

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

ÇOK POMPALI SU TERFİ İSTASYONLARI İÇİN ENERJİ VERİMLİ BİR KONTROL YAKLAŞIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Kadir YARALI

**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.

Kadir YARALI

07.08.2020



TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim ve bu çalışma sürecinde desteğini eksik etmeyen, deneyimlerini paylaşıp yönlendiren, çalışmanın şekillenmesi aşamasında bana bolca zaman ayıran, danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Mustafa TURAN'a, teşekkür ediyorum.

Bu çalışmadaki, olay çalışması alanı seçimi ve ilgili bilgilere ulaşmamda yardımlarını esirgemeyen Sakarya Büyükşehir Belediyesi, SASKİ SCADA Şube Müdürü İsa Çomaklı'ya, ayrıca Ufuk Akarsu ve SCADA birimindeki tüm çalışanlara teşekkür ederim.

Son olarak bu çalışmanın yapılmasına imkan tanıyan, teknik perspektifi ve teşviklerini eksik etmeyen, Natura Otomasyon ve Yazılım Şirketi müdürü T. Bahadır Taşkiran'a, arkadaşlarım Hayri Küçük ve Hussein AL-Sanabani'ye ve bana her konuda her zaman destek olan aileme teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

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

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Genel	1
1.2. Benzer Çalışmalar	3
1.3. Tezin Amacı	4
1.4. Tez Aşamaları	4

BÖLÜM 2.

OTOMASYON VE SCADA SİSTEMLERİNİN GEREKLİLİĞİ	6
2.1. Programlanabilir Lojik Kontrolör	7
2.1.1. Röle tabanlı kontrolden PLC'ye geçiş	7
2.1.2. PLC'nin genel yapısı ve gelişimi	10
2.2. Açık İletişim Platformu	12
2.3. SCADA Sistemleri	13
2.3.1. SCADA sistemi temel bileşenleri	13
2.3.1.1. Saha enstrümantasyonu	14
2.3.1.2. Endüstriyel kontrolörler	15
2.3.1.3. Uzak iletişim ağları	15

2.3.1.4. SCADA yazılımı	16
2.3.2. SCADA sistemi nesilleri	17
2.3.2.1. Birinci nesil - Monolitik sistemler	17
2.3.2.2. İkinci nesil - Dağıtık sistemler	18
2.3.2.3. Üçüncü nesil - Ağ tabanlı sistemler	19
2.3.3. Su temin sistemlerinde SCADA	20
 BÖLÜM 3.	
KULLANILAN YÖNTEM	24
3.1. Çalışma Alanındaki Su Temin Sistemi	24
3.2. Problemin Modellenmesi	27
3.3. Uygulanan SDPA Algoritması	29
 BÖLÜM 4.	
SİMÜLASYON ÇALIŞMASI	33
4.1. İkinci Aşamadaki Pompa C	33
4.1.1. Pompa C'nin mevcut çalışma durumu	33
4.1.2. Pompa C'nin optimizasyon sonrası çalışma durumu	34
4.2. İkinci Aşamadaki Pompa B	35
4.2.1. Pompa B'nin mevcut çalışma durumu	35
4.2.2. Pompa B'nin optimizasyon sonrası çalışma durumu	36
4.3. Birinci Aşamadaki Pompa A	37
4.3.1. Pompa A'nın mevcut çalışma durumu	37
4.3.2. Pompa A'nın B ve C optimizasyonu sonrası çalışma durumu	38
4.3.3. Pompa A'nın optimizasyon sonrası çalışma durumu	40
4.4. SDPA'da Yapılan İyileştirilmenin Etkisi	41
4.5. Elde Edilecek Kazanç	44
 BÖLÜM 5.	
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	45
KAYNAKLAR	47

ÖZGEÇMİŞ	52
----------------	----



SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

CPS	: Kaskad Pompalama İstasyonları (Cascade Pumping Stations)
CPU	: Merkezi İşleme Birimi (Central Processing Unit)
DDPA	: Ayrıştırma-Dinamik Programlama Çözüm Birleştirilmesi (Decomposition–Dynamic Programming Aggregation)
FED	: Ön Uç Sürücü (Front End Driver)
FEP	: Ön Uç İşlemcisi (Front End Processor)
HMI	: İnsan Makine Arayüzü (Human Machine Interface)
IDPA	: Geliştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması (Improved Dynamic Programming Algorithm)
LAN	: Yerel Alan Ağı (Local Area Network)
MODICON	: Modüler Dijital Kontrolör (Modular Digital Controller)
MTU	: Ana Terminal Birimi (Master Terminal Unit)
ODBC	: Açık Veri Tabanı Bağlantısı (Open Database Connectivity)
OLE-DB	: Nesne Bağlama ve Katıştırma/Gömme, Veritabanı (Object Linking and Embedding, Database)
OPC	: Açık İletişim Platformu (Open Platform Communications)
PLC	: Programlanabilir Lojik Kontrolör (Programmable Logic Controller)
RTU	: Uzak Terminal Birimi (Remote Terminal Unit)
SASKİ	: Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi
SCADA	: Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama (Supervisory Control and Data Acquisition)
SDPA	: Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması
TOU	: Kullanım Zamanı (Time-of-Use), Çok Zamanlı Tarife
WAN	: Geniş Alan Ağı (Wide Area Network)
WLC	: Su Seviye Kontrolü (Water Level Control)

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1. Röle panoları [21].	8
Şekil 2.2. İlk üretilen PLC: Modicon 084 [26].	9
Şekil 2.3. Modicon 084'ün orijinal programlama paneli [20].	10
Şekil 2.4. Kompakt ve modüler olan PLC örneği [32].	12
Şekil 2.5. SCADA sistemine genel bakış [37].	14
Şekil 2.6. Monolitik SCADA sistemi	18
Şekil 2.7. IBM anaçatı bilgisayarlı birinci nesil SCADA [44].	18
Şekil 2.8. Dağıtık SCADA sistemi.	19
Şekil 2.9. Ağ tabanlı SCADA sistemi.	20
Şekil 2.10. Su temin sistemi SCADA mimarisi örneği.	21
Şekil 2.11. Su temin sistemi SCADA sayfası örneği [50].	22
Şekil 2.12. Su temin sistemi SCADA alarm sayfası örneği.	23
Şekil 3.1. Çalışma alanının yapısal gösterimi.	24
Şekil 3.2. Saatlik talep faktörü.	26
Şekil 3.3. SDPA algoritması.	32
Şekil 4.1. Mevcut pompa C çalışma ve depo C seviye durumları.	34
Şekil 4.2. Optimizasyon sonrası pompa C çalışma ve depo C seviye durumları. ..	34
Şekil 4.3. Mevcut pompa B çalışma ve depo B seviye durumları.	36
Şekil 4.4. Optimizasyon sonrası pompa B çalışma ve depo B seviye durumları. ..	36
Şekil 4.5. Mevcut pompa A çalışma ve depo A seviye durumları.	38
Şekil 4.6. Pompa B ve C optimizasyon sonrası pompa A çalışma ve depo A seviye durumları.	39
Şekil 4.7. Tüm pompaların optimizasyonu sonrası pompa A çalışma ve depo A seviye durumları.	40
Şekil 4.8. SDPA kullanılması sonrası pompa C çalışma ve depo C seviye durumları.	42

Şekil 4.9. SDPA kullanılması sonrası pompa B çalışma ve depo B seviye durumları.

..... 43



TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1. Çalışma alanı verileri.	25
Tablo 3.2. Üç zamanlı elektrik tarife fiyatlandırması.	25
Tablo 3.3. Saatlik talep faktörü değerleri.	26
Tablo 3.4. Her bir tarifiedeki düğüm talepleri.	30
Tablo 4.1. C pompası için WLC ve SDPA'nın karşılaştırılması.	35
Tablo 4.2. B pompası için WLC ve SDPA'nın karşılaştırılması.	37
Tablo 4.3. Yalnızca B ve C pompa optimizasyonunun A pompasına etkisi.	39
Tablo 4.4. A Pompası için WLC ve SDPA'nın karşılaştırılması.	41
Tablo 4.5. C pompası için WLC, SDPA ve önerilen SDPA'nın karşılaştırılması..	42
Tablo 4.6. B pompası için WLC, SDPA ve önerilen SDPA'nın karşılaştırılması..	43

ÖZET

Anahtar kelimeler: Çok aşamalı pompalama istasyonları, optimizasyon algoritması, elektrik tarifiesi, enerji verimliliği, yük yönetimi, yük kaydırma, PLC, SCADA.

Su pompalama sisteminde optimizasyonun önemi, belirli bir zaman dilimindeki talebin karşılanması ve pompalama sisteminin işletim maliyetinin azaltılması ile temsil edilir. Bu çalışma, karmaşık çok aşamalı bir pompalama sistemini alt sistemlere bölerek, her bir alt sistemi ayrı ayrı optimize ederek tüm pompalama sistemini optimize etmek için bir yöntem önermektedir. Her bir alt sistem için çok zamanlı elektrik tarifiesi ve su talebi dikkate alınarak, son aşamadan ilk aşamaya kadar teker teker Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması (SDPA) kullanılıp optimize edilmiştir. Türkiye'de Sakarya ilindeki su temin sistemi bir olay çalışması olarak incelenmiştir. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin puant zaman periyodunun yükünü puant dışı (gündüz veya gece) zaman periyoduna kaydırarak enerji maliyetini düşürmede önemli ölçüde başarılı olabileceğini gösterir. Klasik su seviye kontrolüyle kıyaslandığında ikinci aşamadaki iki pompa için maliyeti yaklaşık %40, %42 ve birinci aşamadaki pompa için %21 azaltmıştır.

AN ENERGY-EFFICIENT CONTROL APPROACH FOR MULTI-PUMP WATER PUMPING STATIONS

SUMMARY

Keywords: Multi-level pumping stations, optimization algorithm, electricity tariff, energy efficiency, load management, load shifting, PLC, SCADA.

The importance of the optimization in the water pumping system is represented in supplying demand in a given time period and reduces the operation cost of the pumping system. This study has proposed a method for solving a complex multi-level pumping system by dividing them into subsystems and optimize each subsystem separately in order to optimize the whole pumping system. Taking into account the Time-of-Use (TOU) electricity tariff and water demand, each subsystem has been optimized using a simplified dynamic programming algorithm (SDPA) separately starting from the last level to the first level. The water supply system in Sakarya city in Turkey was investigated as a case study. The simulation results show that the proposed method can significantly succeed in reducing energy cost by shift the load of the peak time period to the off-peak or the standard time period, which reduced the cost by approximately 40%, 42%, for two pumps in the second level and 21% for the pump in the first level compared with conventional water level control.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1.1. Genel

Günlük yaşantımızı büyük ölçüde etkileyen alanlardan olan iklimlendirme sistemleri, petrol ve gaz boru hattı taşımacılığı, sulama, atık su arıtımı, su temini gibi alanlarda pompalar yaygın olarak kullanılmaktadır [1]. Su temini ve atık su arıtımında enerji kullanımı ulusal düzeyde önemlidir ve bu kullanımın %90'ından fazlası pompalama amaçlı olmaktadır [2].

Dünya çapında elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık %20'si pompalama sistemleri tarafından gerçekleştirilmektedir [3]. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki yıllık tüketilen toplam elektrik enerjisinin yaklaşık %3-4'ü su ve atık su sistemleri tarafından kullanılmaktadır [4]. Su teminindeki elektrik tüketimi, toplam su üretim maliyetinin yaklaşık %30-50'sine tekabül etmektedir, bu gerekçeyle elektrik tüketimini azaltmak sadece su temin işletmelerine ekonomik fayda sağlamakla kalmaz aynı zamanda ulusal enerji yoğunluğunu da azaltır [5]. Bu nedenle su temini sistemlerinde enerji maliyetini mümkün olduğunca en aza indirmek ve bunun nasıl yapıldığı önemlidir.

Pompalama sistemindeki enerji tüketim maliyetinin düşürülmesi, enerji verimliliği ve yük yönetimi olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. Enerji verimliliği, tüketilen net enerji miktarını azaltmayı, yük yönetimi ise yoğun enerji talep dönemindeki yükü azaltmayı amaçlamaktadır. Yük yönetiminin en yaygın şekli yük kaydırma [6]. Yük kaydırma için operasyonlarda yüksek enerji talebi dönemindeki yükler, mümkün olduğunca düşük enerji talebi dönemine kaydırılır [7],[8]. Elektrik sağlayıcıları, tüketicileri yük kaydırma uygulamalarını kullanmaya teşvik etmek amacı ile çok zamanlı elektrik tarife seçeneğini sunmaktadır. Çok zamanlı tarifeler yüksek talep dönemlerinde daha yüksek fiyatlandırma, düşük talep dönemlerinde daha düşük

fiyatlandırma esasına dayanmaktadır. Pompalama sistemlerinin enerji verimliliği, ekipmanların en verimli noktada işletimi ve mevcuttaki ekipmanın verimli ekipmanla değişimi yapılarak sağlanabilirken pompalama sistemlerinde yük kaydırma yöntemi ise su depolama birimlerinden yararlanarak bir strateji geliştirmektir.

Çok zamanlı tarife kullanımında yük kaydırma işlemi, su ihtiyacını karşılayacak şekilde su debisinin ve pompanın açma/kapama durumunun kontrol edilmesini ve aynı zamanda enerji maliyetinin en aza indirilmesinin gerçekleştirilmesini gerektirir, zaman koordinasyon kontrolüne tipik bir örnektir. Başka bir deyişle geçici depolama alanının yeterince büyük olduğu durumlarda pompalama sistemini optimize etmek için daha özgürce davranılabilir, bu sayede yük kaydırma teknikleri ile çok zamanlı tarife kullanılarak enerji maliyetinde azami derecede düşüş sağlanabilir. Pompalama zamanlamasının kaydırılması, su depolama tanklarında daha önceden depolanmış suyun stratejik olarak kullanılmasıyla mümkün olur ve bu da pompaların puant saatlerinde kapatılmasına veya asgari düzeyde kullanılmasına izin verir. Teorik olarak, bu depolar yoğun saatlerde boşaltılabilir ve maliyetleri en aza indirmek için yoğun olmayan saatlerde yeniden doldurulabilir [9]. Böylece kullanılan toplam enerji miktarı değişmez iken, kullanılacak olan enerjinin büyük bir kısmı ucuz tarifiede, mümkün olduğunca az bir kısmı da pahalı tarifiede kullanılarak su pompalanır ve toplam maliyette bir düşüş sağlanır.

Optimizasyon açısından bakıldığında, pompanın çalışma/durma periyod seçimi ne kadar küçük olursa optimizasyon o kadar iyi olur. Bununla birlikte bu süre çok kısa ise pompaların çalışma sıklığı artabilir, bu da pompaların kullanım ömrünü kısaltır ve bakım maliyetini artırır [10]. Bu nedenle, geçerli duruma göre denge noktası aramak, yani uygun çalışma periyodu seçimi önemlidir [11].

Su pompalama sistemlerinde işletim planlaması optimize edildiğinde, pompalar ve sistem altyapıları gibi fiziksel unsurlarda herhangi bir değişikliğe ihtiyaç duyulmadan operasyon maliyetinde kayda değer bir azalma elde edilebilir [12]. Fiziksel elemanlar değiştirilmediğinde enerji maliyeti, elektrik tüketimi ve elektrik fiyat yapısı (çok zamanlı tarife) ile ilgilidir [11].

1.2. Benzer Çalışmalar

Gong ve Cheng, Cheng ve ark. yaptıkları çalışmalarda [13]–[15] ayrıştırma-dinamik programlama çözüm birleştirilmesi (Decomposition–Dynamic Programming Aggregation DDPA) algoritması geliştirilmiş ve büyük ölçekli şebeke sistemlerinde ardışık karar problemlerini çözmek için kullanılmaktadır. Bu çalışmalarda DDPA algoritmasının temel stratejisi: büyük sistem problemlerini ayrı ayrı çözmek için alt problemlere bölmek ve daha sonra ilişkili değişkenler ve her bir alt problemin optimal değeri arasındaki ilişkiye dayanarak bu alt problemlerin çözümlerini toplamak, son olarak ilişkili değişkenin global optimal çözümü ve karşılık gelen optimal değer elde edilmesidir.

Zhang ve ark. [6] yaptıkları çalışmada pompa istasyonu sistemlerini çok aşamalı bir pompalama sistemi olarak modellemişlerdir. Mevcutta var olan pompa düzenlemesini dikkate alarak farklı aşamaları sınıflandırmışlardır. Her bir aşama, aynı giriş ve çıkış borularını paylaşan birbirine bağlı bir veya daha çok pompa veya pompa kümesinden oluşabilmektedir.

Su transfer projelerin esası, bölgesel su arz ve talep açıklığına çözüm getirmek ve su kaynakları yönetiminin optimize edilmesidir. Kaskad pompa istasyonları (Cascade Pumping Stations CPSs), suyu daha alçakta bulunan su kaynaklarından daha yüksek yerlerdeki talep alanlarına aktaran birincil taşıyıcılardır. Zhang ve ark. [16] açık su kanallı su transfer sistemlerindeki kaskad pompalama istasyonları üzerine çalışma yapmışlar ve çalışmalarında ara istasyonlardan bazılarını es geçmeye dayalı optimize edilmiş bir programlama yöntemini önermişlerdir.

Zheng ve Huang [11] dağıtık su temin sistemi örneği olan iki aşamalı bir pompalama istasyonunu incelemişlerdir. Çalışmalarında elektrik maliyetinin düşürülmesi için kırsal alan su talebini ve zamana göre fiyatlandırmayı dikkate alınarak geliştirilmiş dinamik programlama algoritması (Improved Dynamic Programming Algorithm IDPA) önerilmektedir.

1.3. Tezin Amacı

Bu çalışmada, Sakarya ilindeki çok aşamalı (kaskad yapıdaki) bir su pompalama sistemi çalışma alanı olarak seçilmiştir. Sakarya şehrinde hizmet veren elektrik dağıtım şirketi (Sepaş), diğer birçok elektrik hizmet sağlayıcı şirkete benzer şekilde (puant zamanında yüksek enerji fiyatlandırılması) üç zamanlı elektrik tarifesine {Gece, Gündüz, Puant} göre de ücretlendirme yapmaktadır.

Yapılan bu çalışmada, fiziksel herhangi bir değişiklik yapmaksızın üç zamanlı tarife göz önünde bulundurularak, seçilen çalışma alanındaki yüksek su depolarını kullanarak, pompalama zamanlarının optimize edilmesiyle enerji maliyetinin azaltılması olasılığı değerlendirilecektir.

Seçilen bu çalışma alanındaki çok aşamalı pompalama sistemi alt sistemlere ayrılarak su temin sisteminin son aşamasından ilk aşamasına (ana kaynağa) kadar her bir alt sistemin “Sadeleştirilmiş Dinamik Programlama Algoritması” (SDPA) [8] kullanılarak ayrı ayrı optimize edilmesiyle nihai olarak tüm sistemin optimize edilmesi ve kaskad sistemlerde son aşamada yapılan optimizasyonun ilk aşamalara etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır.

1.4. Tez Aşamaları

Bu tez aşağıdaki gibi düzenlenmiştir. Bölüm 2’de, Otomasyon ve “Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama” (SCADA) sistemlerinin gerekliliğine değinilmiş, proses kontrolünde röleler ve “Programlanabilir Lojik Kontrolörler” (PLC) kullanılmasından bahsedilip PLC’lerin genel yapısı, geçmişi ve gelişimi, ayrıca “Açık İletişim Platformu” (OPC) anlatılmıştır. SCADA sistemlerinin temel bileşenleri açıklanıp SCADA sistemlerinin gelişimi ve su temin sistemlerinde SCADA kullanımından bahsedilmiştir. Bölüm 3’te Problem denklemlerle ifade edilmiş, problemi çözmek için kullanılan SDPA algoritmasının tanıtımı yapılmış ve algoritmanın geliştirilen yönünden bahsedilmiştir. Bölüm 4’te belirlenen çalışma alanındaki pompalama istasyonlarına ait mevcut ve optimizasyon sonrası durumlar açıklanmış ve

karşılaştırılmıştır. Ayrıca önerilen SDPA algoritmasında yapılan iyileştirmenin pozitif etkisi açıklanmıştır. Bölüm 5’te sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.



BÖLÜM 2. OTOMASYON VE SCADA SİSTEMLERİNİN GEREKLİLİĞİ

Su idarelerinin başlıca hedeflerinden biri, son tüketiciye suyu olabildiğince kesintisiz ulaştırmak ve son tüketiciyi memnun etmektir. Birçok su idaresinin istasyonları coğrafi olarak farklı konumlara yayılmıştır ve bu nedenle büyük bir kontrol yükü ve izleme gerektirmektedir. Günümüzde bu istasyonların kontrolü PLC gibi kontrolörler tarafından yapılmaktadır ve otonom bir şekilde çalışmaya devam edebilecek niteliktedir. Su idareleri, olası normal dışı çalışmanın farkına varabilmek ve olası arızalara erken müdahale edebilmek için istasyon çalışmalarının doğruluğunu takip etmek durumunda kalır. Bununla birlikte daha önceden belirlenmiş seviye çalışma sınırları gibi istasyon parametrelerinin ihtiyaç halinde değiştirilmesi gerekmektedir. Bütün istasyonlar için geçerli olan bu durumlar SCADA sistemi kullanım ihtiyacını doğurur. SCADA sayesinde bu istasyonlar bir veya daha fazla merkezden anlık izlenip kontrol edilebilir, parametre değişiklikleri yapılabilir. Aynı zamanda istenilen verilerin SCADA sistemiyle bir veri tabanına kaydedilmesi mümkün olmaktadır. Kaydedilen bu veri setleri, enerji verimliliğinin yanı sıra birçok konuda analiz yapılabilmesini sağlayarak, idarelerin yatırım ve planlama konularında fikir edinmelerine olanak tanımaktadır.

Endüstriyel proseslerin işletiminin optimize edilmesi için gelişmiş SCADA sistemleri önemli bir araçtır. Günümüzde birçok su idaresi, sistemlerini kontrol ve izlemek için SCADA sistemini kullanmaya yönelmektedir. SCADA sistemleri, tüm su proseslerini hassas bir şekilde kontrol etmek ve proses işletim iyileştirmesi için kullanılmaktadır. Genel olarak SCADA sistemleri, programlanabilir lojik kontrolörler (PLC'ler), uzak terminal üniteleri (RTU'lar) gibi cihazlarının saha ekipmanlarından topladıkları verileri (su debisi, basınç, depo seviyeleri, vana durumu, pompa durumu, işletim parametreleri vb.) alır ve operasyon personeli tarafından görüntülenecek veya proses analizinde kullanılması için biçimlendirir [17]–[19].

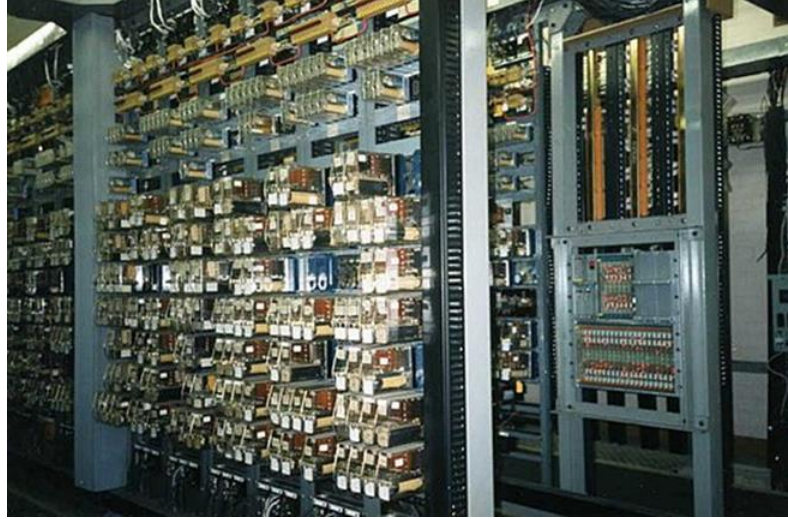
Pompalama ve su arıtımını aktif olarak kontrol etme yeteneğine sahip otomatik SCADA sistemlerinin kullanımı önemli miktarda elektrik tasarrufu sağlayabilir. Enerji verimliliği genellikle proses iyileştirilmesinin bir yan ürünü olarak görülür ve SCADA sistemlerinin özel bir odağı değildir [18]. Su dağıtım sistemlerinde SCADA'nın kullanılması ayrıca pompa çalışmalarını optimize edebilecek yük kaydırma algoritmalarının uygulanmasına olanak sağlayacak bir alt yapı hazırlar.

2.1. Programlanabilir Lojik Kontrolör

Programlanabilir lojik kontrolörler (PLC), zorlu ortamlarda çalışması için uygun olarak tasarlanan, dijital ve analog giriş çıkışlarının çoklu düzenlemelerinin yapılabilirdiği, kontrol işlemlerini gerçekleştirebilen mikroişlemci temelli cihazlardır ve endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. PLC'ler belirli durumlara tepki vermek için programlandıktan sonra herhangi bir müdahale gerektirmeden içindeki lojiği koşturabilir, yani otomatik bir şekilde işlemleri yapabilir.

2.1.1. Röle tabanlı kontrolden PLC'ye geçiş

PLC'nin icadından önce proseslerdeki kontrol işlemleri, rölelerle kurulan devreler aracılığıyla gerçekleştiriliyordu. 1800'lerin sonlarından bu yana basit proses kontrolünde yer bulan röleler ilk olarak demiryolu hemzemin geçit kontrolünde kullanılmıştır. Demir yollarında kullanılan bu röle devreleri, bariyer ve ikaz lambalarının kontrol altına alınmasını sağlayarak hemzemin geçitlerde meydana gelen kaza sayısının azaltılmasına yardımcı olmuştur [20].



Şekil 2.1. Röle panoları [21].

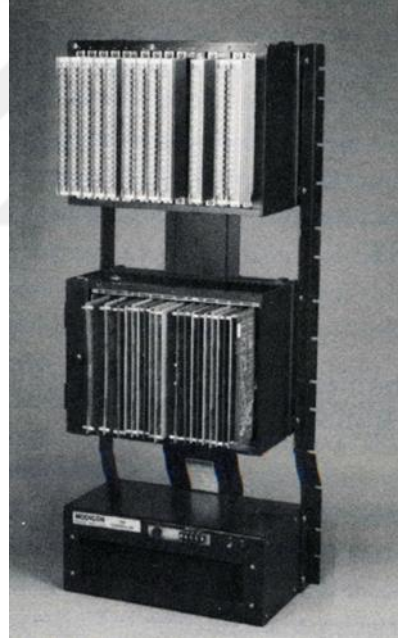
Otomotiv üretim tesislerinde makine kontrol sistemleri, röle tabanlı kontrol devreleriyle kurulu panolarla (Şekil 2.1.) sağlanıyordu. Yüzlerce hatta binlerce röleden oluşan bu panolar oldukça komplekti, hata teşhisi için rölelerin ve bir yığın kablonun takibi gerekiyordu. Yeni bir otomobil modeli için yeni kontrol devreleri kurulmalıydı ve yeni bir kontrol devresinin kurulması için gereken süre boyunca üretim durmak zorundaydı. Üretimin durması ve röle devrelerinin yeniden hazırlanmasının yeni maliyetler getirmesi otomotiv sektörü için bir problemdi. Bilgisayar kullanımının yaygınlaşmasıyla bilgisayar tabanlı sistemlerin ucuzlaması, kontrol alanlarında kullanılmalarının düşünülmesini sağladı. Bu fikir otomotiv sektörüne cazip gelse de mühendisler için rahatsız ediciydi ve çoğu bu fikre pek sıcak bakmamıştı [20], [22].

Bilgisayarların çevrim kontrolüne dahil edilmesi 1962 yılını bulmuştu [23]. Mühendisler için oldukça yeni ve kontrol için kullanılmayacak kadar güveniliriz olarak görülüyorlardı. Ayrıca röle panolarının yerine bilgisayar tabanlı kontrol sistemlerinin kullanılması durumunda mühendislerin ve teknisyenlerin müdahale ve sorun giderme için FORTRAN ve/veya assembly dilini öğrenmeleri gerekebilirdi [24].

Bir otomobil üreticisi olan General Motor'un Hydra-matic bölümü mühendisleri, röle kontrol devrelerine alternatif olarak standart makine kontrolörü adını verdikleri bir cihazın tasarlanması için gereksinim listelerini hazırladılar ve bu listeyi [25] üretici firma adaylarına gönderdiler. Gönderilen listede aşağıdaki istekler sıralanmıştı.

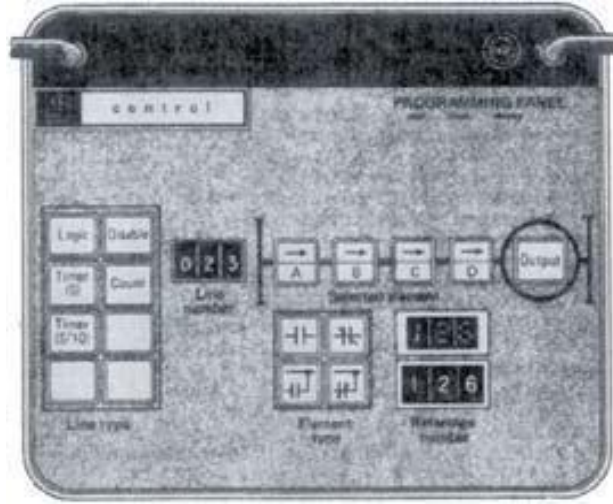
- Endüstriyel bir ortamda zorlu şartlar altında (toz, nem, elektromanyetizma vb.) çalışmalı
- Mevcut röle tabanlı kontrol sistemi ile rekabetçi maliyette ancak bilgisayar gibi esnek olabilecek katı hal sistemi
- Bakımı kolayca yapılabilen ve zaten kabul görmüş olan röle merdiven mantığıyla programlanabilmeli
- Bileşenlerinin kolay, hızlı değişimi sağlanabilecek ve genişletilebilirlik için modüler form olması gerekmektedir.

Farklı tasarımlar arasından kazanan tasarım, Dick Morley ve şirketi Bedford Associates'in sunduğu Modicon084 (Şekil 2.2.) oldu. 1968 yılında tasarlanmış bu ilk PLC'nin adına, modüler dijital kontrolör kısaltması olan MODICON verilmişti [21].



Şekil 2.2. İlk üretilen PLC: Modicon 084 [26].

PLC ile programlanabilir sıralı mantık kullanarak açma-kapama kontrolü gerçekleştirilebildi. Röle tabanlı kontrol panolarının tekrar kablolamasına gerek duyulmadan, teknik adamların sıralı mantığı değiştirmesine olanak tanıdı [27].



Şekil 2.3. Modicon 084'ün orijinal programlama paneli [20].

Modicon 084, mühendislerin ve teknisyenlerin zaten aşına olduğu röle lojik devrelerine benzeyen merdiven diyagram (ladder) ile programlanabiliyordu, bilgisayar programlama dilleri gibi ek uzmanlık gerektirmiyordu [28]. Yukarıda Şekil 2.3'te bu programlama panelinin resmi yer almaktadır. Normalde açık, normalde kapalı kontakları ve alttaki dallanma butonları rahatlıkla görülmektedir. Günümüzde bu programlama panelleri yerine markaların kendi programlama yazılımları kullanılarak program PLC'ye yüklenmektedir. Röle lojik devrelerinin yerini alan PLC'lerin çıkmasından sonra röleler artık hiç kullanılmıyor gibi bir anlam çıkartılmamalıdır. PLC aracılığıyla çok sayıda röle kullanılarak yapılan ardışık lojik işlemleri, mekanik sayaçlarla yapılan sayma işlemleri, zaman rölesinin yaptığı zaman ayarına göre kontak değişimleri gibi birçok işlem yapılabilirdi. Bu da birçok kumanda elemanlarının kullanım sayısını özellikle de röle kullanım sayısını azalttı.

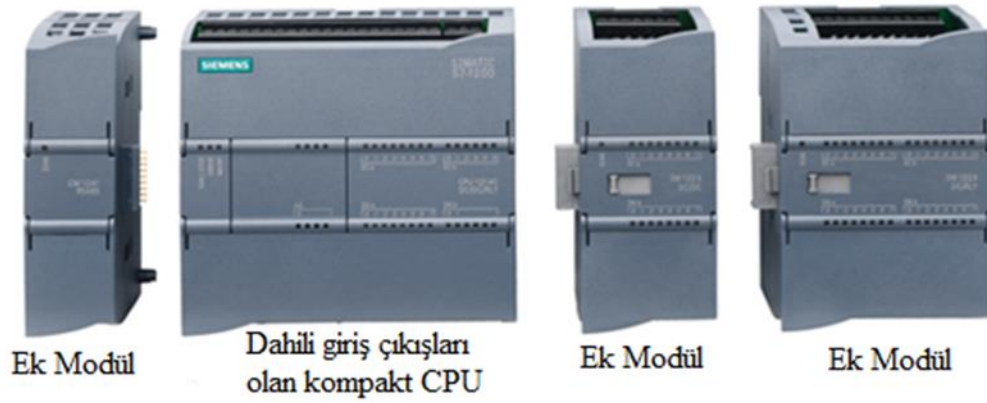
2.1.2. PLC'nin genel yapısı ve gelişimi

İlk PLC'nin geliştirilmesinden hemen sonra PLC'ler otomotiv dışında diğer endüstriyel alanlarda da kullanılmaya başlandı ve giriş/çıkış sayıları giderek arttırıldı. İlk olarak Amerika'da üretilen PLC'nin büyük ilgi görmesiyle Avrupa ve Japonya gibi üreticiler de pazara girdi ve rekabet arttı. Oluşan bu rekabet ve teknolojik gelişmelerle birlikte PLC alanında birçok yenilik gerçekleştirildi. Geliştirilen yeniliklerin başlıca olanları aşağıda listelenmiştir [21], [29]–[31].

- Aritmetik işlemler, PID kontrolü ve analog verileri işleme yeteneği
- Hiyerarşik konfigürasyonlarda PLC'lerin kullanılması, güvenlikle ilgili ilk PLC'ler, mikroişlemci teknolojisi tabanlı PLC tanıtımı
- Modbus ağ iletişimleri, veri otoyolları ağları
- Operatör ara yüzleri ve 3. Parti çevre birimlerinin kullanılabilmesi
- Çok işlemcili PLC'lerin tanıtımı, kayan nokta işlemlerinin yapılabilmesi.
- Genişletilmiş talimat listeleri
- Profibus, Ethernet bağlantıları
- Açık ağ yapısı
- Hareket kontrolü

PLC temel bileşenleri; merkezi işleme birimi (CPU), giriş ve çıkış ara birimlerinden oluşmaktadır. Basitçe ifade etmek gerekirse PLC'nin giriş birimlerinden alınan sinyaller, CPU tarafından PLC içindeki lojiğe bağlı olarak programı işler ve çıkış birimlerine iletilir. Detaylandırarak olursak PLC'nin çalışma mantığı şöyledir: Bir tarama döngüsü başlatılır, girişler taranır ve giriş işlem görüntüsünde saklanır, saklanan giriş görüntüleri kullanılarak program yürütülür ve işlem sonuçlarını çıkış işlem görüntüsü olarak saklar ve son adım olarak çıkış işlem görüntülerini kullanılarak çıkış sinyallerine aktarılır döngü biter ve bu döngü sürekli olarak tekrar edilir.

PLC'ler yapısal olarak kompakt ve/veya modüler olabilmektedir. Kompakt versiyonlarında dahili giriş çıkış birimleri vardır ve bazı kompakt versiyonlara harici modül ilavesi yapılamamaktadır. Modüler yapıda olan PLC modellerinde ise harici dijital veya analog giriş/çıkış modülleri, harici teknoloji modülleri gibi modüllerle birim ilavesi yapmak mümkündür. Şekil 2.4.'te hem kompakt hem modüler olan bir PLC örneği yer almaktadır. PLC marka ve modeline göre desteklediği harici modül sayısı değişebilmektedir. Kapsamlı uygulamalar daha çok harici modül gerektirmekte ve PLC'nin desteklediği eklenebilir harici modül sayısı daha önemli hale gelmektedir.



Şekil 2.4. Kompakt ve modüler olan PLC örneği [32].

Harici hafıza kartlarıyla, bazı PLC çeşitlerinde PLC'ye program yüklenebilmektedir. Bazı PLC'ler harici hafıza kartsız çalışmaz, harici hafıza kartına ihtiyaç duymayan PLC'lerde ise veri depolama alanını artırmak için de hafıza kartı ekstra olarak kullanılabilir. Uygulamaya göre tercih edilecek PLC modelinin özellikleri, teknik bilgi dokümanlarından kontrol edilerek; hafıza kapasiteleri, talimat başına işleme süreleri, çalışma ortamı şartlarına uyumluluğu, dahili haberleşme portu, desteklediği protokoller, desteklediği PLC'ye özgü programlama dilleri ve daha spesifik özellikler göz önünde bulundurularak tercih yapılmaktadır.

2.2. Açık İletişim Platformu

Otomasyonun ilk günlerinde üreticiler kendi cihazları ve uygulamaları arasındaki iletişim için kendilerine özgü protokoller kullandılar. Bu durum kullanıcıları, otomasyon sistemlerine aynı üreticinin farklı cihazını bağlamak için bile üretici firmanın kapısını çalmak zorunda bıraktı ve farklı firmaların cihazlarını bağlamak ise yüksek mühendislik çözümleri demekti [33].

OPC (Açık İletişim Platformu), 1996 yılında PLC'lere özgü çeşitli protokoller ile SCADA (Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama) sistemleri arasında okuma/yazma işlemlerinde standart arabirim sağlamak amacıyla OPC Vakfı tarafından geliştirildi. Başlangıçta Windows işletim sistemi ile sınırlıydı ve Proses Kontrolü için OLE olarak adlandırıldı. Sonraları ise servis odaklı mimarilerin kullanılması gibi çeşitli yenilik

ihtiyaçlarını karşılamak için OPC UA çıkartıldı ve günümüzde OPC Vakfı tarafından OPC açılımı; Açık İletişim Platformu olarak kullanılmaktadır [34].

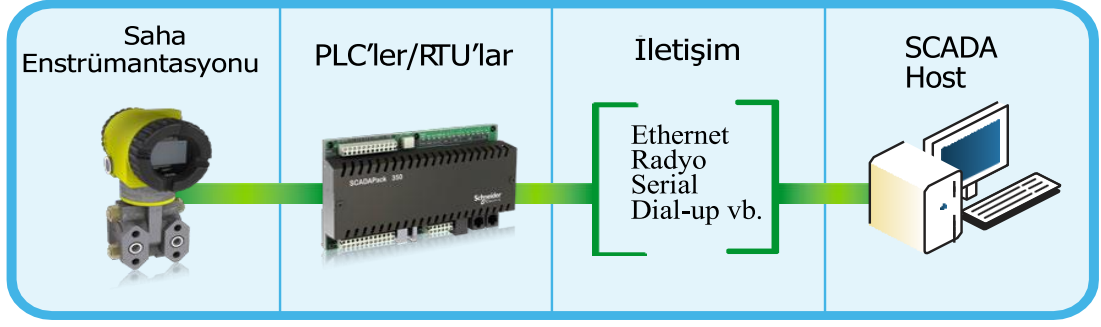
OPC bir dizi özel tanımlamalar ve gereksinimler içeren standarttır ve gerçek zamanlı verilere erişimde istemci-sunucu, sunucu-sunucu arasındaki arabirimi ifade eder. Bağlanabilirlik sorununu çözmek için bu standartlar geliştirilmiştir ve zamanla PLC ve SCADA ile sınırlı kalmayıp kapsamı arttırılmıştır. OPC'nin birçok kontrol cihazının kullandığı haberleşme protokollerini desteklemesi, son kullanıcılar için ekleyecekleri kontrol cihazı seçiminde fazlaca alternatifte sahip olmalarını sağlamaktadır [35]. İletişim yükünün kontrolör üzerinde fazla olduğu (bir PLC'den birden fazla SCADA'nın veri istemesi gibi) durumlarda da OPC kullanılabilir. Böylece PLC sadece OPC ile iletişim kurar, OPC ise diğer istemcilerle iletişimi sağlar ve PLC'nin iletişim yükü azaltılmış olur.

2.3. SCADA Sistemleri

PLC ve RTU gibi kontrolörler otomatik bir çalışma yrtse de çok büyük proseslerde ya da prosesler topluluğunda, genelde bu prosesler farklı konumlarda bulunan çok sayıda PLC/RTU tarafından kontrol edildiğinden, denetleme ve izleme gibi ihtiyaçlar doğar. Prosesleri denetleme ve izleme gereksinimleri, SCADA sistemi aracılığıyla denetleyici kontrol uygulanarak karşılanır. SCADA sistemleri, merkezi veri toplama ve denetleyici kontrolün önemli ve kritik olduğu kurumlarda kullanılır. Genelde bu sistemler, coğrafi olarak kilometrekarelere dağıtılmış saha cihazlarını kontrol etmeyi ve izlemeyi kapsar [36].

2.3.1. SCADA sistemi temel bileşenleri

SCADA sistemleri (şekil 2.5.) temel bileşenler olarak saha enstrümantasyonu, PLC'ler/RTU'lar, iletişim ağları ve SCADA yazılımından oluşmaktadır. Lokal bir alanda çalışan bir SCADA sistemi de bu bileşenleri içerir.



Şekil 2.5. SCADA sistemine genel bakış [37].

Geniş coğrafi alanlara yayılmış SCADA sistemlerinde uzak iletişim ağlarına, uzak cihazlarla iletişimin iyi yönetilmesine ve daha yetenekli SCADA yazılımlarına ihtiyaç duyulabilir.

2.3.1.1. Saha enstrümantasyonu

SCADA sistemini izlemek ve kontrol etmek için sensörler, anahtarlar, vanalar, pompalar gibi birçok saha enstrümanına ihtiyaç vardır. Proseslerin çeşitliliğine, büyüklüğüne ve ihtiyaçlarına göre bu enstrümanlar değişiklik gösterebilmektedir. Saha cihazları zaman içinde geri bildirim sensörleri ve aktüatörlerle donatılmış ve uzaktan kontrol yetenekleri açısından daha uygun hale gelmiştir. Vanalar gibi çoğu saha cihazı artık lokalde manuel olarak kontrol edilmek yerine, cihazın özelliğine bağlı olarak vana açıklığı bile, PLC veya RTU aracılığıyla uzaktan kontrol edilmektedir.

Günümüzde enstrümantasyon tekniği daha nitelikli bilgi ve eğitim gerektirmektedir. Saha enstrümanının, yerleştirileceği yer ve çevresel koşullara uygunluğu göz önünde bulundurularak tercih edilmelidir. Aksi halde zorlu çevre koşulları cihazın uyumlu cihazlarla değiştirilmesi ile sonuçlanabilir veya bir pano içinde tutulması gerekebilir, bu da ekstra bakım maliyeti demektir. Ayrıca elektromanyetik uyumluluk (EMC) standartlarına uyumlu olup çevresindeki elektrikli cihazlar üzerinde istenmeyen etkiler bırakmaması gerekir [38].

SCADA sistemi açısından tüm saha cihazları, dijital giriş/çıkışlar ve analog giriş/çıkışlar olarak ele alınır. Cihazlardan alınan sinyaller, motor kontrol panolarındaki

gerekli sinyallerle birlikte otomasyon panolarına taşınır. Otomasyon panosundan da gereken yerlere de sinyaller aktarılır. Değişken hızlı sürücülerin ve bazı cihazların verileri ise haberleşme (Profinet, Modbus TCP/IP vb.) ile alınabilmekte ve bu cihazlara komutlar yine haberleşme aracılığıyla gönderilebilmektedir.

2.3.1.2. Endüstriyel kontrolörler

SCADA yazılımı ve saha cihazları arasında PLC'ler ve/veya RTU'lar gibi endüstriyel kontrolörler yer alır. Endüstriyel kontrolörler, gerekli saha verilerini ve saha cihazlarının durumlarını toplayarak işler ve SCADA yazılımına iletir. SCADA yazılımından aldığı komutları yerine getirir. PLC/RTU, içerisinde koşturulan lojiğe bağlı olarak uzaktan otomatik ve/veya manuel kontrol yapmaya ve saha verilerinin değerlendirilmesine olanak sağlar. Kısacası uzaktan izleme, denetleyici kontrolü ve etkinleştirme PLC'ler ve RTU'lar aracılığıyla yapılır.

SCADA sistemlerinin başlangıç zamanlarına gidersek RTU'lar sadece saha enstrümanlarının verilerini SCADA bilgisayarına ileten cihazlardı, herhangi bir bilgi işleme ve kontrol yeteneğinden yoksun ama PLC'lere göre gelişmiş iletişim yetenekleri vardı. Bununla birlikte PLC'ler kontrol ve otomasyon için tasarlanmış olduğundan bilgi işleme ve kontrol yetenekleri hep vardı fakat iletişim arabirimleri ve veri kaydı becerileri yoktu. İlk zamanlarda PLC'ler ve RTU'lar farklı özellikleri olan cihazlar olsalar da mevcut gelişmelerle, aralarındaki teknolojik çizgi bulanıklaşmış ve benzer özellikleri taşımaya başlamışlardır [39].

2.3.1.3. Uzak iletişim ağları

Merkezi SCADA sunucusunda bulunan SCADA yazılımı ile sahada bulunan PLC/RTU arasındaki karşılıklı veri aktarımı iletişim ağı sayesinde gerçekleştirilir. İletişim sadece SCADA yazılımı ve PLC/RTU arasında değil, SCADA sunucusu ve istemci bilgisayarlar, web istemcileri, 3. parti yazılımları ve ayrıca birden fazla PLC/RTU arasında olabilmektedir. Kullanılan iletişim ortamları: telefon hatları, kablo, radyo, hücresel, uydu ve fiber optik veya bunların bir kombinasyonu olabilmektedir.

2.3.1.4. SCADA yazılımı

İlk SCADA host ürünleri genellikle imalat tesisleri için tasarlanmıştır ve sistemin tek bir bina veya tesis içinde çalışması yeterliydi. Birinci nesil SCADA sistemleri sınıflandırılmasına giren bu ürünlerin kısıtlı iletişim yetenekleri vardı ve zamanla iletişime duyulan ihtiyaç arttı.

Birinci nesil SCADA Hostlar, uzak cihazlarla iletişimi sağlamak için bir ön uç işlemcisi/sürücüsü (FEP / FED) olarak kullanılan hibrit bir PLC veya RTU'ya gereksinim duyuyordu. Bu şekilde iletişimi sürdürmek maliyetli ve zorluydu. Günümüzde SCADA yazılımlarına entegre edilmiş, farklı protokol türlerini destekleyen sürücüler (drivers) kullanılmaktadır ve bu tür hibrit PLC veya RTU'ya ihtiyaç kalmamıştır. Artık SCADA yazılımı aracılığıyla sahadaki PLC'ler/RTU'lar ile iletişim kurulmaktadır [37].

İlk SCADA sistemlerinde kontrol, donanımsal ve yazılımsal bir platform olan MTU (Master Terminal Unit, Ana Terminal Birimi veya Ana Kontrol Merkezi) tarafından sağlanmıştır. Bu yapılar tam kontrol sistemi olarak kullanılıyordu [40]. Yani sahadaki RTU'ların geçmişte kontrol işlevi olmadığından, tüm lojik bu platformlarda koşuyordu. Sonuç olarak MTU kavramı bahsedilen eski yapıyı temsile daha uygun olsa da bu kavram hala kullanılmaktadır.

Günümüzde ise kontrol yükü genel olarak saha bazında PLC/RTU'lara dağıtılmıştır ve SCADA yazılımıyla veri toplama, izleme ve denetim sağlanmaktadır. SCADA sunucu bilgisayarını ise bu yazılımın çalıştığı, ihtiyaçlara göre yapılandırılmış sunucu olarak nitelendirebiliriz. Coğrafi olarak geniş alana yayılmış sistemlerde bir adet, performans ve yedeklilik gibi gereksinimleri karşılamak için ise birden çok sunucu ve/veya alt sunucu grubu gerekebilir. Uzaktan erişim, SCADA yazılımının yeteneği, kurum ihtiyaçları, uzak iletişim ağ altyapısı ve erişim türlerine göre yapılacak farklı konfigürasyonlarla sağlanabilir.

SCADA yazılımı, sistemin son bileşeni olup geleneksel olarak sistemi temsil eden grafik, alarm, trend, ayar sayfaları, kaydedilmiş verilerden ve çıktısı alınabilen raporlardan oluşmaktadır. Genel olarak bu bilgilere sadece operatörler, mühendisler ve teknisyenlerin kullandıkları özel uygulamalar üzerinden erişim sağlanabiliyordu. Günümüzde kurum içi veya dışı diğer kullanıcıların da kaydedilmiş sistem verilerini analiz edebilmek ve kendi uygulamalarında kullanabilmek için erişim istekleri bulunmaktadır. Birçok SCADA yazılımı, üçüncü parti uygulamaların da kaydedilmiş verilere erişimi için ODBC ve OLE-DB bağlantı desteği vermektedir.

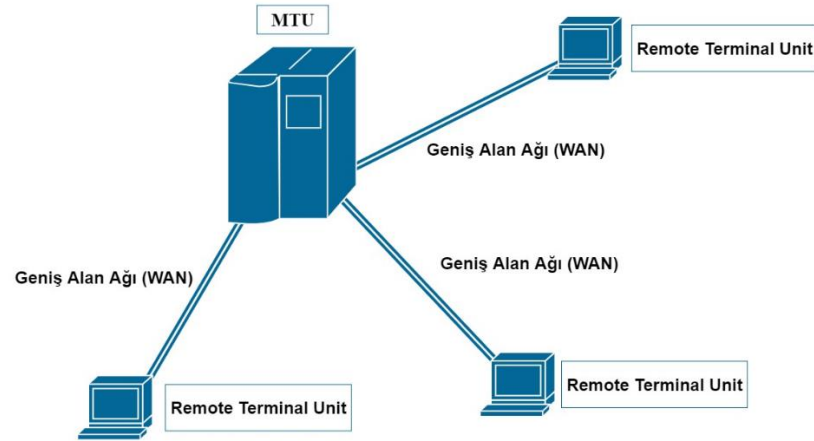
2.3.2. SCADA sistemi nesilleri

SCADA sistemlerinin gelişiminde, ağ teknolojilerinin ve bilgisayarların gelişimleri büyük rol oynamaktadır. Nesiller arasındaki en büyük farklar bu değişimlerin etkisi ile oluşmuştur, ayrıca son kullanıcılarının talep ve ihtiyaçları da bu değişimleri etkilemiştir. SCADA sistem nesillerinin anlaşılması günümüzde de birçok SCADA sisteminde görülebilen entegrasyon problemini ve sistem yapısını anlamaya yardımcı olacaktır.

2.3.2.1. Birinci nesil - Monolitik sistemler

SCADA sistemlerinin ilk dönemlerinde bilgi işleme, merkezi monolitik (Şekil 2.6.) yapıya dayanıyordu ve merkezi birim olarak anaçatı bilgisayar (Şekil 2.7.) kullanılıyordu. Bu sistemlerin ilk geliştirildiklerinde tek amacı prosesi çalıştırmaktı. Diğer sistemlerle bağlantıları yok denecek kadar azdı ve iletişim ağı varla yok arasındaydı [41].

Daha sonraları sahadaki RTU'lar ile iletişim kurma amacıyla geniş alan ağları (WAN) tasarlanmıştı. Bu protokoller günümüz WAN protokolleri işlevlerinden uzaktı, MTU ve RTU'lar arasında tarama ve kontrol dışında pek bir işlevi yoktu. Ayrıca iletişim protokollerinin, üretici firma tescilli olmasından dolayı sadece aynı firmanın tescilli MTU'su ile kullanılabiliyordu. Bu sebeple farklı üretici firmalarına ait RTU'lar ve MTU'ların birbiriyle bağlantısı mümkün değildi [42].



Şekil 2.6. Monolitik SCADA sistemi.

Yedekli çalışma istendiğinde sistemde kullanılan anaçatı bilgisayar sayısı ikiye çıkartılıyordu. Birincil anaçatı bilgisayar sisteminin arızalanması durumunda, veri yolu seviyesinde bağlı olan yedek anaçatı bilgisayarın devreye girmesiyle sistemin yedekli çalışması sağlanıyordu [43].

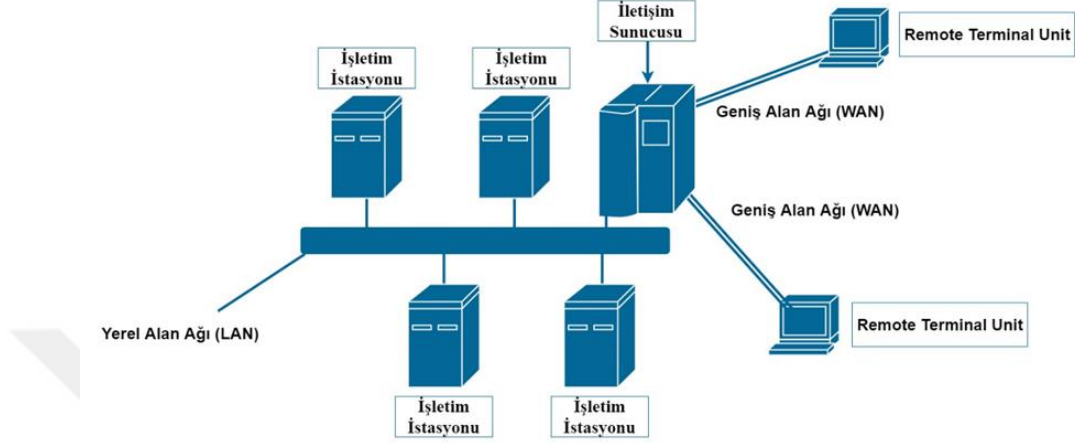


Şekil 2.7. IBM anaçatı bilgisayarlı birinci nesil SCADA [44].

2.3.2.2. İkinci nesil - Dağıtık sistemler

Yerel alan ağlarının kullanılmaya başlanmasıyla SCADA sistemi işlevleri, birinci nesilde kullanılan anaçatı bilgisayardan fiziksel olarak daha küçük ve daha ekonomik

olan mini bilgisayarlarla dağıtıldı ve böylece tek bir işlemci gücü yerine çoklu işlemci gücü ile daha fazla performans elde edildi [45]. Şekil 2.8.'de dağıtık SCADA sisteminin yapısı gösterilmektedir.

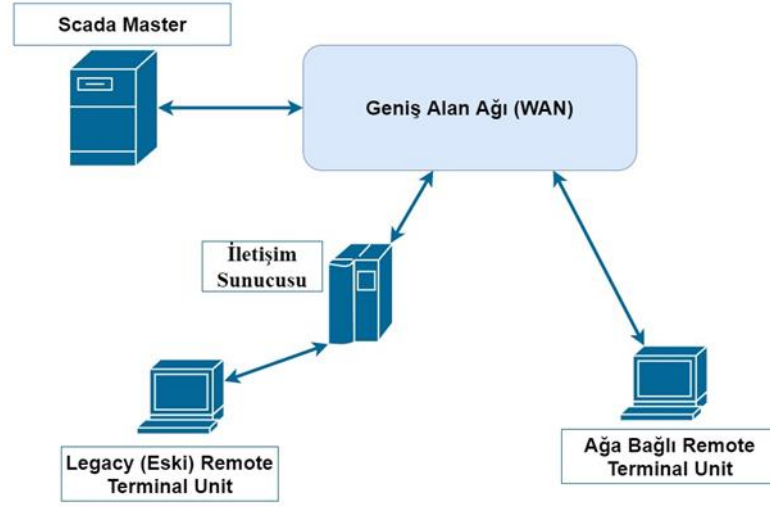


Şekil 2.8. Dağıtık SCADA sistemi.

Mini bilgisayarların kendi aralarında iletişim kurabilmesi ve işlevlerin dağıtılması neticesinde SCADA sisteminin güvenilirliği de artırılmıştır. Örneğin, işlevi sistem operatörlerine insan-makine arayüzü (HMI) sağlamak olan bilgisayar arızalanırsa diğer sistemler çalışmaya devam ediyordu. LAN bağlantıları yakın mesafelerle kısıtlıydı, Sahadaki RTU'larla iletişim kurmak için WAN kullanılmaya devam edildi [45], [46].

2.3.2.3. Üçüncü nesil – Ağ tabanlı sistemler

Açık sistem mimarili üçüncü nesil sistemler, tescilli işletim sistemleri ve iletişim protokollerinin kullanıldığı önceki iki neslin karşıtıdır [47]. Açık standartlar ve protokollerin kullanılmasıyla SCADA sistemi işlevleri LAN yerine WAN üzerinden dağıtılmıştır. SCADA Master/Ana istasyon (MTU) ile iletişim, internet protokolleri (IP) gibi WAN protokolleri aracılığıyla yapıldı. Farklı firmaların ürettiği çevre birimleri (monitör, yazıcı vb.) ağ veya sisteme bağlanabildi [48]. Şekil 2.9.'da ağ tabanlı SCADA sisteminin yapısı gösterilmektedir.



Şekil 2.9. Ağ tabanlı SCADA sistemi.

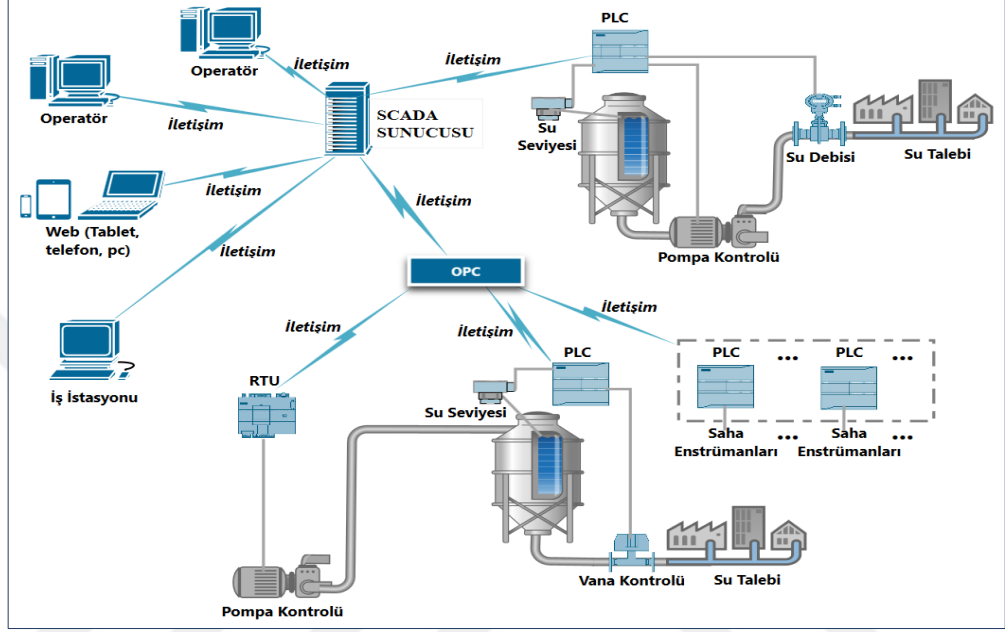
Bu nesil daha geniş coğrafik alana yayılmaya izin verdi ve bunun sonucunda bilgi işleme işi, fiziksel olarak farklı lokasyonlara dağıtılabilir oldu, artık bir felaket sırasında oluşabilecek zararın büyüklüğünü felaketin fiziksel olarak olduğu yerle sınırlandırmak mümkün olabiliyordu. Önceleri anahtar teslim SCADA sistemi kuran firmalar donanım geliştirme işini, birçoğunun adını bugün de bildiğimiz firmalara bıraktı ve SCADA yazılımlarını geliştirmeye odaklandılar [45], [49].

Geçmişte bu sistemler mühendislerin, teknisyenlerin ve operatörlerin erişebildiği dışarıya kapalı sistemlerdi fakat yaşanan teknoloji gelişmeler sayesinde ve dışardan erişim ihtiyaçlarından dolayı dışarıdan erişim sağlanabilir hale dönüştü. Günümüzde çoğunlukla üçüncü nesil, ağ tabanlı SCADA sistemleri kullanılmaktadır ve bu sistemlerin birçoğuna internet üzerinden erişim sağlanabilmektedir. Dışardan erişim özelliğinin kullanılmaya başlanması, sistem kullanıcılarını; sistem yedeklerini periyodik olarak alma, kullanıcı yetkilendirme ve erişim kontrolü, bilgi teknoloji birimleriyle ortak çalışma ve güvenlik önlemleri vb. konularına yönlendirmiştir.

2.3.3. Su temin sistemlerinde SCADA

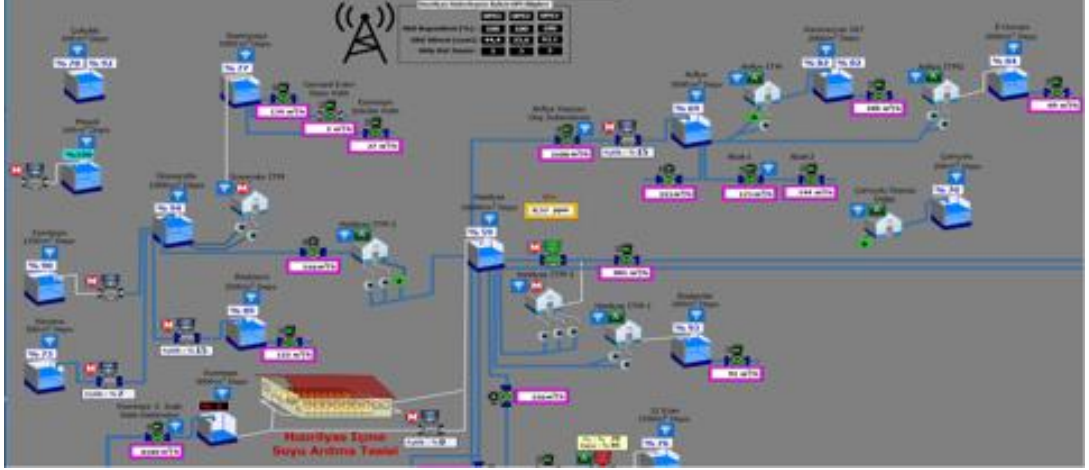
Su temin sistemlerinde kullanılacak SCADA mimarisi, kurumun alt yapısına ve kurum ihtiyaçlarına göre farklı yapılandırmalar ile gerçekleştirilmektedir. İstenilen

performans, saha cihazları çeşitliliği, iletişim alt yapısı ve PLC/RTU'nun sisteme bağlanabilirliği, OPC kullanım ihtiyacı vb. konular ile SCADA mimarisi şekillenmektedir. Örnek bir su temin sistemi SCADA mimarisi Şekil 2.10.'da gösterilmektedir.



Şekil 2.10. Su temin sistemi SCADA mimarisi örneği.

Su temin sistemlerinde farklı lokasyonlarda bulunan PLC'ler/RTU'lar aracılığıyla yerel proses kontrolleri gerçekleştirilir. Kontrol parametrelerinin değişimi, sahadaki cihazların durumlarının izlenilmesi ve kontrolü, SCADA kontrol merkezlerinde bulunan operatörler tarafından SCADA yazılımı ile oluşturulmuş SCADA proje uygulaması sayfaları (Şekil 2.11.) ile gerçekleştirilir.



Şekil 2.11. Su temin sistemi SCADA sayfası örneği [50].

Temsili proses akışı sunumu sayfalarının prosesin gereksiz ayrıntılarını içermeyecek yani operatörün dikkatini dağıtmadan gerekli olan bilgileri gösterecek şekilde tasarımının yapılması en az diğer bileşenler kadar önemlidir. Son dönemlerde bu konuların önemi artmış ve durumsal farkındalığı ön plana çıkartan SCADA sayfa tasarımları [51] gündeme gelmeye başlamıştır.

Su temin sistemlerinde bulanıklık, pH, klor, seviye, akış debisi; vana, pompa durumları; ekipmanın otomatikte/manuelde olma durumu; ekipmanın ne kadar süre çalıştığı bilgisi, istasyon haberleşme durumları; seviyeye göre çalışma durma sınırları, gibi parametreler izlenir ve uygulanan parametreler değiştirilerek yönetilir.

Seviye değerleri ve ekipmanın anormal çalışma durumları alarm olarak yapılandırılabilir. Şekil 2.12.'de örnek bir alarm sayfası görülmektedir. Analog değerlerin alarm verme sınırlarının ayar sayfalarından değiştirilebilir olması sistem yönetimi açısından önemlidir.

Anlık									
Drag column here / flick column up									
Tarih / Zaman	Durum Zamanı	Bölge	İstasyon	Alarm Mesajı	Ekipman Açıklama	Ekipman Adı	Ekipman Türü	Anlık Durum	
1	3/16/2020 2:51 PM	GUNEY TARAKLI	TAR009	DEBIMETRE1 Hata Yok	Taraklı 300m ² Depo Çıkış Debi	DEBIMETRE1	DEBIMETRE	Normal Onay Bekliyor	
2	3/16/2020 1:56 PM	MERKEZ SERDIVAN	SER024	DEBIMETRE1 Hata Yok	32 Evler 1500m ² Depo Giriş Debi	DEBIMETRE1	DEBIMETRE	Normal Onay Bekliyor	
3	3/16/2020 2:01 PM	MERKEZ SERDIVAN	SER016	SEVIYE Değer Normal	Hızırlyas 10000m ² Depo	SEVIYE	SEVIYE	Normal Onay Bekliyor	
4	3/9/2020 8:40 PM	MERKEZ SERDIVAN	SER012	DEBIMETRE1 Hata	Serdivan 1250m ² Depo Giriş Debi	DEBIMETRE1	DEBIMETRE	Alarm Onaylanmıştır	
5	3/14/2020 8:24 AM	MERKEZ SERDIVAN	SER004	DEBIMETRE1 Hata	Üniversite 1000m ² Depo Giriş Debi	DEBIMETRE1	DEBIMETRE	Alarm Onaylanmıştır	
6	3/9/2020 8:40 PM	MERKEZ SERDIVAN	SER003	MOTOR_GENEL Depo Hab. Hata	Hızırlyas Üniversitesi ITM	MOTOR_GENEL	MOTOR_GENEL	Alarm Onaylanmıştır	
7	3/9/2020 8:40 PM	MERKEZ SERDIVAN	SER002	DEBIMETRE2 Hata	Osmanlı Evleri Depo Hattı Debi	DEBIMETRE2	DEBIMETRE	Alarm Onaylanmıştır	
8	3/9/2020 10:07 AM	GUNEY SAPANCA	SAP103	SEVIYE Değer Düşük	Özlemevler ATM Seviye	SEVIYE	SEVIYE	Alarm Onaylanmıştır	
9	3/16/2020 1:43 PM	GUNEY SAPANCA	SAP103	MOTOR3 Hata Yok	Özlemevler ATM Motor3	MOTOR3	MOTOR	Normal Onay Bekliyor	
10	3/16/2020 1:43 PM	GUNEY SAPANCA	SAP103	MOTOR2 Hata Yok	Özlemevler ATM Motor2	MOTOR2	MOTOR	Normal Onay Bekliyor	
11	3/16/2020 1:43 PM	GUNEY SAPANCA	SAP103	MOTOR1 Hata Yok	Özlemevler ATM Motor1	MOTOR1	MOTOR	Normal Onay Bekliyor	
12	3/16/2020 1:43 PM	GUNEY SAPANCA	SAP103	GENEL Enerji Var	Özlemevler ATM	GENEL	GENEL	Normal Onay Bekliyor	
13	3/16/2020 2:50 PM	GUNEY SAPANCA	SAP101	MOTOR3 Hata Yok	Yüzevler ATM Motor3	MOTOR3	MOTOR	Normal Onay Bekliyor	
14	3/16/2020 1:43 PM	GUNEY SAPANCA	SAP101	MOTOR2 Hata Yok	Yüzevler ATM Motor2	MOTOR2	MOTOR	Normal Onay Bekliyor	
15	3/16/2020 1:43 PM	GUNEY SAPANCA	SAP101	MOTOR1 Hata Yok	Yüzevler ATM Motor1	MOTOR1	MOTOR	Normal Onay Bekliyor	
16	3/16/2020 1:43 PM	GUNEY SAPANCA	SAP101	GENEL Enerji Var	Yüzevler ATM	GENEL	GENEL	Normal Onay Bekliyor	
17	3/16/2020 1:43 PM	GUNEY SAPANCA	SAP031	GENEL Enerji Var	Mermuniye 1000m ² Depo	GENEL	GENEL	Normal Onay Bekliyor	
18	3/16/2020 2:46 PM	GUNEY SAPANCA	SAP029	GENEL Enerji Var	Kırkpınar Tepebaşı 200m ² Depo	GENEL	GENEL	Normal Onay Bekliyor	

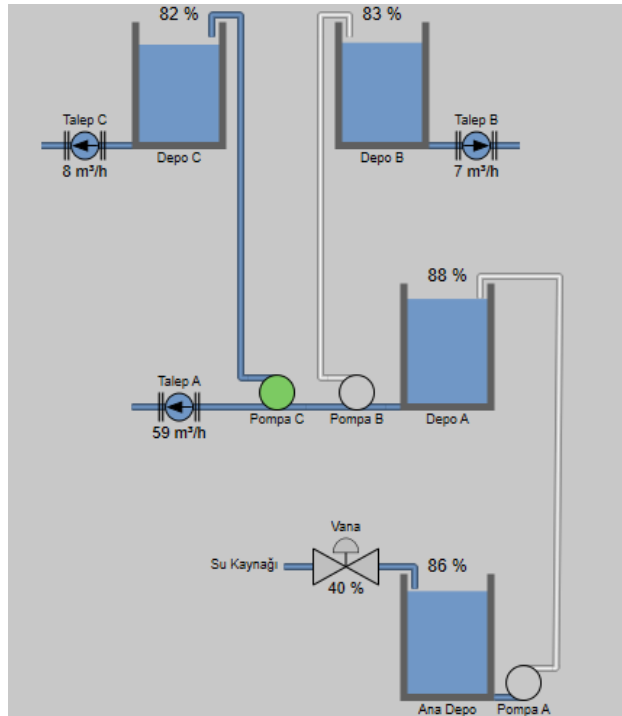
Şekil 2.12. Su temin sistemi SCADA alarm sayfası örneği.

Kaydedilen veriler, zamana göre değişen grafiksel çizimler (trendler) olarak gösterilebilmekte ve yapılan konfigürasyonlara göre raporlar alınabilmektedir. Ayrıca kaydedilen verilerin 3.parti yazılımlarla paylaşılabilmesine olanak sağlayan SCADA yazılımları da mevcuttur. Su temin sistemlerinde SCADA kullanımı, işletim iyileştirmeleri için ve yük kaydırma gibi optimizasyon algoritmalarının uygulanabilmesi için bir alt yapı sağlar. Kapsamlı SCADA veri tabanlarının kullanılabilirliği, optimizasyon modellerinin kullanımını kolaylaştıran pozitif bir etki oluşturur.

BÖLÜM 3. KULLANILAN YÖNTEM

3.1. Çalışma Alanındaki Su Temin Sistemi

Bu çalışma için uygulama alanı olarak Şekil 3.1.'de gösterilen, Sakarya şehrindeki su temin sisteminin, Serdivan ilçesinde bulunan çok aşamalı bir parçası seçilmiştir. Şekil 3.1'de görüldüğü gibi birinci aşama olarak, ana depodaki su A pompası kullanılarak A deposuna yükseltilmektedir. A deposuna yükseltilen su, çevresindeki kullanıcıların su talebini karşılarken aynı zamanda, ikinci aşama olarak, A deposundaki su B pompası kullanılarak B deposuna, C pompası kullanılarak C deposuna yükseltilmektedir. A, B ve C depolarının çıkışlarında birer adet debimetre bulunmakta ve kullanıcı talebinin anlık ve toplam değeri bu debimetreler ile hesaplanabilmektedir. Ana depo, girişinde bulunan bir vana aracılığı ile sürekli dolu tutulduğu sınırsız su kaynağı olarak düşünülmektedir.



Şekil 3.1. Çalışma alanının yapısal gösterimi.

Tablo 3.1. Çalışma alanı verileri.

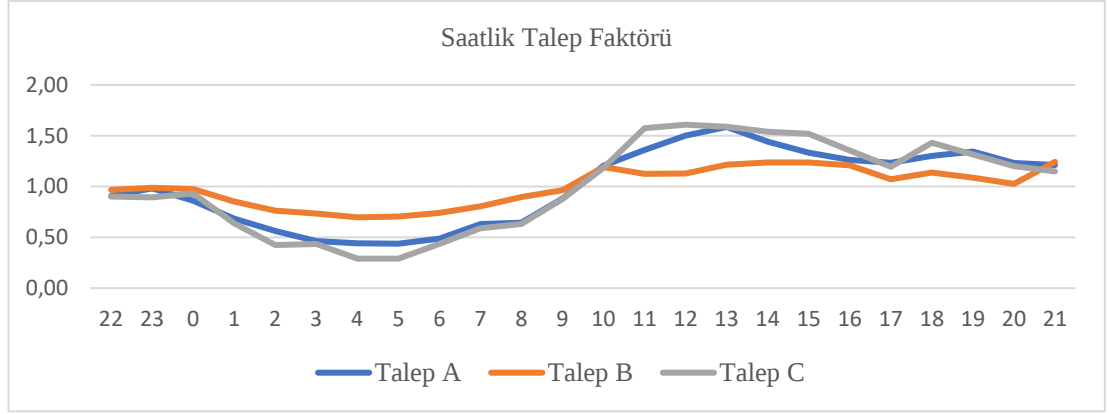
Aşama	Pompa Adı	Pompanın Nominal Gücü	Pompa Su Basma Kapasitesi	Depo Adı	Depo Su Tutma Kapasitesi
1	A	90 kW	244 m ³ /sa	A	328 m ³
2	B	37 kW	57 m ³ /sa	B	308 m ³
2	C	11 kW	34 m ³ /sa	C	192 m ³

Çalışma alanı verileri Tablo 3.1’de verilmiştir. Çok aşamalı pompa istasyonlu su temin sistemlerinde elektrik maliyetini en aza indirmek için A, B, C pompalarının elektrik tüketimini mümkün oldukça puant zaman periyodundan, gece zaman periyoduna veya gündüze kaydırarak, yük kaydırma işleminin gerçekleştirilmesi gerekir. Çok zamanlı tarife, yük kaydırma işleminin temel stratejilerinden biridir. Sepaş tarafından sağlanan elektrik fiyatlandırılmasının üç tarifesi (Gece, Gündüz, Puant) bulunmaktadır [8]. Çok zamanlı tarife dikkate alınarak başlangıç saatini 22:00 olarak seçiyoruz ve bununla birlikte tüm gün 3 ana döneme ayrılıyor. Her periyottaki süre ve elektrik fiyatı Tablo 3.2.’de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Üç zamanlı elektrik tarife fiyatlandırması.

No	Tarife	Zaman Periyodu	Periyot Uzunluğu	Fiyat
1	Gece	22:00 – 06:00	8 saat	0,3547 ₺/kWsa
2	Gündüz	06-00 – 17-00	11 saat	0,597 ₺/kWsa
3	Puant	17:00 – 22:00	5 saat	0,9015 ₺/kWsa

Yukarıdaki olay çalışmasında, üç talep düğümü bulunmaktadır. Başlangıç su deposu seviyelerinin ve günlük talep modelinin bilindiğini varsayıyoruz. İlk talep düğümü olan A talebi için günlük toplam talep 1164 m³, ikinci talep düğümü olan B talebi için 167 m³ ve üçüncü talep düğümü olan C talebi için 165 m³’tür. Her bir düğüm için saatlik talep faktörü Şekil 3.2.’de gösterilmektedir ayrıca Tablo 3.3.’te ayrıntılı bilgi verilmiştir.



Şekil 3.2. Saatlik talep faktörü.

Tablo 3.3. Saatlik talep faktörü değerleri.

SAAT	TALEP A	TALEP B	TALEP C
22:00	0,91	0,97	0,90
23:00	0,98	0,99	0,89
00:00	0,86	0,98	0,93
01:00	0,68	0,85	0,64
02:00	0,56	0,76	0,42
03:00	0,46	0,73	0,44
04:00	0,44	0,70	0,29
05:00	0,44	0,70	0,29
06:00	0,49	0,74	0,44
07:00	0,63	0,81	0,59
08:00	0,64	0,90	0,63
09:00	0,88	0,96	0,88
10:00	1,21	1,19	1,18
11:00	1,36	1,13	1,57
12:00	1,50	1,13	1,61
13:00	1,59	1,21	1,59
14:00	1,44	1,24	1,54
15:00	1,33	1,24	1,52
16:00	1,26	1,21	1,36
17:00	1,23	1,07	1,19
18:00	1,30	1,14	1,43
19:00	1,34	1,09	1,32
20:00	1,23	1,03	1,20
21:00	1,21	1,24	1,15

3.2. Problemin Modellenmesi

Yük kaydırma problemleri, bir optimal zamanlama problemi olarak tanınan, tamsayı programlama problemleridir [52]. Bu çalışmada kullandığımız ve geliştirdiğimiz SDPA bir dinamik programlama optimizasyon tekniğidir.

SDPA'ya göre [8], örnekleme periyodunu bir dakika ve bir gün için $n = 1440$ dakikalık örnekleme periyodu olarak ele alınmaktadır. Pompa durumları i . örnekleme periyodunda, pompa çalışırken durumu $d(i) = 1$, pompa duruyorken durumu $d(i) = 0$ olarak gösterilmektedir. Pompanın bir günlük enerji maliyeti (Z) aşağıdaki gibi hesaplanır.

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

Burada E pompa nominal gücünü (kW), $M(i)$ i . örnekleme periyodundaki elektrik birim fiyatını (TL/kWsa) ve $d(i)$ pompanın i . örnekleme periyodundaki çalışma durumunu göstermektedir.

İçinde bulunulan örnekleme periyodunun sonunda ulaşılacak depo seviyesi $L_{(i)}$ aşağıdaki denklem ile hesaplanır.

$$L_{(i)} = L_{(i-1)} + \left(\frac{P_x \cdot d(i-1) - Q_{(i)}}{R^*} \right) \cdot 100 \quad (3.2)$$

Depo yüzde seviyesinin i . örnekleme periyottaki gösterimi L_i , herhangi bir örnekleme periyodu boyunca pompa basma kapasitesi P_x olup sabit değer olarak kabul edilmiştir, i . örnekleme periyodundaki su talebi gösterimi Q_i ve R^* ise depo kapasitesini temsil etmektedir.

Optimizasyon algoritması kullanırken, işletmeci tarafından L_{min} ile gösterilen minimum seviye %20 ve L_{max} ile gösterilen maksimum seviye %100 olarak depo seviye kısıtları belirlenmiş ve bu değerler tüm depolar için kullanılmıştır.

$$L_{min} \leq L_{(i+1)} \leq L_{max} \quad \forall i \in [1, n] \quad (3.3)$$

Denklem 3.2’de kullanılan $Q_{(i)}$, i . örnekleme periyodundaki su talebini temsil eder ve aşağıdaki denklem ile hesaplanabilir.

$$Q_{(i)} = \frac{C_d \cdot C_{h(i)}}{24 \cdot 60}, \quad \forall i \in [1, n] \quad (3.4)$$

Günlük talep C_d ile gösterilmekte ve $C_{h(i)}$ ise Tablo 3.3.’te verilmiş olan ilgili saatin talep faktörünü göstermektedir.

C deposunun seviyesi aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$L_{C(i)} = L_{C(i-1)} + \left(\frac{P_C \cdot d_C(i-1) - Q_{C(i)}}{R^{C*}} \right) \cdot 100 \quad (3.5)$$

C deposunun yüzde seviyesinin i . örnekleme periyottaki gösterimi $L_{C(i)}$, herhangi bir örnekleme periyodu boyunca Pompa C’nin basma kapasitesi P_C , Pompa C’nin bir önceki periyotta çalışma kararı $d_C(i-1)$, i . örnekleme periyodundaki C düğümündeki su talebi gösterimi $Q_{C(i)}$ ve R^{C*} ise C deposunun kapasitesini temsil etmektedir.

B deposunun seviyesi aşağıdaki formülle hesaplanabilir.

$$L_{B(i)} = L_{B(i-1)} + \left(\frac{P_B \cdot d_B(i-1) - Q_{B(i)}}{R^{B*}} \right) \cdot 100 \quad (3.6)$$

B deposunun yüzde seviyesinin i . örnekleme periyottaki gösterimi $L_{B(i)}$, herhangi bir örnekleme periyodu boyunca Pompa B’nin basma kapasitesi P_B , Pompa B’nin bir

önceki periyotta çalışma kararı $d_B(i-1)$, i . örnekleme periyodundaki B düğümündeki su talebi gösterimi $Q_{B(i)}$ ve R^{B*} ise B deposunun kapasitesini temsil etmektedir.

B ve C pompalarının çalışma durumları göz önünde bulundurularak A deposunun seviyesini Denklem 3.7’de hesaplayabiliriz.

$$L_{A(i)} = L_{A(i-1)} + \left(\frac{P_A \cdot d_A(i-1) - (P_B \cdot d_B(i-1) + P_C \cdot d_C(i-1) + Q_{A(i)})}{R^{A*}} \right) \cdot 100 \quad (3.7)$$

A deposunun yüzde seviyesinin i . örnekleme periyottaki gösterimi $L_{A(i)}$, herhangi bir örnekleme periyodu boyunca Pompa A’nın basma kapasitesi P_A , Pompa A’nın bir önceki periyotta çalışma kararı $d_A(i-1)$, i . örnekleme periyodundaki A düğümündeki su talebi gösterimi $Q_{A(i)}$ ve R^{A*} ise A deposunun kapasitesini temsil etmektedir.

3.3. Uygulanan SDPA Algoritması

Çok aşamalı pompa sistemleri için yukarıdaki zamanlama probleminde, sistem alt sistemlere bölünür ve SDPA algoritması sırasıyla son aşamadan ilk aşamaya doğru her bir alt sisteme uygulanarak tüm sistem optimize edilir.

SDPA algoritmasına göre her bir alt sistem, her bir elektrik zaman tarifesindeki su talebini hesaplayarak ve her bir elektrik zaman tarifesinin sonunda olması gereken depo seviyesini belirleyerek çözülebilir. Son olarak pompa bu hesaplama göre çalıştırılır.

Bu olay çalışmasında, Tablo 3.4.’te gösterildiği gibi üç zaman tarifi ve üç düğüm talebi bulunmaktadır. Örnek olarak, C düğüm talebi için günlük talep baz alınarak her bir elektrik zaman tarifesindeki su talebi oranları aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$C_C = \{C_1; C_2; C_3\} \rightarrow \{Gece; Gündüz; Puant\} \rightarrow \{0,20; 0,54; 0,26\}$$

Tablo 3.4. Her bir tarifiedeki düğüm talepleri.

Tarife	Talep A	Talep B	Talep C
<i>Gece</i>	0,22	0,28	0,20
<i>Gündüz</i>	0,52	0,49	0,54
<i>Puant</i>	0,26	0,23	0,26

Mümkün olan en iyi optimizasyonu elde etmek ve çok zamanlı tarife için maksimum su seviyesi kısıtlamasının üç zamanlı tarife dönemi talebine göre otomatik olarak hesaplanabilmesi için SDPA algoritmasında bir iyileştirme yapılmıştır. Böylece, maksimum optimizasyonu elde etmek için her tarifenin {Gece, Gündüz, Puant} sonunda ulaşılması istenilen depo seviyesi:

$$L = \{L_1, L_2, L_3\} \rightarrow \{Gece, Gündüz, Puant\} \rightarrow \% \{100, L_x, 20\}$$

L_x , Gündüz tarifesinin sonunda olması gereken yüzde seviyedir ve aşağıdaki Denklem 3.9 ile hesaplanabilir. Burada r puant zamanındaki tüketimin depo kapasitesine oranının yüzdelik karşılığıdır ve aşağıdaki Denklem 3.8 ile bulunur.

$$r = \frac{C_d \cdot C_3 \cdot 100}{R^*} \quad (3.8)$$

Herhangi bir düğüm talebi için günlük talep C_d , düğümdeki depo kapasitesini R^* temsil etmektedir.

$$L_x = \begin{cases} r + L_3, & r + L_3 < 100 \\ 100, & r + L_3 \geq 100 \end{cases} \quad (3.9)$$

Yukarıdaki denklem (Denklem 3.9), Talep C ile C Deposu ve Talep B ile B Deposu için uygulanabilir, ancak A Deposu için talep, Talep A'ya eşit olmadığından, Talep A'ya Pompa B ve C'nin verdikleri su miktarları hesaplanıp eklenerek bulunur.

Her bir tarife için dakika cinsinden süre miktarı {Gece; Gündüz; Puant}

$$T = \{T_1; T_2; T_3\} \rightarrow \{Gece; Gündüz; Puant\} \rightarrow \{480; 660; 300\}$$

Yükü gece tarifesine veya gündüz tarifesine kaydırarak maksimum optimizasyon elde etmek için kullanılan SDPA algoritması, Şekil 3.3.'te açıklanmaktadır.

Algoritmanın çalışma modunu belirlemek için S değişkeni kullanılacaktır. Pompa, $S = 0$ başlangıç koşullarına bakarak başlayacak veya duracaktır. $S = 1$, depo doldurma moduna ve $S = 2$ depo boşaltma moduna karşılık gelir. Algoritma koşullara bakarak durumlar arasında geçiş yapar.

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

D dizisi algoritma kararlarını içermektedir ve pompanın her bir dakikalık davranışını yani o dakikada çalışacağını veya duracağını önümüzdeki 24 saat için gösteren bir dizidir. Bu tezin devamında iyileştirme yapılmış algoritma önerilen SDPA olarak geçecektir.

Input: (R^* ; C_d ; C ; L_{max} ; L_{min} ; L ; P_x ; 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 L_i, Q_i with equations (3.2), (3.4)

$Q_s = Q_s + Q_i$

$Q_a = \frac{R^*(L_j - L_i)}{100} + (C_j \cdot C_d - Q_s)$

$T_g = \frac{Q_a}{P_x}$

$T_k = T_k - 1$

if $L_i \leq L_{min}$ **then**

$S = 1$

end if

if $L_i \geq L_{max}$ **then**

$S = 2$

end if

if $S = 1$ **then**

$D[i] = 1$

if $L_i \geq L_{max}$ **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 $L_i \leq L_{min}$ **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** $L_i \geq L_{min}$) **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 3.3. SDPA algoritması.

BÖLÜM 4. SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

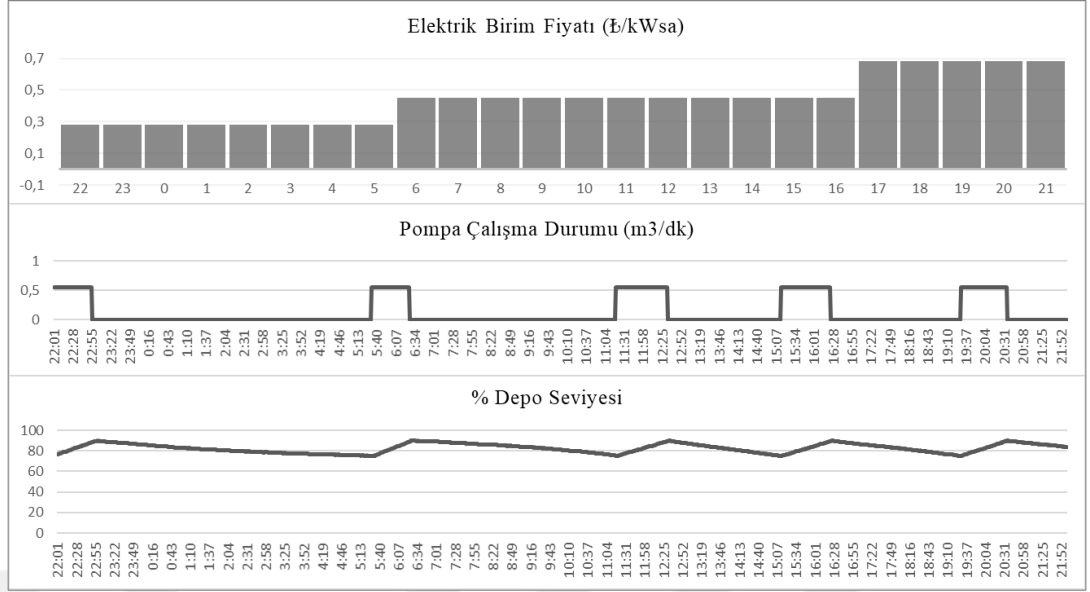
Bu olay çalışmasındaki su temin sistemine ait pompaların mevcut çalışması, depolarda kullanılan seviye sensörlerinin değerlerini referans alan su seviye kontrolü (Water Level Control, WLC) ile gerçekleştirilmektedir. Su seviyesi belirlenmiş minimum seviyeye düştüğünde, depoyu doldurmak için pompa çalıştırılır. Su seviyesi belirlenmiş maksimum seviye ulaştığında pompa kapatılır ve su seviyesinin tekrar minimum seviyeye düşmesi beklenir. Su seviyesi, tüm bu süreçte pompanın çalışma durumunu etkileyen tek faktördür.

Her bir pompalama istasyonu için, WLC’de kullanılan mevcut olay çalışmasından elde edilen aynı veriler, mevcut su tedarik sisteminde önerilen SDPA ile elde edilebilecek enerji maliyetindeki büyük iyileşmeyi göstermek ve bu çalışmada önerilen algoritmayı (SDPA) simüle etmek için toplanmıştır. Algoritma, c# dilinde Core i7 -2720QM 2.2 GHz 16 RAM kullanılarak uygulanmış, her bir pompalama istasyonu için hesaplama süresi 1 saniyeden az sürmüştür.

4.1. İkinci Aşamadaki Pompa C

4.1.1. Pompa C’nin mevcut çalışma durumu

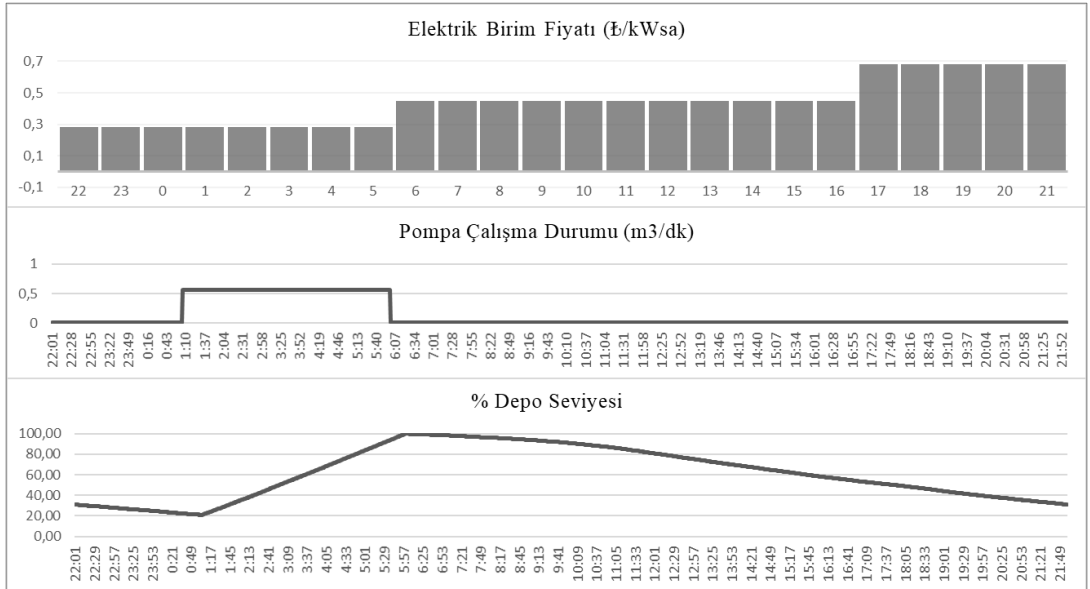
C pompası için mevcut çalışma, C depo seviye kısıtları maksimum seviye %90 ve minimum seviye %75 olacak şekilde WLC yöntemi ile yapılmaktadır. Mevcut su temin sistemindeki pompa çalışma ve depo seviye durumları Şekil 4.1.’de gösterilmektedir. Şekil 4.1.’den görüldüğü üzere C pompası gündüz ve puant tarifesinde de çalışmaktadır.



Şekil 4.1. Mevcut pompa C çalışma ve depo C seviye durumları.

4.1.2. Pompa C'nin optimizasyon sonrası çalışma durumu

C pompası ve C deposu için WLC'deki kullanılmış olan aynı veriler önerilen SDPA ile kullanılarak C pompasına uygulanmıştır. Önerilen SDPA'nın uygulanması ile oluşan C pompasının çalışma durumu ve C deposunun su seviyesi için elde edilmiş sonuçlar Şekil 4.2.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Optimizasyon sonrası pompa C çalışma ve depo C seviye durumları.

Şekil 4.2.'den, puant ve gündüz tarifelerindeki tüm yükün geceye kaydığı ve pompa açma/kapama sayısının azaldığı görülmektedir. Çok zamanlı elektrik tarifiesi göz önünde bulundurulduğunda, aynı şartlar altında önerilen SDPA'nın WLC'ye kıyasla enerji birim maliyetini C pompası için %40,5 oranında azaltabildiği ve yük kaydırma ile elde edebileceğimiz en iyi optimizasyonu sağladığı görülmüştür. WLC ve önerilen SDPA algoritmasıyla elde edilen sonuçların karşılaştırılması Tablo 4.1.'de özetlenmiştir.

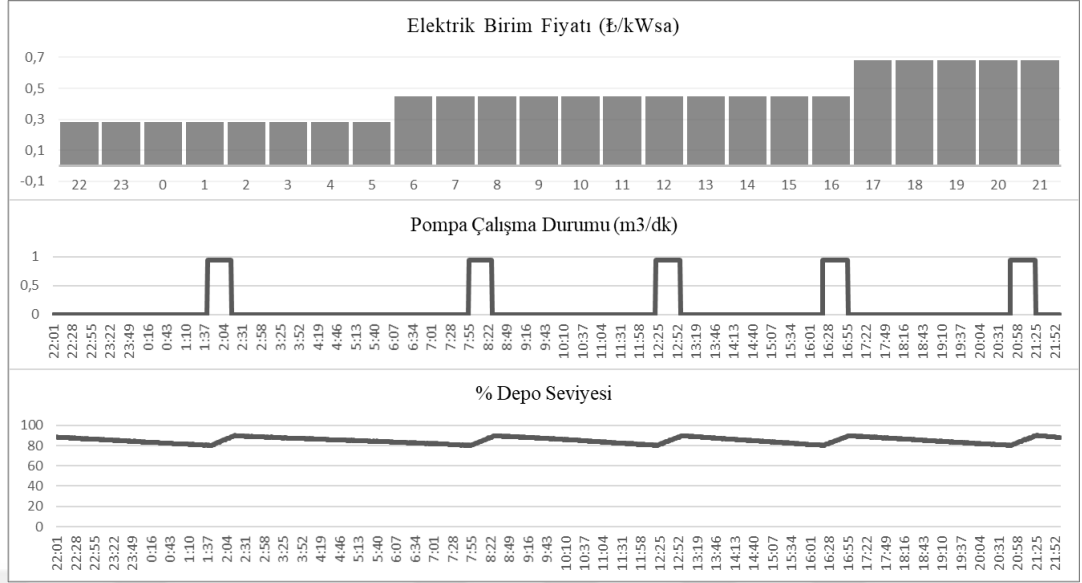
Tablo 4.1. C pompası için WLC ve Önerilen SDPA'nın karşılaştırılması.

	WLC	Önerilen SDPA
# Çalış/Dur	5	1
Toplam Çalışma Süresi	320 dk.	295 dk.
Gece Çalışma Süresi	83 dk.	295 dk.
Gündüz Çalışma Süresi	171 dk.	0 dk.
Puant Çalışma Süresi	66 dk.	0 dk.
Toplam Pompalanan Su	179,26 m ³	165,25 m ³
Elektrik Maliyeti	35,02 ₺	19,18 ₺
Birim Pompalama Maliyeti	0,1953 ₺/m ³	0,1160 ₺/m ³

4.2. İkinci Aşamadaki Pompa B

4.2.1. Pompa B'nin mevcut çalışma durumu

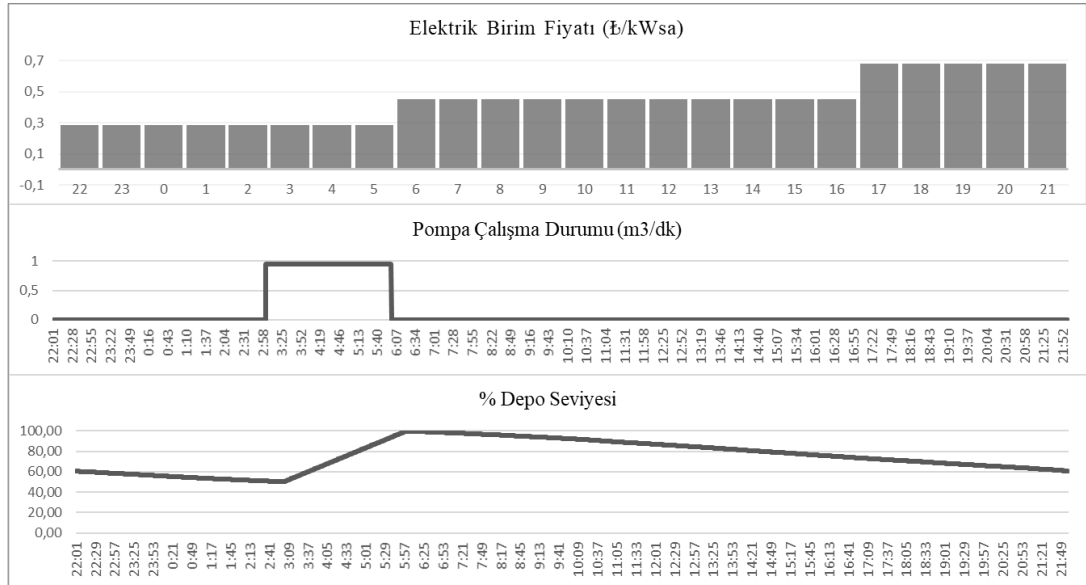
B pompası için mevcut çalışma, B depo seviye kısıtları maksimum seviye %90 ve minimum seviye %80 olacak şekilde WLC yöntemi ile yapılmaktadır. Mevcut su temin sistemindeki pompa çalışma ve depo seviye durumları Şekil 4.3.'te gösterilmektedir. Şekil 4.3.'ten görüldüğü üzere B pompası gündüz ve puant tarifesinde de çalışmaktadır.



Şekil 4.3. Mevcut pompa B çalışma ve depo B seviye durumları.

4.2.2. Pompa B'nin optimizasyon sonrası çalışma durumu

B pompası ve B deposu için WLC'deki kullanılmış olan aynı veriler önerilen SDPA ile kullanılarak B pompasına uygulanmıştır. Önerilen SDPA'nın uygulanması ile oluşan B pompasının çalışma durumu ve B deposunun su seviyesi için elde edilmiş sonuçlar Şekil 4.4.'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4. Optimizasyon sonrası pompa B çalışma ve depo B seviye durumları.

Şekil 4.4.'ten, puant ve gündüz tarifelerindeki tüm yükün geceye kaydığı ve pompa açma/kapama sayısının azaldığı görülmektedir. Çok zamanlı elektrik tarifiesi göz önünde bulundurulduğunda, aynı şartlar altında önerilen SDPA'nın WLC'ye kıyasla enerji birim maliyetini B pompası için %42,08 oranında azaltabildiği ve yük kaydırma ile elde edebileceğimiz en iyi optimizasyonu sağladığı görülmüştür. WLC ve önerilen SDPA algoritmasıyla elde edilen sonuçların karşılaştırılması Tablo 4.2.'de özetlenmiştir.

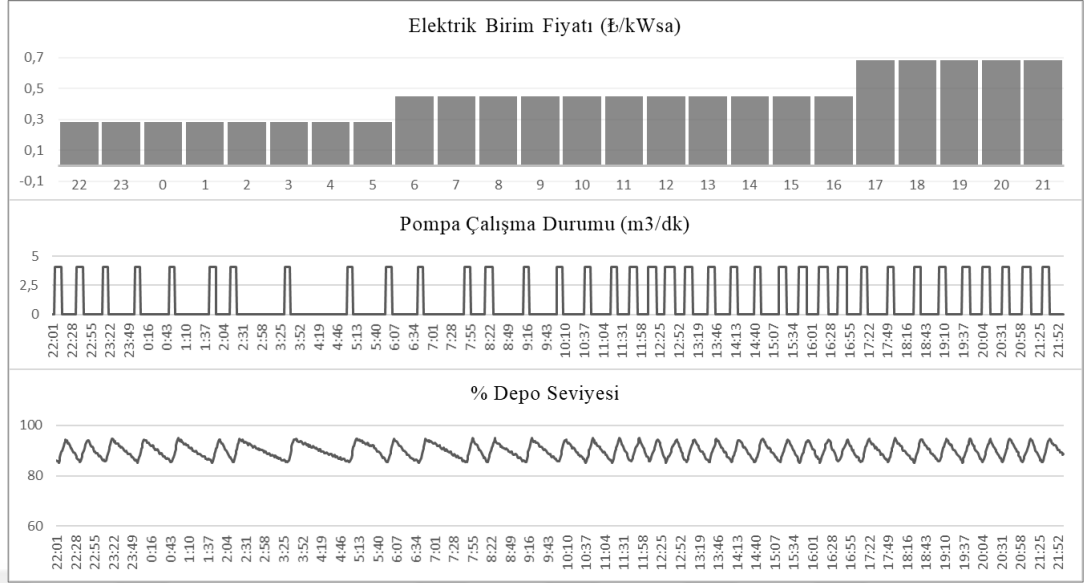
Tablo 4.2. B pompası için WLC ve önerilen SDPA'nın karşılaştırılması.

	WLC	Önerilen SDPA
# Çalış/Dur	5	1
Toplam Çalışma Süresi	176 dk.	178 dk.
Gece Çalışma Süresi	34 dk.	178 dk.
Gündüz Çalışma Süresi	106 dk.	0 dk.
Puant Çalışma Süresi	36 dk.	0 dk.
Toplam Pompalanan Su	166,24 m ³	168,13 m ³
Elektrik Maliyeti	66,47 ₺	38,93 ₺
Birim Pompalama Maliyeti	0,3998 ₺/m ³	0,2315 ₺/m ³

4.3. Birinci Aşamadaki Pompa A

4.3.1. Pompa A'nın mevcut çalışma durumu

A pompası için mevcut çalışma, A depo seviye kısıtları maksimum seviye %95 ve minimum seviye %85 olacak şekilde WLC yöntemi ile yapılmaktadır. Mevcut su temin sistemindeki pompa çalışma ve depo seviye durumları Şekil 4.5.'te gösterilmektedir. Şekil 4.5.'ten görüldüğü üzere A pompası gündüz ve puant tarifesinde fazlaca çalışmaktadır.

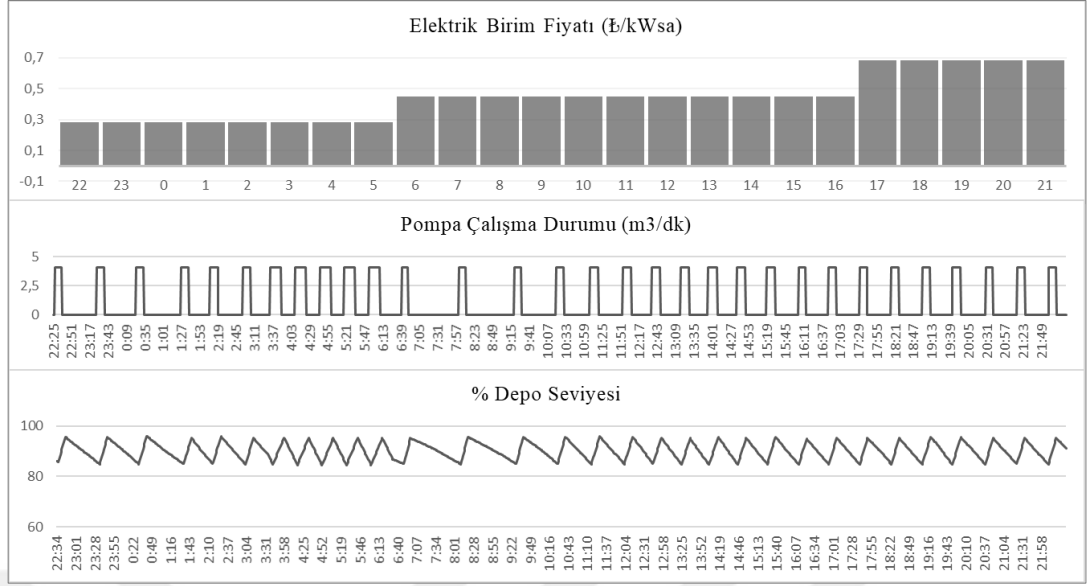


Şekil 4.5. Mevcut pompa A çalışma ve depo A seviye durumları.

4.3.2. Pompa A'nın B ve C optimizasyonu sonrası çalışma durumu

İlk olarak, çok aşamalı sistemlerde son aşamanın optimize edilmesi durumunu ele almak istiyoruz ve optimize edilmiş son aşamanın önceki aşamalara (önceki aşamalar klasik su seviye kontrolü ile çalışsa bile) pozitif bir fayda sağlamasını beklemekteyiz. Yani herhangi bir üst aşamanın optimize edilmesi alt aşamaları pozitif etkiler diye düşünüyoruz. Bu etkiyi görebilmek için ikinci aşama pompalar (B ve C) optimize edildiğinde, birinci aşamadaki Pompa A'nın çalışma durumunu değerlendirebiliriz.

Pompa B ve Pompa C'nin önerilen SDPA algoritması ile çalıştırılmasının, WLC ile çalışmaya devam eden Pompa A'nın çalışma ve depo A'nın seviye durumlarına etkisi Şekil 4.6.'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Pompa B ve C optimizasyon sonrası pompa A çalışma ve depo A seviye durumları.

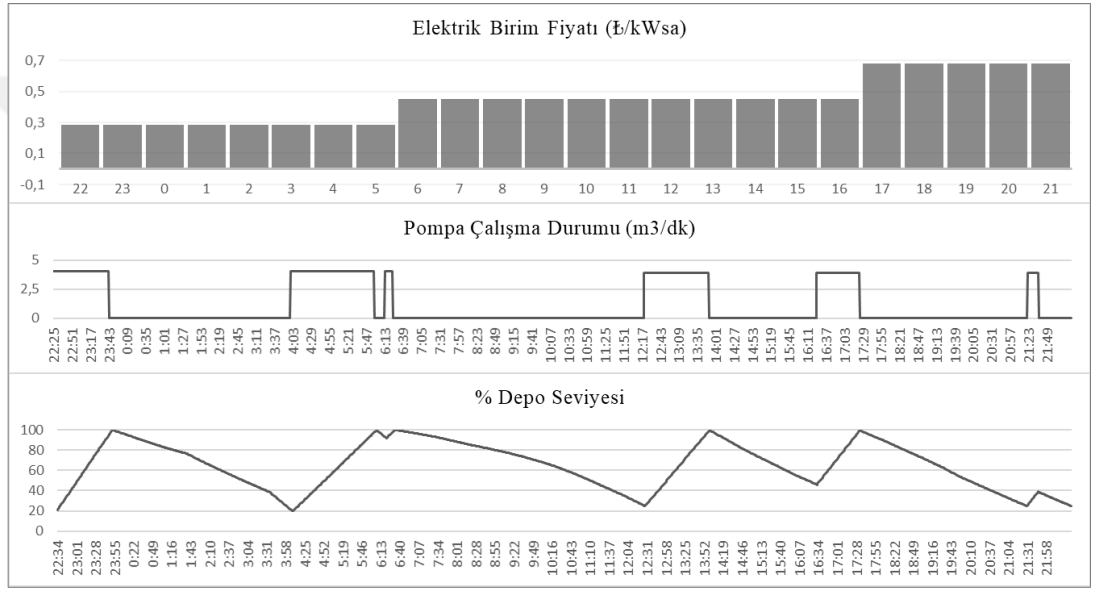
Çok zamanlı elektrik tarifiesi göz önünde bulundurularak, yalnızca ikinci aşama pompaları (B ve C) optimize edildiğinde Pompa A'ya olan etkiyi değerlendirelim. İkinci aşamadaki yüklerin kaydırılması (B ve C Pompası), birinci aşamada (Pompa A) da aynı oranda yükün kaydırılmasına yansıdığı görülebilir. Yalnızca B ve C pompalarının optimize edilmesi, hiçbir optimizasyon olmayan duruma kıyasla WLC ile çalışan pompa A'nın enerji maliyetini yaklaşık %8,39 azaltabilmiştir. Hiçbir optimizasyonun olmadığı ve yalnızca B ve C pompalarının optimize edildiği durumlardaki sonuçların karşılaştırılması Tablo 4.3.'te özetlenmiştir.

Tablo 4.3. Yalnızca B ve C pompa optimizasyonunun A pompasına etkisi.

	İkinci aşama normal	İkinci aşama optimize
# Çalış/Dur	37	31
Toplam Çalışma Süresi	373 dk.	372 dk.
Gece Çalışma Süresi	85 dk.	146 dk.
Gündüz Çalışma Süresi	194 dk.	147 dk.
Puant Çalışma Süresi	94 dk.	79 dk.
Toplam Pompalanan Su	1517,79 m ³	1513,72 m ³
Elektrik Maliyeti	346,07 ₺	316,15 ₺
Birim Pompalama Maliyeti	0,2280 ₺/m ³	0,2088 ₺/m ³

4.3.3. Pompa A'nın optimizasyon sonrası çalışma durumu

Pompa B ve Pompa C optimize edilmiş iken pompa A'yı da optimize ettiğimizde, hiçbir optimizasyon olmayan duruma göre pompa A'nın nasıl etkilendiğinin sonucunu görmek istiyoruz. A pompası ve A deposu için WLC'deki kullanılmış olan aynı veriler önerilen SDPA ile kullanılarak A pompasına uygulanmıştır. Tüm pompalara önerilen SDPA'nın uygulanması ile oluşan A pompasının çalışma durumu ve A deposunun su seviyesi için elde edilmiş sonuçlar Şekil 4.7.'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7. Tüm pompaların optimizasyonu sonrası pompa A çalışma ve depo A seviye durumları.

Tüm pompaların optimize edilmesiyle, puant tarifesindeki yükün büyük bir bölümünün ve gündüz tarifesindeki yükün bir kısmının geceye kaydığı ve pompa açma/kapama sayısının azaldığı görülmektedir.

Çok zamanlı elektrik tarifi göz önünde bulundurulduğunda, aynı şartlar altında önerilen SDPA'nın WLC'ye kıyasla enerji birim maliyetini A pompası için %21,66 oranında azaltabildiği ve yük kaydırma ile elde edebileceğimiz en iyi optimizasyonu sağladığı görülmüştür. WLC ve önerilen SDPA algoritmasıyla elde edilen sonuçların karşılaştırılması Tablo 4.4.'te özetlenmiştir.

Tablo 4.4. A Pompası için WLC ve önerilen SDPA'nın karşılaştırılması.

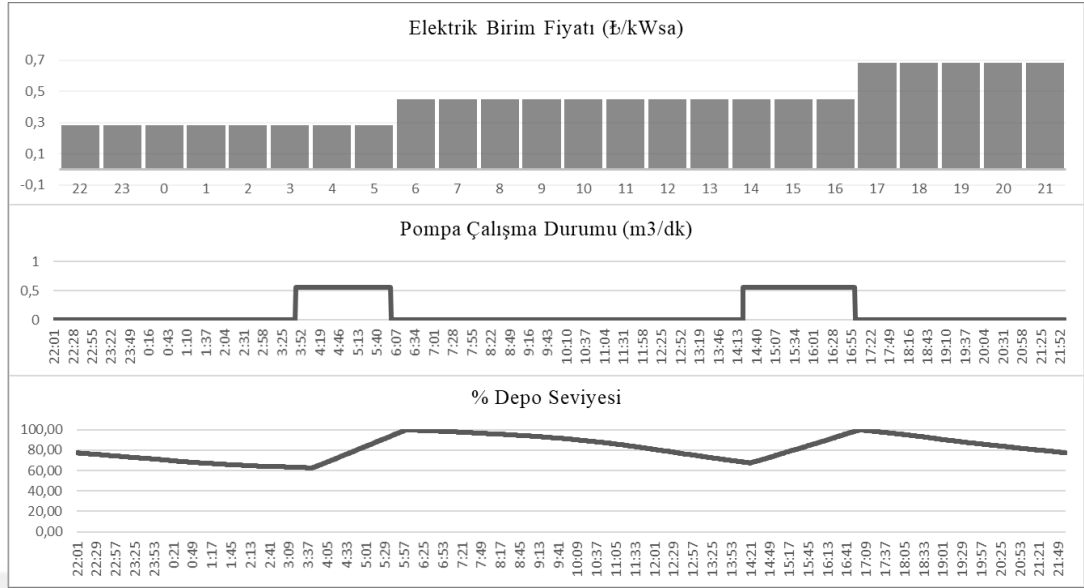
	WLC	Önerilen SDPA
# Çalış/Dur	37	5
Toplam Çalışma Süresi	373 dk.	379 dk.
Gece Çalışma Süresi	85 dk.	210 dk.
Gündüz Çalışma Süresi	194 dk.	153 dk.
Puant Çalışma Süresi	94 dk.	16 dk.
Toplam Pompalanan Su	1517,79 m ³	1513,85 m ³
Elektrik Maliyeti	346,07 ₺	270,38 ₺
Birim Pompalama Maliyeti	0,2280 ₺/m ³	0,1786 ₺/m ³

4.4. SDPA'da Yapılan İyileştirilmenin Etkisi

SDPA algoritmasında, gündüz tarifesinin sonunda olması gereken yüzde seviye L_2 'dir ve $L_2 = 100$ olarak kullanılmıştır. Yaptığımız iyileştirmeye gündüz tarifesinin sonunda olması gereken yüzde seviye L_x olarak tanımlanmış ve Denklem 3.9 ile hesaplanmıştır. Bu değerin sabit olarak 100 seçilmesi, seviye kısıtlarını sağlayarak depo kapasitesinin puant zamanındaki tüketimi karşılayamadığı durumlarda uygun olabilir. Ancak depo kapasitesi, kısıtları sağlayacak şekilde puant zamanındaki tüketimi fazlasıyla karşılayabilecek durumda ise bu değerin hesaplanması ve olabilecek minimum değerde tutulması, gündüz periyodundaki yüklerin de gece periyoduna kaydırılmasını sağlayacaktır.

SDPA'nın uygulanmasıyla elde edilen sonuçlar C pompasının çalışma ve C deposunun seviye durumları için Şekil 4.8.'de, B pompasının çalışma ve B deposunun seviye durumları için Şekil 4.9.'da gösterilmiştir.

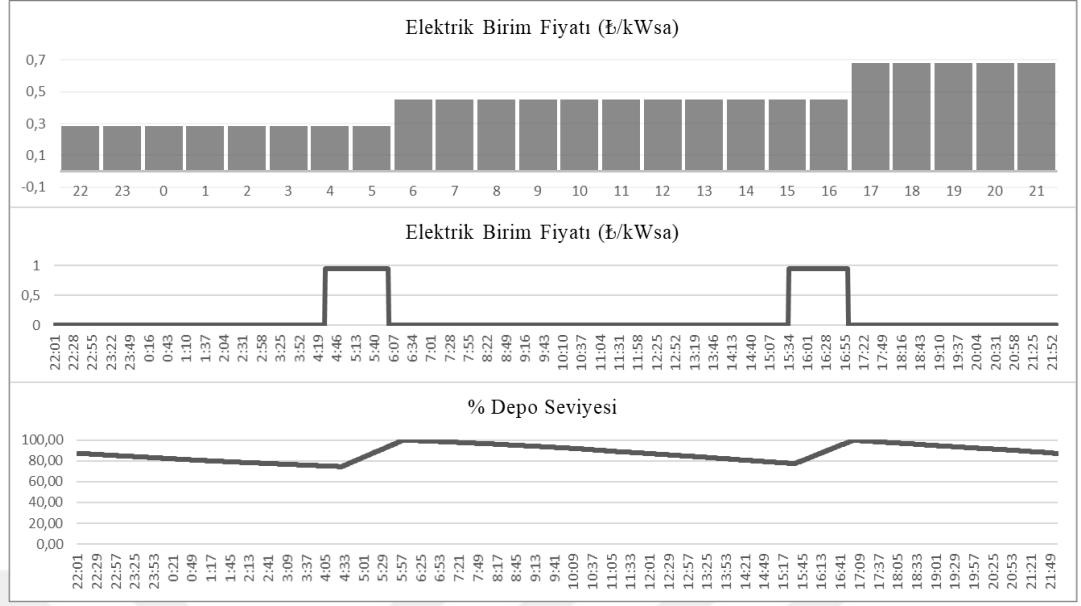
B ve C pompalarının WLC, SDPA ve önerilen SDPA ile çalıştırılması sonucunda elde edilen pompaların çalışma ve depoların seviye durumları Tablo 4.5. ile Tablo 4.6.'da kıyaslanmıştır.



Şekil 4.8. SDPA kullanılması sonrası pompa C çalışma ve depo C seviye durumları.

Tablo 4.5. C pompası için WLC, SDPA ve önerilen SDPA'nın karşılaştırılması.

	WLC	SDPA	Önerilen SDPA
# Çalış/Dur	5	2	1
Toplam Çalışma Süresi	320 dk.	295 dk.	295 dk.
Gece Çalışma Süresi	83 dk.	136 dk.	295 dk.
Gündüz Çalışma Süresi	171 dk.	159 dk.	0 dk.
Puant Çalışma Süresi	66 dk.	0 dk.	0 dk.
Toplam Pompalanan Su	179,26 m³	165,25 m³	165,25 m³
Elektrik Maliyeti	35,02 ₺	26,25 ₺	19,18 ₺
Birim Pompalama Maliyeti	0,1953 ₺/m³	0,1588 ₺/m³	0,1160 ₺/m³



Şekil 4.9. SDPA kullanılması sonrası pompa B çalışma ve depo B seviye durumları.

Tablo 4.6. B pompası için WLC, SDPA ve önerilen SDPA'nın karşılaştırılması.

	WLC	SDPA	Önerilen SDPA
# Çalış/Dur	5	2	1
Toplam Çalışma Süresi	176 dk.	178 dk.	178 dk.
Gece Çalışma Süresi	34 dk.	91 dk.	178 dk.
Gündüz Çalışma Süresi	106 dk.	87 dk.	0 dk.
Puant Çalışma Süresi	36 dk.	0 dk.	0 dk.
Toplam Pompalanan Su	166,24 m ³	168,13 m ³	168,13 m ³
Elektrik Maliyeti	66,47 ₺	51,57 ₺	38,93 ₺
Birim Pompalama Maliyeti	0,3998 ₺/m ³	0,3067 ₺/m ³	0,2315 ₺/m ³

Tablo 4.5. ve Tablo 4.6.'dan da görüldüğü üzere SDPA algoritması puant zamanındaki yükleri gece ve gündüze kaydırırken, yaptığımız iyileştirme ile önerilen SDPA algoritması puant ve gündüzdeki tüm yükleri geceye kaydırmayı başarmıştır. WLC'ye kıyasla SDPA'nın uygulanması C pompası için %18,7 ve B pompası için %23,3 oranında tasarruf sağlarken, yapılan iyileştirme sonucunda önerilen SDPA'nın uygulanması C pompasındaki tasarruf oranını %40,5'e ve B pompasındaki tasarruf oranını %42,08'e çıkarmıştır.

4.5. Elde Edilecek Kazanç

C pompasının günlük ortalama pompaladığı su miktarı 165 m^3 'tür ve C pompasının optimizasyonu sonrası, birim pompalama maliyeti $0,1953 \text{ ₺/m}^3$ 'den $0,1160 \text{ ₺/m}^3$ 'e düşmüştür. Yalnızca C pompasının optimizasyonu ile elde edilecek günlük kazanç; $165 \cdot (0,1953 - 0,1160) = 13,08 \text{ ₺}$, yıllık kazanç ise; $13,08 \cdot 365 = 4.774,20 \text{ ₺}$ olacaktır.

B pompasının günlük ortalama pompaladığı su miktarı 167 m^3 'tür ve C pompasının optimizasyonu sonrası, birim pompalama maliyeti $0,3998 \text{ ₺/m}^3$ 'den $0,2315 \text{ ₺/m}^3$ 'e düşmüştür. Yalnızca B pompasının optimizasyonu ile elde edilecek günlük kazanç; $167 \cdot (0,3998 - 0,2315) = 28,11 \text{ ₺}$, yıllık kazanç ise; $28,11 \cdot 365 = 10.260,15 \text{ ₺}$ olacaktır.

A pompasının günlük ortalama pompaladığı su miktarı 1513 m^3 'tür. B ve C'nin optimizasyonundan sonra A pompasının da optimizasyonu yapıldığında, A'nın birim pompalama maliyeti $0,2280 \text{ ₺/m}^3$ 'den $0,1786 \text{ ₺/m}^3$ 'e düşmüştür. B ve C'nin optimizasyonundan sonra yalnız A pompasının optimizasyonu ile elde edilecek günlük kazanç; $1513 \cdot (0,2280 - 0,1786) = 74,74 \text{ ₺}$, yıllık kazanç ise; $74,74 \cdot 365 = 27.280,10 \text{ ₺}$ olacaktır.

A, B ve C pompalarının tümünün optimize edilmesiyle elde edilecek günlük kazanç; $13,08 + 28,11 + 74,74 = 115,93 \text{ ₺}$, yıllık kazanç ise; $115,93 \cdot 365 = 42.314,45 \text{ ₺}$ olacaktır.

BÖLÜM 5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmanın odak noktası, Sakarya ilindeki su temin sistemindeki çok aşamalı pompalama istasyonlarının olay çalışması olarak incelenmesi ve SDPA algoritması gibi bir yük kaydırma tekniği kullanarak sağlanabilecek enerji tasarruf miktarını belirlemektir. Çalışmanın sonucu, çok aşamalı karmaşık bir sistemi ilk olarak alt sistemlere ayırmamız gerektiğini ve su temin sisteminin son aşamasından başlanarak ilk aşamasına (ana kaynağa) doğru her bir alt sistemin ayrı ayrı optimize edilmesi gerektiğini göstermiştir.

Önerilen SDPA, çok aşamalı su temin sistemindeki A, B, C pompalarının elektrik tüketimini, en iyi pompalama zamanlamasını sağlayarak puant tarifesinden gece veya gündüz tarifesine kaydırmıştır. Su temin sisteminde uygulanan geleneksel su seviye kontrolü (WLC) ile kıyaslandığında olay çalışması kısıtları altında, fiziksel elemanlar değiştirilmeden elde edilebilecek en iyi optimizasyon sonucunu veren önerilen SDPA, enerji maliyetinde Pompa C, Pompa B ve Pompa A için sırasıyla yaklaşık %40, %42 ve %21 oranlarında tasarruflar elde edilebileceğini göstermiştir.

Depo kapasitesinin puant zamanındaki tüketimi fazlasıyla karşılayabilecek olduğu durumda, puant yüklerinin tamamı geceye aktarılabilir. Bunun yanında gündüz periyodundaki yüklerin bir kısmı veya tamamının da (depo kapasitesi ve tüketim oranına göre) geceye kaydırılabileceği fakat SDPA algoritmasının bu işlemi gerçekleştiremediği, önceden sabit kabul edilen puant tarifesine geçişteki hedef seviyenin de hesaplanması gerektiği görülmüştür. Algoritmada iyileştirme yapılarak bu değerin hesaplanarak kullanılması sonucunda SDPA'nın sağlayamadığı bu durum sağlanmış ve sonuca pozitif etkisi olmuştur.

Çok aşamalı pompa sisteminin üst aşamalarında elde ettiğimiz enerji tasarrufları, ana su kaynağına ulaşmaya kadar alt aşamalardaki pompalara aynı oranda yansıtacağından dolayı olarak da avantajı vardır.

Pompalama sistemi işletim optimizasyonu algoritmasının, işletim parametreleri değiştiğinde (tarife, talep, çalışma kısıtlarında değişiklik vb.) bu değişikliklere ayak uydurabilir olması önemlidir. Bu çalışmada su talebi sabit kabul edilmiştir bunun için talep tahmini modülüne gerek görülmemiştir. Su talebinin değişken olduğu durumlarda önerilen SDPA'nın bir tahmin modülü ile kullanılması önerilmektedir.



KAYNAKLAR

- [1] Yang, Z., Børsting, H., Optimal Scheduling And Control Of A Multi-pump Boosting System, 2010 IEEE International Conference on Control Applications, Yokohama, 2071-2076, 2010.
- [2] Bunn, S. M., Reynolds, L., The energy-efficiency benefits of pumpscheduling optimization for potable water supplies, IBM J. Res. Dev., 53(3): 5:1-5:13, 2009.
- [3] Grundfos., Section 5.1 Life cycle costs equation. İçinde: Pump Handbook, Grundfos Management A/S, 126-131, 2004.
- [4] Takahashi, S., Koibuchi, H., Adachi, S., Water Supply Operation and Scheduling System with Electric Power Demand Response Function, Procedia Engineering., 186: 327-332, 2017.
- [5] Shu, S., Zhang, D., Liu, S., Zhao, M., Yuan, Y., Zhao, H., Power Saving in Water Supply System with Pump Operation Optimization, 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Chengdu, 1-4, 2010.
- [6] Zhang, H., Xia X., Zhang, J., Optimal sizing and operation of pumping systems to achieve energy efficiency and load shifting, Electric Power Systems Research., 86: 4150, 2012.
- [7] Zhuan, X., Li, W., Yang, F., Optimal Operation Scheduling of a Pumping Station in East Route of South-to-north Water Diversion Project, Energy Procedia., 105: 3031-3037, 2017.
- [8] Küçük, H., İçme Suyu Terfi İstasyonlarının Enerji Verimli İşletimi İçin Bir Tasarım, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2020.
- [9] Barry, J. A., WATERGY: Energy and Water Efficiency in Municipal Water Supply and Wastewater Treatment, Cost-Effective Savings of Water and Energy, Washington, 1-44, 2007.
- [10] Bagirov, A.M., Barton, A.F., Mala-Jetmarova, H., Nuimat, A.Al., Ahmed, S.T., Sultanova, N., Yearwood, J., An algorithm for minimization of pumping costs in water distribution systems using a novel approach to pump scheduling, Mathematical and Computer Modelling., 57(3-4): 873-886, 2013.

- [11] Zheng, G., Huang, Q., Energy Optimization Study of Rural Deep Well Two-Stage Water Supply Pumping Station, IEEE Transactions on Control Systems Technology., 24(4): 1308–1316, 2016.
- [12] Savic, D. A., Walters, G. A., Schwab, M., Multiobjective genetic algorithms for pump scheduling in water supply, Lecture Notes in Computer Science., 1305: 227-235, 1997.
- [13] Gong, Y., Cheng, J., Optimization of Cascade Pumping Stations' Operations Based on Head Decomposition–Dynamic Programming Aggregation Method Considering Water Level Requirements, Journal of Water Resources Planning and Management., 144(7): 04018034, 2018.
- [14] Gong, Y., Cheng, J., Combinatorial Optimization Method for Operation of Pumping Station with Adjustable Blade and Variable Speed Based on Experimental Optimization of Subsystem, Adv. Mech. Eng., 6: 283520, 2014.
- [15] Cheng, H. *ve ark.*, Optimization of Pressurized Tree-Type Water Distribution Network Using the Improved Decomposition–Dynamic Programming Aggregation Algorithm, Water., 11(7): 1391, 2019.
- [16] Zhang, Z., Lei, X., Tian, Y., Wang, L., Wang, H., Su, K., Optimized Scheduling of Cascade Pumping Stations in Open-Channel Water Transfer Systems Based on Station Skipping, Journal of Water Resources Planning and Management., 145(7): 05019011, 2019.
- [17] National Research Council., Drinking Water Distribution Systems: Assessing And Reducing Risks, The National Academies Press, 1-391, 2006.
- [18] EPRI., Program on Technology Innovation: Electric Efficiency Through Water Supply Technologies—A Roadmap, Electric Power Research Institute: Palo Alto USA, 1-104, 2009.
- [19] NYSERDA., Water & Wastewater Energy Management Best Practices Handbook, New York State Energy Research and Development Authority and Malcolm Pirnie, 1-96, 2010.
- [20] Ewans, W. T., Introduction to PLCs, [utoledo.edu](http://www.eng.utoledo.edu/~wevans/chap1_S.pdf), Online Link: http://www.eng.utoledo.edu/~wevans/chap1_S.pdf, Erişim Tarihi: 27.02.2020.
- [21] AutomationDirect.com., History of the PLC, AutomationDirect.com, Online Link: <https://library.automationdirect.com/history-of-the-plc/>, Erişim Tarihi: 27.02.2020.
- [22] Melore, P., PLC History, PLCS.net, Online Link: <http://www.plcs.net/chapters/history2.htm>, Erişim Tarihi: 27.02.2020.
- [23] Love, J., Systems Architecture. İçinde: Process Automation Handbook, Springer London, Londra, 279-286, 2007.

- [24] Hooper, J. F., Introduction to PLCs, 2. Baskı Carolina Academic Press Yayınları, 1-120, 2006.
- [25] PLCdev.com., The Birth of the PLC, PLCdev.com. Online Link: http://www.plcdev.com/the_birth_of_the_plc, Erişim Tarihi: 28.02.2020
- [26] DaveM580., Stepwise approach to upgrading your automation control system, rs-online.com/designspark/home, 2017. Online Link: <https://www.rs-online.com/designspark/stepwise-approach-to-upgrading-your-old-control-system>, Erişim Tarihi: 27.02.2020.
- [27] Fauci, J.L., PLC or DCS: Selection and trends, ISA Transactions., 36(1): 21-28, 1997.
- [28] Walker, M., Bissell, C., Monk, J., The PLC: A logical development, Measurement and Control., 43(9): 280-284, 2010.
- [29] Lipták, B. G., PLC - Programmable Logic Controllers. İçinde: Process Control: Instrument Engineers' Handbook 3. Baskı, 721-750, 2013.
- [30] PLCdev.com., PLC Timeline, PLCdev.com, Online Link: http://www.plcdev.com/plc_timeline, Erişim Tarihi: 28.02.2020.
- [31] Maxey, W., The PLC: A Historic Timeline, eecoonline.com, Online Link: <https://eecoonline.com/evolution-of-the-plc-a-historic-timeline/>, Erişim Tarihi: 28.02.2020.
- [32] Distrelec.nl., Distrelec.nl, Distrelec.nl. Online Link: https://www.distrelec.nl/Web/WebShopImages/landscape_large/_t/if/simatic-s7-1200.jpg, Erişim Tarihi: 28.02.2020.
- [33] Mehta, B. R., Reddy, Y. J., OPC communications. İçinde: Industrial Process Automation Systems, Butterworth-Heinemann Yayınları, 459-477, 2015.
- [34] OPC Foundation., What is OPC?, OPCFoundation.org/, Online Link: <https://opcfoundation.org/about/what-is-opc/>, Erişim Tarihi: 02.03.2020.
- [35] Nicola, M., Nicola, C.I., Duță, Marian., Sacerdoțianu, D., SCADA Systems Architecture Based on OPC and Web Servers and Integration of Applications for Industrial Process Control, International Journal of Control Science and Engineering., 8(1): 13-21,2018.
- [36] Stouffer, K., Falco, J., Scarfone, K., Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security Recommendations of the National Institute of Standards and Technology, NIST Special Publication., Ekim:1-157, 2007.
- [37] Schneider Electric., SCADA Systems Made Simple, 2012. Online Link: https://www.se.com/vn/en/download/document/998-2095-01-19-12AR0_EN/, Erişim Tarihi: 18.02.2020.

- [38] Martyusheva, O., Smart Water Grid, Colorado State University, Department Of Civil And Environmental Engineering, Yüksek Lisans Tezi, 2014.
- [39] Avrahami, T., Scada Systems : the Heart and Brain of Industrial, Ayyeka Technologies, 1-7, 2016.
- [40] Reddy, S. B., What is SCADA System, instrumentationtools.com, Online Link: <https://instrumentationtools.com/scada-system/>, Erişim Tarihi: 29.02.2020.
- [41] Adams, T. SCADA Systems Intermediate Overview, Tech. Inf. Bull. 04-1 (877): 1-73, 2004.
- [42] Yadav, G., Paul, K., Architecture and Security of SCADA Systems: A Review, Cornell University, 2020. Online Link: <https://arxiv.org/pdf/2001.02925v1.pdf>, Erişim Tarihi : 02.03.2020.
- [43] Hieb, J., Security hardened remote terminal units for SCADA networks, Electronic Theses and Dissertations. Paper 615, University of Louisville, Computer Engineering and Computer Science, Yüksek Lisans Tezi, 2008.
- [44] Peter., SCADA System (Supervisory Control and Data Acquisition): What is SCADA?, PLCAcademy.com, 2019. Online Link: <https://www.plcademy.com/scada-system/> Erişim Tarihi: 28.02.2020.
- [45] McClanahan, R. H., The Benefits of Networked Scada Systems Utilizing IP-Enabled Networks, 2002 Rural Electric Power Conference. Papers Presented at the 46th Annual Conference (Cat. No. 02CH37360), C5-1-7, 2002.
- [46] Demir, A.Ö., Scada ve İstasyon Otomasyonunda Haberleşme, Standartlar ile Uygulamalar, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2010.
- [47] Love, J., Open Systems. İçinde: Process Automation Handbook, Springer London, Londra, 351-363, 2007.
- [48] Walk, T., Critical IT-infrastructure (like Pipeline SCADA systems) require cyber attack protection, 6th Pipeline Technology Conference 2011, Hannover, 1-10, 2010.
- [49] Ujvarosi, A., Evolution of SCADA Systems, Bulletin of the Transilvania University of Braşov - Series I Engineering Sciences., 9(58): 63-68, 2016
- [50] Sakarya Su ve Kanalizasyon İdaresi (SASKİ), 2017 Faaliyet Raporu, Sakarya, 117, 2017.
- [51] Human Centered Solutions., WPAC Safety Conference Effective HCI Practices Workshop Workshop Protocol Share Your Experiences Describe challenges you have had ?, Canadian Biomass 2017. Online Link: <https://www.canadianbiomassmagazine.ca/images/wpac-safety-presentation-7.pdf>, Erişim Tarihi: 10.03.2020.

- [52] Zhuan, X., Zhang, L., Guo, J., Optimal operation scheduling of a pump station, 2011 Chinese Control and Decision Conference (CCDC), 3797-3802, 2011.



ÖZGEÇMİŞ

Kadir Yaralı, 28 Nisan 1988’de Konya’nın Meram ilçesinde doğdu. İlk ve orta öğrenimini 23 Nisan İlköğretim Okulu’nda tamamladı. 2006 yılında Konya Meram Anadolu Lisesinden mezun oldu. Lisans eğitimini Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde 2014 yılında tamamladı. Endüstriyel otomasyon alanında faaliyet gösteren bir firmada çalışmakta ve 2015 yılından bu yana Sakarya Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü’nde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.