pompa ikilisi için Şekil 6'da, B depo ve pompa ikilisi için Şekil 7'de, A depo ve pompa ikilisi için Şekil 8'de gösterilmektedir.

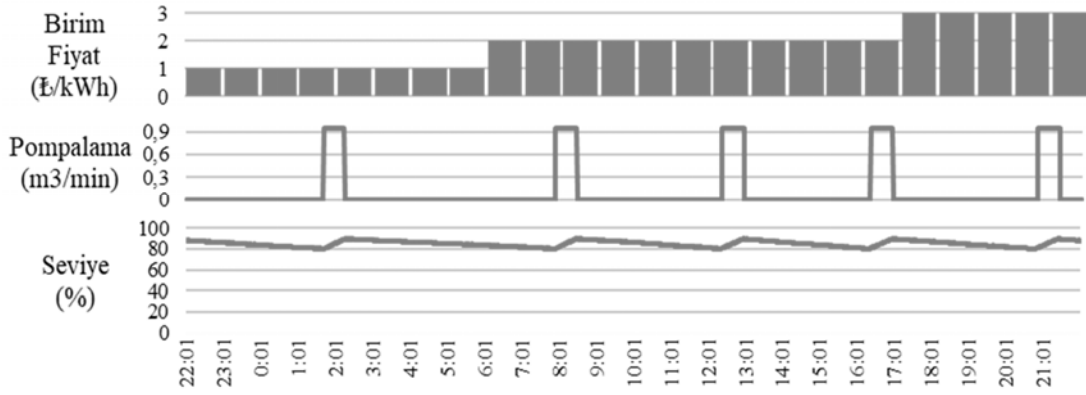
Tablo 4. CWLC için Çalışma Sınırları (Operating Limits for CWLC)

Pompa	Minimum Seviye (%)	Maksimum Seviye (%)
A	85	95
B	80	90
C	75	90

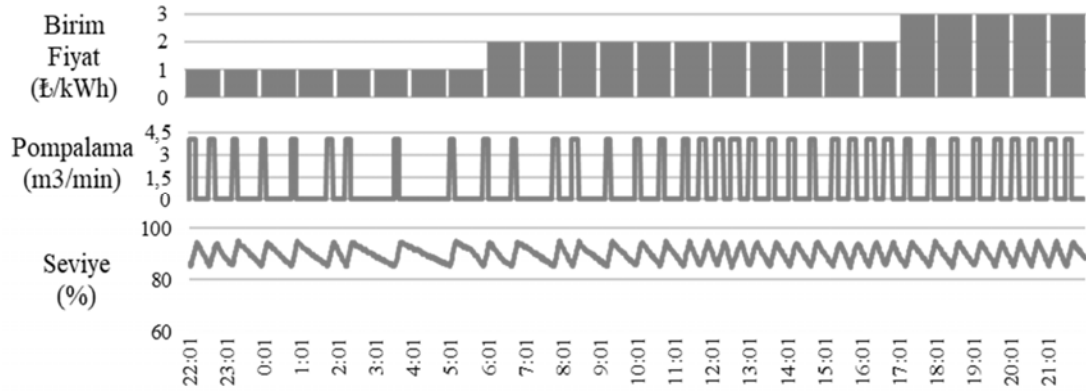
Şekillerden görüldüğü üzere A, B ve C pompaları gündüz ve puant tarifelerinde fazlaca çalışmaktadır. Özellikle A pompasının çalışma durumu incelendiğinde, en yoğun pompalamanın puant periyodunda yapıldığı kolayca anlaşılabilir. Bu da pompalama çizelgesinin optimize edilerek, puant yüklerinin diğer periyotlara kaydırılabilmesi halinde, enerji maliyetinde kayda değer bir azalma sağlanabileceğini göstermektedir.



Şekil 6. C Depo ve Pompa İkili için Mevcut Durumlar (Current Situations for C Tank and Pump Duo)



Şekil 7. B Depo ve Pompa İkili için Mevcut Durumlar (Current Situations for B Tank and Pump Duo)



Şekil 8. A Depo ve Pompa İkili için Mevcut Durumlar (Current Situations for A Tank and Pump Duo)

5. Çözümler (Solutions)

5.1. SDPA Yaklaşımı (SDPA Approach)

SDPA yaklaşımı, daha önceden geliştirilmiş olan IDPA yaklaşımında ortaya çıkan açma/kapama karar periyodu T_o 'nun küçülmesi halinde pompa açma/kapama sıklığının kabul edilemeyecek oranda artması problemini ortadan kaldırmıştır. SDPA yaklaşımında, T_o 'nun küçülmesi halinde pompa çalışma frekansı artmadığından, depo kapasitesinin izin verdiği oranda en büyük yük ötelemesi yapılabilmektedir. Ayrıca SDPA yaklaşımı, IDPA yaklaşımında olduğu gibi pompalama çizelgesi için oluşabilecek 2^n (n : pompa açma/kapama karar sayısı) ihtimalden en iyisini bulmak yerine, tarife geçişlerinde hedeflenen seviyelere ulaşmaya çalışarak, kullanılan algoritmayı oldukça sade bir hale getirmiştir.

SDPA yaklaşımında, tarifeler arası geçişlerde hedeflenen seviyeler, işletmeci tarafından belirlenmiş minimum (L_l) veya maksimum (L_h) değerlerden biri olarak seçilir. Çünkü SDPA'nın uygulandığı çalışma alanındaki depo kapasitesi, puant yüklerinin tamamının geceye aktarılmasına imkan sağlamamaktadır. Yani puant periyoduna maksimum seviye ile girilse dahi, puant periyodu hiç pompa çalıştırılmadan geçilemediğinden, puant dönemine girerken hedeflenen seviye izin verilen maksimum seviye olarak belirlenmiştir. Puant döneminin hiç pompa çalıştırılmadan geçilebileceği sistemler göz ardı edilir ise SDPA'nın en iyi optimizasyonu sağladığı söylenebilir.

5.2. OSDPA Yaklaşımı (OSDPA Approach)

Bir pompa ve bir depodan oluşan basit pompalama sistemlerinde kullanılan SDPA yaklaşımı, direk olarak çok aşamalı (kaskad) sistemlerde kullanılamaz. Kaskad sistemlerin optimizasyonu için OSDPA yaklaşımında olduğu gibi sisteminin alt sistemlere ayrılıp, en üst katmandan aşağıya doğru çözümlenmesi gerekmektedir. OSDPA yaklaşımı, çözüm metodunda anlatıldığı gibi Eş. 6 yerine Eş. 7'yi kullanarak, alt katmanların optimizasyonunu yaparken üst katmandaki çözüm sonucunda elde edilen pompalama kararlarının etkisini de göz önünde bulundurur. Böylece, SDPA yerine OSDPA'nın kullanılması, tek pompa ve tek depolu basit sistemlerin yanı sıra çok aşamalı karmaşık terfi sistemlerinin de optimize edilmesine olanak sağlar.

SDPA yaklaşımının uygulandığı sistemde, puant periyoduna maksimum seviye ile girilse dahi puant periyodu hiç pompa çalıştırılmadan geçilemediğinden, her tarife sonunda ulaşılması hedeflenen seviye sınırları Eş. 2'yi sağlayacak şekilde direk olarak L_l veya L_h değerlerinden biri olarak seçilmiştir. Gündüz, puant ve gece tarifeleri sonunda ulaşılması hedeflenen seviyeler sırasıyla $L = \{L_1, L_2, L_3\}$ olmak üzere, $L = \{L_h, L_l, L_h\}$ olarak seçilmiştir. Ancak, puant periyoduna maksimum seviye ile girildiğinde puant periyodu hiç pompa çalıştırılmadan geçilebilen bir sistemde gündüz tarifesi sonunda ulaşılması hedeflenen (puant tarifesine girişteki seviye) L_1 seviyesinin en iyi çözümü elde edilmesi için aşağıdaki gibi belirlenmesi gerekmektedir.

Gündüz, puant ve gece tarifeleri boyunca talep edilen su miktarlarının günlük tüketime oranı sırasıyla $C = \{C_1, C_2, C_3\}$ olmak üzere, puant zamanındaki tüketimin depo kapasitesine oranının yüzdelik karşılığı Eş. 8 ile bulunur.

$$r = \frac{(C_d C_2 + C_{py}) \cdot 100}{C^*} \quad (8)$$

r : Puant periyodunda depodan çıkan toplam suyun depo kapasitene oranının yüzde karşılığı, C_d : Günlük toplam su talebi, C_2 : Puant periyodundaki talep oranı, C_{py} : Depodan su alan pompasının puant periyodunda terfi ettirdiği su miktarı, C^* : Deponun su tutma kapasitesi

L_1 , gündüz tarifesinin sonunda (puant periyoduna girilirken) hedeflenen depo seviyesinin yüzdelik değeri Eş. 9 ile hesaplanır.

$$L_1 = \begin{cases} r + L_2, & r + L_2 < 100 \\ 100, & r + L_2 \geq 100 \end{cases} \quad (9)$$

OSDPA yaklaşımında, üst katmandaki pompa kararlarının alt katmanların çözümünde kullanılabilmesi, puant tarifesine girerken hedeflenecek olan seviyenin hesaplanarak bulunması, SDPA yaklaşımına göre kullanım alanını oldukça genişletmiştir.

6. Sonuçlar ve Tartışmalar (Results and Discussions)

Tüm pompa ve depo ikilileri için 24 saat boyunca CWLC yönteminin kullanılması durumunda oluşacak pompa çalışma ve seviye durumları yukarıda gösterilmiştir. Aynı datalar kullanılarak, tüm sistemin çözümü için en üst kademeden alt kademeye doğru sırasıyla C, B, A pompa ve depo ikililerinin, SDPA ve OSDPA yaklaşımlarıyla optimizasyonları yapılmıştır.

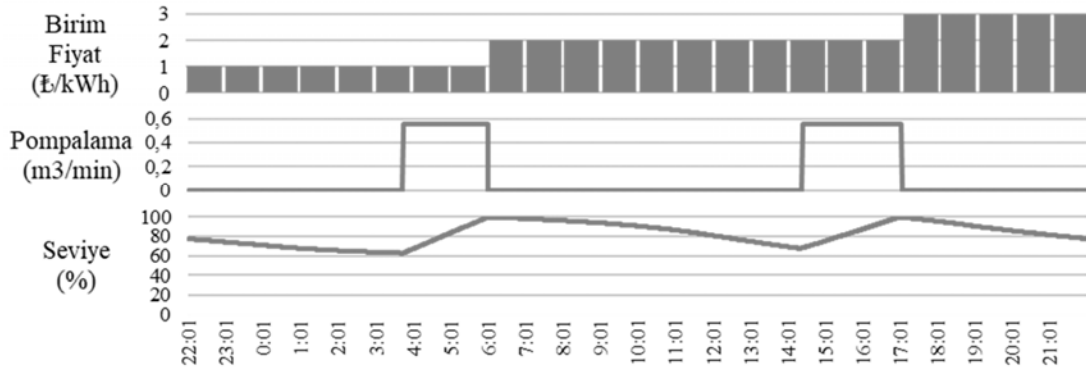
Çalışma alanındaki tüm istasyonlarda, kullanılan elektrik tarifesi, üç farklı tarife periyoduna ($I = 3$) sahiptir. Gündüz, puant, gece, periyotları için sırasıyla birim fiyatlar 1,937409 ₺/kWh, 2,879227 ₺/kWh, 1,177270 ₺/kWh'dir. Tüm depolar için, işletmeci tarafından $L_l = 20$ ve $L_h = 100$ olarak belirlenmiştir ve puant periyodu sonunda hedeflenen seviye $L_2 = L_l = 20$, gece periyodu sonunda hedeflenen seviye $L_3 = L_h = 100$ olarak seçilmiştir. Gündüz periyodu sonunda hedeflenen L_1 seviye değeri her bir depo için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Her bir pompa ve depo ikilisi için; günlük su talebi C_d , deponun toplam su tutma kapasitesi C^* , tarife süresince oluşan talebin günlük su talebe oranı $C = \{C_1, C_2, C_3\}$, tarife süreleri $T = \{T_1, T_2, T_3\}$, depoya su basan ve depodan su alan pompaların kapasiteleri Q_{px} ve Q_{py} , depo seviyesinin başlangıç değeri L_0 ve pompa çalışma durumunun başlangıç değeri D_0 bilinmektedir. Bilinen bu değerlerin kullanılmasıyla, tarife geçişlerinde hedeflenen seviyelere ulaşmayı sağlayacak pompa açma/kapama ($D[i] = 1$, $D[i] = 0$.) kararları kolayca verilerek, en uygun $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ pompalama çizelgesi oluşturulur.

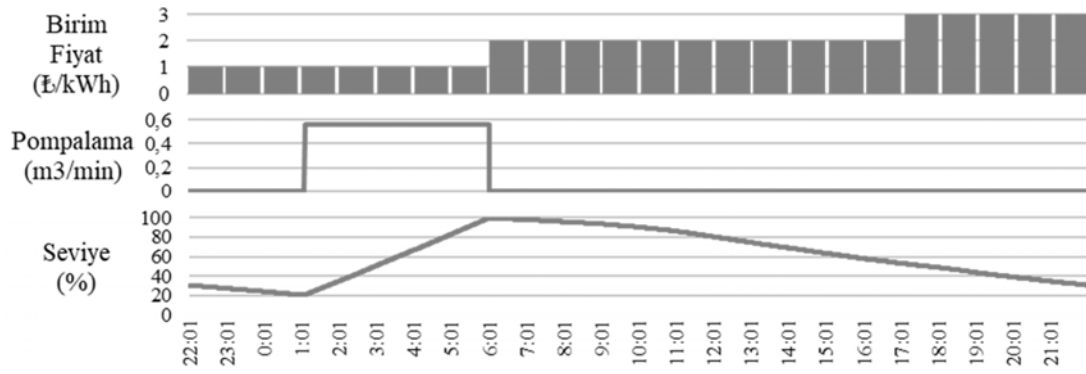
6.1. Pompa C'nin Optimizasyonu (Optimization of Pump C)

C pompa ve depo ikilisi için; günlük toplam su talebi $C_d = 165 m^3$, puant periyodundaki talep oranı $C_2 = 0,26$, depodan su alan pompa olmadığı için puant periyodunda terfi ettirdiği su miktarı $C_{py} = 0 m^3$, deponun su tutma kapasitesi $C^* = 192 m^3$ 'tür. Eş. 8'in kullanılmasıyla, puant periyodunda depodan çıkan toplam suyun depo kapasitene oranının yüzde karşılığı $r = 22,34$ olarak hesaplanır ve Eş. 9 şartlarına göre gündüz tarifesi sonunda hedeflenen seviye değeri $L_1 = 42,34$ olarak bulunur.

C pompa ve depo ikilisinin optimizasyonu için SDPA yaklaşımının kullanılması halinde elde edilen sonuçlar Şekil 9'da, OSDPA kullanılması halinde elde edilen sonuçlar Şekil 10'da gösterilmiştir. CWLC, SDPA ve OSDPA yaklaşımlarına ait sonuçlar Tablo 5'te özetlenmiştir.



Şekil 9. C Pompasının SDPA ile Optimizasyonu (Optimization of Pump C with SDPA)



Şekil 10. C Pompasının OSDPA ile Optimizasyonu (Optimization of Pump C with OSDPA)

Tablo 5. C Pompası için CWLC, SDPA ve OSDPA'nın Karşılaştırılması (Comparison of CWLC, SDPA and OSDPA for Pump C)

Nitelik	CWLC	SDPA	OSDPA
#Çalışma/Durma Sayısı	5	2	1
Çalışma Süresi Toplam	320 min	295 min	295 min
Çalışma Süresi Gece	83 min	136 min	295 min
Çalışma Süresi Gündüz	171 min	159 min	0 min
Çalışma Süresi Puant	66 min	0 min	0 min
Pompalanan Su Toplam	179,26 m ³	165,25 m ³	165,25 m ³
Elektrik Maliyeti	113,49 ₺	85,83 ₺	63,67 ₺
Birim Pompalama Maliyeti	0,6331 ₺/m ³	0,5194 ₺/m ³	0,3853 ₺/m ³

Şekil 9, Şekil 10 ve Tablo 5'ten de görüldüğü üzere; SDPA puant yüklerinin tamamını gece ve gündüze kaydırabilmişken, OSDPA hem puant hem de gündüz yüklerinin tamamını geceye ötelemeyi, ayrıca pompa açma/kapama sayısını daha fazla azaltmayı başarmıştır. CWLC'ye kıyasla, SDPA'nın uygulanması C pompası için %17,96 oranında tasarruf sağlarken, yapılan iyileştirme ($L_1 = L_h = 100$ olarak kullanılması yerine, Eş. 8 ve Eş. 9 ile hesaplanması) sonucunda OSDPA'nın uygulanması C pompasındaki tasarruf oranını %39,14'e çıkarmıştır.

6.2. Pompa B'nin Optimizasyonu (Optimization of Pump B)

B pompa ve depo ikilisi için; günlük toplam su talebi $C_d = 167 m^3$, puant periyodundaki talep oranı $C_2 = 0,23$, depodan su alan pompa olmadığı için puant periyodunda terfi ettirdiği su miktarı $C_{py} = 0 m^3$, deponun su tutma kapasitesi, $C^* = 308 m^3$ 'tür. Eş. 8'in kullanılmasıyla, puant periyodunda depodan çıkan toplam suyun depo kapasitene oranının yüzde karşılığı $r = 12,47$ olarak hesaplanır ve Eş. 9 şartlarına göre gündüz tarifesi sonunda hedeflenen seviye değeri $L_1 = 32,47$ olarak bulunur.

B pompa ve depo ikilisinin optimizasyonu için SDPA yaklaşımının kullanılması halinde elde edilen sonuçlar Şekil 11'de, OSDPA kullanılması halinde elde edilen sonuçlar Şekil 12'de gösterilmiştir. CWLC, SDPA ve OSDPA yaklaşımlarına ait sonuçlar Tablo 6'da özetlenmiştir.

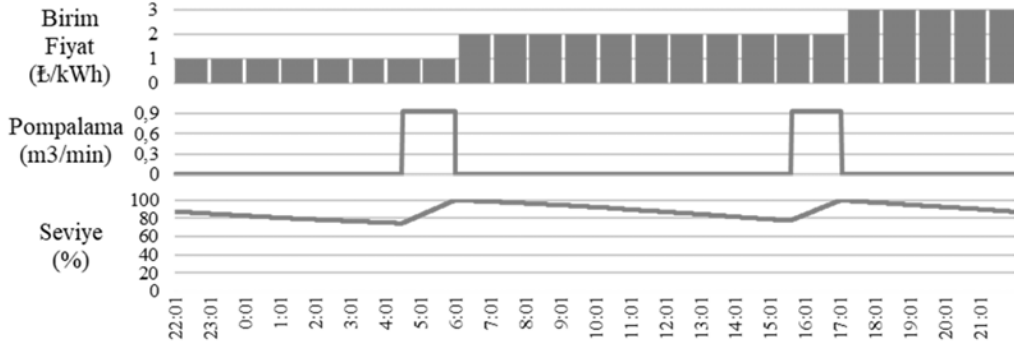
Şekil 11, Şekil 12 ve Tablo 6'dan da görüldüğü üzere; SDPA puant yüklerinin tamamını gece ve gündüze kaydırabilmişken, OSDPA hem puant hem de gündüz yüklerinin tamamını geceye ötelemeyi ayrıca pompa açma/kapama sayısını daha fazla azaltmayı başarmıştır. CWLC'ye kıyasla, SDPA'nın uygulanması B pompası için %21,90 oranında tasarruf sağlarken, yapılan iyileştirme ($L_1 = L_h = 100$ olarak kullanılması yerine, Eş. 8 ve Eş. 9 ile hesaplanması) sonucunda OSDPA'nın uygulanması B pompasındaki tasarruf oranını %40,64'e çıkarmıştır.

6.3. Pompa B ve C Optimizasyonunun Pompa A'ya Etkisi (Effect of Pump B and C Optimization on Pump A)

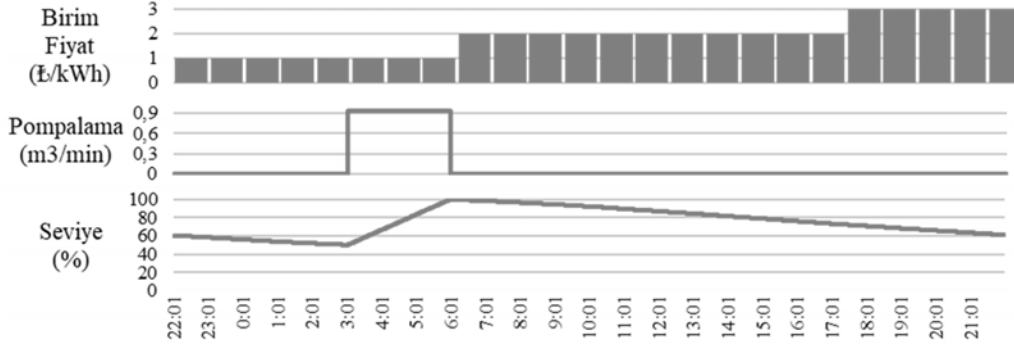
Öncelikle, çok aşamalı terfi sistemlerinde yalnızca en üst aşamanın optimize edilmesi durumunu ele almak istiyoruz ve optimize edilmiş

son aşamanın önceki aşamalara (alt aşamalar CWLC ile çalışmaya devam etse bile) pozitif bir fayda sağlamasını beklemekteyiz. Dolayısıyla, üst aşamaların herhangi birinde yapılacak optimizasyonun alt aşamalarda pompalama maliyetine pozitif bir etkisi olacağını görmek için üst aşamadaki B ve C pompalarının optimizasyonundan sonra, en alt aşamadaki A pompasının CWLC'ye

göre çalıştırılmaya devam etmesi durumunu inceleyebiliriz. B ve C pompalarının OSDPA ile çalıştırılması durumunda, CWLC ile çalışmaya devam eden A pompa ve depo ikilisi için elde edilen sonuçlar Şekil 13'te gösterilmiştir. B ve C pompalarının optimize edilmesi ve edilmemesi durumunda, A pompası için CWLC yaklaşımı kullanılırken elde edilen sonuçlar Tablo 7'de özetlenmiştir.



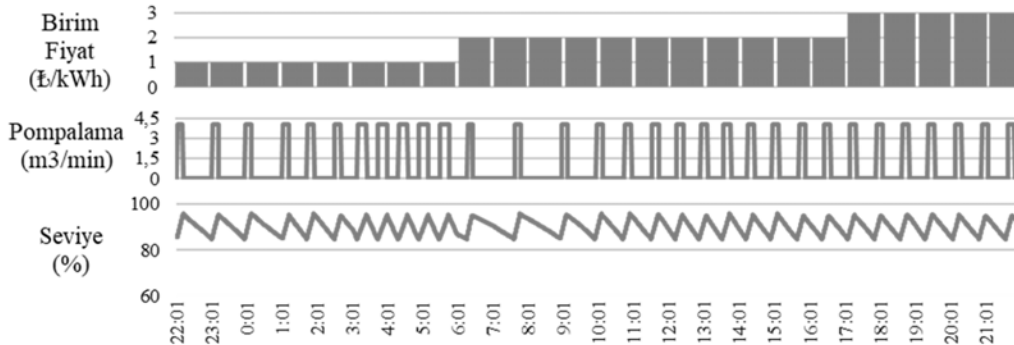
Şekil 11. B Pompasının SDPA ile Optimizasyonu (Optimization of Pump B with SDPA)



Şekil 12. B Pompasının OSDPA ile Optimizasyonu (Optimization of Pump B with OSDPA)

Tablo 6. B Pompası için CWLC, SDPA ve OSDPA'nın Karşılaştırılması (Comparison of CWLC, SDPA and OSDPA for Pump B)

Nitelik	CWLC	SDPA	OSDPA
#Çalışma/Durma Sayısı	5	2	1
Çalışma Süresi Toplam	176 min	178 min	178 min
Çalışma Süresi Gece	34 min	91 min	178 min
Çalışma Süresi Gündüz	106 min	87 min	0 min
Çalışma Süresi Puant	36 min	0 min	0 min
Pompalanan Su Toplam	166,24 m ³	168,13 m ³	168,13 m ³
Elektrik Maliyeti	215,24 ₺	170,01 ₺	129,23 ₺
Birim Pompalama Maliyeti	1,2948 ₺/m ³	1,0112 ₺/m ³	0,7686 ₺/m ³



Şekil 13. Pompa B ve C'nin Optimizasyonu Sonrası A Pompa ve Depo İkilisinin Durumları (Status of Pump A and Tank Duo After Optimization of Pumps B and C)

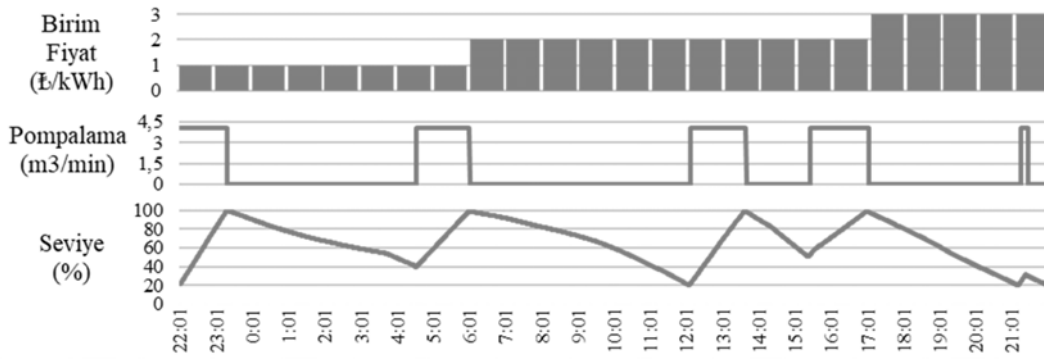
Şekil 13 ve Tablo 7’den de görüldüğü üzere; ikinci aşamadaki (B ve C Pompası) yüklerin OSDPA yaklaşımı kullanılarak kaydırılması, birinci aşamada (Pompa A) da aynı miktarda yükün kaymasını ve pompa açma/kapama sayısının azalmasını sağlamıştır. Herhangi bir optimizasyonun olmadığı duruma kıyasla, sadece B ve C pompalarının optimize edilmesi, CWLC ile çalışan pompa A’nın enerji maliyetinde yaklaşık olarak %8,12’lik bir tasarruf sağlamıştır.

6.4. Pompa A’nın Optimizasyonu (Optimization of Pump A)

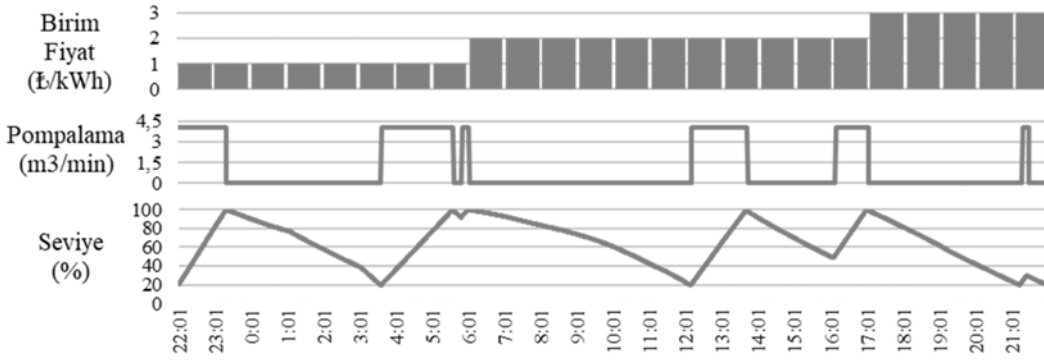
A pompa ve depo ikilisi için; günlük toplam su talebi $C_d = 1164 m^3$, puant periyodundaki talep oranı $C_2 = 0,26$, depodan su alan B ve C pompalarının OSDPA ile optimizasyonu sonrası puant periyodunda terfi ettirdikleri su miktarı $C_{py} = C_{pB} + C_{pC} = 0 m^3$, deponun su tutma kapasitesi $C^* = 328 m^3$ ’tür. Eş. 8’in kullanılmasıyla, puant

Tablo 7. Sadece B ve C Pompa Optimizasyonunun A Pompasına Etkisi (Impact of Only B and C Pump Optimization on Pump A)

Nitelik	A, B, C için CWLC	A için CWLC, B ve C için OSDPA
#Çalışma/Durma Sayısı	37	31
Çalışma Süresi Toplam	373 min	372 min
Çalışma Süresi Gece	85 min	146 min
Çalışma Süresi Gündüz	194 min	147 min
Çalışma Süresi Puant	94 min	79 min
Pompalanan Su Toplam	1517,79 m ³	1513,72 m ³
Elektrik Maliyeti	1.119,86 ₺	1.026,21 ₺
Birim Pompalama Maliyeti	0,7378 ₺/m ³	0,6779 ₺/m ³



Şekil 14. Tüm Pompaların SDPA ile Optimizasyonu Sonrası A Pompa ve Depo İkilisinin Durumları (Status of Pump A and Tank Couple After Optimization of All Pumps with SDPA)



Şekil 15. Tüm Pompaların OSDPA ile Optimizasyonu Sonrası A Pompa ve Depo İkilisinin Durumları (Status of Pump A and Tank Couple After Optimization of All Pumps with OSDPA)

Tablo 8. A Pompası için CWLC, SDPA ve OSDPA’nın Karşılaştırılması (Comparison of CWLC, SDPA and OSDPA for Pump A)

Nitelik	CWLC	SDPA	OSDPA
#Çalışma/Durma Sayısı	37	5	6
Çalışma Süresi Toplam	373 min	368 min	368 min
Çalışma Süresi Gece	85 min	167 min	210 min
Çalışma Süresi Gündüz	194 min	189 min	147 min
Çalışma Süresi Puant	94 min	12 min	11 min
Pompalanan Su Toplam	1517,79 m ³	1497,45 m ³	1497,45 m ³
Elektrik Maliyeti	1.119,86 ₺	895,99 ₺	845,55 ₺
Birim Pompalama Maliyeti	0,7378 ₺/m ³	0,5983 ₺/m ³	0,5647 ₺/m ³

Tablo 9. Tasarruf Miktarlarının Karşılaştırılması (Comparison of Savings Amounts)

Tasarruf	SDPA Pompa C	OSDPA Pompa C	SDPA Pompa B	OSDPA Pompa B	SDPA Pompa A	OSDPA Pompa A	SDPA Toplam	OSDPA Toplam
Günlük	18,76 ₺	40,89 ₺	47,36 ₺	87,88 ₺	211,06 ₺	261,90 ₺	277,18 ₺	390,67 ₺
Aylık	564 ₺	1.227 ₺	1.421 ₺	2.636 ₺	6.332 ₺	7.857 ₺	8.315 ₺	11.720 ₺
Yıllık	6.847 ₺	14.925 ₺	17.286 ₺	32.076 ₺	77.037 ₺	95.594 ₺	101.171 ₺	142.595 ₺

periyodunda depodan çıkan toplam suyun depo kapasitene oranının yüzde karşılığı $r = 92,27$ olarak hesaplanır ve Eş. 9 şartlarına göre gündüz tarifesi sonunda hedeflenen seviye değeri $L_1 = 100$ olarak bulunur.

B ve C pompalarının SDPA ile optimizasyonu sonrası A pompa ve depo ikilisinin optimizasyonu için de SDPA yaklaşımının kullanılması halinde, A pompa ve depo ikilisi için elde edilen sonuçlar Şekil 14'te gösterilmiştir. B ve C pompalarının OSDPA ile optimizasyonu sonrası A pompa ve depo ikilisinin optimizasyonu için de OSDPA yaklaşımının kullanılması halinde, A pompa ve depo ikilisi için elde edilen sonuçlar Şekil 15'te gösterilmiştir. Sistemdeki tüm pompaların CWLC, SDPA ve OSDPA yaklaşımlarıyla yapılması halinde elde edilen sonuçlar Tablo 8'de özetlenmiştir.

Şekil 15 ve Tablo 8'den de görüldüğü üzere; tüm pompaların SDPA değil de OSDPA ile optimize edilmesi, Pompa A'ya ait açma/kapama sayısında kayda değer bir değişiklik olmadan, puant yüklerinin daha fazla kaydırılmasını sağlamıştır. CWLC'ye kıyasla, tüm pompaların optimizasyonu için SDPA yaklaşımının kullanılması Pompa A'nın enerji maliyetinde yaklaşık %18,90'lık bir tasarruf sağlanırken, OSDPA yaklaşımının kullanılması halinde ise Pompa A'nın enerji maliyetindeki tasarruf oranı %23,47'ye çıkmıştır.

6.5. Elde Edilecek Kazanç (Earnings to be Achieved)

C pompası günlük ortalama $165 m^3$ su pompalamaktadır. SDPA ile optimizasyonu sonrası, C pompasının birim pompalama maliyeti $0,6331 \text{ ₺}/m^3$ 'ten $0,5194 \text{ ₺}/m^3$ 'e düşmüştür. Yalnızca C pompasının SDPA ile optimizasyonu sonucu sağlanacak günlük kazanç; $165 \cdot (0,6331 - 0,5194) = 18,76 \text{ ₺}$, yıllık kazanç ise; $18,76 \cdot 365 = 6.847,40 \text{ ₺}$ olacaktır. C pompasının OSDPA ile optimizasyonu sonrası, birim pompalama maliyeti $0,6331 \text{ ₺}/m^3$ 'ten $0,3853 \text{ ₺}/m^3$ 'e düşmüştür. Yalnızca C pompasının OSDPA ile optimizasyonu sonucu sağlanacak günlük kazanç; $165 \cdot (0,6331 - 0,3853) = 40,89 \text{ ₺}$, yıllık kazanç ise; $40,89 \cdot 365 = 14.923,76 \text{ ₺}$ olacaktır.

B pompası günlük ortalama $167 m^3$ su pompalamaktadır. SDPA ile optimizasyonu sonrası, B pompasının birim pompalama maliyeti $1,2948 \text{ ₺}/m^3$ 'ten $1,0112 \text{ ₺}/m^3$ 'e düşmüştür. Sadece B pompasının SDPA ile optimizasyonu sonucu sağlanacak günlük kazanç; $167 \cdot (1,2948 - 1,0112) = 47,36 \text{ ₺}$, yıllık kazanç ise; $47,36 \cdot 365 = 17.286,40 \text{ ₺}$ olacaktır. B pompasının OSDPA ile optimizasyonu sonrası, birim pompalama maliyeti $1,2948 \text{ ₺}/m^3$ 'ten $0,7686 \text{ ₺}/m^3$ 'e düşmüştür. Sadece B pompasının OSDPA ile optimizasyonu sonucu sağlanacak günlük kazanç; $167 \cdot (1,2948 - 0,7686) = 87,88 \text{ ₺}$, yıllık kazanç ise; $87,88 \cdot 365 = 32.076,20 \text{ ₺}$ olacaktır.

A pompası günlük ortalama $1513 m^3$ su pompalamaktadır. B ve C pompalarının SDPA ile optimizasyonu sonrası, A pompasının SDPA ile optimizasyonu, A pompasının birim pompalama maliyeti $0,7378 \text{ ₺}/m^3$ 'ten $0,5983 \text{ ₺}/m^3$ 'e düşmüştür. B ve C pompalarının SDPA ile optimizasyonu sonrası, yalnızca A pompasının SDPA ile optimizasyonu sonucu sağlanacak günlük kazanç; $1513 \cdot (0,7378 - 0,5983) = 211,06 \text{ ₺}$, yıllık kazanç ise; $211,06 \cdot 365 = 77.036,90 \text{ ₺}$ olacaktır. B ve C pompalarının OSDPA ile optimizasyonu sonrası, A pompasının OSDPA ile optimizasyonu, birim pompalama maliyeti

$0,7378 \text{ ₺}/m^3$ 'ten $0,5647 \text{ ₺}/m^3$ 'e düşmüştür. B ve C pompalarının OSDPA ile optimizasyonu sonrası, yalnızca A pompasının OSDPA ile optimizasyonu sonucu sağlanacak günlük kazanç; $1513 \cdot (0,7378 - 0,5647) = 261,90 \text{ ₺}$, yıllık kazanç ise; $261,90 \cdot 365 = 95.593,50 \text{ ₺}$ olacaktır.

A, B ve C pompalarının tümünün SDPA ile optimize edilmesiyle tüm sistemde sağlanacak günlük kazanç; $211,06 + 47,36 + 18,76 = 277,18 \text{ ₺}$, yıllık kazanç ise; $277,18 \cdot 365 = 101.170,70 \text{ ₺}$ olacaktır. A, B ve C pompalarının tümünün OSDPA ile optimize edilmesiyle tüm sistemde sağlanacak günlük kazanç; $261,90 + 87,88 + 40,89 = 390,67 \text{ ₺}$, yıllık kazanç ise; $390,67 \cdot 365 = 142.594,55 \text{ ₺}$ olacaktır.

SDPA ve OSDPA yaklaşımlarının tüm sisteme uygulanması durumlarında, CWLC yaklaşımına kıyasla sağlanacak günlük, aylık ve yıllık tasarruf miktarları Tablo 9'da gösterilmiştir.

7. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmanın amacı, SASKİ (Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi) bünyesindeki çok aşamalı yapıya sahip bir su temin sisteminin incelenmesi, CWLC ve SDPA yük öteleme tekniğine kıyasla OSDPA'nın enerji maliyetinde sağlanabileceği tasarrufun belirlenmesidir. Elde edilen sonuçlar, çok aşamalı (kaskad) yapıda olan su temin sistemlerinin tek aşamalı sistemlere göre daha karmaşık olduklarını, tüm sistemin optimizasyonu için öncelikle sistemin alt sistemlere ayrılması ve en yüksek aşamadan geriye doğru en alt aşamaya (ana kaynağa) kadar teker teker optimize edilmesi gerekliliğini ortaya koymuştur.

Depo kapasitesi, en pahalı tarife (puant) zamanındaki su talebini pompalama yapılmaksızın karşılayabiliyor ise pahalı tarifedeki yüklerin tamamı en ucuz tarife (gece) zamanına ötelenebilir. Ayrıca, tüketim oranı ve depo kapasitesine göre orta pahalılıkta olan tarife (gündüz) zamandaki yüklerinde tamamı veya bir kısmı en ucuz tarife (gece) zamanına ötelenebileceği, SDPA yaklaşımında en pahalı (puant) tarifesine geçiş seviyesinin hesaplanmayıp sabit bir değer olarak kullanılmasından dolayı bu işlemin gerçekleştirilemediği, en pahalı (puant) tarifesine geçişteki seviyenin de hesaplanmasının gerekliliği görülmüştür. SDPA yaklaşımında bazı iyileştirmeler yapılarak bu değerlerin hesaplanmasıyla SDPA'nın sağlamadığı bu durum OSDPA ile sağlanmıştır. Ayrıca, SDPA'ya kıyasla OSDPA, tasarruf miktarını arttırmanın yanı sıra pompa açma/kapama sayısını daha fazla azaltmayı başarmıştır.

Çok aşamalı pompa sistemlerinde, yalnızca en son aşamalarının optimize edilmesi durumunda, ilk aşamalarda herhangi bir optimizasyon yapılması dahi, ana su kaynağına ulaşmaya kadar alt aşamalarda pompaların enerji maliyetinde düşüş yaşandığı görülmüştür.

OSDPA, çok aşamalı (kaskad) yapıda olan su temin sistemine ait A, B ve C pompalarının işletim zamanlanmasını optimize ederek, en pahalı tarifedeki elektrik yüklerinin azami derecede diğer tarife zamanlarına ötelenmesini sağlamıştır. Konvansiyonel su seviye kontrolü (CWLC) ile kıyaslandığında, belirlenen kısıtlar altında ve sistemde herhangi bir fiziksel ekipman iyileştirilmesi yapılmadığında,

yalnızca yük öteleme ile sağlanabilecek en iyi optimizasyon sonucunu veren OSDPA, sistemdeki C, B ve A pompalarının enerji maliyetlerinde sırasıyla %39, %41 ve %24 tasarruf sağlayabileceğini ortaya koymuştur.

Pompalama sistemine ait maksimum minimum çalışma seviyeleri, talep, tarife birim fiyatları vb. işletim parametrelerinin değişmesi durumunda kullanılacak optimizasyon algoritması yapılacak bu değişikliklere uyum sağlayabilmelidir. Günlük su talebi ve talep modelinin değişken olmadığı varsayıldığı için bu çalışmada herhangi bir talep tahmin modülüne ihtiyaç duyulmamıştır. Su talebinin dönemsel olarak (yaz/kış, hafta içi/hafta sonu vb.) değişken olabileceği durumlarda ise OSDPA'nın talep tahmin modülüyle kullanılması önerilir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Çalışma alanı belirleme ve ilgili çalışma alanına ait bilgi edinme konusunda, yardımlarını esirgemeyen Sakarya Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ) SCADA Şube Müdürü İsa Çomaklı ve SCADA Şube Müdürlüğü çalışanlarına teşekkür ederiz. Ayrıca, Natura Otomasyon ve Yazılım Şirketi'ne ait kaynakların bu çalışma için kullanılmasına ve çalışmanın maddi-manevi desteklenmesine olanak sağlayan, şirket müdürü T. Bahadır Taşkıran'a teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

1. Yang Z., Borsting H., Optimal scheduling and control of a multi-pump boosting system, IEEE International Conference on Control Applications, 24 (4), 2071–2076, 2010.
2. Bunn S. M., Reynolds L., The energy-efficiency benefits of pump-scheduling optimization for potable water supplies, IBM J. Res. Dev., 53 (3), 5:1-5:13, 2009.
3. Grundfos, Section 5.1 Life cycle costs equation, Pump Handbook, Grundfos Management A/S, 126-130, 2004.
4. Takahashi S., Koibuchi H., Adachi S., Water Supply Operation and Scheduling System with Electric Power Demand Response Function, XVIII International Conference on Water Distribution Systems-WDSA2016, Cartage-Colombia ,327-332, 24-28 July, 2016.
5. Shu S., Zhang D., Liu S., Zhao M., Yuan Y., Zhao H., Power Saving in Water Supply System with Pump Operation Optimization, 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu-China, 1-4, 28-31 March, 2010.
6. Savic, D.A., Walters, G.A., Schwab, M., Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply, Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics), 1305, 227-235, 1997.
7. 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.
8. Zhang H., Xia X., Zhang J., Optimal sizing and operation of pumping systems to achieve energy efficiency and load shifting, Electr. Power Syst. Res., 86, 41–50, 2012.
9. Zhuan X., Li W., Yang F., Optimal Operation Scheduling of a Pumping Station in East Route of South-to-north Water Diversion Project, The 8th International Conference on Applied Energy-ICAE2016, Beijing-China, 3031-3037, 8-10 October, 2016.
10. Küçük H., Turan M., Yaralı K., Alsanabani H., İskefiyeli M., A new algorithm for load shifting operation of water pumping stations, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 36 (4), 2081-2093, 2021.
11. Barry J. A., Technical And Managerial Approaches To Watergy, Cost-Effective Savings of Water and Energy, WATERGY, 6-17, 2007.
12. Bagirov A. M., Barton A. F., Mala-Jetmarova H., Al Nuaimat A., Ahmed S. T., Sultanova N., Yearwood J., An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling, Math. Comput. Model., 57 (3-4), 873-886, 2013.
13. Gong Y., Cheng J., Optimization of Cascade Pumping Stations' Operations Based on Head Decomposition–Dynamic Programming Aggregation Method Considering Water Level Requirements, J. Water Resour. Plan. Manag., 144 (7), 04018034, 2018.
14. Gong Y., Cheng J., Combinatorial Optimization Method for Operation of Pumping Station with Adjustable Blade and Variable Speed Based on Experimental Optimization of Subsystem, Adv. Mech. Eng., 2014, 1-7, 2014.
15. Cheng H., Chen Y., Cheng J., Wang W., Gong Y., Wang L., Wang Y., Optimization of Pressurized Tree-Type Water Distribution Network Using the Improved Decomposition–Dynamic Programming Aggregation Algorithm, Water, 11 (7), 1391, 2019.
16. Zhang Z., Lei X., Tian Y., Wang L., Wang H., Su K., Optimized Scheduling of Cascade Pumping Stations in Open-Channel Water Transfer Systems Based on Station Skipping, J. Water Resour. Plan. Manag., 145 (7), 05019011, 2019.
17. Zhuan X., Zhang L., Guo J., Optimal operation scheduling of a pump station, 2011 Chinese Control and Decision Conference-CCDC, Mianyang-China, 3797-3802, 23-25 May, 2011.

