

T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI ENDÜSTRİYEL ALTYAPILAR İÇİN ENERJİ  
OPTİMİZASYONU: SU ŞEBEKESİ ÖRNEĞİ

DOKTORA TEZİ

Hussein AL-SANABANI

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilgisayar Mühendisliği Bilim Dalı

ŞUBAT 2024



T.C.  
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKILLI ENDÜSTRİYEL ALTYAPILAR İÇİN ENERJİ  
OPTİMİZASYONU: SU ŞEBEKESİ ÖRNEĞİ

DOKTORA TEZİ

Hussein AL-SANABANI

Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı

Bilgisayar Mühendisliği Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr.Öğr.Üyesi Murat İSKEFİYELİ

ŞUBAT 2024



Hussein AL-SANABANI tarafından hazırlanan “Akıllı Endüstriyel Altyapılar İçin Enerji Optimizasyonu: Su Şebekesi Örneği” adlı tez çalışması 14.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı **Bilgisayar Mühendisliği** Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

### Tez Jürisi

**Jüri Başkanı :** **Prof.Dr. Cemil ÖZ**  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Dr.Öğr.Üyesi Murat İSKEFİYELİ** (Danışman)  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Dr.Öğr.Üyesi Mustafa TURAN**  
Sakarya Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Prof. Dr. İhsan PEHLİVAN**  
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi

**Jüri Üyesi :** **Dr.Öğr.Üyesi Sultan ZAVRAK**  
Düzce Üniversitesi



## **ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ**

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “Akıllı Endüstriyel Altyapılar İçin Enerji Optimizasyonu: Su Şebekesi Örneği” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(14/02/2024).

Hussein AL-SANABANI





*Anneme*



## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitiminin boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Murat İSKEFİYELİ'ye, çalışma arkadaşlarım Hayri KÜÇÜK ve Kadir YARALI'ya teşekkürlerimi sunarım.

Tüm hayatım boyunca yanımda olan ve eğitimin için bana sürekli olarak destek olan anneme sarf ettiği emekler için sonsuz teşekkür ederim.

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

Hussein AL-SANABANI



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

|  |           |
|--|-----------|
| ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ .....                  | v         |
| TEŞEKKÜR .....   | ix        |
| İÇİNDEKİLER .....  | xi        |
| KISALTMALAR .....  | xiii      |
| SİMGELER .....   | xv        |
| TABLO LİSTESİ .....  | xvii      |
| ŞEKİL LİSTESİ .....  | xix       |
| ÖZET .....   | xxi       |
| SUMMARY .....  | xxiii     |
| <b>1. GİRİŞ .....</b>  | <b>1</b>  |
| 1.1. Problem Tanımı .....  | 1         |
| 1.1.1. Enerji verimliliği .....                                    | 1         |
| 1.1.2. Yük yönetimi .....  | 2         |
| 1.2. Motivasyon .....  | 3         |
| 1.3. Hedef .....   | 3         |
| 1.4. Tez planı .....   | 4         |
| <b>2. OPTİMİZASYONA VE DİNAMİK PROGRAMLAMAYA GİRİŞ .....</b>       | <b>7</b>  |
| 2.1. Optimizasyona Genel Bakış .....                               | 7         |
| 2.1.1. Optimizasyon problemi ifadesi .....                         | 7         |
| 2.1.2. Amaç fonksiyonu .....                                       | 7         |
| 2.1.3. Tasarım değişkenleri .....                                  | 7         |
| 2.1.4. Kısıtlamalar .....  | 8         |
| 2.2. Optimizasyon Problemi Türleri .....                           | 8         |
| 2.2.1. Kısıtlamalara dayalı sınıflandırma .....                    | 8         |
| 2.2.2. Amaç fonksiyonu ve kısıtlamalara dayalı sınıflandırma ..... | 8         |
| 2.2.2.1. Doğrusal programlama problemi .....                       | 8         |
| 2.2.2.2. Doğrusal olmayan programlama problemi .....               | 8         |
| 2.2.3. Değişkenlerin deterministiklerine göre sınıflandırma .....  | 9         |
| 2.2.3.1. Stokastik programlama problemi .....                      | 9         |
| 2.2.3.2. Deterministik programlama problemi .....                  | 10        |
| 2.2.4. Amaç fonksiyonu sayısına göre sınıflandırma .....           | 10        |
| 2.2.5. Değişkenlerin değerlerine göre sınıflandırma .....          | 10        |
| 2.3. Optimizasyon Teknikleri .....                                 | 11        |
| 2.3.1. Doğrusal programlama .....                                  | 11        |
| 2.3.2. Doğrusal olmayan programlama .....                          | 11        |
| 2.3.3. Tam sayılı programlama .....                                | 11        |
| 2.3.4. Dinamik programlama .....                                   | 12        |
| <b>3. BASİT POMPALAMA SİSTEMLERİ İLE ÇALIŞMA .....</b>             | <b>15</b> |
| 3.1. Özet .....  | 15        |
| 3.2. Literatür Araştırması .....                                   | 15        |
| 3.3. Çalışma Alanının Tanıtımı .....                               | 16        |

|  |           |
|--|-----------|
| 3.4. Problem Formülasyonu .....                              | 19        |
| 3.5. Çözümler .....  | 20        |
| 3.5.1. IDPA yaklaşımı .....                                  | 20        |
| 3.5.2. SDPA yaklaşımı .....                                  | 21        |
| 3.6. Uygulamalı Çalışma Sonuçları .....                      | 25        |
| 3.6.1. IDPA'nın simülasyonu ve sonuçları .....               | 26        |
| 3.6.2. SDPA'nın simülasyonu ve sonuçları .....               | 27        |
| 3.6.3. CWLC, IDPA ve SDPA'nın karşılaştırılması .....        | 28        |
| 3.6.4. SDPA'nın uygulanması .....                            | 30        |
| 3.7. Sonuçlar .....  | 31        |
| <b>4. ÇOK AŞAMALI POMPALAMA SİSTEMLERİ İLE ÇALIŞMA .....</b> | <b>33</b> |
| 4.1. Özet .....  | 33        |
| 4.2. Literatür Araştırması .....                             | 33        |
| 4.3. Çalışma Alanının Tanıtımı .....                         | 34        |
| 4.4. Problem Formülasyonu .....                              | 38        |
| 4.5. Çözümler .....  | 41        |
| 4.5.1. SDPA yaklaşım .....                                   | 41        |
| 4.5.2. OSDPA Yaklaşımı .....                                 | 42        |
| 4.6. Uygulamalı Çalışma Sonuçları .....                      | 44        |
| 4.6.1. Pompa C'nin optimizasyonu .....                       | 45        |
| 4.6.2. Pompa B'nin optimizasyonu .....                       | 46        |
| 4.6.3. Pompa B ve C optimizasyonunun pompa A'ya etkisi ..... | 48        |
| 4.6.4. Pompa A'nın optimizasyonu .....                       | 49        |
| 4.6.5. Elde edilecek kazanç .....                            | 51        |
| 4.7. Sonuçlar .....  | 52        |
| <b>5. ÇOK POMPALI POMPALAMA SİSTEMLERİ İLE ÇALIŞMA .....</b> | <b>55</b> |
| 5.1. Özet .....  | 55        |
| 5.2. Literatür Araştırması .....                             | 56        |
| 5.3. Çalışma Alanının Tanıtımı .....                         | 57        |
| 5.4. Problem Formülasyonu .....                              | 60        |
| 5.5. Çözümler .....  | 63        |
| 5.5.1. SDPA yaklaşımı .....                                  | 63        |
| 5.5.2. E-SDPA yaklaşımı .....                                | 63        |
| 5.6. Uygulamalı Çalışma Sonuçları .....                      | 67        |
| 5.6.1. CWLC ve E-SDPA'nın karşılaştırılması .....            | 69        |
| 5.7. Sonuçlar .....  | 71        |
| <b>6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>                   | <b>73</b> |
| 6.1. Basit Pompalama Sistemleri ile Çalışma .....            | 73        |
| 6.2. Çok Aşamalı Pompalama Sistemleri ile Çalışma .....      | 73        |
| 6.3. Çok Pompalı Pompalama Sistemleri ile Çalışma .....      | 74        |
| 6.4. Genel Değerlendirme ve Öneriler .....                   | 75        |
| <b>KAYNAKLAR .....</b>                                       | <b>77</b> |
| <b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>  | <b>81</b> |

## **KISALTMALAR**

|               |   |
|---------------|---|
| <b>SDPA</b>   | : Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması   |
| <b>CWLC</b>   | : Conventional Water Level Control, Geleneksel Su Seviyesi Kontrolü   |
| <b>OSDPA</b>  | : Optimal Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması   |
| <b>E-SDPA</b> | : Extended Simplified Dynamic Programming Algorithm,<br>Genişletilmiş Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması |
| <b>SASKİ</b>  | : Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi  |
| <b>LP</b>     | : Linear Programming, Doğrusal Programlama  |
| <b>NLP</b>    | : Non-Linear Programming, Doğrusal Olmayan Programlama  |
| <b>OK</b>     | : Optimal Kontrol   |
| <b>IDPA</b>   | : Improved Dynamic Programming Algorithm,<br>Geliştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması                            |
| <b>SQL</b>    | : Structured Query Language, Yapılandırılmış Sorgu Dili   |
| <b>PLC</b>    | : Programmable Logic Controller, Programlanabilir Lojik Kontrolörler  |



## SİMGELER

|                      |                                   |
|----------------------|-----------------------------------|
| <b>m<sup>3</sup></b> | : Metreküp [Birim]                |
| <b>kW</b>            | : Kilowatt [Birim]                |
| <b>kWsa</b>          | : Kilowatt saat [Birim]           |
| <b>₺</b>             | : Türk lirası para birimi [Birim] |
| <b>μs</b>            | : Mikrosaniye [Birim]             |
| <b>dk</b>            | : Dakika [Birim]                  |





## TABLO LİSTESİ

### Sayfa

|  |    |
|--|----|
| <b>Tablo 3.1.</b> CWLC, IDPA ve SDPA Sonuçlarının Karşılaştırılması. ....        | 28 |
| <b>Tablo 3.2.</b> Uygulama Sonuçları.....  | 30 |
| <b>Tablo 4.1.</b> A, B, C Pompalarına Ait Bilgiler. ....                         | 35 |
| <b>Tablo 4.2.</b> A, B, C Depolarına Ait Bilgiler. ....                          | 36 |
| <b>Tablo 4.3.</b> Üç Zamanlı Elektrik Tarife Fiyatlandırması. ....               | 36 |
| <b>Tablo 4.4.</b> CWLC için Çalışma Sınırları. ....                              | 37 |
| <b>Tablo 4.5.</b> C Pompası için CWLC, SDPA ve OSDPA'nın Karşılaştırılması.....  | 46 |
| <b>Tablo 4.6.</b> B Pompası için CWLC, SDPA ve OSDPA'nın Karşılaştırılması.....  | 47 |
| <b>Tablo 4.7.</b> Sadece B ve C Pompa Optimizasyonunun A Pompasına Etkisi. ....  | 49 |
| <b>Tablo 4.8.</b> A Pompası için CWLC, SDPA ve OSDPA'nın Karşılaştırılması. .... | 50 |
| <b>Tablo 4.9.</b> Tasarruf Miktarlarının Karşılaştırılması. ....                 | 52 |
| <b>Tablo 5.1.</b> 1, 2, 3 Pompalarına Ait Bilgiler. ....                         | 58 |
| <b>Tablo 5.2.</b> A Deposuna Ait Bilgiler.....                                   | 59 |
| <b>Tablo 5.3.</b> Üç Zamanlı Elektrik Tarife Fiyatlandırması. ....               | 59 |
| <b>Tablo 5.4.</b> CWLC için Çalışma Sınırları. ....                              | 60 |
| <b>Tablo 5.5.</b> Üç Pompanın Çalışma Olasılıkları.....                          | 64 |
| <b>Tablo 5.6.</b> CWLC ve E-SDPA Sonuçlarının Karşılaştırılması. ....            | 69 |
| <b>Tablo 5.7.</b> Tasarruf Miktarlarının Karşılaştırılması. ....                 | 71 |



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

|   |    |
|---|----|
| Şekil 2.1. Optimizasyonda Konveks ve Non-Konveks Fonksiyonlar [25].                         | 9  |
| Şekil 2.2. Tek aşamalı karar problemi.  | 13 |
| Şekil 2.3. Çok aşamalı karar problemi.  | 14 |
| Şekil 3.1. Çalışma Alanının Şematik Gösterimi.  | 17 |
| Şekil 3.2. Tüketim Faktörü.   | 18 |
| Şekil 3.3. CWLC Yaklaşımı, Seviye ve Pompa Çalışma Durumları.                               | 18 |
| Şekil 3.4 SDPA-Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması.                             | 23 |
| Şekil 3.5. Akış Diyagramı.  | 25 |
| Şekil 3.6. IDPA Yaklaşımı, $T_o = 60 dk$ , Seviye ve Pompa Çalışma Durumları.               | 26 |
| Şekil 3.7. IDPA Yaklaşımı, $T_o = 30 dk$ , Seviye ve Pompa Çalışma Durumları.               | 26 |
| Şekil 3.8. IDPA Yaklaşımı, $T_o = 15 dk$ , Seviye ve Pompa Çalışma Durumları.               | 27 |
| Şekil 3.9. SDPA Yaklaşımı, $T_o = 1 dk$ , Seviye ve Pompa Çalışma Durumları.                | 28 |
| Şekil 4.1. Uygulama Alanı.  | 35 |
| Şekil 4.2. Saatlik Talep Faktörü.   | 36 |
| Şekil 4.3. C Depo ve Pompa İkili için Mevcut Durumlar.                                      | 37 |
| Şekil 4.4. B Depo ve Pompa İkili için Mevcut Durumlar.                                      | 37 |
| Şekil 4.5. A Depo ve Pompa İkili için Mevcut Durumlar.                                      | 38 |
| Şekil 4.6. Tek Aşamalı Pompa İstasyonu.   | 40 |
| Şekil 4.7. Çok Aşamalı Pompa İstasyonu.   | 40 |
| Şekil 4.8. OSDPA Algoritması.   | 43 |
| Şekil 4.9. C Pompasının SDPA ile Optimizasyonu.   | 45 |
| Şekil 4.10. C Pompasının OSDPA ile Optimizasyonu.   | 45 |
| Şekil 4.11. B Pompasının SDPA ile Optimizasyonu.  | 47 |
| Şekil 4.12. B Pompasının OSDPA ile Optimizasyonu.   | 47 |
| Şekil 4.13. Pompa B ve C'nin Optimizasyonu Sonrası A Pompa ve Depo İkili Durumları.         | 48 |
| Şekil 4.14. Tüm Pompaların SDPA ile Optimizasyonu Sonrası A Pompa ve Depo İkili Durumları.  | 50 |
| Şekil 4.15. Tüm Pompaların OSDPA ile Optimizasyonu Sonrası A Pompa ve Depo İkili Durumları. | 50 |
| Şekil 5.1. Uygulama Alanı.  | 58 |
| Şekil 5.2. Saatlik Talep Faktörü.   | 59 |
| Şekil 5.3. A Depo ve Pompaları için Mevcut Durumlar.  | 60 |
| Şekil 5.4. Tek Pompalı İstasyonu.   | 62 |
| Şekil 5.5. Çok Pompalı İstasyonu.   | 62 |
| Şekil 5.6. E-SDPA Algoritması.  | 66 |
| Şekil 5.7. E-SDPA Akış Diyagramı.   | 67 |
| Şekil 5.8. E-SDPA Yaklaşımı, $T_o = 1 dk$ , Seviye ve Pompalar Çalışma Durumları.           | 69 |



## AKILLI ENDÜSTRİYEL ALTYAPILAR İÇİN ENERJİ OPTİMİZASYONU: SU ŞEBEKESİ ÖRNEĞİ

### ÖZET

Su dağıtım sistemlerinin verimli işletimi için özellikle enerji maliyetlerinin azaltılması ve su talebinin sürekli olarak karşılanması büyük öneme sahiptir. Bu amaçla, enerji maliyetlerini minimize etmek ve su pompalama istasyonlarının işleyişini optimize etmek için matematiksel modeller kullanılır. Bu bağlamda, üç farklı çalışma sunulmuştur:

İlk çalışma, su dağıtım sistemlerindeki (bir pompa ve bir depo) pompalama için kullanılan enerji maliyetini azaltmayı hedeflemektedir. Bu amaçla, SDPA (Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması) adlı yeni bir algoritma geliştirilmiştir. SDPA, geleneksel su seviyesi kontrolü (CWLC) yaklaşımına kıyasla daha fazla enerji tasarrufu sağlayabilir. Özellikle Sakarya ilindeki bir su dağıtım sistemi üzerinde yapılan uygulamalarda, SDPA'nın enerji maliyetinde %12'lik bir tasarruf elde edebildiği görülmüştür.

İkinci çalışmada, SDPA yaklaşımının daha geniş bir kullanım alanı sağlayacak şekilde optimize edilerek OSDPA (Optimal Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması) adlı yeni bir algoritma geliştirilmiştir. OSDPA, çok aşamalı (kaskad) sistemleri optimize etmek için kullanılabilir ve özellikle karmaşık pompalama sistemlerinde etkili sonuçlar verir. Örnek bir vaka çalışması olarak Türkiye'deki Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi'ne ait çok aşamalı pompa sistemleri incelenmiş ve OSDPA yaklaşımının enerji maliyetlerinde önemli tasarruflar sağladığı gösterilmiştir.

Üçüncü çalışma ise E-SDPA (Genişletilmiş Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması) adlı bir algoritmayı tanıtmaktadır. Bu algoritma, çoklu pompa istasyonları için optimize edilmiştir ve enerji maliyetlerini azaltmak için farklı zaman dilimlerindeki yükleri yönetmede etkili bir şekilde çalışır. Çalışmalar, E-SDPA'nın geleneksel su seviyesi kontrolü yaklaşımıyla karşılaştırıldığında enerji maliyetlerinde %20'lik bir tasarruf sağlayabileceğini göstermektedir.

Bu üç çalışma, su dağıtım sistemlerinde enerji tasarrufunu artırmak için geliştirilmiş algoritmalar sunarak elektrik kaynaklarının daha sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine katkı sağlar. Sonuç olarak bu çalışmalar, su dağıtım sistemlerindeki pompalama enerji maliyetlerini azaltmak için geliştirilen SDPA, OSDPA ve E-SDPA algoritmalarının, enerji tasarrufu sağlamak ve su talebini sürekli olarak karşılamak isteyen su dağıtım şirketleri için önemli araçlar olduğunu göstermektedir.



## **ENERGY OPTIMIZATION FOR SMART INDUSTRIAL INFRASTRUCTURE: WATER SUPPLY NETWORK EXAMPLE**

### **SUMMARY**

Inefficient operation of pump stations leads to ineffective pump systems. It is evident that the primary expense in pumping systems is the energy cost, constituting the largest portion of the overall expenditure.

To mitigate energy expenses, load-shifting techniques contributing to water demand management can be employed. These approaches involve strategies to shift electrical loads to off-peak hours, utilizing tank capacity to reduce pumping costs in water distribution systems.

Ensuring the optimal functioning of water distribution systems is crucial, particularly when aiming to improve the performance of water pumping stations for the dual purpose of lowering energy costs and consistently meeting water demand. Mathematical models are employed to minimize energy expenses and optimize the operation of water pumping stations in pursuit of this objective. In this context, three distinct studies have been presented:

The first study aims to reduce the energy cost associated with pumping in water distribution systems (one pump and one reservoir). For this purpose, a new algorithm called Simplified Dynamic Programming Algorithm (SDPA) has been developed. SDPA can provide more energy savings compared to the Conventional Water Level Control (CWLC) approach.

SDPA stands out as an algorithm that aims to shift peak loads to the night by simply optimizing the pumping schedule, without changing the equipment and physical conditions in existing drinking water distribution systems.

The simulation and application results have demonstrated that the SDPA approach offers lower pump operating frequency and reduced pumping costs compared to the CWLC and Improved Dynamic Programming Algorithm (IDPA) approaches. By implementing SDPA, the optimal amount of savings achievable solely through the optimization of the pumping schedule has been attained. In the simulation environment, it was observed that the maximum savings achievable through the optimization of only the pumping schedule is 11.97%, and this amount has translated into a 11.85% savings in operational costs reflected in electricity bills with the implementation of SDPA.

With the implementation of SDPA, it has been possible to reduce the decision period encountered in the IDPA approach, addressing the issue of increased pump operating frequency. This has resulted in a significant reduction of approximately 72% in the number of pump start-stop decisions. The advantages derived from the reduction in pump start-stop cycles include: extended pump-motor lifespan, increased maintenance intervals, avoidance of high currents during startup (inrush current), and a decrease in energy consumption compared to nominal power due to the reduction in inrush current.

The second study optimizes the SDPA approach to create a new algorithm called Optimal Simplified Dynamic Programming Algorithm (OSDPA) that can have a broader range of applications. OSDPA can be used to optimize multi-stage (cascade) systems and yields effective results, especially in complex pumping systems. As an example case study, multi-stage pump systems belonging to the Sakarya Water and Sewerage Administration in Turkey were examined, and the OSDPA approach was shown to provide significant energy cost savings.

According to OSDPA, it is emphasized that in order to optimize the entire system, the system must first be divided into subsystems and optimized step by step from the top level to the bottom level (main source). In multistage pump systems, when only the last stages are optimized, a reduction in the energy cost of the pumps in the lower stages until reaching the main water supply has been observed, even if no optimization has been made in the first stages.

Despite the complexity of cascade-structured systems, OSDPA has provided lower pump operating frequency and significant energy savings compared to CWLC. OSDPA achieves this by optimizing the operating schedules of pumps A, B, and C in the water supply system, ensuring the maximum shift of the highest-cost electricity consumptions to other tariff time slots as much as possible. This underscores the success of OSDPA in cascade-structured water supply systems. When compared to Conventional Water Level Control (CWLC), under specified conditions and without any physical equipment improvements, OSDPA offers the best optimization results achievable solely through load shifting. OSDPA can deliver energy cost savings of 39%, 41%, and 24% for pumps C, B, and A, respectively, in the system.

The third study introduces an algorithm called Extended Simplified Dynamic Programming Algorithm (E-SDPA). E-SDPA is an algorithm developed to optimize multi-pump water stations and effectively manages loads at different time intervals to reduce energy costs. E-SDPA is an adaptation of the SDPA algorithm for use in multiple pump stations, which typically consist of a tank and multiple pumps.

The simulation results conducted in the study field clearly demonstrate that the E-SDPA approach provides lower pump operating frequency and reduced pump costs compared to CWLC approaches. By using E-SDPA, the maximum savings achievable through the optimization of pump operating times alone have been attained. This savings amount was determined to be 20.69% in our simulations.

As a result of implementing E-SDPA, the number of pump start-stop cycles has been reduced by 77% compared to the CWLC approach. The advantages of reducing pump start-stop cycles include an extended pump-motor lifespan, extending maintenance periods, avoidance of high inrush currents during startup, and a decrease in energy consumption compared to nominal power due to the reduction in inrush current.

These three studies present novel algorithms to reduce the energy costs of water pumping systems. Each of SDPA, OSDPA, and E-SDPA demonstrates lower pump operating frequency and costs compared to traditional methods such as CWLC. Additionally, practical advantages like the lightweight nature of these algorithms and their integration with Programmable Logic Controllers (PLC) have been emphasized.

These three studies present that in multistage pump systems, when only the last stages are optimized, a reduction in the energy cost of the pumps in the lower stages until reaching the main water supply has been observed, even if no optimization has been made in the first stages.

These three studies offer developed algorithms to enhance energy savings and efficiency in water distribution systems, contributing to the more sustainable management of electricity resources. As a result, these studies demonstrate that the SDPA, OSDPA, and E-SDPA algorithms developed to reduce pumping energy costs in water distribution systems are essential tools for water distribution companies seeking to achieve energy savings and consistently meet water demand.





# 1. GİRİŞ

## 1.1. Problem Tanımı

Nüfusların artışı, topluluklar ile su kaynakları arasındaki mesafede bir artışa yol açarak çeşitli su ağlarının hızlı bir şekilde genişlemesine neden oldu. Aynı zamanda, küresel su tüketimi son 50 yılda dört kat arttı ve bu değerin artmaya devam edeceği beklenmektedir [1]. Su tedarik sistemleri ve su dağıtım ağları, endüstri toplumlarının en kritik ve hayati altyapı unsurlarından birini oluşturur [2]. Su ve enerji, toplumların refahı için temel unsurlardır. Artan temiz su ve arıtma kapasitesine duyulan ihtiyacın sürekli artması, tasarım ve işletme yöntemlerinin enerji maliyetini azaltma konusunun, tasarımcılar ve operatörler tarafından daha fazla dikkate alınmasına yol açmaktadır [3].

Pompalama sistemleri, elektrik motorları tarafından kullanılan dünya enerjisinin neredeyse %20'sini ve bazı endüstriyel tesislerde toplam elektrik enerjisi tüketiminin %25 ila %50'sini oluşturur [4]. Dünya enerji tüketiminin su dağıtımı için ayrıldığı pay yaklaşık olarak küresel enerjinin %7'sini oluşturur [1]. Pompalama sistemleri nedeniyle oluşan enerji tüketimi, su sektöründeki enerji harcamalarının en büyük kısmını temsil eder ve bazen %90'a kadar ulaşabilir [5]. Akıllı tasarım, modernizasyon ve doğru işletme uygulamaları, pompalama sistemlerinin enerji tüketimini azaltmak için önemli fırsatlar sağlamaktadır. Tasarruflar sıklıkla enerjinin ötesine geçer ve performansın artırılması, güvenilirliğin artırılması ve ömür döngüsü maliyetlerinin azaltılması gibi unsurları da içerebilir [4].

Su tedarik sistemlerindeki pompa işletme elektrik giderlerini düşürme meselesi, enerji verimliliği ve yük yönetimi olmak üzere iki ayrı bakış açısıyla ele alınabilir.

### 1.1.1. Enerji verimliliği

Enerji verimliliği açısından değerlendirildiğinde, mevcut ekipmanların daha etkili ve yeni cihazlarla değiştirilmesi veya mevcut cihazların performansını artırmak için alınacak tedbirlerle enerji tüketiminin azaltılması amaçlanır. Örneğin, sabit akış gerektiren bölgelerde büyük pompaları daha verimli ve uygun boyutlu pompalarla değiştirmek [6], değişken hızlı sürücüler kullanmak [7, 8], düzenli bakım ve önceden koruyucu tedbirler alarak pompa ekipmanlarına bakım yapmak [7], pompaları daha

yüksek verimli modelleriyle değiştirmek [9] ve su kayıplarını önlemek [10] gibi tedbirler enerji verimliliği için uygulanabilecek önlemler arasında yer almaktadır.

### **1.1.2. Yük yönetimi**

Yük yönetimi bağlamında ise tüketilen elektrik miktarı sabit kalmakla birlikte, mevcut yüklerin enerji maliyeti açısından daha uygun zaman dilimlerine kaydırılması amaçlanır. Yük kaydırma, en yaygın kullanılan yük yönetim biçimidir [11]. Yük kaydırma stratejisi, birim fiyatın ve talebin yüksek olduğu zaman dilimlerindeki yükleri, mümkün olduğunca birim fiyatın ve talebin daha düşük olduğu zaman dilimlerine kaydırmayı amaçlar [3, 12]. Bu şekilde, aynı enerji miktarı kullanılırken daha düşük bir maliyet elde edilir. Elektrik maliyetlerini azaltma amacıyla, yük yönetimine katkı sağlayan birçok alanda, iş planlamasını puant saatlerine göre ayarlama, puant saatlerinde elektrik ihtiyacını jeneratörler veya önceden doldurulmuş (yenilenebilir enerji kaynakları veya düşük tarife saatlerinde şebekeden) bataryalardan karşılama gibi kaydırma teknikleri kullanılabilir [13, 14]. Su tedarik sistemlerinde, mevcut altyapı ve ekipmanları değiştirmeden, elektrik tüketimini ve birim fiyat yapısını “zaman tabanlı tarife” dikkate alarak ve depo kapasitesinden yararlanarak pompa işletimini en iyi şekilde düzenlemek ve uygun zamanlarda su pompalamak (yük kaydırma tekniklerini kullanarak), elektrik maliyetlerinde önemli bir azalma sağlayabilir [15-20].

Teorik olarak pompalama maliyetlerini düşürmek için, yeterince büyük su depoları tasarlanırsa ve bu depolar yalnızca yoğun olmayan saatlerde doldurulup, tüm zaman dilimlerinde talebi karşılayabilmesi sağlanabilir [18]. Bu tip depo tasarımı, yük kaydırma amaçlı kontrol algoritmalarının daha basit bir şekilde oluşturulabilmesini sağlar. Basitçe ifade etmek gerekirse, en ucuz saatlerde depolar tamamen doldurulacak ve bu saatlerin dışında tüm pompalar kapatılacaktır. Bu mantıklı bir çözüm olmasına rağmen, depodan talep edilen günlük su miktarı çok yüksek olduğunda, ihtiyaç duyulan depo büyüklüğü inşası zor boyutlara ulaşabilir. Ayrıca, depo kapasitesi çok büyük olduğunda, pompaların ve basma hatlarının sadece en ucuz saatlerde çalışabilmesi için bu talebi karşılayacak büyüklükte olması gerekir. Sonuç olarak, talep arttıkça, depo kapasitesi ve pompalama ekipmanları maliyetleri hızla artar. Bu nedenle, maliyet-etkin boyutlandırmayı sağlamak için fiyat-performans analizi yapılmalıdır [3].

Su depolarının ve pompalama ekipmanlarının, istenen koşulları sağlamak için yeterince büyük inşa edilememe veya mevcut pompalama istasyonlarının talep artışı nedeniyle yetersiz kalması durumlarında, mevcut depo kapasitesinden en iyi şekilde faydalanacak şekilde pompalamanın yapılması gerekir. Su temin sisteminde, fiziksel unsurların sabit olduğu bir durumda enerji maliyeti, pompalama zamanlamaları ve elektrik fiyat yapısı ile ilgilidir [17]. Böylece, zaman tabanlı elektrik tarifesi kullanarak, yükü pahalı zaman diliminden ucuz zaman dilimine kaydırmak ve bu şekilde enerji maliyetini düşürmek mümkündür [11]. Sabit hızlı pompaların kullanıldığı yük kaydırma problemleri, tamsayı programlama olarak adlandırılan bir optimal zamanlama problemi olarak kabul edilir [12, 15]. Bu tezde kullandığımız dinamik programlama tekniği bu tip optimizasyon problemlerinin çözümü için uygundur [21].

## **1.2. Motivasyon**

Pompa istasyonlarının doğru işletilememesi, verimsiz pompa istasyonlarının oluşmasına neden olur. Yapılan çalışmalara göre, pompalama sistemlerinin en büyük maliyetinin enerji maliyeti olduğu açıktır [4]. Başlangıç maliyetleri, kurulum ve devreye alma maliyetleri, enerji maliyetleri, işletme maliyetleri, bakım ve onarım maliyetleri, iş gücü kayıpları maliyetleri, çevresel maliyetler ve devre dışı bırakma ve bertaraf maliyetlerini içeren toplam maliyetin en büyük kısmını enerji maliyeti oluşturur.

Enerji maliyetlerini azaltma amacıyla, talep yönetimine katkı sağlayan yük kaydırma teknikleri kullanılabilir. Bu yaklaşımlar, su dağıtım sistemlerinde pompalama maliyetlerini düşürmek için depo kapasitesinden yararlanarak elektrik yüklerini puant saatleri dışına kaydırma tekniklerini içerir.

## **1.3. Hedef**

Su dağıtım sistemlerinin etkili işleyişi için enerji maliyetlerini azaltmaya yönelik çalışma yapılırken sürekli olarak su talebini de karşılamak büyük öneme sahiptir. Bu amaçla, enerji maliyetlerini azaltmak ve su pompalama istasyonlarının işletimini optimize etmek için matematiksel modeller kullanılmaktadır. Bu bağlamda, Türkiye'deki Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ) bünyesindeki su temin sistemi pompalama istasyonlarından üçü vaka çalışması olarak kullanılmıştır. Bu tezin

amacı herhangi bir ek yatırım veya altyapı değişikliği yapmadan, mevcut su pompalama sisteminin işletiminde elektrik birim fiyatlarının farklı olduğu zaman dilimine dayalı elektrik tarifeleri ile yük kaydırma teknikleri kullanarak, kullanılan enerji maliyetini düşürmektir.

Sonuç olarak, üç farklı çalışma geliştirilmiştir:

- İlk çalışmanın amacı, basit su dağıtım sistemlerinde enerji maliyetlerini azaltmaktır. SDPA (Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması) adı verilen yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma, birim fiyatın yüksek olduğu zaman diliminden birim fiyatın daha ucuz olduğu zaman dilimlerine (gece ve gündüz) yükleri başarılı bir şekilde taşıyabilir. Bu algoritma, tek bir pompa ve tek bir depo bulunan basit sistemler için geçerlidir.
- İkinci çalışmada, OSDPA (Optimal Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması) adı verilen yeni bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma, SDPA algoritmasında yapılan bir iyileştirmedir ve özellikle karmaşık pompalama sistemleri ve çok aşamalı (kaskad) sistemleri optimize etmek için kullanılabilir, etkili sonuçlar verir.
- Üçüncü çalışmada, E-SDPA (Genişletilmiş Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması) adı verilen bir algoritma sunulmaktadır. SDPA algoritması çoklu pompa istasyonlarında (bir depoya ve birden fazla pompa) kullanılacak şekilde geliştirilmiştir. Bu algoritma, enerji maliyetlerini azaltmak için farklı zaman dilimlerindeki yüklerin yönetilmesinde etkili bir şekilde çalışır.

Bu üç çalışma, su dağıtım sistemlerinde enerji tasarrufunu artırmak için geliştirilmiş algoritmalar sunmaktadır. Sonuç olarak bu çalışmalar, kullanılan yöntemlerin, sürekli olarak su talebini karşılamak isterken aynı zamanda enerji tasarrufu sağlamak isteyen su dağıtım şirketleri için önemli araçlar olduğunu göstermektedir.

#### **1.4. Tez planı**

Bu tez aşağıdaki açıklanan bölümlere göre düzenlenmiştir.

- BÖLÜM 2: Optimizasyonun derinlemesine bir incelemesini, optimizasyon türlerini, bazı optimizasyon tekniklerini ve dinamik programlama tekniğine odaklanmayı içermektedir.

- BÖLÜM 3: Basit su dağıtım sistemlerinde (bir depo ve bir pompa) enerji maliyetlerini azaltmak amacıyla geliştirilen SDPA algoritmasını bu tezin ilk hedefidir ve bu bölümde sunulmuştur.
- BÖLÜM 4: Bu tezin ikinci hedefi, çok kademeli (kaskad) su dağıtım sistemlerinde enerji maliyetlerini azaltmak amacıyla geliştirilen OSDPA'yı tanıtmaktır ve bu bölümde sunulmuştur.
- BÖLÜM 5: Bu tezin üçüncü hedefi, çok pompalı su dağıtım sistemlerinde enerji maliyetlerini azaltmak için geliştirilen E-SDPA algoritmasıdır ve bu bölümde sunulmuştur.
- BÖLÜM 6: Genel sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.





## 2. OPTİMİZASYONA VE DİNAMİK PROGRAMLAMAYA GİRİŞ

### 2.1. Optimizasyona Genel Bakış

Kelime olarak "optimum" Latince kökenli olup "nihai ideal" anlamına gelir; benzer şekilde, "optimus" da "en iyi" anlamına gelir. Bu nedenle, optimize etmek, uğraştığımız şeyi en üst düzeye çıkarmaya çalışmak anlamına gelir [22]. Matematik ve bilgisayar bilimi alanında optimizasyon, uygulanabilir çözüm kümesi içinde en iyi çözümü bulma sürecidir. Optimizasyonun temel amacı, bir dizi kısıtlamaya tabi olarak bir amaç fonksiyonunu en üst düzeye çıkarmak veya en aza indirmektir [23]. Optimizasyon, işletme araştırmaları, ekonomi, mühendislik ve bilgisayar bilimi gibi çeşitli alanlarda kritik bir rol oynar.

#### 2.1.1. Optimizasyon problemi ifadesi

Optimizasyon problemi ifadesi, tasarım değişkenlerinin ( $x$ ) amaç fonksiyonu  $f(x)$ 'ini, bu değişkenlere ait kısıtlamalara göre en aza indirme/en fazla artırma durumunu içerir. Matematiksel olarak, bu ifadeyi şu şekilde yazabiliriz:

*minimize/maksimize*  $f(x)$

*eşitsizlik kısıtlamaları* :  $g_i(x) \leq 0$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$

*eşitlik kısıtlamaları* :  $h_j(x) = 0$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$  (2.1)

#### 2.1.2. Amaç fonksiyonu

Amaç fonksiyonu, optimizasyonda hayati bir rol oynar ve bize en üst düzeye çıkarmayı amaçladığımız unsuru belirlemede rehberlik eder. Amaç fonksiyonu, problem türüne bağlı olarak ya bir maksimum ya da bir minimum şeklini alabilir [24]. Eğer maliyeti temsil ediyorsa, amacımız bunu minimize etmek; eğer kârı işaret ediyorsa, amacımız bunu maksimize etmektir.

#### 2.1.3. Tasarım değişkenleri

Tasarım değişkenleri, amaç fonksiyonunu optimize etmek için uygun değerleri atamaya çalıştığımız sistemi tanımlayan değişkenlerdir.

#### **2.1.4. Kısıtlamalar**

Pratikte, optimizasyon problemlerinin büyük çoğunluğu kısıtlamaların uygulanmasını gerektirir [24]. Kısıtlamalar, tasarım değişkenlerinin fonksiyonlarıdır ve amaç fonksiyonunu optimize ederken tasarım değişkenleri sınırlar içinde olmalıdır.

### **2.2. Optimizasyon Problemi Türleri**

Belirli bir optimizasyon problemini çözerken en uygun optimizasyon algoritmasını seçmek için optimizasyon problemini sınıflandırmalı ve problemin özelliklerinin mevcut optimizasyon algoritmalarının etkinliğini nasıl etkilediğini bilmeliyiz. Bu önemlidir çünkü hiçbir optimizasyon tekniği tüm problem türleri için etkili veya uygun değildir [24]. Optimizasyon problemleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir ve bu bölümde bu sınıflandırmaların çoğunu göstereceğiz.

#### **2.2.1. Kısıtlamalara dayalı sınıflandırma**

Herhangi bir optimizasyon problemi, problemin içinde kısıtlamaların olup olmamasına bağlı olarak kısıtlı veya kısıtsız olarak sınıflandırılabilir.

#### **2.2.2. Amaç fonksiyonu ve kısıtlamalara dayalı sınıflandırma**

Optimizasyon problemlerinin başka bir önemli sınıflandırması, amaç fonksiyonu ve kısıtlamalar için ifadelerin doğası üzerine dayanır. Bu sınıflandırmaya göre, optimizasyon problemleri doğrusal ve doğrusal olmayan programlama problemleri olarak sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma, hesaplama açısından son derece faydalıdır çünkü belirli bir problem sınıfının verimli çözümü için birçok özel yöntem bulunmaktadır. Bu nedenle bir tasarımcının ilk görevi karşılaşılan problem sınıfını araştırmaktır. Bu birçok durumda, problemi çözmeye işleminde benimsenecek çözüm prosedürlerini belirleyecektir [21].

##### **2.2.2.1. Doğrusal programlama problemi**

Hem amaç fonksiyonu hem de tüm kısıtlamalar doğrusal fonksiyonlar ise, bu probleme doğrusal programlama (Linear Programming LP) problemi denir.

##### **2.2.2.2. Doğrusal olmayan programlama problemi**

Amaç ve kısıtlama fonksiyonlarından herhangi birinin doğrusal olmaması durumunda probleme doğrusal olmayan programlama (Non-Linear Programming NLP) problemi

adı verilir. Bu en genel programlama problemidir ve diğer tüm problemler NLP probleminin özel durumları olarak düşünülebilir [21].

### 1. Geometrik Programlama Problemi

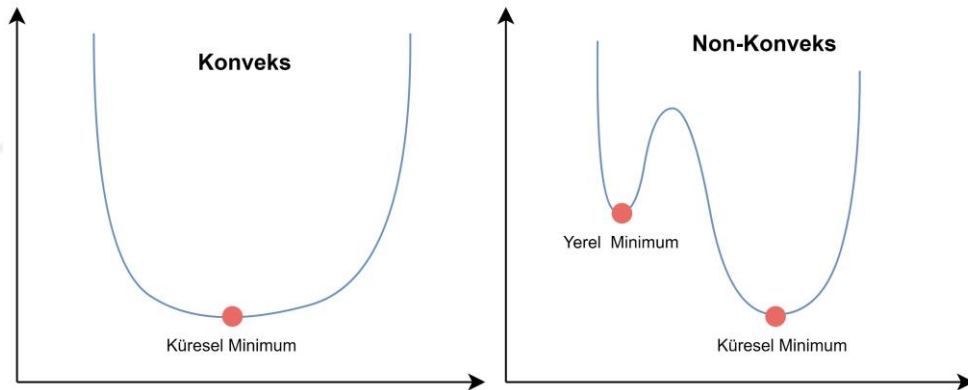
Geometrik programlama problemi, amaç fonksiyonunun ve kısıtlamaların  $X$ 'te posynomial olarak ifade edildiği doğrusal olmayan bir programlama problemidir. Posynomial pozitif katsayılı polinomlardır.

### 2. Kuadratik Programlama Problemi

Bir Kuadratik programlama problemi, amaç fonksiyonunun karesel olduğu ve kısıtlamaların doğrusal olduğu bir doğrusal olmayan programlama problemidir.

### 3. Konveks Optimizasyon

Optimizasyon problemi, amaç fonksiyonu konveks ise konveks optimizasyon veya amaç fonksiyonu konveks değilse non-konveks optimizasyon olarak adlandırılır, Şekil 2.1'de gösterildiği gibi.



Şekil 2.1. Optimizasyonda Konveks ve Non-Konveks Fonksiyonlar [25].

### 4. Düzlemsel olmayan (Non-smooth) optimizasyon

Optimizasyon problemleri, amaç fonksiyonu veya kısıtlamalar veya her ikisi de türevlenebilir olmadığında düzlemsel olmayan optimizasyon olarak adlandırılır.

## 2.2.3. Değişkenlerin deterministiklerine göre sınıflandırma

### 2.2.3.1. Stokastik programlama problemi

Bir stokastik programlama problemi, bazı veya tüm tasarım değişkenlerinin stokastik olduğu bir optimizasyon problemidir. Yani bir rastgelelik unsuru da bulunmaktadır.

### **2.2.3.2. Deterministik programlama problemi**

Deterministik programlama problemleri, tüm tasarım değişkenlerinin deterministik olduğu bir optimizasyon problemidir, bu da onu ne kadar çok denerseniz de aynı şeye sahip olduğunuz anlamına gelir.

### **2.2.4. Amaç fonksiyonu sayısına göre sınıflandırma**

En aza indirilecek amaç fonksiyonlarının sayısına bağlı olarak, optimizasyon problemleri tek amaçlı veya çok amaçlı programlama problemleri olarak sınıflandırılabilir. Çoğu optimizasyon probleminin tek amaçlı bir fonksiyonu vardır, ancak bazı ilginç durumlar çok amaçlı fonksiyonları olan optimizasyon problemlerini içerebilir. Hedef, karşılıklı uyumluluk koşullarını sağlayan bir çözüm bulmaktır. Çok amaçlı optimizasyon problemleri, mühendislik, ekonomi ve lojistik gibi birçok alanda; iki veya daha fazla çelişen amaç arasında dengeleme yapılması gereken durumlarda optimal kararlar alınması gerektiğinde ortaya çıkar. Örneğin, yeni bir bileşen geliştirmek, ağırlığı minimize etmekle birlikte dayanıklılığı maksimize etmeyi içerebilir veya bir portföy seçimi, beklenen getiriye maksimize etmekle birlikte riski minimize etmeyi içerebilir. Genel olarak pratikte çok amaçlı problemler, farklı amaçların ağırlıklı kombinasyonunu oluşturarak veya bazı amaçları kısıtlamalarla değiştirerek tek amaçlı problemlere dönüştürülür [26].

### **2.2.5. Değişkenlerin değerlerine göre sınıflandırma**

Optimizasyon problemleri genel olarak sürekli ve ayrık optimizasyon olarak kategorize edilebilir. Sürekli optimizasyon (gerçek değerli programlama problemi), herhangi bir gerçek değeri alabilen değişkenlerle ilgilenir. Ayrık optimizasyon (tam sayılı programlama problemi), bir tam sayı değeri alması gereken değişkenleri içerir. Sürekli optimizasyon problemlerini çözmek, genellikle ayrık optimizasyon problemlerinden daha kolaydır. Tam sayılı optimizasyon problemleri özellikle, tasarım değişkenlerinin ayrık doğası nedeniyle benzersiz zorluklar ortaya koymaktadır.

Problemin fiziksel yapısına bağlı olarak, ayrık optimizasyon probleminin özel durumlarından biri Optimal Kontrol (OK) problemi olarak adlandırılmaktadır. OK problemi, her aşamanın bir önceki aşamadan önceden belirlenmiş bir şekilde geliştiği, birkaç aşamayı içeren bir matematiksel programlama problemidir. Genellikle iki tür değişkenle tanımlanır: kontrol (tasarım) ve durum değişkenleri. Kontrol değişkenleri,

sistemi tanımlar ve sistemin bir aşamadan diğerine evrimini yönetir, durum değişkenleri ise sistemin herhangi bir aşamadaki davranışını veya durumunu açıklar. Problemin amacı, kontrol ve durum değişkenlerine yönelik bir dizi kısıtlamaya tabi olarak tüm aşamalardaki toplam amaç (objektif) fonksiyonunu en aza indiren bir kontrol veya tasarım değişken seti bulmaktır.

Bu tezdeki optimizasyon problemi bir tür OK problemidir ve Dinamik Programlama tekniği bu tip optimizasyon problemlerinin çözümü için uygundur [21].

### **2.3. Optimizasyon Teknikleri**

Farklı türdeki optimizasyon problemlerini çözmek için çeşitli teknikler mevcuttur. Bu bölümde bu tekniklerin bazılarında bahsedilmiştir.

#### **2.3.1. Doğrusal programlama**

Doğrusal programlama (Linear Programming LP), amaç fonksiyonunun ve kısıtlamaların tasarım değişkenlerinin doğrusal fonksiyonları olarak görüldüğü doğrusal optimizasyon problemlerinin çözümü için kullanılabilir. Bunun en iyi örneği, George Dantzig tarafından 1947'de geliştirilen doğrusal programlama problemlerini çözmek için kullanılan simpleks yöntemidir [27].

#### **2.3.2. Doğrusal olmayan programlama**

Doğrusal olmayan programlama (Nonlinear Programming NLP), doğrusal olmayan optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır. Benzer şekilde, geometrik programlama ve kuadratik (karesel) programlama, sırasıyla geometrik optimizasyon problemlerini ve kuadratik optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır.

NLP, çoklu değişkenli fonksiyon analizi içerir. NLP, pratikte etkili bir şekilde her NLP problemlerinin örneğini çözebilen bir algoritma bulunmaması nedeniyle zor kabul edilir. NLP, geniş bir problem alanını içerir ve içinde hem çok zor hem de oldukça basit problemleri barındırır. Makul bir süre içinde bazı algoritmalarla çözülebilen NLP problemlerinin en büyük sınıfı, convex problemlerdir ki bunlar NLP problemlerin daha geniş kapsamındaki özel bir kategoriyi temsil eder [22].

#### **2.3.3. Tam sayılı programlama**

Tam sayılı optimizasyon problemlerinin çözümünde tam sayılı programlama teknikleri kullanılmaktadır. Bir optimizasyon probleminde tüm değişkenlerin yalnızca

tamsayı değerlerini alması durumunda buna tam sayılı programlama problemi denir. Bazı değişkenlerin tamsayı değerleri alması durumunda ise optimizasyon problemine karma tam sayılı programlama problemi adı verilir. Tam sayılı optimizasyon probleminin kısmen çözümünde LP teknikleri kullanılır [22]. Tam sayılı ve karma tam sayılı programlama problemlerini çözmek için birçok teknik bulunmaktadır. Gomory'nin kesme düzlemi (Cutting Plane) algoritması [28] ve Land ile Doig'in dal ve sınır (Branch-and-Bound) algoritması [29] bu problemlerin çözümünde oldukça popüler olmuştur.

Bir optimizasyon problemdeki tüm değişkenler yalnızca sıfır veya bir değerlerine sınırlı olduğunda, bu tür bir problem sıfır-bir programlama problemi olarak adlandırılır. Bu tür bir problem, genel kesme düzlemi (Cutting Plane) veya dal ve sınır (Branch-and-Bound) algoritmaları kullanılarak çözülebilir. Balas bu tür problemleri çözmek için özel olarak tasarlanmış etkili bir numaralandırma algoritması tanıtmıştır [30].

#### **2.3.4. Dinamik programlama**

1954 yılında dinamik programlama kavramı, Richard Bellman tarafından ortaya konuldu [31]. Dinamik programlama, bir dizi birbirine bağlı kararı sistemli bir şekilde belirlemenin matematiksel bir tekniği olup, en uygun karar kombinasyonunu belirleme konusunda sistemli bir prosedür sunar [27]. Başka bir deyişle, karmaşık problemleri daha basit alt problemlere bölen ve her alt problemi yalnızca bir kez çözümleri gelecekte referans olarak saklayan güçlü bir optimizasyon tekniğidir. Bu yaklaşım, özellikle örtüşen alt yapılar ve optimal alt yapı özellikleri gösteren problemler için etkilidir. Dinamik programlama algoritmaları, optimal çözümlerin alt problemlerin optimal çözümlerinden oluşabileceği optimizasyon senaryolarında yaygın bir şekilde kullanılır.

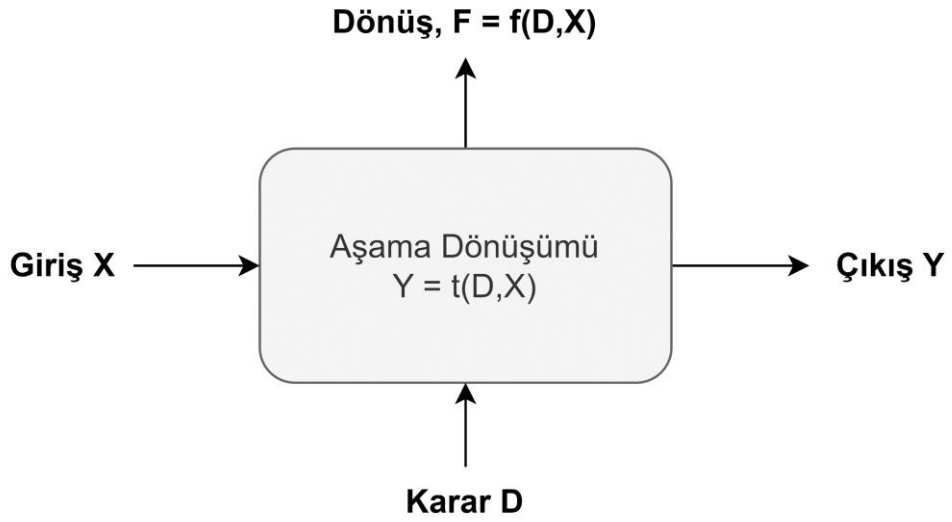
Dinamik programlama ayrık (tam sayılı) değişkenler, konveks olmayan ve türevlenemeyen fonksiyonlarla ilgilenebilir. Dinamik programlama tekniği, çok aşamalı bir karar problemini bir dizi tek aşamalı karar problemine böler. Tek aşamalı (single-stage) bir karar süreci (çok aşamalı problemin bir bileşenidir), Şekil 2'de dikdörtgen bir blok olarak temsil edilebilir. Bir karar süreci, belirli giriş parametreleri ( $X$ ), belirli karar (tasarım) değişkenleri ( $D$ ), ve karar verme sonucunu temsil eden belirli çıkış parametreleri ( $Y$ ) tarafından karakterize edilebilir. Giriş parametreleri giriş durum değişkenleri olarak adlandırılır, çıkış parametreleri ise çıkış durum değişkenleri

olarak adlandırılır. Son olarak, kararların etkinliğini ve bu kararlardan elde edilen çıktıyı ölçen bir geri dönüş veya amaç fonksiyonu  $F$  bulunmaktadır [21]. Şekil 2.2'de gösterilen tek aşamalı bir karar süreci için, çıktı denklem 2.2 tarafından gösterilen bir aşama dönüşüm (Stage Transformation) fonksiyonu aracılığıyla girişle ilişkilidir.

$$Y = t(D, X) \quad (2.2)$$

Sistemin giriş durumu kararlarımızı etkilediği için, amaç fonksiyonu  $F$  denklem 2.3 tarafından temsil edilebilir.

$$F = f(D, X) \quad (2.3)$$



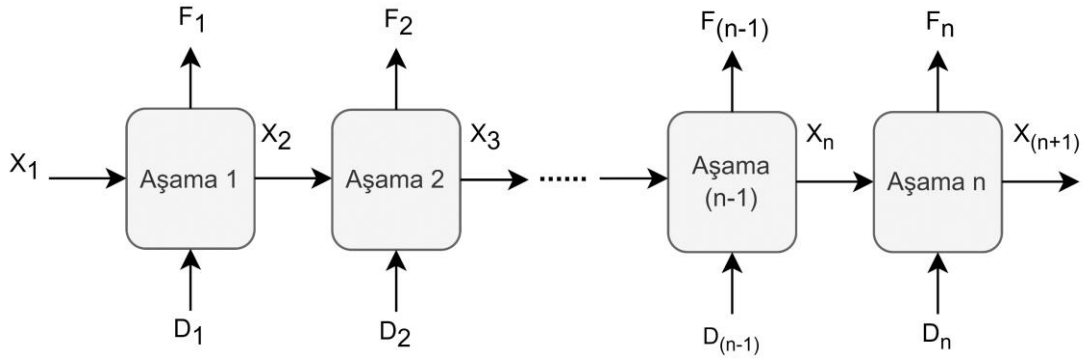
**Şekil 2.2.** Tek aşamalı karar problemi.

Bir seri çok aşamalı (Multi-Stage) karar süreci Şekil 2.3'te gösterildiği gibi şematik olarak gösterilebilir. Aşamalar  $i = 1, 2, 3, \dots, n - 1, n$  artan sırada etiketlenmiştir. ( $i$ )'inci aşama için giriş durumu vektörü  $X_i$  olarak gösterilir ve çıkış durumu vektörü  $X_{i+1}$  olarak gösterilir. Sistem seri olduğundan,  $i$  aşamadan gelen çıkış, bir sonraki aşama  $i+1$  'e girişine eşit olmalıdır. Bu nedenle durum dönüşümü ve amaç fonksiyonları sırasıyla denklem 2.4, denklem 2.5'te gösterilebilir.

$$X_{i+1} = t_i(X_i, D_i) \quad (2.4)$$

$$F_i = f_i(X_i, D_i) \quad (2.5)$$

Burada  $D_i$ ,  $i$  aşamasındaki karar (tasarım) değişkenlerinin vektörünü belirtir. Durum dönüşüm denklemine denklem 2.4 tasarım denklemi de denir.



**Şekil 2.3.** Çok aşamalı karar problemi.

Çok aşamalı bir karar probleminde amaç,  $f(F_1, F_2, \dots, F_n)$  gibi bireysel aşama getirilerinin bazı fonksiyonlarını optimize etmek için  $(D_1, D_2, \dots, D_n)$ 'yi bulmak ve Denklem 2.4 ve Denklem 2.5'i sağlamaktır.

Bu tür çok aşamalı problemler, her alt problemi ayrı ayrı yalnızca bir kez çözen ve problemin çözümünü bir bütün olarak derlemek amacıyla bu çözümleri gelecekte referans olarak saklayan dinamik programlama ile çözülebilir. Bu tezdeki optimizasyon problemi çok aşamalı problem kategorisine girmektedir.

### **3. BASİT POMPALAMA SİSTEMLERİ İLE ÇALIŞMA**

#### **3.1. Özet**

Bu çalışma, su dağıtım sistemlerinde (bir depo ve bir pompa) pompa programlarını optimize etmek için SDPA (sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması) algoritmasını tanıtıyor ve enerji maliyetlerini azaltmayı amaçlıyor. Bu algoritma, sadece tek bir pompa ve tek bir depo içeren basit durumlar için geçerlidir [3].

Bu çalışma kapsamında, mevcut içme suyu dağıtım sistemlerinde herhangi bir ekipman veya fiziksel şart iyileştirmesi yapmadan, son kullanıcıların su kesintisine uğramadan enerji tasarrufu sağlamak amacıyla pompalama çizelgesini optimize eden bir algoritma geliştirilmiştir. Bu algoritma, yüksek yerleşimli depo suyunu stratejik olarak kullanan, depo kapasitelerinden maksimum fayda sağlayan, pompalama yüklerini puant zaman periyodundan gece zaman periyoduna kaydıran ve böylece üç zamanlı elektrik tarifesinin birim fiyat farklarından yararlanarak pompalama enerji maliyetini önemli ölçüde düşürebilen bir yapıya sahiptir.

SDPA'nın kullanılması durumunda, elektrik maliyetlerini düşürme konusundaki etkisini değerlendirebilmek için Sakarya şehri içme suyu dağıtım sistemine ait bir pompalama istasyonu ve yüksek yerleşimli depo çalışma alanı olarak seçilmiştir. Bu çalışmada, mevcut CWLC (konvansiyonel su seviye kontrolü) algoritması ile daha önce geliştirilmiş IDPA (Improved Dynamic Programming Algorithm) [17] algoritması ile SDPA'nın uygulanması durumlarında elde edilecek sonuçlar karşılaştırılmış ve SDPA'nın diğer algoritmalara göre sağladığı avantajlar ortaya konmuştur.

#### **3.2. Literatür Araştırması**

Zheng ve Huang [17], elektrik kullanım zamanı fiyatlandırmasını ve kırsal su talebini dikkate alarak su tedarik sistemlerini optimize etmek için geliştirilmiş bir dinamik programlama algoritması (IDPA) önerdi. Algoritma, su talebi gereksinimlerini karşılarken elektrik tüketimini en aza indirmeyi hedefleyerek kırsal su tedarik sistemlerinde önemli enerji tasarrufu potansiyelini ortaya koydu.

Zhuan ve ark. [12], bir pompa istasyonunun optimum çalışma planlaması için kontrol sırasını optimize etmek amacıyla azaltılmış bir dinamik programlama algoritması ve anahtarlama zaman sırasını optimize etmek için doğrusal bir programlama algoritması önermiştir. Her iki algoritmanın da enerji verimli planlama yaklaşımları olduğu gösterilmiştir.

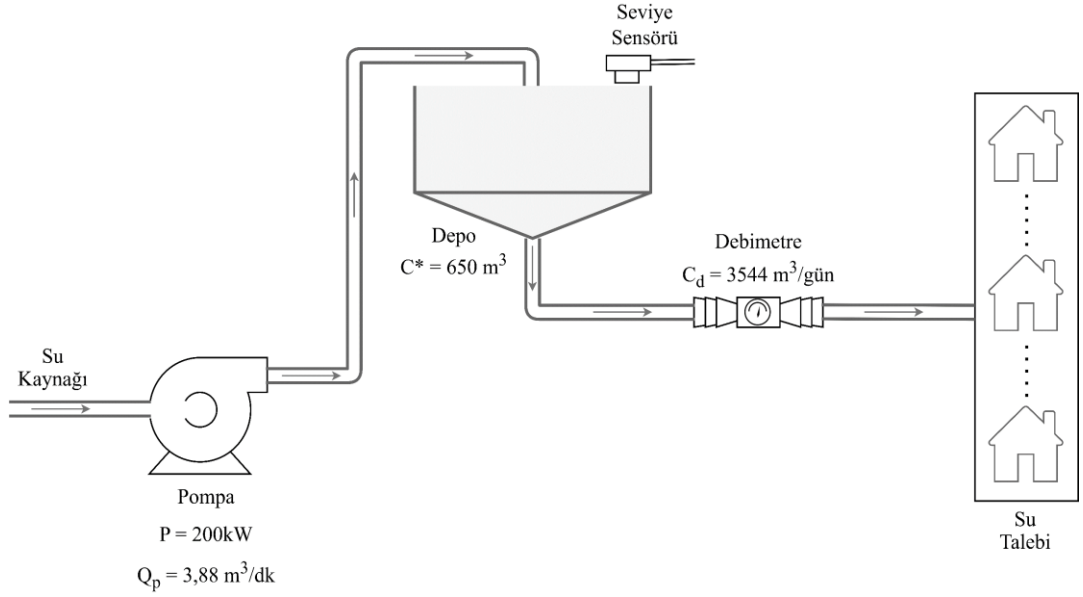
Staden ve ark. [32], hem zaman tabanlı tarife süresini hem de maksimum talep ücretlerini göz önünde bulundurarak pompa planlamasını optimize etmek amacıyla su pompalama sistemlerinde yük aktarımı için ikili tam sayı programlamaya sahip bir model tahminli kontrol tanıttı.

López-Ibáñez ve ark. [33], pompa programlarını optimize etmek için karınca kolonisi algoritmasını önerdi. Algoritma, maksimum pompa anahtarı sayısının önceden belirlendiği, zaman kontrollü tetikleyicilere dayanan pompa programlarının yeni ve açık bir temsilini kullanır. Bu gösterimde, bir pompa programı bir dizi tam sayıya bölünür ve her bir tam sayı, pompanın etkin/etkin olmadığı saat sayısını temsil eder. Bu, ikili gösterimle karşılaştırıldığında potansiyel programların (arama alanı) sayısını azaltır.

Savic ve ark. [34], su tedarik sistemlerinde pompa planlamaya yönelik çok amaçlı Genetik Algoritmalar'ı tanıttı. Dikkate alınan iki hedef enerji ve bakım maliyetlerinin en aza indirilmesidir. Pompa değişimi, bakım maliyetinin yerine geçen bir ölçü olarak uygulamaya konmuştur. Çok amaçlı algoritma, tek amaçlı GA ile karşılaştırılmıştır ve her iki teknik de yerel arama yöntemiyle hibridizasyon kullanılarak geliştirilmiştir.

### **3.3. Çalışma Alanının Tanıtımı**

Sakarya şehrine bağlı Serdivan ilçesindeki Kazımpaşa Mahallesi'nde bulunan bir yüksek su deposu ve Sakarya Üniversitesi kampüsünde yer alan bir pompalama istasyonu bu vaka çalışması için seçilmiştir. Çalışma alanındaki bu yüksek su deposu, yaklaşık 16,000 kişilik nüfusun su ihtiyacını (günlük yaklaşık  $3544 m^3$ ) karşılayarak hizmet vermektedir. Şekil 3.1'den de görüleceği gibi, su temin sistemi iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde, su kaynağından çıkan sabit hızlı bir pompa ve ikinci bölümde ise suyun terfi ettirildiği ve çıkışında debimetre bulunan yüksek su deposu bulunmaktadır.



**Şekil 3.1.** Çalışma Alanının Şematik Gösterimi.

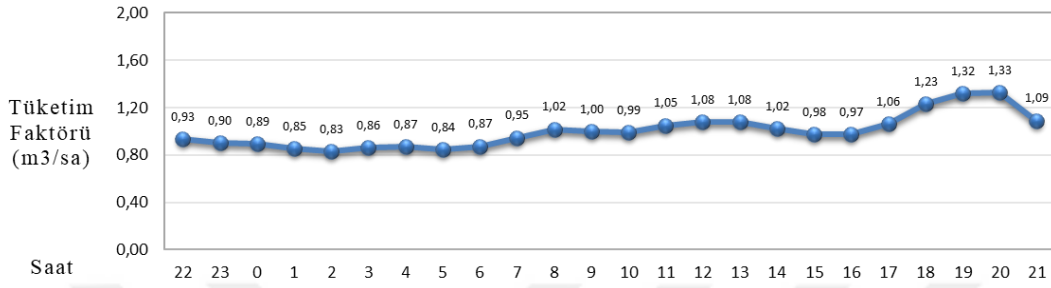
İlk kısmındaki sabit hızlı santrifüj pompa, suyu kaynaktan yüksekteki hedef depoya taşır. Pompanın akış kapasitesi  $Q_p$  ile gösterilir ve  $Q_p = 3,88 \text{ m}^3/\text{dk}$ 'dir. İlgili pompanın nominal gücü  $P = 200 \text{ kW}$ 'tır. Yüksekteki su deposundan her gün talep edilen su miktar  $C_d = 3544 \text{ m}^3$ , deponun anlık azami su tutma kapasitesi  $C^* = 650 \text{ m}^3$ 'tür ve seviyenin %100 olmasına karşılık gelir.

Bu örnekteki su temin sistemi, geleneksel su seviye kontrol (CWLC-conventional water level control) yöntemini kullanmaktadır. Temel hedef, içme suyu deposunun seviyesini belirli bir aralık içinde tutarak, kullanıcı ihtiyaçlarını karşılamaktır. Bu amaçla, depo seviyesi sürekli olarak ölçülür ve sonuçlar, çeşitli teknolojik yöntemlerle pompalama istasyonuna iletilir. Elde edilen seviye değerleri, kullanıcının belirlediği üst ve alt sınırlarla karşılaştırılarak ne zaman su pompalanıp ne zaman pompalanmayacağına karar verilir. Seviye değeri belirlenen alt sınıra ulaştığında pompa çalışır ve depo dolar. Belirlenen üst sınıra ulaşıldığında ise pompa durur ve depo boşalmaya bırakılır.

Çalışma alanındaki pompalama istasyonunda üç zamanlı tarife kullanılmakta ve kullanılan elektrik, en yoğun süre boyunca (puant/17:00-22:00)  $0,9119 \text{ ₺/kWsa}$ , standart süre boyunca (gündüz/06:00-17:00)  $0,5904 \text{ ₺/kWsa}$ , yoğun olmayan süre boyunca (gece/22:00-06:00)  $0,3309 \text{ ₺/kWsa}$  üzerinden ücretlendirilmektedir.

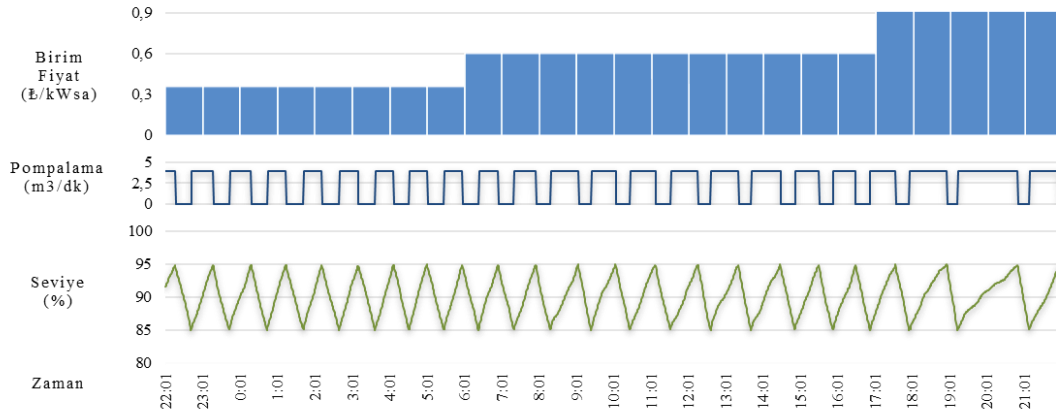
İçme suyu deposundan günlük toplam  $C_d = 3544 \text{ m}^3$  su talep ediliyor. Şekil 3.2'deki talep eğrisi, saatlik ortalama talep ile gün içindeki ortalama saatlik talep arasındaki

ilişkiyi (tüketim faktörü,  $C_h$ ) ve günün farklı dönemlerinde farklı su taleplerini gösteriyor. Bu çalışmada, günlük toplam su talebi ( $C_d$ ) ve gün içindeki saatlik tüketim faktörünün sabit olduğunu varsayıyoruz çünkü odak noktamız, tüketim tahmin modülüne değil, optimizasyon algoritmasının çalışma koşulları altında en iyi çözümü sağlamak.



**Şekil 3.2.** Tüketim Faktörü.

Klasik seviye kontrolü yönteminde, pompanın ne zaman çalışacağı depodaki su seviyesine bağlıdır. CWLC yöntemi, çalışma alanındaki su temin sisteminde kullanılıyor ve belirlenmiş üst seviye sınır değeri %95, alt seviye sınır değeri ise %85'tir. CWLC yöntemiyle oluşan seviyeler, pompa çalışma durumları ve zamanla birlikte değişen elektrik birim fiyatları Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



**Şekil 3.3.** CWLC Yaklaşımı, Seviye ve Pompa Çalışma Durumları.

Bu yöntemde, elektrik birim fiyatları göz önüne alınmadığından dolayı gece, gündüz ve puant zaman periyotlarındaki pompalama yoğunluğu, su talep yoğunluğuna bağlı olarak değişir. Şekil 3.2'den anlaşılacağı gibi, su talebinin yoğunluğu, elektrik talebinin yoğunluğuyla benzer bir şekilde değiştiği için, gece zaman periyodu boyunca geçen sürenin %55'i, gündüz zaman periyodu boyunca geçen sürenin %62,4'ü ve puant

zaman periyodu boyunca geçen sürenin %80'i boyunca pompalama yapılmaktadır. Yani en yoğun pompalama, elektrik birim fiyatının en yüksek olduğu puant zaman periyodunda gerçekleşmiştir.

### 3.4. Problem Formülasyonu

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) denklem 3.1 ile hesaplanabilir.

$$Z = \frac{T_o}{60} \cdot E \sum_{i=1}^n d(i) \cdot M(i), \quad \forall i \in [1, n] \quad (3.1)$$

$E = 200kW$  pompanın nominal gücünü ifade eder;  $d(i)$  ise pompanın çalışma durumunu belirtir (pompa çalıştığında  $d(i) = 1$  ve kapalıyken  $d(i) = 0$ );  $M(i)$  içinde bulunulan zaman periyodundaki elektrik birim fiyatını (₺/kWh) ifade eder. Pompa gücü ve elektrik birim fiyatları önceden belirlenmiş ve sabit değerler olduğu için,  $Z$ 'yi etkileyen tek değişken pompa çalışma planıdır, yani  $d(i)$ .

CWLC yönteminde pompanın çalışma durumunu belirlemek için tek referans seviye sınırlarıdır. Ancak, yük kaydırma stratejisiyle pompalama çizelgesini optimize etmek istediğimizde, elektrik fiyatları, seviye sınırları ve gün içindeki su taleplerini bir arada düşünmemiz gerekiyor. Pompa çizelgesini optimize ederken, depo seviye sınırlarına dikkat etmeliyiz ve bu sınırlar denklem 3.2'de ifade edilmiştir. Depo için belirlenen işletmeci tarafından asgari seviye  $L_l$  olarak %20 ( $130 m^3$ ), azami seviye  $L_h$  olarak %100 ( $650 m^3$ ) olarak belirlenmiştir.

$$L_l \leq L_{i+1} \leq L_h, \quad \forall i \in [1, n] \quad (3.2)$$

Günlük toplam su talebi ( $C_d$ ) kullanılarak, gün içerisindeki ortalama saatlik tüketim ( $C_{ort}$ ) denklem 3.3 ile hesaplanır.

$$C_{ort} = \frac{C_d}{24} \quad (3.3)$$

$C_{ort}$  ve içinde bulunulan saatin toplam tüketimi ( $C_T$ ) temel alınarak, içinde bulunulan saatin tüketim faktörü ( $C_h$ ) denklem 3.4 ile bulunur.

$$C_h(i) = \frac{C_{ort}}{C_T(i)}, \quad \forall i \in [1, n] \quad (3.4)$$

$C_{ort}$  ve  $C_h(i)$  değerleri kullanılarak;  $Q(i)$ , tüketim miktarı denklem 3.5 ile bulunur.

$$Q(i) = \frac{C_{ort} \cdot C_h(i)}{60}, \quad \forall i \in [1, n] \quad (3.5)$$

Depo seviyesinin gelecekteki durumunu bulmak için, tüketim miktarı  $Q(i)$ , bir önceki periyodun depo seviyesi yüzdesi  $L(i-1)$ , sabit olan pompanın herhangi bir  $i$  periyodunda taşıyabileceği su miktarı  $Q_p$  ve depodaki toplam su kapasitesi  $C^*$  gibi değerleri kullanıyoruz. İçinde bulunduğumuz periyodun sonunda depo seviyesi  $L(i)$ , bir önceki periyotta verilen pompa açma-kapama kararı  $d(i-1)$  ile devam edilirse nasıl değişir, bunu denklem 3.6 ile hesaplayabiliriz.

$$L(i) = L(i-1) + \left( \frac{Q_p \cdot d(i-1) - Q(i)}{C^*} \right) \cdot 100, \quad \forall i \in [1, n] \quad (3.6)$$

Hesaplanan seviye değeri ve enerji kullanım miktarını etkileyen diğer koşullara bağlı olarak, pompanın açılıp kapatılma kararı değişebilir veya sabit tutulabilir. Bu nedenle, yoğun yükün puant zamanından geceye kaydırılarak pompalama maliyetinin düşürülmesi amaçlanır. Ancak belirlenen seviye sınırlarını aşmadan pompalama programının optimize edilmesi gerekmektedir. Depo seviyesini belirlenen sınırlarda tutarken, pompanın gün boyunca en iyi açılıp kapanma düzeni olan  $d(i)$  bulunabilirse, puant zamanındaki su talebi geceye kaydırılarak pompalama enerji maliyeti en aza indirilir [2, 17].

### 3.5. Çözümler

#### 3.5.1. IDPA yaklaşımı

IDPA, su dağıtım sistemlerinde önceden kullanılan dal sınır algoritmasının (BABA - branch and bound algorithm) üzerine yapılan iyileştirmelerle oluşturulmuş bir dinamik programlama algoritmasıdır. Eğer pompa açma-kapama karar sayısı  $n$  ise, pompa programı için  $2^n$  farklı olasılık ortaya çıkar [17]. BABA algoritması, bu  $2^n$  olasılıktan en iyisini bulmaya çalışırken, örnekleme/açma-kapama karar periyodu  $T_o$  kısaldığında, çözüm süresi kullanımı engelleyecek kadar uzun olabilir. IDPA yaklaşımı, olasılık sayısını  $2^n$ 'den  $n+1$ 'e indirerek, BABA algoritmasına göre problemin çözüm süresini önemli ölçüde azaltmayı başarmıştır, ancak aynı karar periyotlarında aynı sonuca ulaşmaktadır.

Optimizasyon açısından düşünüldüğünde,  $T_o$  değeri ne kadar küçük olursa, optimizasyon o kadar etkili olacaktır. Ancak, eğer  $T_o$  çok küçükse, pompanın çalışma sıklığı (açma-kapama sayısı) artabilir. Bu durum, pompa mekanik aşınmasını artırır, ekipman ömrünü kısaltır ve bakım maliyetlerini yükseltir [32]. Bu nedenle, sistemin ihtiyaçlarına uygun bir denge noktası bulmak ve uygun bir pompa çalışma sıklığı belirlemek son derece önemlidir [17]. Böylece, IDPA yaklaşımında,  $T_o$  yeterince büyük (60 dakika veya 30 dakika) seçildiği için bu maliyetler göz ardı edilebilir düzeyde görülmüştür.

### 3.5.2. SDPA yaklaşımı

Pompalama programının optimize edilmesi sorununda,  $T_o$  değeri ne kadar küçülürse, genellikle daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Ancak, IDPA yaklaşımında, pompa açma-kapama sıklığını kabul edilebilir düzeyde tutabilmek için  $T_o$ 'nın yeterince büyük olması gereklidir (en az 30 dakika olarak belirlenmiştir). IDPA yaklaşımı, teorik olarak depo kapasitesinden azami derece faydalanabilir gibi görünse de,  $T_o$ 'nın sınırlanması nedeniyle pratikte en iyi sonuca ulaşamayabilir.

En büyük yük kaydırma avantajını elde edebilmek için; gece tarifesinde uygulanan en düşük elektrik birim fiyatından çıkılırken depo seviyesinin üst sınır değeri olan %100'e yakın olmalı, aynı şekilde puant tarifesinde uygulanan en yüksek elektrik birim fiyatından çıkılırken de depo seviyesinin alt sınır değeri olan %20'ye yakın olmalıdır. Bu durum, özellikle depo kapasitesi kullanılan alanda, depo puant periyoduna tam dolu girdiğinde bile puant sırasında hiç pompalama yapılamayacak kadar küçükse, gündüz tarifesinden puant tarifesine geçişte de depo seviyesinin %100'e yakın olması gerektiği anlamına gelir.

Bu çalışma alanında, üç farklı kullanım zamanına ( $I = 3$ ) sahip çoklu tarifemiz var. Gündüz, puant ve gece periyotları için uygulanan fiyatlandırmalar sırasıyla 0,5904  $\text{₺/kWsa}$ , 0,9119  $\text{₺/kWsa}$ , 0,3309  $\text{₺/kWsa}$  olduğundan, her bir tarife sonunda ulaşılmak istenen depo seviyelerinin yüzdelik değerleri,  $L = \{L_1, L_2, L_3\}$ ,  $L_1 = 100$ ,  $L_2 = 20$ ,  $L_3 = 100$  olarak belirlendi.

Günlük su talebi  $C_d = 3544 \text{ m}^3$ , deponun toplam su tutma kapasitesi  $C^* = 650 \text{ m}^3$ , 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;  $T_1 = 660 \text{ min}$ ,  $T_2 = 300 \text{ min}$ ,  $T_3 = 480 \text{ min}$ ,

pompa kapasitesi  $Q_p = 3,88 \text{ m}^3/\text{min}$ , sürekli olarak ölçülen depo seviyesinin başlangıçtaki değeri  $L_0$  ve başlangıçtaki pompa çalışma durumu  $D_0$  bilinmektedir. Bilinen bu değerler kullanılarak, herhangi bir periyotta, içinde bulunulan tarife sonunda hedeflenen seviyeye ulaşmak için tarife boyunca kaç  $\text{m}^3$  daha su pompalanması gerektiği  $Q_a$ , yapılması gereken bu pompalama miktarı için gerekli süre  $T_g$ , tarifenin 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.

Dolayısıyla SDPA, IDPA yaklaşımından farklı olarak, büyük bir açma-kapama periyodu kullanıp  $2^n$  olasılığı araştırmak yerine, küçük bir açma-kapama periyoduyla çalışarak tarifeler arası geçişte istenen seviyelere ulaşmayı amaçlar. SDPA, bu hedefe ulaşırken aynı zamanda, pompa açma-kapama sıklığını art arda getirerek olabildiğince azaltmaya çalışır. 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 sağlayabilecek, yeni bir yük kaydırma algoritması olan SDPA'nın programlanması Şekil 3.4'te gösterilmiştir.

```

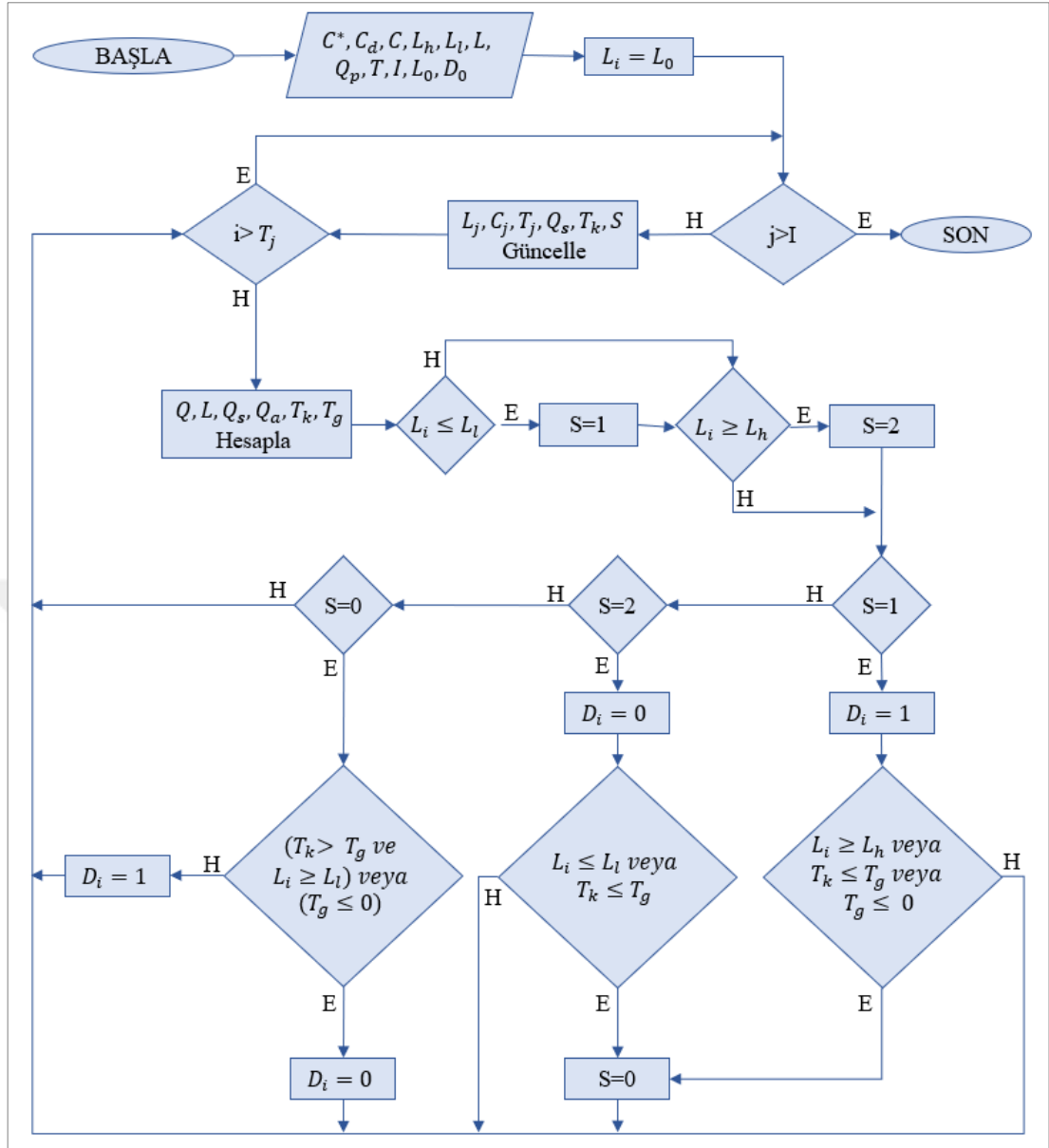
Input: ( $C^*$ ;  $C_d$ ;  $C$ ;  $L_h$ ;  $L_l$ ;  $L$ ;  $Q_p$ ;  $T$ ;  $I$ ;  $L_0$ ;  $D_0$ )
Initialize  $i = 1$ 
for  $j = 1, \dots, I$  do
     $L_j = L[j]$ ,  $C_j = C[j]$ ,  $T_j = T[j]$ 
    Initialize  $Q_s = 0$ ,  $T_k = T_j$ ,  $S = 0$ 
    for  $i = 1, \dots, T_j$  do
        if  $j <> 1$  and  $i <> 1$  then
            Compute  $Q_i, L_i$  with equations (5), (6)
        end if
         $Q_s = Q_s + Q_i$ 
         $Q_a = \frac{C^*(L_j - L_i)}{100} + (C_j \cdot C_d - Q_s)$ 
         $T_g = \frac{Q_a}{Q_p}$ 
         $T_k = T_k - 1$ 
        if  $L_i \leq L_l$  then
             $S = 1$ 
        end if
        if  $L_i \geq L_h$  then
             $S = 2$ 
        end if
        if  $S = 1$  then
             $D[i - 1] = 1$ 
            if  $L_i \geq L_h$  or  $T_k \leq T_g$  or  $T_g \leq 0$  then
                 $S = 0$ 
            end if
             $i = i + 1$ 
            Continue;
        end if
        if  $S = 2$  then
             $D[i - 1] = 0$ 
            if  $L_i \leq L_l$  or  $T_k \leq T_g$  then
                 $S = 0$ 
            end if
             $i = i + 1$ 
            Continue;
        end if
        if  $S = 0$  then
            if ( $T_k > T_g$  and  $L_i \geq L_l$ ) or ( $T_g \leq 0$ ) then
                 $D[i - 1] = 0$ 
            Otherwise
                 $D[i - 1] = 1$ 
            end if
        end if
         $i = i + 1$ 
    end for
end for

```

Şekil 3.4. SDPA-Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması.

Algoritmanın çalışma durumlarını belirlemek için  $S$  değişkeni kullanılır. Her tarifede başlangıç durumu  $S = 0$  olarak ayarlanır ve seviye sınırlarını aşmadıkça  $S = 0$  durumundan çıkılmaz. Eğer tarife süresince seviye sınırları aşılmazsa, pompalama şartı  $T_g = T_k$  sağlandığında başlatılır ve tarife sonunda sonlandırılarak, pompaya bir kez açma-kapama yaptırılmış olur.

Seviye alt sınırı aşılar aşılmaz, depo boş durumu olan  $S=1$  durumuna geçilerek pompalama başlar. Seviye üst sınırı aşılar aşılmaz, depo dolu durumu olan  $S = 2$  durumuna geçilerek pompalama durdurulur. Herhangi bir duruma geçildiğinde, algoritma bulunduğu tarife ve seviye sınırlarını göz önünde bulundurarak mümkünse bulunduğu durumda kalmaya çalışır. Durumlar arasındaki geçişlerin minimum olması, pompalama açma-kapama sayısının en aza indirilmesini sağlar. Algoritma, tüm şartları göz önünde bulundurarak durumlar arasında geçiş yapar ve pompalama çizelgesi  $D$ 'yi oluşturur. Programlanan SDPA'nın akış diyagramı Şekil 3.5'te gösterilmiştir.



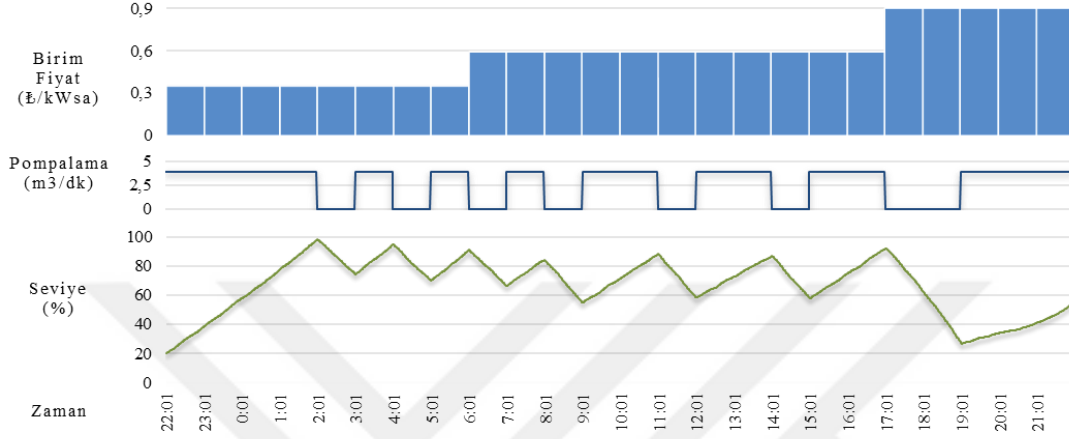
Şekil 3.5. Akış Diyagramı.

### 3.6. Uygulamalı Çalışma Sonuçları

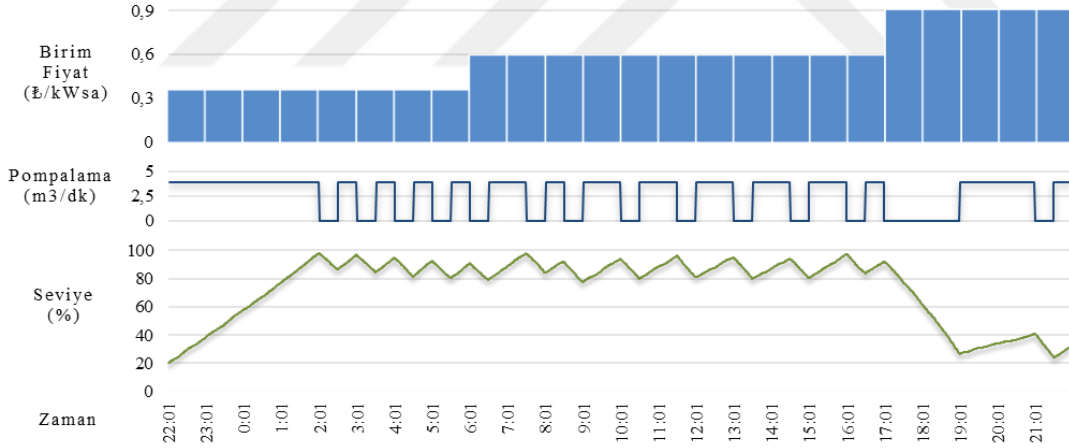
Çalışma alanında, konvansiyonel su seviye kontrolü (CWLC) yöntemi kullanılarak bir gün boyunca oluşan seviye ve pompa çalışma durumları, Şekil 3.3'te gösterilmiştir. Aynı günün verileri alınarak, aynı bilgisayar üzerinde (AMD RyzenTM 5 3600, 3.59GHz, 8GB RAM), C# programlama dili kullanılarak, IDPA ve SDPA algoritmaları için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tüm simülasyonlarda seviye sınır değerleri  $L_l = 20$  ve  $L_h = 100$  olarak belirlenmiştir.

### 3.6.1. IDPA'nın simülasyonu ve sonuçları

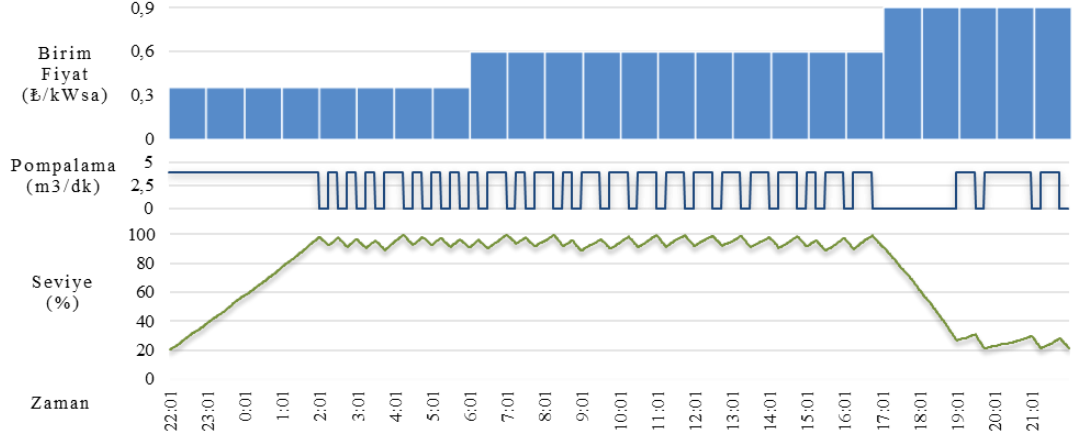
IDPA algoritması için üç farklı  $T_o$  değeri üzerinde simülasyonlar yapılmıştır. Karar periyodu  $T_o$ , sırasıyla 60 dakika, 30 dakika ve 15 dakika olarak seçildiğinde, gün boyunca ortaya çıkan seviye ve pompa çalışma durumları Şekil 3.6, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de gösterilmiştir.



Şekil 3.6. IDPA Yaklaşımı,  $T_o = 60 dk$ , Seviye ve Pompa Çalışma Durumları.



Şekil 3.7. IDPA Yaklaşımı,  $T_o = 30 dk$ , Seviye ve Pompa Çalışma Durumları.



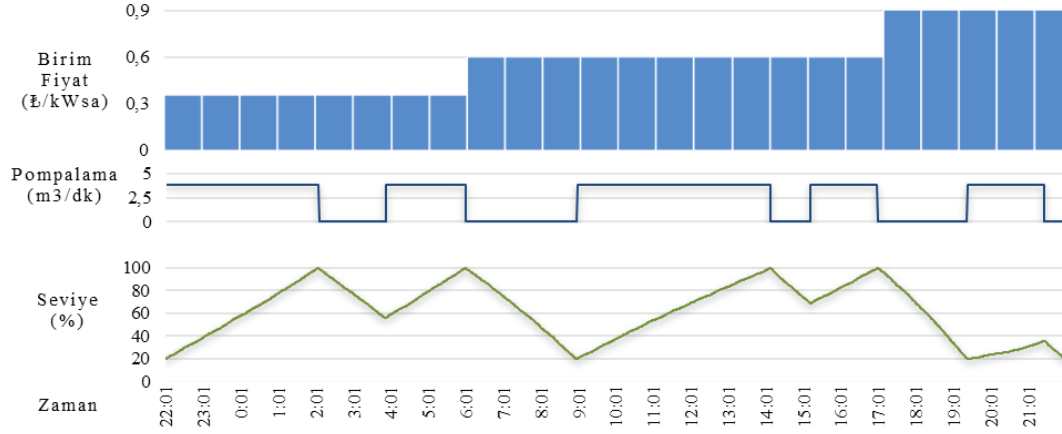
**Şekil 3.8.** IDPA Yaklaşımı,  $T_0=15$  dk, Seviye ve Pompa Çalışma Durumları.

Karar periyodu 60 dakika olduğunda hesaplama süresi 0,0337 milisaniyedir ve tarife geçişlerinde depo seviyeleri, sınır değerlerinden oldukça uzaktadır. Karar periyodu 30 dakika olduğunda hesaplama süresi önemsenmeyecek ölçüde artmış ve 0,1074 milisaniyeye ulaşmıştır. Tarife geçişlerinde depo seviyeleri, sınır değerlerine yakınsamış olsa da hala uzak kalmaktadır. Ayrıca pompa açma-kapama sayısı 8'den 14'e çıkmıştır. Karar periyodu 15 dakika olduğunda hesaplama süresi yine önemsenmeyecek ölçüde artmış ve 0,3713 milisaniyedir. Tarife geçişlerinde depo seviyeleri, sınır değerlerine oldukça yaklaşmış, ancak pompa açma-kapama sayısı 27'ye yükselmiştir.

IDPA yaklaşımında,  $T_0$  değerinin azaltılmasıyla depo kapasitesinden daha fazla yararlanılabileceği fakat aynı zamanda pompa çalışma frekansının artacağı gözlemlenmektedir. Pompa çalışma frekansındaki aşırı artışın neden olabileceği olumsuz etkilerden en az seviyede etkilenmek için  $T_0$  değerini daha fazla azaltmak, uygun bir çözüm olarak görülmemelidir.

### 3.6.2. SDPA'nın simülasyonu ve sonuçları

SDPA algoritmasının simülasyonu, 1 dakikalık bir karar periyodu ( $T_0$ ) kullanılarak yapılmıştır. SDPA algoritmasının kullanımıyla birlikte, gün boyunca ortaya çıkan seviye ve pompa çalışma durumları Şekil 3.9'da görülmektedir.



**Şekil 3.9.** SDPA Yaklaşımı,  $T_0=1$  dk, Seviye ve Pompa Çalışma Durumları.

Karar periyodu 1 dakika olduğunda hesaplama süresi 0,0429 milisaniye seviyesindedir. Tarife geçişlerindeki depo seviyeleri, sınır değerlerine ulaşmıştır. Ayrıca, pompa açma-kapama sayısı 5'tir. SDPA yaklaşımında,  $T_0$  değerinin 1 dakika gibi kısa bir süreye indirilmesiyle depo kapasitesinden en fazla fayda sağlanabildiği görülmüş, ayrıca pompa çalışma frekansında herhangi bir artış olmamış, tersine pompalama sıklığının mümkün olduğunca azaltıldığı gözlemlenmiştir.

### 3.6.3. CWLC, IDPA ve SDPA'nın karşılaştırılması

Tablo 3.1, CWLC, IDPA ve SDPA metodolojilerinin aynı koşullar altında uygulanmasıyla elde edilen sonuçları içermektedir.

**Tablo 3.1.** CWLC, IDPA ve SDPA Sonuçlarının Karşılaştırılması.

| Nitelik                      | CWLC         | IDPA1        | IDPA2         | IDPA3         | SDPA         |
|------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| Karar Periyodu ( $T_0$ )     | 1 dk         | 60 dk        | 30 dk         | 15 dk         | 1 dk         |
| Uygulama Süresi              | 13,3 $\mu$ s | 33,7 $\mu$ s | 107,4 $\mu$ s | 371,3 $\mu$ s | 42,9 $\mu$ s |
| #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 dk       | 420 dk       | 420 dk        | 420 dk        | 418 dk       |
| Pompalama Süresi (Puant)     | 240 dk       | 180 dk       | 150 dk        | 135 dk        | 123 dk       |

**Tablo 3.1. (Devamı) CWLC, IDPA ve SDPA Sonuçlarının Karşılaştırılması.**

| Nitelik                                    | CWLC     | IDPA1    | IDPA2    | IDPA3    | SDPA     |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|
| Pompalama Süresi (Gece)                    | 264 dk   | 360 dk   | 360 dk   | 360 dk   | 372 dk   |
| Pompalama Süresi (Toplam)                  | 916 dk   | 960 dk   | 930 dk   | 915 dk   | 913 dk   |
| Günlük Elektrik Maliyeti                   | 1832 ₺   | 1771 ₺   | 1680 ₺   | 1634 ₺   | 1607 ₺   |
| Birim (m <sup>3</sup> ) 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   |

CWLC, IDPA ve SDPA yaklaşımlarının hepsi uygulanma süresi (1 milisaniyenin altında) açısından birbirine benzer olduğu için, bu yöntemlerin birbirine üstünlük sağlamadığını söyleyebiliriz.

SDPA'nın kullanımı, IDPA yaklaşımında karşılaşılan ve kısmen ihmal edilen bir sorunu çözmüştür (karar periyodu küçüldükçe pompa çalışma frekansının artması). SDPA, çalışma frekansındaki artışı önleyerek, finansal kazanç hesaplamasının zor olduğu ancak pompaların kullanım ömrünü kısaltabilecek ve başlangıç maliyetini artırabilecek bir etkiden kaçınmayı sağlamıştır.

Tüm yöntemler, benzer bir su miktarını pompalamak için aynı süre içinde farklı zaman dilimlerinde pompa kullanarak su teminini gerçekleştirebilir. Ancak, çok zamanlı elektrik tarifesindeki fiyatlandırmayı dikkate aldığımızda; IDPA yaklaşımı, puant dönemi yükünün bir kısmını gece dönemine kaydırırken; SDPA yaklaşımı, puant döneminden geceye kaydırılabilecek tüm yükleri kaydırabilir.

Mevcut CWLC yaklaşımı referans alındığında; SDPA, IDPA ile karşılaştırıldığında günlük açma-kapama sayısını 23'ten 5'e düşürerek daha düşük bir pompa çalışma frekansı ve pompa çalışması için kullanılan elektrik maliyetini 0,5212 ₺/m<sup>3</sup>'ten 0,4535 ₺/m<sup>3</sup>'e indirerek daha düşük bir enerji maliyeti elde etmiştir. SDPA, birim enerji maliyetini yaklaşık %11,97 oranında düşürebilmiş ve vaka çalışmamızda elde edilebilecek en iyi optimizasyonu sağladığını göstermektedir.

Çalışma koşulları (depo kapasitesi, su talebi, kullanılan pompa kapasitesi) ve mevcut elektrik birim fiyatı dikkate alındığında; günlük ortalama su talebi  $C_d = 3544 m^3$  olduğundan, SDPA yaklaşımı kullanılarak pompalanan suyun elektrik maliyeti 0,5212 ₺/m<sup>3</sup>'den 0,4535 ₺/m<sup>3</sup>'e düşürülerek, günlük  $3544 \cdot (0,5152 - 0,4535) =$

218,67 ₺'lik bir elektrik maliyeti tasarrufu sağlanmış olur. Bu, aylık 6.560 ₺ ve yıllık 79.815 ₺'lik bir tasarruf anlamına gelmektedir.

#### 3.6.4. SDPA'nın uygulanması

Bu çalışmada geliştirilen algoritma başarıyla çalışma alanında uygulanmıştır. Pompalama işlemlerini kontrol etmek için gerekli olan otomasyon sistemi, mikroişlemci tabanlı programlanabilir mantık kontrol cihazları (PLC - programmable logic controller) tarafından yönetilmektedir. SDPA, pompalama sistemini yöneten PLC'lerde çalıştırılabilecek bir formata dönüştürülerek uygulanmış ve çalışma alanındaki pompalama sistemini başarıyla bir ay (1 fatura dönemi) boyunca yönetmiştir. SDPA'nın kullanıldığı dönem ile kullanılmadığı bir önceki döneme ait faturalara yansıyan tüketim bilgileri Tablo 3.2'de özetlenmiştir.

**Tablo 3.2.** Uygulama Sonuçları.

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

Her iki ayda da pompalanan su miktarı birbirine yakın olmasına rağmen tam olarak eşit olmadığı için toplam enerji tüketimleri de eşit değildir. Bununla birlikte, SDPA'nın puant yüklerini geceye kaydıracağı açıkça görülmektedir. Enerji birim maliyetleri hesaplandığında, CWLC'nin kullanıldığı aya kıyasla SDPA, enerji birim maliyetini 0,5938 ₺'den 0,5235 ₺'ye indirmiştir. SDPA, simülasyon deney sonuçlarına göre %11,97'ye yakın bir tasarruf oranı elde etmiş ve çalışma alanına uygulandığında enerji maliyetinde %11,85'lik bir tasarruf sağlamıştır.

### 3.7. Sonuçlar

Elektrik maliyetlerini azaltmaya y6nelik birçok alanda kullanılan, y6k y6netimine katkı sağlayacak y6k kaydırma y6ntemleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, mevcut içme suyu dağıtım sistemlerindeki ekipmanları ve fiziksel koşulları değiştirmeden, sadece pompalama çizelgesini değiştirerek puant y6klerini geceye kaydırmayı hedefleyen yeni bir yaklaşım olan SDPA 6nerilmiştir.

Sim6lasyon ve uygulama sonuçları, SDPA yaklaşımının CWLC ve IDPA yaklaşımlarına kıyasla daha d6ř6k pompa çalışma sıklığı ve daha d6ř6k bir pompalama maliyeti sunduğunu g6stermiştir. SDPA'nın kullanılmasıyla, yalnızca pompalama çizelgesinin optimizasyonu ile elde edilebilecek en iyi tasarruf miktarına ulaşılmıştır. Sim6lasyon ortamında yalnızca pompalama çizelgesinin optimize edilmesiyle elde edilebilecek en iyi tasarrufun %11,97 olduğu g6r6lm6ř ve bu miktar, SDPA'nın uygulanmasıyla çalışma alanında %11,85 tasarrufa ulaşarak elektrik faturalarına yansımıştır.

SDPA'nın uygulanmasıyla, IDPA yaklaşımında karşılaşılan karar periyodu k66l6rken pompa çalışma frekansının artma sorununu 6zerek, mevcut pompa açma-kapama karar sayısını %72 oranında azaltmak m6mk6n olmuştur. Pompa dur-kalk sayısının azaltılmasının sağladığı avantajlar şunlardır: pompa-motor 6mr6n6n uzaması, bakım periyotlarının artması, kalkış sırasında çekilen y6ksek akımlardan (demeraj akımı) kaçınılması, demeraj akımı nedeniyle nominal g6ce oranla fazla enerji kullanımının azalması.

Geliştirilen SDPA, yoğun bir veri saklama alanına, işlem g6c6ne veya program hafızasına ihtiyaç duymayacak kadar hafif bir yapıya sahiptir ve bu nedenle kolayca bir PLC içinde çalıştırılabilir. Pompalama komutlarını merkezi bir sunucudan sahadaki cihazlara iletmek yerine, programın sahada kullanılan PLC'lerde yerel olarak çalıştırılması, merkezi sunucuda veya haberleşme ağında oluşabilecek olası bir aksaklıktan etkilenmeden pompalamanın devam etmesini sağlar. Ayrıca, uzaktan izleme ve kontrol (SCADA/PLC) sistemine sahip alanlarda uygulanması ek bir ekipman maliyetini gerektirmez.

Kademeli yapıdaki terfi merkezlerinde, 6zellikle en uçtaki terfi merkezine uygulandığında SDPA, sadece uçtaki terfi merkezinin enerji t6kretiminde tasarruf sağlamakla kalmaz, aynı zamanda 6nceki terfi merkezlerinin suyun ana kaynağına

kadar enerji tüketimlerinde de tasarruf elde edebilir. Eğer depo kapasitesi, puant zaman periyodunda hiç pompalama yapılmasına izin verecek kadar büyükse, farklı tarifeler arasında geçişte hedeflenen seviye değerlerini hesaplamak gerekebilir. Bu tür çok aşamalı (kaskad) sistemlerde optimizasyon, ikinci çalışmanın odak noktasıdır.



## 4. ÇOK AŞAMALI POMPALAMA SİSTEMLERİ İLE ÇALIŞMA

### 4.1. Özet

Bu çalışma, OSDPA (Optimal Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması) olarak adlandırılan yeni bir algoritma ortaya koymaktadır. SDPA algoritmasında yapılan iyileştirmelerle geliştirilen bu algoritma, özellikle karmaşık pompa sistemlerinde ve çok aşamalı (kaskad) sistemlerin optimizasyonunda etkili sonuçlar elde etmek üzere tasarlanmıştır [35].

Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ) bünyesinde işletilen, çok aşamalı bir su temin sistemi üzerinde konvansiyonel su seviye kontrolü (CWLC-conventional water level control) yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu çalışmada, sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması (SDPA) ve optimal sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması (OSDPA) yöntemleri, CWLC yaklaşımıyla işletilen sistemde test edilmiştir. Mevcut CWLC yaklaşımını referans alarak, SDPA ve geliştirilen OSDPA'nın enerji maliyetinde sağladığı potansiyel tasarruf incelenmiştir. Her üç yöntemin çalışma alanındaki performansı karşılaştırılarak, OSDPA'nın diğer yaklaşımlara olan üstünlüğü belirlenmiştir.

### 4.2. Literatür Araştırması

Gong ve Cheng [36, 37] ve Cheng ve ark. [38] çalışmalarda, büyük ölçekli su sistemlerinde ardışık karar problemlerini çözmek amacıyla DDPA (Decomposition–Dynamic Programming Aggregation) algoritmasını geliştirmişlerdir. DDPA algoritmasının temel stratejisi şu şekildedir: büyük sistem problemlerini alt problemlere dönüştürmek, bunları ayrı ayrı çözmek, ardından ilişkili değişkenlerin ve her bir alt problemin optimal değeri arasındaki ilişkiye dayanarak bu alt problemlerin çözümlerini birleştirmek ve nihayetinde ilişkili değişkenin küresel optimal çözümünü ve buna karşılık gelen optimal değeri elde etmektir.

Zhang ve ark. makalesinde [11], pompa istasyon sistemleri çok aşamalı (kaskad) bir pompa sistemi olarak formüle edilmiştir. Farklı aşamaların sınıflandırılması, pompa düzenlemesine dayanmaktadır. Her aşamada bir pompa kümesi bulunmaktadır. Bu

pompa kümesi, aynı giriş ve çıkış borularını paylaşan bir veya daha fazla birbirine bağlı pompayı içerebilir.

Su dağıtım çalışmalarının temel amacı, su arz-talep probleminin çözülmesi ve su kaynaklarının etkin bir şekilde yönetilmesidir. Çok aşamalı pompa istasyonları (CPSs, Cascade Pumping Stations), suyu başlangıç kaynağından en yüksek kullanıcı noktasına kadar taşıyarak aradaki kullanıcı taleplerini karşılamayı amaçlar veya suyun tek bir terfi istasyon ile pompalanamayacak durumlar için suyu birden fazla terfi istasyonu aracılığıyla yükselten sistemlerdir. Zhang ve ark. çalışmasında [39], su kanalı iletim sistemlerinde kullanılan çok aşamalı pompalama istasyonlarını optimize etmek için bir yöntem geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri metodoloji, bazı ara terfi istasyonlarını es geçmeye odaklanan optimize edilmiş bir programlama algoritması içermektedir.

Zheng ve Huang'un araştırmasında [17], kırsal alandaki bir su dağıtım sistemi örneği üzerinde çalışmışlardır. Su talebini ve elektrik tarife birim fiyatlarını dikkate alarak IDPA'yı (Improved Dynamic Programming Algorithm, geliştirilmiş dinamik programlama algoritması) geliştirmiş ve pompalama elektrik maliyetlerini azaltmak için bu algoritmayı önermişlerdir.

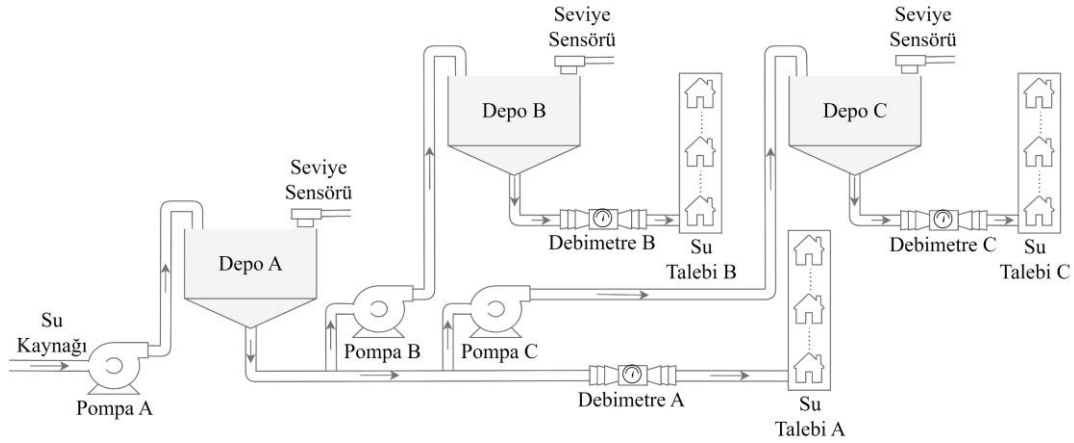
Küçük ve ark. [3] su dağıtım sistemlerinde pompa programlarını optimize etmek için SDPA (sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması) algoritmasını geliştirmiştir. SDPA, pompa enerji maliyetini düşürerek pompalama çizelgesini optimize etmiştir.

### **4.3. Çalışma Alanının Tanıtımı**

SASKİ (Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi) bünyesindeki su dağıtım sistemine ait, üç adet yüksek su deposu ve bu depolara su sağlayan üç pompalama istasyonundan oluşan çok aşamalı bir parçası vaka çalışması olarak seçilmiştir. Şekil 4.1'de 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 cazibeyle ilgili depoya ait son kullanıcılar su sağlanmaktadır. Yüksek su depolarının seviyeleri birer hidrostatik seviye sensörü aracılığıyla ölçülmekte ve sürekli olarak izlenebilmektedir. Her depoda oluşan kullanıcı taleplerinin anlık ve toplam değerlerini hesaplayabilmek için depo çıkışlarında birer elektromanyetik debimetre bulunmakta ve sürekli olarak izlenebilmektedir. Su

kaynağının sürekli dolu tutulan bir ana depo olması sebebiyle kaynağın sınırsız olduğu varsayılmaktadır.

Her depo ve pompa istasyonu üzerinde bir adet programlanabilir lojik kontrolör (PLC - programmable logic controller) bulunmaktadır. İstasyondaki enstrümanlara ait bilgiler PLC'ler üzerinde toplanarak bir radyo link aracılığıyla merkezdeki bir sunucuya iletilir ve bu veriler sürekli olarak kaydedilir. Aynı zamanda her depoda ölçülen seviye değerleri de ilgili pompalama istasyonuna gönderilir. Bu sayede, her pompalama istasyonu ilgili depo seviyesini referans alarak, santrifüj pompa aracılığıyla suyu buldukları noktadan bir üst noktadaki depoya pompalar. Pompalama istasyonlarında mevcut geleneksel su seviye kontrolü (CWLC - conventional water level control) yöntemi kullanılmaktadır. Pompalama istasyonlarının her birinde, gece, gündüz ve puant olmak üzere üç farklı zaman diliminde birim fiyatları değişen ulusal tarife kullanılmaktadır.



**Şekil 4.1.** Uygulama Alanı.

Çalışma alanındaki A, B, C pompalarının ait bilgiler Tablo 4.1'de; A, B, C depolarına ilişkin bilgiler Tablo 4.2'de; tüm istasyonlarda kullanılan elektrik tarifesine göre birim fiyatlar ise Tablo 4.3'te bulunmaktadır.

**Tablo 4.1.** A, B, C Pompalarına Ait Bilgiler.

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

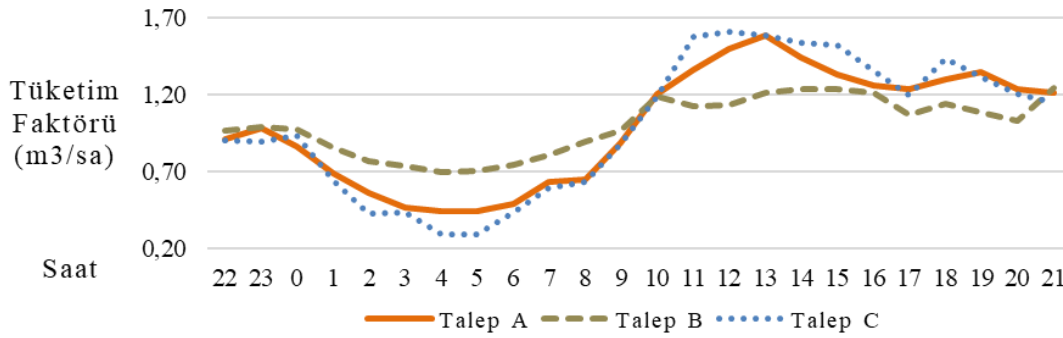
**Tablo 4.2.** A, B, C Depolarına Ait Bilgiler.

| 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 4.3.** Üç Zamanlı Elektrik Tarife Fiyatlandırması.

| Tarife Adı | Süre        | Periyot Uzunluğu (dk) | 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 farklı talep düğümü bulunmaktadır ve bu düğümlerin günlük talep modelleri ile su depolarındaki başlangıç seviyeleri bilinmektedir. A talebinin günlük toplamı  $1164 m^3$ , B talebinin günlük toplamı  $167 m^3$  ve C talebinin günlük toplamı  $165 m^3$ 'tür. Düğümlere ait günlük talep modelleri (saatlik talep faktörü ( $C_h$ )) Şekil 4.2 'de görülmektedir.

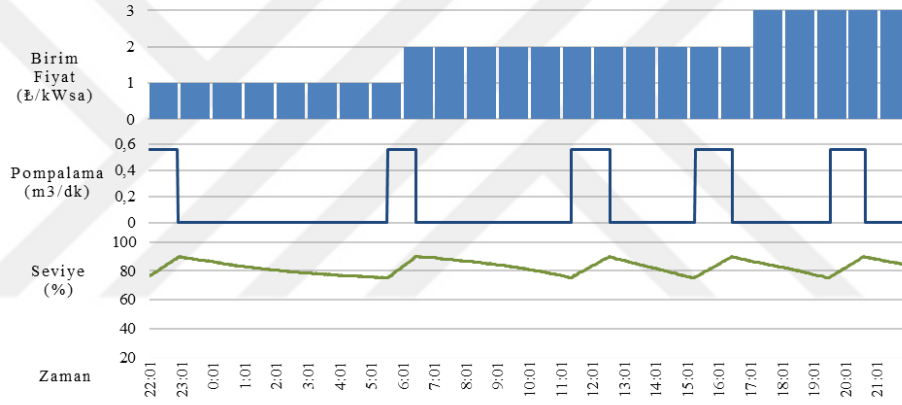
**Şekil 4.2.** Saatlik Talep Faktörü.

Çalışma alanındaki tüm pompalar, depo seviyelerini belirlenmiş maksimum ve minimum değerler arasında tutmayı amaçlayan CWLC yaklaşımını kullanmaktadır. Bu mevcut yöntemde, pompa çalışma-durma kararları, sadece ilgili depo seviyesi referans alınarak verilmekte ve su talebi ile elektrik tarifesinin birim fiyatları göz önüne alınmamaktadır. Bu nedenle, elektrik maliyetinin optimize edilmesi mümkün değildir.

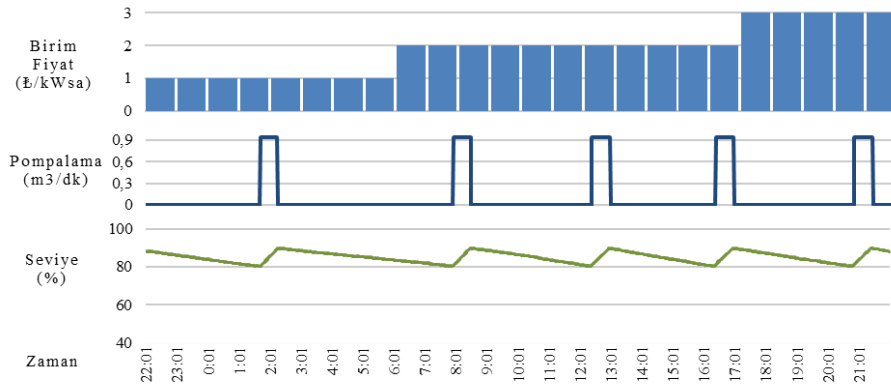
A, B ve C depo-pompa çiftleri, mevcut CWLC yöntemine için Tablo 4.4'te belirlenen maksimum ve minimum depo seviye değerlerine göre işletilmektedir. CWLC yöntemiyle çalıştırılan pompaların sonuçları; C depo ve pompa çifti için Şekil 4.3'te, B depo ve pompa çifti için Şekil 4.4'te, A depo ve pompa çifti için Şekil 4.5'te görülmektedir.

**Tablo 4.4.** CWLC için Çalışma Sınırları.

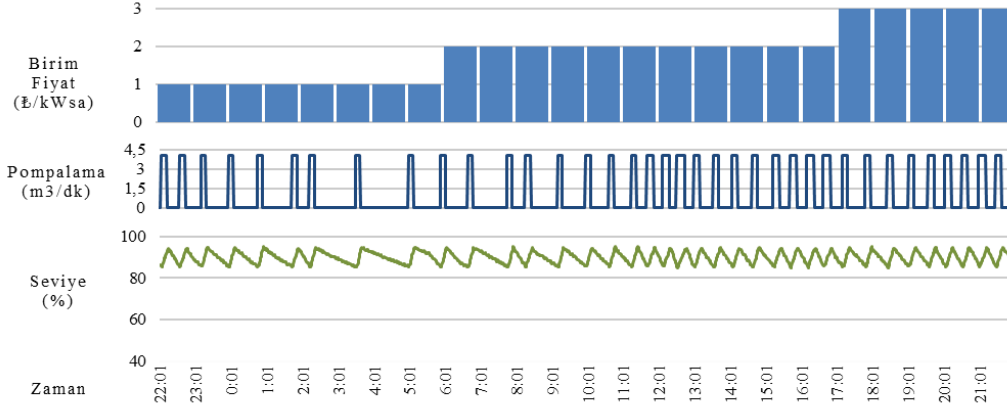
| Pompa | Minimum Seviye (%) | Maksimum Seviye (%) |
|-------|--------------------|---------------------|
| A     | 75                 | 90                  |
| B     | 90                 | 80                  |
| C     | 95                 | 85                  |



**Şekil 4.3.** C Depo ve Pompa İkili için Mevcut Durumlar.



**Şekil 4.4.** B Depo ve Pompa İkili için Mevcut Durumlar.



**Şekil 4.5.** A Depo ve Pompa İkili için Mevcut Durumlar.

Görsellerden açıkça görüldüğü gibi, A, B ve C pompaları gündüz ve puant tarifelerinde yoğun bir şekilde çalışmaktadır. Özellikle A pompasının faaliyetleri incelendiğinde, en yoğun pompalamanın puant döneminde yapıldığı rahatlıkla fark edilmektedir. Bu durum, pompalama planının optimize edilerek puant yüklerinin diğer zaman dilimlerine kaydırılması durumunda, enerji maliyetinde önemli ölçüde bir azalmanın mümkün olabileceğini göstermektedir.

#### 4.4. Problem Formülasyonu

Bu tip yük kaydırma sorunları, tam sayı programlama şeklinde tanımlanan optimal zamanlama problemleri olarak bilinir [12]. Daha önce geliştirilmiş olan SDPA ve bu çalışmada SDPA'nın optimize edilmesiyle ortaya çıkan OSDPA, her ikisi de dinamik programlama optimizasyon teknikleridir.

SDPA perspektifinden [3] bakıldığında, pompanın çalışma ve durma periyodunun ( $T_o$ ) dakika cinsinden kullanılması durumunda (örnek sayısı  $n = \frac{24 \cdot 60}{T_o}$ ), 24 saatlik pompa işletiminin elektrik maliyeti ( $Z$ ) denklem 4.1 ile hesaplanabilir. Bu durumda  $Z$ 'yi etkileyebilecek tek değişken, pompanın çalışma kararı olan  $d$ 'dir.

$$Z = \sum_{i=1}^n E \cdot d(i) \cdot M(i), \quad \forall i \in [1, n] \quad (4.1)$$

$E$ : pompa gücünü,  $d$ : pompanın durumunu belirtir (çalışma için  $d = 1$ , durma için  $d = 0$ ),  $M$ : ise birim fiyat (₺/kWsa) temsil eder.

Pompalama programı optimize edilirken, depo çıkışındaki hat basıncının belirli bir değer altına düşmemesi için veya pompanın olası bir arızadan dolayı aksaması durumunda ihtiyatlı davranmak için bir minimum seviye değeri belirlenir. Aynı

şekilde, depodaki suyun taşmaması için maksimum seviye de saptanır. Bu değerler, seviye sınırlamalarımızı belirler ve sürekli olarak denklem 4.2 durumunun sağlanması gerekmektedir.

$$L_l \leq L_i \leq L_h, \forall i \in [1, n] \quad (4.2)$$

$L_l$ : Minimum seviye değeri,  $L_h$ : Maksimum seviye değeri,  $L_i$ :  $i$ . periyodun sonundaki seviye değeri

Günlük su talebi temel alınarak, saatlik tüketimin ortalaması denklem 4.3 ile hesaplanmaktadır.

$$C_{ort} = \frac{C_d}{24} \quad (4.3)$$

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

Mevcut saatteki tüketimi temel alarak, bu saatteki tüketim faktörü denklem 4.4 ile hesaplanmaktadır.

$$C_h(i) = \frac{C_T(i)}{C_{ort}}, \forall i \in [1, n] \quad (4.4)$$

$C_h$ : Saatlik tüketim faktörü,  $C_T$ : Saatlik toplam tüketim

$C_{ort}$  ve  $C_h(i)$  değerleri belirlendikten sonra  $Q(i)$ , içinde bulunulan periyottaki tüketim miktarını denklem 4.5 ile hesaplamaktadır.

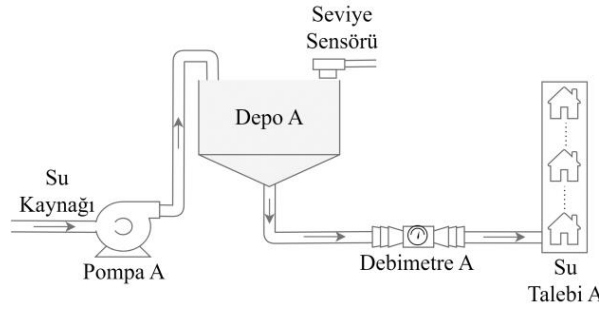
$$Q(i) = \frac{C_{ort} \cdot C_h(i)}{60}, \forall i \in [1, n] \quad (4.5)$$

Pompalanan su miktarı, tüketim miktarı, depo kapasitesi ve mevcut depo seviyesi kullanılarak; önceki periyotta verilen pompa açma/kapama kararlarına devam edilmesi durumunda, mevcut periyot sonunda ulaşılabilecek seviye değeri denklem 4.6 ile hesaplanmaktadır.

$$L(i) = L(i-1) + \left( \frac{Q_p \cdot d^{(i-1)} - Q(i)}{C^*} \right) \cdot 100, \forall i \in [1, n] \quad (4.6)$$

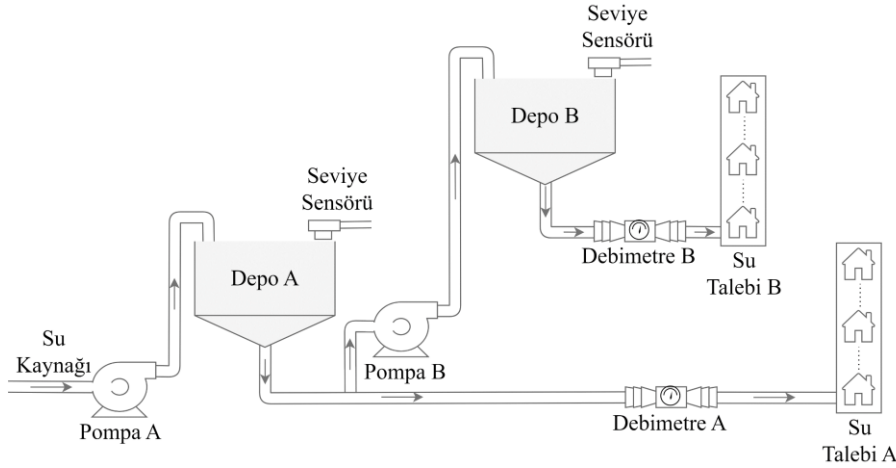
$L$ : Depo seviyesi periyot sonunda,  $Q$ : Tüketim miktarı,  $Q_p$ : Pompanın bir periyotta terfi ettirdiği su miktarı,  $d$ : Pompa açma/kapama kararı,  $C^*$ : Depo su kapasitesi.

SDPA yaklaşımının uygulandığı, Şekil 4.6'da gösterilen gibi tek aşamalı basit sistemlerde (bir pompa ve bir depo); pompa çalışma-durma kararlarıyla ortaya çıkacak seviye değişimi denklem 4.6'ya göre kontrol edilir, böylece depo seviyesi istenen sınırlar içinde tutulmuş olur.



**Şekil 4.6.** Tek Aşamalı Pompa İstasyonu.

Ancak, suyun birden fazla aşamaya terfi ettirildiği, Şekil 4.7'de görüldüğü gibi çok aşamalı (kaskad) bir sistemde; depodan kullanıcılar tarafından tüketilen su miktarına ek olarak depoya pompalanan su miktarı ve bir üst aşamaya su terfi ettiren pompa veya pompaların çalışma durumu da seviye değişimini etkileyecektir.



**Şekil 4.7.** Çok Aşamalı Pompa İstasyonu.

Su ikinci kez terfi ettirildiğinde, depo seviyesinin değişimi için denklem 4.6 kullanılamaz. Bu nedenle, çok aşamalı yapıdaki depoların seviye değişimleri, depodan su alan pompaların çalışma durumunun da hesaba katıldığı denklem 4.7 ile hesaplanabilir.

$$L(i) = L(i - 1) + \left( \frac{Q_{p_x} \cdot d_x(i) - (Q_{p_y} \cdot d_y(i) + Q(i))}{C^*} \right) \cdot 100, \quad \forall i \in [1, n] \quad (4.7)$$

$L$ , periyot sonundaki depo seviyesini;  $Q$ , tüketim miktarını temsil eder.  $Q_{p_x}$ , depoya su basan pompanın bir periyotta taşıdığı su miktarını;  $d_x$ , depoya su basan pompanın açma/kapama kararını belirtir.  $Q_{p_y}$ , depodan su alan pompanın bir periyotta taşıdığı su miktarını;  $d_y$ , depodan su alan pompanın açma/kapama kararını temsil eder.  $C^*$ , ise depo kapasitesini temsil eder.

Su temin sistemi, çalışma alanında su talepleri ve elektrik birim fiyatları dikkate alınarak alt sistemlere ayrılmış ve bu çalışmada önerilen OSDPA yaklaşımıyla tüm sistemin optimize edilmesi gerçekleştirilmiştir.

Bu nedenle, çok aşamalı pompa sistemlerindeki zamanlama sorununu çözmek adına, sistem alt sistemlere bölünerek OSDPA, en üst aşamadan en alt aşamaya kadar tüm alt sistemlere uygulanır ve böylece tüm sistem optimize edilmiş olur. Belirlenen kısıtları karşılayacak şekilde en iyi pompalama çizelgesi  $d(i)$  önce en üst düzeydeki pompa ve depo ikilisi için bulunur, ardından elde edilen üst düzeydeki pompalama çizelgesi, alt düzeydeki pompa ve depo ikilisi için en iyi pompalama çizelgesini belirlemede referans alınır; böylece puant dönemi yükleri diğer dönemlere mümkün olan en üst düzeyde kaydırılır [17, 39].

## 4.5. Çözümler

### 4.5.1. SDPA yaklaşım

SDPA algoritması, önceki IDPA algoritmasındaki açma/kapama karar periyodu  $T_o$ 'nun küçülmesi durumunda pompa açma/kapama sıklığının kabul edilemeyecek oranda artması sorunu ortadan kaldırmıştır. SDPA algoritmasında,  $T_o$ 'nun küçülmesi durumunda pompa çalışma frekansındaki artış engellenerek, depo kapasitesinin izin verdiği ölçüde maksimum yük kaydırma başarılmıştır. Ayrıca, SDPA algoritması, IDPA algoritmasındaki gibi pompalama çizelgesi için oluşabilecek  $2^n$  ( $n$ : pompa açma/kapama karar sayısı) ihtimalden en iyisini bulmak yerine, tarife geçişlerinde belirlenen hedef seviyelere ulaşma amacıyla kullanılan algoritmayı önemli ölçüde basitleştirmiştir.

SDPA algoritmasında, tarifeler arasındaki geçişlerde belirlenen hedef seviyeler, işletmeci tarafından belirlenmiş minimum ( $L_l$ ) veya maksimum ( $L_h$ ) değerlerinden biri olarak seçilir. Çünkü SDPA'nın uygulandığı çalışma alanındaki depo kapasitesi, puant yüklerinin tamamının geceye aktarılmasına izin vermez. Yani, puant periyoduna maksimum seviye ile girilse dahi, puant periyodu hiç pompa çalıştırılmadan geçilemez. Bu nedenle, puant dönemine girerken hedeflenen seviye, izin verilen maksimum seviye olarak belirlenmiştir. Eğer sistemlerde puant dönemi hiç pompa çalıştırılmadan geçilebilecek özellikte değilse, SDPA'nın en iyi optimizasyonu sağladığı söylenebilir.

#### 4.5.2. OSDPA Yaklaşımı

Basit bir pompa-depo sisteminde kullanılan SDPA yöntemi, doğrudan karmaşık çok aşamalı (kaskad) sistemlerde uygulanamaz. Kaskad sistemlerin optimize edilmesi için OSDPA yaklaşımında olduğu gibi, sistem alt sistemlere ayrılmalı ve en üst kademeden en alt kademeye doğru ayrı ayrı ele alınmalıdır. OSDPA yaklaşımı, (Problem Formülasyon) bölümünde anlatıldığı gibi denklem 4.6 yerine denklem 4.7'yi kullanarak çözüm sürecinde alt katmanların optimize edilmesinin yanı sıra üst katmandaki pompalama kararlarının etkisini de dikkate alır. Bu sayede, OSDPA'nın tercih edilmesi, sadece tek pompa ve tek depolu basit sistemlerin değil, aynı zamanda karmaşık çok aşamalı terfi sistemlerinin de optimize edilmesine imkan tanır.

SDPA'nın uygulandığı sistemde, puant periyoduna maksimum seviye ile girilse bile hiç pompa çalıştırılmadan puant periyodunun tamamlanamayacağından dolayı her tarife döneminin sonunda belirlenen seviye sınırları, denklem 4.2'yi sağlayacak şekilde doğrudan  $L_l$  veya  $L_h$  değerlerinden biri olarak seçilmiştir. Gündüz, puant ve gece tarifeleri için hedeflenen seviyeler sırasıyla  $L = \{L_1, L_2, L_3\}$  olmak üzere,  $L = \{L_h, L_l, L_h\}$  olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, puant periyoduna maksimum seviye ile girildiğinde hiç pompa çalıştırılmadan geçilebilen bir sistemde gündüz tarifesinin sonunda ulaşılan hedef seviye (puant tarifesine giriş seviyesi) olan  $L_1$ 'in en iyi çözümü elde edilebilmesi için aşağıdaki gibi belirlenmesi gerekmektedir:

Gündüz, puant ve gece tarifeleri süresince talep edilen su miktarlarının günlük tüketime oranları sırasıyla  $C = \{C_1, C_2, C_3\}$  şeklinde belirlenir. Puant dönemindeki tüketimin depo kapasitesine oranının yüzdesel değeri denklem 4.8 kullanılarak hesaplanır.

$$r = \frac{(C_d \cdot C_2 + C_{py}) \cdot 100}{C^*} \quad (4.8)$$

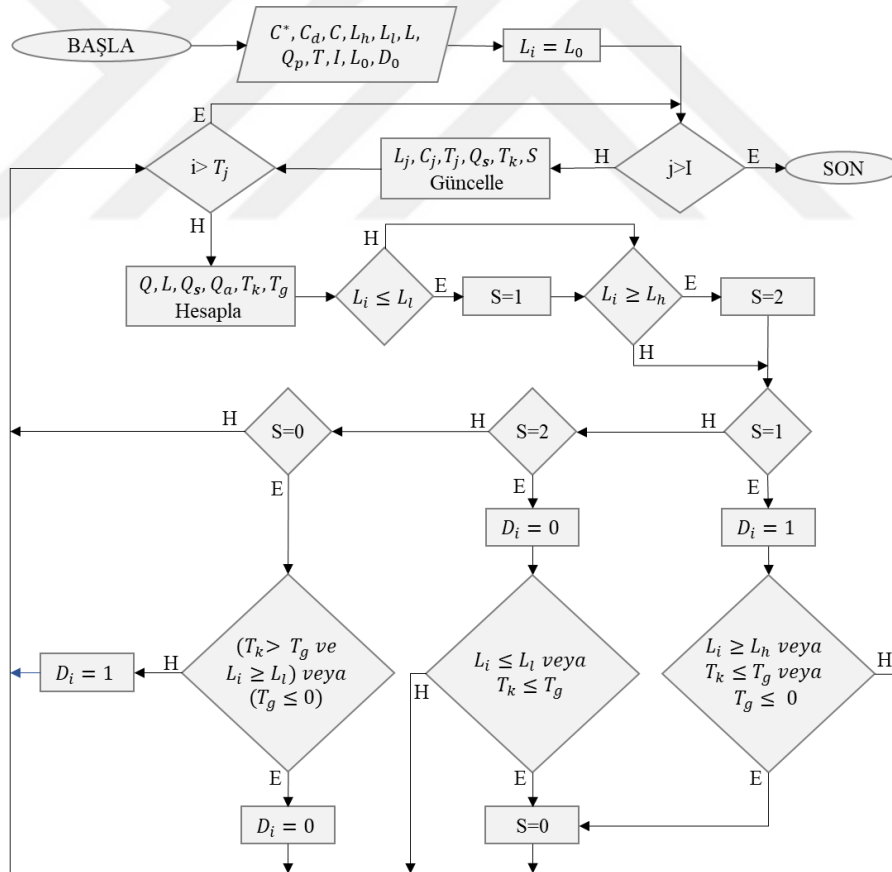
$r$ : Puant döneminde depodan çıkan toplam suyun depo kapasitesine oranının yüzdesel karşılığı,  $C_d$ : Günlük toplam su talebi,  $C_2$ : Puant dönemine ait talep oranı,  $C_{py}$ : Depodan su alan pompanın puant döneminde taşıdığı su miktarı,  $C^*$ : Depo kapasitesi.

$L_1$ , gündüz tarifesinin sonunda (puant dönemine girildiğinde) hedeflenen depo seviyesinin yüzdesel değeri denklem 4.9 tarafından hesaplanır.

$$L_1 = \begin{cases} r + L_2, & r + L_2 < 100 \\ 100, & r + L_2 \geq 100 \end{cases} \quad (4.9)$$

OSDPA algoritmasında, üst aşmadaki pompa kararlarının alt aşmaların çözümünde kullanılabilmesi, puant tarifesine geçerken hedeflenecek olan seviyenin hesaplanarak elde edilmesi, SDPA algoritmasına göre kullanım alanını önemli ölçüde genişletmiştir.

OSDPA algoritmasında da SDPA'da olduğu gibi, elektrik tarife sayısı, günlük su talebi, her bir tarifenin fiyatlandırması, önceden belirlenmiş seviye sınırları, tarifelerin sonunda hedeflenen depo seviyeleri, depo kapasitesi, tarifeler süresince meydana gelen su talep oranları, tarifelerde kalınan süreler ve pompanın su basma kapasitesi bilinen temel değerlerdir. Bu bilinen değerler ve elde edilen denklemler kullanılarak, tarifelerin sonunda hedeflenen seviye değerlerine ulaşacak pompalama planı  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  kolaylıkla oluşturulabilir [3]. Ancak, kaskad sistemlerin optimize edilebilmesi için OSDPA algoritmasında, depo seviyesindeki değişim, denklem 4.6 yerine denklem 4.7 kullanılarak hesaplanır. OSDPA'nın akış diyagramı Şekil 4.8'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. OSDPA Algoritması.

#### 4.6. Uygulamalı Çalışma Sonuçları

Mevcut CWLC yöntemi, önceki SDPA ve bu çalışmadaki OSDPA yaklaşımlarına ait simülasyonlar için C# programlama dili ile yazılmış bir uygulama ile test edilmiştir. Simülasyonların hepsinde, aynı özelliklere sahip bir bilgisayar kullanılarak CWLC yaklaşımının uygulanması sonucunda elde edilen ve SQL (Structured Query Language) veri tabanına kaydedilmiş gerçek veriler kullanılmıştır. Her terfi istasyonunun optimizasyon hesaplaması 1 saniyenin altında tamamlanmıştır. Çalışma alanındaki tüm depo ve pompalama istasyonlarında birer PLC kontrolörü bulunmaktadır. PLC yazılımlarının geliştirilmesinde, yapısal kontrol dili (SCL - Structured Control Language) ve merdiven diyagramı (Ladder Diagram) kullanılmıştır.

24 saat boyunca CWLC yönteminin tüm pompa ve depo ikilileri için kullanılması durumunda oluşacak pompa çalışma ve seviye durumları (Çalışma Alanının Tanıtımı) bölümünde gösterilmiştir. Aynı veriler kullanılarak, tüm sistemin çözümü için en üst katmandan aşağıya doğru başlayarak sırasıyla C, B, A pompa ve depo ikililerinin, SDPA ve OSDPA yaklaşımlarıyla optimize edilmiştir.

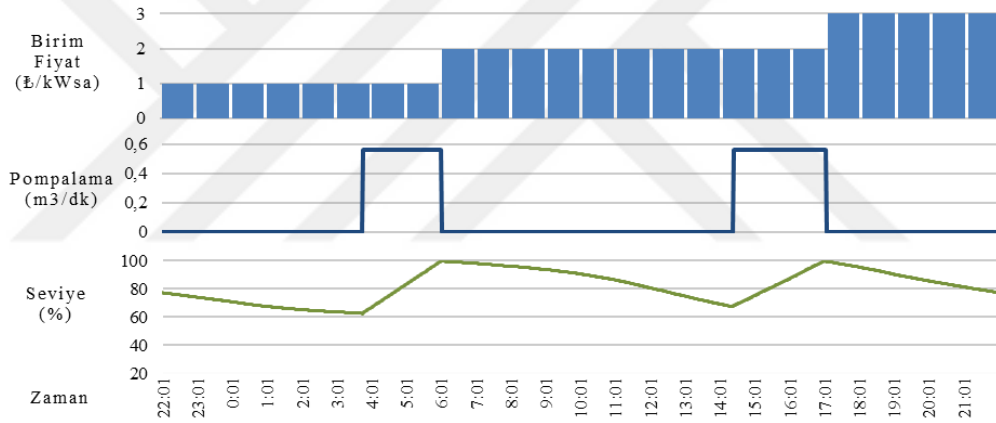
Tüm istasyonlarda kullanılan elektrik tarifesini, üç farklı zaman dilimine ( $I = 3$ ) sahiptir. Gündüz, puant ve gece periyotları için sırasıyla birim fiyatlar 1,937409  $\text{₺}/kWsa$ , 2,879227  $\text{₺}/kWsa$ , 1,177270  $\text{₺}/kWsa$  olarak belirlenmiştir. Tüm depolar için işletmeci tarafından  $L_l = 20$  ve  $L_h = 100$  olarak tanımlanmıştır. Puant periyodu sonunda hedeflenen seviye  $L_2 = L_l = 20$ , gece periyodu sonunda ise hedeflenen seviye  $L_3 = L_h = 100$  olarak belirlenmiştir. Gündüz periyodu sonunda hedeflenen  $L_1$  seviyesi her bir depo için ayrı ayrı hesaplanmıştır.

Her bir pompa ve depo çifti için; günlük su talebi  $C_d$ , depo toplam su kapasitesi  $C^*$ , tarife boyunca 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  $Q_{p_x}$  ve  $Q_{p_y}$ , depo seviyesinin başlangıç değeri  $L_0$  ve pompa çalışma durumunun başlangıç değeri  $D_0$  bilinmektedir. Tarife geçişlerinde hedeflenen seviyelere ulaşmayı sağlayacak pompa açma/kapama ( $D[i] = 1$ ,  $D[i] = 0$ ) kararları, bilinen bu değerler kullanılarak kolayca verilir ve en uygun  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  pompalama planı oluşturulur.

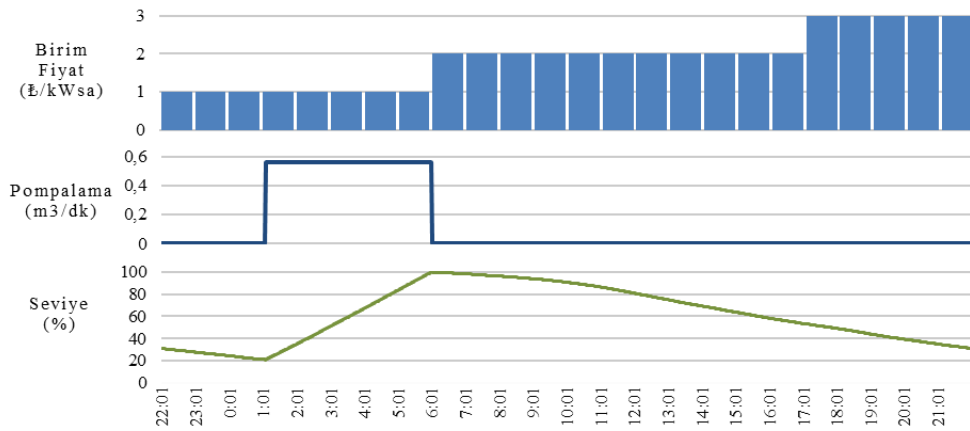
#### 4.6.1. Pompa C'nin optimizasyonu

C pompa ve depo çifti 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  $C_{p_y} = 0 m^3$ , deponun su tutma kapasitesi  $C^* = 192 m^3$ 'tür. Denklem 4.8'in uygulanmasıyla, puant periyodunda depodan çıkan toplam suyun depo kapasitesine oranının yüzde karşılığı  $r = 22,34$  olarak hesaplanır ve denklem 4.9 şartlarına göre gündüz tarifesi sonunda hedeflenen seviye değeri  $L_1 = 42,34$  olarak belirlenir.

C pompa ve depo çiftinin optimizasyonu için SDPA yönteminin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar Şekil 4.9'da, OSDPA kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.10'da gösterilmiştir. CWLC, SDPA ve OSDPA yöntemlerine ait sonuçlar Tablo 4.5'te özetlenmiştir.



Şekil 4.9. C Pompasının SDPA ile Optimizasyonu.



Şekil 4.10. C Pompasının OSDPA ile Optimizasyonu.

**Tablo 4.5.** C Pompası için CWLC, SDPA ve OSDPA'nın Karşılaştırılması.

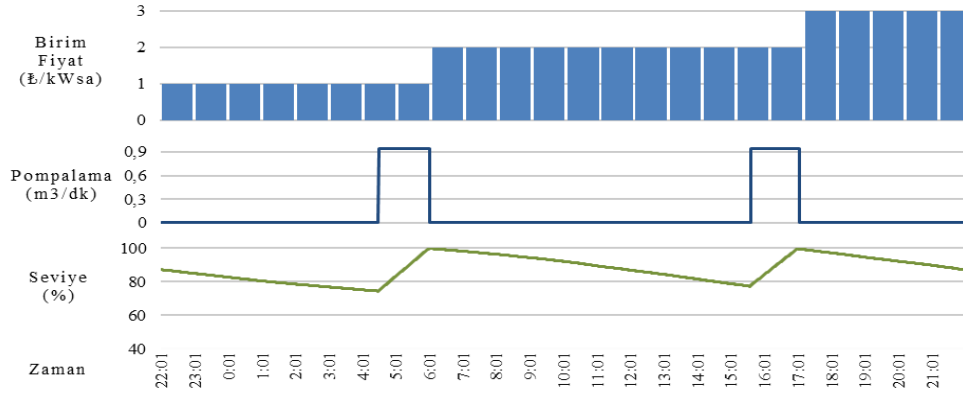
| Nitelik                  | CWLC                    | SDPA                    | OSDPA                   |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| #Çalışma/Durma Sayısı    | 5                       | 2                       | 1    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

Görüldüğü gibi, Şekil 4.9, Şekil 4.10 ve Tablo 4.5 analizleriyle; SDPA puant yüklerini gece ve gündüze başarıyla kaydırırken, OSDPA, sadece puant yüklerini değil aynı zamanda gündüz yüklerini de geceye ötelemeyi ve pompa açma/kapama sayısını daha fazla azaltmayı başarmıştır. CWLC'ye kıyasla, SDPA uygulandığında C pompası için %17,96 tasarruf sağlarken, OSDPA'nın uygulanmasıyla bu tasarruf oranı %39,14'e çıkmıştır; bu, özellikle  $L_1 = L_h = 100$  olarak belirlenmesi yerine denklem 4.8 ve denklem 4.9 kullanılarak yapılan iyileştirmenin etkisiyle gerçekleşmiştir.

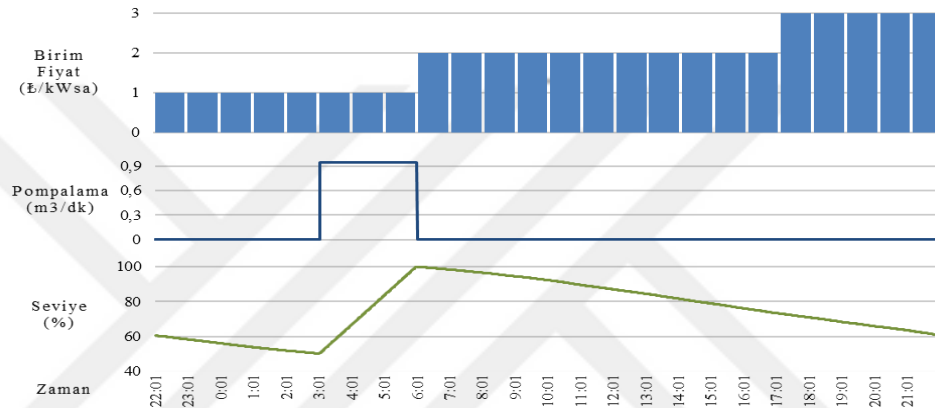
#### 4.6.2. Pompa B'nin optimizasyonu

B pompa ve depo çifti 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  $C_{p_y} = 0 m^3$ , deponun su tutma kapasitesi  $C^* = 308 m^3$ 'tür. Denklem 4.8'in uygulanmasıyla, puant periyodunda depodan çıkan toplam suyun depo kapasitesine oranının yüzde karşılığı  $r = 12,47$  olarak hesaplanır ve denklem 4.9 şartlarına göre gündüz tarifesi sonunda hedeflenen seviye değeri  $L_1 = 32,47$  olarak belirlenir.

B pompa ve depo çiftinin optimizasyonu için SDPA yönteminin uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar Şekil 4.11'de, OSDPA uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar ise Şekil 4.12'de gösterilmiştir. CWLC, SDPA ve OSDPA yöntemlerine ait sonuçlar Tablo 4.6'da özetlenmiştir.



Şekil 4.11. B Pompasının SDPA ile Optimizasyonu.



Şekil 4.12. B Pompasının OSDPA ile Optimizasyonu.

Tablo 4.6. B Pompası için CWLC, SDPA ve OSDPA'nın Karşılaştırılması.

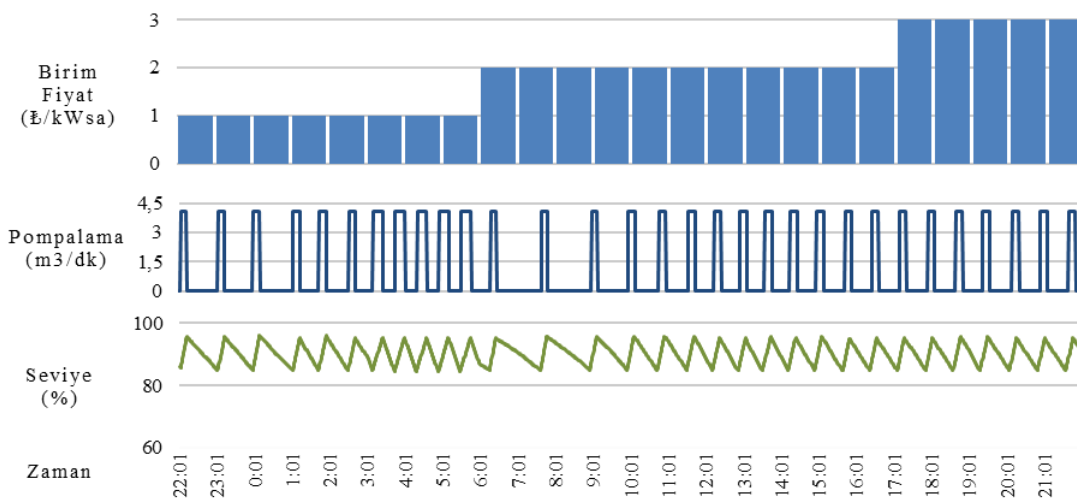
| Nitelik                  | CWLC                    | SDPA                    | OSDPA                   |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| #Çalışma/Durma Sayısı    | 5                       | 2                       | 1    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

Görüldüğü gibi, Şekil 4.11, Şekil 4.12 ve Tablo 4.6 analizleriyle; SDPA puant yüklerini gece ve gündüze başarıyla kaydırırken, OSDPA, sadece puant yüklerini değil aynı zamanda gündüz yüklerini de geceye ötelemeyi ve pompa açma/kapama sayısını daha fazla azaltmayı başarmıştır. CWLC'ye kıyasla, SDPA uygulandığında C pompası için %21,90 tasarruf sağlarken, OSDPA'nın uygulanmasıyla bu tasarruf oranı %40,64'e çıkmıştır; bu, özellikle ( $L_1 = L_h = 100$ ) olarak belirlenmesi yerine denklem 4.8 ve denklem 4.9 kullanılarak yapılan iyileştirmenin etkisiyle gerçekleşmiştir.

#### 4.6.3. Pompa B ve C optimizasyonunun pompa A'ya etkisi

Elde etmek istediğimiz ilk şey, çok aşamalı bir terfi sistemini sadece en üst aşama optimize edilmesi açısından ele almak ve en üst aşamada yapılan optimizasyonun, alt aşamalardaki performansa (alt aşamalar hala CWLC ile işlerken) olumlu bir etkisi olmasını sağlamaktır. Bu nedenle, B ve C pompalarının üst aşama optimizasyonundan sonra, en alt aşamadaki A pompasının hala CWLC ile çalışmaya devam etmesi durumunda, üst aşamada yapılan değişikliklerin alt aşamalara olan etkisini gözlemleyebiliriz.

OSDPA'nın B ve C pompaları için uygulanması sonucunda, A pompa ve depo çiftlisinin CWLC ile çalışmaya devam ettiği senaryoda elde edilen sonuçlar Şekil 4.13'te gösterilmiştir. B ve C pompalarının optimize edilip edilmemesi durumlarında, A pompası için CWLC yönteminin kullanılmasıyla elde edilen sonuçlar Tablo 4.7'de özetlenmiştir.



Şekil 4.13. Pompa B ve C'nin Optimizasyonu Sonrası A Pompa ve Depo İkilişinin Durumları.

**Tablo 4.7.** Sadece B ve C Pompa Optimizasyonunun A Pompasına Etkisi.

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

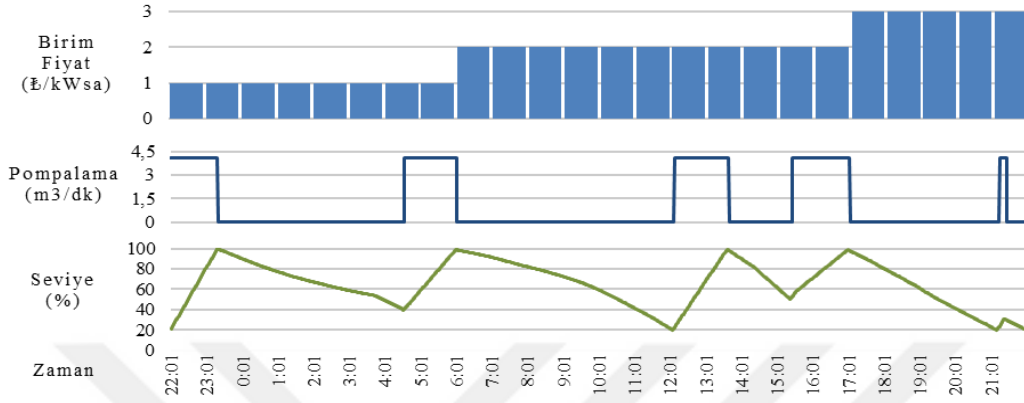
Görüldüğü gibi, Şekil 4.13 ve Tablo 4.7 analizleriyle; ikinci aşamadaki (B ve C Pompası) yüklerin OSDPA yöntemi uygulanarak kaydırılması, birinci aşamada (Pompa A) da aynı miktarda yükün kaymasını ve pompa açma/kapama sayısını daha fazla azaltmayı başarmıştır. Herhangi bir optimizasyon yapılmamış duruma kıyasla, sadece B ve C pompalarının optimize edilmesi, CWLC ile çalışan Pompa A'nın enerji maliyetinde yaklaşık olarak %8,12'lik bir tasarruf sağlamıştır.

#### 4.6.4. Pompa A'nın optimizasyonu

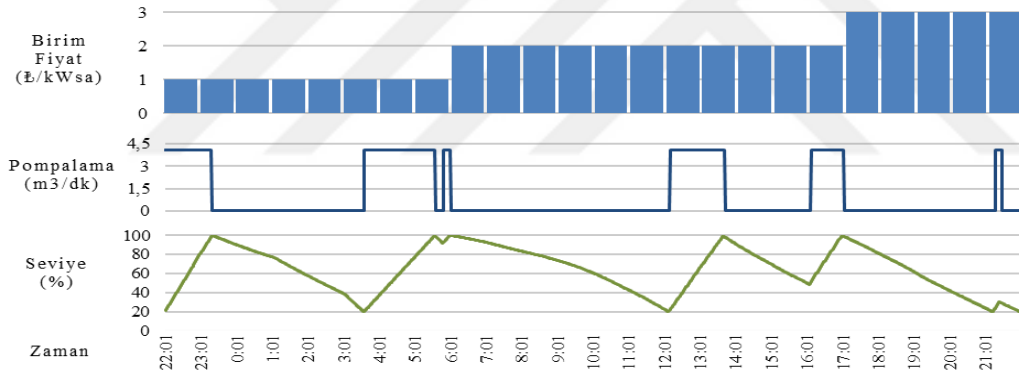
A pompa ve depo çifti için; günlük toplam su talebi  $C_d = 1164 m^3$ , puant periyodundaki talep oranı  $C_2 = 0,26$ , depodan su alan B ve C pompalarının OSDPA ile optimizasyonu sonrası puant periyodunda terfi ettirdikleri su miktarı  $C_{py} = C_{pB} + C_{pC} = 0 m^3$ , deponun su tutma kapasitesi  $C^* = 328 m^3$ 'tür. Denklem 4.8'in uygulanmasıyla, puant periyodunda depodan çıkan toplam suyun depo kapasitesine oranının yüzde karşılığı  $r = 92,27$  olarak hesaplanır ve denklem 4.9 şartlarına göre gündüz tarifesi sonunda hedeflenen seviye değeri  $L_1 = 100$  olarak belirlenir.

B ve C pompalarının SDPA ile optimize edilmesinin ardından, A pompa ve depo çiftinin optimizasyonu için de SDPA yönteminin uygulanması durumunda elde edilen sonuçlar Şekil 4.14'te görülmektedir. Benzer şekilde, B ve C pompalarının OSDPA ile optimize edilmesinin ardından A pompa ve depo çiftinin optimizasyonu için

OSDPA yönteminin uygulanması durumunda elde edilen sonuçlar Şekil 4.15'te görülmektedir. Sistemdeki tüm pompalamanın CWLC, SDPA ve OSDPA yöntemleriyle gerçekleştirilmesi durumunda elde edilen sonuçlar ise Tablo 4.8'de özetlenmiştir.



**Şekil 4.14.** Tüm Pompaların SDPA ile Optimizasyonu Sonrası A Pompa ve Depo İkilişinin Durumları.



**Şekil 4.15.** Tüm Pompaların OSDPA ile Optimizasyonu Sonrası A Pompa ve Depo İkilişinin Durumları.

**Tablo 4.8.** A Pompası için CWLC, SDPA ve OSDPA'nın Karşılaştırılması.

| Nitelik               | CWLC   | SDPA   | OSDPA  |
|-----------------------|--------|--------|--------|
| #Çalışma/Durma Sayısı | 37     | 5      | 6      |
| Çalışma Süresi Toplam | 373 dk | 368 dk | 368 dk |
| Çalışma Süresi Gece   | 85 dk  | 167 dk | 210 dk |
| Çalışma Süresi Gündüz | 194 dk | 189 dk | 147 dk |
| Çalışma Süresi Puant  | 94 dk  | 12 dk  | 11 dk  |

**Tablo 4.8. (Devamı) A Pompası için CWLC, SDPA ve OSDPA'nın Karşılaştırılması.**

| Nitelik                  | CWLC                    | SDPA                    | OSDPA                   |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Pompalanan Su Toplam     | 1517,79 m <sup>3</sup>  | 1497,45 m <sup>3</sup>  | 1497,45 m <sup>3</sup>  |
| Elektrik Maliyeti        | 1.119,86 ₺              | 895,99 ₺                | 845,55 ₺                |
| Birim Pompalama Maliyeti | 0,7378 ₺/m <sup>3</sup> | 0,5983 ₺/m <sup>3</sup> | 0,5647 ₺/m <sup>3</sup> |

Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Tablo 4.8'den de anlaşıldığı üzere; tüm pompaların SDPA yerine OSDPA ile optimize edilmesi, Pompa A'nın açma/kapama sayısında önemli bir değişikliğe neden olmadan puant yüklerini daha fazla kaydırmıştır. CWLC ile karşılaştırıldığında, tüm pompaların optimizasyonu için SDPA yönteminin uygulanması Pompa A'nın enerji maliyetinde yaklaşık %18,90 tasarruf sağlarken, OSDPA yönteminin uygulanması durumunda bu tasarruf oranı %23,47'ye çıkmıştır.

#### 4.6.5. Elde edilecek kazanç

C pompası günlük ortalama 165 m<sup>3</sup> su basmaktadır. SDPA optimizasyonu uygulandıktan sonra, C pompasının birim pompalama maliyeti 0,6331 ₺/m<sup>3</sup>'ten 0,5194 ₺/m<sup>3</sup>'e düşmüştür. Sadece C pompasının SDPA optimizasyonu ile elde edilen günlük tasarruf ise  $165 \cdot (0,6331 - 0,5194) = 18,76$  ₺ olup, yıllık tasarruf ise  $18,76 \cdot 365 = 6.847,40$  ₺ olarak gerçekleşecektir. C pompasının OSDPA optimizasyonu sonrasında, birim pompalama maliyeti 0,6331 ₺/m<sup>3</sup>'ten 0,3853 ₺/m<sup>3</sup>'e düşmüştür. Sadece C pompasının OSDPA optimizasyonu ile elde edilen günlük tasarruf ise  $165 \cdot (0,6331 - 0,3853) = 40,89$  ₺ olup, yıllık tasarruf ise  $40,89 \cdot 365 = 14.923,76$  ₺ olarak gerçekleşecektir.

B pompası günlük ortalama 167 m<sup>3</sup> su basmaktadır. SDPA optimizasyonu uygulandıktan sonra, B pompasının birim pompalama maliyeti 1,2948 ₺/m<sup>3</sup>'ten 1,0112 ₺/m<sup>3</sup>'e düşmüştür. Yalnızca B pompasının SDPA optimizasyonu ile elde edilen günlük tasarruf ise  $167 \cdot (1,2948 - 1,0112) = 47,36$  ₺ olup, yıllık tasarruf ise  $47,36 \cdot 365 = 17.286,40$  ₺ olarak gerçekleşecektir. B pompasının optimizasyonu sonrasında, birim pompalama maliyeti 1,2948 ₺/m<sup>3</sup>'ten 0,7686 ₺/m<sup>3</sup>'e düşmüştür. Yalnızca B pompasının OSDPA optimizasyonu ile elde edilen günlük tasarruf ise  $167 \cdot (1,2948 - 0,7686) = 87,88$  ₺ olup, yıllık tasarruf ise  $87,88 \cdot 365 = 32.076,20$  ₺ olarak gerçekleşecektir.

A pompası günlük ortalama  $1513 \text{ m}^3$  su basmaktadır. B ve C pompalarının SDPA ile optimizasyonu uygulandıktan sonra, 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, sadece A pompasının SDPA optimizasyonu ile elde edilen günlük tasarruf ise  $1513 \cdot (0,7378 - 0,5983) = 211,06 \text{ ₺}$  olup, yıllık tasarruf ise  $211,06 \cdot 365 = 77.036,90 \text{ ₺}$  olarak gerçekleşecektir. B ve C pompalarının OSDPA ile optimizasyonu uygulandıktan sonra, 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, sadece A pompasının OSDPA ile optimizasyonu ile elde edilen günlük tasarruf ise  $1513 \cdot (0,7378 - 0,5647) = 261,90 \text{ ₺}$  olup, yıllık tasarruf ise  $261,90 \cdot 365 = 95.593,50 \text{ ₺}$  olarak gerçekleşecektir.

A, B ve C pompalarının tamamının SDPA optimizasyonu ile sistem genelinde elde edilecek günlük tasarruf toplamı;  $211,06 + 47,36 + 18,76 = 277,18 \text{ ₺}$  olup, yıllık tasarruf ise  $277,18 \cdot 365 = 101.170,70 \text{ ₺}$  olarak hesaplanacaktır. A, B ve C pompalarının tümünün OSDPA optimizasyonu ile sistem genelinde elde edilecek günlük tasarruf toplamı ise;  $261,90 + 87,88 + 40,89 = 390,67 \text{ ₺}$  olup, yıllık tasarruf ise  $390,67 \cdot 365 = 142.594,55 \text{ ₺}$  olarak hesaplanacaktır.

CWLC yöntemi referans alındığında, SDPA ve OSDPA yöntemlerinin tüm sisteme uygulanmasıyla elde edilecek günlük, aylık ve yıllık tasarruf miktarları, Tablo 4.9'da karşılaştırılmıştır.

**Tablo 4.9.** Tasarruf Miktarlarının Karşılaştırılması.

| Tasarruf | SDPA<br>Pompa C | OSDPA<br>Pompa C | SDPA<br>Pompa B | OSDPA<br>Pompa B | SDPA<br>Pompa A | OSDPA<br>Pompa A | SDPA<br>Toplam | OSDPA<br>Toplam |
|----------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|-----------------|------------------|----------------|-----------------|
| Günlük   | 18,76₺          | 40,89₺           | 47,36₺          | 87,88₺           | 211,06₺         | 261,9₺           | 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₺        |

#### 4.7. Sonuçlar

Bu çalışma, SASKİ (Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi) tarafından işletilen çok kademeli (kaskad) bir su temin sisteminin detaylı bir şekilde analiz edilmesini amaçlamaktadır. Bu analiz, OSDPA'nın enerji maliyetinde potansiyel tasarruflar sağlama konusundaki yeteneğini, CWLC ve SDPA gibi yük kaydırma teknikleri ile

karşılaştırarak belirlemeyi hedeflemektedir. Sonuçlar, kaskad yapıdaki su temin sistemlerinin tek kademeli sistemlere kıyasla daha karmaşık olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, tüm sistemin optimize edilebilmesi için öncelikle sistemin alt sistemlere ayrılması ve en üst kademeden en alt kademeye (ana kaynağa) kadar adım adım optimize edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır.

Eğer depo kapasitesi, en yüksek maliyetli tarife (puant) zamanındaki su talebini pompa kullanılmadan karşılayabiliyorsa, o zaman yüksek maliyetli tarifedeki su taleplerin tamamı en düşük maliyetli tarife (gece) zamanına kaydırılabilir. Ayrıca, tüketim oranı ve depo kapasitesine bağlı olarak, orta maliyetli tarife (gündüz) zamanındaki yüklerin tamamı veya bir kısmının en düşük maliyetli tarife (gece) zamanına kaydırılabileceği; ancak SDPA yönteminde en yüksek maliyetli (puant) tarifeye geçiş seviyesinin hesaplanmadığı ve sabit bir değer olarak kullanıldığı için bu işlemin gerçekleştirilemediği gözlemlenmiştir. Bu durumda, en pahalı tarifeye geçiş seviyesinin hesaplanması gerekliliği ortaya çıkmıştır. SDPA yöntemine yapılan bazı geliştirmelerle bu değer hesaplanması, SDPA'nın sağlayamadığı durum OSDPA ile elde edilmiştir. Bunun yanı sıra, SDPA ile karşılaştırıldığında OSDPA, sadece tasarruf miktarını artırmakla kalmayıp aynı zamanda pompa açma/kapama sayısını daha fazla azaltma başarısını göstermiştir.

Çok kademeli pompa sistemlerinde, sadece en son kademeler optimize edildiğinde, ilk kademelerde herhangi bir optimizasyon yapılmamış olsa bile, ana su kaynağına ulaşana kadar alt kademelerdeki pompaların enerji maliyetinde bir azalma gözlemlenmiştir.

OSDPA, su temin sistemine ait A, B ve C pompalarının çalışma zamanlamalarını optimize ederek, en yüksek maliyetli elektrik tüketimlerinin mümkün olan en fazla diğer tarife zaman dilimlerine kaydırılmasını sağlamıştır. Bu, çok kademeli su temin sistemlerindeki (kaskad yapıdaki) OSDPA'nın başarısıdır. Konvansiyonel su seviye kontrolü (CWLC) ile karşılaştırıldığında, belirlenen şartlar altında ve herhangi bir fiziksel ekipman iyileştirmesi yapılmadığında, sadece yük kaydırma yöntemiyle elde edilebilecek en iyi optimizasyon sonuçlarını sunan OSDPA, sistemdeki C, B ve A pompalarının enerji maliyetlerinde sırasıyla %39, %41 ve %24 oranında tasarruf sağlayabilmektedir.

Pompalama sisteminin maksimum ve minimum işletme seviyeleri, su talebi, tarife birim fiyatları ve diğer işletim parametrelerinde meydana gelen değişikliklere uyum sağlayabilen bir optimizasyon algoritması kullanılmalıdır. Günlük su talebinin ve talep modelinin sabit olduğu varsayıldığı için, bu çalışmada herhangi bir talep tahmin modülüne gerek duyulmamıştır. Ancak, su talebinin dönemsel olarak (yaz/kış, hafta içi/hafta sonu vb.) değişken olabileceği durumlarda, OSDPA'nın bir talep tahmin modülü ile kullanılması tavsiye edilir.



## 5. ÇOK POMPALI POMPALAMA SİSTEMLERİ İLE ÇALIŞMA

### 5.1. Özet

Üçüncü çalışmada E-SDPA (Genişletilmiş Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması) adı verilen bir algoritma sunulmaktadır. Tek pompalı istasyonlarda kullanılabilen SDPA algoritması, birden fazla pompaya sahip istasyonlarda da kullanılabilir şekilde geliştirilmiştir. Bu algoritma, enerji maliyetlerini azaltmak için farklı zaman dilimlerindeki yüklerin yönetilmesinde etkili bir şekilde çalışır.

Bu çalışmada, daha önce geliştirilen SDPA (sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması) yaklaşımı optimize edilmiş ve yeni sürüm olan E-SDPA (genişletilmiş sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması) çok pompalı istasyonlar için kullanılmak üzere genişletilmiştir. SDPA yaklaşımı, tek pompalı ve tek tanklı basit sistemlerde en iyi sonucu verir. Öte yandan E-SDPA yaklaşımı, pompaları çalıştırmak için en iyi düzenlemeyi sağlayarak çoklu pompaları ve tek tanklı pompalama sistemlerini optimize etmek için kullanılabilir. Türkiye'deki Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ) için Çok pompalı sistemli bir su temin sistemi örnek çalışma olarak kullanılmıştır. Bu, pompaların çalıştırılmasıyla ilgili tüm olasılıkların maliyetinin incelenerek, su talepleri ve elektrik birim fiyatları dikkate alınarak en ucuz olasılığa göre düzenlenmesiyle yapılır. Bu çalışmada önerilen E-SDPA yaklaşımı ile çok pompalı sistemler optimize edildi. Sonuçlar, E-SDPA yaklaşımının, birim fiyatın pahalı olduğu zaman dilimindeki (puant) yükleri, birim fiyatın ucuz olduğu zaman dilimlerine (gece ve gündüz) kaydırmada oldukça başarılı olabileceğini göstermektedir. Mevcutta kullanılan geleneksel su seviyesi kontrolü (CWLC) yaklaşımı referans alındığında, E-SDPA'nın sistemde kullanılan enerji maliyetinin düşürülmesinde ne ölçüde fayda sağlayacağı incelenmiştir. Bu yöntemin de çalışma alanına uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak, E-SDPA'nın mevcutta kullanılan CWLC yaklaşımına üstünlüğü ortaya konulmuştur.

## 5.2. Literatür Araştırması

Küçük ve ark. [3], içme suyu dağıtım sistemlerinde pompalama maliyetlerini azaltmak için Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması (SDPA) adlı bir yöntemi geliştirmiştir. SDPA, pompalama programlarını optimize ederek pompalama enerjisi maliyetlerini azaltmayı başarmıştır.

Al-Sanabani ve ark. [35], OSDPA (Optimal Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması) adı verilen yeni bir algoritma geliştirmiştir. Bu algoritma, SDPA algoritmasına yapılan bir iyileştirme ve özellikle karmaşık pompalama sistemlerinde ve çok aşamalı (kaskad) sistemleri optimize etmek için kullanılabilir ve etkili sonuçlar verir.

Feng ve ark. çalışmalarında [40], açık kanallı su transfer sistemlerinde paralel pompa istasyonlarının enerji tüketimini optimize etmek için etkili bir yaklaşım sunmaktadır. Çok çeşitli faktörleri göz önünde bulundurur ve önemli miktarda enerji tasarrufu sağlarken hesaplama süresini önemli ölçüde azaltan hibrit bir algoritma sunar. Metodoloji, değişen koşullara sahip sistemlerde gerçek zamanlı optimizasyon için değerlidir.

Wu ve ark. [41], bireysel pompaların verimliliğini ve güvenilirliğini arttırmada kontrol valflerinin rolünü vurgulamaktadır. Ancak valf kısmı kayıplarının genel sistem verimliliğini olumsuz yönde etkileyebileceğini kabul etmektedir. Bu nedenle gerçek dünya uygulamalarında paralel pompa sistemleri için çalışma yöntemi seçilirken maliyet, güvenilirlik ve verimlilik gibi faktörler dikkate alınmalıdır.

Oh ve ark. araştırmalarında [42], minimum sermaye yatırımı ve termodinamik durum değişkenlerine, ölçüme, analize ve geri bildirim dayalı basit kontrol optimizasyonunu içeren optimum paralel pompa programlama yoluyla %15'e varan enerji tasarrufunun elde edilebileceği sonucuna varmıştır.

Zhuan ve Xia [43], birden fazla pompaya sahip bir pompa istasyonunun optimal çalışma planlamasını tartışmaktadır. Yazarlar bu problemi bir dinamik programlama problemi olarak formüle etmişler ve çözmek için genişletilmiş bir azaltılmış dinamik programlama algoritması (RDPA) önermişlerdir. Optimizasyon problemi hem enerji maliyetini hem de bakım maliyetini dikkate alır. Genişletilmiş RDPA'nın, geleneksel dinamik programlama algoritmalarına kıyasla hesaplama süresini önemli ölçüde azalttığı gösterilmiştir. Ancak bu çalışma, pompaların çıkış kapasitesi ve güç açısından

aynı olduğunu varsayıyordu ve bu gerçek dünyada mevcut değildi. İki pompa aynı güçte olsa bile, onları ortak bir pompalama hattında çalıştırdığımızda beklenen çıkış kapasitesi (bir pompanın kapasitesinin iki katı) verilemez.

Olszewski ve Arafeh çalışmalarında [44], birden fazla paralel bağlı pompaya sahip karmaşık pompa istasyonlarının enerji verimliliğini artırmaya yönelik yöntemleri araştırıyor ve kendi kendine öğrenen kontrol uygulamaları için temel oluşturmayı amaçlıyor. Araştırma, genetik algoritmalar aracılığıyla, değişken hızlı sürücülerin aynı sistemdeki hem bireysel pompalar hem de paralel pompa grupları için enerji açısından en verimli kontrol yöntemi olduğunu belirledi. Çalışma, kendi kendine öğrenen kontrol sistemlerinin, özellikle değişken hızlı sürücü ayarlarını optimize ederek, karmaşık pompa istasyonlarında enerji verimliliğini önemli ölçüde artırma potansiyeline sahip olduğu, ancak gerçek zamanlı kontrol için pratik olmadığı, dolayısıyla pratik uygulama için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu sonucuna varıyor.

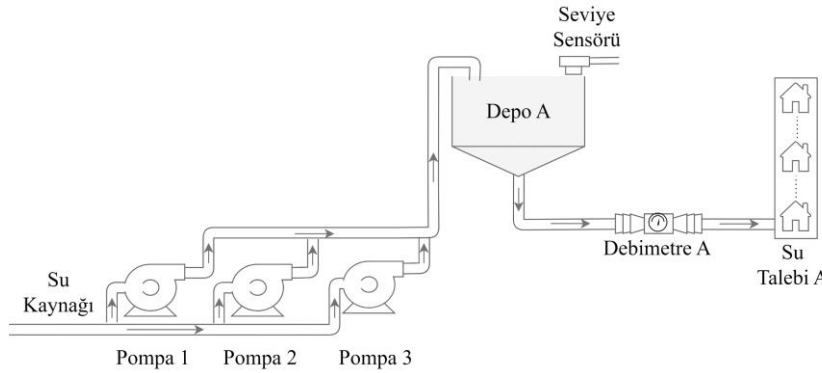
Öte yandan, E-SDPA bize karmaşık pompa istasyonlarında herhangi bir ek sermaye yatırımı yapmadan en iyi enerji optimizasyonunu sağlar, gerçek zamanlı kontrol açısından basit ve pratiktir.

### **5.3. Çalışma Alanının Tanıtımı**

SASKİ (Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi) tarafından işletilen bir yüksek su deposu ve bu deponun beslendiği üç farklı pompa ile donatılmış bir pompalama istasyonu, bu vaka çalışması için seçilmiştir. Su kaynağındaki bu pompalama istasyonu, suyu yüksek seviyedeki depoya üç adet santrifüj pompa kullanarak aktarmaktadır. Yüksek konumda bulunan su deposunun seviyesi bir seviye ölçer tarafından izlenmektedir. Kullanıcıların depodan istedikleri su miktarı, depo çıkışındaki bir debimetre ile ölçülmektedir. Depo ve pompa istasyonlarında programlanabilir mantık denetleyiciler (PLC - programmable logic controller) bulunmaktadır. Her iki istasyonda yer alan GSM modülleri aracılığıyla depo ve pompa istasyonlarındaki PLC'ler, birbirleriyle ve merkezdeki bir sunucu ile iletişim kurabilmektedir. Bu şekilde, depodaki seviye ölçümü bir GSM modemi aracılığıyla pompa istasyonuna iletilir ve sabit hızlı santrifüj pompalar, seviye değerine göre çalıştırılarak, suyu kaynaktan yüksek konumlu hedef deposuna taşır.

Şu anki durumda, pompalama istasyonlarında geleneksel su seviyesi kontrolü (CWLC - conventional water level control) yöntemi uygulanmaktadır. PLC'ler üzerinde toplanan pompa çalışma bilgileri ve ölçüm verileri sürekli olarak merkezi bir sunucuda kaydedilmektedir. Pompalama istasyonunda, gece, gündüz ve puant saatler olmak üzere farklı birim fiyatlarına sahip olan ulusal üç zamanlı tarife kullanılmaktadır.

SASKİ (Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi) bünyesindeki su dağıtım sistemine ait bir yüksek su deposu ve bu deponun beslendiği üç pompa içeren bir pompa istasyonu uygulama alanı olarak seçilmiştir. Şekil 5.1'de görülen uygulama alanı, başlangıçta 1, 2 ve 3 numaralı pompalar ile beslenen A deposuna sahiptir. Bu deposundan, yer çekimi etkisi ile ilgili son kullanıcılara su sağlanmaktadır. Depo çıkışında, depo tarafından talep edilen su miktarlarının anlık ve toplam değerlerini hesaplayabilmek için bir debimetre bulunmaktadır. Ana depo sürekli olarak dolu olduğu için, kaynağın sınırsız olduğu varsayılmıştır.



**Şekil 5.1.** Uygulama Alanı.

Tablo 5.1'de, çalışma alanındaki 1, 2 ve 3 numaralı pompalarla ilgili bilgilere yer verilmektedir. Bu bilgiler pompaların çalışma olasılığını  $D$ , bu olasılıklara dayalı çalıştırma kararlarını, dakikadaki pompalama debisi, saatlik pompalama debisi, pompanın nominal gücü ve çalışan pompalara ve tarifeye göre pompalama için oluşan elektrik birim fiyatlarını içermektedir.

**Tablo 5.1.** 1, 2, 3 Pompalarına Ait Bilgiler.

| Olasılık (D) | Pompa 3 | Pompa 2 | Pompa 1 | D_Debi( $Q_p$ ) | S_Debi | P(kW) | Gece    | Gündüz  | Puant   |
|--------------|---------|---------|---------|-----------------|--------|-------|---------|---------|---------|
| 0            | 0       | 0       | 0       | 0               | 0      | 0     | 0₺      | 0₺      | 0₺      |
| 1            | 0       | 0       | 1       | 5,38            | 322,80 | 90    | 0,667₺  | 1,1442₺ | 1,7351₺ |
| 3            | 0       | 1       | 1       | 9,38            | 562,80 | 180   | 0,7654₺ | 1,3125₺ | 1,9903₺ |
| 5            | 1       | 0       | 1       | 7,20            | 431,81 | 145   | 0,8037₺ | 1,3780₺ | 2,0897₺ |
| 2            | 0       | 1       | 0       | 4,38            | 262,80 | 90    | 0,8196₺ | 1,4054₺ | 2,1312₺ |
| 6            | 1       | 1       | 0       | 6,90            | 414,00 | 145   | 0,8382₺ | 1,4373₺ | 2,1796₺ |
| 7            | 1       | 1       | 1       | 10,70           | 642,00 | 235   | 0,8760₺ | 1,5022₺ | 2,2779₺ |
| 4            | 1       | 0       | 0       | 2,37            | 142,36 | 55    | 0,9246₺ | 1,5855₺ | 2,4043₺ |

Tablo 5.2, A deposuna dair bilgileri içermektedir. Kullanılan elektrik tarifesine bağlı birim fiyatlar ise Tablo 5.3'te bulunmaktadır.

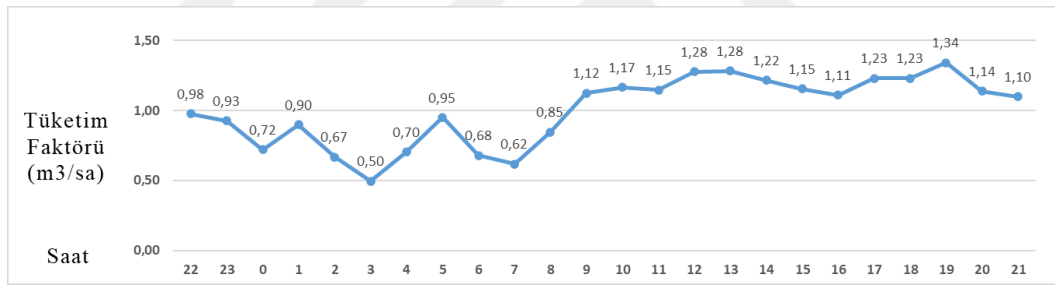
**Tablo 5.2.** A Deposuna Ait Bilgiler.

| Depo | $C^*$ , Azami (%100) Su Tutma Kapasitesi ( $m^3$ ) | $C_d$ , Günlük Su Talebi ( $m^3$ ) |
|------|--|------------------------------------|
| A    | 200  | 6728                               |

**Tablo 5.3.** Üç Zamanlı Elektrik Tarife Fiyatlandırması.

| Tarife Adı | Süre        | Periyot Uzunluğu ( $dk$ ) | Birim Fiyat ( $₺/kWsa$ ) |
|------------|-------------|---------------------------|--------------------------|
| Puant      | 17:00-22:00 | 480                       | 6,223148                 |
| Gündüz     | 06:00-17:00 | 660                       | 4,103792                 |
| Gece       | 22:00-06:00 | 300                       | 2,393267                 |

Çalışma bölgesindeki su talebinin günlük toplamı ve su deposunun başlangıç seviyesi bilinmektedir. Toplam günlük su talep miktarı 1164  $m^3$ 'tür. Gün içindeki su talebi modeli, saatlik talep faktörü ( $C_h$ ), Şekil 5.2'de gösterilmektedir.



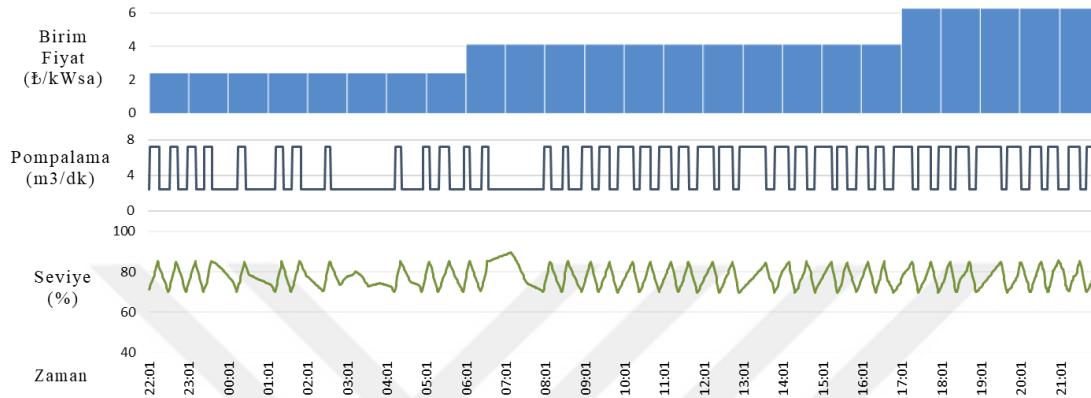
**Şekil 5.2.** Saatlik Talep Faktörü.

Çalışma bölgesindeki pompalar, depo seviyesini belirlenmiş maksimum ve minimum sınırlar içinde tutmayı amaçlayan CWLC yaklaşımını kullanılarak çalıştırılmaktadır. Mevcut bu yöntemde, pompaların açma-kapama kararları sadece depo seviyesini gözeterek verilirken, su talebi ve elektrik birim fiyatları gibi faktörler dikkate alınmadığı için elektrik maliyetini optimize etmek mümkün değildir.

A deposu ve üç pompa, mevcut olarak kullanılan CWLC yöntemi çerçevesinde, Tablo 5.4'te belirtilen depo seviyesinin belirli maksimum ve minimum değerlerine göre işletilmektedir. Pompaların CWLC yöntemi ile çalıştırılmasının sonuçları Şekil 5.3'te görsel olarak sunulmuştur.

**Tablo 5.4.** CWLC için Çalışma Sınırları.

| Pompa | Minimum Seviye (%) | Maksimum Seviye (%) |
|-------|--------------------|---------------------|
| 1     | 75                 | 85                  |
| 2     | 55                 | 65                  |
| 3     | 85                 | 95                  |

**Şekil 5.3.** A Depo ve Pompaları için Mevcut Durumlar.

Görüntüden de anlaşılacağı üzere, 3. pompa sürekli olarak çalışmaktadır, 1. pompa ise özellikle gündüz ve puant tarife saatlerinde yoğun bir şekilde çalışmaktadır. 1. pompanın çalışma durumu incelendiğinde, puant dönemi sırasında en yüksek faaliyetin gerçekleştiği açıkça görülmektedir. Tablo 5.1'deki diğer seçenekler göz önüne alındığında, pompalama programının optimize edilmesiyle puant dönemi yüklerinin diğer dönemlere kaydırılması durumunda, enerji maliyetinde dikkate değer bir azalma sağlanabileceği görülmektedir.

#### 5.4. Problem Formülasyonu

Bu tür yük kaydırma sorunları, tamsayı programlama olarak adlandırılan bir optimal zamanlama problemi olarak kabul edilir [12]. Daha önce geliştirilen Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması (SDPA) [3] yaklaşımı optimize edildi ve Çok pompalı istasyonlarına uyarlandı, böylece genişletilmiş ve geliştirilmiş bir sürüm olan E-SDPA (Genişletilmiş Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama) oluşturuldu.

SDPA yöntemine göre[3], 24 saatlik bir pompalamanın elektrik maliyeti ( $Z$ ), pompanın çalışma ve durma süresinin ( $T_o$ ) dakika cinsinden ifade edildiği durumda

( $n = \frac{24 \cdot 60}{T_o}$  örnek sayısı) denklem 5.1 ile hesaplanabilir.

$$Z = \sum_{i=1}^n E \cdot d(i) \cdot M(i), \forall i \in [1, n] \quad (5.1)$$

$E$ : Pompa gücü,  $d$ : Pompa durumu (çalışma  $d = 1$ , durma  $d = 0$ ),  $M$ : Birim fiyat (₺/kWsa). Pompa gücü ve elektrik birim fiyatları daha önceden belirlenmiş ve sabit değerler olduğundan  $Z$ 'yi etkileyebilecek değişken yalnızca pompa çalışma kararı olan  $d$ 'dir.

Pompalama programı optimize edilirken, depo çıkışındaki basınç belirli bir değerin altına düşmemesi veya olası bir arıza nedeniyle pompalamanın kesilmemesi için minimum bir seviye değeri, aynı zamanda depodan suyun taşmaması için maksimum bir seviye belirlenir. Bu belirlenen değerler, seviye sınırlamalarını tanımlar ve sürekli olarak denklem 5.2 koşulu sağlanmalıdır.

$$L_l \leq L_i \leq L_h, \forall i \in [1, n] \quad (5.2)$$

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

Günlük su talebi kullanılarak, saatlik tüketimin ortalaması denklem 5.3 ile hesaplanır.

$$C_{ort} = \frac{C_d}{24} \quad (5.3)$$

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

İçinde bulunulan saate ait tüketimi kullanılarak, içinde bulunulan saate ait tüketim faktörü denklem 5.4 ile hesaplanır.

$$C_h(i) = \frac{C_T(i)}{C_{ort}}, \forall i \in [1, n] \quad (5.4)$$

$C_h$ : Saatlik tüketim faktörü,  $C_T$ : Saatlik toplam tüketim.

$C_{ort}$  ve  $C_h(i)$  değerleri hesaplandıktan sonra  $Q(i)$ , içinde bulunan periyottaki tüketim miktarı denklem 5.5 ile hesaplanır.

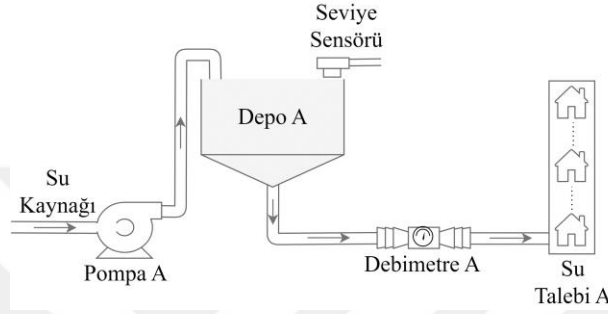
$$Q(i) = \frac{C_{ort} \cdot C_h(i)}{60}, \forall i \in [1, n] \quad (5.5)$$

Pompalanan su miktarı, tüketim miktarı, depo kapasitesi ve mevcut depo seviyesi dikkate alınarak; önceki dönemde uygulanan pompa açma/kapama kararı ile devam edilmesi durumunda, mevcut periyot sonunda ulaşılabilecek seviye değeri denklem 5.6 ile hesaplanır.

$$L(i) = L(i-1) + \left( \frac{Q_p \cdot d(i-1) - Q(i)}{c^*} \right) \cdot 100, \forall i \in [1, n] \quad (5.6)$$

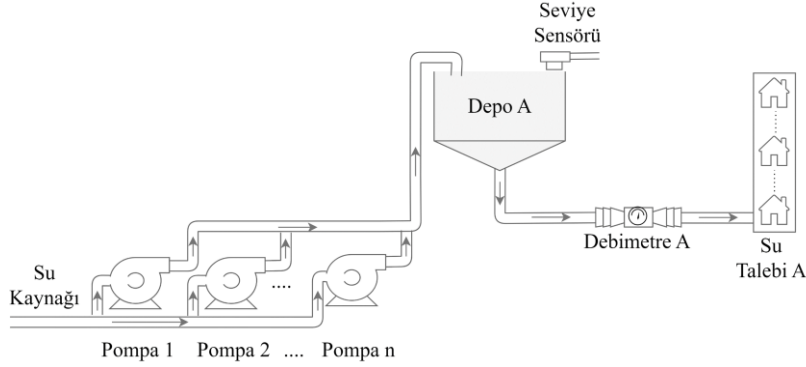
$L$ : Periyot sonundaki depo seviyesi,  $Q(i)$ :  $i$  periyodunda tüketim miktarı,  $Q_p$ : Pompanın bir periyotta terfi ettirdiği su miktarı,  $d$ : Pompa açma/kapama kararı,  $C^*$ : Deponun su tutma kapasitesi.

SDPA metodunun kullanıldığı, Şekil 5.4'te gösterilen gibi basit bir sistemde (bir pompa ve bir depo); pompa açma-kapama kararlarının sonucunda oluşan seviye değişimi denklem 5.6 ile izlenir, böylece depo seviyesi belirlenen sınırlar içinde tutulur.



**Şekil 5.4.** Tek Pompalı İstasyon.

Fakat çoklu pompalı bir sistemde Şekil 5.5'te görüldüğü gibi, depodan çekilen su miktarının yanı sıra depoya eklenen su miktarları ve suyu yukarı taşıyan pompaların çalışma durumu da seviye değişikliğini etkileyecektir.



**Şekil 5.5.** Çok Pompalı İstasyon.

Çoklu pompalardan suyun yukarı taşındığı zaman depo seviyesinde meydana gelen değişiklik, denklem 5.6'nın kullanılmadığı Çok pompalı sistemlerinde, suyu tanka ileten tüm pompaların çalışma durumunu dikkate alan denklem 5.7 ile hesaplanabilir.

$$L(i) = L(i - 1) + \left( \frac{Q_p(W^*) - Q(i)}{C^*} \right) \cdot 100, \quad \forall i \in [1, n] \quad (5.7)$$

$L$ : Periyot sonundaki depo seviyesi,  $Q$ : Tüketim miktarı,  $Q_p(W^*)$ : Tablo 5.1.'de, olasılık sütun değeri  $D(i)$ ,  $W^*$ 'ye eşit olduğunda karşılık gelen  $Q_p$  sütun değeri; yani çalışan pompaların dakikada tanka pompaladığı toplam su miktarı,  $W^*$ :  $i$  periyodundaki seçilen olasılığı Şekil 5.6.'daki E-SDPA algoritmasında hesaplanır,  $C^*$ : Deponun su tutma kapasitesi. Su talepleri ve elektrik birim fiyatları gibi faktörler göz önüne alınarak, çalışma alanındaki su temin sistemi, bu çalışmada tavsiye edilen E-SDPA metoduyla optimize edilmiştir.

Hesaplanan seviye değeri ve enerji kullanımını etkileyen diğer koşullara bağlı olarak, pompaların açma-kapama kararları değişebilir veya korunabilir. Bu nedenle, puant dönemde yoğunlaşan yükü geceye kaydırarak pompalama maliyetini düşürme amacıyla, belirlenmiş seviye sınırlarına uygun olarak pompalama çizelgesinin optimize edilmesi gereken bir problem ortaya çıkar. Bu nedenle, çoklu pompalı sistemlerdeki zamanlama problemine çözüm bulmak için, tüm pompaların kullanılmasıyla sistemin genelinde optimize edilir. Belirlenen kısıtları sağlayacak şekilde en iyi pompalama çizelgesi  $D(i)$  bulundurulur; puant dönemi yükleri, diğer dönemlere olabildiğince kaydırılarak azaltılır [17, 39].

## 5.5. Çözümler

### 5.5.1. SDPA yaklaşımı

SDPA yaklaşımında,  $T_o$ 'nun azalması, pompa çalışma sıklığını artırmaz, bu da depo kapasitesinin izin verdiği kadar yükü kaydırmamıza olanak tanır. Ayrıca, SDPA yaklaşımı, pompalama programını optimize etmek için tüm olası  $2^n$  ( $n$ : pompa açma ve kapama kararı sayısı) kombinasyonlarından en iyisini bulmak yerine, tarife geçişlerinde hedeflenen seviyelere ulaşma odaklı olarak çalışarak algoritmayı daha basit bir hale getirmiştir [3].

Ancak, SDPA yaklaşımı yalnızca tek pompalı istasyonların bulunduğu sistemlere uygulanır ve çok pompalı istasyonlar için bu algoritma geçerli değildir.

### 5.5.2. E-SDPA yaklaşımı

Çok pompalı sistemlerde, SDPA algoritması doğrudan uygulanmaz. İlk adımda, pompa çalıştırma maliyeti hesaplanır, bu hesaplama pompaların çalıştırma olasılıklarıyla ilgili tüm senaryoları içerir ve bu senaryolar maliyete göre sıralanır, Tablo 5.1.'de görüldüğü gibi. Ardından E-SDPA algoritması devreye girer ve gerekli

su seviyesine ulaşmak için kalan süre içinde pompalama su talebini karşılamak için bu senaryolar arasından Tablo 5.1.'den en düşük maliyetli seçeneği seçer. E-SDPA yaklaşımı, (Problem Formülasyon bölümünde anlatıldığı gibi) denklem 5.6 yerine denklem 5.7 kullanır. Sonuç olarak, SDPA yerine E-SDPA'nın kullanılması, tek pompa ve tek depolu basit sistemlerin yanı sıra karmaşık çok pompalı terfi sistemlerinin de optimize edilmesine olanak tanır.

SDPA metodolojisinde olduğu gibi, E-SDPA metodu da bir dizi temel bilgiyi gerektirir. Bu bilgiler, elektrik tarife seçenekleri, günlük su ihtiyacı, her tarife için fiyatlandırma, belirlenmiş seviye kısıtlamaları, tarife dönemlerinin sonundaki hedef depo seviyeleri, depo kapasitesi, tarife dönemlerinde gerçekleşen su talebi oranları, tarife dönemlerinde kalış süreleri ve pompaların su taşıma kapasiteleri gibi bilgilere dayanır. Bu bilgilere dayalı olarak ve elde edilen eşitlikler kullanılarak, hedeflenen depo seviyelerine ulaşmayı sağlayacak pompalama programı  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  kolaylıkla oluşturulabilir. [3]. Lakin, Çok pompalı sistemlerinin etkili bir şekilde optimize edilebilmesi için E-SDPA yaklaşımında, depo seviyesindeki değişim, Eş 6'nın yerine Eş 7'nin kullanılmasıyla hesaplanır. SDPA algoritmasında  $D$ , pompanın çalışması durumunda 0 ve pompanın durması durumunda 1 ile temsil edilirken, E-SDPA algoritmasında  $D$ , pompaların çalışma ihtimalini (kümesini) gösterir. Varsayalım ki elimizde  $z$  sayıda pompa bulunuyor, bu durumda  $2^z$  farklı pompa durumu alt kümesi mevcut olacaktır, yani her pompa ya çalışır ya da durur. Örneğin, 3 pompanız olduğunu farz edelim; bu durumda 8 farklı olasılığınız (pompa durumu alt kümeleri) Tablo 5.5'te gösterilmektedir.

**Tablo 5.5.** Üç Pompanın Çalışma Olasılıkları.

| Olasılık ( $D$ ) | Pompa3 | Pompa2 | Pompa 1 | Pompa Sayısı |
|------------------|--------|--------|---------|--------------|
| 0                | 0      | 0      | 0       | 0            |
| 1                | 0      | 0      | 1       | 1            |
| 2                | 0      | 1      | 0       | 1            |
| 3                | 0      | 1      | 1       | 2            |
| 4                | 1      | 0      | 0       | 1            |
| 5                | 1      | 0      | 1       | 2            |
| 6                | 1      | 1      | 0       | 2            |
| 7                | 1      | 1      | 1       | 3            |

Şöyle de ifade edebiliriz:  $D[i]$ ,  $i$  periyotta pompaların çalışma durumlarını gösterir (Örneğin, Pompa 1 ve Pompa 2 açık olduğunda  $D[i] = 3$  olurken, tüm pompalar kapalı olduğunda  $D[i] = 0$  olacaktır).

SDPA kullanımında su pompalama kapasitesi  $Q_p$ , ve gereken su pompalama süresi  $T_g$  hesaplanmaktaydı. Fakat E-SDPA metodunu kullanıldığında, her  $i$  periyotta çalıştırılacak pompalardan depoya basılan su miktarı  $Q_p(W^*)$  Tablo 5.1'den alınmakta ve çalışan pompalar için gereken su pompalama süresi  $T_{g(*)}$  gibi değişkenler hesaplanabilmektedir. Tablo 5.5'te seçilen olasılık  $D[i] = W^* = max = 7$  durumunda, yani tüm pompaların çalıştığı bir senaryoda,  $T_{g(max)}$  tüm pompaların için gereken su pompalama miktarını süresi belirtir.

E-SDPA'nın algoritma ve akış diyagramı Şekil 5.6 ve Şekil 5.7'de gösterilmektedir.

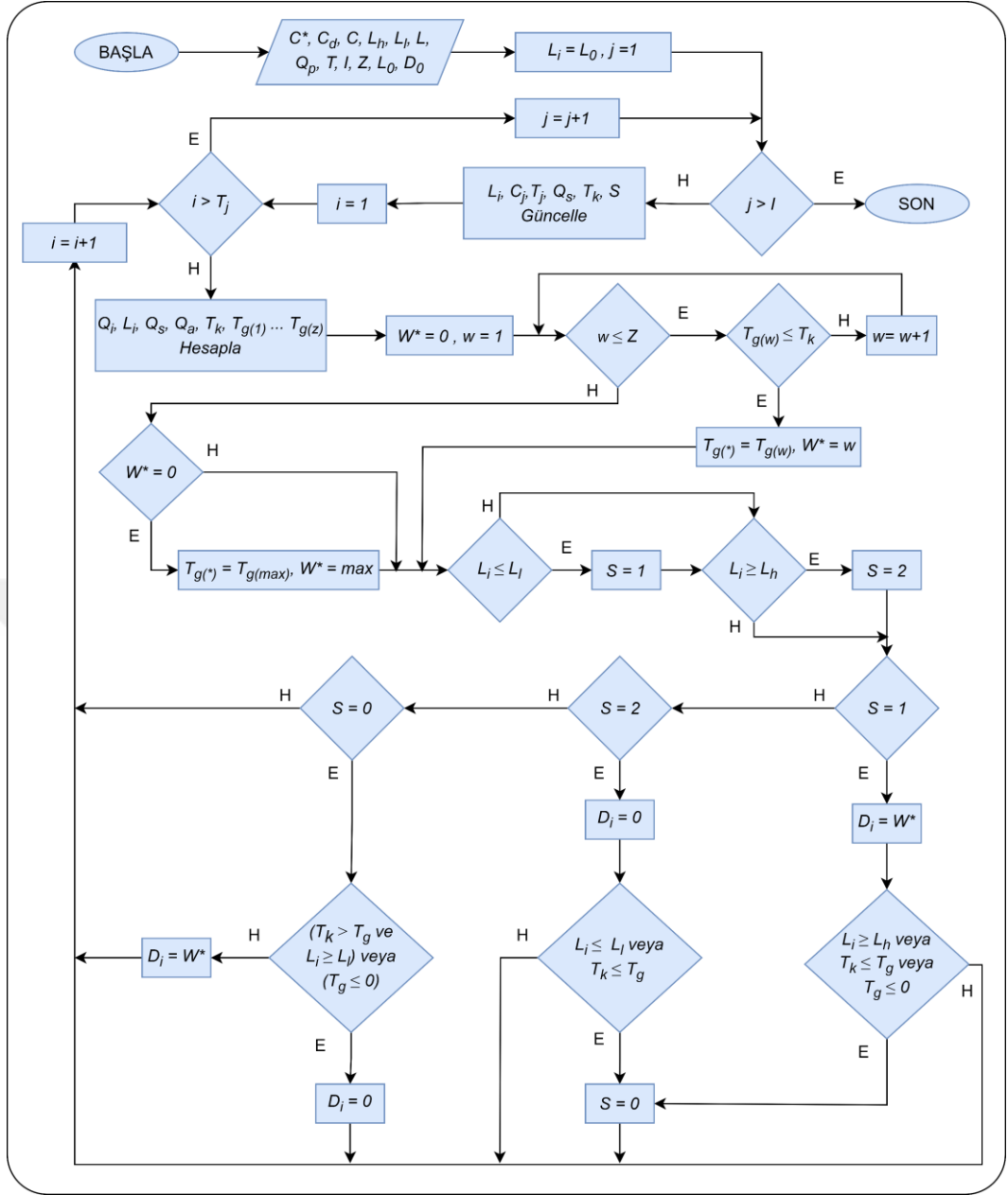


```

Input: ( $C^*$ ;  $C_d$ ;  $C$ ;  $L_h$ ;  $L_i$ ;  $L$ ;  $Q_p$ ;  $T$ ;  $I$ ;  $L_0$ ;  $D_0$ )
Initialize  $i = 1$ 
for  $j = 1, \dots, I$  do
     $L_j = L[j]$ ,  $C_j = C[j]$ ,  $T_j = T[j]$ 
    Initialize  $Q_s = 0$ ,  $T_k = T_j$ ,  $S = 0$ 
    for  $i = 1, \dots, T_j$  do
        if  $j < > 1$  and  $i < > 1$  then
            Compute  $Q_i, L_i$  with equations (5), (7)
        end if
         $Q_s = Q_s + Q_i$ 
         $Q_a = \frac{C^*(L_j - L_i)}{100} + (C_j \cdot C_d - Q_s)$ 
         $T_{g(1)} = \frac{Q_a}{Q_{p(1)}} \dots T_{g(z)} = \frac{Q_a}{Q_{p(z)}}$ 
         $W^* = 0$ 
        for  $w = 1, \dots, z$  do
            if  $T_{g(w)} \leq T_k$  then
                 $T_{g(*)} = T_{g(w)}$ ,  $W^* = w$ 
                Break;
            end if
        end for
        if  $W^* = 0$  then
             $T_{g(*)} = T_{g(Max)}$ ,  $W^* = max$ 
        end if
         $T_k = T_k - 1$ 
        if  $L_i \leq L_l$  then
             $S = 1$ 
        end if
        if  $L_i \geq L_h$  then
             $S = 2$ 
        end if
        if  $S = 1$  then
             $D[i] = W^*$ 
            if  $L_i \geq L_h$  or  $T_k \leq T_{g(*)}$  or  $T_{g(*)} \leq 0$  then
                 $S = 0$ 
            end if
             $i = i + 1$ 
            Continue;
        end if
        if  $S = 2$  then
             $D[i] = 0$ 
            if  $L_i \leq L_l$  or  $T_k \leq T_{g(*)}$  then
                 $S = 0$ 
            end if
             $i = i + 1$ 
            Continue;
        end if
        if  $S = 0$  then
            if  $(T_k > T_{g(*)}$  and  $L_i \geq L_l)$  or  $(T_{g(*)} \leq 0)$  then
                 $D[i] = 0$ 
            Otherwise
                 $D[i] = W^*$ 
            end if
        end if
         $i = i + 1$ 
    end for
end for

```

**Şekil 5.6.** E-SDPA Algoritması.



Şekil 5.7. E-SDPA Akış Diyagramı.

## 5.6. Uygulamalı Çalışma Sonuçları

Şu an mevcut olan CWLC ve bu çalışma içinde geliştirilen E-SDPA yöntemlerine ait simülasyonlar, C# programlama dili kullanılarak oluşturulmuştur. Bütün simülasyonlar için, aynı özelliklere sahip bir bilgisayar ve CWLC yaklaşımının gerçek dünyada uygulanmasından elde edilen veriler, SQL (structured query language) veri tabanına kaydedilerek kullanılmıştır. CWLC ve E-SDPA çalışma işlemi 1 saniyenin altında tamamlanmıştır. Çalışma sahasındaki depo ve tüm pompa istasyonları için, birer PLC (programlanabilir lojik kontrolcü) kontrol cihazı kullanılmıştır. PLC

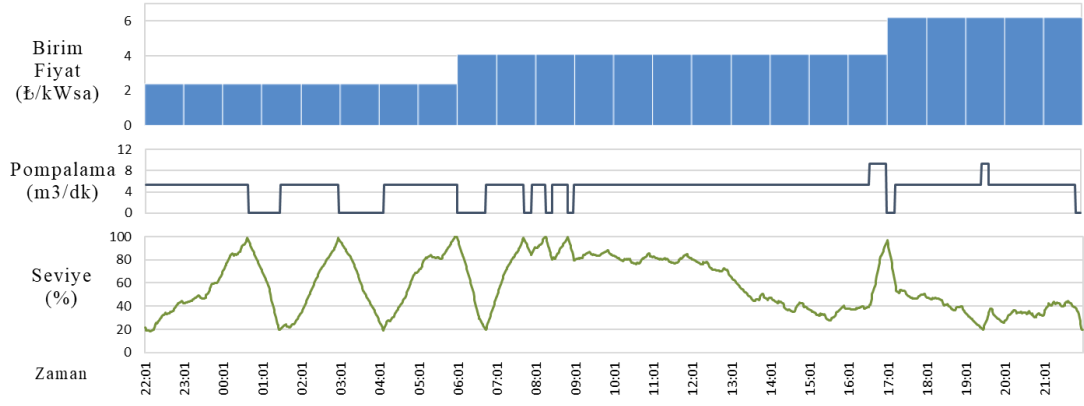
yazılımları geliştirilirken, yapısal kontrol dili (SCL - structured control language) ve merdiven diyagram (ladder diagram) yöntemleri kullanılmıştır.

CWLC yöntemi, tüm pompalar ve A deposu kombinasyonu için 24 saat boyunca uygulandığında elde edilen pompa çalışma ve seviye verileri “Çalışma Alanının Tanıtımı” bölümünde sunulmuştur. Aynı verileri kullanarak, ele alınan çok pompalı sistemin optimizasyonu için E-SDPA yaklaşımıyla çözümler geliştirilmiştir.

İstasyonda faaliyet gösteren elektrik tarifesi, üç ayrı zaman dilimi için ( $I = 3$ ) geçerli olan fiyatlandırmalar içermektedir. Gündüz, puant, ve gece dönemleri için sırasıyla 4,103792 ₺/kWsa, 6,223148 ₺/kWsa, 2,393267 ₺/kWsa birim fiyatlarını içermektedir. Depo seviyesi sınırları, işletme tarafından minimum seviye yüzdesi  $L_l = 100$  ve maksimum seviye yüzdesi  $L_h = 20$  olarak tespit edilmiştir. Bu nedenle, bilinen tarife birim fiyatları ve işletme tarafından tanımlanan sınır değerlerine dayanarak, her bir tarife sonunda hedeflenen seviyelerin yüzdelerik değerleri  $L = \{L_1, L_2, L_3\}$  olmak üzere,  $L_1 = 100$ ,  $L_2 = 20$ ,  $L_3 = 100$  olarak belirlenmiştir.

Günlük su talebi  $C_d = 6728 m^3$ , depo toplam kapasitesi  $C^* = 200 m^3$ , her tarife için günlük su talebin oranı  $C = \{C_1, C_2, C_3\}$ , olmak üzere;  $C_1 = 0,484$ ,  $C_2 = 0,251$ ,  $C_3 = 0,265$  şeklinde belirtilir. Her tarifedeki kalınma süreleri  $T = \{T_1, T_2, T_3\}$ , olmak üzere;  $T_1 = 660 dk$ ,  $T_2 = 300 dk$ ,  $T_3 = 480 dk$  şeklinde ifade edilir. Seçilen pompaların toplam su pompalama kapasiteleri  $Q_p(W^*)$ , başlangıç depo seviyesi  $L_0$  ve başlangıçta çalışan pompaların durumu  $D_0$  gibi bilinen değerler vardır. Algoritma tarafından kullanılan bu değerlere dayanarak, tarife sonunda hedeflenen seviyeye ulaşmayı sağlayacak şekilde Tablo 5.1'deki seçilen pompaların açma-kapama (Örn:  $D[i] = 1$ , sadece 1. Pompa çalışacak;  $D[i] = 4$ , sadece 3. pompa çalışacak gibi) kararları kolayca hesaplanır ve enerji optimizasyonu açısından uygun  $D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$  pompalama programı oluşturulur.

E-SDPA algoritmasının simülasyonu, 1 dakikalık bir karar periyodu  $T_o$  kullanılarak yapılmıştır. E-SDPA'nın kullanımıyla, gün boyunca oluşan seviye değişiklikleri ve pompaların çalışma durumları Şekil 5.8'de açıkça görselleştirilmiştir.



**Şekil 5.8.** E-SDPA Yaklaşımı,  $T_0=1$  dk, Seviye ve Pompa Çalışma Durumları.

Karar döngüsü bir dakika olduğunda, hesaplama süresi 0,0429 milisaniye olarak bulunmuştur. Tarife geçişlerindeki depo seviyelerinin, sınırlara ulaştığı gözlemlenmektedir. Ek olarak, pompaların açma-kapama işlemi 9 kez gerçekleşmektedir. E-SDPA yaklaşımıyla,  $T_0$  süresi 1 dakika gibi kısa bir süreye indirildiğinde, depo kapasitesinin maksimum verimle kullanılabildiği görülür. Ayrıca, pompaların açma-kapama sıklığında artış olmadığı, aksine açma-kapama sıklığının mümkün olduğunca azaltıldığı gözlemlenmektedir.

### 5.6.1. CWLC ve E-SDPA'nın karşılaştırılması

CWLC ve SDPA yöntemlerinin benzer koşullar altında kullanılması sonucunda elde edilen veriler Tablo 5.6'da sunulmuştur.

**Tablo 5.6.** CWLC ve E-SDPA Sonuçlarının Karşılaştırılması.

| Nitelik                   | CWLC                                  | E-SDPA                               |
|---------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| Karar Periyodu            | 1 dk                                  | 1 dk                                 |
| Uygulama Süresi           | 13,3 $\mu$ s                          | 42,9 $\mu$ s                         |
| #Pompa                    | 40                                    | 9                                    |
| Toplam                    | 6754 $m^3$                            | 6727 $m^3$                           |
| Pompalama Süresi (Gündüz) | P(1) 352 dk & P(2) 0 dk & P(3) 660 dk | P(1) 585 dk & P(2) 26 dk & P(3) 0 dk |
| Pompalama Süresi (Puant)  | P(1) 204 dk & P(2) 0 dk & P(3) 300 dk | P(1) 277 dk & P(2) 11 dk & P(3) 0 dk |

**Tablo 5.6. (Devamı) CWLC ve E-SDPA Sonuçlarının Karşılaştırılması.**

| Nitelik                   | CWLC                                   | E-SDPA                                |
|---------------------------|--|---------------------------------------|
| Pompalama Süresi (Gece)   | P(1) 136 dk & P(2) 0 dk & P(3) 480 dk  | P(1) 361 dk & P(2) 0 dk & P(3) 0 dk   |
| Pompalama Süresi (Toplam) | P(1) 692 dk & P(2) 0 dk & P(3) 1440 dk | P(1) 1223 dk & P(2) 37 dk & P(3) 0 dk |
| Günlük Elektrik           | 9806,50 ₺                              | 7745,47 ₺                             |
| Birim (m <sup>3</sup> )   | 1,4517 ₺                               | 1,1512 ₺                              |
| CWLC'ye Kıyasla           | -                                      | %20,69                                |

Her iki yöntem, benzer miktarda suyu pompalamak için aynı süre içinde farklı zaman dilimlerinde pompalama yaparak su tedarikini gerçekleştirebiliyor. Ancak, zaman tabanlı elektrik tarifesi göz önüne alındığında, E-SDPA yaklaşımı, puant saatinden geceye kaydırılabilecek tüm yükleri kaydırma kapasitesine sahiptir.

CWLC yöntemi mevcut olarak kullanıldığında, E-SDPA, günlük açma-kapama işlemlerini 40'ten 9'a düşürerek daha düşük pompa işlem sıklığı ve pompa işlemi sırasında enerji maliyetini 1,4517 ₺/m<sup>3</sup>'den 1,1512 ₺/m<sup>3</sup>'e indirerek daha düşük enerji maliyeti sağlamıştır. E-SDPA yöntemi, birim enerji maliyetini yaklaşık %20,69 oranında azaltma yeteneğine sahip olduğunu ve bu çalışma bağlamında en iyi optimizasyonu elde edebileceğimizi göstermektedir.

Çalışma koşulları (depo kapasitesi, su talebi, kullanılan pompaların kapasitesi) ve güncel elektrik birim fiyatlandırması göz önüne alındığında; günlük ortalama su talebi  $C_d = 6728 m^3$  olduğu için, E-SDPA yaklaşımı kullanıldığında suyun elektrik maliyeti 1,1512 ₺/m<sup>3</sup>'e düşürülerek, günlük olarak  $6728 \cdot (1,4517 - 1,1512) = 2020,13$  ₺ tasarruf edilebilir. Bu da aylık 60.604 ₺ ve yıllık 737.348 ₺ tasarruf sağlar. E-SDPA yönteminin çalışma alanında uygulanması durumunda, günlük, aylık ve yıllık olarak elde edilebilecek tasarruf miktarları, CWLC metoduyla karşılaştırıldığında Tablo 5.7'de sunulmuştur.

**Tablo 5.7.** Tasarruf Miktarlarının Karşılaştırılması.

| Süre   | E-SDPA    |
|--------|-----------|
| Günlük | 2020,13 ₺ |
| Aylık  | 60.604 ₺  |
| Yıllık | 737.348 ₺ |

### 5.7. Sonuçlar

Çeşitli sektörlerde elektrik maliyetlerini azaltmak için kullanılan yöntemler arasında, TTY için katkı sağlayacak olan yük kaydırma veya öteleme teknikleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, mevcut içme suyu dağıtım sistemlerinde herhangi bir ekipman veya fiziksel şart değişikliği yapmadan, sadece pompalar çalışma zamanlarını yeniden düzenleyerek puant yüklerini geceye kaydıran yeni bir yaklaşım olan E-SDPA önerilmektedir.

Çalışma sahasında gerçekleştirilen simülasyonlar sonuçları, E-SDPA yaklaşımının CWLC yaklaşımlarına göre daha düşük pompa çalışma frekansı ve daha düşük pompa maliyeti sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. E-SDPA'nın kullanılmasıyla, sadece pompaların çalışma sürelerini optimize ederek elde edilebilecek en büyük tasarruf miktarına ulaşılmıştır. Bu tasarruf miktarı, simülasyonlarımızda %20,69 olarak belirlenmiştir.

E-SDPA'nın uygulanması sonucunda, CWLC yaklaşımıyla ilgili olarak mevcut pompaların açma-kapama sayısı %77 oranında azaltılmıştır. Pompa dur-kalk sayısının azaltılmasının getirdiği avantajlar arasında pompa-motor ömrünün artması, bakım periyotlarının uzaması, kalkış sırasında yüksek demeraj akımlarından kaçınılması ve demeraj akımı nedeniyle nominal güce kıyasla fazla enerji tüketiminin azalması bulunmaktadır.

Geliştirilen E-SDPA, bilgisayar tabanlı bir cihaz gerektirmeyecek kadar düşük veri saklama alanı, işlem gücü ve program hafızası talep eder, bu nedenle kolayca bir PLC içinde çalıştırılabilir. Tüm istasyonlarda merkezi bir sunucuda program çalıştırarak pompalama komutlarını saha cihazlarına iletmek yerine, programın sahada kullanılan

PLC'lerde yerel olarak çalıştırılması, merkezi sunucuda veya iletişim ağındaki olası bir sorundan etkilenmeden pompalamanın devam etmesini sağlar.

Kademeli yapıdaki terfi merkezlerinde E-SDPA'nın uygulanması, sadece en uzaktaki terfi merkezinin enerji tüketiminde tasarruf sağlamakla kalmaz, aynı zamanda önceki terfi merkezlerinin enerji tüketimlerinde de tasarruf potansiyeli sunar, bu da su kaynağına kadar olan tüm süreçte enerji tasarrufunu sağlar. Çalışma sahasında depo boyutu küçüktü, ancak E-SDPA yöntemini kullanarak yaklaşık %20'lik bir maliyet azalması elde ettik. Tahmin modelini henüz uygulamadık, bu nedenle bu adımı gelecekteki çalışmaların bir hedefi olarak öneriyoruz.



## **6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER**

### **6.1. Basit Pompalama Sistemleri ile Çalışma**

SDPA, mevcut içme suyu dağıtım sistemlerinde ekipman ve fiziksel koşulları değiştirmeden, yalnızca pompalama çizelgesini optimize ederek puant yüklerini geceye kaydırmayı hedefleyen bir algoritma olarak öne çıkmaktadır.

Simülasyon ve uygulama sonuçları, SDPA yaklaşımının CWLC ve IDPA yaklaşımlarına kıyasla daha düşük pompa çalışma sıklığı ve daha düşük bir pompalama maliyeti sunduğunu göstermiştir. SDPA'nın kullanılmasıyla, yalnızca pompalama çizelgesinin optimizasyonu ile elde edilebilecek en iyi tasarruf miktarına ulaşılmıştır. Simülasyon ortamında yalnızca pompalama çizelgesinin optimize edilmesiyle elde edilebilecek en iyi tasarrufun %11,97 olduğu görülmüş ve bu miktar, SDPA'nın uygulanmasıyla çalışma alanında %11,85 tasarrufa ulaşarak elektrik faturalarına yansımıştır.

SDPA'nın uygulanmasıyla, IDPA yaklaşımında karşılaşılan karar periyodu küçülürken pompa çalışma frekansının artma sorununu çözerek, mevcut pompa açma-kapama karar sayısını %72 oranında azaltmak mümkün olmuştur. Pompa dur-kalk sayısının azaltılmasının sağladığı avantajlar şunlardır: pompa-motor ömrünün uzaması, bakım periyotlarının artması, kalkış sırasında çekilen yüksek akımlardan (demeraj akımı) kaçınılması, demeraj akımı nedeniyle nominal güce oranla fazla enerji kullanımının azalması.

### **6.2. Çok Aşamalı Pompalama Sistemleri ile Çalışma**

OSDPA, çok kademeli su temin sistemlerini optimize etmek üzere geliştirilmiş bir algoritmadır. SDPA algoritmasında yapılan iyileştirmelerle geliştirilen bu algoritma, özellikle karmaşık pompa sistemlerinde ve çok aşamalı (kaskad) sistemlerin optimizasyonunda etkili sonuçlar elde etmek üzere tasarlanmıştır.

OSDPA göre, tüm sistemin optimize edilebilmesi için öncelikle sistemin alt sistemlere ayrılması ve en üst kademeden en alt kademeye (ana kaynağa) kadar adım adım optimize edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Çok kademeli pompa sistemlerinde,

sadece en son kademeler optimize edildiğinde, ilk kademelerde herhangi bir optimizasyon yapılmamış olsa bile, ana su kaynağına ulaşana kadar alt kademelerdeki pompaların enerji maliyetinde bir azalma gözlemlenmiştir.

Kaskad yapıdaki sistemlerin karmaşıklığına rağmen, OSDPA, CWLC'ye göre daha düşük pompa çalışma frekansı ve önemli miktarda enerji tasarrufu sağlamıştır. OSDPA, su temin sistemine ait A, B ve C pompalarının çalışma zamanlamalarını optimize ederek, en yüksek maliyetli elektrik tüketimlerinin mümkün olan en fazla diğer tarife zaman dilimlerine kaydırılmasını sağlamıştır. Bu, çok kademeli su temin sistemlerindeki (kaskad yapıdaki) OSDPA'nın başarısıdır. Konvansiyonel su seviye kontrolü (CWLC) ile karşılaştırıldığında, belirlenen şartlar altında ve herhangi bir fiziksel ekipman iyileştirmesi yapılmadığında, sadece yük kaydırma yöntemiyle elde edilebilecek en iyi optimizasyon sonuçlarını sunan OSDPA, sistemdeki C, B ve A pompalarının enerji maliyetlerinde sırasıyla %39, %41 ve %24 oranında tasarruf sağlayabilmektedir.

### **6.3. Çok Pompalı Pompalama Sistemleri ile Çalışma**

E-SDPA, çok pompalı su istasyonları optimize etmek üzere geliştirilmiş bir algoritmadır. SDPA algoritması çok pompalı istasyonlarında (bir depoya ve birden fazla pompa) kullanılabilir şekilde geliştirilmiştir.

Çalışma sahasında gerçekleştirilen simülasyonlar sonuçları, E-SDPA yaklaşımının CWLC yaklaşımlarına göre daha düşük pompa çalışma frekansı ve daha düşük pompa maliyeti sağladığını açıkça ortaya koymaktadır. E-SDPA'nın kullanılmasıyla, sadece pompaların çalışma sürelerini optimize ederek elde edilebilecek en büyük tasarruf miktarına ulaşılmıştır. Bu tasarruf miktarı, simülasyonlarımızda %20,69 olarak belirlenmiştir.

E-SDPA'nın uygulanması sonucunda, CWLC yaklaşımıyla ilgili olarak mevcut pompaların açma-kapama sayısı %77 oranında azaltılmıştır. Pompa dur-kalk sayısının azaltılmasının getirdiği avantajlar arasında pompa-motor ömrünün artması, bakım periyotlarının uzaması, kalkış sırasında yüksek demeraj akımlarından kaçınılması ve demeraj akımı nedeniyle nominal güce kıyasla fazla enerji tüketiminin azalması bulunmaktadır.

#### 6.4. Genel Değerlendirme ve Öneriler

Bu üç çalışma, su pompalama sistemlerinin enerji maliyetlerini azaltmak için özgün algoritmalar sunmaktadır. SDPA, OSDPA ve E-SDPA'nın her biri, CWLC gibi geleneksel yöntemlere göre daha düşük pompa çalışma sıklığı ve maliyeti sağladığını göstermektedir. Ayrıca, bu algoritmaların hafif yapısı ve PLC entegrasyonu gibi pratik avantajları vurgulanmıştır.

Çok kademeli pompa sistemlerinde, sadece en son kademeler optimize edildiğinde, ilk kademelerde herhangi bir optimizasyon yapılmamış olsa bile, ana su kaynağına ulaşana kadar alt kademelerdeki pompaların enerji maliyetinde bir azalma gözlemlenmiştir.

Bu üç çalışma, su dağıtım sistemlerinde enerji tasarrufunu artırmak için geliştirilmiş algoritmalar sunmaktadır, bu da elektrik kaynaklarının daha sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine katkı sağlar. Sonuç olarak, bu çalışmalar, su dağıtım sistemlerindeki pompalama enerji maliyetlerini azaltmak için geliştirilen SDPA, OSDPA ve E-SDPA algoritmalarının, enerji tasarrufu sağlamak ve su talebini sürekli olarak karşılamak isteyen su dağıtım şirketleri için önemli araçlar olduğunu göstermektedir.

Sonuç olarak, SDPA, OSDPA ve E-SDPA algoritmalarının sınırlılığı, pompalanan suyu ölçmek ve günlük su talebini belirlemek için debimetrelerin kullanılmasına dayanmaktadır. Bu nedenle, gelecekteki çalışma olarak bu algoritmaların, debimetrelerin bulunmadığı ve yalnızca su seviye sensörlerinin olduğu senaryolarda da çalışabilmesi için geliştirilebilir.



## KAYNAKLAR

- [1] B. Coelho and A. Andrade-Campos, "Efficiency achievement in water supply systems—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 30, pp. 59–84, Feb. 2014, doi: 10.1016/j.rser.2013.09.010.
- [2] I. Sarbu, "A Study of Energy Optimisation of Urban Water Distribution Systems Using Potential Elements," *Water (Basel)*, vol. 8, no. 12, p. 593, Dec. 2016, doi: 10.3390/w8120593.
- [3] H. KÜÇÜK, M. TURAN, K. YARALI, H. AL-SANABANİ, and M. İSKEFİYELİ, "Su terfi istasyonlarının yük kaydırmalı işletimi için yeni bir algoritma," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 36, no. 4, pp. 2081–2094, Sep. 2021, doi: 10.17341/gazimmfd.772939.
- [4] E. and the U. D. of E. Hydraulic Institute, "Variable Speed Pumping: A Guide to Successful Applications; Executive Summary," 2004. Accessed: Nov. 11, 2023. [Online]. Available: <https://www.energy.gov/eere/amo/articles/variable-speed-pumping-guide-successful-applications-executive-summary>
- [5] D. F. Moreira and H. M. Ramos, "Energy Cost Optimization in a Water Supply System Case Study," *Journal of Energy*, vol. 2013, pp. 1–9, 2013, doi: 10.1155/2013/620698.
- [6] Hydraulic Institute, Europump, and D.E.O., *Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems*. New Jersey, USA, 2001.
- [7] A. Hasanbeigi and L. Price, "Industrial Energy Audit Guidebook: Guidelines for Conducting an Energy Audit in Industrial Facilities," Berkeley, CA (United States), Oct. 2010. doi: 10.2172/992484.
- [8] R. Menke, E. Abraham, and I. Stoianov, "Modeling Variable Speed Pumps for Optimal Pump Scheduling," in *16th World Environmental and Water Resources Congress 2016*, West Palm Beach, Florida, ABD: American Society of Civil Engineers, May 2016, pp. 199–209. doi: 10.1061/9780784479858.022.
- [9] P. Waide and C. U. Brunner, "Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems," 2011. doi: <https://doi.org/10.1787/5kkg52gb9gjd-en>.
- [10] L. S. Araujo, H. Ramos, and S. T. Coelho, "Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management," *Water Resources Management*, vol. 20, no. 1, pp. 133–149, Feb. 2006, doi: 10.1007/s11269-006-4635-3.
- [11] H. Zhang, X. Xia, and J. Zhang, "Optimal sizing and operation of pumping systems to achieve energy efficiency and load shifting," *Electric Power Systems Research*, vol. 86, pp. 41–50, May 2012, doi: 10.1016/j.epsr.2011.12.002.

- [12] X. Zhuan, L. Zhang, and J. Guo, "Optimal operation scheduling of a pump station," in *2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, IEEE, May 2011, pp. 3797–3802. doi: 10.1109/CCDC.2011.5968885.
- [13] W.-Y. Chiu, H. Sun, and H. V. Poor, "Demand-side energy storage system management in smart grid," in *2012 IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm)*, Tainan, Taiwan: IEEE, Nov. 2012, pp. 73–78. doi: 10.1109/SmartGridComm.2012.6485962.
- [14] A. Conteh, M. E. Lotfy, K. M. Kipnetich, T. Senjyu, P. Mandal, and S. Chakraborty, "An Economic Analysis of Demand Side Management Considering Interruptible Load and Renewable Energy Integration: A Case Study of Freetown Sierra Leone," *Sustainability*, vol. 11, no. 10, p. 2828, May 2019, doi: 10.3390/su11102828.
- [15] X. Zhuan, W. Li, and F. Yang, "Optimal Operation Scheduling of a Pumping Station in East Route of South-to-north Water Diversion Project," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 3031–3037, May 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.03.623.
- [16] D. A. Savic, G. A. Walters, and M. Schwab, "Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply," 1997, pp. 227–235. doi: 10.1007/BFb0027177.
- [17] G. Zheng and Q. Huang, "Energy Optimization Study of Rural Deep Well Two-Stage Water Supply Pumping Station," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 24, no. 4, pp. 1308–1316, Jul. 2016, doi: 10.1109/TCST.2015.2498140.
- [18] F. Alighalehabakhani, S. McElmurry, C. J. Miller, and S. M. S. Abkenar, "A case study of energy cost optimization in Monroe water distribution system," in *2013 International Green Computing Conference Proceedings*, IEEE, Jun. 2013, pp. 1–5. doi: 10.1109/IGCC.2013.6604469.
- [19] X. Zhuan, L. Zhang, W. Li, and F. Yang, "Efficient operation of the fourth Huaian pumping station in east route of South-to-North Water Diversion Project," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 98, pp. 399–408, 2018, doi: 10.1016/j.ijepes.2017.10.041.
- [20] R. Menke, E. Abraham, P. Pappas, and I. Stoianov, "Approximation of system components for pump scheduling optimisation," *Procedia Eng*, vol. 119, no. 0, pp. 1059–1068, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.08.935.
- [21] S. S. Rao, "Engineering Optimization: Theory and Practice, Fourth Edition," 2009.
- [22] N. Andréasson, A. Evgrafov, and M. Patriksson, "An Introduction to Optimization: Foundations and Fundamental Algorithms," 2005.
- [23] C. Carissimo and M. Korecki, "Limits of Optimization," *Minds Mach (Dordr)*, Apr. 2023, doi: 10.1007/s11023-023-09633-1.
- [24] J. R. R. A. Martins and A. Ning, *Engineering Design Optimization*. University of Michigan, 2021.

- [25] A. Verma, "Convex vs. Non-Convex Functions in Optimization," Medium . Accessed: Dec. 14, 2023. [Online]. Available: Convex vs. Non-Convex Functions <https://ai.plainenglish.io/navigating-the-terrain-convex-vs-non-convex-functions-in-optimization-86812e9a1989>in Optimization
- [26] I. Sadrehaghghi, "Optimization Problem," 2022. doi: 10.13140/RG.2.2.10973.69605/1.
- [27] F. S. Hillier and G. J. Lieberman, *Introduction to operations research*. McGraw-Hill Higher Education, 2010.
- [28] R. Gomory, "An Algorithm for the Mixed Integer Problem," Jun. 1960.
- [29] A. H. Land and A. G. Doig, "An Automatic Method of Solving Discrete Programming Problems," *Econometrica*, vol. 28, no. 3, pp. 497–520, Jul. 1960, doi: 10.2307/1910129.
- [30] E. Balas, "An Additive Algorithm for Solving Linear Programs with Zero-One Variables," *Oper Res*, vol. 13, no. 4, pp. 517–546, Aug. 1965, doi: 10.1287/opre.13.4.517.
- [31] R. Bellman, "The theory of dynamic programming," *Bulletin of the American Mathematical Society*, vol. 60, no. 6, pp. 503–515, 1954.
- [32] A. J. van Staden, J. Zhang, and X. Xia, "A model predictive control strategy for load shifting in a water pumping scheme with maximum demand charges," in *2009 IEEE Bucharest PowerTech*, IEEE, Jun. 2009, pp. 1–7. doi: 10.1109/PTC.2009.5282271.
- [33] M. López-Ibáñez, T. D. Prasad, and B. Paechter, "Ant Colony Optimization for Optimal Control of Pumps in Water Distribution Networks," *J Water Resour Plan Manag*, vol. 134, no. 4, pp. 337–346, Jul. 2008, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9496(2008)134:4(337).
- [34] D. A. Savic, G. A. Walters, and M. Schwab, "Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply," 1997, pp. 227–235. doi: 10.1007/BFb0027177.
- [35] H. AL-SANABANİ, M. İSKEFİYELİ, K. YARALI, H. KÜÇÜK, and M. TURAN, "Çok aşamalı su terfi istasyonlarının enerji maliyeti yönünden optimum işletimi için yeni bir yaklaşım," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 39, no. 2, pp. 1179–1192, Nov. 2023, doi: 10.17341/gazimmfd.1160729.
- [36] Y. Gong and J. Cheng, "Optimization of Cascade Pumping Stations' Operations Based on Head Decomposition–Dynamic Programming Aggregation Method Considering Water Level Requirements," *J Water Resour Plan Manag*, vol. 144, no. 7, p. 04018034, Jul. 2018, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000952.
- [37] Y. Gong and J. Cheng, "Combinatorial Optimization Method for Operation of Pumping Station with Adjustable Blade and Variable Speed Based on Experimental Optimization of Subsystem," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 6, p. 283520, Jan. 2014, doi: 10.1155/2014/283520.

- [38] H. Cheng *et al.*, “Optimization of Pressurized Tree-Type Water Distribution Network Using the Improved Decomposition–Dynamic Programming Aggregation Algorithm,” *Water (Basel)*, vol. 11, no. 7, p. 1391, Jul. 2019, doi: 10.3390/w11071391.
- [39] Z. Zhang, X. Lei, Y. Tian, L. Wang, H. Wang, and K. Su, “Optimized Scheduling of Cascade Pumping Stations in Open-Channel Water Transfer Systems Based on Station Skipping,” *J Water Resour Plan Manag*, vol. 145, no. 7, p. 05019011, Jul. 2019, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0001080.
- [40] X. Feng, B. Qiu, and Y. Wang, “Optimizing Parallel Pumping Station Operations in an Open-Channel Water Transfer System Using an Efficient Hybrid Algorithm,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 18, p. 4626, Sep. 2020, doi: 10.3390/en13184626.
- [41] P. Wu, Z. Lai, D. Wu, and L. Wang, “Optimization Research of Parallel Pump System for Improving Energy Efficiency,” *J Water Resour Plan Manag*, vol. 141, no. 8, Aug. 2015, doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000493.
- [42] H. Oh, I. Guk, S. Chung, and Y. Lee, “Energy saving through modifications of the parallel pump schedule at a pumping station: A case study,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 54, p. 104035, Aug. 2023, doi: 10.1016/j.jwpe.2023.104035.
- [43] X. Zhuan and X. Xia, “Optimal operation scheduling of a pumping station with multiple pumps,” *Appl Energy*, vol. 104, pp. 250–257, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.10.028.
- [44] P. Olszewski and J. Arafeh, “Parametric analysis of pumping station with parallel-configured centrifugal pumps towards self-learning applications,” *Appl Energy*, vol. 231, pp. 1146–1158, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.09.173.

## ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hussein AL-SANABANI

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2012, Tamar University, Bilgisayar Bilimleri ve Bilgi sistemi Fakültesi, Bilgi Teknolojisi
- **Yükseklisans** : 2016, Sakarya University, Bilgisayar Ve Bilişim Mühendisliği Anabilim Dalı, Bilgisayar Ve Bilişim Mühendisliği

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2012-2013 yılları arasında Tamar Üniversitesi'nde bir yıl öğretim görevlisi olarak çalıştım.
- 2016 Türk Patent'ten "Zaman Kavramını Daha İyi Anlatan Saat" isimli patenti (2016/08115) numarasıyla tescil edilmiştir.
- 2015-2016, Yüksek Lisans derecesi projesi olarak Veri Kaybını Önleme (DLP) Sistemi kurmak.
- 2017'den itibaren Natura Otomasyon & Yazılım Sistemleri firmasında yazılımcı olarak çalışmaktayım.

### TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- AL-SANABANI, H., İSKEFİYELİ, YARALI, M. K., KÜÇÜK, H. Ve TURAN, M. 2023. Çok aşamalı su terfi istasyonlarının enerji maliyeti yönünden optimum işletimi için yeni bir yaklaşım, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, vol. 39, no. 2, pp. 1179–1192.
- KÜÇÜK, H. Ve TURAN, M., AL-SANABANI, YARALI, M. H., İSKEFİYELİ, K., 2021. Su terfi istasyonlarının yük kaydırmalı işletimi için yeni bir algoritma, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, vol. 36, no. 4, pp. 2081–2094.

## YAYINLARIM :

- 2023 Çok aşamalı su terfi istasyonlarının enerji maliyeti yönünden optimum işletimi için yeni bir yaklaşım, (*Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*).
- 2022 A Serendipity-Oriented Personalized Trip Recommendation Model, (*Electronics Journal*).
- 2021 Understanding the Classification of Data Mining and Web Mining (*International Journal of Applied Information Systems (IJ AIS)*).
- 2021 Su terfi istasyonlarının yük kaydırmalı işletimi için yeni bir algoritma, (*Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*).
- 2021 Hybrid fuzzy-genetic algorithm to automated discovery of prediction rules, (*Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*).
- 2020 A DLP Module Design Based on Plug-in for MS Word, (*Sakarya University Journal of Science*).
- 2019 The Performance Comparison of Lightweight Encryption Algorithms, (*Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*).
- 2019 Analyzing Pipe Production Fault Rates by Association Rules and Classification According to Working Conditions and Employee Characteristics, (*Industrial Engineering in the Big Data Era*).