

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**İÇME SUYU TERFİ İSTASYONLARININ ENERJİ
VERİMLİ İŞLETİMİ İÇİN BİR TASARIM**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hayri KÜÇÜK

**Enstitü Anabilim Dalı : ELEKTRİK-ELEKTRONİK
MÜHENDİSLİĞİ**
Tez Danışmanı : Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TURAN

Temmuz 2020

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Hayri KÜÇÜK

22.07.2020

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TURAN'a, çalışma arkadaşlarım Kadir Yaralı ve Hussein ALASANABANI'ye teşekkürlerimi sunarım.

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

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

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER ...	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	v
ŞEKİLLER LİSTESİ	vi
TABLolar LİSTESİ	vii
ÖZET	viii
SUMMARY	ix

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.2. Motivasyon	2
1.3. Hedef	3
1.4. Çalışma Yapısı	4

BÖLÜM 2.

SU DAĞITIM SİSTEMLERİNİN GELİŞİMİ	5
2.1. Eski Dönem Su Dağıtım Sistemleri	5
2.2. Eski Dönem Su Yükseltme Cihazları	7
2.2.1. Shaduf	8
2.2.2. Mohte	9
2.2.3. Su çarkları	9
2.2.4. Su vidası	11
2.2.5. Kuvvet ve zincir pompası	12
2.2.6. Santrifüj pompası	14
2.2.7. Sürgülü kanatlı pompa	15

2.2.8. Dişli pompası	16
2.2.9. Vakumlu pompalar	16
2.3. Modern Dönem Su Yükseltme Cihazları	17

BÖLÜM 3.

SU POMPALAMA MALİYETİNİN DÜŞÜRÜLMESİ	19
3.1. Sistem Tasarımı	19
3.1.1. Depo	19
3.1.2. Pompalar	19
3.1.3. Borular	20
3.2. Bakım	20
3.3. Depo Taşmaları	21
3.4. Kayıp Kaçaklar	21
3.5. Verimli Pompalar	21
3.6. Değişken Hızlı Sürücüler	22
3.7. İzleme ve Kontrol	22
3.8. Enerji Tarifeleri	23

BÖLÜM 4.

UZAKTAN İZLEME ve KONTROL	24
4.1. İşletme Kolaylığı	25
4.2. Bakım Kolaylığı	25
4.3. Arıza ve Kayıp Kaçak Tespiti	25
4.4. Hizmet Kalitesi	26
4.5. Enerji Tasarrufu	26
4.6. Enerji Tarifeleri	26

BÖLÜM 5.

ÖNERİLEN YÖNTEM	28
5.1. Problemin Modellenmesi	28
5.2. Geliştirilen Algoritma	30

BÖLÜM 6.

SDPA’NIN ÇALIŞMA ALANINA UYGULANMASI	34
6.1. Çalışma Alanı	34
6.2. Mevcut Su Seviyesi Kontrol (WLC) Yöntemi	36
6.3. SDPA’nın Uygulanması	37
6.4. SDPA ve WLC’nin Karşılaştırılması	38

BÖLÜM 7.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER	41
KAYNAKLAR	42
ÖZGEÇMİŞ	47

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

ASD	: Adjustable Speed Drive, Ayarlanabilir Hızlı Sürücü
ESKİ	: Eskişehir Su ve Kanalizasyon İdaresi
M.Ö.	: Milattan Önce
M.S.	: Milattan Sonra
PLC	: Programmable Logic Controller
RTU	: Remote Terminal Unit, Uzaktan Yönetim Birimi
SASKİ	: Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi
SDPA	: Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması
SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
TOU	: Time-of-Use, Kullanım Zamanı
VFD	: Variable Frequency Drive, Değişken Frekans Sürücüsü
WLC	: Water Level Control, Su Seviye Kontrolü

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Yağmur sularının toplanması için kullanılan kil borular [1].	5
Şekil 2.2. Su taşıyıcısı [2].	6
Şekil 2.3. Shaduf (Shooduf) [23].	8
Şekil 2.4. Mohte, kasnak ve hayvan gücü kullanılan sistem [24].	9
Şekil 2.5. Fars su çarkı (Raha) [24].	10
Şekil 2.6. Tarihi Çark, Sakarya, 1901 [26].	11
Şekil 2.7. Tarihi Çark, Sakarya, 2010 [25].	11
Şekil 2.8. Modern haliyle Arşimet pompalar, Saki Karaman AAT [28].	12
Şekil 2.9. Kuvvet pompası [29].	13
Şekil 2.10. Zincir pompası [32].	14
Şekil 2.11. Yel değirmenleri [31].	14
Şekil 2.12. Denis Papin tarafından icat edilen santrifüj pompa (1689) [34].	15
Şekil 2.13. Sürgülü kanatlı pompa çalışma prensibi [37].	16
Şekil 2.14. Dişli pompanın çalışmasının temsili [38].	16
Şekil 2.15. Vakumlu pompa [39].	17
Şekil 5.1. Sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması (SDPA).	32
Şekil 5.2. Akış diyagramı.	33
Şekil 6.1. Çalışma alanının şematik gösterimi.	34
Şekil 6.2. Zamana göre elektrik birim fiyatı.	35
Şekil 6.3. Tüketim faktörü.	36
Şekil 6.4. WLC için seviye ve pompa çalışma durumları.	37
Şekil 6.5. SDPA için seviye ve pompa çalışma durumları.	38

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 6.1. Pompalanan su miktarı ve pompalama süreleri.	39
Tablo 6.2. Elektrik maliyetleri.	40



ÖZET

Anahtar kelimeler: Optimizasyon algoritması, elektrik tarifiesi, enerji verimliliği, optimal zamanlama problemi, su dağıtım sistemi, PLC, SCADA.

Su dağıtım sistemlerinin işletilmesinde, su pompalamak için kullanılan enerjinin maliyeti en yüksek gider kalemini oluşturmaktadır. Çok zamanlı elektrik tarifiesi ve kentsel su talebi ile bağlantılı olarak, bir pompa istasyonunun optimal zamanlama problemi, bir matematik problemi olarak formüle edilir. Bu problemi çözmek için bir sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması (SDPA) elde edilmiştir. Elde edilen bu SDPA, Türkiye'nin Sakarya şehrindeki bir su dağıtım istasyonuna uygulanmıştır. SDPA'nın uygulandığı istasyonda sonuç şunu gösterir; SDPA, puant zaman periyodunun yükünü puant zaman dışı süreye önemli ölçüde kaydırabilir ve geleneksel su seviyesi kontrolüne kıyasla, mevcut şartlar altında enerji maliyetini yaklaşık %11 oranında düşürür. Fiziksel elemanlar değiştirilmediği göz önüne alındığında, bu da bize yalnızca pompalama çizelgesinin değiştirilmesiyle elde edilebilecek en iyi optimizasyon sonucunu verir.

A DESIGN FOR THE ENERGY-EFFICIENT OPERATION OF WATER PUMPING STATIONS

SUMMARY

Keywords: Optimization algorithm, electricity tariff, energy efficiency, optimal scheduling problem, water distribution system, PLC, SCADA.

The cost of energy required for pumping is the most expensive part of operating a water distribution system. With regarding Time-of-Use (TOU) electricity tariff and urban water demand, the optimal scheduling problem of one pump station is formulated as a mathematic problem. A simplified dynamic programming algorithm (SDPA) is achieved to solve this problem. The SDPA applied to the water supply station in Sakarya in Turkey. In the investigated station the result shows that the SDPA can significantly shift a load of the peak time period to the off-peak time period, which results in reducing the energy cost by about 11% compared with conventional water level control given us the best optimization result that can be achieved when physical elements are not changed.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Genel

Su, tüm canlılar için en temel ihtiyaçtır. Su kaynakları, geçmişten günümüze kadar insanların yerleşim alanlarını dahi şekillendirmişlerdir. İnsanlar, suya erişmek için ilk zamanlarda yerleşim yerlerini su kaynaklarına yakın yerlere kurarken, ilerleyen zaman içerisinde nüfus yoğunluğunun artması, yerleşim alanlarının genişlemesi sebebi ve teknolojik gelişmeler sayesinde suyu kaynağından alıp, kaynaktan uzaktaki yerleşim yerlerine yönlendirmeye başlamıştır [1], [2].

Artan dünya nüfusu ve endüstriyel gelişimlerden dolayı su talebinin yanı sıra elektrik talebi de giderek artmaktadır [3]. Günümüzde suyun bir noktadan başka bir noktaya terfi ettirilmesi için genellikle elektrikli pompalar kullanılmaktadır. Su temin sistemlerinde kullanılan elektriğin büyük çoğunluğu da terfi istasyonlarında kullanılmaktadır [4]. Elektrik ve su taleplerinin farklı zaman aralıklarında farklı miktarlarda olması, bu taleplerin karşılanmasını daha da güç hale getirmektedir. Talep artışının hızlı bir şekilde yükselmesinin sonucu olarak, elektrik ve su temin eden kurumlar farklı zamanlar için farklı fiyatlandırmalar ortaya koyabilmektedir.

Elektrik dağıtım şirketleri, enerjinin fazla tüketildiği dönemlerdeki birim fiyatı arttırmış, enerjinin az tüketildiği dönemlerdeki birim fiyatı düşürmüş ve talebin yoğun olduğu zamanlardaki yükü talebin az olduğu zamanlara kaydırmayı hedeflemişlerdir [5]. Tüketiciler ise çok zamanlı tarife kullanımına geçmeleri halinde enerji kullanım alışkanlıklarını değiştirerek, tüketimlerini elektriğin ucuz olduğu zamanlara kaydırmak sureti ile enerji maliyetlerini düşürebilirler.

1.2. Motivasyon

Su temini sistemleri ve su dağıtım ağı, endüstriyel toplumun hayati ve kritik altyapı varlıklarından birini temsil etmektedir. Dünyadaki elektrik tüketiminin yaklaşık %2 ila %3'ü su temin sistemleri için kullanılır [6]. Bu enerjinin büyük çoğunluğu da pompa istasyonlarında kullanılmaktadır [4]. Artan elektrik gücü maliyetlerinden dolayı, pompalama sistemlerinin enerji talebini ve enerji maliyetlerini azaltmak için daha verimli sistem işletim uygulamalarının ve tasarımlarının, operatörler ve tasarımcılar tarafından daha fazla dikkate alınmasına neden olmaktadır [7]. Bu nedenle, pompalama çizelgesini optimize etmek fark edilir bir enerji tasarrufu sağlayabilir [6].

Fiziksel unsurların değişmediği su tedarik sisteminde enerji maliyeti, elektrik tüketimi ve elektrik fiyat yapısı ile ilgilidir. Bu nedenle, su temin sistemlerindeki işletme enerji maliyetinin nasıl en aza indirileceği çok önemlidir [8]. Akademik araştırmalara göre enerji verimliliğinde temel iyileştirmeler pompaların verimli çalıştırılması ile elde edilebilir [9]–[11]. Bununla birlikte, çok zamanlı elektrik tarifi kullanıldığında, yükü puant zaman periyodundan geceye kaydırmak mümkündür ve böylece enerji maliyeti azalır [12], [13].

Bireysel elektrik kullanıcıları, çok zamanlı elektrik tarifelerine geçtiklerinde günlük yaşantılarını bu tarifeye ayak uyduracak şekilde ayarladıklarında kazanç elde etmiş olurlar. Pahalı zamanda yapmak zorunda olmadıkları tüketimleri ucuz zamana kaydırarak enerji maliyetlerini düşürebilirler. Ancak, su temin sistemleri gibi büyük ve başka kullanıcılara hizmet sağlayan kurumlar için bu çok kolay sağlanabilecek bir durum değildir. Kurumlar yükü ucuz tarife zamanına kaydırmayı hedeflerken, müşterilerine sundukları hizmetin de kesintiye uğramamasını, hizmet kalitesinin düşmemesini sağlamak zorundadırlar. Dolayısıyla su sistemlerinde çoklu enerji tarifelerinin fiyat farklarından yararlanarak enerji tasarrufu sağlamak için verilen hizmeti kesintiye uğratabilecek veya hizmet kalitesini düşürecek kısıtlar göz önünde bulundurularak optimum bir çözüm üretmek gerekmektedir.

1.3. Hedef

İçme suyu terfi sistemlerinde enerji optimizasyonuna yönelik birçok yöntem denenmekte ve kullanılmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, içme suyu terfi sistemlerinde, herhangi bir yapısal değişiklik yapmadan, sadece pompaların enerji tarifi ve su talep rejimi göz önünde tutularak optimum çalıştırılmasıyla enerji tasarrufu sağlamaktır. Bu çalışmada, Sakarya ilindeki bir içme suyu pompalama istasyonuna ait pompalama sistemi optimize edilerek, Sakarya içme suyu dağıtım sistemindeki su pompalama ile ilgili finansal maliyetlerin azaltılması olasılığı değerlendirilecektir.

Dünyanın birçok noktasında çok zamanlı tarifeler kullanılmaktadır. Ülkemizde de tek ve üç zamanlı olarak iki farklı elektrik tarifi kullanılmaktadır. Üç zamanlı elektrik kullanım tarifesinde (gündüz, puant, gece) kullanıcılardan, en yüksek elektrik talebi için (puant zamanında) en yüksek birim ücret talep edilirken, en düşük elektrik talebi için (gece zamanında) en düşük birim ücret talep edilir. Enerji ihtiyaçlarının yoğun olmayan saatlere kaydırılmasıyla su tedarik sisteminin maliyet tasarrufu sağlanması mümkün olabilir. Yüksekte bulunan su depolarındaki depolanan suyun stratejik olarak kullanılması, en pahalı tarifiede pompaların kapatılması ve pompalama zamanının kaydırılmasını mümkün kılar. Ayrıca teorik olarak, yüksekte bulunan bu depolar yeterince büyük tasarlanarak, maliyetleri en aza indirmek için sadece yoğun olmayan saatlerde doldurulup, tüm zamanlarda su tedarik edebilir [13].

Bu çalışmanın odağı, Sakarya şehrindeki içme suyu sistemine ait yüksekteki mevcut su depolama alanlarını kullanarak, mevcut ekipmanlar ve fiziksel şartlar için herhangi bir iyileştirme yapmadan, üç zamanlı elektrik tarifesinin birim fiyat farklarından da yararlanarak, su pompalarının çalışma zamanlarının değiştirilmesiyle içme suyu terfi istasyonlarında sağlanabilecek enerji tasarrufu miktarını belirlemektir.

1.4. Çalışma Yapısı

Bu tez aşağıdaki açıklanan bölümlere göre düzenlenmiştir.

- BÖLÜM 2: Su dağıtım sistemleri, su yükseltme cihazları ve tarihsel gelişimleri hakkında bilgiler verilmiştir.
- BÖLÜM 3: Su dağıtım sistemlerinde pompalama maliyetlerinin azaltılmasına yönelik yapılabilecek faaliyetlerden bahsedilmiştir.
- BÖLÜM 4: Su dağıtım sistemlerinin uzaktan izlenmesi ve kontrol edilmesinin faydalarından bazıları anlatılmıştır.
- BÖLÜM 5: Optimal zamanlama problemi modellenmiş ve bu problemi çözmek için geliştirilen SDPA'nın tanıtımı yapılmıştır.
- BÖLÜM 6: Belirlenen çalışma alanının mevcut durumu açıklanmış ve çalışma alanına uygulanan SDPA'nın performansı mevcutta kullanılan WLC yöntemi ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir.
- BÖLÜM 7: Sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

BÖLÜM 2. SU DAĞITIM SİSTEMLERİNİN GELİŞİMİ

2.1. Eski Dönem Su Dağıtım Sistemleri

İnsanlar suyu kaynağından uzak yerleşim bölgelerine aktararak su ihtiyaçlarını karşılamak için binlerce yıldır çeşitli uygulamalar ve yöntemler geliştirmiştir. Kentsel su dağıtım sistemlerinin tarihi, M.Ö. üçüncü binyılın ortalarına kadar dayanmaktadır. M.Ö. 2000 yıllarında kullanılan pişmiş topraktan (kil) yapılan su borularından (Şekil 2.1.), günümüzün karmaşık hidrolik modellerine kadar, su dağıtım teknolojisinin tarihi oldukça uzun bir serüvendir [1].



Şekil 2.1. Yağmur sularının toplanması için kullanılan kil borular [1].

Romalılar tarafından (yaklaşık M.Ö. 100 ila M.Ö. 500) su dağıtım sistemleri oldukça geliştirilmiştir. Bir kaynaktan şehirlere su taşıyan, Roma dönemine ait 100km'den fazla uzunluğa sahip su kemerleri bulunmaktadır. Romalılar, Kuzey Avrupa'da yaygın olan pişmiş toprak borulara alternatif olarak ahşap borular da kullanmışlardır. Roma

dönemine ait su dağıtım yapılarının dayanıklılığı, bazılarının modern zamanlara kadar çalışması sebebiyle dikkat çekicidir [14].

Roma İmparatorluğu'nun M.S. beşinci yüzyıldaki çöküşünden sonra, su yönetimi hakkındaki bilgiler tamamen unutulmasa dahi, su yönetim uygulamalarının kalitesinde bir düşüş olduğu kabul edilmektedir [15], [16]. Özellikle Avrupa'da, kaynaklardaki kirli su ve sokaklardaki atık da dahil olmak üzere sağlık koşullarında yaşanan bu kötü düşüş rapor edilmektedir. Su temini, insanların kendileri veya hizmetçileri ya da su satma ve dağıtma işi yapan su taşıyıcıları tarafından evlere getirildiği merkezi bir teslimat noktasından sağlanmıştır (Şekil 2.2.).



Şekil 2.2. Su taşıyıcısı [2].

Su yönetimi uygulamalarının yeniden gelişmeye başlaması ancak Rönesans'tan (14. ve 17. yüzyıllar) sonra olmuştur. Boru için demir dökümü 1455'te pratik hale gelir ve Almanya'nın Siegerland şehrinde üretilen ilk dökme demir boru montajı Dillenburg Kalesi'nde gerçekleşir. Muhtemelen ilk büyük boru hattı, 1664'te tamamlanan Marly-on-Seine'den Fransa'daki Versay Sarayı'na 25 km'lik bir hattır. 1700'lü yılların

ortalarında, Londra'da ahşap, dökme demir ve kurşun borulardan yapılmış 50 km'den fazla bir uzunlukta su şebekesi vardı [17]. Amerika Birleşik Devletleri'nde, ilk borulu su temini 1652'de Boston'da kullanılmış ve su, kaynaklardan ve kuyulardan Quincy pazar bölgesinin yakınına getirilmiştir [18].

İnsanlar, yerleşim yerlerine göre daha yüksekte bulunan su kaynaklarından aldıkları suyu, açık veya kapalı kanallar, borular kullanarak oluşturdıkları su dağıtım sistemleri ile kolay bir şekilde yerleşim yerlerine ulaştırabiliyorlardı. Su kaynaklarının yerleşim yerlerinden daha düşük kotlar da bulunması durumunda insanların suyu daha yüksek noktalara terfi ettirmeleri gerekmektedir.

2.2. Eski Dönem Su Yükseltme Cihazları

Antik medeniyetlerde (Mezopotamya, Mısır vb.) insanlar yaşadıkları şehirleri, ihtiyaç duydukları suya kolay ulaşabildikleri göllere, nehirlerle ve düşük deniz seviyelerine yakın yerlere kurmuşlardır. Bunun aksine, bazı önemli Helenistik dönem Yunan uygarlıklarında kentler, su mevcudiyeti düşük olan bölgelerde kurulmuştur [19]. Çeşitli güvenlik nedenleri (düşük deniz seviyesindeki verimli toprakların işgalinin kolaylığı gibi) ve su ile ilgili hastalıklardan korunarak hayatta kalma olasılıklarını arttırmak (yüksekte bulunan yerleşim noktalarından kanalizasyon tahliyesinin kolaylığı), su mevcudiyetinin düşük olduğu bölgelere yerleşmeye sebep olarak gösterilebilir [20]. Bu faktörlerle suyun mevcudiyetinin sınırlandırılması neticesinde, insanlar geçmişten günümüze kadar, suyun tasarruflu kullanılması ve bulunduğu noktadan daha yüksek bir noktaya taşınması için çeşitli ekipman ve sistemler geliştirmiştir.

Su kaynağına göre daha düşük rakımlı yerleşim yerlerine suyun taşınması uygun kanallar ve borulardan oluşan hatlarla kolayca sağlanabilirken, yüksek rakımlı bölgelerde suyun kullanılabilirliğini sağlamak için enerji harcaması gerekiyordu. Elektrik enerjisi ve fosil yakıtlardan gelen enerji bilinmediği için, elle çalıştırılan mekanik cihazlar veya rüzgar gibi doğal kuvvetler tarafından tahrik edilen cihazlar icat

edilmeliydi. Bu tür su kaldırma cihazları tarih öncesi zamanlardan itibaren icat edilmekte ve geliştirilmektedir [21].

2.2.1. Shaduf

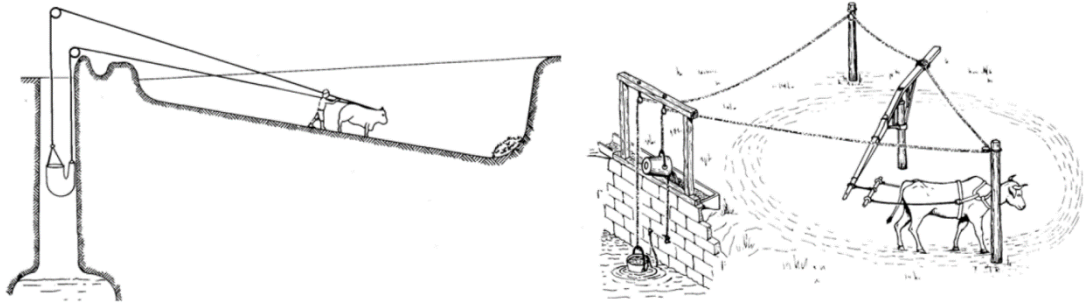
Shaduf (Shadoof) çeşitli eski uygarlıklarda su kaldırmak için kullanılan ilk cihazlardan biri olarak bilinir. Mezopotamyalıların M.Ö. 3000 civarında shaduf kullanarak su kaldırdıkları biliniyordu [22]. Bir kuyudan, nehirden, sarnıçtan veya kanaldan su kaldırmak için kullanılan ahşap, elle çalışan bir cihazdır. En yaygın haliyle, bir tahterevalli gibi monte edilen uzun, konik, neredeyse yatay bir ahşap koldan oluşur (Şekil 2.3.). Kolun bir ucunda ip ile aşağı sarkıtılmış bir kova, diğer tarafında karşı dengeyi sağlayacak bir ağırlık vardır. Operatör uzun uca tutturulmuş ipi aşağı çeker, kabı doldurur ve karşı ağırlığın dolu kabı kaldırmasına izin verir. Sistem daha sonra derin kuyulardan su alınması için bir kasnak ve hayvan çekişinin eklenmesi ile iyileştirilmiştir. Günümüzde halen içme suyu sağlamak ve kuyulara yakın küçük arazileri sulamak için yaygın olarak kullanılmaktadır [21], [23].



Şekil 2.3. Shaduf (Shooduf) [23].

2.2.2. Mohte

Suyu kaldırmak için hayvanları kullanmanın orijinal yöntemi mohte adı verilen bir cihazdı (Şekil 2.4.). Burada, hayvanlar kuyu veya su kaynağından uzakta, yokuş aşağı, düz bir çizgide yürürken, bir torba veya kap vasıtası ile suyu yukarıya çeker. Diğer bir mohte versiyonunda hayvanlar dairesel bir hareket yaparak sürekli olarak ilerlemesi sağlanmış ve ilk versiyonuna göre hayvan enerjisi daha verimli kullanılmıştır.

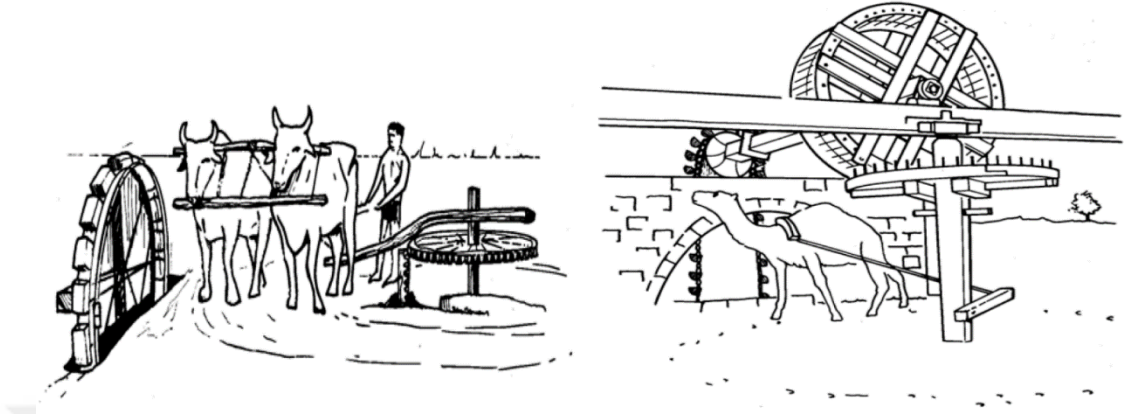


Şekil 2.4. Mohte, kasnak ve hayvan gücü kullanılan sistem [24].

2.2.3. Su çarkları

Farşlıların kullandığı su çarkı (Raha), mohte sistemi üzerinde yapılan büyük bir iyileştirmedir (Şekil 2.5.). Raha'da kova zinciri su çarkı tahrik miline neredeyse sabit bir yük uygular. Farşlıların kullandığı su çarkları genellikle bir tür dik açılı tahrik ile sürülür. Tahrik mili ikincil dişliye gömülüdür ve hayvan yürüyerek etrafında dolaşır. Bunun avantajı suyun kaldırıldığı yüksekliği en aza indirmek için Fars çarkı mümkün olduğu kadar düşük tutulabilir. İkinci örnek, yatay şaftın altından geçen hayvana dayanan geleneksel bir ahşap Fars çarkı mekanizmasıdır. Bir Fars çarkının dişlisi neredeyse sabit bir yük taşır; böylece hayvan rahat bir tempo ile hareket eder ve daha az denetime ihtiyaç duyar. Raha'nın avantajları; nispeten ucuz olan geleneksel bir teknolojiye dayanıyor olması, yerel olarak inşa edilebilir ve bakım yapılabilir olması, 7,5 m'nin altındaki derinliklerde en verimli olmasına ve 9 m'lik asansörlerde yaklaşık 160-170 L/dk su vermesine rağmen 20 m'ye kadar su kaldırılabilir olması, kullanımının kolay olması ve orta düzeyde verimliliğe (%40 - %70) sahip olmasıdır. Bu cihazların dezavantajları, suyun toplama kanalına düşmeden önce deşarj noktasının

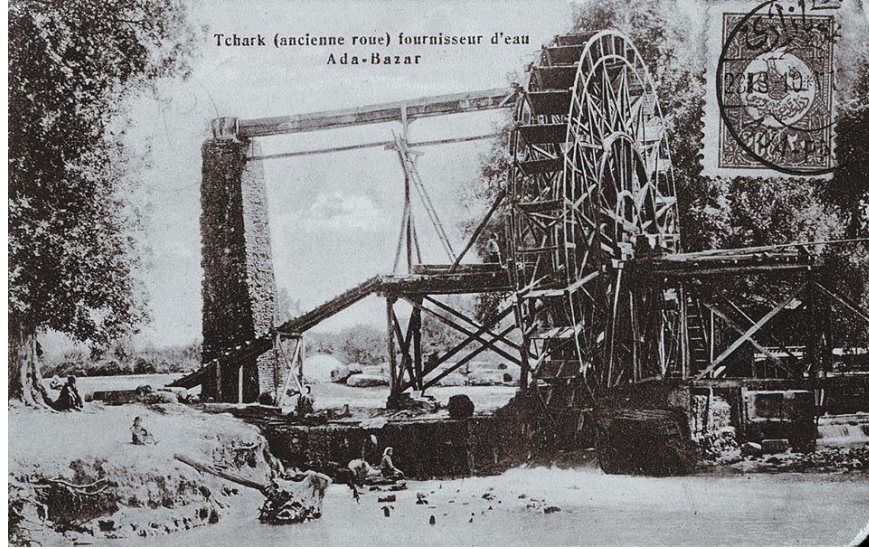
üzerine kadar çıkarılması ve sulama gerekmeyen yağmurlu zamanlarda dahi hayvanların yıl boyunca bakımlarının yapılması ve korunması gerektiğidir [24].



Şekil 2.5. Fars su çarkı (Raha) [24].

Mısırlıların kullandığı su çarkının (noria) ilk dikey (yatay eksenli) su çarkı olduğu düşünülmektedir. Su akışı ile çalışan ve yakındaki arazileri sulamak için su kaldıran kovalarla donatılmış ahşap bir tekerlektir [18]. Fars su çarkı ile kıyasladığımızda, Mısır su çarkının çalışması için insan veya hayvan gücüne ihtiyaç duyulmaz. Çark akan bir su kaynağının üzerine konularak, suyun akış gücünün çarkı döndürmesi sağlanır. Akan su kaynaklarında Fars çarkına göre çok daha verimli bir sistem olması yanında dezavantaj olarak da durgun su kaynaklarında kullanılamaz olması gösterilebilir.

Sakarya şehrinin simgelerinden Tarihi Çark, bir Mısır su çarkına örnek olarak gösterilebilir. Osmanlı İmparatorluğu zamanında (1581-1585) Ada Karyesinin ihtiyacına yönelik bir değirmen olarak yapılır. Yaklaşık 250 yıla yakın hizmet veren bu değirmen yerine, 1734 yılında hayırsever Devoğlu Mustafa tarafından bir çark yapılarak Çark suyu Orta Camii çeşmesine ve Adapazarı'na içme suyu olarak taşınır. 1901 yılına ait kartpostaldan elde edilen görüntüsünden esinlenerek (Şekil 2.6.), Sakarya Büyükşehir Belediyesi tarafından 2010 yılında yeniden inşa edilmiştir (Şekil 2.7.). Kent Park'ın içerisinde yapılan Tarihi Çark, tamamen ahşaptan ve hiç metal bağlantı elemanı kullanılmadan imal edilmiştir ve çalışır durumdadır [25], [26].



Şekil 2.6. Tarihi Çark, Sakarya, 1901 [26].



Şekil 2.7. Tarihi Çark, Sakarya, 2010 [25].

2.2.4. Su vidası

Su vidası (vidalı pompa), alçak bir su kütlesinden sulama kanallarına su aktarmak için kullanılan bir makinedir. Su, borunun içinde vida şeklindeki bir yüzeyin döndürülmesiyle pompalanır. Vidalı pompa (Arşimet vidası, Mısır vidası) en eski pozitif deplasmanlı pompadır. Su vidası, yaygın olarak Arşimet'e atfedilir ve Arşimet vidası olarak bilinir ancak bu pompanın ilk kayıtları M.Ö. 3. yüzyıldan önce Eski

Mısır'a kadar uzanır. Nil'den su temin etmek için kullanılan Mısır vidası, bir silindirin etrafına sarılmış tüplerden oluşuyordu; silindir döndükçe, spiral boru içinde su daha yüksek seviyeye kaldırılır [2], [24], [27].

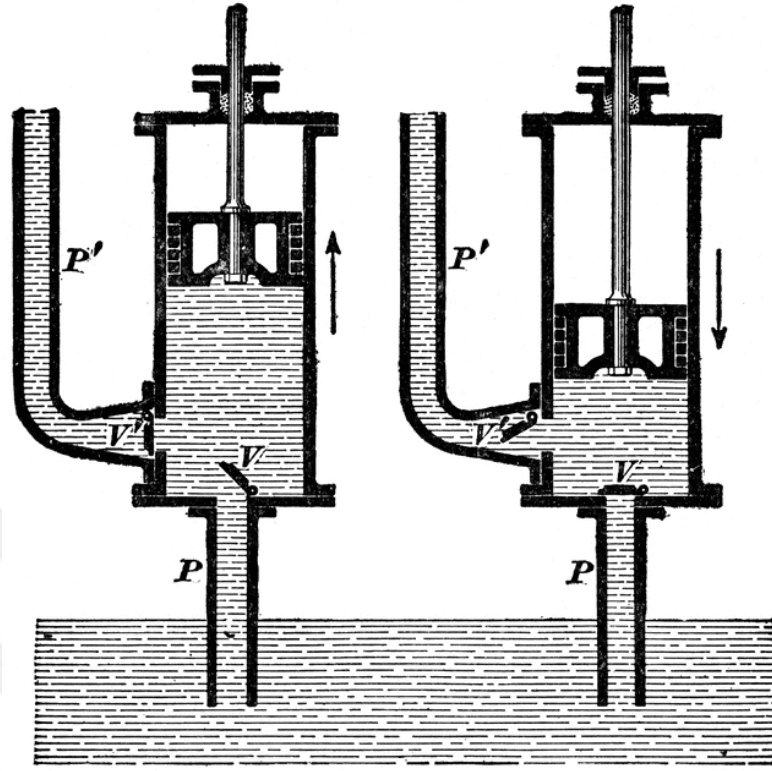
Günümüzde genellikle, ufak partiküllerden oluşan maddeler (tahıl vb.) ve atık su arıtma tesislerindeki kanalizasyonun (pompa kanalizasyonla gelen katı pisliklerden etkilenmediğinden) pompalanmasında etkin olarak kullanılmaktadır. Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresine ait Karaman atık su arıtma tesisinde kullanılan, 5400 m³/saat atık su terfi ettirme kapasitesine sahip modern haliyle Arşimet'in su vidaları Şekil 2.8.'de gösterilmiştir [28].



Şekil 2.8. Modern haliyle Arşimet pompalar, Saski Karaman AAT [28].

2.2.5. Kuvvet ve zincir pompası

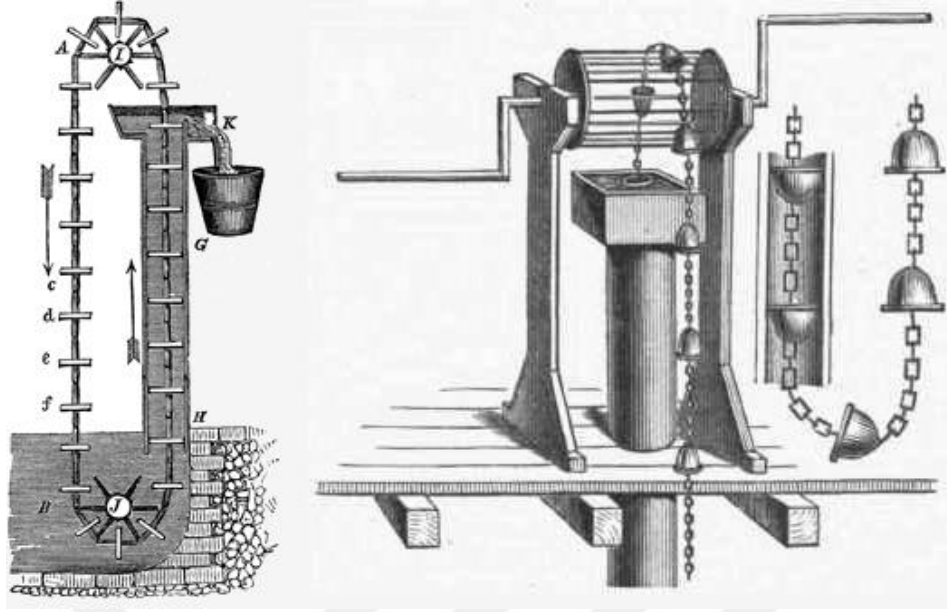
Kuvvet pompası (Şekil 2.9.), emme-basma tulumba olarak tabir ettiğimiz su pompalama mekanizmasıdır. Kuvvet pompası, M.Ö. 285-222 arasında, İskenderiye mühendisi Ktesibios (veya Tesibius) tarafından icat edilmiştir. Bu pompa, tek bir kolun karşıt uçlarına tutturulmuş bağlantı çubukları vasıtasıyla hareket ettirilen pistonlu iki silindirden oluşur ve kolun aşağı yukarı sürekli hareketi ile oluşturulan basınç ile su yükseğe çıkartılır [27].



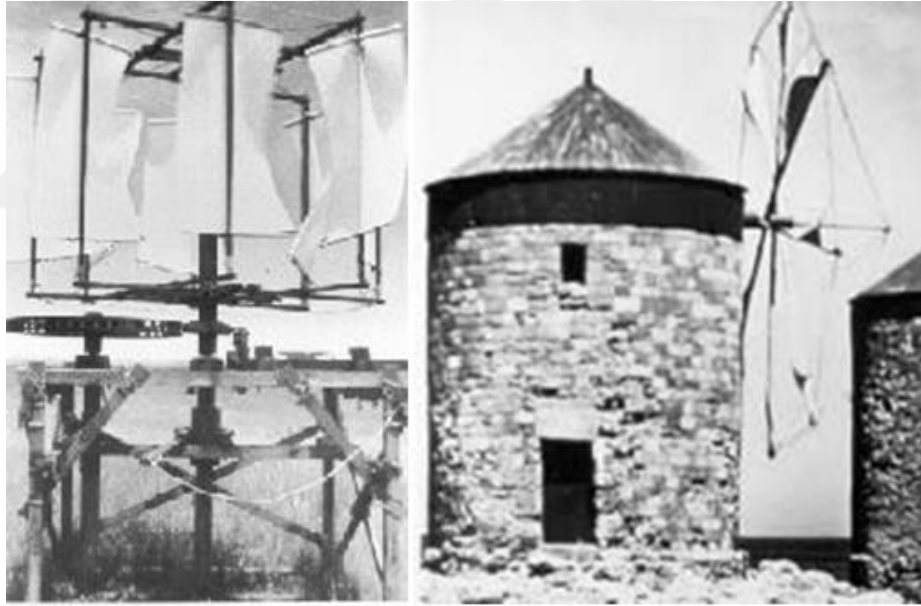
Şekil 2.9. Kuvvet pompası [29].

Zincir pompalarının tarihi M.Ö. 700'lü yıllara kadar dayanmaktadır. Zincir pompalar eski Orta Doğu, Avrupa, Çin'de yüzyıllardır kullanılmıştır. Zincir pompa (Şekil 2.10.), dairesel dişlerin sonsuz zincir üzerinde konumlandırıldığı bir su pompası türüdür. Zincirin bir kısmı suya daldırılır ve zincir, disklerin çapından biraz daha büyük bir borudan geçer. Zincir tüp içerisinden çekilirken, diskler arasında su sıkışır ve üst tarafa kaldırılır.

Bu pompalar; manuel ayak pedalları, hidrolik su çarkları veya hayvanlar tarafından çekilen döner mekanik su çarkları ile güçlendirilmiştir. Çin'de ejderha omurgaları olarak anılıyordu ve 13. yüzyıldan itibaren Çinliler, kare palet zincir pompalarına güç vermek için (Orta Doğu'dan alınan) yel değirmenlerini (Şekil 2.11.) de kullanmışlardır [30], [31].



Şekil 2.10. Zincir pompası [32].

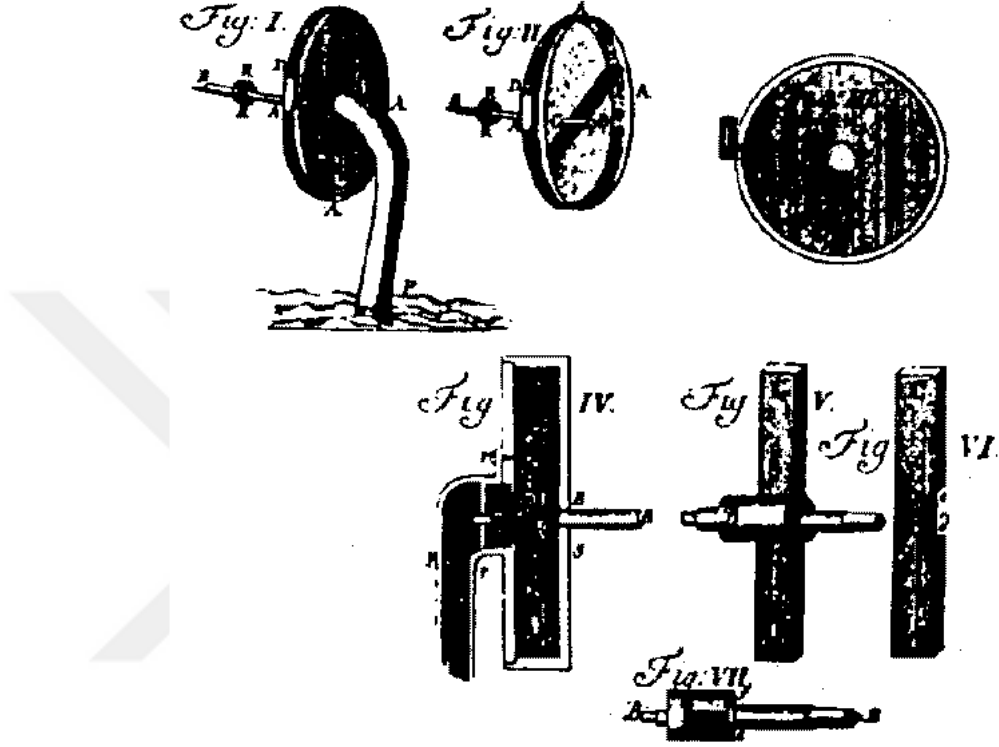


Şekil 2.11. Yel değirmenleri [31].

2.2.6. Santrifüj pompası

Santrifüj pompa olarak tanımlanabilen ilk makine, İtalyan Rönesans mühendisi Francesco di Giorgio Martini'nin yaptığı bir incelemede bahsettiği, 1475 gibi erken bir zamanda ortaya çıkan bir çamur kaldırma makinesiydi [33]. Fransız mucit Denis Papin, 1687 yılında yerel drenaj için kullanılan düz kanatlı ilk gerçek santrifüj

pompayı (Şekil 2.12.) geliştirdi. Santrifüj pompalar genel olarak, çark adı verilen bir dizi döner kanattan teşkil edilmektedir. Döner kanatlar, tipik olarak bir mahfaza içerisinde bulunur ve santrifüj kuvvetiyle sıvıyı hareket ettirmek için kullanılır. Akışkan, pervaneden geçerken hem hız hem de basınç kazanır [34].



Şekil 2.12. Denis Papin tarafından icat edilen santrifüj pompa (1689) [34].

2.2.7. Sürgülü kanatlı pompa

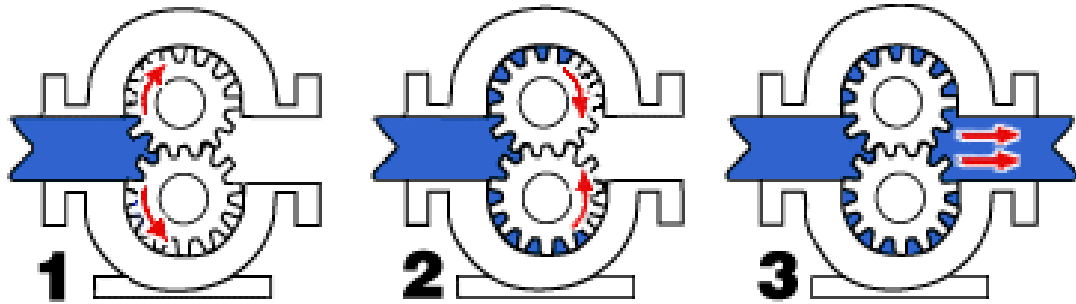
Sürgülü kanatlı pompa, 1580'de Agostino Ramelli tarafından icat edilmiştir [35]. Kanatlı pompalarda, dönen bir şaft içine yerleştirilmiş birkaç sürgülü kanat bulunur. Sürgülü kanatlı pompanın çalışması Şekil 2.13.'te temsil edilmiştir. Şaft dönerken santrifüj kuvvet kanatları dışa çekerek akışkanın girmesine olanak veren boşluğu yaratır. Kanatlar arasında hapsedilen akışkan boşaltma ucuna iletilir [36].



Şekil 2.13. Sürgülü kanatlı pompa çalışma prensibi [37].

2.2.8. Dişli pompası

1636'da Alman bir mühendis olan Pappenheim, hala motorları yağlamak için kullanılan çift derin dişli döner dişli pompayı icat etti. Bu dişli pompa, Ramelli tarafından kullanılan sürgülü kanatlı pompalardan vazgeçilmesini sağladı. Pappenheim, makinesini bir akarsu tarafından harekete geçirilen bir su çarkı ile sürdü ve su çeşmelerini beslemek için kullanıldı. İmparator II. Ferdinand bu buluşla ilgili olarak ona patente eşdeğer bir imtiyaz verdi [35]. Dişli pompanın çalışması Şekil 2.14.'te gösterilmiştir.

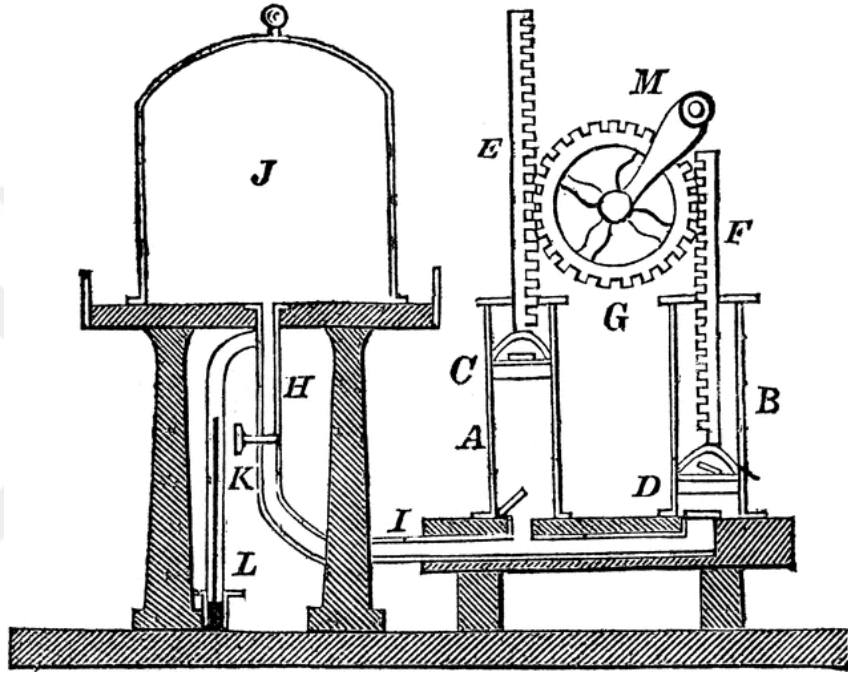


Şekil 2.14. Dişli pompanın çalışmasının temsili [38].

2.2.9. Vakumlu pompalar

Ktesivius tarafından icat edilen pistonlu pompa daha sonra birçok kişi tarafından geliştirildi. Pompa tutarlı bir şekilde suyu kaldırabilme avantajına sahip ve dağıtım borusu, hidrostatik basınca dayanabiliyordu. Ancak, önemli dezavantajları vardı. İlk

olarak, pompalama mekanizması suya batırılmalıdır ve ikincisi, su seviyesi düşerse, silindir dolmayacaktır. Bu problem, pompanın girişinde bir emme borusu kullanılarak çözülebilirdi. Emme borusu, pompanın suyun üzerine yerleştirilmesine izin vermekle birlikte, su seviyesindeki değişikliklerden de etkilenmezdi. Teorik olarak emme menzili, atmosfer basıncının bir su sütununu destekleyeceği yüksek kadar (10 metre) olabilir. Ancak, pratikte maksimum su kaldırma yüksekliği 7,62 metredir [24].



Şekil 2.15. Vakumlu pompa [39].

Gasparo Berti'nin vakumla ilgili ilk denemesinden birkaç yıl sonra, 1640'larda ilk vakum pompaları (Şekil 2.15.) Magdeburg'un Burgomaster'ı Otto von Guericke tarafından oluşturuldu. Bu, vakum cihazlarının tarihçesinin başladığı zamandır [40].

2.3. Modern Dönem Su Yükseltme Cihazları

Modern döneme kadar, su yükseltme, taşıma ve dağıtma ihtiyacı için çeşitli cihazlar icat edildi ve geliştirildi. Bu cihazların çalıştırılması için gereken enerji insan gücü, hayvanlar ve doğa güçlerinin (su akışı, rüzgar) kullanılmasıyla elde edildi. İlk mekanik pompalar basit olmalarının yansira aynı zamanda mevcut doğal enerji kaynaklarının kullanımına izin veren ustaca tasarlanmış cihazlardı.

Sanayi devrimi ile birlikte kimyasal ve elektrik enerjisinin kullanılması, buhar motorunun icadı, elektrik motorlarının geliştirilmesi su pompalama yöntemlerinde hızlı gelişmeler sağlanmasına katkıda bulunmuştur. Modern santrifüjlü ve deplasmanlı pompalar, mekanik çalışma prensipleri söz konusu olduğunda, eski kavram ve tasarımlardan faydalandıkları görülmektedir. Aslında ilk pompalar ile modern pompalar arasındaki temel farkın çalıştırılmaları için gereken enerjiyi sağlama biçimleri olduğunu söyleyebiliriz [24].

Sanayi devriminin başlarında buharlı makinelerin kullanılması revaçtaydı. Fakat elektriğin üretimi, iletimi ve dağıtımı konusunda ilerlemeler sağlanmasıyla buharlı makinelerin yerini elektrik makineleri almaya başladı. Endüstrileşmenin hızlı bir şekilde yaygınlaşması, nüfus artışı, insanların daha modern yaşama sahip olma çabaları endüstriyel ve günlük yaşam alanlarındaki su ve elektrik ihtiyacı artışını da beraberinde getirmiştir.

BÖLÜM 3. SU POMPALAMA MALİYETİNİN DÜŞÜRÜLMESİ

Günümüzde, su ve elektrik talebindeki hızlı artış, kullanılabilir su ve elektrik kaynaklarının azalması, su ve elektriğin tasarruflu (optimum) kullanılması gerekliliğini ön plana çıkarmaktadır. Su dağıtım sistemlerinde harcanan enerjinin %80-90'ı pompalar tarafından kullanılmaktadır [6]. Su dağıtım sistemlerinde de pompalama maliyetini düşürmek için birçok yöntem uygulanmakta ve yeni çözümler aranmaktadır.

3.1. Sistem Tasarımı

Sistemin ilk kurulumunda, pompa istasyonu, basma hattı ve depo için ihtiyaçlara göre tasarımlarının doğru yapılarak (pompa büyüklüğü, boru tipi, boru çapı, toplam boru uzunluğu, basma hattı güzergahı, depo büyüklüğü vb.) sistemin ömrü boyunca güvenli ve verimli çalışması sağlanmalıdır. Pompalama verimliliğini etkileyen bu faktörlerin sistem kurulumundan sonra iyileştirilmesi oldukça maliyetli olacaktır.

3.1.1. Depo

Tutma tankları (depolar), üretim döngüsü boyunca akışı eşitlemek, enerji verimliliğini artırmak ve potansiyel olarak pompa kapasitesi ekleme ihtiyacını azaltmak için kullanılabilir [41]. Suyun pompalanacağı deponun boyutu yeterince büyük seçilirse, pompaların uygun çalıştırılmasıyla yükler talebin düşük olduğu zamana kaydırılabilir [13] ve daha düşük boyutlarda pompa kullanılabilmesinin önü açılabilir.

3.1.2. Pompalar

Kullanılacak pompa boyutlarının seçimi, sistemin ihtiyaç duyduğu basma yüksekliği, akış hızı ve basınç gereksinimlerinin hesaplanmasıyla doğru bir şekilde yapılmalıdır.

Gereğinden büyük seçilen pompalar (özellikle değişken bir debi ihtiyacı olmadığında) sürekli olarak verimsiz çalışacaklardır. Doğru pompayı seçmek genellikle hem işletme maliyetlerinden hem de kurulum maliyetlerinden tasarruf sağlar [42].

3.1.3. Borular

Boru çaplarının optimizasyonu ile sürtünmeden kaynaklanan kayıplar azaltılarak enerji tasarrufu sağlanabilir. Gereken sürtünme gücü akışa, boru boyutuna (çap), toplam boru uzunluğuna, boru özelliklerine (yüzey pürüzlülüğü, malzeme vb.) ve pompalanan sıvının özelliklerine bağlıdır [43]. Sürtünme faktörünü azaltmanın yollarını aranmalıdır. Eğer uygulama, epoksi kaplı çelik veya plastik boruların kullanımına uygun ise, bu tür boruların kullanılması sürtünme faktörünü %40'tan fazla bir oranda azaltılabilir ve pompalama maliyetlerinizi orantılı olarak düşürebilir [44].

3.2. Bakım

Sistem kurulurken tasarımın verimli çalışmaya uygun bir şekilde yapılması, sistemin tüm ömrü boyunca verimli çalışacağı anlamına gelmez. Dolayısı ile sistemin verimli çalışmaya devam edebilmesi için bakımlarının düzenli bir şekilde yapılması şarttır.

Etkili pompa bakımı, pompaların verimli çalışır halde tutulmasına, onarımları zamanlamak ve erken pompa arızalarından kaçınmak için sorunların zamanında tespit edilmesine olanak tanır. Düzenli bakım ayrıca, bir pompa arızalanmadan çok önce meydana gelebilecek verimlilik ve kapasitedeki bozulmaları da ortaya çıkarır. Bakım faaliyetlerinin çoğu önleyici veya öngörücü olarak sınıflandırılabilir. Önleyici bakım, yağlama, periyodik ayarlamalar ve kirleticilerin giderilmesi gibi rutin sistem ihtiyaçlarını karşılar. Öngörülü bakım, bozulan koşulları tespit eden testlere ve denetimlere odaklanır. Öngörülü bakımların yapılabilmesi için bazı sistem parametreleri (titreşim, basınç, akış, akım veya güç, sıcaklık) sürekli olarak izlenmelidir [45].

Pompa verimliliği, kullanım ömrü boyunca %10 ila %25 oranında düşebilir. Bununla birlikte, yeni modeller daha verimli olduğu için bazen mevcut pompayı yenisiyle değiştirmek daha avantajlı olabilir [46].

3.3. Depo Taşmaları

Pompaların verimli çalışır halde tutulmasının yanı sıra sistemin doğru bir şekilde işletilmesi de oldukça önemlidir. Maksimum verimde çalışan bir pompalama sistemi, doğru bir şekilde kontrol edilemiyor ise sistemin genelinde bir verim düşüklüğüne sebebiyet verebilir. Su dağıtım sistemlerinde, son kullanıcıların beslendiği depolardaki su miktarının belirlenen bir sınırın altına düşürülmemesi amaçlanır. Bunun yanında, pompaların doldurdukları deponun seviyesine göre otomatik çalıştırılmadıkları durumlar (manuel pompalama, zaman saati kullanımı) depoların taşmasına, dolayısıyla su ve enerji israfına yol açabilir.

3.4. Kayıp Kaçaklar

Sistemin verimli çalışması için hidrolik dengenin kurulması ve basınç yönetimi oldukça önemlidir. Tüm dünyadaki su sistemi yöneticilerinin temel endişelerinden biri, içme suyu sistemlerindeki yüksek derecedeki su kayıplarının en aza indirilmesidir [47]. Pompalama hattındaki gereksiz yüksek basınçların önlenmesi için pompalar optimize edilebilir. Yükseltilmiş bir deponun çıkış hattında oluşan yüksek basınçlar için ise basınç düşürücü vanaların kullanılması oldukça yaygındır. Basınç düşürücü vanalar kullanılarak şebekede oluşan kaçakların düşürülmesi, dolaylı olarak pompalama ihtiyacının azalması demek olduğundan, pompalama maliyetlerinin düşmesini sağlayacaktır.

3.5. Verimli Pompalar

Yeni model pompalar daha verimli olduğu için bazen mevcut pompayı kullanmak yerine yeni bir pompa satın almak daha verimli olabilir. Pompaların dünyadaki elektrik enerjisi tüketimindeki payı %10-12 civarındadır [48], [49]. Kullanılan tüm pompaların

üçte ikisi düşük verimli pompalardır ve %60'a kadar fazla elektrik tüketmektedir. Küresel bir pompa üreticisi olan Grundfos'a göre, tüm işletmelerin yüksek verimli pompa sistemleri kullanmaya başlaması halinde, küresel elektrik tüketiminde %4 oranında tasarruf sağlanabilir [49].

3.6. Değişken Hızlı Sürücüler

Bugün çalışan pompaların çoğu, maksimum sistem talebini veya gelecekteki potansiyel talepleri karşılamak üzere seçilmiştir. Bu, çoğu pompanın büyük boyutlu olduğu ve nadiren tam tasarım kapasitelerinde çalıştığı anlamına gelir. Ayarlanabilir hız sürücüleri (ASD'ler), bir pompanın dönüş hızını değiştirerek verimli bir akış kontrolü alternatifi sağlar [50]. Statik kaldırma olmayan santrifüj uygulamalarında, sistem güç gereksinimleri pompa hızının küpüne göre değişir. Hız veya akıştaki küçük düşüşler enerji kullanımını önemli ölçüde azaltabilir. Örneğin, hızı (akışı) %20 oranında azaltmak giriş gücü gereksinimlerini yaklaşık %50 oranında azaltabilir [46].

Değişken frekanslı sürücüler (VFD'ler) en sık kullanılan ASD tipidir. Enerji tasarrufuna ek olarak, VFD'ler hassas hız kontrolü ve yumuşak kalkış özelliği sunar. Yumuşak kalkış, sargılar, kaplinler ve kayışlar üzerindeki termal ve mekanik gerilimleri azaltır. Ayrıca, VFD'ler büyük motorların çalıştırılmasında meydana gelebilecek voltaj dalgalanmalarını azaltır. Direkt hat üzerinden kaldırılan asenkron motorlar, kalkış sırasında tam yük akımının altı katına kadar akım çekerler. Hızlanma sırasında, bir VFD kontrollü motorun kilitli rotor akımı tam yük akımının bir buçuk katı ile sınırlıdır. Düşük hızlarda çalışma, daha düşük yatak yükleri, azaltılmış şaft sapması ve daha düşük bakım maliyetleri gibi başka faydalar da sağlar [51], [52].

3.7. İzleme ve Kontrol

Bir uzaktan izleme ve kontrol sistemine sahip olmayan sistemler manuel olarak kontrol edilir veya lokal olarak bir otomatik kontrol sistemlerine sahiptirler. Lokal otomasyon sistemleri genel olarak otomatik pompalama için bir zaman rölesini veya şamandırayı (sıvı seviye rölesi) referans alır. Pompalama istasyonunun suyun yükseltildiği depoya

olan uzaklığının oldukça fazla olduğu durumlarda genellikle zaman röleleri kullanılır ve pompalama edinilmiş tecrübeye göre sezgisel olarak yapılır. Kritik öneme sahip pompalama istasyonları veya depolarda manuel olarak kontrol ve izleme yapması için operatörler dahi görevlendirildiler. Bu tarz geleneksel çözümler verimsiz çalışma, yüksek operasyonel maliyet, hizmet kalitesinin düşmesi vb. olumsuzluklara sebebiyet verebilir.

3.8. Enerji Tarifeleri

Uygun depo kapasitesi ve pompa seçimi yapılmış ise, pompaların elektrik tarifelerine göre uygun çalıştırılmasıyla, talebin yoğun olduğu zamanlardaki (elektrik fiyatının yüksek olduğu zamanlar) yükler talebin az olduğu zamanlara (elektrik fiyatının düşük olduğu zamanlar) kaydırılarak pompalama için kullanılan enerji maliyeti düşürülebilir [6].

Pompalar, kullanılan depoyu elektrik tarifesinin en ucuz olduğu zamanda tamamen doldurabilecek durumda ve depo kapasitesi diğer zamanlarda pompalamaya ihtiyaç duymadan talebi karşılayabilecek boyutlarda ise gün içinde kullanılacak enerji aynı kalmakla birlikte kullanılan enerjiye ödenecek miktar daha az olacaktır [12], [13].

BÖLÜM 4. UZAKTAN İZLEME ve KONTROL

Su dağıtım sistemlerine sahip birçok idare, sistemini uzaktan izleme ve kontrol etmeyi hedeflemektedir. Herhangi bir kontrol stratejisinin amacı, gereksiz pompaları kapatmak veya pompaların yükünü azaltmaktır. Uzaktan kontrol sistemleri, pompalamanın nispeten hızlı ve doğru bir şekilde başlatılmasını ve durdurulmasını sağlar [46]. Günümüzde su dağıtım sistemlerinin uzaktan izlenmesi ve kontrolü amacı ile yoğun olarak SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), PLC (Programmable Logic Controller) ve RTU (Remote Terminal Unit) sistemlerinin kullanıldığı görülmektedir.

Bir su dağıtım SCADA sistemi temel olarak; sahada bulunan kontrolörler (PLC, RTU), seviye sensörleri, debimetreler, vana aktüatörleri, sürücüler, enerji analizörleri, basınç ölçerler, klorlama cihazları vb. gibi bir veya daha fazla saha veri arabirim cihazından oluşan bir sistemdir [53]. Sahada bulunan PLC'ler sensörler ve diğer veri arabirim cihazlarından topladıkları verileri işleyerek lokal olarak ekipmanları kontrol edebilmelerinin yanı sıra, topladıkları verileri bir merkez sunucuya gönderebilir ve merkez sunucudan veri alabilirler. Bir SCADA ara yüzü kullanılarak merkez sunucuda toplanan veriler görselleştirilerek sistemin anlık olarak izlenmesi ve kontrol edilmesi sağlanır.

Bir su dağıtım sisteminin uzaktan izlenmesi ve kontrol edilmesi pompaların gereksiz çalıştırılmasının önlenmesinin yanı sıra daha birçok fayda sağlayacaktır. Uzaktan izleme ve kontrol sisteminin su dağıtım sistemlerine sağladığı faydaların bir kısmı aşağıda açıklanmıştır.

4.1. İşletme Kolaylığı

Uzaktan izleme ve kontrol, özellikle büyük su dağıtım sistemleri için muazzam bir işletme kolaylığı sağlar. Örneğin, Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ) SCADA sistemi üzerinden içme suyu terfi istasyonları, içme suyu depoları, içme suyu kuyuları, debimetreler ve atık su terfi merkezlerinden oluşan 416 adet istasyonun izlenmesi ve kontrolünü sağlamaktadır. Bu istasyonlar 263 adet seviye sensörü, 383 adet pompa, 17 adet oransal vana, 31 adet on-off vana, 181 adet debimetre, 39 adet klorlama cihazı ve diğer sensörler (pH, Bulanıklık vb.) olmak üzere 922 adet uç noktayı teşkil etmektedir [54]. Böylesine büyük bir içme suyu dağıtım sisteminin, pek mümkün olmasa dahi, SCADA sistemi olmadan kontrol edilmesi aşırı derecede iş yükü, operasyonel zorluk, hizmet kalitesinde düşüş gibi birçok dezavantaja sebebiyet verecektir.

4.2. Bakım Kolaylığı

Sistemlerin verimliliğinin sürdürülmesi için periyodik (önleyici) bakımların yapılmasının yanında kestirimci (öngörülü) bakımlarında yapılması planlanmamış ekipman kesintilerini en aza indirmeye yardımcı olur. Uzaktan izleme sistemleri, öngörülü bakımların yapılabilmesi için gerekli bazı sistem parametrelerinin (titreşim, basınç, akış, akım veya güç, sıcaklık) sürekli olarak izlenebilmesini kolaylaştırır [45].

4.3. Arıza ve Kayıp Kaçak Tespiti

Sistemde oluşan arızalar, kayıp ve kaçaklar sistemin sürekli olarak uzaktan izlenilmesiyle hızlı bir şekilde tespit edilebilir. Örneğin pompa akım değerlerinin, pompalama hattında bulunan debimetrelerin, basınç ölçerlerin uzaktan izlenmesiyle hatta oluşacak bir patlak kısa süre içerisinde tespit edilebilir. Böyle bir durumda uzaktan pompalar manuel olarak durdurularak patlağın büyümesi, daha fazla su ve elektrik israfının önüne geçilmesi, arıza ekibinin hızlı bir şekilde arızaya yönlendirilmesi sağlanabilir.

4.4. Hizmet Kalitesi

Arızaların hızlı tespiti, hızlı müdahale imkanı sağlar ve tüketicilerin arızadan etkilenme sürelerinin asgari düzeye indirerek hizmet kalitesi artırır. Beklenmedik bir şekilde oluşan bir elektrik veya mekanik arıza sebebiyle uzun süre pompalamanın yapılamayacağı durumlarda, pompalama yapılan depodaki, mevcut su ve depodan talep edilen anlık su miktarına göre ilgili tüketicilere yaklaşık olarak ne kadar süre sonra hizmet verilemeyeceği bilgisinin verilmesiyle de hizmet kalitesine katkı sağlanabilir.

4.5. Enerji Tasarrufu

Bir SCADA sisteminin kullanılmasıyla sistem otomatik hale geldiği için geleneksel kontrol sistemlerine göre verimlilik artar, iş gücü azalır ve pompalama için harcanan toplam enerji tüketimindeki potansiyel tasarruf oranı %10 ila %20 arasındadır [55]. Eskişehir Su ve Kanalizasyon İdaresi (ESKİ), su dağıtımında SCADA sistemi kullanımı sonrasında enerji tüketiminde %15’lik bir tasarruf sağlanmıştır [56]. Ayrıca SCADA faaliyetlerine 2007 yılında başlayan Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ, 31.01.2011 tarihinden önce ADASU) 2008 faaliyet raporunda “SCADA Sistemi daha kurulma aşamasında tasarruf sağlamaya başlamıştır. Sistemin devreye alınması ile birlikte çok ciddi miktarda bir paranın harcanmamasına ve dolayısıyla başka yatırımlar için kullanılmasına imkânımız olmuştur. Aynı zamanda SCADA Sistemi; su kesintilerinde, depolardaki suların yönetimini hızlı bir şekilde yapmaya müsait olduğundan, su kesintisi vatandaşla yansıtılmadan birçok arızanın onarımına fırsat tanımaktadır. Bu kadar faydalı bir sistemin ADASU tarafından en uç noktalarda dahi kullanılması hem maddi olarak hem de hizmet kalitesi olarak çok yararlı olacaktır.” tespitlerinde bulunmuştur [57].

4.6. Enerji Tarifeleri

Enerji tarifelerinden faydalanmak için pompalama işleminin mümkün olduğunca elektrik tarifesinin ucuz olduğu zaman dilimine kaydırılması manuel çalıştırılacak bir

sistem için oldukça zor bir iştir. Yüzlerce istasyona sahip bir sistemin manuel işletilmesi dahi oldukça zor iken, sezgisel olarak operatörlerin pompalamayı tarifelere uygun şekilde işletebilmeleri neredeyse imkansızdır.

Uzaktan izleme ve kontrol sistemlerinin kurulmasıyla ihtiyaç duyulan veriler (depo seviyeleri, tüketim verileri, pompa verileri vb.) sahadan kolayca alınıp kaydedilebilir. Alınan bu veriler, enerji tarifeleri de göz önüne alınarak ve doğru bir şekilde işlenerek pompalamanın verimli bir şekilde yapılması enerji maliyetinde ekstra bir tasarruf sağlayacaktır.



BÖLÜM 5. ÖNERİLEN YÖNTEM

Bu bölümde, optimal zamanlama problemi modellenmesi ve bu problemi çözmek için önerilen algoritmanın çalışma prensibi anlatılacaktır. Bu tür optimal zamanlama problemleri özünde ikili veya tamsayı programlama problemleridir. Bu tarz problemlerin çözümünde doğrusal programlama [9] ve dinamik programlama [58] gibi çeşitli optimizasyon teknikleri kullanılmıştır. Bu çalışmadaki SDPA bir dinamik programlama optimizasyon tekniğidir.

5.1. Problemin Modellenmesi

Enerji şirketleri tarafından uygulanan çok zamanlı tarifelerde, farklı zaman dilimlerinde (en yoğun saatler, standart saatler, yoğun olmayan saatler) farklı birim fiyatlar uygulanmaktadır. Dolayısıyla pompalamanın farklı zaman aralıklarında yapılması toplam elektrik maliyetin de farklılık olmasını sağlayacaktır.

Örnekleme/açma-kapama karar periyodunun (T_o) dakika olarak alınması durumunda, örnek sayısı $n = \frac{24 \cdot 60}{T_o}$ adet olmaktadır ve pompalamanın 24 saatlik elektrik maliyeti (Z), aşağıdaki gibi (Denklem 5.1) hesaplanabilir.

$$Z = \frac{T_o}{60} \cdot E \sum_{i=1}^n d(i) \cdot M(i) , \quad \forall i \in [1, n] \quad (5.1)$$

Burada, E pompanın nominal gücünü (kW); $d(i)$ pompanın çalışma durumunu (pompa çalışırken $d(i) = 1$ ve pompa kapalıyken $d(i) = 0$); $M(i)$ elektrik birim fiyatını (TL/kWsa) göstermektedir.

Toplam elektrik tüketim maliyeti Z 'nin minimum olması hedeflenmektedir. Sabit hızlı bir pompa kullanıldığı için pompanın nominal gücü E sabit ve elektrik birim fiyatı M 'nin hangi zaman aralıklarında ne kadar olduğu bilineceğinden dolayı, d pompa çalışma durumlarının belirlenecek kısıtlar da göz önüne alınarak Z 'yi minimum yapacak şekilde optimize edilmesi gerekir.

Pompalama zamanını optimize ederken dikkat edeceğimiz kısıtlar depo seviyesinin belirlenmiş üst ve alt değerleri olacaktır ve bu değerlerin aşılmaması sağlanacaktır. Depo seviye kısıtlarımız, işletmeci tarafından belirlenecek deponun olması gereken yüzdelik asgari seviyesi L_l ve azami seviyesi L_h 'dir. Depo seviyesinin kısıtları Denklem 5.2'de ifade edilmiştir.

$$L_l \leq L_{i+1} \leq L_h, \forall i \in [1, n] \quad (5.2)$$

C_d , depodan talep edilen günlük su miktarı olmak üzere, gün içerisindeki ortalama saatlik tüketim (C_{ort}) aşağıdaki gibi (Denklem 5.3) hesaplanır.

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

C_T , içinde bulunulan saatin toplam tüketimi olmak üzere, içinde bulunulan saatin tüketim faktörü (C_h) aşağıdaki gibi (Denklem 5.4) hesaplanır.

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

$Q(i)$, tüketim miktarını göstermekte olup Denklem 5.5 ile hesaplanmaktadır.

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

İçinde bulunulan i periyodunun sonunda ulaşılacak depo seviyesi $L(i)$ 'nin bir önceki periyotta verilen pompa açma-kapama kararı $d(i - 1)$ ile devam edilmesi durumunda nasıl değişeceği Denklem 5.6 ile hesaplanabilir.

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

Burada, $L(i)$ depo seviyesinin yüzdelik değerini; Q_p , sabit olduğunu varsaydığımız ve herhangi bir i periyodunda pompanın terfi ettirdiği su miktarını; $Q(i)$, su talebini ve C^* deponun toplam su tutma kapasitesini göstermektedir.

Hesaplanan seviye değeri ve enerji kullanım miktarını etkileyecek diğer şartlara göre pompa açma-kapama kararı değiştirilir veya korunur. Dolayısıyla, puant zaman periyodunda yoğunlaşan yükün geceye kaydırılarak pompalama maliyetinin düşürülmesi için, belirlenmiş seviye sınırlarının dışına çıkılmadan pompalama çizelgesinin optimize edilmesi problemi ortaya çıkmaktadır. Depo seviyesi sınır değerleri için de tutulmak şartıyla, 24 saat boyunca pompa için en iyi açma-kapama kontrol sekansı $d(i)$ bulunursa, puant zamanı yükü (su talebi) azami derecede geceye kaydırılarak pompalama enerji maliyeti en aza indirilir [6], [7].

5.2. Geliştirilen Algoritma

Yukarıdaki zamanlama problemi, çok zamanlı elektrik tarifesinin her periyodundaki su talep oranı C 'nin hesaplanması ve her tarife periyodunun sonunda ulaşılması gereken depo seviyesi belirlenerek çözülebilir. Son olarak, pompa bu hesaplama göre çalıştırılır.

Genelde çoklu tarife sistemi üç farklı kullanım zamanına ($I = 3$) sahiptir ve her kullanım zamanı tarifesindeki su talebi oranı C şöyledir:

$$C = \{C_1, C_2, C_3\} \rightarrow \{\text{gündüz, puant, gece}\}$$

Her bir kullanım zamanı tarifiesi (gündüz, puant, gece) sonunda ulaşılması gereken depo seviyesi:

$$L = \{L_1, L_2, L_3\} \rightarrow \{\text{gündüz, puant, gece}\}$$

Her bir kullanım zamanı tarifesinin dakika cinsinden aldığı süre miktarı:

$$T = \{T_1, T_2, T_3\} \rightarrow \{\text{gündüz, puant, gece}\}$$

Algoritmanın çalışma durumlarını belirlemek için bir S değişkeni kullanılır. Her tarifeye başlangıç durumu olan $S = 0$ durumu ile başlanılır ve seviye sınır değerleri aşılmadığı sürece $S = 0$ durumundan çıkılmaz. Seviye alt sınırı aşıldığında depo boş durumu olan $S=1$ durumuna geçilerek pompalama başlatılır, seviye üst sınırı aşıldığında depo dolu durumu olan $S = 2$ durumuna geçilerek pompalama durdurulur. Başlangıç, depo dolu, depo boş durumlarından birine geçtiğinde; algoritma, bulunduğu tarife ve seviye sınır şartlarını göz önünde bulundurarak, mümkün mertebe bulunduğu durumda kalmaya çalışır. Durumlar arasındaki asgari geçiş, pompa açma-kapama sayısının da asgari düzeyde olmasını sağlar. Algoritma, gerekli tüm şartlara bakarak durumlar arasında geçiş yapar ve pompalama çizelgesi D 'yi oluşturur.

$$D = \{D_1, D_2, \dots, D_n\} \rightarrow \{D[i] = 0 \text{ pompa dur}, D[i] = 1 \text{ pompa çalış}\}, \forall i \in [1, n]$$

D dizisi pompanın dakikalık bazda ne zaman çalışıp ne zaman duracağını gelecek 24 saat için belirten, algoritma çıkışlarının yer aldığı dizidir.

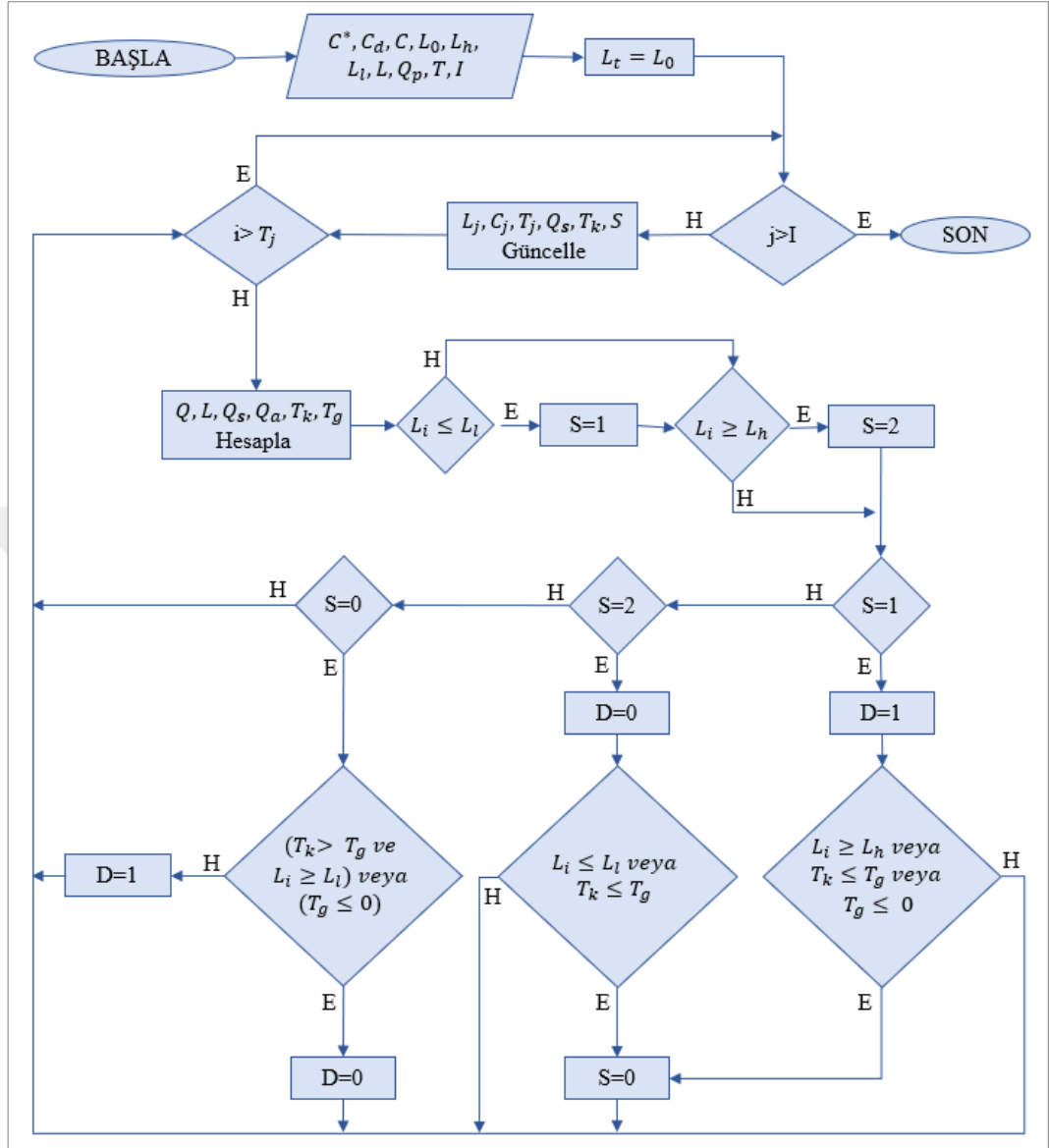
Bu çalışmada, yükün yoğun olmayan zaman tarifesine kaydırılmasıyla maksimum optimizasyonu sağlamak için geliştirilmiş yeni bir algoritma olan SDPA (Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması) Şekil 5.1.'de ve programın akış diyagramı Şekil 5.2.'de gösterilmiştir.

```

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  $t = 1, \dots, T_j$  do
        Compute  $Q_i, L_i$  with equations (5.5), (5.6)
         $Q_s = Q_s + Q_i$ 
         $Q_a = \frac{C^*(L_j - L_i)}{100} + (C_j \cdot C_d - Q_s)$ 
         $T_g = \frac{Q_a}{Q_p}$ 
         $T_k = T_k - 1$ 
        if  $L_i \leq L_t$  then
             $S = 1$ 
        end if
        if  $L_i \geq L_h$  then
             $S = 2$ 
        end if
        if  $S = 1$  then
             $D[i] = 1$ 
            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
             $D[i] = 0$ 
            if  $L_i \leq L_t$  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  $L_i \geq L_t$ ) or ( $T_g \leq 0$ ) then
                 $D[i] = 0$ 
            Otherwise
                 $D[i] = 1$ 
            end if
        end if
         $i = i + 1$ 
    end for
end for

```

Şekil 5.1. Sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması (SDPA).

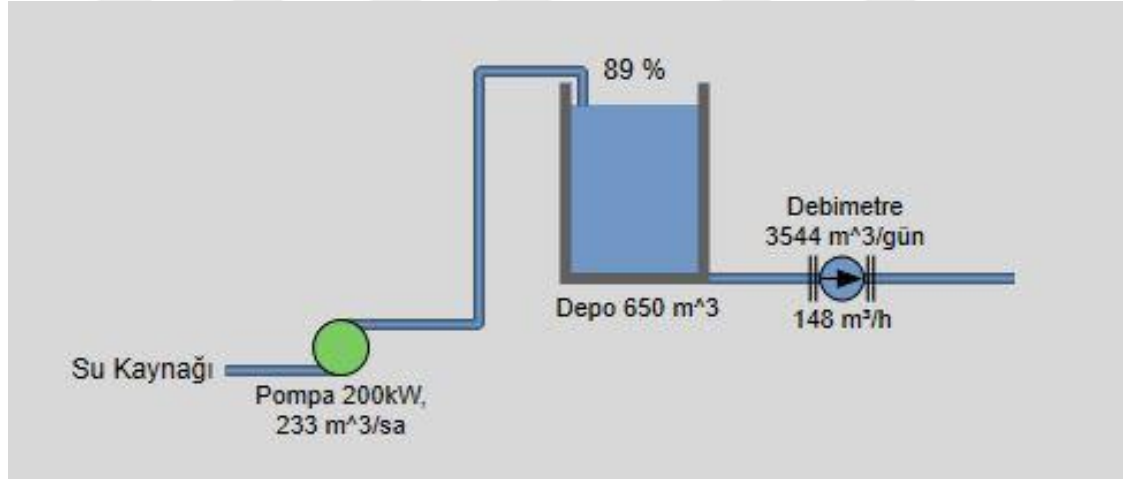


Şekil 5.2. Akış diyagramı.

BÖLÜM 6. SDPA’NIN ÇALIŞMA ALANINA UYGULANMASI

6.1. Çalışma Alanı

Sakarya şehrindeki Serdivan ilçesinde bulunan Kazımpaşa Mahallesi sınırları içerisinde bulunan bir yüksek su deposu ve bu depoya su pompalayan Sakarya Üniversitesi kampüsü içerisinde bulunan bir pompalama istasyonu bu vaka çalışması için seçilmiştir. Çalışma alanındaki bu yüksek su deposu yaklaşık 16000 kişinin günde ortalama 3544 m^3 'lük su talebini karşılayarak hizmet vermektedir. Şekil 6.1., su temin sisteminin iki parçalı olduğunu göstermektedir. Birinci bölüm su kaynağında bulunan sabit hızlı bir pompanın bulunduğu pompalama istasyonunu, ikinci bölüm suyun terfi ettirildiği ve çıkışında debimetre bulunan yüksek su deposunu göstermektedir.

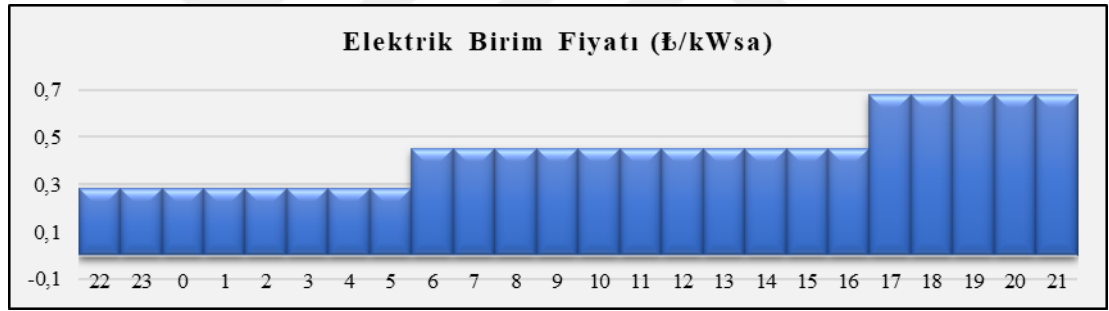


Şekil 6.1. Çalışma alanının şematik gösterimi.

İlk bölümdeki sabit hızlı santrifüj pompa, suyu kaynaktan tepedeki hedef depoya pompalar. Pompanın akış kapasitesi Q_p ile gösterilir ve $Q_p = 3,88 \text{ m}^3/dk$ 'dır. İlgili pompanın nominal gücü $P = 200 \text{ kW}$ 'tır.

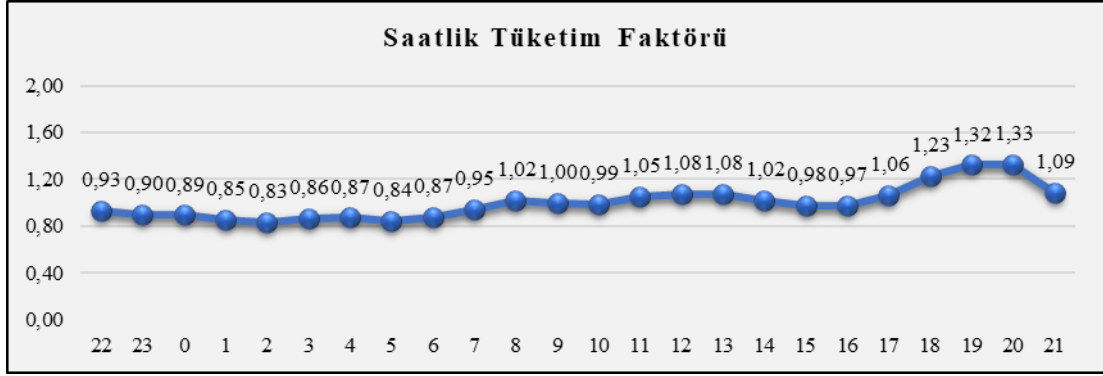
Yüksekteki içme suyu deposundan günlük ortalama talep edilen su miktarı $C_d = 3544 \text{ m}^3$ deponun anlık azami su tutma kapasitesi $C^* = 650 \text{ m}^3$ 'tür ve seviyenin %100 olmasına karşılık gelir. Bu çalışma alanındaki depo için, işletmeci tarafından belirlenmiş, L_l ile gösterilen deponun asgari seviyesi %20 (130 m^3), L_h ile gösterilen azami seviyesi %100 (650 m^3) olarak belirlenmiştir.

Çalışma alanında kullanılan elektrik, Sepaş Enerji şirketi tarafından sağlanmakta ve çok zamanlı tarife kullanılmaktadır. Elektrik kullanımı, en yoğun süre boyunca (17:00 - 22:00) 0,9015 ₺/kWsa, standart süre boyunca (06:00 - 17:00) 0,597 ₺/kWsa, yoğun olmayan süre boyunca (22:00 – 06:00) 0,3547 ₺/kWsa üzerinden ücretlendirilir. Dolayısıyla pompa farklı zaman aralıklarında çalıştığında elektrik maliyeti farklı olacaktır. Kullanılan üç zamanlı tarifenin zamana göre birim fiyat grafiği Şekil 6.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 6.2. Zamana göre elektrik birim fiyatı.

Pompanın elektrik tüketim maliyeti, su temin sistemindeki su talebinden büyük ölçüde etkilenir. Şekil 6.3.'teki talep eğrisi, saatlik ortalama talep ile gün içindeki ortalama saatlik talep arasındaki ilişkiyi (tüketim faktörü, C_h) ve günün farklı dönemlerinde farklı su taleplerinin olduğunu göstermektedir. Bu çalışmada, günlük toplam su talebi (C_d) ve gün içindeki saatlik tüketim faktörünün sabit olduğunu varsayıyoruz çünkü bu çalışma, tahmin modülüne değil optimizasyon algoritmasının çalışma alanındaki şartlar altında en iyi çözümü vermesine odaklanmaktadır. Bu çalışma alanındaki günlük toplam su talebi $C_d = 3544 \text{ m}^3$ 'tür.



Şekil 6.3. Tüketim faktörü.

Bu vaka çalışmasında çoklu tarifemiz, üç farklı kullanım zamanına sahiptir ve her kullanım zamanı tarifesindeki su talebi oranı C , tarife sonunda ulaşılması hedeflenen depo seviyesi L , tarifenin dakika cinsinden aldığı süre miktarı T değerleri aşağıdaki gibidir.

$$C = \{C_1, C_2, C_3\} \rightarrow \{\text{gündüz}, \text{puant}, \text{gece}\} \rightarrow \{0,45, 0,25, 0,3\}$$

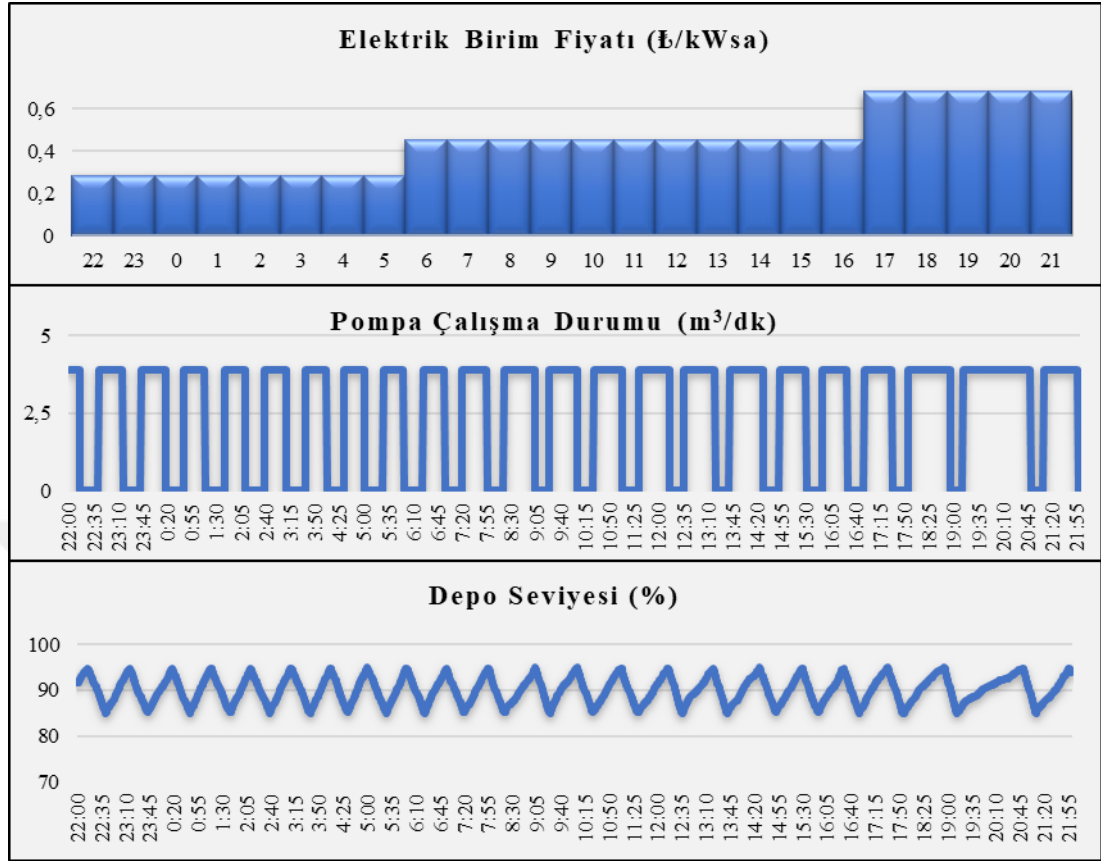
$$L = \{L_1, L_2, L_3\} \rightarrow \{\text{gündüz}, \text{puant}, \text{gece}\} \rightarrow \% \{100, 20, 100\}$$

$$T = \{T_1, T_2, T_3\} \rightarrow \{\text{gündüz}, \text{puant}, \text{gece}\} \rightarrow \{660, 300, 480\}$$

Geliştirilen SDPA, belirlenen kısıtlar ve diğer parametreler kullanılarak çalışma alanına uygulanmıştır.

6.2. Mevcut Su Seviyesi Kontrol (WLC) Yöntemi

Bu vaka çalışmasındaki su temin sistemi, mevcutta klasik su seviye kontrolü (WLC) yöntemini kullanmaktadır. Bir seviye sensörü aracılığı ile deponun su seviyesi ölçülmektedir ve depodaki su seviyesi %85'e düştüğünde pompa depoya suyu pompalamak için çalıştırılır. Su seviyesi %95'e ulaştığında depoya su pompalamakta olan pompa durdurulur. Kullanılan bu klasik yöntemde, pompanın çalışma durumunu etkileyen tek faktör seviye sensörü ile ölçülen deponun su seviyesidir. Mevcut su temin sistemindeki seviye ve pompa çalışma durumları Şekil 6.4.'te gösterilmektedir.



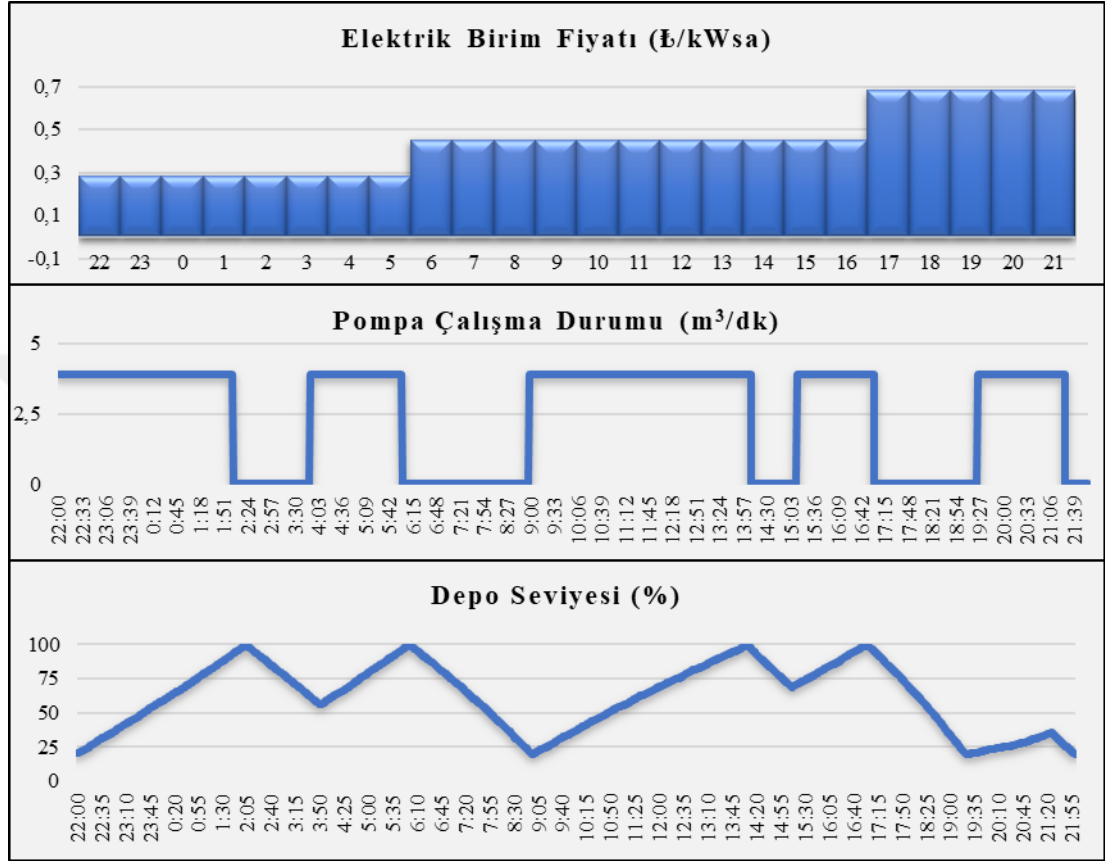
Şekil 6.4. WLC için seviye ve pompa çalışma durumları.

Şekil 6.4.'ten, pompanın puant zaman periyodu boyunca uzun bir süre çalıştığı gözlemlenebilir. Bu yöntemde, puant zaman periyodu dikkate alınmadığından, tüm sürecin enerji maliyeti oldukça yüksek olacaktır.

6.3. SDPA'nın Uygulanması

Klasik su seviye kontrolü (WLC) yöntemini kullanan mevcut su temin sisteminden elde edilen aynı veriler, mevcut su temin sisteminde bu çalışma ile önerilen algoritmayı simüle etmek ve SDPA tarafından elde edilebilecek enerji maliyetindeki büyük iyileşmeyi göstermek için toplanmıştır. Algoritma, C# programlama dili ve Core i7 -2720QM 2.2GHz 16 RAM özelliklerine sahip bir bilgisayar kullanılarak uygulanmıştır. Hesaplama süresi 1 saniyeden az sürmüştür.

WLC yönteminde kullanılan aynı veriler SDPA için kullanıldığı göz önüne alındığında, su temin sistemine ait seviye ve pompa çalışma durumlarının sonucu Şekil 6.5.'te gösterilmiştir.



Şekil 6.5. SDPA için seviye ve pompa çalışma durumları.

6.4. SDPA ve WLC'nin Karşılaştırılması

Çok zamanlı elektrik tarifiesi fiyatlandırması göz önüne alındığında; SDPA, aynı miktarda suyu pompalamak için aynı sürede pompalamayı farklı zaman aralıklarında yaparak, puant zaman periyodu yükünün bir kısmını, gece ve gündüz zaman periyoduna kaydırır. SDPA ve WLC algoritmalarının aynı şartlar altında uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar (pompaladıkları toplam su miktarı, toplam ve zaman aralıklarına göre pompalama süreleri, pompanın çalışma/durma sayısı) Tablo 6.1.'de sıralanmıştır.

Tablo 6.1. Pompalanan su miktarı ve pompalama süreleri.

Nitelik	WLC	SDPA
Toplam Pompalanan Su Miktarı	3555 m ³	3543 m ³
Pompalama Süresi (Toplam)	916 dk.	913 dk.
Pompalama Süresi (Gündüz)	412 dk.	418 dk.
Pompalama Süresi (Puant)	240 dk.	123 dk.
Pompalama Süresi (Gece)	264 dk.	372 dk.
#Pompa Çalış/Dur Sayısı	23	5

Günlük toplam enerji maliyetini aşağıdaki şekilde (Denklem 6.1) ifade ederek, kolayca hesaplayabiliriz.

$$Z = \frac{E}{60} \sum_{i=1}^I t(i) \cdot M(i), \quad \forall i \in [1, I] \quad (6.1)$$

$$M = \{M_1, M_2, M_3\} \rightarrow \{\text{gündüz}, \text{puant}, \text{gece}\} \text{ ₺/kWh}$$

$$t = \{t_1, t_2, t_3\} \rightarrow \{\text{gündüz}, \text{puant}, \text{gece}\} \text{ dk}$$

Burada, pompanın nominal gücü $E = 200 \text{ kW}$, her kullanım zamanı tarifesindeki elektrik birim fiyatı M , pompalama süresi t olmak üzere günlük toplam enerji maliyeti Z , Denklem 6.1 kullanılarak iki yöntem için de hesaplanır ise;

WLC yöntemi için;

$$M = \{0,597, 0,9015, 0,3547\} \text{ ₺/kWsa}$$

$$t = \{412, 240, 264\} \text{ dk}$$

$$Z_{WLC} = \frac{200}{60} \cdot (412 \cdot 0,597 + 240 \cdot 0,9015 + 264 \cdot 0,3547) = 1853 \text{ ₺}$$

Pompalanan günlük toplam su miktarı $C_d = 3555 \text{ m}^3$ olduğundan, birim elektrik maliyeti $0,5212 \text{ ₺/m}^3$ olarak hesaplanır.

SDPA yöntemi için;

$$M = \{0,597, 0,9015, 0,3547\} \text{ ₺/}kWsa$$

$$t = \{418, 123, 372\} dk$$

$$Z_{WLC} = \frac{200}{60} \cdot (418 \cdot 0,597 + 123 \cdot 0,9015 + 372 \cdot 0,3547) = 1641 \text{ ₺}$$

Pompalanan günlük toplam su miktarı $C_d = 3543 m^3$ olduğundan, birim elektrik maliyeti $0,4632 \text{ ₺/}m^3$ olarak hesaplanır.

Tablo 6.2. Elektrik maliyetleri.

Nitelik	WLC	SDPA
Günlük Toplam Elektrik Maliyeti	1853 ₺	1641 ₺
Toplam Pompalanan Su Miktarı	3555 m ³	3543 m ³
Birim Elektrik Maliyeti	0,5212 ₺/m ³	0,4632 ₺/m ³

Sonuç olarak, Tablo 6.2.'de görüldüğü gibi SDPA'nın kullanılması WLC'ye kıyasla daha düşük enerji maliyeti sağlamıştır. Ayrıca Tablo 6.1.'de gösterildiği gibi SDPA'nın uygulanması ile pompanın gün içerisindeki dur kalk sayısı 23'ten 5'e düşürülmüştür. SDPA, WLC'ye kıyasla kullanılan birim enerji maliyetini yaklaşık %11,13 oranında azaltabildiğini ve vaka çalışmamızda fiziksel unsurlar değiştirilmeden elde edebileceğimiz en iyi optimizasyonu sağladığını bize göstermektedir.

Çalışma alanındaki, mevcut şartlar (depo kapasitesi, su talebi, kullanılan pompa kapasitesi) ve güncel elektrik birim fiyat tarifesi göz önüne alındığında, günlük ortalama su talebi $C_d = 3544 m^3$ olduğundan ve pompalanan suyun birim elektrik maliyetinin $0,5212 \text{ ₺/}m^3$ 'den $0,4632 \text{ ₺/}m^3$ 'e düşürülmesiyle elektriğe ödenen bedelde, günlük $3544 \cdot (0,5212 - 0,4632) = 205,55 \text{ ₺}$ olmak üzere, aylık 6166 ₺, yıllık 75025 ₺ tasarruf sağlanabilir.

BÖLÜM 7. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Çok zamanlı elektrik tarifiesi fiyatlandırmasından yararlanarak, su temin sistemindeki pompa istasyonunun optimal zamanlamasını yapmak için bir sadeleştirilmiş dinamik programlama algoritması geliştirilmiştir. Fiziksel unsurlar değiştirilmeden elde edilebilecek en iyi optimizasyon sonucunu veren SDPA, geleneksel WLC'ye kıyasla enerji verimliliğini arttırarak, kullanılan enerji maliyetinde yaklaşık %11 oranında tasarruf edilebileceğini göstermektedir.

SDPA'nın kullanılmasıyla pompanın dur kalk sayısı %72 azaltılabilir. Pompa dur kalk sayısının azaltılmasıyla oluşan faydalar; pompa-motor ömrünün uzaması, bakım periyotlarının uzaması, kalkış esnasında çekilen yüksek akımlardan (demeraj akımı) kaçınılması, demeraj akımı sebebiyle nominal güce oranla harcanan fazla enerji kullanımının azalması şeklinde sıralanabilir.

Geliştirilen SDPA, bilgisayar tabanlı bir cihaza ihtiyaç duyacak kadar yoğun bir data saklama alanı ve program hafızasına ihtiyaç duymayacağından kolayca bir PLC içerisinde koşturulabilir. Tüm istasyonlar için merkezdeki bir sunucuda program koşturularak pompalama komutlarının sahadaki cihazlara iletilmesinden, programın sahada kullanılan PLC'lerde lokal olarak koşturulması, merkez sunucuda oluşacak olası bir aksilikten pompalamanın etkilenmemesini sağlar. Uzaktan izleme ve kontrol (SCADA/PLC) sistemine sahip alanlara uygulanması için ekstra bir malzeme maliyeti gerektirmez.

Kaskat yapıdaki terfi merkezlerinde, en uçtaki terfi merkezinde uygulanması halinde SDPA, uçtaki terfi merkezinin enerji tüketiminde tasarruf sağlamanın yanı sıra suyun ana kaynağına kadar olan önceki terfi merkezlerinin enerji tüketimlerinde de tasarruf sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- [1] Angelakis, A., De Feo, G., Laureano, P., Zourou, A., Minoan and Etruscan Hydro-Technologies, *Water*, 5(3), 972–987, 2013.
- [2] Mala-Jetmarova, H., Barton, A., Bagirov, A., A history of water distribution systems and their optimisation, *Water Sci. Technol. Water Supply*, 15(2), 224–235, 2015.
- [3] Şahin, B., Küresel Bir Sorun: Su Kıtlığı ve Sanal Su Ticareti, Hitit Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İktisat Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2016.
- [4] Moreira, D. F., Ramos, H. M., Energy Cost Optimization in a Water Supply System Case Study, *J. Energy*, 2013, 1–9, 2013.
- [5] Demir, M., Elektrik Sayaçlarının Gprs ile Uzaktan Okunması, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi, 2006.
- [6] Sarbu, I., A Study of Energy Optimisation of Urban Water Distribution Systems Using Potential Elements, *Water*, 8(12), 593-612, 2016.
- [7] Lightle, R., Design Energy Efficient Pumping Stations with PIPE-FLO, *World Water*, 1–5, 2008.
- [8] Zheng, G., Huang, Q., Energy Optimization Study of Rural Deep Well Two-Stage Water Supply Pumping Station, *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, 24(4), 1308–1316, 2016.
- [9] Jowitt, P. W., Germanopoulos, G., Optimal Pump Scheduling in Water-Supply Networks, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 118(4), 406–422, 1992.
- [10] McCormick, G., Powell, R. S., Optimal Pump Scheduling in Water Supply Systems with Maximum Demand Charges, *J. Water Resour. Plan. Manag.*, 129(5), 372–379, 2003.
- [11] Salomons, E., Goryashko, A., Shamir, U., Rao, Z., Alvisi, S., Optimizing the operation of the Haifa-A water-distribution network, *J. Hydroinformatics*, 9(1), 51–64, 2007.
- [12] Alighalehbabakhani, F., McElmurry, S., Miller, C. J., Abkenar, S. M. S., A case study of energy cost optimization in Monroe water distribution system, 2013 International Green Computing Conference Proceedings, Arlington, 1–5, 2013.

- [13] Barry, J. A., WATERGY: Energy and Water Efficiency in Municipal Water Supply and Wastewater Treatment, Cost-Effective Savings of Water and Energy, Washington, 1–40, 2007.
- [14] Hodge, A. T., Roman Aqueducts and Water Supply, 2. Baskı, Duckworth, London, 2003.
- [15] Angelakis, A. N., Koutsoyiannis, D., Tchobanoglous, G., Urban wastewater and stormwater technologies in ancient Greece, Water Res., 39(1), 210–220, 2005.
- [16] Burian, S. J., Edwards, F. G., Historical Perspectives of Urban Drainage, Ninth International Conference on Urban Drainage, Oregon, 1–16, 2002.
- [17] Walski, T. M., A History of Water Distribution, J. Am. Water Works Assoc., 98(3), 110–121, 2006.
- [18] Mays, L. W., Water Distribution System Handbook, McGraw-Hill Companies, New-York, 1–47, 2000.
- [19] Zarkadoulas, N., Koutsoyiannis, D., Mamassis, N., Papalexiou, S.M., Climate, Water and Health in Ancient Greece, Eur. Geosci. Union Gen. Assem., Vienna, 12006-12028, 2008.
- [20] Yannopoulos, S., Yapijakis, C., Kaiafa-Saropoulou, A., Antoniou, G., Angelakis, A. N., History of sanitation and hygiene technologies in the Hellenic world, J. Water Sanit. Hyg. Dev., 7(2), 163–180, 2017.
- [21] Mays, L. W., Ancient Water Technologies. İçinde: A Brief History of Water Technology During Antiquity: Before the Romans, 1. Baskı, Springer, Dordrecht, 1–28, 2010.
- [22] Ann, C., History of Water Pumps, 2009. Online Link: https://www.ehow.com/facts_5031932_history-water-pumps.html, Erişim Tarihi: 06.02.2020.
- [23] Bazza, M., Overview of the history of water resources and irrigation management in the Near East region, Water Sci. Technol. Water Supply, 7(1), 201–209, 2007.
- [24] Yannopoulos, S. I., Lyberatos, G., Theodossiou, N., Li, W., Valipour, M., Tamburrino, A., Angelakis, A.N., Evolution of water lifting devices (Pumps) over the centuries worldwide, Water, 7(9), 5031–5060, 2015.
- [25] Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ), Tarihi Çark, 2010. Online Link: <https://www.sakarya.bel.tr/1/Proje/tarihi-cark/29>, Erişim Tarihi: 07.02.2020.
- [26] Mimdap, Kentsel Simge Bağlamında Tarihi Çark'ın 'Yeniden' Yapımı, 2010. Online Link: <http://www.mimdap.org/?p=45236>, Erişim Tarihi: 07.02.2020.

- [27] Dekker, M., Encyclopedia Water Science. İçinde: Hydrologic and Hydraulic Science and Technology in Ancient Greece. 1. Baskı, CRC Press, New York, 415–417, 2003.
- [28] Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ), Karaman Atıksu Arıtma Tesisi, 2015. Online Link: <https://www.sakarya-saski.gov.tr/icerik/detay.aspx?Id=86>., Erişim Tarihi: 10.02.2020.
- [29] ClipArt VB, Force Pump. Online Link: <https://etc.usf.edu/clipart/86400/86439/86439-force-pump.htm>., Erişim Tarihi: 22.02.2020.
- [30] Needham, J., Science and Civilisation in China, Vol. 4. Physics and Physical Technology, Part II: Mechanical Engineering. İçinde: Basic Mechanical Principles. 5. Baskı, Cambridge University Press, London, 65–156, 2000.
- [31] Dodge, D. M., Illustrated History of Wind Power Development, Part 1 - Early History Through 1875, 2006. Online Link: <http://telosnet.com/wind/early.html>., Erişim Tarihi: 10.02.2020.
- [32] ClipArt VB, Chain Pump. Online Link: https://etc.usf.edu/clipart/36300/36378/chain_pump_36378.htm., Erişim Tarihi: 22.02.2020.
- [33] Reti, L., di Giorgio Martini, F., Francesco di Giorgio Martini's Treatise on Engineering and Its Plagiarists, Technol. Cult., 4(3), 287, 1963.
- [34] Van Esch, B. P. M., Simulation of three-dimensional unsteady flow in hydraulic pumps, Febodruk BV, 12–15, 1997.
- [35] Pumps & Systems, The History of Pumps: Through the Years, 2011. Online Link: <https://www.pumpsandsystems.com/history-pumps-through-years>., Erişim Tarihi: 12.02.2020.
- [36] Beşergil, B., Akışkan İletici Cihazlar; Pompalar, Fanlar, Kompresörler. Online Link: http://bilsenbesergil.blogspot.com/p/blog-page_214.html., Erişim Tarihi: 12.02.2020.
- [37] Lukehud, Sliding Vane Pumps, 2014. Online Link: <http://www.pearltrees.com/lukehud/lubrication/id13060232/item130321279>., Erişim Tarihi: 19.02.2020.
- [38] Pump School, External gear Pumps. Online Link: <http://www.pumpschool.com/principles/external.php>., Erişim Tarihi: 19.02.2020.
- [39] ClipArt VB, Double Barrel Air Pump. Online Link: https://etc.usf.edu/clipart/36300/36383/pump_dbl_36383.htm., Erişim Tarihi: 22.02.2020.

- [40] Madey, T. E., Early Applications of Vacuum, From Aristotle to Langmuir, J. Vac. Sci. Technol. A Vacuum, Surfaces, Film., 2(2), 110–117, 1984.
- [41] Jochem, E., Landwehr, M., Strategies to Promote Energy-Efficient Motor Systems. İçinde: Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, 305–320, 1997.
- [42] Hydraulic Institute, Europump, D.E.O., Pump Life Cycle Costs: A Guide to LCC Analysis for Pumping Systems, New Jersey, 9–10, 2001.
- [43] Nayyar , M. L., Deremiah, R. E., Piping Handbook. İçinde: Prestressed Concrete Cylinder Pipe and Fittings. 7. Baskı, McGraw-Hill, New-York, 404–405, 2000.
- [44] Department of Energy, Reduce Pumping Costs through Optimum Pipe Sizing, Energy Tips – Pumping Systems, 2005. Online Link: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/fl6/reduce_pumping_costs.pdf, Erişim Tarihi: 15.02.2020.
- [45] Department of Energy and Hydraulic Institute, Improving Pumping System Performance, U.S. Department of Energy, 2006. Online Link: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/fl6/pump.pdf>, Erişim Tarihi: 16.02.2020.
- [46] Hasanbeigi, A., Price, L., Industrial Energy Audit Guidebook: Guidelines for Conducting an Energy Audit in Industrial Facilities, İçinde: Energy-efficiency improvement opportunities in pumping systems. Berkeley National Laboratory, California, 30–34, 2010.
- [47] Araujo, L. S., Ramos, H., Coelho, S. T., Pressure Control for Leakage Minimisation in Water Distribution Systems Management, Water Resour. Manag., 20(1), 133–149, 2006.
- [48] Waide, P., Brunner, C. U., Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems, Int. energy agency, 46–70, 2011.
- [49] Orchard, B., Grundfos Offers Approach To Missing IE3 Wastewater Class. Online Link: <https://www.grundfos.com/about-us/news-and-press/news/Grundfos-offers-approach-to-missing-IE3-wastewater-class.html>, Erişim Tarihi: 13.02.2020.
- [50] Marchi, A., Simpson, A. R., Ertugrul, N., Assessing variable speed pump efficiency in water distribution systems, Drink. Water Eng. Sci., 5(1), 15–21, 2012.
- [51] Hallouda, M. M., Helal, M. A., Younes, M. A., Fetyan, K. M., Energy Saving of Adjustable Speed Pump Stations in Egypt, 2017. Online Link: https://www.researchgate.net/publication/237736737_Energy_Saving_Of_Adjustable_Speed_Pump_Stations_In_Egypt/citations, Erişim Tarihi: 23.02.2020.

- [52] Department of Energy, Adjustable Speed Pumping Applications, Energy Tips – Pumping Systems, 2007. Online Link: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/05/f16/adjust_speed_pumping.pdf, Erişim Tarihi: 15.02.2020.
- [53] Walski, T. M., Chase, D. V., Savic, D. A., Grayman, W., Advanced Water Distribution Modeling and Management. İçinde: Operation, 2. Baskı, Haestad Press, Waterbury, 417–498, 2007.
- [54] Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ), 2019 Faaliyet Raporu, Sakarya, 220–223, 2019.
- [55] Global Energy Partners, High-Efficiency Pump/Motor Systems. Program on Technology Innovation: Electric Efficiency through Water Supply Technologies - A Roadmap, Electric Power Research Institute, California, 5–9, 2009.
- [56] Otomasyon Dergisi, Su Atık Su Otomasyonu SCADA Sistemleri Ve Akıllı Şebekeler, Otomasyon Dergisi, 2018. Online Link: <http://otomasyondergisi.com.tr/arsiv/yazi/su-atik-su-otomasyonu-scada-sistemleri-ve-akilli-sebekeler>., Erişim Tarihi: 18.02.2020.
- [57] Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ), 2008 Faaliyet Raporu, Sakarya, 101–102, 2008.
- [58] Zhuan, X., Zhang, L., Guo, J., Optimal Operation Scheduling Of A Pump Station, 2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Mianyang, 3797–3802, 2011.

ÖZGEÇMİŞ

Hayri Küçük, 28 Nisan 1987’de Trabzon’da doğdu. İlk, orta ve lise eğitimini Trabzon’da tamamladı. 2005 yılında Arsin Lisesi’nden mezun oldu. Lisans eğitimine Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde 2007 yılında başladı ve 2011 yılında lisans eğitimini tamamladı. Çalışma hayatı 2012 yılında, endüstriyel otomasyon alanında faaliyet gösteren bir firmada başlamış olup, 2015 yılında Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine başladı. Su sektöründe, endüstriyel otomasyon konusunda çalışmalar yapmakta ve aynı zamanda yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.