

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YEŞİL VERİ MERKEZLERİ İÇİN SÜRDÜRÜLEBİLİR
ENERJİ YÖNETİM SİSTEMİ



MEHMET TÜRKER TAKCI
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

GEBZE
2022

T.C.
GEBZE TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YEŞİL VERİ MERKEZLERİ İÇİN
SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ YÖNETİM
SİSTEMİ

MEHMET TÜRKER TAKCI
DOKTORA TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

DANIŞMANI
DR. ÖĞR. ÜYESİ TUBA GÖZEL

GEBZE
2022

T.R.
GEBZE TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

SUSTAINABLE ENERGY
MANAGEMENT SYSTEM FOR GREEN
DATA CENTERS

MEHMET TÜRKER TAKCI
A THESIS SUBMITTED FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF PHILOSOPHY
DEPARTMENT OF ELECTRONICS ENGINEERING

THESIS SUPERVISOR
DR.ÖĞR.ÜYESİ TUBA GÖZEL

GEBZE
2022



DOKTORA JÜRİ ONAY FORMU

GTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim 20/05/2022 tarih ve 2022/25 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 30.05.2022 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Mehmet Türker Takcı'nın tez çalışması Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI)

: Dr. Öğr. Üyesi Tuba Gözel

ÜYE

: Prof. Dr. M.Hakan Hoccoğlu

ÜYE

: Prof. Dr. A. Fevzi Baba

ÜYE

: Prof. Dr. Abdülkadir Balıkçı

ÜYE

: Doç. Dr. Behnam Mohammadi - Ivatloo

ONAY

Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun

...../...../..... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

21. yüzyılda gerçekleşen dijital dönüşüme ek olarak Covid-19 salgınıyla, internet tabanlı pek çok uygulama ve online platform günlük hayatın bir parçası haline gelerek, üretilen, saklanan ve işlenen dijital veri miktarı çok yüksek bir seviyeye ulaşmıştır. Buna paralel olarak çok sayıda yüksek performanslı sunucu ve büyük soğutma üniteleri barındıran veri merkezlerine olan talep de artmıştır. Öyle ki 2018 yılında 198 TWh olan veri merkezi (VM) global enerji tüketimi, 2021 yılında 308 TWh olmuştur. Bununla birlikte VM'lerin sahip olduğu IT ve Soğutma yükleri, benzer miktarda enerji tüketen sektörlerle kıyasla zamanda kaydırılması ve kontrolü daha kolay yüklerdir. Bu yönüyle VM'ler, Talep Tarafı Yönetim (TTY) programlarına katılım açısından oldukça uygun adaylardır. Ancak hem VM'lerin TTY'ye katılımının planlanabilmesi hem mevcut VM enerji kaynaklarının efektif olarak yönetilebilmesi hem de VM enerji maliyetlerinin azaltılabilmesi için, enerji talebinin doğru tahmin edilebilmesi ve optimum enerji yönetim stratejilerinin üretilmesi gerekmektedir.

Tez kapsamında geliştirilen karar destek mekanizması ile bu ihtiyacın giderilmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen simülatör, yapay zeka tabanlı tahmin modelleriyle doğru ve güvenilir enerji talebi tahminleri yaparak, VM'nin sahip olduğu jeneratör, kesintisiz güç kaynağı (UPS), termal kapasiteyi alternatif enerji kaynağı olarak kullanarak ve IT iş yükünü kaydırarak güvenilir ve sürdürülebilir enerji yönetim planları oluşturmaktadır. Böylelikle enerji verimliliğine ve karbon salınımının azaltılmasına katkı sağlanmakta ve enerji maliyeti minimize edilmektedir.

Simülatör geliştirilirken, VM'nin sahip olduğu mevcut argümanların (jeneratör, UPS, termal kapasite, yük kaydırma) kullanılması amaçlanmış, yeni kurulum/yatırım maliyeti gerektirecek araçlar (PV, rüzgar türbini vb) sisteme dahil edilmemiştir. Bütün analizler ve geliştirilen modeller gerçek iş yükü altında çalışan bir VM'den alınan verilerle gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Veri Merkezleri, güç tüketim tahmini, talep tarafı yönetimi, termal enerji depolama, karışık tamsayı doğrusal olmayan programlama, enerji yönetim sistemi.

SUMMARY

Covid-19 has accelerated the rapid digital transformation in the 21st century, and numerous internet-based apps and online platforms have become a part of daily life, enabling the amount of digital data that are produced, stored, and processed to reach a gigantic number. Concordantly, the demand for VM hosting a large number of high-performance servers and large cooling units has also increased tremendously. The global energy consumption of the VM jumped from 198 TWh in 2018 to 308 TWh in 2021. IT and Cooling loads of VM are easier to control and shift in time than the other big industrial customers. From this aspect, they are very suitable candidates for participation in Demand Side Management programs (DSM). However, the energy demand must be accurately predicted and managed to schedule the participation of VMs in DSM, manage existing VM energy resources effectively, and reduce VM energy costs as well.

It is aimed to address this need by developing a decision support system within the scope of the thesis. The developed simulator creates optimum energy management plans by making accurate and reliable energy demand forecasts and using data center's generator, UPS, and thermal capacity as an alternative energy source and shifting IT workloads. Thus, it contributes to energy efficiency and reduction of carbon emissions, additionally, energy costs are minimized. The simulator was built with the goal of using the VM's existing components (generator, UPS, thermal capacity, load shifting), and tools requiring new investment costs were not included in the system. All analyses were carried out using measured data.

Key Words: Data Centers, power consumption forecasting, demand Side Management, thermal energy storage, mixed integer nonlinear programming, sustainable energy management system .

TEŞEKKÜR

Akademik çalışma hayatım boyunca değerli görüşleriyle beni yönlendiren, motivasyonunu ve desteğini hiçbir zaman eksik etmeyen danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Tuba Gözel'e en derin ve en içten teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca akademik çalışmaların yanı sıra hayatın her alanında bilgi ve tecrübesinden yararlandığım, desteğini ve ilgisini hiçbir zaman esirgemeyen Prof. Dr. M. Hakan Hocaoglu'na gönülden teşekkür ediyorum. Değerli görüşleri ve önerileriyle çalışmamın iyileştirilmesine katkı sunan tez jüri üyesi Prof. Dr. A. Fevzi Baba'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

734273 numaralı ve “Sustainable energy demand side management for GREEN Data Centers (GREENDC)” isimli projeyi desteklerinden dolayı Avrupa Birliği Horizon 2020 araştırma ve yenilik programına teşekkür ediyorum.

Son olarak, manevi olarak her zaman yanımda olan, doktora çalışmalarım boyunca bana katlanan ve sabır gösteren, yardımlarını hiçbir zaman eksik etmeyen değerli aileme, neşeleri ve sevgileriyle beni her zaman motive eden kıymetli yeğenlerim Beren ve Batu'ya teşekkürlerimi sunuyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
SUMMARY	vi
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ	xix
TABLolar DİZİNİ	xxii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı ve Sınırları	3
1.2. Tezin İçeriği	4
2. LİTERATÜR ÖZETİ	6
2.1. Veri Merkezlerinin Talep Tarafı Yönetimine Katılımı	6
2.1.1. Kullanım Zamanına Göre Fiyatlandırma (Time of Use Tariff)	7
2.1.2. Piyasa Mekanizması (Market Mechanism)	7
2.2. Veri Merkezi Enerji Tüketimi Analizi	12
2.3. Güç Tüketimini Etkileyen Parametrelerin Seçimi	17
2.4. Güç Tüketimi Tahmini İçin Kullanılan Yöntemler	20
2.4.1. Regresyon Analizi	20
2.4.1.1. Basit Doğrusal Regresyon	20
2.4.1.2. Çoklu Doğrusal Regresyon	21
2.4.1.3. Doğrusal Olmayan Regresyon	21
2.4.2. Yapay Sinir Ağları	22
2.4.2.1. Yapay Sinir Ağları Özellikleri	22
2.4.2.2. Yapay Sinir Ağları Modelleri	23
2.4.2.3. YSA Öğrenme Algoritmaları	24
2.5. Veri Merkezi Enerji Yönetimi ve TTY'ye Katılımı ile Alakalı Optimizasyon Yaklaşımları	26

3. VERİ MERKEZLERİNİN TALEP TARAĞI YÖNETİMİNE KATILIMININ İNCELENMESİ	29
3.1. Talep Tarağı Yönetimi Katılımcısı Olarak Veri Merkezleri	31
3.1.1. Türkiye'nin Elektrik Tüketim Analizi ile Yük ve Kayıp Faktörlerinin Tanımı	31
3.1.2. Veri Merkezlerinin TTY'ye Katılımı	33
3.2. Analiz Sonuçları	36
3.2.1 Veri Merkezlerinin TTY'ye Katılmasının Sonuçları	36
3.2.2. Kurulması Planlanan Yeni Enerji Santrallerinin Ertelenmesinin Maliyet Tasarruf Analizi	38
3.2.3. Veri Merkezlerinin TTY'ye Katılmasının Karbon Emisyonu Üzerindeki Etkisi	40
3.3. Veri Merkezlerinin TTY'ye Katılmasının Küresel Etkileri	43
3.4. Sonuç	46
4. VERİ ANALİZİ	48
4.1. Ölçüm Verilerinin Elde Edilmesi	48
4.2. Ölçülen Verilerin İşlenmesi	51
4.3. Bağımsız Değişken (Predictors) Belirleme Süreci	54
4.4. Bağımsız Değişkenlerin (Predictors) IT Güç Tüketimi Tahmini Üzerindeki Etkileri	55
4.4.1. Deneysel Çerçeve	56
4.4.1.1. Deneysel Düzen	56
4.4.1.2. Korelasyon Analizi	57
4.4.1.3. ARGE Rack Güç Tüketimi için Kullanılan Tahmin Algoritması	58
4.4.1.4. Performans Değerlendirme Metrikleri	59
4.4.1.5. Deneyler	61
4.4.1.5.1. Deney 1: Bağımsız Değişkenlerin Bireysel Etkisi	61
4.4.1.5.2. Deney 2: Bağımsız Değişkenlerin Grup Etkileri	61
4.4.1.5.3. Deney 3: Bağımsız Değişkenlerin En İyi Kombinasyonu	62
4.4.2. Deney Sonuçları	62
4.4.2.1. Korelasyon Analizi Sonuçları	62

4.4.2.2. Deney 1'in Sonuçları	65
4.4.2.3. Deney 2'nin Sonuçları	68
4.4.2.4. Deney 3'ün Sonuçları	70
4.5. Sonuç	72
5. TAHMİN MODÜLÜ	75
5.1. Veri Merkezi Güç Tüketimi Tahmin Modellerinin Oluşturulması	75
5.1.1. Doğrusal Olmayan Regresyon Yöntemi	75
5.1.2. Yapay Sinir Ağları Modeli	76
5.2. Tahmin Modelinde Kullanılan Bağımsız Değişkenlerin Belirlenmesi	77
5.2.1. IT Güç Tüketimi İçin Bağımsız Değişkenlerin Belirlenmesi	79
5.2.2. Soğutma Üniteleri Güç Tüketimi İçin Bağımsız Değişkenlerin Belirlenmesi	81
5.2.3. VM Toplam Güç Tüketimi İçin Bağımsız Değişkenlerin Belirlenmesi	82
5.3. YSA ile Tahmin Modellerinin Belirlenmesi	84
5.4. Veri Merkezi Güç Tüketiminin 01 Ocak 2022 İçin Tahmin Edilmesi	86
5.5. Sonuç	88
6. OPTİMİZASYON MODÜLÜ	89
6.1. Genel Bilgiler	89
6.1.1. Optimizasyon Modülünde Kullanılacak Veri Merkezine Ait Değişkenlerin Yıllık Profilleri	89
6.1.2. Kaydırılabilir İş Yüğü Hesabı	91
6.1.3. Dizel Jeneratör Modeli	93
6.1.4. UPS Bilgileri	95
6.1.5. Optimizasyon Senaryolarında Kullanılan Veriler	95
6.2. Tek Zamanlı Elektrik Tarifesi ile Maliyet Hesabı	99
6.2.1. Matematiksel Model	99
6.2.2. Analiz Sonuçları	100
6.3. Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi ile Maliyet Hesabı	101
6.3.1. Matematiksel Model	101
6.3.2. Analiz Sonuçları	101

6.4. Senaryo 1: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi Kullanılarak ve Yük Kaydırması Yapılarak Maliyet Hesabı	102
6.4.1. Matematiksel Model	103
6.4.2. Analiz Sonuçları	104
6.5. Senaryo 2: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi ve Alternatif Enerji Kaynakları Kullanılarak Maliyet Hesabı	106
6.5.1 Matematiksel Model	106
6.5.1.1 UPS Kısıtları	107
6.5.1.2 Jeneratör ve Güç Dengesi Kısıtları	109
6.5.2. Analiz Sonuçları	110
6.6. Senaryo 3: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi, Alternatif Enerji Kaynakları Kullanılarak ve Yük Kaydırması Yapılarak Maliyet Hesabı	112
6.6.1 Matematiksel Model	113
6.6.1.1 Yük Kaydırma ve Güç Dengesi Kısıtları	113
6.6.1.2 UPS Kısıtları	114
6.6.1.3 Jeneratör Kısıtları	114
6.6.2. Analiz Sonuçları	115
6.7. Senaryo 4: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi, Alternatif Enerji Kaynakları, Yük Kaydırma Yöntemi ve Termal Enerji Depolama Kullanılarak Maliyet Hesabı	117
6.7.1. Veri Merkezi Termal Modeli	118
6.7.2. IT Güç Tüketiminin Termal Etkisi	121
6.7.3. Matematiksel Model	124
6.7.3.1 Yük Kaydırma, Güç Dengesi, Jeneratör ve UPS Kısıtları	124
6.7.3.2 Soğutma ve İç Ortam Sıcaklığı Kısıtları	125
6.7.4. Analiz Sonuçları	128
6.8. Jeneratör, UPS ve VM Termal Kapasitesinin Bireysel Olarak Kullanımı	133
6.8.1. Jeneratör Kullanımının Bireysel Katkısı	133
6.8.2. UPS Kullanımının Bireysel Katkısı	135
6.8.3. VM Termal Kapasitesi Kullanımının Bireysel Katkısı	136
6.9. Genel Değerlendirme	138

6.10. Sonuç	142
7. SİMÜLATÖR TASARIMI	143
7.1. Tahmin Modülü Ara Yüzünün Tasarlanması	143
7.2. Optimizasyon Modülü Ara Yüzünün Tasarlanması	144
7.3. Sonuç	145
8. SONUÇLAR	146
 KAYNAKLAR	 150
ÖZGEÇMİŞ	164
EKLER	165



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler ve

Açıklamalar

Kısaltmalar

$P_{IT}^{CPU, RAM}$

CPU ve RAM kullanımının fonksiyonu şeklinde yazılan IT güç tüketimi değeri.

X^{CPU}

CPU kullanım oranı.

X^{RAM}

RAM kullanım oranı.

Δt

$P_{IT}^{est}(t)$

Tahmin edilen IT güç tüketimi değeri.

$P_{AC}^{est}(t)$

Tahmin edilen soğutma üniteleri güç tüketimi değeri.

$P_{OD}^{est}(t)$

Tahmin edilen diğer cihazlar güç tüketimi değeri.

$P_{tot}^{est}(t)$

Tahmin edilen VM toplam güç tüketimi değeri.

P_{IT}^{max}

CPU ve RAM kullanım oranlarının %100 olduğu durumda gerçekleşen IT güç tüketiminin maksimum değeri.

$P_{gen}(t)$

Jeneratörden her “t” zamanı için sağlanan güç [kW].

$C_{liter}(t)$

Jeneratörden her “t” zamanı için $P_{gen}(t)$ kadar güç sağlamak için gerekli olan yakıt tüketim miktarı [litre].

$P_{gen}^{capacity}$

Veri merkezinde bulunan bütün jeneratörlerden sağlanabilecek maksimum güç sağlama kapasitesi.

P_{gen}^{max}

Jeneratörün sağlayabileceği maksimum güç miktarı [kW].

C_{gen}^{Tank}

Jeneratörün sahip olduğu yakıt tankı kapasitesi [litre].

$Cost_{grid}^{IT, singleT}$

TZET’e göre hesaplanan IT güç tüketim maliyeti.

$Cost_{grid}^{AC, singleT}$

TZET’e göre hesaplanan soğutma üniteleri güç tüketim maliyeti.

$Cost_{grid}^{OD, singleT}$

TZET’e göre hesaplanan diğer cihazlar güç tüketim maliyeti.

$Cost_{grid}^{DC, singleT}$

TZET’e göre hesaplanan veri merkezi toplam güç tüketim maliyeti.

M^s

Veri merkezinin ikili anlaşma yoluyla ödemiş olduğu elektrik birim fiyatı [TL/kWh].

$M^{ToU}(t)$

Üç zamanlı elektrik tarifesi.

$Cost_{grid}^{IT, ToU}$

ÜZET’e göre hesaplanan IT güç tüketim maliyeti.

$Cost_{grid}^{AC,ToU}$	ÜZET'e göre hesaplanan soğutma üniteleri güç tüketim maliyeti.
$Cost_{grid}^{OD,ToU}$	ÜZET'e göre hesaplanan diğer cihazlar güç tüketim maliyeti.
$Cost_{grid}^{DC,ToU}$	ÜZET'e göre hesaplanan veri merkezi toplam güç tüketim maliyeti.
$Cost_{grid}^{AC,LS}$	ÜZET ve IT yük kaydırma yapılarak hesaplanan soğutma üniteleri güç tüketim maliyeti.
$Cost_{grid}^{OD,LS}$	ÜZET ve IT yük kaydırma yapılarak hesaplanan diğer cihazlar güç tüketim maliyeti.
$Cost_{grid}^{IT,LS}$	ÜZET ve IT yük kaydırma yapılarak hesaplanan IT güç tüketim maliyeti.
$P_{ITnew}^{grid,LS}(t)$	ÜZET ve IT yük kaydırma yapıldığı Senaryo 1'de her "t" anı için hesaplanan yeni IT güç tüketimi değeri.
$Cost_{grid}^{IT}$	Şebekeden IT güç tüketimi için sağlanan enerji maliyeti.
$Cost_{grid}^{AC}$	Şebekeden soğutma üniteleri güç tüketimi için sağlanan enerji maliyeti.
$Cost_{grid}^{OD}$	Şebekeden diğer cihazlar güç tüketimi için sağlanan enerji maliyeti.
$Cost_{gen}^{IT}$	Jeneratörden IT güç tüketimi için sağlanan enerji maliyeti.
$Cost_{gen}^{AC}$	Jeneratörden soğutma üniteleri güç tüketimi için sağlanan enerji maliyeti.
$Cost_{gen}^{OD}$	Jeneratörden diğer cihazlar güç tüketimi için sağlanan enerji maliyeti.
$Cost_{UPS}$	UPS'ten IT, soğutma üniteleri ve diğer cihazlar güç tüketimi için sağlanan enerji maliyeti.
$C_{liter}^{IT}(t)$	Jeneratörden IT için sağlanan güç miktarına bağlı olarak jeneratörün her "t" anında harcadığı yakıt tüketim miktarı.
$C_{liter}^{AC}(t)$	Jeneratörden soğutma üniteleri için sağlanan güç miktarına bağlı olarak jeneratörün her "t" anında harcadığı yakıt tüketim miktarı.
$C_{liter}^{OD}(t)$	Jeneratörden diğer cihazlar için sağlanan güç miktarına bağlı olarak jeneratörün her "t" anında harcadığı yakıt tüketim miktarı.
$P_{grid}^{IT}(t)$	IT güç talebi için optimizasyon sonucunda belirlenen her "t" anında şebekeden sağlanan güç miktarı [kW].
$P_{grid}^{AC}(t)$	Soğutma üniteleri güç talebi için optimizasyon sonucunda belirlenen her "t" anında şebekeden sağlanan güç miktarı [kW].

$P_{grid}^{OD}(t)$	Diğer cihazlar güç talebi için optimizasyon sonucunda belirlenen her “t” anında şebekeden sağlanan güç miktarı [kW].
$P_{gen}^{IT}(t)$	IT güç talebi için optimizasyon sonucunda belirlenen her “t” anında jeneratörden sağlanan güç miktarı [kW].
$P_{gen}^{AC}(t)$	Soğutma üniteleri güç talebi için optimizasyon sonucunda belirlenen her “t” anında jeneratörden sağlanan güç miktarı [kW].
$P_{gen}^{OD}(t)$	Diğer cihazlar güç talebi için optimizasyon sonucunda belirlenen her “t” anında jeneratörden sağlanan güç miktarı [kW].
$P_{UPS}^{ch}(t)$	Optimizasyon sonucunda her “t” anında UPS bataryalarını şarj etmek için belirlenen şebekeden çekilen güç miktarı [kW].
$U_{gen}^{IT}(t)$	IT güç tüketimi için ikili karar değişkeni: eğer “t” anında jeneratörden güç sağlanmışsa 1, değilse 0.
$U_{gen}^{AC}(t)$	Soğutma üniteleri güç tüketimi için ikili karar değişkeni: eğer “t” anında jeneratörden güç sağlanmışsa 1, değilse 0.
$U_{gen}^{OD}(t)$	Diğer cihazlar güç tüketimi için ikili karar değişkeni: eğer “t” anında jeneratörden güç sağlanmışsa 1, değilse 0.
C_d	Jeneratör yakıt fiyatı [TL/litre].
$P_{UPS}^{ch,max}$	Maksimum UPS şarj gücü [kW].
$P_{UPS}^{disCh,max}$	UPS’in maksimum deşarj olma gücü [kW].
$P_{UPS}^{IT,disCh}(t)$	IT güç talebi için optimizasyon sonucunda belirlenen her “t” anında UPS’ten sağlanan güç miktarı [kW].
$P_{UPS}^{AC,disCh}(t)$	Soğutma üniteleri güç talebi için optimizasyon sonucunda belirlenen her “t” anında UPS’ten sağlanan güç miktarı [kW].
$P_{UPS}^{OD,disCh}(t)$	Diğer cihazlar güç talebi için optimizasyon sonucunda belirlenen her “t” anında UPS’ten sağlanan güç miktarı [kW].
$U_{ch}(t)$	UPS için belirlenen ikili karar değişkeni: eğer “t” anında UPS şarj edilmişse 1, değilse 0.
$U_{disCh}^{IT}(t)$	IT güç tüketimi için ikili karar değişkeni: eğer “t” anında UPS deşarj edilmişse 1, değilse 0.
$U_{disCh}^{AC}(t)$	Soğutma üniteleri güç tüketimi için ikili karar değişkeni: eğer “t” anında UPS deşarj edilmişse 1, değilse 0.
$U_{disCh}^{OD}(t)$	Diğer cihazlar güç tüketimi için ikili karar değişkeni: eğer “t” anında UPS deşarj edilmişse 1, değilse 0.

$SoE_{UPS}(t)$	UPS bataryalarındaki her “t” anındaki enerji miktarı.
SoE_{UPS}^{init}	UPS bataryalarının başlangıç anında sahip olduğu enerji miktarı.
SoE_{UPS}^{min}	UPS bataryalarının sahip olabileceği minimum enerji miktarı.
SoE_{UPS}^{max}	UPS bataryalarının sahip olabileceği maksimum enerji miktarı.
γ_{ch}	UPS bataryaları şarj verimliliği.
γ_{disCh}	UPS bataryaları deşarj verimliliği.
$P_{ITnew}(t)$	IT yük kaydırması yapıldıktan sonra her “t” anı için bulunan yeni IT güç tüketim değeri.
C_{air}^{DC}	Havanın özgül ısı kapasitesi
M_{air}^{DC}	Veri Merkezi iç ortam hava kütlesi
q^{air}	Veri merkezi iç ortam sıcaklığı değişimi için gerekli olan ısı miktarı [kW].
q_{wall}^{out}	Dış ortam ile veri merkezi iç ortamı arasında gerçekleşen ısı transferi miktarı [kW].
q^{IT}	IT kabinlerinin sebep olduğu ısı transferi miktarı [kW].
q^{AC}	Soğutma ünitelerinden sağlanan ısı transferi miktarı [kW].
q^{TES}	Termal enerji depolama (TES) tankı kullanılarak sağlanan soğutma miktarı [kW].
k_{wall}	Duvarın termal iletkenlik katsayısı.
L_{wall}	Duvarın kalınlığı.
A_{wall}	Isı transferinin gerçekleştiği toplam duvar alanı.
T^{out}	Dış ortam sıcaklığı.
V_{DC}	Veri merkezi hacmi.
δ_{air}	Hava yoğunluğu.
$T^{DC}(t)$	Optimizasyon sonucunda belirlenen veri merkezi iç ortam sıcaklığı.
T^{AC}	Soğutma ünitesinden gelen hava sıcaklığı.
m_{AC}^{DC}	Soğutma ünitesinden gelen hava kütlesi akış hızı.
M_{water}^{TES}	Termal enerji depolama tankındaki su kütlesi.
C_{water}	Suyun özgül ısı kapasitesi.
$T^{TES}(t)$	Optimizasyon sonrası her “t” anı için belirlenen su tankı içerisindeki su sıcaklığı değeri.
$P_{TES}^{Ch}(t)$	Optimizasyon sonrası her “t” anı için belirlenen su tankını şarj etmek için (soğutmak için) harcanan güç tüketimi.

$P_{TES}^{disCh}(t)$	Optimizasyon sonrası her “t” anı için belirlenen su tankının deşarj olmasıyla ortama sağlamış olduğu güç miktarı.
$q_{TOut,PIT}^{IT}(t)$	Dış ortam sıcaklığı ve IT güç tüketimine bağlı olarak hesaplanan, IT güç tüketiminin veri merkezinde sebep olduğu ısı miktarı.
$Cost_{TES}$	Şebeke kullanılarak TES tankındaki suyun soğutulularak şarj edilmesi işlemi için hesaplanan maliyet.
$U_{TES}^{Ch}(t)$	TES tankı için ikili karar değişkeni: eğer t anında şarj ediliyorsa 1, değilse 0.
$U_{TES}^{disCh}(t)$	TES tankı için ikili karar değişkeni: eğer t anında deşarj ediliyorsa 1, değilse 0.
$P_{TES}^{Ch,max}$	Maksimum TES tankı şarj gücü.
$P_{TES}^{disCh,max}$	TES tankı maksimum deşarj gücü.
T_{min}^{DC}	TES tankındaki suyun sıcaklık değerinin minimum sınırı.
T_{max}^{DC}	TES tankındaki suyun sıcaklık değerinin maksimum sınırı.
T_{init}^{DC}	TES tankındaki suyun optimizasyon periyodu başlangıcındaki sıcaklık değeri.
c	: Maddenin olduğu materyalin spesifik ısı kapasitesi
IoT	: Nesnelerin İnterneti
m	: Maddenin kütlesi
MAPE	: Ortalama Mutlak Yüzde Hata
MSE	: Ortalama Kare Hatası
MAE	: Ortalama Mutlak Hata
PU	: Per-Unit
PDU	: Protokol Veri Ünitesi
RMSE	: Kök Ortalama Kare Hata
RMSPE	: Yüzdesel Kök Ortalama Kare Hatası
sMAPE	Simetrik Ortalama Mutlak Yüzde Hatası
T&D	: Elektrik Enerjisi İletim Ve Dağıtım
TES	: Termal Enerji Depolama (Thermal Energy Storage)
TTY	: Talep Tarafı Yönetimi
ToU	: Kullanım Zamanına Göre Fiyatlandırma (Time of Use Pricing)
TZET	Veri merkezi ikili anlaşmalarla elde ettiği tek zamanlı elektrik tarifesi

ÜZET	Üç zamanlı elektrik tarifiesi
VM	: Veri Merkezi
YSA	: Yapay Sinir Ağları
QoS	: Hizmet Kalitesi (Quality of Service)
Q	: Herhangi bir maddeye veya maddeden transfer edilen ısı miktarı



ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: Veri merkezi genel güç akış diagramı.	12
2.2: Veri merkezi güç tüketimi oranlarının cihazlara göre dağılımı.	13
2.3: Bir sunucun bölümlerine göre güç tüketim dağılımı.	14
2.4: Tipik bir YSA nöronunun katmanları.	22
2.5: İleri beslemeli YSA modeli.	23
2.6: Geri beslemeli YSA modeli.	24
3.1: Türkiye'nin 2019 yılı toplam güç tüketimi eğrisi: (a) saatlik yük eğrisi; (b) tertiplenmiş yük eğrisi.	31
3.2: Normalize edilmiş gerçek tertiplenmiş yük eğrisi ile olması arzu edilen tertiplenmiş yük eğrisi karşılaştırması.	32
3.3: Veri merkezlerinin TTY'ye katılım sürecinin genel şeması.	33
3.4: Yük eğrisi tepe noktası azaltılması sonrası elde edilen yeni tepe noktasının belirlenme süreci.	34
3.5: Her DSM_{ratio} için tepe noktası azaltma işlemi sonrası Türkiye için elde edilen yeni tertiplenmiş yük eğrilerinin gösterimi.	36
3.6: Her DSM_{ratio} için tepe noktası azaltılması sonrası dünya geneli için elde edilen normalize edilmiş tertiplenmiş yük eğrileri.	42
4.1: Geçmiş veri indirme programı ara yüz ekranı.	49
4.2: Veri merkezi API'sine gönderilen istek formu.	50
4.3: Geçmiş veri indirme programı sonuç ekranı.	50
4.4: Zaman parametrelerinin türetilmesi.	53
4.5: Cihazlara göre VM güç tüketimi dağılımı.	53
4.6: Bağımsız değişken belirleme süreci için benimsenen metodoloji.	55
4.7: ARGE rack güç tüketimini etkileyen değişkenler için korelasyon matrisi.	64
4.8: Her bir bağımsız değişken tek tek kullanılarak yapılan ARGE rack güç tüketimi tahmini sonucu.	67
4.9: Bağımsız değişken çiftleri kullanılarak yapılan ARGE rack güç tüketimi tahmini sonucu.	69

4.10:	En uygun bağımsız değişken seti kullanılarak gerçekleştirilen ARGE rack güç tüketimi tahmin sonucu.	71
5.1:	Bütün değişkenler için oluşturulan korelasyon matrisi.	78
5.2:	IT güç tüketimi için belirlenen bağımsız değişkenler ve doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tahmin işlemi sonucu.	80
5.3:	Soğutma üniteleri güç tüketimi için belirlenen bağımsız değişkenler ve doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tahmin işlemi sonucu.	82
5.4:	VM toplam güç tüketimi için belirlenen bağımsız değişkenler ve doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tahmin işlemi sonucu.	84
5.5:	IT güç tüketimi için oluşturulan YSA modeliyle gerçekleştirilen tahmin işlemi sonucu.	85
5.6:	Soğutma üniteleri güç tüketimi için oluşturulan YSA modeliyle gerçekleştirilen tahmin işlemi sonucu.	85
5.7:	VM toplam güç tüketimi için oluşturulan YSA modeliyle gerçekleştirilen tahmin işlemi sonucu.	86
5.8:	Doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak 01 Ocak 2022 için gerçekleştirilen VM güç tüketimi tahminleri.	87
5.9:	YSA modeli kullanılarak 01 Ocak 2022 için gerçekleştirilen VM güç tüketimi tahminleri.	87
6.1:	Yıllık ortalama 24 saatlik IT güç tüketimi profili.	89
6.2:	Yıllık ortalama 24 saatlik VM toplam güç tüketimi profili.	90
6.3:	Yıllık ortalama 24 saatlik RAM kullanım oranı.	90
6.4:	Yıllık ortalama 24 saatlik CPU kullanım oranı.	91
6.5:	1 Ocak 2022 veri merkezi güç tüketimi tahminleri.	96
6.6:	Sıcaklık ölçümleri karşılaştırması.	97
6.7:	Tek zamanlı elektrik tarifi ile hesaplanan güç tüketimi maliyetleri.	100
6.8:	Üç zamanlı elektrik tarifi ile hesaplanan güç tüketimi maliyeti.	102
6.9:	Üç zamanlı elektrik tarifi ve yük kaydırma yapıldığı durum için IT güç tüketimi planlaması.	105
6.10:	Veri merkezi enerji maliyeti.	105

6.11:	Senaryo 2 için kaynaklara göre veri merkezi enerji yönetim planı.	111
6.12:	Kaynaklara ve tüketim cinsine göre enerji yönetim planı.	111
6.13:	Senaryo 2 için UPS şarj - deşarj durumu.	112
6.14:	Optimizasyon sonrası yeni IT güç tüketimi planlaması.	115
6.15:	Senaryo 3 için kaynaklara göre veri merkezi enerji yönetim planı.	116
6.16:	Kaynaklara ve tüketim cinsine göre enerji yönetim planı.	116
6.17:	Senaryo 3 için UPS şarj - deşarj durumu.	117
6.18:	ARGE rack ön ve arka kapı ortalama sıcaklık değerleri.	122
6.19:	Veri merkezi ortalama iç ortam sıcaklığı değişimi.	122
6.20:	Tahmin edilen ve gerçek $q_{T_{out},PIT}^{IT}$ değeri	123
6.21:	Optimizasyon sonrası yeni IT güç tüketimi planlaması.	128
6.22:	TES tankı şarj desarj durumu ve sıcaklık değişimleri.	129
6.23:	UPS şarj-desarj durumu	130
6.24:	Kaynaklara göre veri merkezi enerji yönetim planı.	131
6.25:	Kaynaklara ve tüketim cinsine göre enerji yönetim planı.	131
6.26:	IT güç tüketiminin veri merkezi ısınmasına etkisi.	132
6.27:	Jeneratör ve şebeke kullanıldığı durum için VM enerji yönetim planı.	134
6.28:	Jeneratör ve şebeke kullanıldığı durum için tüketim cinsine göre VM enerji yönetim planı.	134
6.29:	UPS şarj-deşarj grafiği.	136
6.30:	UPS ve şebeke kullanıldığı durum için VM enerji yönetim planı.	136
6.31:	VM termal kapasitesi ve şebeke kullanılarak elde edilen TES tankı şarj deşarj durumu ve sıcaklık değişimleri.	137
6.32:	Şebekeden sağlanan soğutma gücü ile TES tankı şarj-desarj gücü grafiği.	138
7.1:	Tahmin Modülü Ara Yüzü	143
7.2:	Optimizasyon Modülü Ara Yüzü	144

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo No:</u>	<u>Sayfa</u>
2.1: VM'lerin TTY'ye katılımı ile alakalı çalışmalar.	8
3.1: VM'lerin TTY'ye katılımının Türkiye için sonuçları.	37
3.2: Türkiye kurulu gücünün enerji kaynaklarına ve yıllara göre dağılımı.	39
3.3: Enerji santrali kaynaklarına göre kurulum ve işletme maliyetlerinin birim değerleri.	39
3.4: Ertelenen yeni enerji santrallerinin Türkiye için maliyet hesaplaması.	40
3.5: Küresel ölçekte VM'lerin TTY'ye katılım sonuçları.	43
3.6: Dünya kurulu gücünün enerji kaynaklarına ve yıllara göre dağılımı.	45
3.7: Ertelenen yeni enerji santrallerinin tüm dünya için maliyet hesaplaması.	45
4.1: Veri merkezi ölçüm cihazları ölçüm verileri.	49
4.2: IT güç tüketimi tahmini için kullanılabilecek muhtemelen bağımsız değişkenler.	58
4.3: Her bir bağımsız değişken tek tek kullanılarak yapılan ARGE rack güç tüketimi tahmini hata değerleri.	66
4.4: Bağımsız değişken çiftleri kullanılarak yapılan ARGE rack güç tüketimi tahmin hata değerleri.	68
4.5: En uygun bağımsız değişken seti kullanılarak gerçekleştirilen ARGE rack güç tüketimi tahmin hata değerleri.	71
5.1: IT güç tüketimi tahmini için belirlenen bağımsız değişkenler.	79
5.2: IT güç tüketimi için oluşturulan doğrusal olmayan regresyon modelinin hata oranları.	81
5.3: Soğutma üniteleri güç tüketimi tahmini için belirlenen bağımsız değişkenler.	81
5.4: Soğutma üniteleri güç tüketimi için oluşturulan doğrusal olmayan regresyon modelinin hata oranları.	82
5.5: VM toplam güç tüketimi tahmini için belirlenen bağımsız değişkenler.	83
5.6: VM toplam güç tüketimi için oluşturulan doğrusal olmayan regresyon modelinin hata oranları.	83
5.7: IT güç tüketimi için oluşturulan ysa modelinin hata oranları.	84

5.8:	Soğutma üniteleri güç tüketimi için oluşturulan ysa modelinin hata oranları.	85
5.9:	VM toplam güç tüketimi için oluşturulan ysa modelinin hata oranları.	86
5.10:	Tahmin modellerinin performans karşılaştırması.	88
6.1:	Zamana Göre İş Yüğü Kaydırma Sınırları.	93
6.2:	Farklı marka jeneratörlerin yakıt tüketimi ile önerilen jeneratör modeli yakıt tüketiminin karşılaştırılması.	95
6.3:	Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi Birim Fiyatları.	98
6.4:	Tek zamanlı elektrikli tarifesi için hesaplanan maliyetler.	100
6.5:	Üç zamanlı elektrikli tarifesi için hesaplanan maliyetler.	102
6.6:	Kullanılan Senaryoların Maliyet Performansı Karşılaştırması.	139
6.7:	VM'lerin optimizasyon senaryoları vasıtasıyla TTY'ye katılma miktarları.	141

1.GİRİŞ

Son yirmi yılda internet servis sağlayıcıları ve bulut hizmetleri ile bilgi ve iletişim cihazlarının kullanımına olan talep oldukça yükselmiştir. Buna paralel olarak üretilen ve işlenen veri miktarı da artmıştır. 2018 yılında dünyadaki internet kullanıcılarının toplam sayısı 3,9 milyar iken, 2023 yılına kadar bu rakamın 5,3 milyar olacağı tahmin edilmektedir[1]. Ayrıca, internete bağlı cihaz sayısının 2023 yılına kadar 29,3 milyar olacağı öngörülmektedir[1]. Seagate'in gerçekleştirdiği teknik incelemeye göre, üretilen dijital bilgi miktarı 2018'de 33 zettabayt (ZB) iken bu rakamın 2025 yılına kadar 175 ZB'ye ulaşması beklenmektedir[2]. Bunlara ek olarak bütün dünyada yaşanan COVID-19 salgını, hali hazırda gerçekleşen dijital dönüşümü çok daha fazla hızlandırmış ve pek çok dijital platformun gelişmesine ve tüketici alışkanlıklarının değişmesine sebep olmuştur. Özellikle işverenlerin evden çalışmasına olanak sağlayan çoğu şirketle birlikte, Google Meet, Zoom, Microsoft Teams gibi internet ve çevrimiçi video konferans yazılımlarına olan talep artmıştır. İzolasyon süresi aynı zamanda insanların evdeki alışkanlıklarını da etkilemiştir [3]. Arkadaşlar ve akrabalarla görüntülü görüşme oranı, sosyal medyada geçirilen zaman ve Netflix, HBO Now, Spotify gibi online ses ve video içerik servislerinin kullanımı çok hızlı bir şekilde artmıştır. ABD'de 24 Mart - 26 Mart 2020 tarihleri arasında 2200 yetişkinle yapılan bir araştırma [4], yetişkinlerin %37'sinin online alışveriş yapmayı pandemi öncesine göre daha fazla tercih ettiğini, yetişkinlerin %41'inin ve 18-29 yaş grubundakilerin %57'sinin online platformlardan film izlemeyi eskisinden daha fazla tercih ettiğini tespit etmiştir. Ayrıca aynı çalışma, 18-29 yaş grubundaki kişilerin %18'inin pandemiyle birlikte ilk kez FaceTime veya Zoom platformlarını kullandığını göstermektedir. Ayrıca [5]'te yer alan çalışmaya göre, COVID-19 sonrası Google Meet'e olan talep %60'a ulaşmış ve ortalama günlük kullanım günde 2 milyar dakika olarak beyan edilmiştir. Benzer şekilde pandemi döneminde Zoom programının kullanımı 10 kat artmıştır [6]. Yaşanan bu değişiklikler, dijital veri miktarında ve veri aktarım trafiğinde hızlı bir artışa sebep olmuştur. Verilen hizmetlerin aksamadan sürdürülebilmesi için, bu büyük verinin çok sayıda yüksek performanslı sunucu (server) içeren ve uzaktan erişim yeteneğine sahip veri merkezlerinde depolanması ve işlenmesi gerekmektedir.

IT sektöründeki en büyük paydaşları temsil eden Amazon, Google, Yahoo vb. internet servis sağlayıcıları, müşterilere güvenilir ve düşük gecikmeli hizmetler sunmak için çok sayıda coğrafi olarak dağıtılmış veri merkezi (VM) inşa etmiştir [7],[8]. Ayrıca pek çok büyük kolej ve üniversitenin veri depolama ve işleme süreçleri için kendi VM'leri bulunmaktadır. VM'ler çok sayıda sunucu, soğutma birimi, büyük ölçekli depolama birimi, ağ ekipmanı ve güç sağlama altyapısından oluşur. VM'ler sahip olduğu bu cihazlar sebebi ile yüksek miktarda enerji tüketen bir sektör haline gelmiştir [9],[10]. İngiltere'de VM'ler, İngiltere üniversitelerindeki elektrik tüketiminin yaklaşık %8'ini tüketmektedir [11]. JRC'nin çalışmasına göre [12], 2007 yılında 56 TWh olarak gerçekleşen Batı Avrupa'daki VM'lerin elektrik tüketiminin, 2020'de 104 TWh'ye yükselmesini öngörmüştür. EPA raporuna göre [13], 2006 yılında ABD'de gerçekleşen VM enerji tüketimi 61 TWh'tır. Bu miktar ABD'deki toplam elektrik tüketiminin %1,5'inin VM'ler tarafından tüketildiği ve Arjantin gibi orta ölçekli bir ülke kadar karbon emisyonuna sebep olduğu anlamına gelmektedir [14]. 2013 yılında ise ABD'deki VM'ler 91 TWh enerji tüketmiştir. Ayrıca, VM elektrik tüketiminin 2020 yılında %53 artarak 140 TWh olduğu tahmin edilmekte, bu tüketimin yaklaşık 150 milyon metrik ton karbon emisyonuna sebep olduğu öngörülmektedir[15]. ABD Çevre Koruma Ajansı'na göre [13], IT sektörü 2005 yılında dünyadaki karbon emisyonlarının %2'sinden sorumluydu [16]. Ayrıca 2013 yılında yayınlanan raporlarda [17], [18], VM'leri de içeren IT sektörünün dünyadaki elektrik üretiminin yaklaşık %10'nunu tükettiği belirtilmiştir. [19]'e göre, dünyadaki tüm VM'lerin toplam elektrik tüketimi 2005-2010 yılları arasında %56 oranında artmıştır. Bununla birlikte VM'lerin dünya çapındaki enerji tüketimi 2018'de 198 TWh olarak gerçekleşirken, 2021 yılında 308 TWh olmuştur [20], [21]. Bu rakamın 2040 yılına kadar 1.678 TWh'ye yükselmesi beklenmektedir [21]. Dolayısıyla bu kadar yüksek enerji tüketimine sahip VM sektörü, hem talep tarafı yönetimine katılım açısından, hem enerji verimliliği sağlanabilecek bir sektör olma potansiyeli açısından hem de dünya karbon salınımına etkisi açısından oldukça önemli bir sektör haline gelmiştir. Dolayısıyla VM yöneticileri için hem maliyeti minimize eden hem de VM'lerin karbon ayak izinin azaltılmasına fayda sağlayan sürdürülebilir enerji yönetim planlarının oluşturulması oldukça önem arz etmektedir.

1.1. Tezin Amacı ve Sınırları

Bu tezde, veri merkezlerinin talep tarafı yönetimi (TTY) uygulamalarına katılması durumunda hem veri merkezi hem de şebeke açısından sağlayabileceği faydaların analiz edilerek, VM'lerin sahip olduğu potansiyelin ortaya çıkarılması amaçlanmıştır. Ayrıca VM'lerin TTY'ye katılabilmeleri için enerji talebinin doğru ve güvenilir bir şekilde tahmin edilmesini sağlayan, maliyeti minimize edecek şekilde optimum enerji yönetim planı sunan ve dolaylı yoldan enerji verimliliği sağlayarak karbon emisyonunun azaltılmasına katkıda bulunan bir karar destek mekanizması (Decision Support Tool) geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu karar destek mekanizması sayesinde veri merkezi yöneticileri, bir simülatör ara yüzü üzerinden istedikleri zaman aralığı için VM enerji talebini tahmin ederek gelecek planlamaları yapabilecek, maliyeti minimize etmek için karar destek mekanizmasının önerdiği farklı enerji kullanım stratejileri arasından uygun olanlarını seçebilecektir. Yeni yatırım maliyeti gerektirmeden, yalnızca VM'lerin sahip olduğu mevcut argümanların bu karar destek mekanizmasına entegre edilerek TTY'ye katılmalarının sonucunda, dolaylı yoldan enerji verimliliğinin artırılması ve karbon emisyonunun azaltılmasına katkı sağlanması amaçlanmaktadır. Böylelikle VM'lerin karbon ayak izi açısından daha yeşil olması ve sürdürülebilir enerji yönetim sistemine sahip olması amaçlanmaktadır.

Bu amaçla Tez kapsamında yapılan çalışmalarda var olan sınırlar aşağıda sıralanmıştır:

- VM'lerin enerji tüketimi incelenmiş ve TTY'ye katılmasının güç sistemleri üzerindeki etkisi hem ekonomik hem de çevresel faktörler açısından incelenmiştir. VM'lerin TTY'ye katılmalarının karbon emisyonunun azaltılmasına olan etkisi analiz edilmiştir. Türkiye için yapılan çalışma ölçeklenerek bütün dünya için de gerçekleştirilmiştir.
- Günlük rutin iş yükü altında çalışmasına devam eden bir VM'de ölçümler yapılarak gerçek veriler kullanılmış ve veri ön işleme süreci gerçekleştirilmiştir. Düzenlenen veriler güç tüketim modellerinin oluşturulmasında ve tahmin modellerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır.
- Literatürde var olan pek çok tahmin algoritmasından hem tahmin işleminin hızlı yapılabilmesi hem de tahmin doğruluğunun yüksek olmasını sağlamak amacıyla,

doğrusal olmayan regresyon ve yapay sinir ağı yöntemi kullanılmıştır. Tahmin edilen güç talebi optimizasyon modülünde giriş verisi olarak kullanılmıştır.

- Optimizasyon modülünde VM'nin sahip olduğu jeneratör ve UPS, şebekeye alternatif enerji kaynağı olarak sisteme dahil edilmiştir. Ayrıca VM'nin iç ortam hava sıcaklığının izin verilen sınırlarda değiştirilmesi ve sahip olduğu su tankının termal enerji depolama elamanı olarak kullanılmasıyla VM'nin termal kapasitesi enerji kaynağı olarak kullanılmıştır.

1.2. Tezin İçeriği

Tezin 1. Bölümünde veri merkezlerine olan ihtiyaç, kullanım alanları ve tüketmiş olduğu enerji miktarı özetlenmiş, Tezin amacı, sınırları ve katkısı anlatılmıştır.

Tezin 2. Bölümünde VM'lerin kullanım zamanına göre fiyatlandırma (ToU) ve piyasa mekanizması yöntemleriyle TTY'ye katılımı ile alakalı literatürdeki çalışmalar özetlenmiştir. Ardından VM enerji tüketim elemanları analiz edilmiş ve literatürdeki enerji tüketim modelleri özetlenmiştir. Sonrasında literatürde var olan parametre seçimi ile alakalı çalışmalar ve yöntemler analiz edilmiştir. Son olarak ise VM enerji yönetimi ve TTY'ye katılımı ile alakalı çalışmalar incelenmiştir.

Tezin 3. Bölümünde veri merkezlerinin TTY'ye katılmasının güç sistemleri üzerindeki etkisi hem ekonomik hem de çevresel faktörler açısından incelenmiştir. Türkiye için, veri merkezlerinin TTY'ye katıldığı enerji miktarı, elektrik yük eğrisinin yataylaştırılması/tepe noktasının azaltılması için kullanılmıştır. Şebekenin enerji tasarrufu kapasitesinin iyileştirilmesine, güç kayıplarının azaltılmasına ve yeni enerji santrallerinin inşasının önlenmesine/ötelenmesine bağlı olası sonuçlar, Türkiye'nin elektrik tüketim verileri kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, iletim sistemi kayıplarında yaşanacak azalmanın ekonomik ve karbon emisyonu üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Türkiye için yapılan çalışma, bütün dünya için ölçeklenerek tekrarlanmış, küresel manada veri merkezlerinin TTY'ye katılmasının ne gibi sonuçları olacağı incelenmiştir.

Tezin 4. Bölümünde öncelikle VM ölçüm verilerinin elde edilmesi ve işleme süreçleri anlatılmış, ardından güç tüketimi modellerinde kullanılacak bağımsız

değişkenlerin belirlenme metodolojisi özetlenmiş ve örnek bir çalışma olarak IT güç tüketimi için bağımsız değişkenlerin belirlenmesi detaylı olarak anlatılmıştır.

Tezin 5. Bölümünde tahmin işlemi için kullanılan doğrusal olmayan regresyon ve YSA modelleri oluşturulmuş, ardından bu modellerde kullanılan bağımsız değişkenlerin belirlenmesi süreci anlatılmıştır. IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi için belirlenen doğrusal olmayan regresyon ve YSA modelleri, örnek bir tarih olarak 01 Ocak 2022 için kullanılarak güç tüketimi tahmini yapılmıştır.

Tezin 6. Bölümünde öncelikle optimizasyon modülüne ait genel bilgiler ve benimsenen yaklaşım açıklanmıştır. Ardından tahmin modülünde elde edilen IT güç tüketimi ve veri merkezi toplam güç tüketimi tahminleri, veri merkezinin sahip olduğu enerji kaynaklarıyla birlikte kullanılarak; veri merkezi yöneticilerine maliyeti minimize eden optimum enerji yönetim planları sunulmaktadır.

Tezin 7. Bölümünde tahmin ve optimizasyon modülünün kullanıcı tarafından çalıştırıldığı, MATLAB-GUI ortamında geliştirilen simülatör ara yüz tasarımları anlatılmaktadır.

Tezin 8. Bölümünde diğer bölümlerde elde edilen sonuçlar bir araya getirilerek genel olarak elde edilen sonuçlar özetlenmiştir.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Veri merkezlerinin işlevi ve tüketmiş oldukları enerji miktarı ile VM'lere olan ihtiyacın her geçen gün daha da artması, VM'leri güç sistemleri açısından oldukça önemli bir konuma getirmiştir. Bu bölümde öncelikle VM'lerin talep tarafı yönetimine katılmaları ile alakalı mevcut literatür özetlenmiştir. Sonrasında VM enerji tüketimi analiz edilmiş ve güç tüketimini etkileyen parametre seçimi ile alakalı literatür özetlenmiştir. Ardından güç tüketimi tahmin yöntemleri anlatılmış ve son olarak VM enerji yönetimi ve TTY'e katılımı ile alakalı kullanılan optimizasyon yaklaşımları anlatılmıştır.

2.1. Veri Merkezlerinin Talep Tarafı Yönetimine Katılımı

Yüksek miktarda güç tüketim özelliği ve prosumer olma yetenekleri açısından VM'ler, güç sistemleri için oldukça önemli bir konuma gelmiştir. Literatürde VM güç tüketimi tahmini ve enerji yönetim stratejileri ile alakalı pek çok çalışma bulunmaktadır [22]–[25]. VM'ler talep dalgalanmaları ve güç eğrisi yumuşatma işlemleri için kullanılan, talep tarafı yönetimi (TTY) uygulamalarına katılım açısından oldukça uygun adaylardır. Klasik güç sistemlerinde talep dalgalanması problemi, güç kaybı, voltaj/frekans kontrolü ve güç sistemlerinin kararlılığı üzerindeki etkileri açısından oldukça önemli bir sorundur. Bu sorun genellikle birim taahhüt (unit commitment) teknikleri kullanılarak rezerv üretim kaynaklarının dağıtılmasıyla telafi edilir. Ancak yenilenebilir enerji kaynakları kesintili yapıya (intermittent nature) sahip oldukları için enerji sürekliliği sağlayamazlar ve birim taahhüt için uygun değildir. Yenilenebilir enerji kaynakları güç sistemi açısından, dağıtılamayan (non-dispatchable) enerji kaynaklarıdır ve güç sistemlerindeki dalgalanmalara göre anlık olarak kapatılıp açılmazlar. Ayrıca hava koşullarının değişken doğası nedeniyle güç sistemlerindeki dalgalanma sorunlarına katkıda bulunurlar. Yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın kullanımıyla birlikte yaşanan bu problemler, enerji yönetimini ve sistem verimliliğini daha önemli hale getirmektedir. Akıllı şebeke teknolojilerinin gelişmesiyle birlikte yüklerin, enerji üretimi yerine dağıtıldığı ve kontrol edildiği bir sistem olan talep tarafı yönetimi, tüketicilerin ihtiyaç duydukları yük talebini karşılarken aynı zamanda elektrik faturalarını azaltma gibi faydalar sağlar. Ayrıca

şebeke ve üretici tarafına ise daha verimli bir sistem sağlamak, enerji üretimi için sermaye gereksinimini azaltmak ve enerji üretim, iletim ve dağıtım sistemlerinin maliyetini azaltmak gibi avantajlar sağlar [26]. TTY, yük kontrol sistemleri, yerinde enerji depolama üniteleri veya tüketimin yoğun olduğu saatlerdeki elektrik yükünün yoğun olmayan saatlere kaydırılmasının teşvik edilmesi gibi yöntemlerle, talep tarafında ihtiyaç duyulan değişikliklerin zamanında yapılmasını amaçlamaktadır [27],[28]. Bu açıdan VM'ler, endüstrideki diğer büyük müşterilere kıyasla zaman içinde kaydırılması ve kontrol edilmesi daha kolay olan esnek yüklere sahip oldukları için, TTY sistemleri açısından oldukça uygun katılımcılardır. VM'lerin TTY'ye katılması, hem VM enerji kaynaklarının ve enerji tüketiminin efektif olarak yönetilmesiyle VM'ye ekonomik açıdan fayda sağlamakta hem de güç sistemlerindeki talep dalgalanmalarının yumuşatılmasına ve tepe noktasının azaltılmasına katkıda bulunmaktadır. Clausen ve arkadaşlarının [29]'de gerçekleştirdiği çalışma, yenilenebilir enerji kaynaklarının hava koşulları nedeniyle neden olduğu şebeke iletim ve dağıtım sistemi dalgalanmalarını dengelemek için VM'lerin nasıl iyi bir aday olabileceği açıklanmaktadır. İlgili çalışmada veri merkezleri TTY'ye katılarak sanal enerji santralleri olarak kullanılmaktadır. VM'lerin TTY'ye katılımı ile alakalı çalışmalar iki alt kategoride incelenebilir: kullanım zamanına göre fiyatlandırma ve piyasa mekanizması. VM'lerin TTY'ye katılımı ile alakalı çalışmalar Tablo 2.1.'de özetlenmiştir.

2.1.1. Kullanım Zamanına Göre Fiyatlandırma (Time of Use Tariff)

Kullanım zamanına göre fiyatlandırma (ToU), elektrik fiyatının günün farklı saatlerine göre ayarlanmasına dayanır. Güç talebinin yoğun olduğu saatlerde daha yüksek, yoğun olmayan saatlerde daha düşük fiyatlara sahip bir elektrik tarifi vardır. Bu yaklaşım dünyadaki çoğu elektrik sağlayıcılar tarafından uzun süredir kullanılmaktadır [30].

2.1.2. Piyasa Mekanizması (Market Mechanism)

Piyasa mekanizması, katılımcıların gün öncesi veya gün içi elektrik piyasası tekliflerine göre elektrik fiyatlarının belirlenmesine dayanmaktadır. Teklif sahipleri,

üretim veya tüketim miktarları üzerinden piyasaya katılabilir ve taahhütlerini sağlamazlarsa cezalandırılmayı kabul ederler [31]–[33]. Literatürde VM’lerin piyasa mekanizması uygulaması ile TTY’ye entegre edildiği üç teknik vardır: (I) enerji tüketiminin belli bir zaman aralığı içinde kaydırılmasına dayanan yük kaydırma (load shifting) yöntemi, (II) enerji tüketim talebinin coğrafi olarak kaydırılması olan yük taşıma (load migration) yöntemi ve (III) uyku modunu geçici olarak etkinleştiren veya sunucuları boşa durumdayken enerji tüketimini azaltmak için komple kapatan, yük atma (load shedding) yöntemi [33],[34].

VM’lerin iş yükleri genellikle gecikme hassasiyetli ve gecikme toleranslı iş yükleri olmak üzere iki alt kategoriye ayrılır [8].Gecikme hassasiyetli iş yükü, herhangi bir gecikme olmadan hemen gerçekleştirilmelidir. Öte yandan, gecikme toleranslı iş yükleri, başka bir zamana ertelenebilmekte, böylelikle iş yükünün yüksek elektrik fiyatlarının olduğu zaman diliminden daha düşük fiyatların olduğu zamana kaydırılmasına dayanan, yük kaydırma tekniği için kullanılabilir. Gecikme toleranslı iş yükleri aynı zamanda daha düşük elektrik fiyatlarına sahip farklı bir konumdaki VM’lere yük taşıma yöntemi ile taşınabilmektedir.

Tablo 2.1: VM’lerin TTY’ye Katılımı ile Alakalı Çalışmalar.

Mevcut Çalışmalar	Kullanım Zamanına göre Fiyatlandırma (ToU)	Piyasa Mekanizması (Market Mechanism)			İlgili Çalışmanın Amaçları
		Yük Kaydırma (Load Shifting)	Yük Taşıma (Load Migration)	Yük Atma (Load Shedding)	
[35]	✓				IT ekipmanlarının ve elektrikli araçların birlikte elektrik şebekesine entegre edildiği, müşterilerin elektrik faturalarını azaltmayı ve güç eğrisini iyileştirmeyi amaçlayan Konut Enerji Yönetimi sistemi geliştirilmiştir.
[36]	✓				Yazarlar, VM’lerin operasyonel harcamaları ve güç tüketimini azaltmak için ToU tabanlı optimizasyon yöntemleri uygulamışlardır. Çalışma sayesinde elektrik faturasında bir azalma olmasına rağmen, hizmet süresi gecikmeleri artmıştır.
[25]	✓				Bu çalışmada yazarlar, derin öğrenme tabanlı optimizasyon yöntemleri kullanarak rüzgar çiftlikleri ve güneş panelleri olan farklı veri merkezlerinin enerji maliyetini en aza indirmeyi amaçlamaktadır.
[37]	✓		✓		Kantarcı ve ark., [36]’deki çalışmalarını sezgisel çözümler uygulayarak ve VM’ler arasındaki trafiği göz önünde bulundurarak genişletmişlerdir. Ayrıca, iş yükünün %70’lik kısmı için yük taşıma yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 2.1: Devam.

Mevcut Çalışmalar	Kullanım Zamanına göre Fiyatlandırma (ToU)	Piyasa Mekanizması (Market Mechanism)			İlgili Çalışmanın Amaçları
		Yük Kaydırma (Load Shifting)	Yük Taşıma (Load Migration)	Yük Atma (Load Shedding)	
[38]		✓			Bu çalışmada, yenilenebilir enerji kaynakları ve VM'lerin UPS bataryaları kullanarak bir veri merkezinin elektrik tüketim maliyetini azaltmak ve güç eğrisindeki dalgalanmaları dengelemek için bir iş yükü kaydırma mekanizması geliştirilmiştir.
[39]		✓			Yazarlar, VM'lerin elektrik maliyetini en aza indirmek için hem yük kaydırma hem de enerji depolama alternatiflerini içeren ve konveks optimizasyon modeli kullanarak güç eğrisi tepe noktası azaltma stratejisi önermişlerdir.
[40]		✓			Bu çalışmada, yazarlar VM'nin yük kaydırma yöntemiyle talep yanıtına katılımı için HVAC, IT iş yükü ve batarya enerji depolama sistemlerini kontrol eden gerçek zamanlı bir model önermektedir.
[41]		✓			Bu çalışmada yazarlar, Xen balon sürücüsüne dayalı olarak birden fazla sanal makine belleğini optimize eden bir sistem geliştirmişlerdir. Bu sistem, bir sanal makinedeki aşırı yüklenmiş belleği, genel zamanlama algoritması kullanarak otomatik olarak başka bir sanal makineye kaydırmaktadır.
[42]		✓			Bu çalışma, bir VM'de sanal makineler arasındaki yük kaydırma işlemi sırasında ağ trafiği maliyetlerinin de dikkate alınması gerektiği vurgulamaktadır. Yazarlar, ağı duyarlı sanal makineler arası iş yükü geçiş problemini genetik algoritma ve yapay arı kolonisi yöntemlerini kullanarak çözmektedir.
[43]		✓			AMMAR ve ark., bir VM'deki sanal makineler arası yük kaydırma işlemi için hizmet düzeyi sözleşmesi (SLA) ihlali şartlarını da dikkate alan bir algoritma önermektedir. Önerilen algoritma enerji kaynaklarının dengeli kullanımını sağlar, kaynak israfını, SLA ihlalini ve yük kaydırma maliyetini en aza indirir.
[44]		✓		✓	Bu çalışmada, gecikme toleranslı iş yükü ve hizmet kalitesinin korunması dikkate alınarak, enerji maliyetini en aza indirmek için bir enerji yönetim sistemi önerilmiştir. Yazarlar, yük kaydırma ve atma yöntemleri de dahil olmak üzere uygun maliyetli çözümleri belirlemek için farklı çalışma senaryolarını karşılaştırmaktadır.
[45]		✓		✓	Bu çalışma, sunucu kiralama hizmeti sunan veri merkezlerinde sunucu kiralayan müşterilerin, Nash Pazarlık Teorisi aracılığı ile yedek enerji kaynakları kullanılmadan acil talep yanıtına (emergency demand response) katılmalarıyla alakalıdır. Kiracıların acil durumlarda iş yüklerini kaydırması veya atması, teşvik mekanizması kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Tablo 2.1: Devam.

Mevcut Çalışmalar	Kullanım Zamanına göre Fiyatlandırma (ToU)	Piyasa Mekanizması (Market Mechanism)			İlgili Çalışmanın Amaçları
		Yük Kaydırma (Load Shifting)	Yük Taşıma (Load Migration)	Yük Atma (Load Shedding)	
[46]		✓		✓	Yazarlar, ayrıştırma tabanlı algoritma kullanarak VM'lerin enerji maliyetini azaltmak için sunucu kiralayan müşterilerin iş yüklerini kaydırmasına veya atmasına dayanan "parasal ödül ile kullanıma dayalı fiyatlandırma" adı verilen yeni bir yöntem önermektedir.
[47]			✓		Bu çalışmada, Fridgen ve ark. VM'nin elektrik tüketimi maliyetini optimum yük taşıma programı ayarlamaları ile en aza indiren ekonomik bir analiz sunmaktadır.
[48]			✓		Thimmel ve ark. [47]'deki yaklaşımı genişleterek, farklı elektrik piyasaları arasındaki talebi dengelemek için farklı coğrafyalardaki VM'ler aracılığıyla yük taşıma yöntemini kullanmışlardır.
[49]			✓		Bu çalışmada yazarlar, koalisyonel oyun teorisi yöntemi kullanarak ve birden fazla bulut sağlayıcısı arasında yük taşıma yöntemi kullanarak, VM'nin elektrik maliyetini en aza indirmeyi amaçlamaktadır.
[50]			✓		Yazarlar, tıkanıklık yönetimi yöntemiyle coğrafi olarak dağıtılmış veri merkezleri arasında yük taşıma yöntemi kullanarak farklı bölgelerdeki şebekeler arasındaki tıkanıklığı ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır. Önerilen mekanizma, tıkanıklık maliyetlerini en aza indirir ve taşınan yüke karşılık gelen miktar kadar veri merkezlerine gelir sağlar.
[51]			✓	✓	Yazarlar, uzun vadeli işletme maliyetini en aza indirmeyi ve farklı coğrafyalardaki veri merkezlerinin gerçek zamanlı enerji yönetimi sorununu çözmeyi amaçlamaktadır. Optimum enerji yönetimi problemini çözmek için Lyapunov optimizasyon yöntemi ile iş yükü taşınması ve atılması yöntemleri kullanılmıştır.
[52]				✓	Yazarlar, VM'lerin karbon ayak izini ve operatör maliyetini en aza indirmek için, veri merkezi kiracılarından, azaltmayı taahhüt ettikleri güç miktarı tekliflerini toplayan karbon duyarlı bir teşvik mekanizması geliştirmişlerdir. Çevrimiçi optimize edici, kazanan teklifi belirleyerek kiracının ödüllendirilmesini sağlar.
[53]				✓	Yazarlar, VM'lerin yedek güç sağlayıcıları yerine sunucu iş yükleri ve ofis binalarının soğutma yükü aracılığıyla acil durum talep yanıtına katılmalarını sağlayan teşvik tabanlı bir program tasarlamaktadır. Acil durum anında, klimaların sıcaklık ayarlamaları değiştirilir ve sunucu iş yükleri atılır.

Literatürde var olan VM'lerin TTY'ye katılmasıyla alakalı bu makalelerle birlikte aynı zamanda çeşitli Avrupa Birliği fonları tarafından desteklenmiş pek çok proje bulunmaktadır. Bu projeler genel olarak enerji verimliliğine odaklanmaktadır.

Çoğu proje (L3MATRIX, Cubbit, PhotoniX, Twilight, Poetics, Vineyard, Mercury, FPGA Accelerators, Polysys, Ict-Streams, Fips) enerji tasarruflu donanım cihazları geliştirmeyi ve ağ ekipmanlarının kararlılığını, güvenilirliğini, kapasitesini ve verimliliğini artırmayı, enerji tüketimini en aza indirmek için yeni anahtarlama ve yönlendirme mimarisi tasarlamayı ve iş yükü dengeleme için optimum sanal makine tahsisinin gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır. Bununla birlikte, Submer, HeatTank, AIC24, serverChill, Dew-Cool-4-CDC, LhPchPlate4DC projeleri, yeni teknolojik cihazlarla entegre olan yeni yönetim araçları sağlayarak veya soğutma enerji tüketimini en aza indirmek ve veri merkezi verimliliği ölçümüne yarayan PUE değerini azaltmak için modüler ve taşınabilir ticari ürünler icat ederek, soğutma ünitelerinin verimlilik sorunlarıyla başa çıkmayı amaçlamaktadır. Tüm projeler genellikle bireysel bileşenlere odaklanır ve VM ekosistemi üzerindeki kümülatif etkileri açısından fayda sağlar.

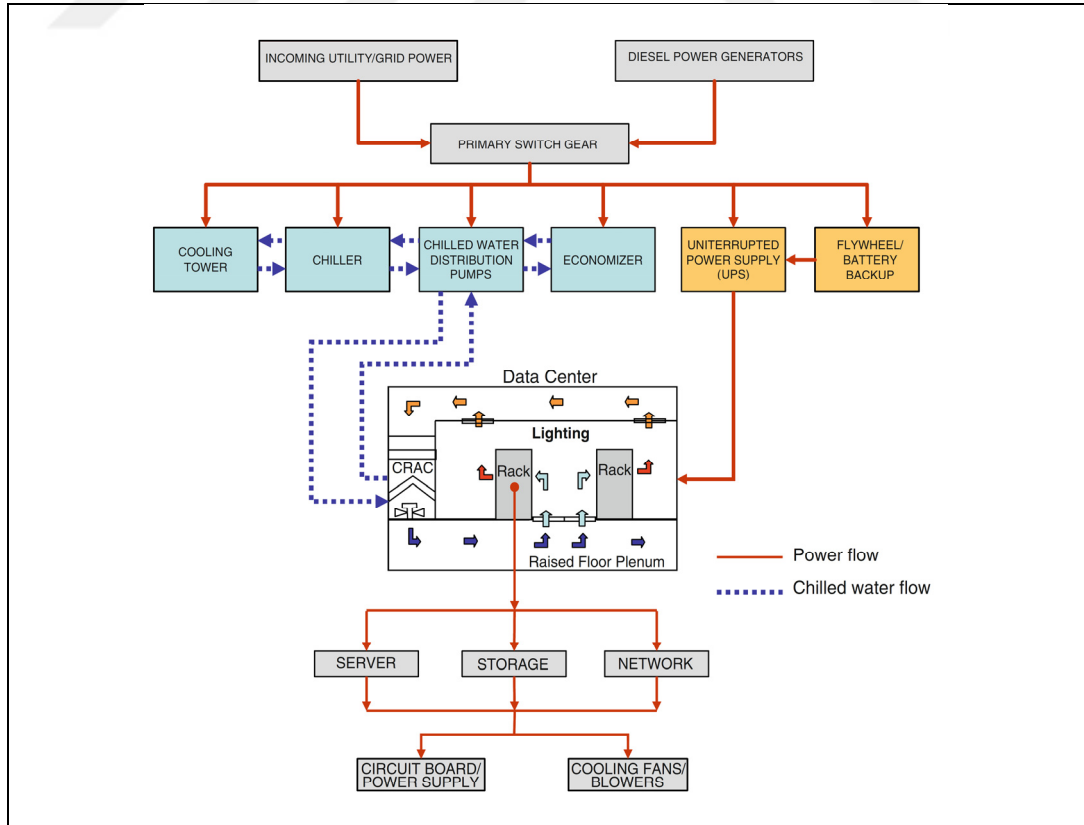
Çok az proje VM enerji verimliliğine bütünsel bir bakış açısına sahiptir. Eco4Cloud (<http://www.eco4cloud.com>), farklı konumlardaki enerji fiyatlarına göre, VM'lerde sanal makine tahsis edilmesini yöneterek maliyeti, enerji tüketimini ve CO₂'yi azaltmayı amaçlamaktadır. Öte yandan CATALYST (<https://project-catalyst.eu/>), enerji verimliliğini artırmak, mevcut ve yeni VM'ler için atık ısıyı yeniden kullanmak için çalışmalar yapmıştır. FishDirector (<https://www.sardinasystems.com/>), sunucu kaynaklarının kullanımını optimize ederek enerji tüketimini en aza indiren bir yazılım geliştirmeyi amaçlamaktadır. BodenTypeDC (<https://bodentypedc.eu/>), temiz hava soğutma sistemi ve harmonik içermeyen yenilenebilir enerji kaynakları kullanarak, PUE değeri 1,1'in altında olan en verimli VM'yi inşa etmeyi amaçlamaktadır. Dış ortam havası doğrudan soğutma için kullanılmaktadır.

Bu çalışmalar göstermektedir ki VM'ler sahip olduğu yük karakteristiği ve miktarı açısından TTY'ye katılım için oldukça uygun oyuncular olup, hem şebeke ve güç sistemi açısından hem de VM işletme maliyetleri açısından pek çok fayda sağlama potansiyeli vardır. Ancak bu potansiyelin ortaya çıkarılması için öncelikle veri merkezindeki güç tüketim araçlarının ve güç tüketimini etkileyen parametrelerin incelenmesi ve analiz edilmesi gerekmektedir. Bu analizler Bölüm 2.2'de gerçekleştirilmiştir.

2.2. Veri Merkezi Enerji Tüketimi Analizi

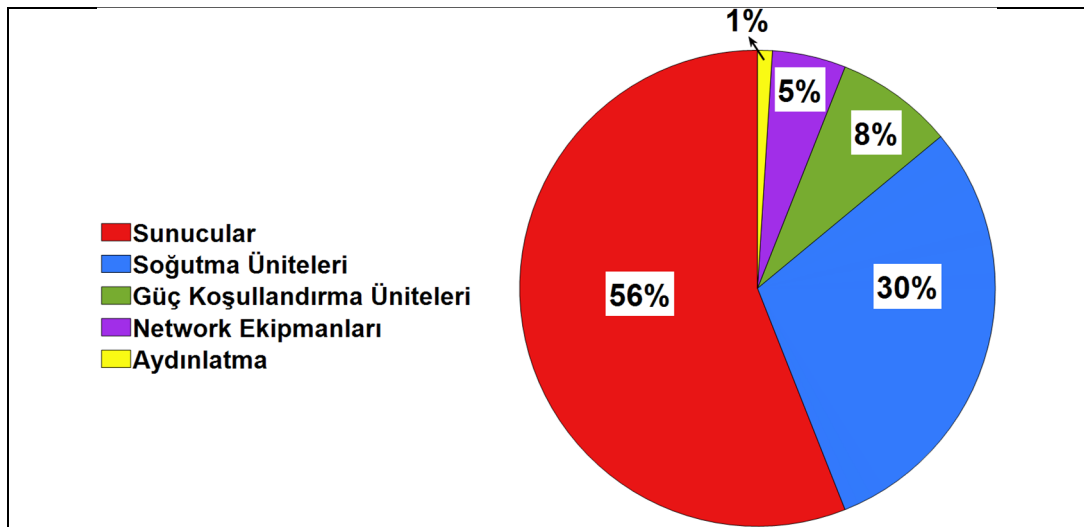
Devlet kurumları, eğitim kurumları, telekomünikasyon şirketleri, finans kuruluşları, sağlık kurumları, araştırma laboratuvarları, internet servis sağlayıcıları ve bulut hizmetleri gibi pek çok kuruluş, ürettiği veya kullandığı her türlü veri için VM'lere ihtiyaç duyar. Tipik bir VM'nin hizmetlerini aksatmadan sürdürebilmesi için sunucular, ağ ekipmanları, sunucu kabinleri, güç dönüşüm cihazları, yedek güç üniteleri ve soğutma üniteleri gibi çeşitli cihazların bir arada çalışması ve uygun şekilde yönetilmesi gerekmektedir.

Bir VM için genel güç akış şeması Şekil 2.1'de verilmiştir[54]. Şekilden görülebileceği gibi, birincil şalt cihazı şebekeden veya dizel jeneratörden gelen güçle beslenir. VM'nin enerji ihtiyacı (IT ekipmanları, veri depolama üniteleri, networking, aydınlatma vb.) kesintisiz güç kaynağı (UPS) üzerinden sağlanmaktadır. Şebeke elektrik kesintisi durumunda, yedek batarya grubu UPS'i beslemektedir. Ayrıca soğutma üniteleri ve kulesi ve pompaları ile ekonomizör, birincil şalt cihazı üzerinden beslenir.



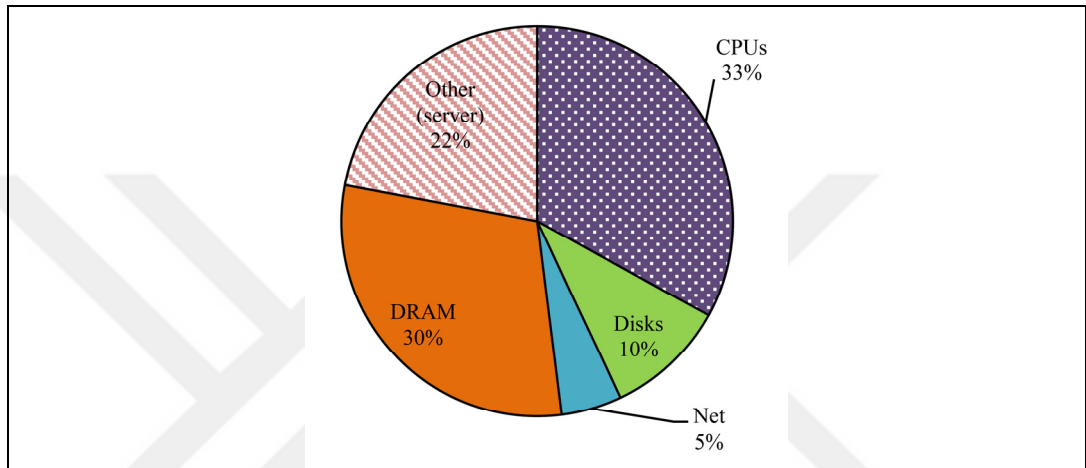
Şekil 2.1: Veri merkezi genel güç akış diagramı.

Bir VM'de enerji tüketen birbirinden farklı pek çok cihaz bulunmaktadır. Bu nedenle, her bir güç tüketen bileşenin verimliliğini ölçmek hem çok zor hem de karmaşıktır. Bu sebeple veri merkezi verimliliğini ölçmeye yarayan “güç kullanım etkinliği (PUE)” isimli bir metrik tanımlanmıştır [13]. PUE, toplam güç tüketiminin IT ekipmanlarının güç tüketimine oranı ile hesaplanır [16]. Düşük PUE değeri, veri merkezi toplam güç tüketiminin büyük çoğunluğunun IT ekipmanları tarafından gerçekleştirildiği manasına geldiği için, aynı zamanda veri merkezinin yüksek verimlilikte çalıştığını da göstermektedir. Dolayısı ile pek çok araştırmacı ve VM yöneticileri PUE değerini 1,5'in altına düşürecek yöntemler geliştirmek için çalışmaktadır. Doğru PUE değerini hesaplamak için, bir veri merkezinin güç tüketim dağılımını bilmek gerekir. Pelley ve arkadaşlarına göre [55], VM enerji tüketimi dört bölümde incelenebilir. Birincisi IT ekipmanlarıdır (sunucular, depolama ve ağ ekipmanları dahil), ikincisi dahili mekanik sistemlerdir (öncelikle soğutma üniteleri), üçüncüsü genel tesis elektrik sistemleridir (aydınlatma, yedek güç, güvenlik ve görüntüleme cihazları vb.) ve sonuncusu ise veri merkeziyle sürekli etkileşim halinde olan dizüstü ve masaüstü bilgisayarlar, telefonlar, tabletler vb. harici cihazlardır. VM güç tüketimi sorumluluğunun cihazlara göre dağılımı konusunda farklı çalışmalarda farklı oranlar verilmektedir. [13]'e göre yüksek performanslı bir VM'de enerji kullanım oranları şu şekilde verilmiştir: IT ekipmanları %55, HVAC %30, aydınlatma %3 ve diğer tüketimler %12. Pelley ve arkadaşlarına göre ise veri merkezi güç tüketimi oranlarının cihazlara göre dağılımı Şekil 2.2'de gösterilmiştir [55].



Şekil 2.2: Veri merkezi güç tüketimi oranlarının cihazlara göre dağılımı.

Sunucular, bir veri merkezinin ana görevlerini gerçekleştiren en önemli bilgi işlem bileşenleridir. Ayrıca veri merkezi enerji tüketiminin önemli bir bölümünden sorumlu oldukları için, sıklıkla enerji verimliliği ile alakalı çalışmaların konusu olmuştur. Sunucular; işlemci, bellek, fan, network ara yüzü ve harddisk gibi birçok alt bölümden oluşur ve her bir parçanın enerji tüketimi modellemesi çeşitli çalışmalarda mevcuttur [17], [56]–[58]. Google'ın veri merkezinde yer alan bir sunucunun tipik güç tüketimi dağılımı Şekil 2.3'te gösterilmiştir[59].



Şekil 2.3: Bir sunucunun bölümlerine göre güç tüketim dağılımı.

Literatürde, sunucu güç tüketiminin alt bileşenlerinin bir toplamı olarak modellenmesi konusunda farklı çalışmalar bulunmaktadır. Basit güç modellerinden biri, Roy ve ark. tarafından geliştirilmiştir[56]. Modele göre sunucu güç tüketimi, CPU ve bellek güç tüketiminin toplamından oluşur ve denklem (2.1)'deki gibi gösterilir.

$$E(A) = E_{cpu}(A) + E_{memory}(A) \quad (2.1)$$

“A” algoritmasının çalıştığı durum için CPU ve bellek güç tüketimi sırasıyla $E_{cpu}(A)$ ve $E_{memory}(A)$ ile gösterilmiştir. Bu modele ek olarak pek çok çalışmada diğer sunucu alt birimlerinin de dahil olduğu güç tüketim modelleri geliştirilmiştir. Ge ve ark. tarafından önerilen sunucu güç tüketim modeli, CPU, bellek ve diğer sistem bileşenlerinin güç tüketimi toplamından oluşur[60]. Song ve arkadaşları (2.1)'deki denkleme, disk ve network ara yüz kartı enerji tüketimleri olan E_{disk} ve E_{NIC} ifadelerini ekleyerek denklem (2.2)'de gösterilen yeni bir model önermişlerdir[61].

$$E_{total} = E_{cpu} + E_{memory} + E_{disk} + E_{NIC} \quad (2.2)$$

Bunlara ek olarak Zhang ve ark. ile Tang ve ark. toplam sunucu enerji tüketimini tahmin etmek için yalnızca CPU kullanıma bağlı denklemlerle gerçekleştirdikleri modeller önermişlerdir [62],[63]. CPU kullanım oranına bağlı güç tüketim modeli pek çok çalışmada sunucu güç tüketimi tahmini, yönetimi veya yük dengelemesi için kullanılmaktadır[64].

Ayrıca pek çok araştırmacı [9], [31], [65], [66], VM'lerdeki sunucuların homojen olarak dağıldığı ve aynı konfigürasyona sahip olduğu kabulü ile tek bir model ile bütün sunucuların güç tüketimini modellemektedir. [65]'te güç tüketimi, CPU kullanımı ve frekansı ile doğrusal ilişkiye sahip bir model kullanılarak hesaplanmıştır. Elektrik maliyetini en aza indirmek için doğrusal programlama yöntemi ve Brenner'in hızlı polinom-zaman algoritması kullanılmıştır. IT iş yükü, güç tüketimi tahminini oldukça etkilediği için, Markov Modülasyon Poisson Süreci (MMPP) [67] ve Markovian Varış Süreçleri (MAP) [68] gibi stokastik süreç modellemeleri, iş yükü belirsizliğini tahmin etmek için kullanılmaktadır. VM'lerin talep yönetimi için Li ve ark. [31] ile Arroyo ve ark. [32] karışık tamsayı programlama (MIP) tabanlı model geliştirmiştir. Bu çalışmada hem hizmet kalitesi (QoS) hem de VM sistem güvenilirliği etkilenmeden, VM sunucularının çalışmalarını optimize eden MIP tabanlı bir model ile elektrik maliyeti en aza indirilmektedir.

Gandhi ve ark. ile Mazzucco ve ark. sunucu grupları şeklinde ve kurulum maliyetlerini de göz önüne alarak model geliştirmişlerdir [69],[70]. Gandhi ve arkadaşları tarafından “k” adet sunucun yer aldığı sunucu grubu için toplam güç tüketimi, $P = \sum_{i=1}^k P_i$ şeklinde hesaplanmaktadır [70],[71]. Modelde sunucu grubu, kuruluş maliyetiyle birlikte M/M/k kuyruk sistemi ve Poisson varış süreci ($S \sim \text{Exp}(\mu)$) yaklaşımı kullanılarak modellenmiştir. Modelde sunucular için 4 farklı durum tanımlanmıştır: “boşta(idle)”, “açık (on)”, “kapalı (off)” ve “kurulum (setup)”. Sunucu, gelen iş yükü için işlem yapıyorsa “açık” durumundadır. Eğer kuyrukta bekleyen herhangi bir iş yoksa sunucu “kapalı” veya “boşta” durumunda olabilir. Sunucu “kapalı” durumdan “açık” duruma geçerken öncelikle “kurulum” durumunda çalışmaktadır. Sunucu “boşta” çalışırken enerji tüketmeye devam eder ancak tüketilen bu enerji miktarı “açık” durumundakinden çok daha düşüktür. Sunucunun “kapalı”, “boşta” ve “açık” durumlarındaki güç tüketimi sırasıyla P_{off} , P_{idle} ve P_{on} ile

gösterilmiştir. Bu güç tüketimleri arasındaki sıra ise $0 = P_{off} < P_{idle} < P_{on}$ şeklindedir. Sunucu, “kurulum” durumunda bulunduğu süre boyunca P_{on} kadar güç tüketmektedir. Sonuç olarak, toplam k adet sunucudan “ ρ ” kadarı “açık” konumunda çalışırken ve $(k - \rho)$ kadarı da “boşta” konumunda çalıştığı durum için toplam ortalama sunucu güç tüketimi, denklem (2.3)’deki gibi hesaplanmaktadır.

$$P_{on\backslash idle} = \rho P_{on} + (k - \rho)P_{idle} \quad (2.3)$$

Sunucu grubu için bir başka güç modeli Qureshi ve ark. tarafından geliştirilmiştir [17]. Model, veri merkezi performansını ölçen PUE metriği tabanlı olup, sunucuların “boşta” çalışma gücü P_{idle} ile maksimum performansta çalışma gücü olan P_{peak} kullanılarak oluşturulmuş ve denklem (2.4)’de gösterilmiştir.

$$P \approx n (P_{idle} + (P_{peak} - P_{idle})U + (\eta_{pue} - 1)P_{peak}) \quad (2.4)$$

Sunucu sayısı “ n ” ile, PUE değeri η_{pue} ile, ortalama CPU kullanım oranı “ U ” ile gösterilmiştir.

Öte yandan literatürdeki pek çok çalışmada sunucu güç tüketimi modeli ve tahmin işlemi için kullanılan modeller, genelde CPU kullanım oranı temelli fonksiyonlar kullanılarak veya CPU ile ilişkili değişkenler kullanılarak oluşturulmuştur. Berezovskaya ve ark. [72], IT ekipmanı için CPU kullanımını, CPU sıcaklığını ve sunucu fanının güç tüketimini dikkate alan doğrusal bir güç tüketim modeli kullanmıştır. Daraghmeş ve ark. [73], sunucular için CPU kullanım oranının bir fonksiyonu olan doğrusal bir güç tüketim modeli geliştirmiş ve gerçek olmayan iş yükü kullanarak testler gerçekleştirmiştir. CPU kullanımı bir sunucunun güç tüketimi modelini oluşturmak için en çok kullanılan değişken olsa da [64], CPU frekansı, sıcaklığı ve bellek kullanım oranı da sunucu güç tüketimini etkileyen diğer parametrelerdir. CPU, sunucunun toplam güç tüketiminin %32’sinden sorumlu olup geride kalan asıl büyük orandan diğer alt bileşenler sorumludur [64],[74]. Bu nedenle, yalnızca CPU’ya bağlı değişkenler, sunucular için doğru bir güç tüketim modeli oluşturmak için yeterli değildir. Çünkü diğer değişkenler güç tüketimini doğrudan veya dolaylı olarak etkileyebilir. Küçük ve orta ölçekli veri merkezlerinin enerji verimliliğine odaklanan bir derleme makalesinde [75], CPU, bellek, sabit disk,

network ara yüz kartı, kesintisiz güç kaynağı (UPS) gibi parametreleri içeren çeşitli güç tüketimi modelleri incelenmiştir [76]. Lin ve ark. yaptığı çalışmada sunucu güç tüketimi, farklı iş yükü türleri altında CPU, bellek ve disk değişkenleri kullanılarak yapay sinir ağı tabanlı modeller ile tahmin edilir[77]. Duan ve ark., boşa kalma durumunu verimli bir şekilde kullanmak için, gelecekteki CPU boşa kalma zaman aralığını tahmin ederken, güç tüketimini en aza indirmeye odaklanmakta ve dinamik tahmin şeması kullanmaktadır[78]. Hlavacs ve ark. yaptığı çalışmada CPU kullanım oranı, iş yükü olarak kabul edilmiş ve Holt-Winters ile otoregresif hareketli ortalama yöntemleri kullanılarak tahmin işlemi gerçekleştirilmiştir [79]. İş yükünün veri merkezinin enerji tüketimine dolaylı etkisi açısından, tahmin edilen iş yükü, yük dengeleme vasıtasıyla gerçekleştirilen enerji verimliliğinde kullanılmaktadır. CPU kullanımını tahmin etmeye dayanan başka bir çalışmada[80], araştırmacılar yük dengeleme için hangi sanal makinenin taşınması gerektiğine karar vermek için CPU kullanımını tahmin etmektedir. Maliyeti en aza indirmek için, sanal makineler aşırı yüklenmeden önce sanal makine taşıma planlaması yapılmaktadır.

2.3. Güç Tüketimini Etkileyen Parametrelerin Seçimi

Önceki bölümde anlatıldığı gibi pek çok araştırmacı sunucular için güç tüketimi modeli önerirken, bellek, disk, ağ arabirim kartı, fan ve özellikle CPU kullanım oranı gibi sunucuların güç tüketen bileşenlerine odaklanmış ve modellerini bu parametreleri kullanarak oluşturmuşlardır. Her ne kadar bir sunucunun toplam güç tüketimi, bu parametrelerin bireysel güç tüketimlerinin toplamından oluşsa da güç tüketimini etkileyen iç ve dış ortam sıcaklıkları, nem, zaman bilgisi vb. pek çok farklı parametre bulunmaktadır. Bu nedenle, veri merkezi enerji tüketen bileşenlerinin güç tüketimini modellerken, özellikle IT elemanları güç tüketimi için doğru parametreleri/özellikleri/bağımsız değişkenleri seçmek, güvenilir ve doğru tahmin sonuçları elde etmek için oldukça önemlidir. Bu amaçla, birçok araştırmacı farklı özellik seçim yöntemleri (feature/predictors selection methods) kullanarak tahmin işlemi için en uygun bağımsız değişken (predictors) kombinasyonunu belirlemeyi hedeflemişlerdir [76], [81]–[86]. Ancak bağımsız değişken seçim sürecinde, çoğu çalışma, bireysel olarak veya grup olarak kullanılan farklı bağımsız değişkenlerin, tahmin sonucunu nasıl etkilediğini araştırmamıştır. [76]'da, güç tüketimi modeli için

en iyi parametreleri belirlemek için ana bileşen analizi (principal component analysis) kullanılmıştır. Aynı çalışmada doğrusal, üstel ve polinom regresyonu gibi çeşitli güç tüketimi modellerinde aynı değişkenler ve sentetik iş yükü kullanılarak deneyler yapılmış ve bu modellerin performansları karşılaştırılmıştır. Bu nedenle değişkenlerin tahmin sonucu üzerindeki etkisi incelenmemiştir. [86]'da, bir veri merkezindeki IT enerji tüketimi için en iyi tahmin modelini belirlemek amacıyla, her bir değişkenin enerji tüketimiyle alaka derecesi, bilgi entropisi yaklaşımı (information entropy approach) ve Kullback-Leibler yöntemleri kullanılarak hesaplanmış ve modelde kullanılacak özellikler (features) bu şekilde belirlenmiştir.[83]'te, “tek benzersiz değer” (*single unique value*), “eşdoğrusal tanımlama” (*identify collinear*), “sıfır önem taşıyan özellikleri tanımlama” (*zero importance features*) gibi özellik seçimi için çeşitli yöntemler içeren açık kaynaklı bir kitaplık tanımlanmıştır. Bu yöntemler, özellikleri (features), aynı benzersiz değerlerine, korelasyon katsayı değerlerine ve diğer değişkenlerin önem derecesine göre filtrelemektedir. [82]'de, Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) ve Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) metrikleri kullanılarak çeşitli özellik seçim yöntemlerinin tahmin doğruluğu üzerindeki etkileri karşılaştırılmıştır. Aynı çalışmada, bağımsız değişkenlerin tahmin sonucu üzerindeki etkisi incelenmek yerine, daha doğru bir tahmin sonucu elde etmek için hangi özellik seçim yönteminin bağımsız değişkenleri daha iyi belirlediği araştırılmıştır. Lin ve ark. yaptığı çalışmada [77], dört farklı yük türü altında, CPU, bellek kullanımı ve disk G/Ç kullanımındaki değişikliğin güç tüketimi karakteristiği üzerinde yaratacağı değişim, grafiksel olarak incelenmiştir. Model için kullanılacak değişkenler/özellikler, değişkenler arasındaki ilişki görsel olarak incelenerek ve herhangi bir ölçüm metriği kullanılmadan belirlenmiştir.

[84]'te korelasyon analizi ve otokorelasyon yöntemleri özellik seçimi (feature selection) olarak kullanılmıştır. İlgili çalışmada yüksek korelasyon katsayısına sahip değişkenler, güç tüketimi tahmininde kullanılacak en uygun bağımsız değişkenler olarak kabul edilmiştir. Hafeez ve ark. [81] bağımsız değişkenleri belirlemek için Random Forest and Relief-F yöntemlerini birleştirerek hibrit bir özellik seçim algoritması önermişlerdir. Model, her bir değişken ile enerji tüketimi arasındaki korelasyonu hesaplar, ardından daha yüksek değere sahip olanı seçerek modelde kullanır. Benzer bir çalışmada [85], sentetik test iş yükü kullanılarak filtre tabanlı ve Random Forest yöntemi tabanlı değerlendiricilere göre bağımsız değişkenleri belirlemek için Gri Korelasyon Analizine dayalı bir model kullanılmıştır. [87]'de,

Pearson korelasyon katsayısı matrisi ve sentetik test iş yükü kullanılarak, CPU, bellek, disk ve network yükü ile güç tüketimi arasındaki ilişki analiz edilmiştir. [88] ve [89] çalışmalarında da bağımsız değişken seçimi korelasyon analizi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. [90]'da yapılan çalışma veri merkezinin enerji tüketimini en aza indirilebilmek için, otoregresif doğrusal tahmin ve yapay sinir ağı tahmin yöntemleri kullanarak tahmin edilen ağ iş yüküne (network workload) göre güç kaynaklarının etkin bir şekilde kullanımını önermektedir. İlgili çalışmada güç tüketimi ile ağ iş yükü arasında bir ilişki olduğu varsayılmakta, ancak bu ilişki matematiksel olarak gösterilmemektedir. [91]'de veri merkezi güç tüketimi, tahmin yöntemlerinin verimliliğini karşılaştırmak amacıyla, dört farklı tüketim profili kullanılarak Holt-Winters yöntemi ve kalıcılık yaklaşımı (persistence approach) ile tahmin edilmektedir. [92]'de veri merkezinin elektrik piyasasına katılımı kapsamında Hidden Markov Modeli kullanılarak veri merkezi güç tüketimi tahmin edilmiş ve veri merkezinin sanal enerji santrali olarak kullanılması öngörülmüştür. [93]'te yazarlar, hava koşullarının veri merkezinin enerji tüketimi üzerindeki etkisine odaklanmışlardır. Veri merkezinin aktif ve reaktif gücü, atmosferik basınç, çiğlenme noktası sıcaklığı, yağış miktarı, bağıl nem ve rüzgarın sıcaklığı gibi değişkenler, tek değişkenli doğrusal regresyon yönteminde kullanılarak tahmin edilir. Farklı bir çalışmada soğutma cihazları ile veri merkezi güç tüketimi arasındaki ilişki esas alınmıştır [94]. Soğutma cihazlarının çalışma performansını ve veri merkezi güç tüketimini etkileyen klima üfleme sıcaklığı makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Böylece IT cihazları kullanılmadan veri merkezi güç tüketimi soğutma üniteleri üzerinden optimize edilmiştir. [95]'te, maliyeti minimize etmek amacıyla yapay sinir ağları tabanlı tahmin modeli kullanılarak her bir sunucunun güç tüketimi tahmin edilmiş ve en uygun yük dengeleme programı (load balancing scheme) belirlenmiştir.

Mevcut çalışmalara göre, araştırmacılar genellikle güç tüketimini doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen CPU kullanımı, ağ iş yükü, hava durumu gibi parametreleri farklı yöntemler ve metrikler kullanarak belirlemişlerdir. Ancak kullanılan parametrelerin, oluşturulan güç tüketim modelinin doğruluğu üzerindeki etkisi veya gerçekleştirilen güç tüketim tahmini doğruluğu üzerindeki etkisi incelenmemiştir.

2.4. Güç Tüketimi Tahmini İçin Kullanılan Yöntemler

Bu bölümde güç tüketimi tahmini için en çok kullanılan yöntemlerden regresyon analizi ve yapay sinir ağları yöntemleri genel hatlarıyla anlatılmıştır.

2.4.1. Regresyon Analizi

Regresyon analizi, iki veya daha fazla değişken arasındaki matematiksel/fonksiyonel ilişkiyi tahmin etmek için kullanılır. Regresyon analizi modelinde, genellikle yanıt değişkeni (tahmin edilmek istenen değişken), bir veya daha fazla bağımsız değişkenin fonksiyonuna bağlıdır. Regresyon analizi kullanılarak, bağımsız değişkenler ve yanıt değişkeni arasındaki ilişkiyi tanımlayan bu fonksiyonun katsayıları bulunur. Bu katsayılar kullanılarak, bağımsız değişkenlere bağımlı olan yanıt değişkeni (bağımlı değişken) tahmin edilebilir. Bu nedenle regresyon analizi modelinde kullanılacak fonksiyon türü önemlidir. Kurulacak model bir veya daha fazla bağımsız değişkene sahip olabilir ve bağımsız değişkenler arasında doğrusal bir ilişki veya doğrusal olmayan bir ilişki bulunabilir. Tahmin işlemi için kullanılacak regresyon analizi, basit doğrusal regresyon, çoklu doğrusal regresyon ve doğrusal olmayan regresyon olmak üzere üç alt bölümde incelenebilir.

2.4.1.1. Basit Doğrusal Regresyon

Basit doğrusal regresyonda bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki neden-sonuç ilişkisi, (2.5)'te gösterildiği gibi doğrusal bir fonksiyonla açıklanmaktadır. Basit doğrusal regresyon modelinde, yalnızca tek bir bağımsız değişken bulunmaktadır.

$$Y_1 = a_1 + a_2 * X \quad (2.5)$$

Bağımsız ve bağımlı değişkenler arasındaki ilişkileri belirleyen katsayıları (ör: a_1 , a_2) hesaplamak için genellikle en küçük kareler yöntemi kullanılır. En küçük kareler yöntemi ile, tahmin edilen bağımlı değişken ile gerçek bağımlı değişken değerleri arasındaki farkın karesinin toplamını en aza indiren denklem katsayıları hesaplanır. Kullanılan genel denklem (2.6)'da gösterilmiştir.

$$\varepsilon = \sum [Y_1 - \hat{Y}_1]^2 \quad (2.6)$$

2.4.1.2. Çoklu Doğrusal Regresyon

Çoklu doğrusal regresyonda, bir bağımlı değişken (Y) ile ilişkili birden fazla bağımsız değişken ($X_1, X_2, \dots, X_n$) vardır. Çoklu doğrusal regresyonun genel denklemi (2.7)'de gösterilir:

$$Y = a_1 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + \dots + b_n * X_n \quad (2.7)$$

Denklemden gösterildiği gibi, ilişki fonksiyonu doğrusaldır ve n adet bağımsız değişken vardır. Değişkenlerde meydana gelen herhangi bir değişiklik bağımlı değişken değerini doğrudan etkilemektedir. En küçük kareler yöntemi, basit doğrusal regresyon yönteminde olduğu gibi çoklu doğrusal regresyon yönteminde de denklem katsayılarını ($b_1, b_2, \dots, b_n$) bulmak için kullanılır.

2.4.1.3. Doğrusal Olmayan Regresyon

Doğrusal olmayan regresyonda, bağımlı değişken bağımsız değişkenlerin doğrusal olmayan bir fonksiyonu şeklinde ifade edilmektedir. Doğrusal olmayan regresyon yönteminin genel matematiksel gösterimi (2.8)'de verilmiştir.

$$Y_i = f(X_i, \alpha) + \varepsilon \quad (2.8)$$

Gözlem sayısı " i " ile gösterilmiştir, i 'inci bağımsız ve bağımlı değişkenler X_i ve Y_i ile gösterilmiştir. X_i ile Y_i arasındaki ilişki fonksiyonu " f ", genel olarak denklem (2.9)'da gösterildiği gibi doğrusal olmayan bir fonksiyon olarak seçilir.

$$Y = a_1 + (b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + \dots + b_n * X_n) + (b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + \dots + b_n * X_n)^2 + (b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + \dots + b_n * X_n)^k \quad (2.9)$$

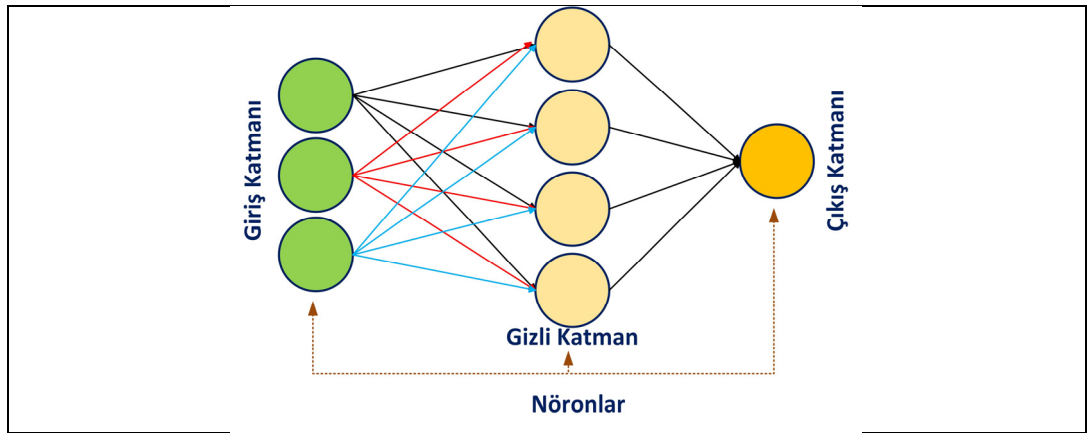
2.4.2. Yapay Sinir Ağları

Bu bölümde yapay sinir ağları genel özellikleriyle anlatılmış olup ardından YSA modelleri açıklanmış, sonra da YSA öğrenme algoritmaları özetlenmiştir.

2.4.2.1. Yapay Sinir Ağları Özellikleri

İnsan beyninin yapısından ilham alınarak geliştirilen yapay sinir ağları (YSA) modeli, her bir birimin bir diğerine farklı ağırlıklar ile bağlandığı hesaplamalı bir modeldir [96]–[99]. YSA, biyolojik sinir sistemi yapısını taklit eden ve benzer çalışma prensiplerine sahip bir tür program olarak kabul edilebilir. YSA, herhangi bir sistemde giriş ve çıkış verileri arasında bir ilişki kurarak ve sonrasında bu ilişkiyi kullanarak, sisteme daha önce verilmemiş giriş verileri ile doğru çıkış verilerinin üretilmesini sağlar.

Nöronlar aynı yönde bir araya gelerek farklı katmanları oluştururlar. YSA katmanları, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi bilgileri alan, işleyen ve ileten; giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşur [96],[100]



Şekil 2.4: Tipik bir YSA nöronunun katmanları.

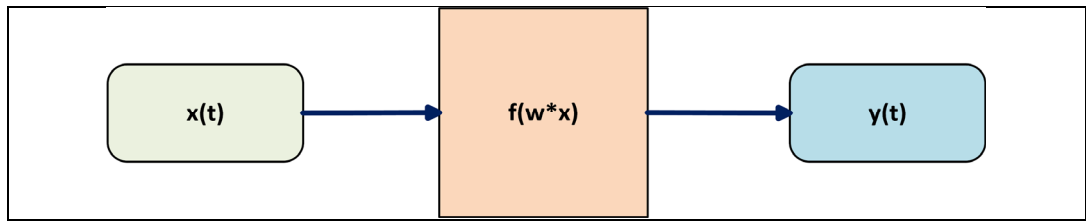
Dış dünya ile YSA modeli arasındaki bağlantı olan giriş katmanındaki nöron sayısı, çıkışta elde edilmek istenen sonuç değişkenini etkileyen bağımsız değişken sayısına eşittir. Giriş katmanındaki nöronlar vasıtasıyla alınan veriler gizli katmana iletilir. Gizli Katman, giriş katmanından alınan bilgileri işler ve bir sonraki katmana iletir. Gizli katmandaki nöron sayısı giriş ve çıkış değişken sayısından bağımsızdır.

Gizli katmandan gelen bilgi çıkış katmanına gönderilir, çıkışta elde edilmek istenen bağımlı değişken sayısı kadar nöron, çıkış katmanında yer alabilir.

Genel olarak YSA, model seçimi ve sınıflandırılması, fonksiyon tahmini, veri uydurma ve veri sınıflandırması konularında başarılıdır. YSA, herhangi bir sistem için matematiksel bir model oluşturulmaması bile veya giriş ile çıkış arasında doğrusal bir ilişki olmasa bile tutarlı sonuçlar üretir. Bu özelliği sayesinde tahmin çalışmaları için önemli bir avantaj sağlamaktadır. Genelleme yeteneği sayesinde YSA, bir örneklemden elde edilen bilgileri kullanarak diğer örneklerdeki benzerlikleri doğru bir şekilde anlar. YSA paralel hesaplama yeteneği sayesinde bağımsız işlemleri çok hızlı bir şekilde gerçekleştirebilir.

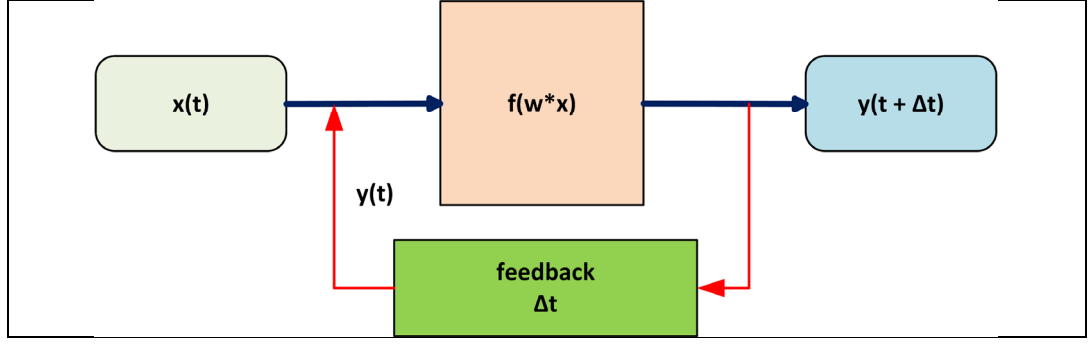
2.4.2.2. Yapay Sinir Ağları Modelleri

Modelleme açısından YSA, ileri beslemeli (feedforward ANN) YSA ve geri beslemeli YSA (feedback ANN) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. İleri beslemeli YSA'da işlem, girişlerden çıkışlara tek bir yönde ilerler ve herhangi bir gecikme yoktur. Şekil 2.5'te ileri beslemeli YSA'nın yapısı gösterilmiştir. İleri beslemeli YSA'da çıkış değeri, elde edilmek istenen çıkış değeri ile karşılaştırılarak bir hata sinyali oluşturulur ve ağ ağırlıkları güncellenir. İleri beslemeli YSA'da en çok kullanılan öğrenme algoritması geri yayılım (backpropagation) algoritmasıdır [96],[101],[102]



Şekil 2.5: İleri beslemeli YSA modeli.

Geri beslemeli YSA ise, çıkışları girişlere bağlanılarak ileriye dönük bir YSA'dan türetilir [102]. Örnek bir geri beslemeli YSA'nın yapısı Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



Şekil 2.6: Geri beslemeli YSA modeli.

Genellikle denetimsiz öğrenme algoritması (unsupervised learning algorithm) kullanılan geri beslemeli YSA'da, şekilde de görüldüğü gibi gecikme söz konusudur. Sembolik gecikme süresi " Δt "dir. Ağın t anındaki çıkışı $y(t)$ ise, $(t+\Delta t)$ anındaki çıkışı $y(\Delta t+t)$ olarak ifade edilir. Başlangıç anında $x(t)$ 'ye ihtiyaç duyulmaktadır ve $y(0) = x(0)$ 'dir.

2.4.2.3. YSA Öğrenme Algoritmaları

YSA'da öğrenme algoritmaları danışmanlı/denetimli (supervised), danışmansız/denetimsiz (unsupervised) ve pekiştirmeli (reinforcement) öğrenme olmak üzere üç kısımda incelenir [96], [100].

En yaygın kullanılan makine öğrenmesi algoritması denetimli öğrenmedir. Denetimli öğrenme algoritmasında bir eğiticiye ihtiyaç vardır. Bu algoritmada geçmiş veriler, öğrenme ve test süreçlerinde kullanılmak amacıyla eğitim ve test veri setleri olmak üzere ikiye ayrılır. YSA eğitimi için, giriş değişkenleri ve bu değişkenler kullanılarak elde edilecek çıkış değişkeninden oluşan eğitim veri seti kullanılır. Eğitilen YSA, eğitim setinde kullanılmayan verilerden oluşan test veri seti ile test edilir. Test prosedürü, YSA yönteminin kabul edilebilir bir genelleme yapısı yapamadığını görmeyi mümkün kılar. Eğitim ve test aşamalarında istenen başarıya ulaşırsa, eğitim veri seti ile eğitilmiş olan ağ, farklı bir zaman dilimi için giriş değişkenleri verildiğinde çıkış değerini tahmin etmek için kullanılmaktadır. Günümüzde denetimli öğrenmede kullanılan birçok eğitim modeli/fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlardan en yaygın kullanılanı geri yayılım(backpropagation) modelidir. Bu modelde sonuç bulunur ve ardından geriye doğru çalıştırılarak hata en aza indirilmeye çalışılır. Bu model, tahmin ve sınıflandırma işlemlerinde iyi sonuçlar

vermektedir. Denetimli öğrenmede en çok kullanılan eğitim yöntemlerinden bir diğeri Levenberg-Marquart yöntemidir. Daha çok doğrusal olmayan en küçük kareler problemlerini çözmede ve daha yüksek eğitim hızlarına ulaşmak için tercih edilen bir algoritmadır. Doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon, ağaç tabanlı teknikler, destek vektör makineleri (support vector machines -SVM) gibi pek çok yöntem denetimli öğrenme tabanlıdır. Karar ağacı tekniği(decision tree technique), karar noktalarının bir ağaç gibi modellenmesine dayanır [103]. M5 algoritması bu ailede en çok kullanılan sınıflandırıcı olarak kabul edilebilir.

Denetimsiz öğrenme algoritmasında ise denetimli öğrenmenin aksine herhangi bir eğitmen yoktur ve öğrenme algoritması için etiketlenmiş bir veri setine ihtiyaç duyulmaz. Sisteme girdi olarak değişken vektörleri verilir ve YSA girdiler arasında sınıflandırma yaparak her bir grup için farklı örüntüler oluşturur [100]. "Gaussian mix modeli" ve "hierarchical clustering", "k-means clustering" algoritmaları denetimsiz öğrenme tekniklerine örnek olarak verilebilir. Ayrıca Kohonen tarafından geliştirilen "self-organizing maps" (SOM) ve Hebbian öğrenme metotları denetimsiz öğrenmede yaygın olarak kullanılmaktadır [98],[102].

Pekiştirmeli öğrenmede ise, denetimli ve denetimsiz öğrenmeden farklı olarak modele herhangi bir veri seti verilmemektedir. Bunun yerine ajan (agent) ismi verilen bir yapı bulunmakta, onun gerçekleştirdiği aksiyonlara göre bir öğrenme işlemi gerçekleşmektedir. Pekiştirmeli öğrenmede yer alan bazı temel kavramlar vardır. Ajanın öğrenme amacı ile gerçekleştirdiği her bir eylem “aksiyon” olarak adlandırılır ve bu aksiyonların gerçekleştiği ortama “çevre” denilir. Ajan’ın aldığı aksiyonlar sonucunda başarılı veya başarısız olduğu durumun ölçüsü “ödül”dür. Ajanlar elde edilen ödüllere göre eğitilir. Amaç öğrenme aşamasında hatalar yaparak ödülü maksimize eden yeni yerler keşfetmektir ve öğrenmeyi sürdürmektir. En iyi çözüm bulunana kadar denenen olasılıklar belli bir süre sonra deneyime dönüşür ve sonradan bu deneyim kullanılır [104]. Örneğin robot bir farenin labirentten en hızlı çıkış yolunu bulması görevi için kullanılan pekiştirmeli öğrenme tabanlı algoritma, öncelikle farenin (ajan) rastgele sağa-sola, yukarı-aşağı gidip gelmesini sağlayarak ilerleme veya duvara rastlama eylemlerine göre (ödül/ceza durumları) çevreyi keşfeder ve öğrenir. Öğrenme işlemi tamamlandıktan sonra elde ettiği tecrübeyi kullanarak herhangi bir duvara rastlamadan başlangıç noktasından çıkış noktasına en kısa çıkış yolunu kullanarak görevi tamamlar.

2.5. Veri Merkezi Enerji Yönetimi ve TTY'ye Katılımı ile Alakalı Optimizasyon Yaklaşımları

Veri Merkezlerinin TTY'ye katılımı ile alakalı literatür taraması Bölüm 2.1'de yapılmış olup bu bölümde ise TTY'ye katılım ve enerji yönetimi için kullanılan optimizasyon yaklaşımlarına odaklanılmıştır.

Cupelli ve ark. yaptığı çalışmada [40], HVAC, IT iş yükü ve batarya enerjisi optimizasyon algoritmasında kullanılmış, aynı zamanda IT iş yükü gecikme toleranslı ve kaydırılabilir yük olarak sınıflandırılarak yük kaydırması işleminde kullanılmıştır. Model öngörücü kontrol (Model Predictive Control) tabanlı bir sistem geliştirilmiş ve ikinci dereceden programlama formülasyonu (quadratic programming) kullanılmıştır. Modelde üç adet kontrol değişkeni belirlenmiştir: batarya gücü, IT iş yükü ve iç ortam hava sıcaklığı. İki farklı senaryo için amaç fonksiyonu belirlenmiştir. Birinci senaryoda amaç fonksiyonu, TTY tarafından belirlenen hedef güç tüketimi ile VM'nin gerçekleşen gerçek güç tüketimi arasındaki farkın karesi ve varsa QoS cezaları ile bataryaların şarj-desarj sebebi ile oluşacak kayıp maliyetinin toplamını minimize etmektir. İkinci senaryoda kullanılan amaç fonksiyonu ise gün öncesi ve gerçek zamanlı elektrik fiyatlandırmasını da dahil ederek veri merkezi operasyonları için tüketilen toplam güç tüketimi maliyeti ile yine QoS'tan kaynaklanan maliyet ve batarya kayıpları maliyetinin dahil edildiği toplam maliyeti minimize etmektir. IT iş yükü tahmini için ARIMA tabanlı tahmin algoritması kullanılmıştır.

Bir diğer çalışmada[105], veri merkezlerinin de entegre olduğu multienerji sistemleri içerisinde yer alan farklı enerji istasyonları için, enerji istasyonu kapasitesi, enerji tüketen veri merkezi cihazları ve sunucuların çalışma planlamasının aynı anda optimize edildiği bir optimum boyutlandırma yöntemi önerilmektedir. Dinamik voltaj frekans ölçekleme (DVFS) tekniği ve veri merkezinin termal ataleti, enerji akışını ve bilgi akışını aynı anda optimize etmek için kullanılmıştır. Veri merkezi soğutma gücü termal modeli, atık ısı da dikkate alınarak oluşturulmuştur. İç ortam sıcaklığı değiştirilerek soğutma gücü talebinin zamanda kaydırılması prensibi kullanılmıştır. Kurulan optimizasyon probleminin amaç fonksiyonu, yatırım maliyeti, enerji satın alım maliyeti ve talep tarafı maliyeti olarak adlandırılan yük atma işleminden kaynaklı ve soğutma için değiştirilen sıcaklık değişimlerinin sebep olduğu maliyetin toplamını minimize etmektedir. Karışık tamsayı ikinci dereceden program (mixed-integer

quadratic program) kullanılarak oluşturulan model, Gurobi çözücüsü ile optimize edilmiştir.

GALKIN ve ark. yaptığı çalışmada veri merkezleri [106], sahip oldukları yedek güç üniteleri, yenilenebilir enerji kaynakları açısından aynı zamanda bir mikro şebeke (microgrid) olarak varsayılmıştır. MATLAB simulink ortamında küçük veri merkezlerinin (edge data center) akıllıca dağıtıldığı bir veri merkezi mikro şebekesi geliştirilmiştir. Model, şebeke, IT iş yükü, batarya ve fotovoltaik panel (PV) grubundan oluşmaktadır. Veri merkezi soğutma gücünün enerji kaynağı olma potansiyeli bu çalışmada dikkate alınmamıştır. Veri merkezi yük talebi her ne kadar ana şebekeden karşılanacak şekilde modellenmiş olsa da aynı zamanda mikro şebeke konumundayken güç talebi güneş panelleri ve UPS bataryaları kullanılarak karşılanmaktadır. Oluşturulan modelin çalışma prensibi öncelikle enerji ihtiyacının PV panellerinden sağlanması, ikincil enerji kaynağı olarak şebekenin kullanılması ve şebekeden bağlantı koptuğunda bataryaların enerji kaynağı olarak kullanılmasıdır. Bataryaların şarj edilmesi için gerekli olan enerji, öncelikle PV'den sağlanmakta yetmemesi durumundan şebeke kullanılmaktadır.

Zheng ve ark.[107] yaptığı çalışmada, veri merkezi güç tüketiminin en yüksek olduğu zamanlarda elektrik maliyetini minimize etmek amacıyla hem veri merkezinin sahip olduğu UPS bataryalarını hem de termal enerji depolama(TES) tankını kullanmıştır. Önerilen model, elektrik fiyatlarının yüksek olduğu zamanlarda termal depolama tankının klimalar yerine soğutma aracı olarak kullanılmasına dayanmaktadır. UPS bataryaları ise TES tankı devreye girene kadarki sürede enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Kullanılan optimizasyon algoritmasında amaç fonksiyonu, VM orijinal güç tüketimi değerinden UPS'lerden sağlanan güç miktarı ve TES tankı sayesinde sisteme sağlanan soğutma gücünün çıkarılmasıyla elde edilen değeri maksimize etmektedir. Böylelikle UPS'ten ve TES tankından sisteme sağlanan gücün mümkün olduğunca fazla olması sağlanmaktadır. Doğrusal programlama optimizasyon problemi, MATLAB CVX aracı kullanılarak çözülmüştür. Testler yapılırken dinamik DVFS kontrolör kullanılmıştır. Yapılan çalışmada VM güç tüketimi maliyeti %30 oranında azaltılmıştır.

Bir diğer çalışmada yazarlar[108], VM ertelenebilir iş yükü ve kontrol edilebilir klima yükünü kullanarak optimum enerji yönetim planı oluşturarak maliyeti minimize etmeyi amaçlamaktadır. Karışık tamsayı ikinci dereceden programlama problemi “off-the-shelf” çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Bir diğer çalışmada [109]

ise iş yükü talebini kaydırabilen, soğutma verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanım verimliliğini artıran, aynı zamanda maliyeti de minimize eden optimum iş yükü yönetim sistemi geliştirilmesi amaçlanmıştır. Optimizasyon algoritması yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanabilecek gücü, elektrik fiyatını, IT kapasitesini, anlık IT talebini, optimum soğutma planını dikkate alacak şekilde belirlenen zaman aralığı için optimum iş yükü çalışma planı oluşturmaktadır. Bu plan oluşturulurken veri merkezi operasyon maliyeti amaç fonksiyonu olarak belirlenmiş ve minimize edilmiştir.



3. VERİ MERKEZLERİNİN TALEP TARAFI YÖNETİMİNE KATILIMININ İNCELENMESİ

Veri merkezleri yüksek enerji tüketen sunuculara (servers) sahiptir. Ayrıca VM'lerin optimum sıcaklıkta tutulmasını sağlayan soğutma üniteleri de oldukça yüksek enerji tüketimine sebep olmaktadır. VM'ler, sahip olduğu bu enerji tüketim karakteristiği ve miktarı açısından, diğer büyük enerji tüketicilerine göre daha esnek, zamanda kaydırılması ve kontrolü daha kolay yük karakteristiğine sahiptir. Bu yönüyle veri merkezleri, elektrik yük eğrisinin yataylaştırılması/tepe noktasının azaltılması ve elektrik sistemlerindeki güç dalgalanmalarının kompanze edilmesi gibi amaçlar için, talep tarafı yönetimi ("TTY" – Demand Side Management) için çok uygun oyuncularlardır. Tepe noktasının azaltılması, özellikle puant elektrik talebini karşılamak amacıyla inşa edilen elektrik santrallerinin kurulumuna olan ihtiyacı ortadan kaldırmaktadır. Puant elektrik talebini karşılamak için kurulması planlanan elektrik santralleri yatırımları ötelenerek, gelecek yıllar için büyüyen toplam elektrik enerjisi talebini karşılamak amacıyla kullanılabilir.

Tezin bu bölümünde veri merkezlerinin neden TTY'ye katılması gerektiği sorusu araştırılmıştır. Veri merkezlerinin TTY'ye katılmasının güç sistemleri üzerindeki etkisi hem ekonomik hem de çevresel faktörler açısından incelenmiştir. Türkiye için, veri merkezlerinin TTY'ye katıldığı enerji miktarı, elektrik yük eğrisinin yataylaştırılması/tepe noktasının azaltılması için kullanılmıştır. Şebekenin enerji tasarrufu kapasitesinin iyileştirilmesine, güç kayıplarının azaltılmasına ve yeni enerji santrallerinin inşasının önlenmesine/ötelenmesine bağlı olası sonuçlar, Türkiye'nin elektrik tüketim verileri kullanılarak incelenmiştir. Ayrıca, iletim sistemi kayıplarında yaşanacak azalmanın ekonomik ve karbon emisyonu üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Türkiye için yapılan çalışma, bütün dünya için ölçeklenerek tekrarlanmış, küresel manada veri merkezlerinin TTY'ye katılmasının ne gibi sonuçları olacağı incelenmiştir. Böylelikle VM'lerin TTY'ye katılmasının şebeke açısından ne gibi kazanımlar sağlayacağı araştırılmış, veri merkezlerinin elde edebileceği kazanç Bölüm 3.2'de açıklanmıştır.

3.1. Talep Tarafı Yönetimi Katılımcısı Olarak Veri Merkezleri

Veri merkezlerine olan talep bütün dünya ülkeleri için her geçen gün artarken, Türkiye'nin sahip olduğu genç nüfus sebebiyle veri merkezine olan gereksinim daha da fazladır. Türkiye'de 2008 yılında yaklaşık 16 milyon olan genişbant internet müşterisi sayısı, 2017 yılında 68 milyonu aşmıştır [110]. 2011 yılında veri merkezi sunucularının bulunduğu beyaz alandaki büyüme hızı açısından Türkiye, sahip olduğu %60 değer ile dünyada birinci olmuştur. Ayrıca VM'lere yapılan yatırım hızında, %74'lük değer ile dünyada ikinci sırada yer almıştır [111],[112]. Veri merkezi pazarının küresel büyüme oranı 2014-2021 yıllarında %15 iken, Türkiye için %30'dur [112]. Bütün bu veriler VM ihtiyacının küresel olarak artmasının yanı sıra, Türkiye ölçeğinde bu ihtiyacın ve büyüme oranlarının daha fazla olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla halihazırda VM'lerin tükettiği yüksek enerji miktarı, VM pazarının daha da gelişmesi ve büyümesiyle çok daha büyük miktarlara ulaşacaktır. Ayrıca, 2018 yılında Türkiye'de yürürlüğe giren yasa ile birlikte [113] enerji tüketen büyük endüstrilerin, yardımcı hizmetler aracılığıyla TTY programlarına katılması desteklenmektedir. Bu nedenle VM'ler, yüksek enerji tüketme yeteneği ve prosumer özelliği sayesinde TTY'ye katılabilecek önemli oyuncularından biridir[23].

Aşağıdaki bölümlerde Türkiye'nin elektrik tüketimi karakteristiği, bu bölümde yapılan çalışmada kullanılan temel tanımlar ve yük eğrisi düzeltme süreci ile ilgili analizler detaylı olarak anlatılmaktadır.

3.1.1 Türkiye'nin Elektrik Tüketim Analizi ile Yük ve Kayıp Faktörlerinin Tanımı

2019 yılı için Türkiye'ye ait saatlik gerçek güç tüketim verileri, tez kapsamında geliştirilen bir yazılım aracılığıyla Yük Tevzi Bilgi Sistemi web sayfasından alınmıştır [6]. Bu veriler kullanılarak, VM'lerin TTY'ye katılım süreci için yapılan bütün hesaplamalar ve yük eğrisi tepe noktası azaltılması işlemleri MATLAB ortamında gerçekleştirilmiştir. Türkiye'nin 2019 yılında tükettiği saatlik güç tüketimi eğrisi Şekil 3.1- (a)'da [6], bir yıl içerisindeki güç tüketim verilerinin en yüksek değerden en küçüğe doğru yeniden sıralanarak elde edilen "Tertiplenmiş Yük Eğrisi" Şekil 3.1-

(b)'de gösterilmiştir. Her iki eğrinin altında kalan alan birbirine eşittir ve toplam enerji miktarını vermektedir.

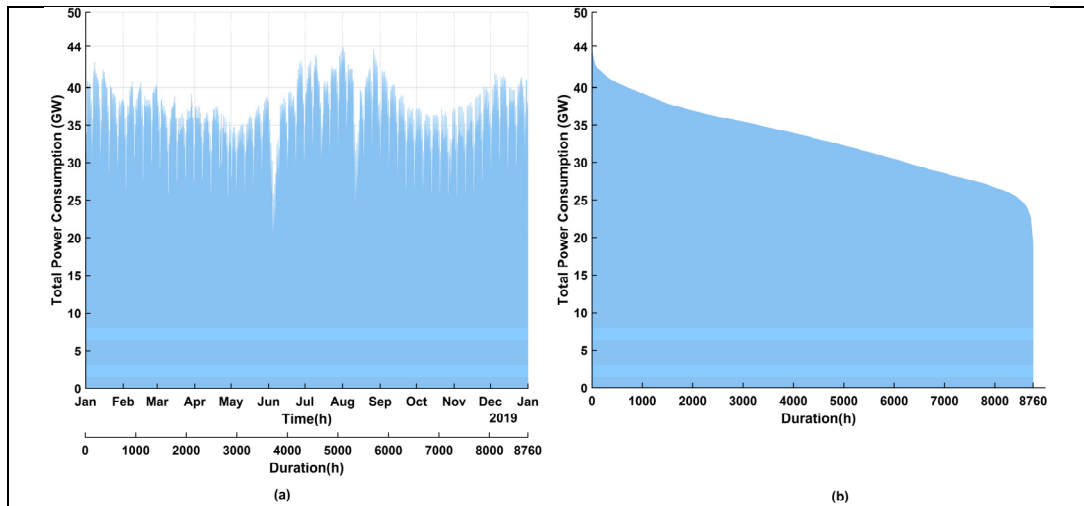
Elektrik iletim sistemlerinin verimliliğini ölçmek için genellikle iki farklı endeks kullanılır: yük faktörü ve kayıp faktörü. Yük faktörü (3.1)'deki gibi tanımlanır [115].

$$Load\ Factor = \frac{\frac{1}{8760} * \sum_{t=1}^{8760} P_t}{P_{max}} \quad (3.1)$$

Denklem (3.1)'de yer alan 8760 sayısı bir yıldaki toplam saati göstermektedir. Bir yıl içerisinde gerçekleşmiş maksimum güç tüketimi değeri P_{max} ile, saatlik güç tüketimi değeri ise P_t ile gösterilmektedir. Gustafson'a göre kayıp faktörü (3.2)'de tanımlanmaktadır[116].

$$Loss\ Factor = (Load\ Factor)^{1.912} \quad (3.2)$$

Kayıp faktörü ve yük faktörü değerleri “0” ile “1” arasında değişmektedir. Bu faktörler 1'e yaklaşırsa sistem verimliliği yükselmektedir.

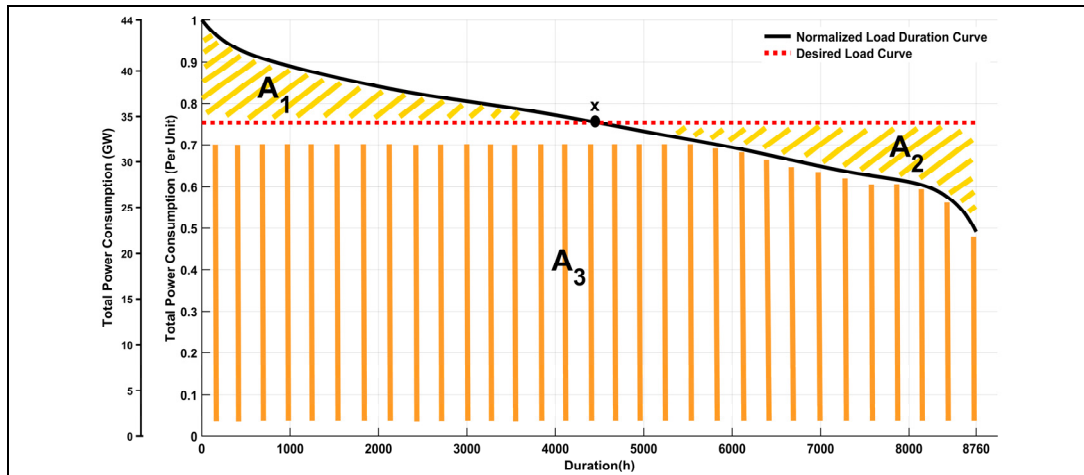


Şekil 3.1: Türkiye'nin 2019 yılı toplam güç tüketimi eğrisi: (a) saatlik yük eğrisi; (b) tertiplenmiş yük eğrisi.

Yük eğrisinde yaşanan değişiklikler, kayıpların doğrusal olmayan özelliği nedeniyle kayıp faktörünü, yük faktöründen çok daha fazla etkilemektedir. Güç tüketimi ile kayıplar arasındaki ilişki [117]'de tanımlanmakta ve (3.3)'te gösterilmektedir.

$$P_{loss} = \sum_{j=1}^{nb} R_j (a_j P_i^2 + b_j P_i + c_j) \quad (3.3)$$

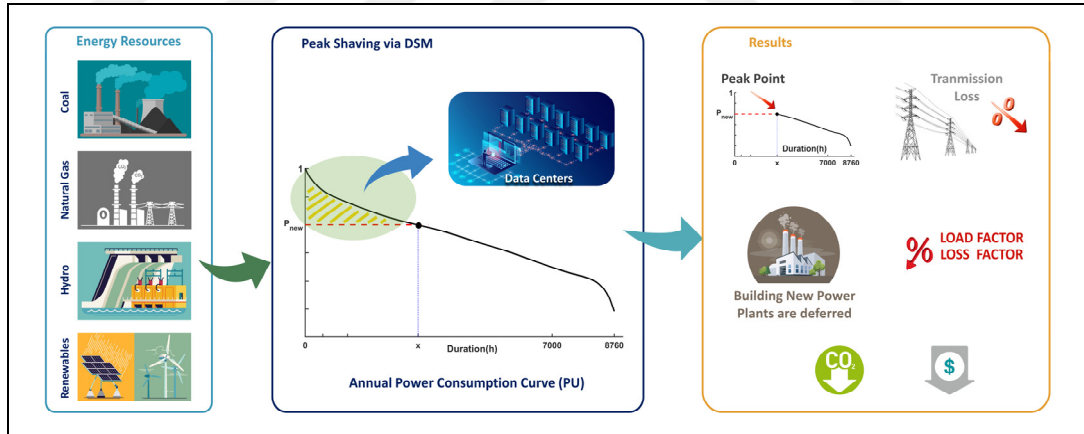
Hat empedansı R_j ile, hat numarası “ j ” ile, branch numarası “ nb ” ile gösterilmektedir. Katsayılar ise a_j, b_j ve c_j ile temsil edilmektedir. Denklem (3.3)’ten görüldüğü gibi güç ile güç kayıpları arasında doğrusal olmayan bir ilişki vardır [117], [118]. Elektrik enerjisi iletim sistemlerinde genellikle sistem kararlılığı, daha düşük kayıp ve kurulu enerji santrallerinin verimli kullanımı açısından, yük eğrisinin mümkün olduğunca düz olması beklenir. Bu nedenle, yük eğrisinin maksimum ve minimum tüketim değerleri arasındaki farkın küçük olması arzu edilir. Ayrıca iki farklı yük eğrisi aynı enerji tüketimine sahip olabilir, ancak sahip oldukları yük faktörü ve kayıp faktörü birbirinden oldukça farklı olabilir. Örneğin Şekil 3.2.’deki siyah çizgi grafik ile kırmızı kesikli çizgi grafik altında kalan alanlar, yani her iki grafiğin temsil ettiği enerji tüketim miktarı, birbirine eşittir. Türkiye’ye ait gerçek güç tüketim verilerinin her bir “ t ” zamanı için yıl içinde gerçekleşen maksimum değerine bölünmesiyle elde edilen normalize edilmiş tertiplenmiş yük eğrisi, Şekil 3.2’de siyah çizgi grafik olarak gösterilmektedir. Kırmızı kesikli çizgi grafik ise; maksimum verimlilik sağlaması açısından Türkiye’nin arzu edilen yük eğrisidir. Normalize edilmiş tertiplenmiş yük eğrisinin enerji miktarı A_1 ile A_3 ’ün toplamıdır.



Şekil 3.2: Normalize edilmiş gerçek tertiplenmiş yük eğrisi ile olması arzu edilen tertiplenmiş yük eğrisi karşılaştırması.

Arzu edilen yük eğrisi, A_1 enerji miktarının “ x ” noktasından sonraki kısma kaydırılması ile elde edilir. Bu “ x ” noktası normalize edilmiş tertiplenmiş yük eğrisinin

ortalaması alınarak bulunmuştur ve aynı zamanda arzu edilen yük eğrisinin de maksimum değeridir. Bu “x” değeri aynı zamanda normalize edilmiş tertiplenmiş yük eğrisinde, maksimum miktarda yük kaydırılması yapıldıktan sonra elde edilen **yeni tepe noktasıdır**. A_1 ve A_2 enerji miktarı birbirine eşittir. Dolayısı ile her iki eğrinin sahip olduğu enerji miktarı birbirine eşittir. Ancak her iki eğri birbirinden farklı yük ve kayıp faktörlerine sahiptir. Her iki grafik için (3.1) ve (3.2) denklemleri kullanılarak elde edilen yük ve kayıp faktörleri, normalize edilmiş tertiplenmiş yük eğrisi için sırasıyla 0.7544 ve 0.5834 iken, her iki faktörün değeri arzu edilen yük eğrisi için 1.00'dir. Elde edilen 1 değeri ise, arzu edilen yük eğrisinin maksimum verimliliğe sahip olduğu anlamına gelmektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, tüketilen enerji miktarı değişmese bile, tepe noktasının azaltılmasının sistem verimliliğini oldukça etkilediği görülmektedir. Bu sebeple, elektrik sistemi verimliliğini artırmak, iletim sistemindeki kayıpları azaltmak, güç eğrisi yumuşatma yoluyla parasal tasarruf elde etmek ve toplam enerji tüketimi miktarını değiştirmeden, yük ve kayıp faktörlerini iyileştirmek amacıyla; yük eğrisi tepe noktası azaltmanın, yük ve kayıp faktörlerine olan etkisi kullanılmıştır. Genel yaklaşım Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



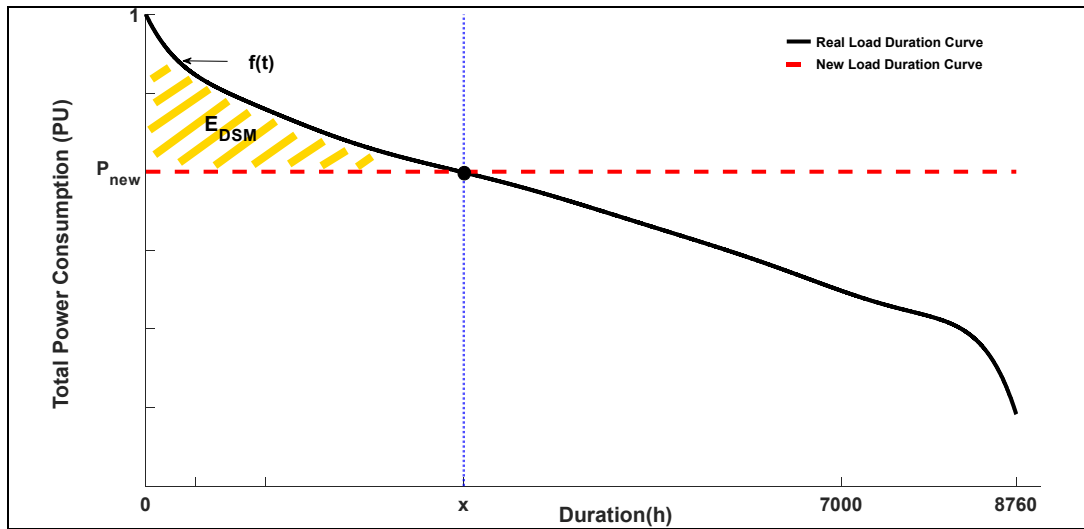
Şekil 3.3: Veri merkezlerinin TTY'ye katılım sürecinin genel şeması.

3.1.2. Veri Merkezlerinin TTY'ye Katılımı

Bu bölümde yapılan analizler Türkiye'nin 2019 yılına ait enerji tüketim verileri kullanılarak yapılmıştır. VM'lerin 2019 yılında tükettikleri toplam enerji miktarı, Türkiye'nin toplam enerji tüketimi olan 290,4 TWh'in yüzde ikisi olarak kabul edilmiş ve 5,8TWh olarak hesaplanmıştır[114]. VM'lerin toplam tüketmiş olduğu bu enerji

miktarı kullanılarak saatlik tüketim verileri hesaplanmıştır. Sonrasında VM'lerin TTY'ye farklı oranlarda katılımının etkisini incelemek amacıyla, saatlik VM enerjisinin %10 ile %70 arasında değişen kısmının TTY'ye katıldığı durumlar için analizler gerçekleştirilmiştir. VM'lerin TTY'ye katılabileceği saatlik enerji tüketiminin maksimum oranı olan %70 değeri belirlenirken, bir VM'nin anlık olarak bütün iş yükünü değiştiremeyeceği ve VM yedek güç kapasitesinin (UPS, Jeneratör, vb) ortalama VM güç tüketiminin en az iki katı olması gerekliliği göz önünde bulundurulmuştur [119]. Dolayısıyla VM'lerin TTY'ye katıldığı anlarda VM'ler sahip oldukları iş yükünün belli miktarını farklı zamanlara kaydıramasa bile, sahip oldukları yedek güç kapasitesi vasıtasıyla kendi iş süreçlerini yönetebilecek durumdadırlar.

VM'lerin TTY'ye katıldığı %10'dan %70'e kadar olan enerji miktarı, Türkiye'nin tertiplenmiş yük eğrisi tepe noktasının azaltılması için kullanılmıştır. Azaltılan enerji miktarı eğrinin diğer ucuna kaydırılmıştır. Bu sayede toplam enerji tüketimi değişmeden tepe noktası azaltma işlemi gerçekleştirilmiştir. Bu süreç Şekil 3.4'te anlatılmıştır. Ayrıca hesaplamalar için (3.4) ile (3.6) arasındaki denklemler kullanılmıştır. VM'lerin saatlik güç tüketimi, VM'lerin toplam enerji tüketiminin (5,8 TWh) toplam saate (8760) bölünmesiyle hesaplanır. VM'lerin saatlik toplam güç tüketimi 663MW (DCs_{Pow}) olarak hesaplanır



Şekil 3.4: Yük eğrisi tepe noktası azaltılması sonrası elde edilen yeni tepe noktasının belirlenme süreci.

VM'lerin TTY'ye katılım sağladığı saatlik güç miktarı $DSM_{hourlyP}$, denklem (3.4) kullanılarak hesaplanır. DSM_{ratio} , VM'lerin saatlik TTY'ye katılım oranıdır ve %10 ile %70 arasında değer almaktadır.

$$DSM_{hourlyP} = DC_{SPow} * DSM_{ratio} \quad (3.4)$$

Şekil 3.4'te, Türkiye'nin tertiplenmiş yük eğrisi, tepe noktası “1” olan zaman bağımlı bir fonksiyon olan $f(t)$ ile tanımlanmıştır. Tepe noktası azaltılması sürecinde, üç bilinmeyen değişkenin değerinin belirlenmesi gerekmektedir. Bunlardan ilki “x” saatini hesaplamaktır. Bu değer VM'lerin TTY'ye bir yıl içerisinde toplam kaç saat katılacaklarını göstermektedir. İkincisi, her DSM_{ratio} için VM'lerin TTY'ye katıldıkları enerji miktarıdır ve E_{DSM} ile gösterilmektedir. Bu enerji, tepe noktası azaltması için kullanılan enerjidir. Dolayısıyla aynı zamanda başlangıç tepe noktası ile yük kaydırılması yapıldıktan sonra elde edilen yeni tepe noktası P_{new} arasındaki enerji miktarına eşittir. Üçüncü bilinmeyen ise yeni tepe noktası P_{new} 'dir.

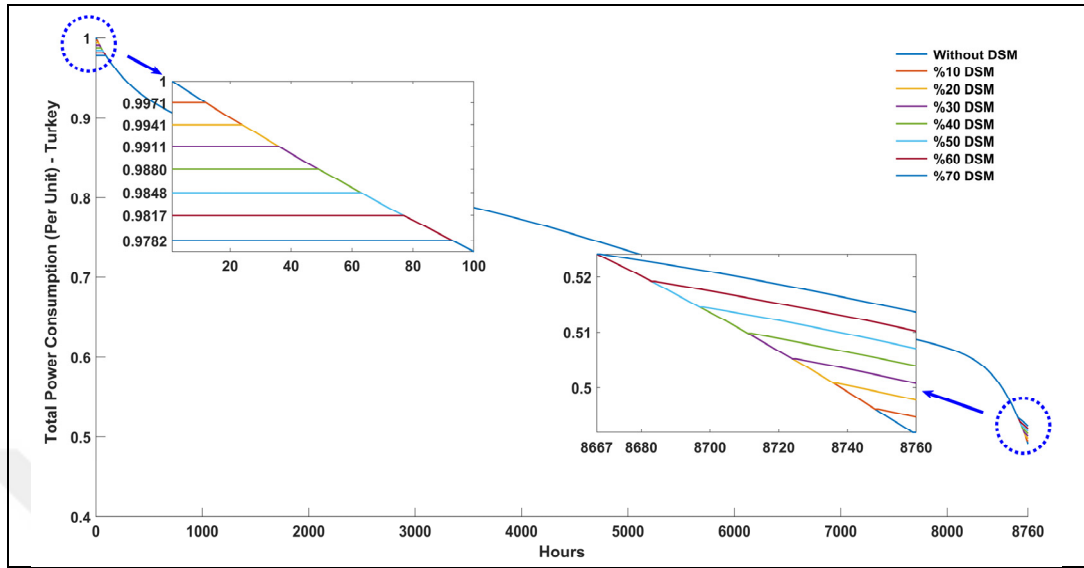
Şekil 3.4'te görüldüğü gibi her DSM_{ratio} için $P_{new} = f(x)$ eşitliği vardır. Dolayısıyla P_{new} değerini bulmak için öncelikle x değerinin hesaplanması gerekmektedir. Bu değer ise VM'lerin TTY'ye katıldıkları enerji miktarının hesaplandığı denklem (3.5) ve (3.6) kullanılarak yapılabilmektedir. Denklem (3.5), VM'lerin TTY'ye katılabileceği saatlik güç tüketimi verisi ile TTY'ye katılma zamanı olan x 'in çarpımıyla elde edilen E_{DSM} hesabını göstermektedir. Denklem (3.6)'da ise Şekil 3.4'te gösterilen yük eğrisi $f(t)$ ile $P_{new} = f(x)$ doğrusu arasında kalan alanın, 0'dan x 'e kadar integralinin alınmasıyla, E_{DSM} 'in hesaplanabileceğini göstermektedir.

$$E_{DSM} = DSM_{hourlyP} * x \quad (3.5)$$

$$E_{DSM} = \int_0^x [f(t) - f(x)] dt \quad (3.6)$$

Her iki denklem sonucu birbirine eşitlenerek bilinmeyen değer “x”, hesaplanır. Sonrasında bu x değeri kullanılarak P_{new} değeri hesaplanır. Sonrasında, hesaplanan E_{DSM} enerji miktarı, tertiplenmiş yük eğrisi sonuna eklenir ve yeni normalize edilmiş

tertiplenmiş yük eğrisi elde edilir. Bütün bu adımlar her DSM_{ratio} için tekrarlanır. Oluşturulan yeni eğriler Şekil 3.5'te gösterilmektedir.



Şekil 3.5: Her DSM_{ratio} için tepe noktası azaltma işlemi sonrası Türkiye için elde edilen yeni tertiplenmiş yük eğrilerinin gösterimi.

3.2. Analiz Sonuçları

Bu bölümde VM'lerin farklı yüzdelerde TTY'ye katılarak Türkiye tertiplenmiş yük eğrisinin tepe noktasının azaltılarak Şekil 3.5'te gösterildiği gibi yeni tertiplenmiş yük eğrilerinin elde edilmesinin sonuçları incelenmiştir. Elde edilen ana sonuçlar bölüm 3.2.1'de açıklanmış, VM'lerin TTY'ye katılması sonucunda yeni enerji santrallerinin kurulmasının ertelenmesiyle elde edilebilecek maliyet tasarrufu Bölüm 3.2.2'de analiz edilmiştir. Bölüm 3.2.3'te ise azaltılabilecek iletim sistemi kayıpları sayesinde oluşan karbon salınımı azalması ve bunun ekonomik katkısı analiz edilmiştir.

3.2.1. Veri Merkezlerinin TTY'ye Katılmasının Sonuçları

Her DSM_{ratio} oranı için, yük ve kayıp faktörlerinde yaşanan değişim, yük eğrisinde meydana gelen tepe noktası azaltılma miktarı ve iletim sistemi kayıplarında meydana gelen azalma Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1: VM'lerin TTY'ye katılmasının Türkiye için sonuçları.

DSM_{ratio}	VM'lerin Bir Yılda TTY'ye Toplam Katılma Süresi (sa)	VM'lerin TTY'ye Katıldıkları Enerji Miktarı (MWh)	Yük Eğrisi Tepe Noktası (MW)	Tepe Noktasında Meydana Gelen Azalma (MW)	Yük Faktörü	Kayıp Faktörü	İletim Sisteminde Yaşanan Kayıplardaki Azalma (GWh)	Kayıpların Azalmasından Elde Edilen Tasarruf
TTY'ye Katılım Olmadan	-	-	43.948	-	0,7544	0,5834	-	-
%10	12	796	43.821	127	0,7566	0,5866	37	\$3,2 milyon
%20	24	3.182	43.687	261	0,7589	0,5900	76	\$6,6 milyon
%30	36	7.160	43.557	391	0,7612	0,5935	116	\$10,1 milyon
%40	49	12.995	43.421	527	0,7636	0,5970	155	\$13,5 milyon
%50	63	20.885	43.278	670	0,7661	0,6008	197	\$17,1 milyon
%60	77	30.631	43.141	807	0,7685	0,6044	236	\$20,5 milyon
%70	93	43.161	42.990	958	0,7712	0,6085	280	\$24,3 milyon

VM'lerin TTY'ye katılmasının sonuçlarının detaylı analizini gerçekleştirmek amacıyla, VM'ler TTY'ye katılmadığı durum için ve %10 ile %70 arasında değişen farklı oranlarda katıldığı durum için hesaplamalar yapılmıştır. Tablo 3.1'de görüldüğü gibi VM'ler TTY'ye en az 12 saat en çok ise 93 saat katılmaktadır. VM'lerin TTY'ye katıldığı minimum enerji miktarı 796 MWh iken maksimum katıldığı enerji miktarı 43.161 MWh'tır. Türkiye'nin 2019 yılında sahip olduğu yük eğrisinin tepe noktası/puant talebi Şekil 3.1'den görüldüğü gibi 43.948 MW'tır. Bu değer, VM'lerin TTY'ye minimum enerji miktarıyla katılması durumu olan %10 DSM_{ratio} senaryosu uygulandığında, en az 43.821 MW'a düşürülebilirken, VM'lerin %70 DSM_{ratio} ile TTY'ye katılmasıyla en fazla 42.990 MW'a kadar düşürülebilir. Dolayısıyla yük eğrisi tepe noktası %0,28 ile %2,18 arasındaki değerlerde azaltılabilir. Bu oranlar yük eğrisi tepe noktasının VM'lerin TTY'ye katılmasıyla 127 MW ile 958 MW arasında değişen miktarda azaltılabileceğini göstermektedir. Her DSM_{ratio} değeri için yapılan hesaplamalar detaylı olarak Tablo 3.1'de yer almaktadır.

Yük eğrisi tepe noktasında meydana gelecek azalma, tüketilen toplam enerji değişmese bile kayıp ve yük faktörlerinin iyileşmesine sebep olmaktadır. Yük eğrisi tepe noktası 43.948 MW'tan 42.990 MW'a düşürüldüğünde, Türkiye'nin yük faktörü %2,2 artışla 0,7544'ten 0,7712'ye, kayıp faktörü ise %4,3 artışla 0,5834'ten 0,6085'e iyileştirilebilir. Kayıp faktöründeki iyileşme aynı durum için yük faktöründeki iyileşmeden neredeyse iki kat daha fazladır. Önceki bölümde açıklandığı gibi, bu sonuçlar yük eğrisi tepe noktası azaltmanın yük ve kayıp faktörlerinde farklı miktarlarda iyileşmeye sebep olduğunu göstermektedir. Kayıp faktörünün iyileşmesi, iletim

sistemlerinde yaşanan güç kayıplarının azalması manasına gelmektedir. 2006-2017 yılları arasında Türkiye’de yaşanan güç kayıplarının ortalama değeri, tüketilen enerjinin %2,34’ü olarak hesaplanmıştır[120]. Bu oran 2019 yılı iletim sistemi güç kayıplarını hesaplamak için de kullanılmıştır. 2019 yılı Türkiye enerji tüketiminin %2.34’üne karşılık gelen iletim sistemi kayıpları miktarı 6,79 TWh olarak hesaplanmaktadır. Bu değere karşılık gelen kayıp faktörü ise 0,5834’tür. Tablo 3.1’de gösterilen kayıp faktöründe yaşanan iyileşme oranlarına karşılık gelen iletim sistemleri kayıplarında yaşanan azalma miktarları, 37 GWh ile 280 GWh arasında değişmektedir. Bu değerler, iletim sistemi kayıplarının %0,54 ile %4,13 arasında azaltılabileceğini göstermektedir. Güç sistemlerinde yaşanan kayıpların 1 GWh azaltılması, mali açıdan 87.000\$ tasarruf sağlanmasına sebep olmaktadır[121]. Tablo 3.1’deki kayıp azaltılma miktarları için bu hesaplama yapıldığında; 3,2 milyon dolar ile 24,3 milyon dolar arasında tasarruf sağlanabileceği hesaplanmıştır. Ayrıca, kayıp faktörünün iyileştirilmesi, iletim hatlarının taşıma kapasitesinin artmasına neden olur ve yeni iletim hatlarının inşasını önler.

3.2.2.Kurulması Planlanan Yeni Enerji Santrallerinin Ertelenmesinin Maliyet Tasarruf Analizi

VM’lerin TTY’ye katılmasıyla iletim sistemlerinde yaşanan kayıpların azaltılmasından kaynaklı elde edilebilecek mali tasarruftan çok daha fazlası, Türkiye’nin elektrik puant talebini karşılamak amacıyla kurulması planlanan yeni enerji santrallerinin inşasının ertelenmesi ile sağlanabilmektedir. Türkiye’nin kurulu güç kapasitesi 2018 yılında 88.442 MW [122], 2019 yılında ise 91.060 MW’tır [123]. Yani 2019 senesinde 2.799 MW büyüklüğünde yeni enerji santrallerinin hizmete girdiği anlaşılmaktadır. Bu yeni enerji santrallerinin enerji kaynaklarına göre kurulu güç dağılımı Tablo 3.2’de gösterilmiştir [120], [122], [123]. Doğal gaz kategorisi LNG’yi de içermektedir. Kömür kategorisi sert kömür, ithal kömür, linyit ve asfaltitten oluşur. Yenilenebilir enerji kategorisinde jeotermal, rüzgar, güneş, biyokütle enerji kaynakları da bulunmaktadır. Sıvı yakıt, nafta ve fuel oil, akaryakıt kategorisi altında yer almaktadır. 2019 yılında VM’ler TTY’ye katılmış olsaydı, Tablo 3.1’de gösterildiği gibi Türkiye’nin enerji tüketimi tepe noktası 127 MW ile 958 MW arasında azaltılmış olacaktı. Bu durum ise, aslında tepe noktasında yaşanan azalma miktarı kadar kurulu güce ihtiyacın kalmaması manasına gelmektedir.

Tablo 3.2: Türkiye kurulu gücünün enerji kaynaklarına ve yıllara göre dağılımı.

Enerji Kaynakları	Kurulu Güç Kapasitesi (MW) 2018	Kurulu Güç Kapasitesi (MW) 2019	Fark 2018-2019 (MW)
Doğalgaz	25.909	26.186	277
Kömür	19.742	20.284	542
Hidroelektrik	28.293	28.505	212
Yenilenebilir Enerji	14.005	15.773	1.768
Akaryakıt	493	312	-
Toplam	88.442	91.060	2.799

Yani Türkiye, 2019 yılında kurulu güç miktarını artırmak için devreye aldığı yeni enerji santrallerinin, 127 MW ile 958 MW'lık kurulu güç miktarına ihtiyaç duymayabilirdi. Dolayısıyla Türkiye, 2019 yılında devreye giren kurulu güç santrallerinin en az %4,5'ini en fazla ise %34,3'ünü erteleyebilirdi. Bu erteleme durumu ise büyük maddi kazançların elde edilmesini sağlamaktadır. Kurulmasından kaçınılan enerji santrallerinden elde edilecek gelir hesaplanırken, enerji kaynaklarına göre santrallerin kurulum ile işletme ve bakım maliyetleri, [124] çalışmasına göre hesaplanmış ve Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Tablo 3.3: Enerji santrali kaynaklarına göre kurulum ve işletme maliyetlerinin birim değerleri.

Enerji Santrali Kaynakları	Kurulum Maliyeti	İşletme Maliyeti
Kömür	3.676 \$/kW	40,58 \$/kW yıllık
Doğalgaz	1.810 \$/kW	35,16 \$/kW yıllık
Hidroelektrik	5.316 \$/kW	29,86 \$/kW yıllık

Tablo 3.2 incelendiğinde 542 MW büyüklüğünde yeni kömür bazlı enerji santrallerinin hizmete alındığı görülmektedir. Kömür bazlı santraller diğerlerine göre hem daha fazla çevre kirlenmesine hem de daha fazla karbon salınımına sebep olduğu için öncelikli olarak kömür bazlı santrallerin kurulmasının ertelenmesi, sonrasında yine aynı yaklaşımla doğal gaz ve hidroelektrik santrallerinin kurulumunun ertelenmesi tercih edilmiştir. Dolayısıyla minimum tepe noktası azaltmanın gerçekleştiği durum olan VM'lerin TTY'ye %10 DSM_{ratio} ile katılması durumunda, 127 MW büyüklüğündeki kurulması ertelenebilir enerji kaynağının tamamı, kömür

santrali olarak belirlenmiştir. Bundan dolayı elde edilebilecek maddi gelir ise 472 milyon dolar olarak hesaplanmıştır. Tablo 3.3'teki birim maliyetler ve kurulması planlanan enerji santrallerinin kurulu güç değerleri kullanılarak hesaplanan maliyetler Tablo 3.4'te detaylı olarak gösterilmiştir. VM'lerin %70 oranında TTY'ye katılmış olduğu durum için elde edilen kurulması önlenebilen kurulu güç miktarı olan 958MW, enerji kaynaklarına göre dağıtıldığında kurulu güçleri 542 MW olan kömür, 277 MW olan doğal gaz ve 139 MW olan Hidroelektrik enerji santrallerinin kurulmasından kaçınılmazdır. Bunlardan dolayı ise toplamda 3,276 milyar dolar mali kazanç elde edilebilirdi.

Tablo 3.4: Ertelenen yeni enerji santrallerinin maliyet hesaplaması.

DSM_{ratio}	Enerji Santrali Kaynakları	Ertelenen Kurulu Güç (MW)	Kurulum Maliyeti	İşletme Maliyeti	Toplam Maliyet
%10	Kömür	127	467 milyon dolar	5 milyon dolar	472 milyon dolar
%70	Kömür	542	2 milyar dolar	22 milyon dolar	3,276 milyar dolar
	Doğalgaz	277	501 milyon dolar	10 milyon dolar	
	Hidro	139	739 milyon dolar	4 milyon dolar	

3.2.3. Veri Merkezlerinin TTY'ye Katılmasının Karbon Emisyonu Üzerindeki Etkisi

21. yüzyılda teknolojinin hızla gelişmesi, insanların hayatını kolaylaştıracak birçok fayda sağlamakla birlikte aynı zamanda geri dönüşü olmayan çevre problemlerine de sebep olmaktadır. Son yıllarda insanlığın karşılaştığı en önemli problemlerden biri, fosil yakıtların aşırı kullanımı ve ormanların yok olması nedeniyle artan sera gazı emisyonlarının neden olduğu küresel ısınmadır. Sera gazları arasında en çok sera etkisine sebep olan gaz, %72'lik sorumluluk payı ile karbondioksittir (CO_2). Onu %19 sorumluluk payı ile metan (CH_4), %6'lık sorumluluk payı ile nitroz oksit (N_2O) izlemektedir. En az sorumluluk, %3 oranı ile florlu gazlar(F-gazlar)'a aittir[125].

VM'lerin TTY'ye katılımı sayesinde iletim sistemi kayıplarındaki azalma, dolaylı yoldan karbon emisyonunun azalmasına katkıda bulunmaktadır. Çünkü kayıplarda yaşanacak azalma miktarı kadar enerjinin üretilmesine ihtiyaç

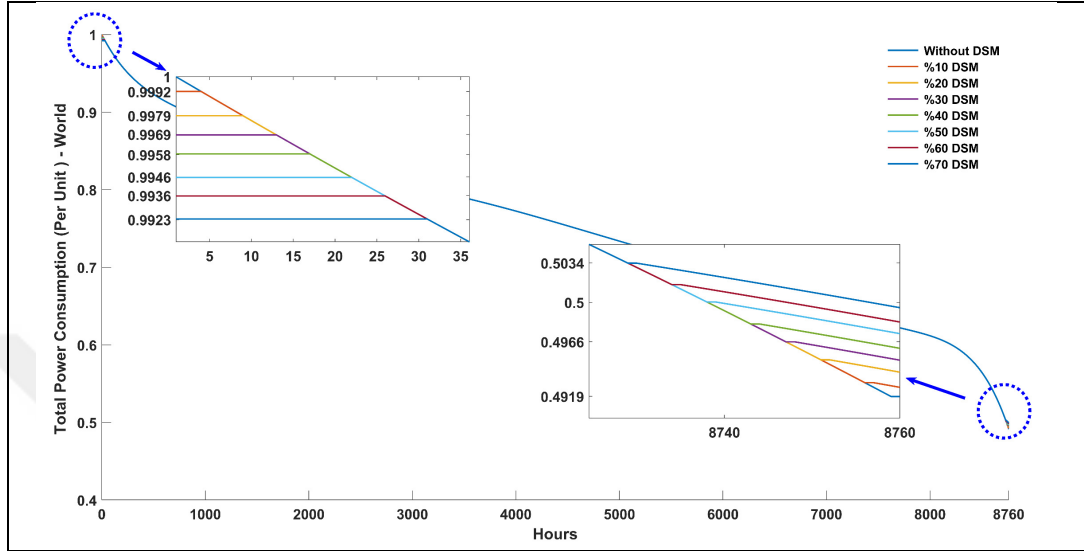
kalmayacaktır. Kömür santralleri GWh başına 908 tCO₂ üretirken, doğal gaz santralleri 400 tCO₂ ve hidroelektrik santralleri de 21 tCO₂ üretmektedirler[126],[127]. Tablo 3.1’de de gösterilen iletim sistemi kayıplarında yaşanan en az 37 GWh ve en çok 280 GWh enerji üretilmeseydi, karbon salınımı bu miktarlara karşılık gelen en az 33.596 tCO₂, en çok ise 254.240 tCO₂ azaltılabilirdi. Bu hesaplamalar yapılırken azaltılan enerji üretiminin kömür santrallerinden sağlandığı kabul edilmiştir çünkü diğer enerji santrallerine göre daha fazla çevreyi kirletici karakteristiktir ve daha çok karbon salınımına sebep olmaktadır. Karbon salınımının sağlık, su ve gıda üretimi ile çevre üzerindeki olumsuz etkilerinin ekonomik olarak verdiği zararlar da vardır. Bu zarar her bir ton CO₂ salınımı için 100\$’dır [128]. Dolayısıyla yukarda açıklanan önlenebilir CO₂ miktarları göz önüne alındığında, eğer 2019 yılında Türkiye’de VM’ler TTY’ye katılmış olsalardı karbon salınımının azaltılmasından kaynaklı 3,3 milyon dolar ile 25,4 milyon dolar arasında bir kar elde edebilirdi.

3.3. Veri Merkezlerinin TTY’ye Katılmasının Küresel Etkileri

Türkiye’deki VM’lerin en az 796 MWh en çok ise 43.161 MWh enerji miktarı kadar TTY’ye katılımı ile elde edilen sonuçlar dikkate alındığında, dünyanın farklı yerlerinde bulunan VM’lerin küresel ölçekte TTY’ye katılmasının çok daha büyük kazançlara sebep olacağı anlaşılmaktadır. 2018 yılında dünya genelinde VM’lerin tükettiği enerji miktarı 198 TWh’tır [20]. Bu bölümde geçen VM’lerin TTY’ye katılımı ifadesi küresel ölçekte dünyanın farklı yerlerinde bulunan VM’lerin TTY’ye katılımını temsil etmektedir. Bu bölümde Türkiye için yapılan örnek senaryodaki yaklaşım, VM’lerin küresel manada TTY’ye katılması durumu için de kullanılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir.

Bu bölümde 2018 yılı için küresel ölçekte VM’lerin TTY’ye katılımının çevresel ve ekonomik sonuçlarına yönelik hesaplamalar ve analizler gerçekleştirilmiştir. Hesaplamalar yapılırken bütün dünyada tüketilen saatlik güç tüketimi eğrisi bulunamadığı için, Şekil 3.2’de yer alan Türkiye’ye ait tertiplenmiş yük eğrisi profili kullanılmıştır. Dünya güç tüketimine ait bilinen tek değer 2018 yılında toplam tüketimin 26.615 TWh olduğudur[129]. VM’lerin TTY’ye katılımın etkilerinin analizi için Türkiye için yapılan çalışmadaki benzer adımlar ve yöntemler kullanılmıştır. Dünya tertiplenmiş yük eğrisinin tepe noktası, VM’lerin saatlik güç tüketiminin %10’u

ile %70'i arasında değişen farklı katılım oranlarındaki enerji miktarı kullanılarak azaltılmıştır. Tepe noktasının azaltılmasında kullanılan enerji miktarı E_{DSM} , eğrinin son kısmına kaydırılmıştır. Bu işlemler yapıldıktan sonra her bir DMS_{ratio} için elde edilen dünya tertiplenmiş yeni yük eğrileri Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6: Her DMS_{ratio} için tepe noktası azaltılması sonrası dünya geneli için elde edilen normalize edilmiş tertiplenmiş yük eğrileri.

Küresel ölçekte VM'lerin TTY'ye katıldığı enerji miktarı, yük eğrisi tepe noktasının azalma miktarı vb. pek çok değişkenin gerçek değerlerin hesaplanması için, Şekil 3.6'da yer alan TTY'ye katılımın olmadığı durumdaki eğri kullanılmıştır. Bu eğri altında kalan alanın integrali alınarak, dünya enerji tüketimi per-unit olarak hesaplanmıştır. Dünya enerji tüketiminin gerçek değeri olan E_{real} değeri bilinmekte ve 26.615 TWh'tir[129]. Şekil 3.6'daki grafik kullanılarak integral hesabı ile yapılan enerji tüketimi E_{pu} ise 6.609PU olarak hesaplanmaktadır. Bu iki değer arasındaki ilişki ise PU değerinin, baz değer ile çarpımı şeklindedir ve denklem (3.7)'de gösterilmiştir.

$$E_{real} = E_{PU} * E_{base} \quad (3.7)$$

Denklem 3.7'ye göre baz enerji değeri 4.027 GWh olarak hesaplanmaktadır. Baz enerji değeri, Tablo 3.1'de gösterilen ve hesaplanması gereken bütün değişkenlerin PU olarak hesaplandıktan sonra, gerçek değerlerinin hesaplanması için kullanılmaktadır. Türkiye için yapılan çalışmadaki analiz adımları bu bölümde de kullandığı için, (3.4) ile

(3.6) arasındaki denklemler, benzer şekilde dünya güç tüketimi tepe noktasının azaltılması ve sonrasında elde edilen yeni tepe noktası hesabı için kullanılır. Buna göre, DCS_{Pow} 22,6 GW olarak hesaplanır. Her bir DSM_{ratio} oranı için yapılan hesaplamalar sonrası azaltılan tepe noktası sonuçları, Tablo 3.5'te özetlenmiştir.

Tablo 3.5: Küresel ölçekte VM'lerin TTY'ye katılım sonuçları.

DSM_{ratio}	VM'lerin Bir Yılda TTY'ye Toplam Katılma Süresi (sa)	VM'lerin TTY'ye Katıldıkları Enerji Miktarı (GWh)	Yük Eğrisi Tepe Noktası (GW)	Tepe Noktasında Meydana Gelen Azalma (GW)	Yük Faktörü	Kayıp Faktörü	İletim Sisteminde Yaşanan Kayıplarda ki Azalma (GWh)
TTY'ye Katılım Olmadan	-	0	4.027	0	0,7544	0,5834	-
%10	4	9,1	4.024	3,2	0,7550	0,5843	1.230
%20	9	40,7	4.019	8,4	0,7560	0,5858	3.271
%30	13	88,2	4.015	12,6	0,7568	0,5870	4.897
%40	17	153,7	4.010	16,7	0,7576	0,5882	6.516
%50	22	248,6	4.005	21,8	0,7585	0,5895	8.262
%60	26	352,6	4.001	25,8	0,7593	0,5907	9.867
%70	31	490,5	3.996	30,8	0,7603	0,5922	11.865

2018 yılında dünya güç tüketimi eğrisinin tepe noktası 4.027 GW olarak hesaplanmaktadır. VM'lerin TTY'ye %10 oranında katılmasıyla bu değer %0,08 düşmekte ve yeni tepe değer 4.024 GW olarak hesaplanmaktadır. VM'lerin TTY'ye saatlik güç tüketimlerinin %70'i kadar katılmaları durumunda ise tepe değer %0,77 kadar düşerek 3.996 GW değerine ulaşmaktadır. Dolayısıyla tepe noktası en az 3,2 GW en çok 30,8 GW miktarında azaltılabilmektedir. Tepe noktasının azaltılması yük ve kayıp faktörlerinde iyileşmeye yol açmaktadır. Dünya Bankası verilerine dayanarak [130], 2010-2014 yılları arasındaki dünya ortalama elektrik enerjisi iletim ve dağıtım (T&D) kayıpları, dünyadaki toplam elektrik üretiminin %8,23'üdür. The Regulatory Assistance Projesi (RAP) raporuna göre [131] T&D kayıplarının oranı, üretimin %6'sı ile %11'i arasında değişmektedir. Ayrıca, National Association of Clean Air Agencies (NACAA) raporu [132] iletim sistemi kayıplarının, üretimin %2'i ile %5'i arasında değiştiğini belirtmektedir. T&D kayıpları teknik olmayan ve transformatör kayıplarını da içerdiğinden, tepe noktası azaltılması sonucu meydana gelen dünya çapındaki iletim sistemi kayıplarında yaşanabilecek azalmayı hesaplamak için, sadece kayıp faktörü ile ilgili olan, “iletim sistemi kayıplarına” odaklanılmıştır. Sonuç olarak, 2018 yılı için dünya çapındaki iletim sistemi kayıplarının miktarı, enerji üretiminin %3'ü olarak kabul

edilmiştir. Böylece, dünya genelindeki iletim sistemi kayıpları, 0.5834 kayıp faktörü değerine karşılık gelen 798,45 TWh olarak hesaplanmaktadır. Her DSM_{ratio} oranı için yük ve kayıp faktörü (3.1) ve (3.2) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 3.5'te gösterilmiştir.

Her DSM_{ratio} oranı için hesaplanan tepe noktası azalma miktarları incelendiğinde, minimum ve maksimum iletim sistemi kayıpları azaltma miktarları sırasıyla 1.230 GWh ve 11.865 GWh olarak hesaplanmış ve bunlara karşılık gelen kayıp faktörleri değerleri de 0,5843 ve 0,5922 olarak belirlenmiştir. Bu değerler, 2018'deki dünya çapındaki iletim kayıplarının en az %0,15'inin ve en çok %1,5'inin azaltılabileceğini göstermektedir. Ayrıca bu hesaplamalar, VM'lerin 2018 için küresel ölçekte TTY'ye katılmasının, dünya çapında enerji üretiminin 1.230 GWh ile 11.865 GWh arasında azaltılmasına sebep olabileceğini göstermektedir. Böylece, küresel CO_2 emisyonu; 1,2 Mt CO_2 ile 10,78 Mt CO_2 arasında azaltılabilirdi. Ayrıca karbon emisyonunun doğa üzerindeki olumsuz etkileri nedeniyle oluşacak 120 milyon dolar ile 1,078 milyar dolar arasında maliyet önlenebilirdi. Bütün hesaplamalar Türkiye için kullanılan dönüşüm değerleri kullanılarak yapılmıştır. Maksimum azaltılabilir CO_2 emisyonu miktarı 2018 yılında dünyada meydana gelen toplam 37.887 Mt CO_2 'in %0.03'ü kadardır[133]. Bu oran her ne kadar az gibi görünse de aynı zamanda Senegal ülkesinin sebep olduğu emisyon miktarına eşittir.

Yük eğrisinde meydana gelen tepe noktasının azaltılması yeni enerji santrallerinin kurulumunun ertelenmesini sağlayabilir. Tepe noktasının farklı oranlarda azalması sonucu ertelenebilecek enerji santrallerinin belirlenebilmesi amacıyla, 2017-2018 yılları arasındaki enerji kaynağına göre dünya toplam kurulu güç kapasitesi miktarları Tablo 3.6'da gösterilmiştir [134]. Tablo 3.6'daki yenilenebilir enerji kategorisi; jeotermal, rüzgar, güneş, biokütle, nükleer enerji santrallerini içerir. Tablo 3.5'te gösterildiği gibi, tüm dünyadaki VM'ler 2018'de TTY'ye katılmış olsaydı, minimum 3,2 GW ile maksimum 30,8 GW kurulu güç oranına sahip yeni enerji santrallerinin kurulumuna ihtiyaç olmayacaktı. Bu güç değerleri 2018 yılında kurulan enerji santrallerinin kurulu güç oranının %1,3'ü ile %12,5'ine eşittir. Farklı bir deyişle, VM'lerin TTY'ye 2018 yılında katılmış olması bütün dünyada yeni kurulacak enerji santrallerinin en az %1,3'ünün en çok %12,5'inin kurulması ihtiyacını önleyebilecekti. Kurulması önlenebilir ve ertelenebilir enerji santrallerinin enerji kaynaklarına göre dağılımı yapılırken, kömür ve doğal gaz enerji santrallerinin öncelikli olarak kurulmaması tercih edilmiştir. Çünkü bu santrallerin doğayı kirletici özellikleri ve karbon emisyonuna

katkısı diğerlerine göre daha fazladır. Tablo 3.6'daki değerler göz önüne alındığında %10 DSM_{ratio} için hesaplanan 3,2 GW ertelenebilir kurulu güç miktarının tamamının, kömür santrallerinin kurulumunun ertelenmesinde kullanılabileceği görülmektedir. Ayrıca %70 DSM_{ratio} için ertelenebilir 30,8 GW kurulu güç miktarının 8 GW'ı, kömür santrallerinin kurulumunun ertelenmesi için, geri kalan 22.8 GW'ı ise doğalgaz santrallerinin kurulumunun ertelenmesi için kullanılmıştır.

Tablo 3.6: Dünya kurulu gücünün enerji kaynaklarına ve yıllara göre dağılımı.

Enerji Kaynakları	Kurulu Güç Kapasitesi (GW) 2017	Kurulu Güç Kapasitesi (GW) 2018	2018 Yılında Kurulan Enerji Santrallerinin Kapasitesi (GW)
Doğalgaz	1.693	1.745	52
Kömür	2.071	2.079	8
Hidroelektrik	1.269	1.290	21
Yenilenebilir	1.488	1.654	166
Akaryakıt	450	450	0
Toplam	6.971	7.218	247

Kurulumu ertelenebilir bu enerji santralleri, büyük ekonomik ve çevresel kazanımların elde edilmesini sağlamaktadır. Elde edilebilir bu kazanımlar Tablo 3.3'te [124] tanımlanan enerji santrallerinin kurulum ve İşletme maliyetleri kullanılarak hesaplanmıştır ve sonuçlar Tablo 3.7'de gösterilmiştir.

Tablo 3.7: Ertelenen yeni enerji santrallerinin tüm dünya için maliyet hesaplaması.

DSM_{ratio}	Enerji Santrali Kaynakları	Ertelenen Kurulu Güç (GW)	Kurulum Maliyeti	İşletme Maliyeti	Toplam Maliyet
10%	Kömür	3,2	11,7 milyar dolar	\$129,8 milyon	11,83 milyar dolar
70%	Kömür	8	29,4 milyar dolar	\$324,6 milyon	71,72 milyar dolar
	Doğalgaz	22.8	41,2 milyar dolar	\$801,6 milyon	

Sonuç olarak, tüm dünyadaki VM'ler 2018 yılı için TTY'ye katılmış olsaydı, yeni enerji santrallerinin kurulmasının ertelenmesi ve karbon emisyonun zararlı etkilerinin önlenmesi sebebiyle sağlayabileceği parasal tasarruf minimum 11,95 milyar dolar, maksimum ise 72,8 milyar dolar olabilirdi.

3.4. Sonuç

Bu bölümde VM'lerin TTY'ye katılmasının önemi ve nedenleri analiz edilmiştir. VM'lerin TTY'ye katılımı öncelikle Türkiye ölçeğinde incelenmiş ve elde edilebilecek hem maddi hem de çevresel faydalar analiz edilmiştir. VM'lerin TTY'ye katılımının yük ve kayıp faktörleri üzerindeki etkileri, iletim sistemi kayıplarının azalmasına olan etkisi, Türkiye'nin karbon emisyonunun azaltılmasına olan etkisi incelenmiştir. Kurulması planlanan yeni enerji santrallerinin kurulumuna ihtiyaç kalmaması sebebiyle elde edilebilecek maliyet analizi gerçekleştirilmiştir. Bütün bunlara ek olarak, benzer yaklaşım ve yöntemler kullanılarak küresel ölçekte VM'lerin TTY'ye katılmasının ne gibi sonuçları olabileceği analiz edilmiştir.

Gerçekleştirilen çalışma ile, aynı enerji tüketimi miktarına sahip olsa bile, iki farklı yük eğrisi için yük ve kayıp faktörleri değerlerinin, birbirinden farklı olabileceği gösterilmiştir. Bu özellik kullanılarak, toplam enerji tüketimini değiştirmeden sadece tepe noktası azaltılması yöntemiyle iletim sistemi kayıplarının azaltılabileceği, elektrik puant talebi/tepe noktasını karşılamak için yeni enerji santrallerinin kurulmasının ertelenebileceği ve bunlardan dolayı da hem karbon emisyonunun azaltılabileceği hem de yüksek miktarda maddi kazancın sağlanabileceği matematiksel hesaplamalarla gösterilmiştir. VM'lerin TTY'ye katılımının kayıp faktörünü yük faktöründen daha fazla etkilediği açık bir şekilde gösterilmiştir. Örneğin VM'lerin TTY'ye %70 oranında katılması sonucu kayıp faktöründe meydana gelen iyileşme, yük faktöründe meydana gelen iyileşmeden iki kat daha fazladır. Bu iyileşme iletim sistemlerindeki güç kayıplarının azalmasına, iletim hatlarının taşıma kapasitesinin artmasına, yeni iletim hatlarının inşasının önlenmesine sebep olmaktadır.

Bu bölümde elde edilen temel sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenmiştir. 2019 yılında Türkiye'de VM'ler TTY'ye katılmış olsalardı:

- Türkiye'nin güç tüketimi tepe noktasının %0,28 ile %2,18 arasında azaltılması sağlanabilirdi.
- Yük faktöründe %2,2 oranında, kayıp faktöründe ise %4,3 oranında iyileşme gerçekleştirilebilirdi.
- İletim sistemi kayıplarının %0,54 ile %4,13 arasında azaltılması sağlanabilirdi. Bunun sonucunda 3,2 milyon dolar ile 24,3 milyon dolar arasında tasarruf sağlanabilirdi.

- 2019 yılında hizmete giren enerji santrallerinin %4,5'u ile %34,3'ünün kurulumuna ihtiyaç olmayabilirdi. Böylece 472 milyon dolar ile 3,276 milyar dolar arasındaki maliyet önlenebilirdi.
- Türkiye'nin CO_2 emisyonunun maksimum 254.240 t CO_2 azaltılması sağlanabilirdi. Bu sayede 25,4 milyon dolar tasarruf elde edilebilirdi.

Ayrıca Türkiye için gerçekleştirilen hesaplamalar ve analizler küresel ölçekte VM'lerin TTY'ye katılmasının analizi için de gerçekleştirildiğinde elde edilen sonuçlar aşağıda özetlenmiştir. Bütün dünyada yer alan VM'ler 2018 yılında TTY'ye katılmış olsalardı:

- Dünya güç tüketim eğrisi tepe noktasının %0,08 ile %0,77 arasında azaltılması sağlanabilirdi.
- Dünya çapında enerji iletim sistemi kayıplarının %0,15'i ile %1,5'u oranları arasındaki miktarın azaltılması sağlanabilirdi.
- 2018 yılında devreye giren enerji santrallerinin %1,3'ü ile %12,5'inin kurulumuna ihtiyaç olmayabilirdi. Bunun sonucunda 11,83 milyar dolar ile 71,72 milyar dolar arasında maddi tasarruf sağlanabilirdi.
- 2018 yılında bütün dünyada meydana gelen CO_2 salınımı miktarı, %70 DSM_{ratio} için 10,78 Mt CO_2 kadar azaltılabilirdi. Bu değer 2018'de Senegal'in sebep olduğu toplam karbon emisyon miktarına ve dünya çapındaki emisyonun da %0,03'üne eşittir. Önlenebilecek karbon emisyonu sebebi ile 120 milyon dolar ile 1.078 milyar dolar arasında mali kazanç elde edilebilirdi.

4. VERİ ANALİZİ

Bu bölümde öncelikle veri merkezinde ölçülebilen ve JSON (JavaScript Object Notation) formatında saklanan ham verilerin tez kapsamında kullanılmak üzere elde edilmesi süreci anlatılmış, ardından elde edilen verilerin ayıklanarak hatalı veya eksik verilerin tamamlanması, aykırı değerlerin ve gürültünün belirlenerek veriden temizlenmesi, verilerin etiketlenerek sınıflandırılması işlemleri anlatılmıştır. Ardından güç tüketimi modellerinde kullanılacak bağımsız değişkenlerin belirlenme sürecinde benimsenen metodoloji özetlenmiş ve örnek bir çalışma olarak IT güç tüketimi için bağımsız değişkenlerin belirlenmesi detaylı olarak anlatılmıştır.

4.1. Ölçüm Verilerinin Elde Edilmesi

Veri merkezi veri toplama modeli “Fiziksel Cihazlar” ve “IT” olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. Veri merkezi fiziksel cihazlar yönetim yazılımı, DCIM üzerinden UPS, jeneratör, soğutucu, klima vb cihazlara ait veriler kaydedilmektedir. Ayrıca veri merkezi ana dağıtım panosuna, soğutuculara, klimalara yerleştirilen enerji analizörleri ile elektrik tüketimi ölçülmekte, akıllı PDU’lar vasıtasıyla da IT kabinlerinin (Rack) güç tüketimi ölçülmektedir. Ayrıca veri merkezinde farklı konumlarda iç ortam sıcaklığını ve nemi, klimaların hava üfleme sıcaklıklarını, hava koridoru sıcaklıklarını ve dış ortam sıcaklığını ölçmek için pek çok IoT tabanlı sensör kullanılmıştır. Bununla birlikte sunucu kabininin ön ve arka kapılarına yerleştirilmiş üçer adet sıcaklık sensörü ile havanın kabine giriş ve çıkış sıcaklıkları ölçülmektedir.

IT ile alakalı bütün ölçümler (CPU, RAM, Ağ kullanımı vb.) Zabbix isimli IT izleme ve yönetim programı aracılığıyla ölçülmüştür. Ölçüm yapılan farklı cihazlardan elde edilen veriler sınıflara ayrılmış ve Tablo 4.1.’de özetlenmiştir. Veri merkezinde ölçülen ham veriler programlama dilleri arasında yapılandırılmış veri değişimini kolaylaştıran bir metin biçimi olan JSON formatında saklanmaktadır. Tez kapsamında gerçekleştirilen çalışmalarda kullanılmak üzere, veri merkezinde saklanan ham verinin indirilerek bir veri tabanı oluşturmak için python ortamında geliştirilen “Data Downloader” isimli kısa bir program kullanılmıştır. Program, indirilmek istenen verinin “cihaz kimliğini”, indirilmek istenen verinin “ilk ölçüm tarihini” ve kaç günlük verinin indirileceğini belirleyen “gün sayısını” kullanıcıdan ister.

Tablo 4.1. Veri merkezi ölçüm cihazları ölçüm verileri.

Cihaz Tipi	Veri Tipi	Birim
UPS	Active Power (W) Total	W
	Current (A) Outlet #001	A
	Current (A) Outlet #002	A
	Current (A) Outlet #003	A
	Voltage (V) Outlet #001	V
	Voltage (V) Outlet #002	V
	Voltage (V) Outlet #003	V
Enerji Analizörü	Active Power (W) Total	W
	Energy (WH) Total	WH
Akıllı PDU	Output Voltage	V
	Output Current	A
	Output Power	W
	Total Output Power	W
Bellek (RAM)	Total Swap Space	GB
	Total Memory	GB
	Free Swap Space	GB
CPU	CPU Idle Time	%
	CPU User Time	%
	CPU Load	%
IoT Sensörler	Temperature	C
	Humidity	%

Bu bilgiler kullanılarak veri merkezi API sunucusundan veri indirilmesi için istekte bulunulur. Programın konsol ekranı Şekil 4.1’de gösterilmiştir.

```

Number of days: 1
**** Don't insert date before 01-06-2019 ****
Device ID (insert 'all' without quote for all devices): all
Initial date (GG-AA-YYYY):01-04-2020_

```

Şekil 4.1: Geçmiş veri indirme programı ara yüz ekranı.

Veri merkezine ait geçmiş verilerin kayıtları 1 Haziran 2019 tarihinden itibaren kaydedilmeye başlandığından, veri indirme işlemi için bu tarihten önce bir başlangıç tarihi girildiğinde program “Lütfen Geçerli Bir Tarih Giriniz” şeklinde bir hata mesajı verir. “Cihaz Kimliği (Device ID)” argümanı kullanılarak tek bir cihaza ait veriler indirildiği gibi “all” seçeneği kullanılarak bütün cihazlara ait veriler tek defa da indirilebilmektedir. Ardından program Şekil 4.2’de gösterilen JSON istek formunu oluşturur ve veri merkezi API’sine gönderir.

```
{
    "dc": "all",
    "to_date": "1584737999",
    "device": "all",
    "username": "GREENDC",
    "password": "*****",
    "is_hourly": "no",
    "from_date": "1584651600"
}
```

Şekil 4.2: Veri merkezi API’sine gönderilen istek formu.

Program, veri indirme sürecinde kullanıcının girdiği “ilk tarih” değerinden başlayarak her güne ait veri için istek gönderir ve gelen veriyi günlük olarak kaydeder. Bu işlem kullanıcı tarafından belirlenen “gün sayısı” kadar devam eder. Eğer istek ve indirme işlemi başarıyla tamamlanırsa Şekil 4.3’te gösterildiği gibi bir mesaj görünmektedir.

```
Number of days: 1
**** Don't insert date before 01-06-2019 ****
Device ID (insert 'all' without quote for all devices): all
Initial date (GG-AA-YYYY):01-03-2020

from date: 2020-Mar-01_00-00
Waiting for response of post request....
Received data successfully!
Saved data successfully!
2020-03-01

elapsed time:92.09905219078064
Press any key to continue . . .
```

Şekil 4.3: Geçmiş veri indirme programı sonuç ekranı.

İstenilen tarih aralığındaki geçmiş veriler elde edildikten sonra, aylara göre kategorilere bölünür ve günlük veriler aylık olarak birleştirilir. Veriler önce “Cihaz Kimliği”ne göre sıralanır, ardından her bir cihazda bulunan ve farklı ölçümleri temsil

eden “anahtar isimleri (key name)”ne göre yeniden sıralanır. Düzenlenen JSON formatındaki veriler, veri ön işleme sürecinde kullanılmak üzere veri tabanında saklanır.

4.2. Ölçülen Verilerin İşlenmesi

Veri tabanında JSON formatında saklanan aylara göre bölünmüş geçmiş veriler, MATLAB ortamında kullanılmak üzere öncelikle JSON’dan CSV formatına dönüştürülür. Ardından MATLAB ortamında yazılan kodlarla “Cihaz Kimliği” ve her bir cihaz için olması gereken veri filtrelemede kullanılan “Anahtar İsimler” kontrol edilmiştir. Böylelikle herhangi bir cihaz veya anahtar isim değişikliği olup olmadığı, eksik veya yanlış veri olup olmadığı tespit edilmektedir. Bu kontroller sonucunda veri bütünlüğü ve devamlılığı açısından tez kapsamında analizler için kullanılacak en uygun tarih aralığının Kasım 2020 – Kasım 2021 tarihleri olduğu tespit edilmiştir. Ardından bu tarih aralığındaki her ay için veriler, ayrı ayrı incelenerek analiz edilmiş, sonrasında ise birleştirilerek tek bir “zaman tablosu (timetable)” dosyası oluşturulmuştur. Veri ön işleme süreci için gerçekleştirilen bütün adımlar MATLAB ortamında yazılan kodlar aracılığı ile gerçekleştirilmiştir. Ham veriler öncelikle aylık olarak “cihaz kimliğine göre” filtrelenmiş daha sonra her bir cihaz’da yer alan elde edilmek istenen farklı değişkenlere ait veriler “anahtar isimlere” göre filtrelenerek kaydedilmiştir. Örneğin çevresel izleme aracı olarak isimlendirilen “DeviceID:10233” cihazından her bir değişken için tanımlanan “anahtar isimler” kullanılarak klimaların üfleme sıcaklıkları, tavanda yer alan iç ortam sıcaklığını ölçen sensörlere ait veriler, nem verisi, kabin ön kapı ve arka kapı sıcaklıkları, soğuk hava üfleme koridoru sıcaklıkları gibi değişkenler diğer verilerden ayıklanarak elde edilmiştir. Ölçülen verilerin ölçüm aralıkları 30 saniye, 1 dakika, 5 dakika, 10 dakika gibi farklı değerlere ve başlangıç zamanına sahiptirler. Bu yüzden her ay için veriler ayıklanırken, ilgili ay için saatlik ölçüm aralığı olacak şekilde ayrı ayrı zaman damgaları oluşturulmuş ve ayıklanan veriler bu zaman damgasına göre senkronize edilmiştir. Veri senkronizasyonu yapılırken, farklı ölçüm aralığına sahip her bir değişken öncelikle orijinal zaman damgası kullanılarak “timetable”a çevrilmiş, ardından bütün değişkenler ayrı bir kolona atanarak tek bir “timetable” elde edilmiştir. Daha sonra ilgili ay için belirlenmiş olan saatlik zaman damgasına göre senkronize işlemi

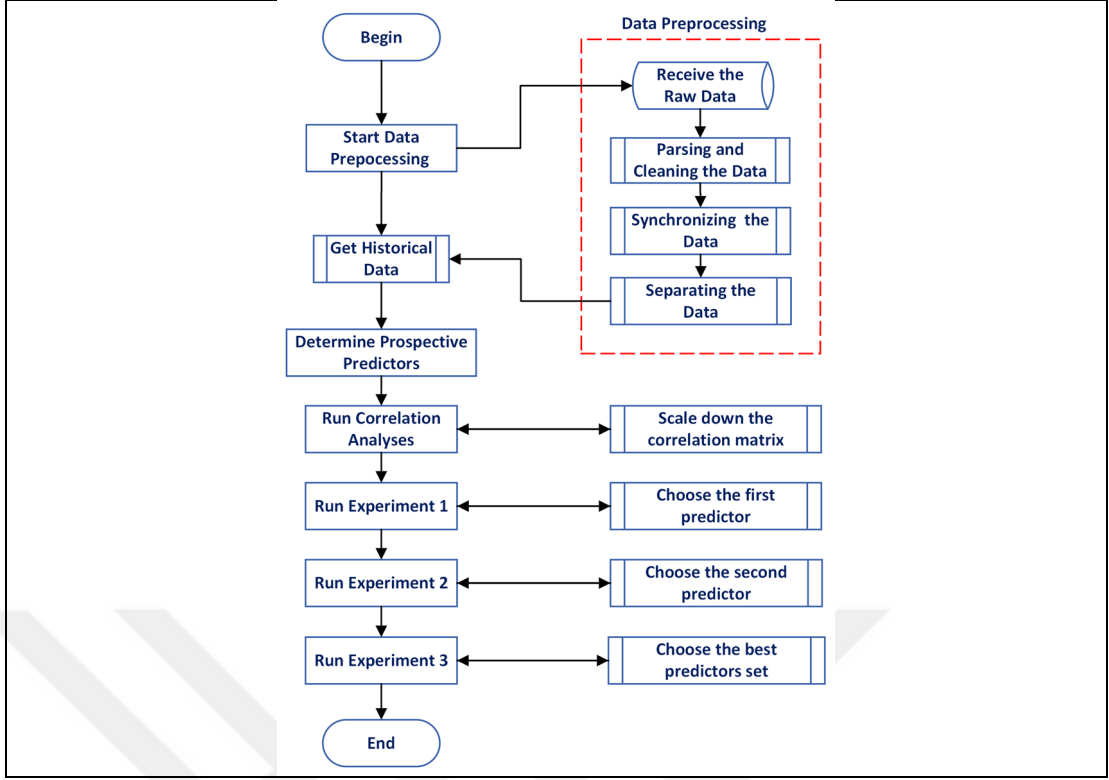
gerçekleştirilmesi için “synchronize” fonksiyonu kullanılmıştır. Bu fonksiyon doğrusal enterpolasyon yöntemi kullanarak verileri yeniden örnekleyerek, bir araya getirerek veya olmayan aralıklarda yeniden türeterek senkronize işlemini gerçekleştirmektedir. Sonrasında her ay için saatlik senkronize edilmiş veriler, değişkenlere göre alt alta eklenerek birleştirilmiştir. Böylelikle ölçüm periyodu boyunca her bir değişken için tek bir tablo oluşturulmuştur. Bundan sonra, tüm veriler ait oldukları cihazlara ve sensörlere göre kategorilere ayrılmıştır. Örneğin “ActPowCooling” kategorisinde her bir klimanın ve soğutucunun (chiller) güç tüketimi verisi, 10 adet farklı kolon kullanılarak birleştirilmiş ve tek “timetable” olarak kaydedilmiştir. İşlemler sonunda 13 farklı kategori ve toplam 220 değişkenden oluşan 9144 adet gözlem sayısına sahip bir veri kümesi oluşturulmuştur. Daha sonra “filloutliers” fonksiyonu kullanılarak, bu veri kümesindeki her bir değişken için standart sapma değerinin 3 katından fazla olan değerler aykırı değer, “outlier” olarak kabul edilmiş ve bu değerler 24 saatlik aralık kullanılarak elde edilen hareketli ortalama değeri kullanılarak düzeltilmiştir. Ardından “smoothdata” fonksiyonu ile 6 saatlik aralık kullanılarak elde edilen hareketli ortalama değeri ile veriler, gürültüden arındırılarak düzgünleştirilmiştir (data smoothing).

Bu işlemler gerçekleştirildikten sonra ölçülen çok sayıda değişken manipüle edilerek yeni değişkenler türetilmiştir (feature extraction). Örneğin IT kabinlerde yer alan her bir sunucunun güç tüketimi toplanarak bütün IT kabin için tek bir güç tüketim değeri elde edilmiş ve “IT Kabin Güç Tüketimi” isimli bir değişken oluşturulmuştur. Benzer şekilde IT kabininde yer alan sunucuların ortalama CPU kullanım oranı bütün sunucular dikkate alınarak IT kabin için CPU kullanım oranı elde edilmiştir. RAM kullanımı için de benzer durum söz konusudur. Ayrıca her bir klimanın güç tüketimi toplamı ile “AC Toplam Güç Tüketimi”, soğutucuların güç tüketimi toplamı ile yeni bir değişken elde edilmiş ve soğutma üniteleri ile alakalı bütün güç tüketimlerinin toplamı ile de veri merkezi toplam soğutma güç tüketimini oluşturan bir değişken oluşturulmuştur. IoT sensörlerinden ölçülen veriler kullanılarak, ortalama iç ortam sıcaklığı, dış ortam sıcaklığı ve nem gibi değerler türetilmiştir. Ayrıca IT kabinlerinin ön ve arka kısmına yerleştirilen sıcaklık sensörlerinin değerlerinin de ön kapı ve arka kapı için ayrı ayrı ortalaması alınarak yeni bir değişken türetilmiştir. Ayrıca zamanla alakalı parametrelerin etkisinin doğru ve tam bir şekilde ortaya çıkarılması için zamanın döngüsel özelliği dikkate alınmıştır. Örneğin Şekil 4.4’te gösterildiği gibi günün saatlerini bir doğru üzerindeki sayılar gibi kabul edersek, 2 sayısının 12’ye olan

Elde edilen güç tüketim oranlarına göre PUE değeri 1,9 olarak hesaplanmaktadır. Veri ön işleme süreci sonunda elde edilen değişkenlerin değerlendirilmesi ve güç tüketim modellerinde kullanılacak bağımsız değişkenlerin belirlenmesi süreci hem güç tüketimi tahmini hem de optimum enerji yönetimi açısından oldukça önemlidir. Bu süreç Bölüm 4.3'te özetlenmiştir.

4.3. Bağımsız Değişken (Predictors) Belirleme Süreci

Güç tüketimi modelini oluşturacak bağımsız değişkenlerin belirlenmesi süreci hem modelin hem de bu model kullanılarak geliştirilecek tahmin algoritmasının doğru ve güvenilir sonuç vermesi açısından oldukça önemlidir. Literatürde var olan bağımsız değişken belirleme yöntemleri özellikle veri merkezi ölçeğinde Bölüm 2.3'te özetlenmiştir. Buna göre pek çok çalışmada bağımsız değişkenlerin tahmin sonucuna veya kurulan güç tüketimi modelinin doğruluğuna olan etkisi incelenmemiş, bağımsız değişkenler çoğunlukla korelasyon analizi veya farklı metrikler kullanılarak seçilmiştir. Tez kapsamında oluşturulan güç tüketimi modeli ve tahmin algoritmaları için kullanılacak olan modeller geliştirilirken hibrit bir yaklaşım benimsenmiştir. Bağımsız değişken belirleme sürecine ait izlenen genel metodoloji Şekil 4.6'da gösterilmiştir. Öncelikle Bölüm 4.1 ve 4.2'de anlatılan veri ön işleme süreci gerçekleştirilerek elde edilen ham veriler, süreç sonucunda kullanılabilir formata getirilmekte ve güç tüketimi modelinde kullanılabilecek muhtemel bağımsız değişkenler belirlenmektedir. Sonrasında bütün değişkenler için korelasyon matrisi oluşturulmakta ve değişkenler arasındaki en alakasız ilişkiye sahip olanlar matristen çıkarılarak korelasyon matrisi küçültülmektedir. Yeni elde edilen korelasyon matrisi üzerinden korelasyon analizi gerçekleştirilerek, değişkenlerin birbiri ile arasındaki ilişkisi hakkında ön bilgi edinilmektedir. Bu işlem sonucunda hangi bağımlı değişken (IT / Soğutma vb güç tüketimi) için bağımsız değişkenler belirlenmek isteniyorsa, korelasyon analizine göre kullanıldığında iyi bir sonuç elde edilmesi beklenen değişkenler belirlenmektedir. Ardından her bir değişkenin teker teker tahmin sonucuna olan etkisi incelenmektedir. Hem korelasyon analizine göre hem literatürde kullanılan değişkenlerin neler olduğu bilgisi kullanılarak, hem de yapılan deneyler sonucuna göre birinci bağımsız değişken belirlenmektedir.



Şekil 4.6: Bağımsız değişken belirleme süreci için benimsenen metodoloji.

İkinci bağımsız değişkenin belirlenmesi sürecinde, birinci bağımsız değişkene ek olarak geride kalan diğer değişkenler sırasıyla ikinci bağımsız değişken olarak kullanılarak tahmin sonucu analiz edilmektedir. Elde edilen hata oranları ve tahmin sonucunun dalga formu ile veri karakteristiği incelenerek ikinci bağımsız değişkene karar verilmektedir. Bu süreç deneysel olarak tahmin sonucunun artık değişmediği durum elde edilene kadar tekrarlanmakta ve her bir bağımlı değişken için en uygun bağımsız değişken seti elde edilmektedir.

Bağımsız değişken belirleme süreciyle alakalı deneysel bir örnek olarak, IT güç tüketimini etkileyen bağımsız değişkenlerin belirlenmesi süreci ve bağımsız değişkenlerin tahmin sonucuna etkisi detaylı olarak Bölüm 4.4'te anlatılmıştır.

4.4. Bağımsız Değişkenlerin (Predictors) IT Güç Tüketimi Tahmini Üzerindeki Etkileri

Doğru yük tahmini sonuçları, ek işletme maliyetlerini, enerji israfını ve gereksiz enerji alımlarını önlemek için hem tüketiciler hem de şebeke ve dağıtım firmaları için kritik öneme sahiptir.[135]. Ancak tüketici alışkanlıkları, çevresel ve sosyo-ekonomik parametreler ile hava koşulları, tahmin işlemini oldukça etkilediği için, doğru ve

güvenilir yük tahmini yapmak zorlu bir süreçtir[82]. Bu sebeple tahmin edilen değişkeni (bağımlı değişken) etkileyen, bağımsız değişkenler (predictors) kombinasyonunu seçmek çok önemlidir[83]. Bu bölümde veri merkezi toplam güç tüketiminin önemli bir kısmını oluşturan IT güç tüketimi tahminini etkileyen bağımsız değişkenlerin analizi gerçekleştirilmiştir. Özellikle büyük miktarda ve çok çeşitlilikte ölçüm verisi kullanılarak yapılan tahmin işlemlerinde, bağımsız değişken seçimi, doğru ve güvenilir tahmin sonuçları elde etmek açısından oldukça önemlidir. Tahmin edilen değişken, bağımsız değişkenlerden oluşan matematiksel bir model kullanılarak tahmin edildiği için, kullanılan bağımsız değişkenler tahmin işlem süresini ve hata oranını doğrudan etkilemektedir. Literatürde var olan bağımsız değişken belirleme metotları (feature/predictor selection methods) genelde korelasyon analizine dayanmakta veya kullanılan farklı metriklerin matematiksel sonucu kullanılmaktadır. Bağımsız değişkenler bu şekilde doğrudan seçilmekte, bu değişkenlerin tahmin sonucuna olan etkileri karşılaştırılarak veya analiz edilerek bağımsız değişken seçimi yapılmamaktadır [81]–[89], [136] Bu sebeple bu bölümde, farklı değişkenlerin (ör: CPU ve RAM kullanım oranları, sıcaklık, nem, vb) IT güç tüketimi tahmini üzerindeki bireysel ve grup olarak kullanıldıklarındaki etkileri, IoT tabanlı sensörlerden ölçülen veriler, enerji analizörleri ve örnek bir IT kabinden ölçülen gerçek veriler kullanılarak incelenmiştir.

4.4.1 Deneysel Çerçeve

Bu bölümde öncelikle deney düzeni açıklanmış, daha sonra korelasyon analizi süreci ve IT kabini güç tüketimi için kullanılan tahmin modelinin yapısı açıklanmıştır. Daha sonra, deneylerin performansını karşılaştırmak için kullanılan hata metriklerinin tanımları verilmiş, son olarak ise gerçekleştirilen deneylerin içerikleri anlatılmıştır.

4.4.1.1 Deneysel Düzen

Bu bölümde yapılan analizler Nisan 2020 ile Şubat 2021 arasında ölçülen gerçek veriler kullanılarak yapılmıştır. Veri merkezinde "ARGE Rack" isimli sunucu kabini ölçüm için tahsis edilmiş ve rutin çalışma koşulları altında veriler ölçülmüştür. ARGE Rack'taki sunucuların güç tüketimi akıllı PDU'larla ölçülür. Ayrıca, VM'nin toplam güç tüketimini, her klimanın ve chiller'ın güç tüketimini ölçmek için veri

merkezindeki elektrik panosuna, her klimaya ve chiller'a enerji analizörleri monte edilmiştir [30]. Veri merkezinde farklı konumlarda iç ortam sıcaklığını ve nemi, klimaların hava üfleme sıcaklıklarını, soğuk hava üfleme koridoru sıcaklıklarını ve dış ortam sıcaklığını ölçmek için pek çok IoT tabanlı sensör kullanılmıştır. Ayrıca, ARGE RACK'in ön ve arka kapılarına üçer adet sıcaklık sensörleri yerleştirilerek, kabine giren ve çıkan havanın sıcaklıkları ölçülmüştür.

4.4.1.2 Korelasyon Analizi

Korelasyon analizi, değişkenler arasındaki ilişkiyi değerlendirmek ve tahmin algoritmalarında kullanılacak bağımsız değişkenlerin belirlenmesinde sıklıkla kullanılır[84], [87]–[89], [136] Bu nedenle bu çalışmada da öncelikle Pearson korelasyon katsayılarını içeren korelasyon matrisi, ölçülen verilerden elde edilen 70 adet değişken için oluşturulmuştur. Başlangıçta oluşturulan geniş ölçekli bu korelasyon matrisiyle, güç tüketimi modelinde kullanılabilecek muhtemel bağımsız değişkenlerin belirlenmesi ve bu değişkenlerin ARGE Rack güç tüketimi üzerindeki etkilerinin analiz edilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca korelasyon analizi kullanılarak gerçekleştirilen bağımsız değişken seçiminin etkinliği ve doğruluğu araştırılmıştır. Geniş ölçekli oluşturulan korelasyon matrisinde ilk önce, ARGE Rack güç tüketimi ile aralarındaki korelasyon katsayısı “-0,2” ile “+0,2” arasında olan değişkenler matristen çıkarılarak daha küçük ölçekli yeni bir korelasyon matrisi oluşturulmuştur. Bu matris Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Ayrıca güç tüketimi tahmin modelinde kullanılabilecek muhtemel bağımsız değişkenler Tablo 4.2'de verilmiştir. *TotalPowerCons* bağımlı değişkeni, ARGE Rack'taki sunucuların toplam güç tüketimini temsil eder. VM'de farklı yerlere yerleştirilen klimaların hava üfleme sıcaklıkları *TempAC* ile gösterilmiştir. VM tavanındaki çeşitli konumlara monte edilmiş IoT tabanlı sensörlerle ölçülen iç ortam sıcaklıkları, *TempCeiling* ile, ARGE Rack ön kapısının üst kısmına yerleştirilen sensörün ölçtüğü sıcaklık ise *FrontTopTemp* ile gösterilir. Toplam giriş/çıkış ağ trafiği yükü *NetworkLoad* ile gösterilir. ARGE Rack'taki sunucuların ortalama CPU ve RAM kullanım oranları sırasıyla *CpuMeanUsageRatio* ve *RamMeanUsageRatio* ile temsil edilir. Ortalama dış ortam sıcaklığı *TempOutside* ile gösterilirken, ortalama oda nemi *HumidityRoom* ile temsil edilir. Zaman parametrelerinin gerçek ve tam etkilerini ortaya çıkarmak için, zaman parametreleri

sinüs ve kosinüs kısımlarına ayrılmıştır. Ay bilgisinin sinüs ve kosinüs kısımları (MonthX ve MonthY), denklem (4.1) ve (4.2)'de gösterildiği gibi hesaplanır.

$$MonthX = \sin\left(2 * \pi * \frac{MonthNumber}{12}\right) \quad (4.1)$$

$$MonthY = \cos\left(2 * \pi * \frac{MonthNumber}{12}\right) \quad (4.2)$$

MonthNumber, ölçülen verilerin ait olduğu Ayın yıl içindeki sırasını gösterir (ör. Mayıs ayı için 5 yazılır).

Tablo 4.2: IT güç tüketimi tahmini için kullanılabilecek muhtemel bağımsız değişkenler.

TempAC1	TempAC2	TempAC3	TempAC4
TempCeiling1	TempCeiling2	TempCeiling3	FrontTopTemp
NetworkLoad	RamMeanUsageRatio	CpuMeanUsageRatio	TempOutside
MonthX	HumidityMeanRoom		

4.4.1.3. ARGE Rack Güç Tüketimi için Kullanılan Tahmin Algoritması

Bu bölümde tahmin yöntemlerinin doğruluğunun karşılaştırılmasından ziyade, kullanılan bağımsız değişkenlerin tahmin sonuçlarının doğruluğu üzerindeki etkisine odaklanıldığı için, her bir bağımsız değişkenin ARGE RACK güç tüketimi tahmini üzerindeki etkisi, yalnızca doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Doğrusal olmayan regresyon yöntemi, bağımsız değişkenlere bağlı doğrusal olmayan bir fonksiyon aracılığı ile bağımlı değişkenin hesaplanması için kullanılır ve matematiksel olarak denklem (4.3)'teki gibi gösterilmektedir.

$$y_i = f(x_i, \theta) + \varepsilon \quad (4.3)$$

y_i bağımlı değişkenin yani tahmin edilen değişkenin " i " inci değeridir. Bağımsız değişkenin " i " inci değeri ise x_i ile gösterilmektedir. Katsayı vektörü θ ile temsil edilir ve rastgele hata ε ile gösterilir. x_i ile y_i arasındaki ilişki fonksiyonu f doğrusal

değildir. Bu çalışmada, ARGE Rack güç tüketimi tahmini için (4.4)'te gösterilen doğrusal olmayan güç tüketim modeli kullanılmıştır.

$$P_{ARGERack} = \sum_i [a + (b_1 * X_{1,i} + b_2 * X_{2,i} + \dots b_m * X_{m,i}) + (c_1 * X_{1,i} + c_2 * X_{2,i} + \dots + c_m * X_{m,i})^2] \quad (4.4)$$

Gözlem sayısı " i " ile temsil edilir. Denklem tahmin katsayıları " a ", " b " ve " c " ile gösterilir. Bağımsız değişken sayısı " m " ile gösterilir. Tahmin edilen bağımlı değişken $P_{ARGERack}$, ARGE Rack güç tüketimini temsil etmektedir. Tablo 4.2'de listelenen olası bağımsız değişkenler $X_1, X_2 \dots X_m$ ile gösterilmektedir. Tahmin sürecinde hem bağımlı hem de bağımsız değişkenler için geçmiş veriler (historical data) kullanılmaktadır. Geçmiş verilerin %80'i eğitim için, %20'si test için kullanılır. Bu nedenle, 01 Nisan - 23 Aralık 2020 tarihleri arasındaki geçmiş veriler eğitim için, 24 Aralık 2020 ile 28 Şubat 2021 tarihleri arasındaki veriler ise test için kullanılmıştır. MATLAB'daki istatistik ve makine öğrenimi bölümü altındaki " $nlinfit$ " fonksiyonu, hesaplamalar için kullanılmıştır.

4.4.1.4. Performans Değerlendirme Metrikleri

Tahmin sonuçlarının performansını değerlendirmek için literatürde çok farklı hata metrikleri olmasına rağmen, hangisinin tahmin sonucunu değerlendirmede en etkili olduğu konusunda bir fikir birliği yoktur. Her hata metriğinin artıları ve eksileri vardır[137]. Ayrıca, hata metriklerinin etkinliği ve kullanışlılığı, kullanım durumlarına ve veri kümesinin özelliklerine bağlı olarak değişir [138]. Örneğin, Ortalama Kare Hatası (MSE), Ortalama Mutlak Hata (MAE) ve Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) metrikleri ölçekleri veri ölçeğine bağımlı ölçümlerdir (scale-dependent). Yüzde hata ölçümlerinde ise; Yüzdesel Kök Ortalama Kare Hatası (RMSPE), Simetrik Ortalama Mutlak Yüzde Hatası (sMAPE) ve Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) metrikleri kullanılır. Ek olarak, Koehler ve Hyndman, verilerin ölçeğinden bağımsız olan ve farklı tahmin modelleri arasında etkili bir karşılaştırmaya izin veren ortalama mutlak ölçekli hata (MASE) isimli yeni bir hata metriği önermiştir[138]. Hata metriklerinin matematiksel hesaplamaları denklem (4.6) ile (4.12) arasında gösterilmiştir. Tahmin

hatası hesabı denklem (4.5)'te gösterilmiştir. Her t anı için ölçülen bağımlı değişken y_t ile, tahmin edilen bağımlı değişken değeri ise f_t ile gösterilir.

$$e_t = (y_t - f_t) \quad (4.5)$$

Tahmin periyodundaki toplam gözlem sayısı n ile, ortalama işlemi $mean(*)$ ile ve gözlem numarası i ile gösterilir.

$$MSE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (e_i^2) = mean(e_i^2) \quad (4.6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (e_i^2)} = \sqrt{mean(e_i^2)} \quad (4.7)$$

$$MAE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n |e_i| = mean(|e_i|) \quad (4.8)$$

$$MAPE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n 100 * \frac{|e_i|}{|y_i|} = mean\left(100 * \frac{|e_i|}{|y_i|}\right) \quad (4.9)$$

$$RMSPE = \sqrt{mean\left(100 * \frac{|e_i|}{|y_i|}\right)^2} \quad (4.10)$$

$$sMAPE = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n 200 * \frac{|e_i|}{|y_i + f_i|} = mean\left(200 * \frac{|e_i|}{|y_i + f_i|}\right) \quad (4.11)$$

$$MASE = mean\left(\left|\frac{e_i}{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=2}^n |y_i - y_{i-1}|}\right|\right) \quad (4.12)$$

Yorumlanması daha kolay olduğu için tahmin modellerinin doğruluğunu değerlendirmek için genellikle MAPE yaygın olarak kullanılmasına rağmen, RMSE hata metriği istatistiksel modellerdeki teorik önemi açısından sıkça kullanılan diğer bir metriktir[138]. Bu çalışmada, tahmin sonuçları öncelikli olarak MAPE kullanılarak karşılaştırılmış olsa da her tahmin sonucu için diğer metrikler de hesaplanmış ve tahmin sonuçlarındaki değişikliklerin ayrıntılı olarak analiz edilebilmesi için tüm metrikler birlikte verilmiştir.

4.4.1.5. Deneyler

Genel olarak bağımlı değişken ile daha yüksek korelasyon katsayılarına sahip değişkenler, tahmin sonucunu diğer değişkenlerden daha fazla etkilediği varsayımıyla bağımsız değişken olarak tahmin modelinde kullanılırlar. Bu bölümde anlatılan deneylerle birlikte, bu varsayımın doğruluğu araştırılmıştır. Literatürde sunucuların güç modellenmesi için en sık kullanılan değişkenlerden biri CPU kullanım oranı olduğu için, öncelikli olarak CPU'nın IT güç tüketimi tahmini üzerindeki etkisi incelenmekte, sonra diğer değişkenlerin etkisi analiz edilmektedir. Bu amaçla aşağıda detayı anlatılan üç farklı deney gerçekleştirilmiştir.

4.4.1.5.1. Deney 1: Bağımsız Değişkenlerin Bireysel Etkisi

Doğru ve güvenilir bir tahmin sonucu elde etmek için, doğru ve en uygun bağımsız değişkenlerin seçilmesi en az tahmin modelinin belirlenmesi kadar önemlidir. Bu sebeple bu deneyde her bir bağımsız değişkenin IT güç tüketimi tahmini üzerindeki bireysel etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla Tablo 4.2'de listelenen değişkenler, denklem (4.4)'de gösterilen tahmin modelinde tek tek kullanılarak her biri için ARGE Rack güç tüketimi tahmin edilmiştir. Her bir değişken kullanılarak elde edilen tahmin sonuçları Tablo 4.3'te yer almaktadır. Tahmin sonuçlarının grafikleri Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

4.4.1.5.2. Deney 2: Bağımsız Değişkenlerin Grup Etkileri

IT güç tüketimi tahmininde CPU, önemli bir değişken olduğu için birinci deney sonunda tahmin modelinde kullanılacak ilk bağımsız değişken olarak belirlenmiştir. Değişken kümesinde yer alan diğer değişkenler ise CPU kullanım oranı değişkeninin yanında ikinci bağımsız değişken olarak tek tek kullanılmış ve IT güç tüketimi tahmin işlemi her durum için tekrarlanmıştır. Böylelikle diğer değişkenlerin CPU ile birlikte kullanımının etkileri detaylıca analiz edilmiştir. CPU kullanım oranının dışında kalan 13 değişkenin sırayla ikinci bağımsız değişken olarak kullanıldığı 13 farklı tahmin işlemi için elde edilen hata oranları Tablo 4.4'te, tahmin sonuçlarının grafiksel

gösterimi ise Şekil 4.9’da yer almaktadır. Deney sonunda MonthX, tahmin modeli için kullanılacak ikinci bağımsız değişken olarak belirlenir.

4.4.1.5.3. Deney 3: Bağımsız Değişkenlerin En İyi Kombinasyonu

Bir önceki deneyde ikinci bağımsız değişkenin belirlenmesi için uygulanan sürecin aynısı diğer bağımsız değişkenleri belirlemek için kullanılmıştır. Öncelikle CpuMeanUsageRatio ve MonthX bağımsız değişkenlerine ek olarak, kalan değişkenlerin her biri tek tek üçüncü bağımsız değişken olarak kullanılmış ve tahmin işlemi tekrarlanmıştır. Üçüncü bağımsız değişken belirlendikten sonra benzer süreç tahmin sonucu hatası değişmeyene kadar tekrarlanmış ve diğer bağımsız değişkenler belirlenmiştir. Tahmin sonuçları grafiksel olarak Şekil 4.10’de, hata metrikleri ise Tablo 4.5’te gösterilmektedir.

4.4.2. Deney Sonuçları

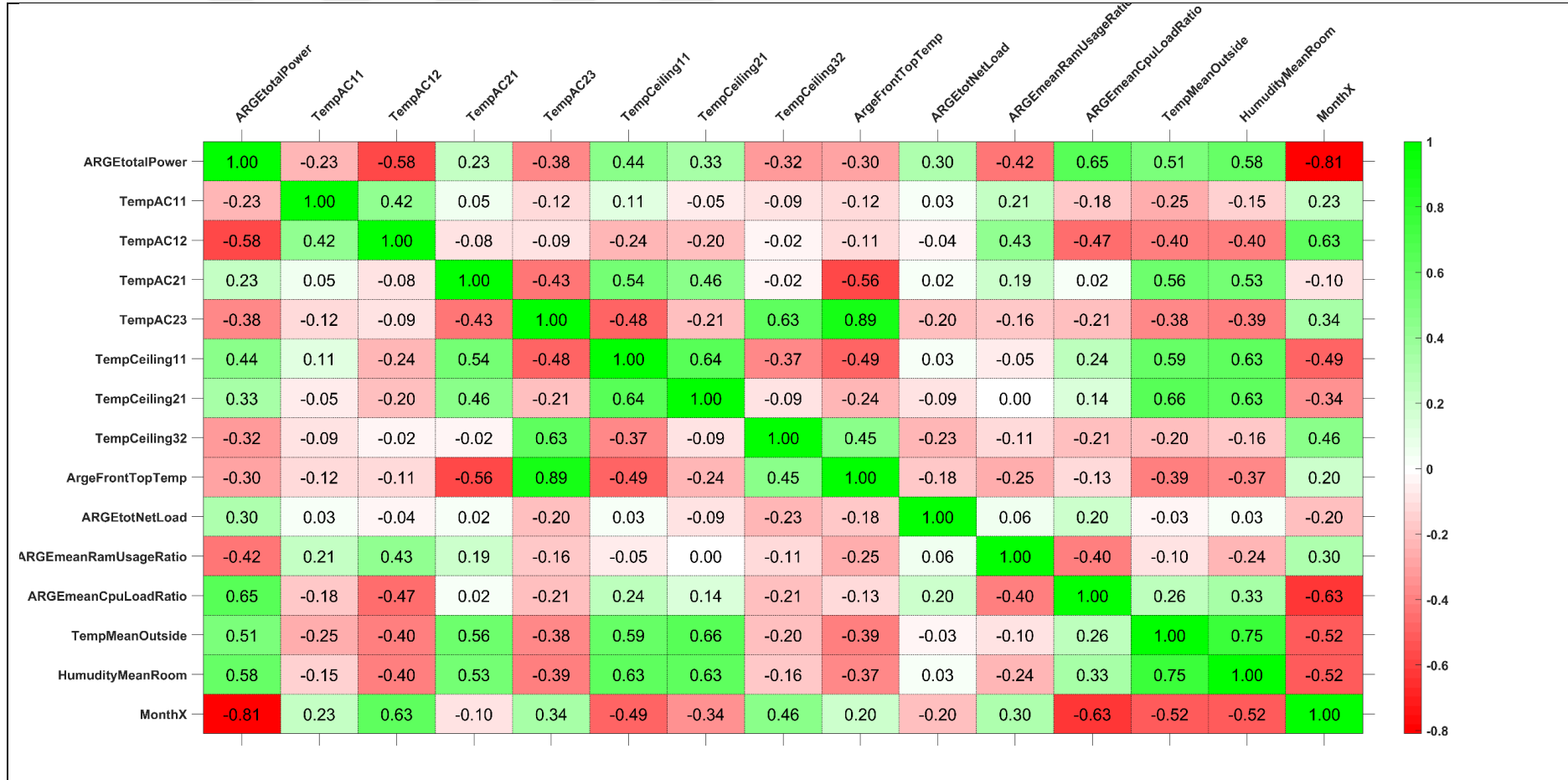
Bu bölümde, ilk önce Şekil 4.7’de gösterilen korelasyon matrisi genel olarak yorumlanmış, sonrasında deney 1, 2 ve 3’ün sonuçları sırasıyla analiz edilmiştir.

4.4.2.1.Korelasyon Analizi Sonuçları

-1 ile +1 arasında değişen korelasyon katsayısı, iki değişken arasındaki ilişkinin kuvvetini ölçmek için kullanılır [136]. Sıfıra yakın korelasyon katsayısı değişkenler arasında zayıf bir ilişki olduğunu gösterirken, + 1 veya -1’e yakın korelasyon katsayıları değişkenler arasında güçlü bir ilişki olduğunu gösterir. Bu sebeple değişkenler arasındaki korelasyonu analiz etmek amacıyla MATLAB ortamında Pearson korelasyon katsayıları hesaplanarak korelasyon matrisi oluşturulmuş ve Şekil 4.7’de gösterilmiştir. Korelasyon katsayısı 0’dan +1’e kadar olan pozitif değerler açıktan koyuya doğru değişen yeşil renk tonlarında, 0’dan -1’e kadar olan negatif değerler ise açıktan koyuya doğru değişen kırmızı renk tonlarında, “0” değeri ise beyaz renkle gösterilmiştir. Şekil 4.7’e göre, TotalPowerCons ile en çok ilişkili değişken MonthX’tir, bunu CpuMeanUsageRatio, TempAC2, HumidityRoom ve TempOutside takip eder. TotalPowerCons ile en az ilişkiye sahip değişkenler ise "-0.23" ve "0.23"

korelasyon değerine sahip TEMPAC1 ve TEMPAC3'tür. TotalPowerCons üzerinde önemli bir etkisi olması beklenen NetworkLoad değişkeni “0.3” korelasyon katsayısı değeri ile TotalPowerCons ile en düşük korelasyona sahip 3. değişken olmuştur.

Şekil 4.7’den CpuMeanUsageRatio değişkeni ile MonthX, TempAC2 ve RamMeanUsageRatio değişkenleri arasında oldukça önemli bir korelasyon olduğu açıktır. Ayrıca MonthX değişkeninin, TempAC1, TempAC3, FrontTopTemp ve NetworkLoad değişkenleri dışındaki bütün değişkenlerle arasında iyi bir ilişki olduğu görülmektedir. Bütün değişkenler arasında en yüksek korelasyon katsayısı, TempAC4 ile FrontTopTemp değişkenleri arasında “0.89” olarak ölçülmüştür. TempAC1 ve TempAC2 değişkenleri ile, TempCeiling1, TempCeiling2 ve TempCeiling3 değişkenleri arasında iyi bir korelasyon olmaması şaşırtıcı bir sonuçtur. Buna karşın TempAC3 ile TempCeiling1, TempCeiling2 değişkenleri arasında iyi bir korelasyon ilişkisi bulunmaktadır. NetworkLoad, diğer değişkenlerle en düşük korelasyona sahip değişken olup yalnızca TotalPowerCons ile “0.3” korelasyon katsayısı ile ilişkilidir.



Şekil 4.7: ARGE rack güç tüketimini etkileyen değişkenler için korelasyon matrisi.

4.4.2.2. Deney 1'in Sonuçları

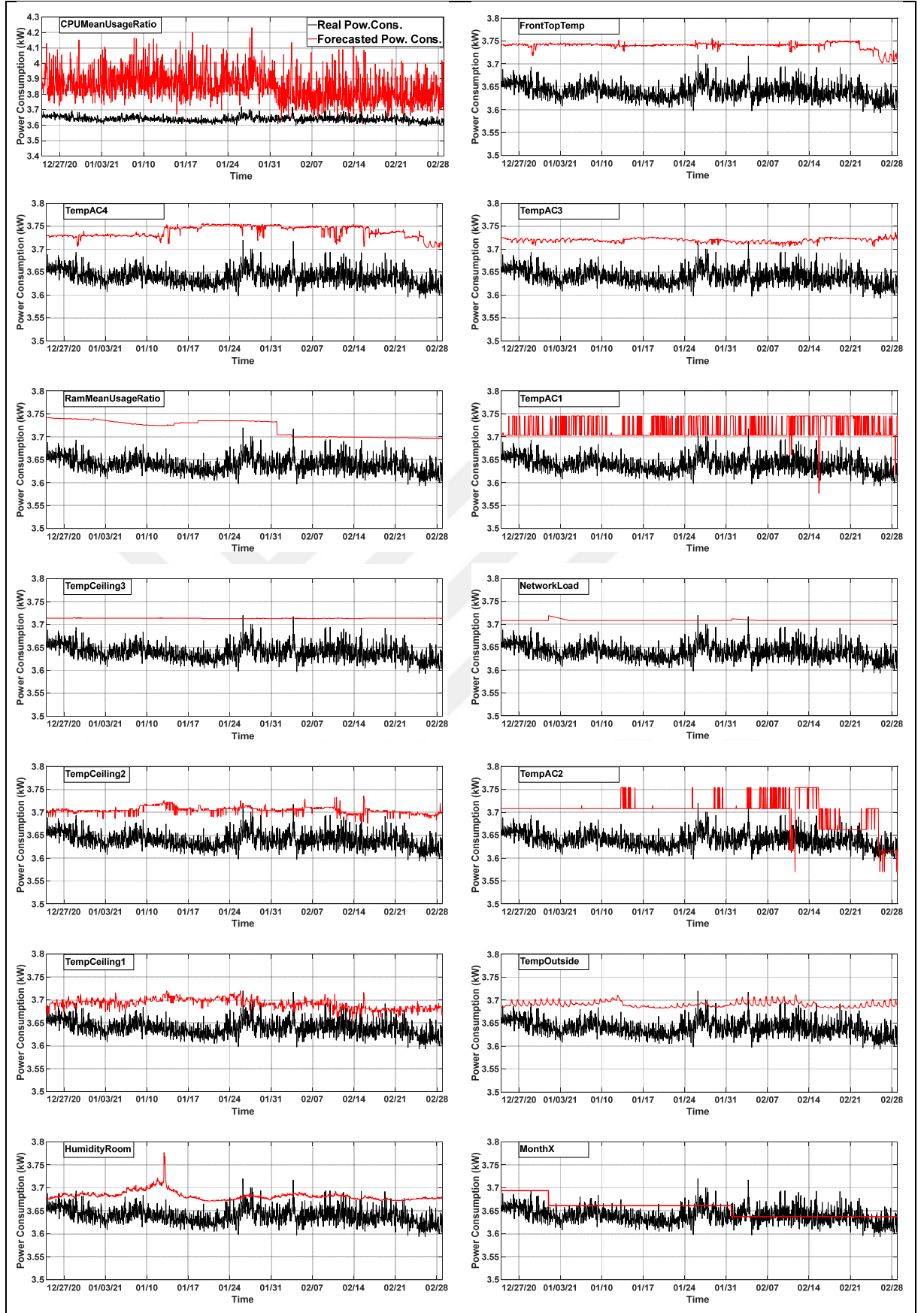
Tablo 1'de yer alan değişkenler ayrı ayrı bağımsız değişken olarak kullanılarak yapılan güç tüketimi tahminleri için elde edilen hata oranları Tablo 4.3'te gösterilmiştir. Tablodaki değişkenler MAPE değerine göre en yüksek değerden en aza doğru azalan sırada düzenlenmiştir. Tahmin sonuçlarının doğruluğunu karşılaştırmak için kullanılan diğer metriklere göre de sıralama yapıldığında, MSE ve RMSE dışındaki bütün hata metrikleri için aynı sıra elde edilmiştir. Sonuçlar MSE ve RMSE'ye göre karşılaştırıldığında, en iyi ve en kötü sonuçlar diğer metrikler ile aynı olsa da TempAC3 ve RamMeanUsageRatio, TempCeiling2 ve TempAC2 için elde edilen sonuçların sıralamasında farklılık bulunmaktadır. Tablo 4.3'teki sonuçlar incelendiğinde, CpuMeanUsageRatio ve TotalPowerCons arasında yüksek bir korelasyon olmasına rağmen, yalnızca CpuMeanUsageRatio kullanılarak gerçekleştirilen tahmin sonucunun en yüksek hata değerine sahip olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, TempAC4'ün TotalPowerCons ile arasındaki korelasyon katsayısı, TempAC1 ve TempAC3 değişkenleriyle olandan daha fazla olmasına rağmen, TempAC4 değişkeni kullanılarak yapılan tahmin işleminin hata oranı diğerlerinden daha yüksek çıkmaktadır.

ARGE Rack güç tüketimi tahmin sonuçları grafiksel olarak Şekil 4.8'de gösterilmiştir. Şekil 4.8'de yer alan bazı tahmin işlemlerinin MAPE değeri düşük olsa bile elde edilen sonucun veri karakteristiği sebebi ile tahmin işlemi için kullanılamayacağı görülmektedir. Örneğin, MonthX ile yapılan tahminin hata oranı çok düşüktür. Bunun nedeni, tahmin sonucunun, MonthX'in adım fonksiyonu karakteristiği biçiminde, aynı ayın tüm günleri için sabit bir değer olarak kalmasıdır. Elde edilen bu sonuç, tahmin işlemi için kullanılamaz. Çünkü doğru ve efektif bir tahmin işleminde her t anı için sabit bir değer yerine, zamanda değişen ve en uygun değer tahmin edilmesi gerekmektedir. Bu nedenle, yalnızca hata metriğine odaklanmak ve bir tahmin yaparken en düşük hata değerine sahip olanı seçmek çok doğru olmamaktadır. Elde edilen tahmin sonucunun veri karakteristiği ve dalga formu da önemlidir ve tahmin işleminde hata oranları kadar dikkate alınmalıdır. Ayrıca, bazı durumlarda bağımsız değişkenler arasındaki ilişki, bağımlı değişkenle olan ilişki kadar önemli olmakta ve tahmin sonucunu etkilemektedir. Korelasyon katsayısı düşük olmasına ve tek başına kullanıldığında tahmin sonucunun hata oranını artırmasına

rağmen, başka bir değişkenle birlikte kullanıldığında hata oranlarının azaltılmasında olumlu etkisi olan değişkenler olabilir. Bu tür durumları analiz etmek için ikinci deney gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.3: Her bir bağımsız değişken tek tek kullanılarak yapılan ARGE rack güç tüketimi tahmini hata değerleri.

Bağımsız Değişken İsimleri	MSE	RMSE (Watt)	MAE (Watt)	RMSPE (%)	sMAPE (%)	MAPE (%)	MASE
CpuMeanUsageRatio	53.601	231,51	210,95	5,79	5,60	5,79	13,82
FrontTopTemp	10.432	102,14	100,76	2,77	2,73	2,77	6,61
TempAC4	10.186	100,93	98,78	2,72	2,68	2,72	6,48
TempAC3	6.816	82,56	80,43	2,21	2,19	2,21	5,27
RamMeanUsageRatio	6.830	82,65	79,71	2,19	2,17	2,19	5,23
TempAC1	6.721	81,98	77,69	2,14	2,11	2,14	5,09
TempCeiling3	5.778	76,02	74,04	2,04	2,02	2,04	4,85
NetworkLoad	5.144	71,73	69,62	1,92	1,90	1,92	4,56
TempCeiling2	4.578	67,67	65,35	1,80	1,78	1,80	4,28
TempAC2	4.952	70,37	64,52	1,77	1,76	1,77	4,23
TempCeiling1	3.160	56,22	52,75	1,45	1,44	1,45	3,46
TempOutside	2.920	54,05	51,28	1,41	1,40	1,41	3,36
HumidityRoom	2.213	47,05	43,43	1,20	1,19	1,20	2,85
MonthX	704	26,55	21,87	0,60	0,60	0,60	1,43



Şekil 4.8: Her bir bağımsız değişken tek tek kullanılarak yapılan ARGE rack güç tüketimi tahmini sonucu.

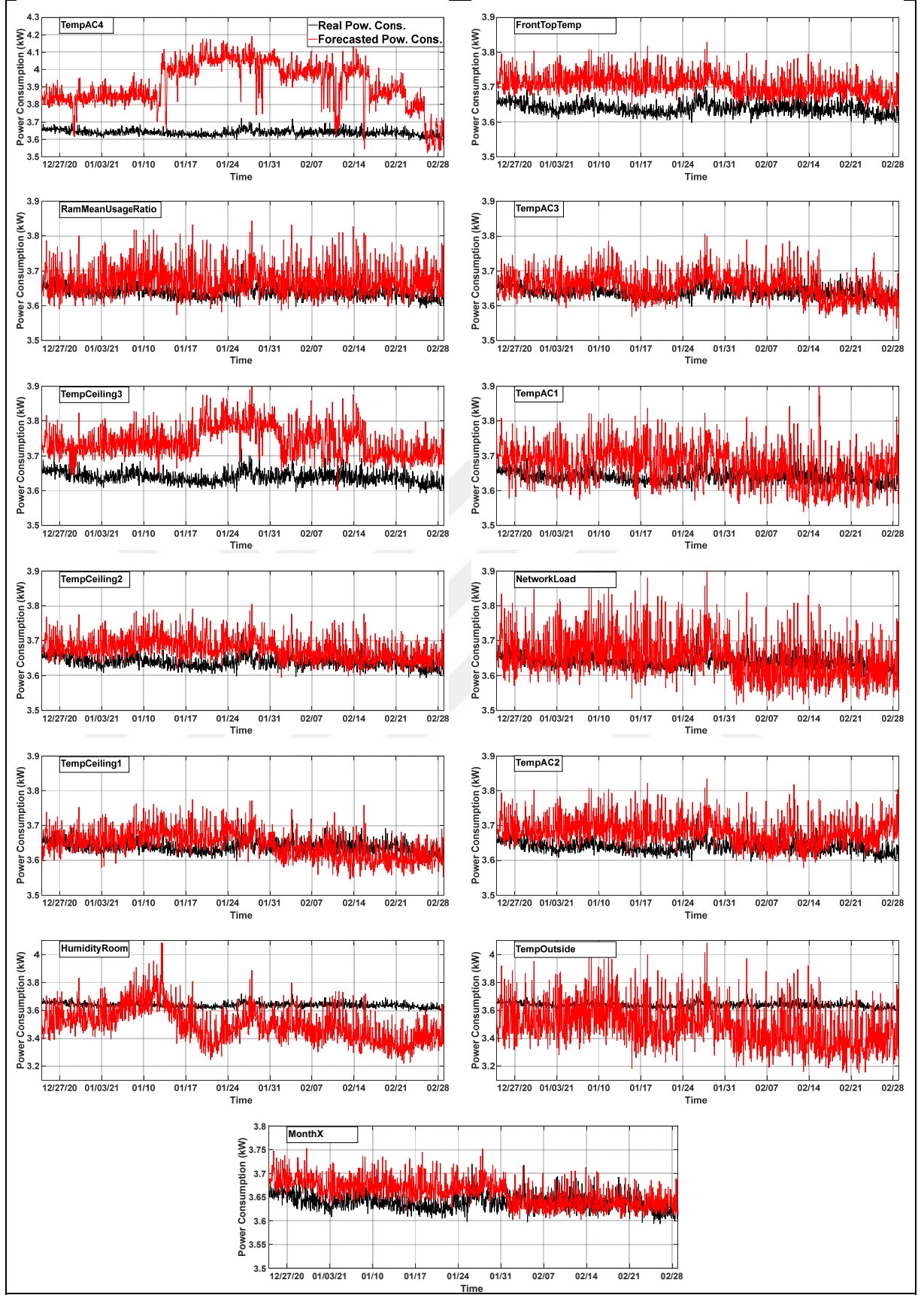
4.4.2.3. Deney 2'nin Sonuçları

CpuMeanUsageRatio tek başına bağımsız değişken olarak kullanıldığında kötü bir tahmin sonucu elde edilmesine neden olsa da, literatürde var olan tahmin modellerinde en çok kullanılan bağımsız değişkenlerden biri olması ve sunucuların güç tüketiminin büyük bir kısmından sorumlu olması nedeniyle, Deney 2'de ARGE Rack güç tüketimi tahmini için kullanılan ilk bağımsız değişken olarak belirlenmiştir. Sonrasında CpuMeanUsageRatio ile birlikte diğer değişkenler ikinci bağımsız değişken olarak tek tek kullanılarak tahmin işlemi tekrarlanmış ve buna bağlı olarak elde edilen tahmin sonuçları Şekil 4.9'da, hata oranları ise Tablo 4.4'te verilmiştir.

Tablo 4.4: Bağımsız değişken çiftleri kullanılarak yapılan ARGE rack güç tüketimi tahmin hata değerleri.

Bağımsız Değişken Çiftleri (X_1 & X_2)		MSE	RMSE (Watt)	MAE (Watt)	RMSPE (%)	sMAPE (%)	MAPE (%)	MASE
X_1	X_2							
CpuMeanUsageRatio	TempAC4	90.192	300,32	275.63	7,58	7,25	7,58	18,07
	TempOutside	45.200	212,6	183,83	5,05	5,21	5,05	12,05
	HumidityRoom	33.197	182,2	157,49	4,33	4,44	4,33	10,32
	TempCeiling3	11.425	106,89	97,64	2,68	2,64	2,68	6,4
	FrontTopTemp	4.348	65,94	57,2	1,57	1,62	1,70	3,75
	TempAC1	4.552	67,47	54,86	1,51	1,5	1,51	3,6
	NetworkLoad	4.081	63,89	49,46	1,36	1,35	1,36	3,24
	TempAC2	3.423	58,51	48,61	1,34	1,32	1,34	3,19
	RamMean-UsageRatio	3.270	57,19	42,86	1,18	1,17	1,18	2,81
	TempCeiling2	2.539	50,4	40,13	1,1	1,09	1,1	2,63
	TempCeiling1	1.930	43,93	34,48	0,95	0,94	0,95	2,26
	TempAC3	1.873	43,28	33,61	0,92	0,92	0,92	2,2
	MonthX	1.286	35,87	28,9	0,79	0,79	0,79	1,89

Tahmin hata oranları MAPE değerine azalan düzende sıralanarak tabloda yer almıştır. Bu sıra, FrontTopTemp- CpuMeanUsageRatio ve TempAC1- CpuMeanUsageRatio bağımsız değişken çiftleri dışındaki bütün değişkenler için, diğer hata metriklerine göre de sıra aynıdır.



Şekil 4.9: Bağımsız değişken çiftleri kullanılarak yapılan ARGE rack güç tüketimi tahmini sonucu.

MSE ve RMSE'nin değerine göre, FrontTopTemp- CpuMeanUsageRatio bağımsız değişken çifti kullanılarak yapılan tahmin hatası, TempAC1-CpuMeanUsageRatio kullanılarak yapılan tahminden daha küçüktür. Tablo 4.4'e göre en yüksek tahmin doğruluğu CpuMeanUsageRatio ve MonthX bağımsız değişken çiftlerinin kullanılmasıyla elde edilirken, en düşük tahmin doğruluğu TempAC4 ve CpuMeanUsageRatio kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca, TempAC4 ve TotalPowerCons arasındaki korelasyon katsayısının değeri, TempAC3 ile TotalPowerCons arasındaki değerin neredeyse iki katıdır, ancak TempAC4 ile elde edilen tahmin sonucu, TempAC3'ünkinden neredeyse sekiz kat daha kötüdür. Bununla birlikte, TempAC3'ün TotalPowerCons ile en düşük korelasyon katsayısına sahip değişkenlerden biri olmasına ve CpuMeanUsageRatio ile aralarında korelasyon olmamasına rağmen, CpuMeanUsageRatio ile kullanıldığında en iyi ikinci tahmin sonucu elde edilmiştir. Ayrıca TotalPowerCons ile yüksek korelasyona sahip olan TempOutside ve HumidityRoom değişkenlerinin bağımsız değişken olarak kullanılması sonucu, en kötü ikinci ve üçüncü tahmin sonuçları elde edilmiştir. İkinci deney sonunda MonthX, ARGE Rack'in güç tahmin modelinde kullanılan ikinci bağımsız değişken olarak belirlenmiştir.

4.4.2.4. Deney 3'ün Sonuçları

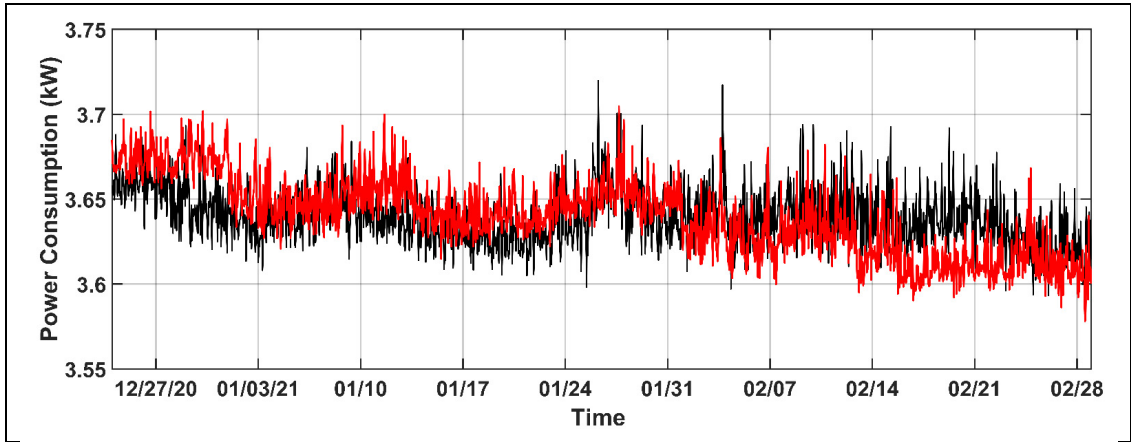
Bu deneyde, en iyi tahmin sonucunu veren bağımsız değişken kombinasyonunu bulmak için deney 2'dekine benzer bir yaklaşım izlenmiştir. CpuMeanUsageRatio ve MonthX değişkenlerine ek olarak üçüncü bağımsız değişkeni belirlemek için diğer değişkenler tek tek kullanılmış ve sonuçlar analiz edilmiştir. Deneyin sonunda, NetworkLoad ve TempAC3, tek başına kullanıldığında tahmin sonuçları üzerinde sınırlı bir etkiye sahip olmalarına ve TotalPowerCons ile aralarında düşük korelasyon olmasına rağmen, 3. ve 4. bağımsız değişken olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, TotalPowerCons ile oldukça yüksek bir korelasyon katsayısına sahip olan ve CpuMeanUsageRatio ile birlikte kullanıldığında nispeten iyi bir tahmin sonucu sağlayan RamMeanUsageRatio değişkeninin, bu deneyle birlikte tahmin modelinde kullanılamayacağına karar verilmiştir. Çünkü RamMeanUsageRatio 3., 4. veya 5. bağımsız değişken olarak kullanıldığında, her zaman hata oranlarında bir artışa sebep olmuştur. Ayrıca, ikinci deneyde TempOutside değişkeninin tahmin hata oranını artırmasına rağmen, bu deneyde diğer bağımsız değişkenlerle birlikte kullanıldığında

tahmin hatasını azalttığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, en iyi bağımsız değişken kombinasyonu ve bu değişkenler kullanılarak gerçekleştirilen tahmin hata oranları Tablo 4.5'te verilmiştir. Bu değişkenler kullanılarak yapılan tahmin işleminin grafiksel gösterimi Şekil 4.10'da yer almaktadır.

Tablo 4.5: En uygun bağımsız değişken seti kullanılarak gerçekleştirilen ARGE rack güç tüketimi tahmin hata değerleri.

Bağımsız Değişken Kombinasyonu	MSE	RMSE (Watt)	MAE (Watt)	RMSPE (%)	sMAPE (%)	MAPE (%)	MASE
CpuMeanUsageRatio, MonthX, NetworkLoad , TempAC3 , TempOutside	596	24,42	19,51	0,53	0,53	0,53	1,27

Bağımsız değişken olarak yalnızca CpuMeanUsageRatio kullanılarak yapılan tahmin işlemi MAPE değeriyle, en iyi bağımsız değişken kombinasyonu ile yapılan tahmin sonucu MAPE değeri karşılaştırıldığında, hata oranının %5,79'dan %0,53'e düşerek yaklaşık 10 kat iyileştiği görülmektedir. Bu iyileşme oranı diğer hata metrikleri olan MAE, RMSPE, sMAPE ve MASE ile karşılaştırıldığında neredeyse aynıdır. RMSE'ye göre yapılan karşılaştırmada ise hata oranının 9 kat, MSE'ye göre yapılan karşılaştırmada ise hata oranının 90 kat iyileştiği gözlenmektedir.



Şekil 4.10: En uygun bağımsız değişken seti kullanılarak gerçekleştirilen ARGE rack güç tüketimi tahmin sonucu.

4.5. Sonuç

Bağımsız değişken (feature/predictor) seçim süreci, yük tahmininde kritik bir rol oynamaktadır. Ayrıca, gerçek çalışma koşulları altında ölçülen verilerle deneyler yapmak, tahmin sonuçlarının doğruluğu ve güvenilirliği açısından oldukça önemlidir. Özellikle veri merkezlerindeki sunucu güç tüketimi gibi, iş yükü karakteristiğinin tahmin üzerindeki etkisinin oldukça fazla olduğu tahmin süreçlerinde ölçüm verilerinin karakteristiği oldukça önem arz etmektedir.

Bu bölümde, tezde kullanılan verilerin elde edilmesi ve veri işleme süreci anlatılmış, benimsenen hibrit bağımsız değişken seçim metodolojisi anlatılmış ve ARGE Rack isimli bir IT kabin kullanılarak güç tüketimi tahmini için örnek bir çalışma yapılmıştır.

Bağımsız değişkenlerin ARGE Rack'in güç tüketimi üzerindeki etkileri, IoT tabanlı sensörlerden ve rutin iş yükleri altında çalışan ARGE Rack'tan ölçülen gerçek veriler kullanılarak üç farklı deneyle araştırılmıştır. Bağımsız değişkenlerin ARGE Rack'ın güç tüketimi tahmini üzerindeki bireysel etkisini araştırmak için, olası bağımsız değişkenler kümesinden her defasında bir değişkenin güç tüketimi modelinde kullanılmasıyla güç tüketimi tahmin işlemi gerçekleştirilmiştir.

CpuMeanUsageRatio birinci bağımsız değişken olarak belirlenmiştir. Sonrasında diğer değişkenler CpuMeanUsageRatio' a ek olarak ikinci bağımsız değişken olarak tek tek kullanılmış ve tahmin işlemi tekrarlanmıştır. Benzer yaklaşım benimsenerek en iyi güç tüketimi tahmini yapmak için gerekli olan bağımsız değişkenleri belirlemek için kullanılmış ve hata oranının artık değişmediği durum için bağımsız değişkenler belirlenmiştir. Yapılan deney ve analizlere göre, aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- Korelasyon analizinin bir sonucu olarak CpuMeanUsageRatio değişkeni, TotalPowerCons ile oldukça yüksek bir korelasyona sahip olmasına rağmen, tahmin modelinde tek başına kullanıldığında en yüksek tahmin hatasının oluşmasına sebep olmuştur. Benzer şekilde TempAC4 değişkeninin TotalPowerCons ile arasındaki korelasyon, TempAC1 ve TempAC3 değişkenlerinin sahip olduğundan daha yüksek olmasına rağmen, TempAC4 ile yapılan tahmin işlemi daha yüksek tahmin hatası oranına sahiptir. Bu sonuçlar,

bağımlı değişken ile arasında yüksek korelasyon katsayısı bulunan bağımsız değişkenlerin tahmin modelinde kullanılmasının tahmin sonucunu iyileştireceği yaklaşımının genelleştirilemeyeceğini göstermektedir. Veya tam tersi şeklinde bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken ile arasında düşük korelasyon olması, tahmin sonucunu iyi yönde etkilemeyeceği manasına gelmez.

- Deney 1'den elde edilen tahmin hatalarına göre, CpuMeanUsageRatio'nun tek bağımsız değişken olarak kullanılarak elde edilen tahmin sonucu, diğer tüm değişkenler arasında en kötü tahmin sonucunu verirken, en iyi tahmin sonucu MonthX kullanılarak elde edilmiştir. Ancak, MonthX kullanılarak gerçekleştirilen tahmin sonucunun veri karakteristiği ve dalga formu incelendiğinde tahmin işlemi için uygun olmadığı görülmektedir. Çünkü tahmin edilen değer, zamana göre değişmemekte ve bütün bir ay boyunca sabit değer almaktadır. Bu nedenle, yalnızca hata metriklerinin sonucu incelenerek en düşük hata oranına sahip değişkeni tahmin modeli için bağımsız değişken olarak belirlemek, doğru bir yaklaşım değildir. Tahmin hata oranı ile birlikte, tahmin edilen verinin karakteristiği ve dalga formu da dikkate alınmalıdır.
- Deney 2, bağımlı değişken ile düşük korelasyon katsayısına sahip bazı bağımsız değişkenlerin, tek başlarına kullanıldıklarında düşük tahmin doğruluğuna sebep olmalarına rağmen, diğer bağımsız değişkenlerle kullanıldıklarında tahmin doğruluğunu artırabileceğini göstermektedir. Örneğin, TempAC3 değişkeni, TotalPowerCons ile en düşük korelasyon katsayısına sahip değişkenlerden biri olmasına rağmen, CpuMeanUsageRatio ile birlikte kullanıldığında en iyi ikinci tahmin sonucu elde edilmektedir. Ayrıca, 2. Deneyde CpuMeanUsageRatio ile birlikte kullanıldığında en kötü ikinci tahmin sonucunun elde edilmesine sebep olan TempOutside değişkeni, CpuMeanUsageRatio, Monthx, NetworkLoad ve TempAC3 değişkenleri ile birlikte kullanıldığında tahmin hata değerinin azalmasına neden olmuştur.
- Literatürde pek çok güç tüketim modelinin CPU kullanım oranı tabanlı olmasına ve güç tüketim tahminlerinin bu modellerle yapılmaktadır. Ayrıca bir sunucu için en önemli güç tüketim elemanlarından biri CPU'dur. Buna rağmen IT güç tüketimi tahmini için bu bölümde yapılan deneyler, CpuMeanUsageRatio ile birlikte çeşitli değişkenlerin de dahil edildiği bir tahmin işleminin daha doğru ve güvenilir sonuçlar verdiğini göstermiştir. Öyle ki çalışma sonucunda elde edilen

en uygun bağımsız değişkenler kümesi ile yapılan tahmin sonucu, CpuMeanUsageRatio ile yapılan tahmin sonucunu 10 kat iyileştirmiştir.

Sonuç olarak bu çalışma, bir tahmin sürecinde sadece tek bir perspektif veya bir yöntem kullanarak bağımsız değişkenleri belirlememek gerektiğini göstermektedir. Bunun yerine karşılaştırmalı bir analiz yapılarak, bağımsız değişkenlerin tahmin sonuçları üzerindeki etkilerinin araştırılarak, tahmin edilen değişkenin karakteristiğinin ve dalga formunun incelenerek bağımsız değişkenlerin seçilmesini önermektedir. Bu yaklaşım, daha doğru ve güvenilir tahmin sonuçları elde edilmesini sağlamasına ek olarak, gereksiz bağımsız değişken kullanılmasını da önlemektedir. Böylece hem gereğinden fazla değişkenin ölçülmesi, değerlendirilmesi ve analizi için gerekli olan efor ve maliyet azalır, hem de daha az değişkenle tahmin işlemi gerçekleştirildiği için işlem süresi azaltılmış olur. Bu bölümde düzenlenen veriler güç tüketim modellerinin oluşturulmasında ve tahmin modellerinin geliştirilmesinde kullanılmıştır.

5. TAHMİN MODÜLÜ

Bu bölümde tahmin işlemi için kullanılan doğrusal olmayan regresyon ve YSA modelleri oluşturulmuş, ardından bu modellerde kullanılan bağımsız değişkenlerin belirlenme süreci anlatılmıştır. IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi için belirlenen doğrusal olmayan regresyon ve YSA modelleri, 01 Ocak 2022 tarihi için kullanılarak güç tüketimi tahmini yapılmıştır.

5.1. Veri Merkezi Güç Tüketimi Tahmin Modellerinin Oluşturulması

Tez kapsamında geliştirilen enerji yönetim simülatörü için, IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketiminin tahmin edilmesi ve bu değerlerin optimizasyon modülünde kullanılması gerekmektedir. Bölüm 5.1.1’de güç tüketimleri için doğrusal olmayan regresyon yöntemiyle model geliştirme süreci anlatılmakta, Bölüm 5.1.2’de ise yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak geliştirilen model açıklanmaktadır.

5.1.1. Doğrusal Olmayan Regresyon Yöntemi

Doğrusal olmayan regresyon yönteminin detayları tezin birinci bölümünde anlatılmaktadır. Bu bölümde ise IT cihazları, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi için ayrı ayrı güç tüketim modelleri oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin genel matematiksel gösterimi P_{XX}^{est} , denklem 5.1’de yer almaktadır. Bu denklem tahmin edilen IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi olan P_{IT}^{est} , P_{AC}^{est} ve P_{Total}^{est} değerlerinin belirlenmesi için kullanılmıştır.

$$P_{XX}^{est} = \sum_i [a + (b_1 * X_{1,i} + b_2 * X_{2,i} + \dots b_m * X_{m,i}) + (c_1 * X_{1,i} + c_2 * X_{2,i} + \dots + c_m * X_{m,i})^2] \quad (5.1)$$

Her güç tüketimi modeli için ayrı ayrı bağımsız değişken belirleme süreci gerçekleştirilmiş olup, modelde kullanılan toplam bağımsız değişken sayısı m ile temsil edilirken, bağımsız değişkenler $X_{1,i}, X_{2,i}, \dots X_{m,i}$ ile gösterilmektedir. Gözlem

sayısı i ile, tahmin edilen denklem katsayıları ise a, b ve c ile gösterilmektedir. Denklem 5.1’de yer alan güç tüketim modeli ve doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tahmin işlemi *MATLAB - İstatistik ve Makine Öğrenmesi* kütüphanesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Geçmiş verilerin %70’i eğitim verisi olarak, %30’u ise test verisi olarak kullanılmıştır. Denklem 5.1’de yer alan a, b ve c katsayıları “*nlinfit*” fonksiyonu kullanılarak tahmin edilmektedir. Bu fonksiyon başlangıç koşulları ile yinelemeli en küçük kareler tahmini (iterative least square estimation) yöntemini ve Levenberg-Marquardt doğrusal olmayan en küçük kareler algoritmasını (Levenberg-Marquardt nonlinear least-squares algorithm) kullanır. Tahmin edilen katsayı vektörü ve test verisindeki bağımsız değişkenler kullanılarak, “*nlpredci*” fonksiyonuyla güç tüketimi tahmin edilmektedir. Sonrasında ise tahmin edilen güç tüketimi ile test verisinde yer alan gerçek güç tüketimi değerleri farklı hata metrikleri kullanılarak birbiri ile karşılaştırılmaktadır.

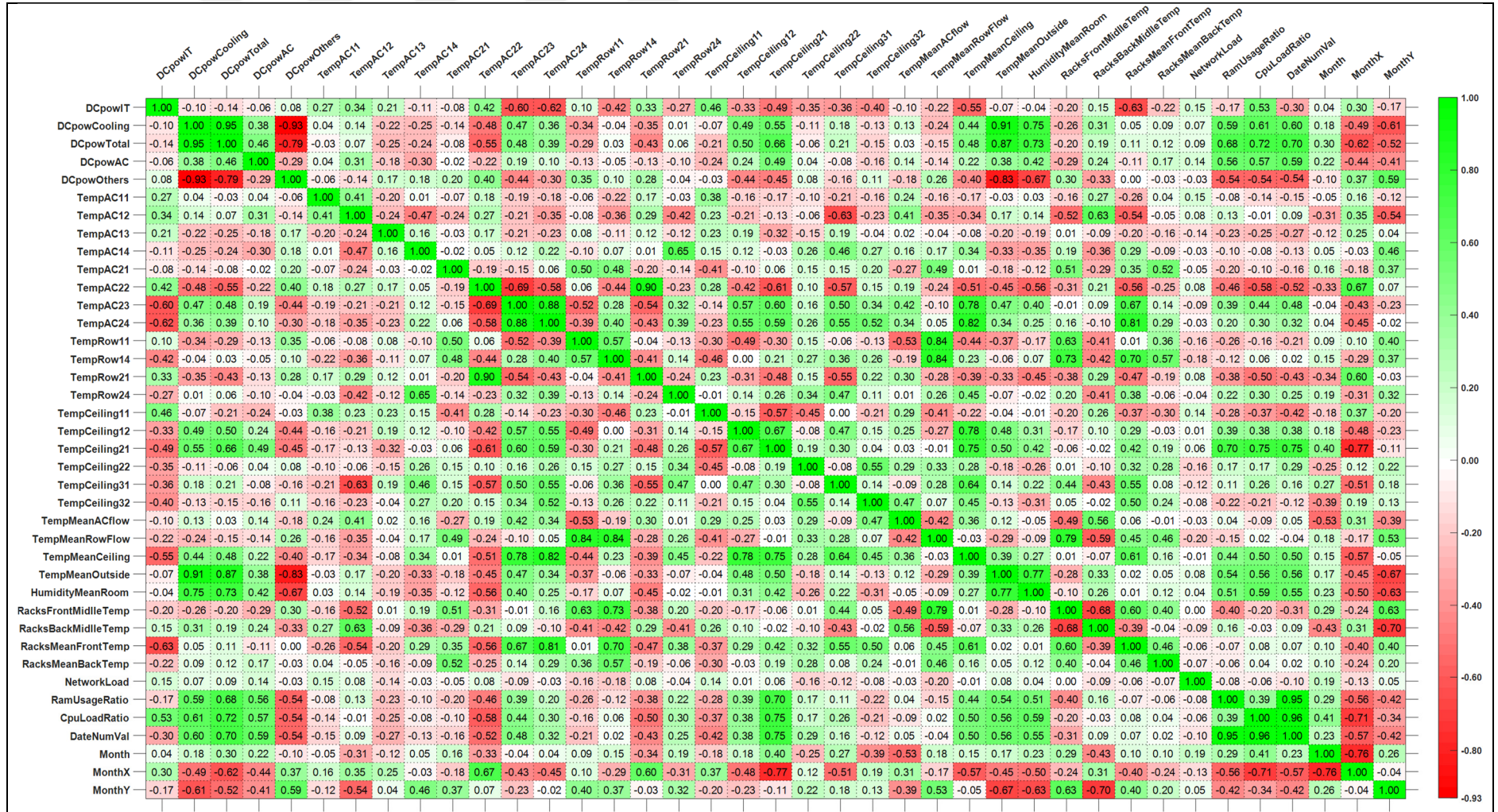
5.1.2. Yapay Sinir Ağları Modeli

Tez kapsamında kullanılan ikinci tahmin algoritması, tezin birinci bölümünde detaylıca anlatılan YSA modelidir IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi için MATLAB-Yapay Sinir Ağları kütüphanesi ile ileri beslemeli YSA modeli ve denetimli öğrenme algoritması kullanılarak tahmin algoritması oluşturulmuştur. Öncelikle giriş, gizli ve çıkış katmanlarından oluşan ağ (network) oluşturulur. Her bir katmandaki nöron sayısı belirlenir. Giriş katmanındaki nöron sayısı bağımsız değişken sayısı kadardır. Çıkış katmanındaki nöron sayısı ise tahmin edilmek istenen değişken sayısı kadardır. Gizli katmandaki nöron sayısı ise sayısı değiştirilerek tahmin işlemine olan etkisine göre deneme yanılma yöntemiyle belirlenebilir. Daha sonra en hızlı geri yayılım algoritmalarından biri olan “*trainlm*” eğitim fonksiyonu ile sapma ve ağırlıkları güncellemek için Levenberg-Marquardt optimizasyon tekniği kullanılacak şekilde “*fitnet*” fonksiyonu yardımı ile “ağ” oluşturulur. Oluşturulan bu “ağ” ile, eğitim verisi için ayrılmış olan bağımsız ve bağımlı değişken vektörleri “*train*” fonksiyonuna girdi olarak verilir ve tahmin modeli bunlar kullanılarak oluşturulur. Oluşturulan ağ ve test için ayrılmış olan bağımsız değişkenler kullanılarak, bağımlı değişken olan güç tüketimi tahmin edilir. Tahmin sonucu ile gerçek değerler, çeşitli hata metrikleri kullanılarak karşılaştırılır.

5.2.Tahmin Modelinde Kullanılan Bağımsız Değişkenlerin Belirlenmesi

Tahmin algoritmasında kullanılan bağımsız değişkenlerin seçimi Bölüm 4.3'te anlatılan yaklaşım kullanılarak yapılmıştır. Farklı bağımsız değişkenler kullanılarak gerçekleştirilen tahmin işlemleri, yalnızca doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, tahmin sonuçları 4 farklı hata metriği kullanılarak karşılaştırılmıştır. Ancak yorumlama kolaylığı açısından MAPE değeri dikkate alınarak tahmin işlemleri analiz edilmiştir. Öncelikle Bölüm 4.2'de anlatılan ölçülen verilerin işlenmesi süreci sonucunda elde edilen muhtemel bağımsız ve bağımlı değişkenler kullanılarak korelasyon matrisi oluşturulmuş ve değişkenler arasındaki ilişki incelenmiştir. Elde edilen korelasyon matrisi Şekil 5.1'de gösterilmiştir.

IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazların Toplam Güç Tüketimleri *DCpowIT*, *DCpowCooling* ve *DCpowOthers* ile gösterilmiştir. Bu üç güç tüketim verisinin toplamı olan veri merkezi toplam güç tüketimi ise *DCpowTotal* ile temsil edilmiştir. Ayrıca klimaların toplam güç tüketimi ise *DCpowAC* ile temsil edilmiş olup bu güç tüketim değeri *DCpowCooling*'in içerisine dahil edilmiştir. VM'de farklı konumlara yerleştirilmiş klimaların hava üfleme sıcaklıkları *TempAC* ile, soğuk havanın üflendiği koridorlara yerleştirilen sensörlerin ölçtüğü sıcaklık değerleri *TempRow* ile gösterilmektedir. VM tavanına yerleştirilmiş sıcaklık sensörlerinin değerleri *TemCeiling* değişkenleri ile gösterilmektedir. Klimaların ortalama üfleme sıcaklık değeri *TempMeanACflow* ile, hava koridorlarında ölçülen sıcaklık değerlerinin ortalaması *TempMeanRowFlow* ile gösterilmektedir. VM ortalama iç ortam sıcaklığı *TemMeanCeiling* ile, dış ortam ortalama sıcaklık değeri *TempMeanOutside* ile, iç ortam ortalama nem değeri *HumidityMeanRoom* ile temsil edilmektedir. IT kabinlerinin ön kapılarında orta bölmeye yerleştirilmiş sıcaklık sensörlerinin ortalama değeri *RacksFrontMiddleTemp* ile, arka kapılarının orta bölmesine yerleştirilmiş ortalama sıcaklık değeri ise *RacksBackMiddleTemp* ile gösterilmektedir. IT kabinlerinin ön kapılarına yerleştirilmiş bütün sıcaklık sensörlerin ortalama değeri *RacksMeanFrontTemp*, arka kapılarına yerleştirilmiş bütün sıcaklık sensörlerin ortalama değeri *RacksMeanBackTemp* ile temsil edilmektedir. IT kabinleri giriş ve çıkış ağ trafiği toplamı *NetworkLoad* ile, bütün sunuculardaki ortalama RAM kullanım oranı *RamUsageRatio* ile, bütün sunuculardaki CPU kullanım oranı ise *CPUloadRatio* ile gösterilmiştir.



DateNumVal değişkeni ise zaman verisinin (örn: 01 Ocak 2021) saat ve gün değerinin seri tarih numaralarına dönüştürülmüş halidir. Seri tarih numarası proleptik ISO takviminde 0 Ocak 0000 tarihinden itibaren başlayan günlerin sayısı şeklindedir (örn: 01/01/2021 tarihinin karşılığı 738157 sayısıdır). Zaman verisindeki ay sırası *Month* ile, bu değer sinüs ve kosinüs kısımlarına ayrılmış bölümleri ise *MonthX* ve *MonthY* ile temsil edilmektedir.

5.2.1. IT Güç Tüketimi İçin Bağımsız Değişkenlerin Belirlenmesi

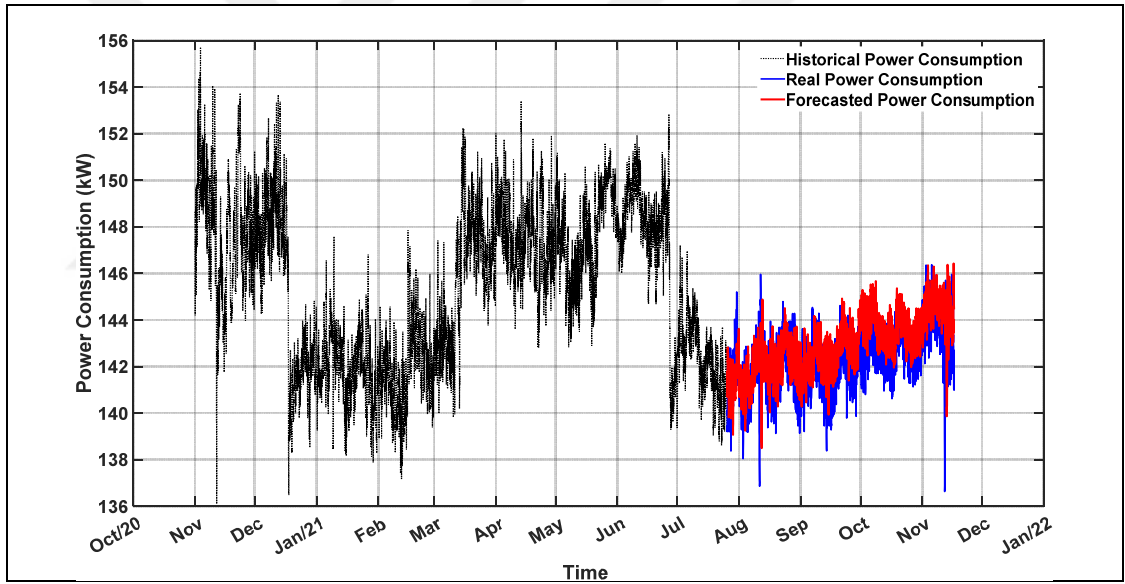
IT güç tüketimi tahminini etkileyen bağımsız değişkenler belirlenirken, bölüm 4'te benimsenen yaklaşım kullanılmıştır. Öncelikle korelasyon matrisine göre *DCpowIT* değişkeni ile en yüksek korelasyona sahip değişkenlerin tahmin sonucuna olan etkisi incelenmiş, ardından korelasyon katsayısı düşük olsa bile geri kalan bütün değişkenler tek tek kullanılarak tahmin sonuçları analiz edilmiştir. Bu süreç örnek bir çalışma üzerinden Bölüm 4'te anlatıldığı için bu bölümde detaylıca anlatılmamış olup, yalnızca yapılan işlemlerin sonuçları verilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda birinci bağımsız değişken olarak *CpuLoadRatio* belirlenmiştir. Ardından bütün değişkenler ikinci bağımsız değişken olarak kullanılmış ve deneyler sonucunda *DateNumVal* değişkeni ikinci bağımsız değişken olarak belirlenmiştir. Bu işlem tahmin sonucu artık değişmeyecek düzeyde olana kadar tekrarlanmış ve en iyi tahmin sonucunu veren bağımsız değişken seti Tablo 5.1'deki gibi belirlenmiştir. *DCpowerIT_Lagged* değişkeni, *DCpowIT* değişkeninin 24 saat önceki değerleri kullanılarak türetilmiştir. Yani *DCpowerIT_Lagged(t)* değeri aslında *DCpowIT(t+24)* değerine eşittir.

Tablo 5.1: IT güç tüketimi tahmini için belirlenen bağımsız değişkenler.

CpuLoadRatio	DateNumVal	TempMeanCeiling
RacksMeanFrontTemp	TempAC24	DCpowerIT_Lagged

Kullanılan değişkenlerin *DCpowIT* ile aralarındaki korelasyon katsayıları incelendiğinde genel olarak yüksek korelasyonlara sahip oldukları söylenebilmektedir. Ancak korelasyon katsayısı yüksek olan diğer pek çok değişkenin tahmin için kullanılamayacağı da tespit edilmiştir. Örneğin klima hava üfleme sıcaklıkları arasında TempAC23'ün korelasyon değeri de TempAC24 kadar yüksek olmasına rağmen,

bağımsız değişken olarak kullanıldığında tahmin sonucunu kötüleştirmektedir. Veya *DateNumVal*'ın korelasyon katsayısı 0,30 iken bağımsız değişken olarak kullanılmasına rağmen, bu değerden daha yüksek korelasyona sahip *TempRow14*, *TempCeiling11*, *TempCeiling21*, *TempAC22* gibi değişkenler bağımsız değişken olarak kullanılamamaktadır. Dolayısıyla korelasyon matrisi her ne kadar bağımsız değişken seçimi için ön bilgi edinilmesini sağlayıp, genel olarak muhtemel bağımsız değişkenler hakkında fikir edinilmesini sağlasa da yalnızca korelasyon değerlerine göre bağımsız değişkenlerin seçilmesi doğru bir yaklaşım değildir. Kullanılan bağımsız değişkenlerin tahmin sonucuna olan etkisi mutlaka incelenmeli ve deneme yanılma yöntemi ile bütün bağımsız değişkenler denenerek en uygun değişkenler seçilmelidir. Tablo 5.1'deki değişkenler kullanılarak elde edilen tahmin işlemi sonucu Şekil 5.2'de, tahmin sonucu hata değerleri ise Tablo 5.2'de gösterilmektedir.



Şekil 5.2: IT güç tüketimi için belirlenen bağımsız değişkenler ve doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tahmin işlemi sonucu.

Tablo 5.2'ye göre IT güç tüketimi tahmin modeli %0,67 gibi çok düşük bir hata oranı ile tahmin işlemlerini gerçekleştirmektedir. Bu hata oranının elde edildiği modelde hesaplanan *a*, *b* ve *c* katsayıları kaydedilerek, geliştirilen simülatörde doğrusal olmayan regresyon yöntemiyle IT güç tüketimi tahmini sürecinde kullanılmaktadır.

Tablo 5.2: IT güç tüketimi için oluşturulan doğrusal olmayan regresyon modelinin hata oranları.

MAE	RMSPE	sMAPE	MAPE	MASE
953	0,6720	0,6692	0,6720	1,8370

5.2.2. Soğutma Üniteleri Güç Tüketimi İçin Bağımsız Değişkenlerin Belirlenmesi

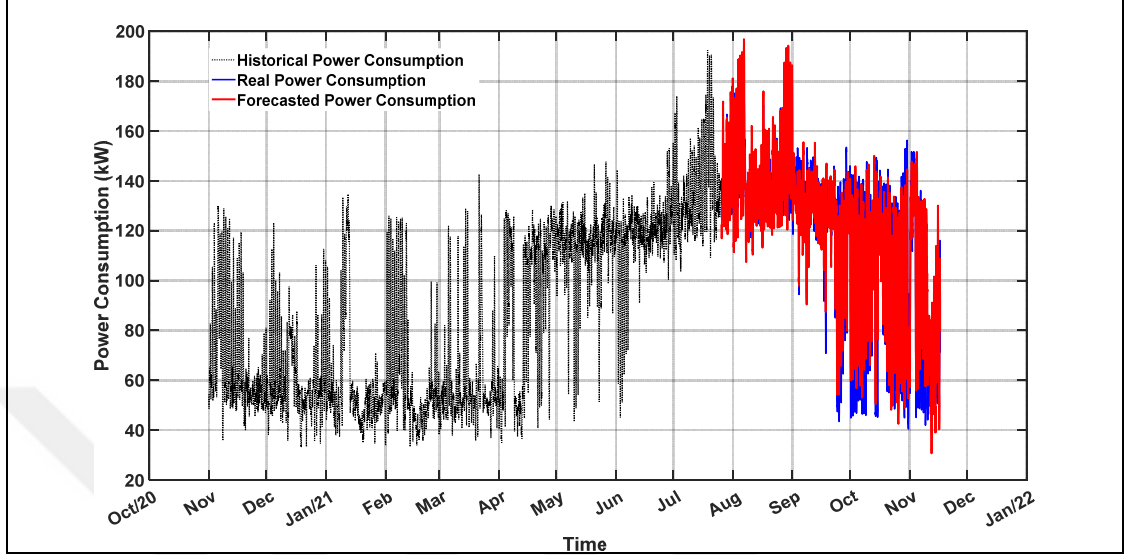
Bir önceki bölümde benimsenen bağımsız değişken belirleme yaklaşımı bu bölümde de kullanılmıştır. En iyi tahmin sonucunu elde etmek için belirlenen bağımsız değişkenler Tablo 5.3'te gösterilmektedir.

Tablo 5.3: Soğutma üniteleri güç tüketimi tahmini için belirlenen bağımsız değişkenler.

TempMeanOutside	DCpowerTotal	RacksFrontMiddleTemp	MonthX
RamUsageRatio	HumidityMeanRoom	RacksBackMidlleTemp	

Korelasyon matrisi incelendiğinde kullanılan bağımsız değişkenlerden daha yüksek korelasyon katsayısına sahip değişkenler olmasına rağmen tahmin algoritmasında kullanılmadığı görülmektedir. Bazı değişkenler bağımlı değişkenle yüksek korelasyona sahip olmalarına rağmen tahmin sonucunu kötü etkilerken, bazı değişkenler ise düşük korelasyon katsayısına sahip olmalarına rağmen tahmin sonucunu iyi yönde etkilemektedir. Örneğin zaman parametreleri incelendiğinde *MonthX* değişkeni ile *DCpowCooling* arasındaki korelasyon değeri, *MonthY* ve *DateNumVal* değişkenlerinin sahip olduğu değerden daha düşük olmasına rağmen, tahmin sonucunun iyileşmesine sebep olduğu için bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. Ayrıca *CpuLoadRatio* her ne kadar yüksek korelasyon katsayısına sahip olsa da diğer değişkenlerle birlikte kullanıldığında tahmin sonucunu kötü yönde etkilemektedir. Bu durumun tam tersi ise *RacksFrontMiddleTemp* ve *RacksBackMidlleTemp* değişkenlerinin kullanımında gerçekleşmiştir. Bu değişkenler korelasyon matrisinde pek çok değişkenin *DCpowCooling* ile sahip olduğu korelasyon katsayısından çok daha düşük katsayıya sahip olmalarına rağmen, tahmin sonucunun iyileşmesine sebep oldukları için bağımsız değişken olarak kullanılmışlardır.

Tablo 5.3'teki değişkenler kullanılarak elde edilen tahmin sonucu ise Şekil 5.3'te, farklı metrikler kullanılarak elde edilen tahmin hata değerleri ise Tablo 5.4'te gösterilmiştir.



Şekil 5.3: Soğutma üniteleri güç tüketimi için belirlenen bağımsız değişkenler ve doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tahmin işlemi sonucu.

Soğutma güç tüketimi en iyi tahmin işleminin gerçekleştiği durum için MAPE değeri %7,54 olarak hesaplanmıştır. Bu tahmin sonucu için hesaplanan a, b ve c katsayıları kaydedilerek simülátörde kullanılan soğutma güç tüketimi modelinde kullanılmıştır.

Tablo 5.4: Soğutma üniteleri güç tüketimi için oluşturulan doğrusal olmayan regresyon modelinin hata oranları.

MAE (Watt)	RMSPE (%)	sMAPE (%)	MAPE (%)	MASE
7217	7,5482	7,2091	7,5482	1,4473

5.2.3.VM Toplam Güç Tüketimi İçin Bağımsız Değişkenlerin Belirlenmesi

Veri merkezi toplam güç tüketimi tahmini için kullanılan bağımsız değişkenler belirlenirken diğer güç tüketimi tahminlerinde benimsenen yaklaşım kullanılmıştır. Korelasyon matrisine göre öncelikle $DCpowTotal$ değişkeni ile yüksek korelasyon katsayısına sahip değişkenler bağımsız değişken olarak denenmiş, ardından diğer

değişkenlerin tahmin sonucuna olan etkisi gözlenmiştir. Sırayla birinci, ikinci ve diğer bağımsız değişkenler deneme yanılma yöntemi ile belirlenmiştir. En uygun tahmin sonucunun elde edilmesi için belirlenen bağımsız değişkenler Tablo 5.5'te gösterilmiştir.

Tablo 5.5: VM toplam güç tüketimi tahmini için belirlenen bağımsız değişkenler.

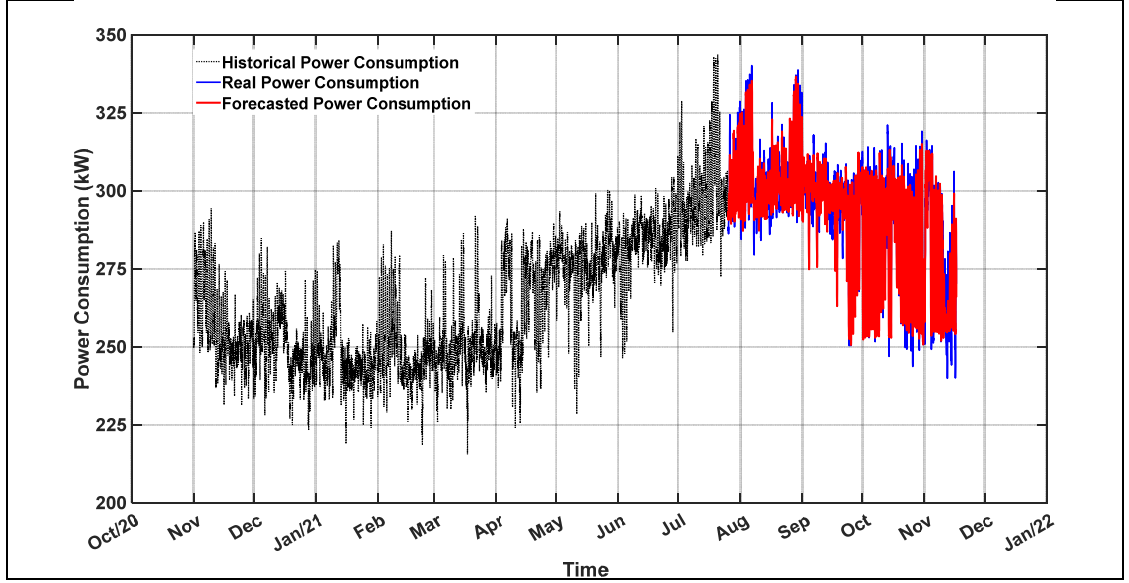
TempMeanOutside	Month	TempRow21
DCpowerCooling	CpuLoadRatio	TempCeiling11

Zaman parametreleri arasında *Month* değişkeni diğerlerine göre *DCpowTotal* ile daha az korelasyon katsayısı değerine sahip olmasına rağmen, diğer değişkenler yerine bağımsız değişken olarak kullanılmıştır. *HumidityMeanRoom* oldukça yüksek korelasyon değerine sahip olmasına rağmen bağımsız değişken olarak kullanıldığında tahmin hatasını oldukça artırdığı için kullanılmamıştır. Ayrıca *TempAC22*, *TempAC23* değişkenleri de yüksek kabul edilecek korelasyon değerine sahip olmalarına rağmen bağımsız değişken olarak kullanılmamıştır. Bu bölümde de önceki bölümlerde tespit edilen, bağımsız değişkenlerin belirlenmesi sürecinde yalnızca korelasyon katsayısı yüksek olan değişkenlerin seçilmesi yerine, her bir değişkenin farklı kombinasyonlarda denenerek ve tahmin sonucu analiz edilerek bağımsız değişken seçmenin daha doğru olacağı sonucu elde edilmiştir. Sonuç olarak Tablo 5.5'te belirlenen bağımsız değişken seti kullanılarak elde edilen veri merkezi toplam güç tüketimi tahmini sonucu Şekil 5.4'te, elde edilen hata oranları ise Tablo 5.6'da gösterilmektedir.

Tablo 5.6: VM toplam güç tüketimi için oluşturulan doğrusal olmayan regresyon modelinin hata oranları.

MAE (Watt)	RMSPE (%)	sMAPE (%)	MAPE (%)	MASE
4381	1,5121	1,5216	1,5121	1,1886

Veri merkezi toplam güç tüketimi tahmin işlemi %1,51 MAPE oranı ile gerçekleştirilmektedir. Bu tahmin işlemi için oluşturulan modeldeki *a*, *b* ve *c* katsayıları kaydedilerek, simülatörde yer alan veri merkezi toplam güç tüketimi tahmin modelinde kullanılmaktadır.



Şekil 5.4: VM toplam güç tüketimi için belirlenen bağımsız değişkenler ve doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen tahmin işlemi sonucu.

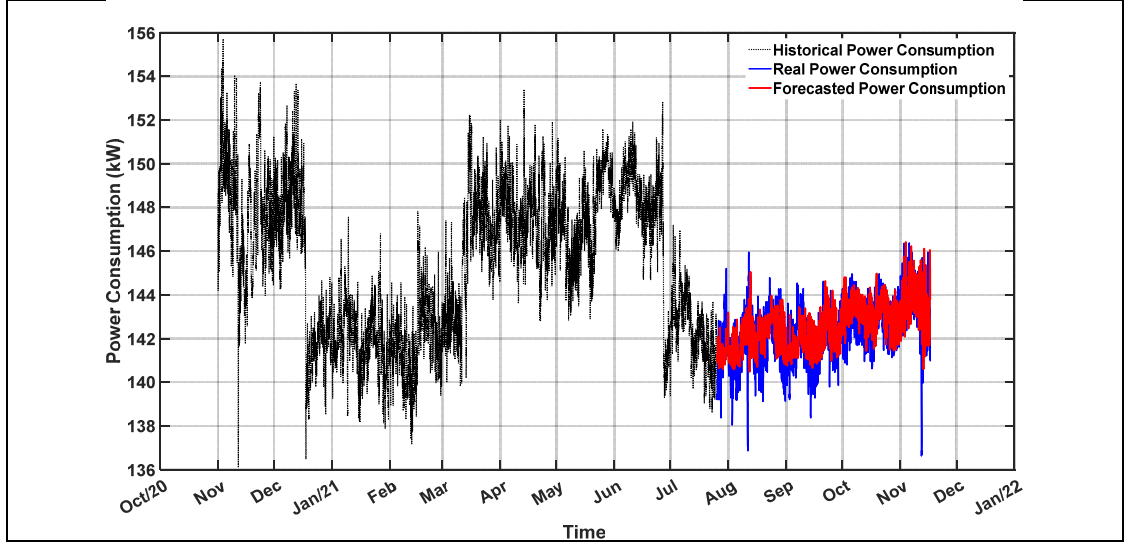
5.3. YSA ile Tahmin Modellerinin Belirlenmesi

YSA modeli belirlenirken bağımsız değişken belirleme süreci yeniden gerçekleştirilmemiş olup, Bölüm 5.2’de IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi tahmini için doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak belirlenen bağımsız değişkenler kullanılmıştır. Böylelikle her iki modelin performanslarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi için Bölüm 5.2’de anlatıldığı şekilde ayrı ayrı YSA modelleri oluşturulmuştur. IT güç tüketimi tahmini için oluşturulan modelin performansı Tablo 5.7’de gösterilmekte, tahmin sonucu ise Şekil 5.5’te yer almaktadır.

Tablo 5.7: IT güç tüketimi için oluşturulan YSA modelinin hata oranları.

MAE (Watt)	RMSPE (%)	sMAPE (%)	MAPE (%)	MASE
746	0,5252	0,5250	0,5252	1,4386

YSA modeli kullanılarak gerçekleştirilen IT güç tüketimi tahmininin MAPE oranı %0,52 olarak ölçülmüştür. Tahmin sonucu grafiksel olarak incelendiğinde de başarılı bir tahmin işleminin gerçekleştiği görülmektedir.



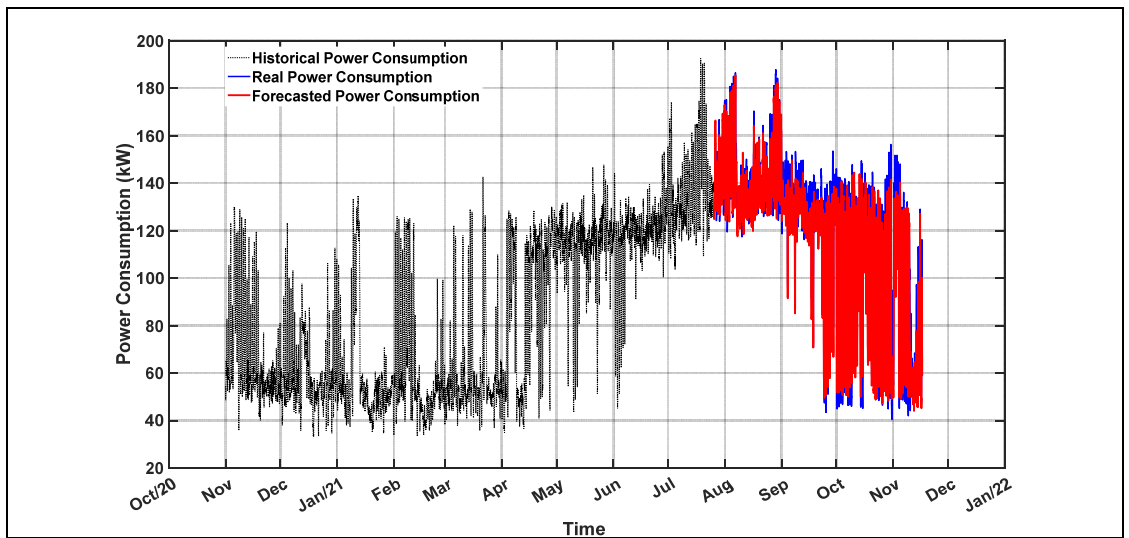
Şekil 5.5: IT güç tüketimi için oluşturulan YSA modeliyle gerçekleştirilen tahmin işlemi sonucu.

Soğutma üniteleri güç tüketimi tahmini için oluşturulan YSA modelinin performansı Tablo 5.8’de, tahmin işlemi sonucu ise Şekil 5.6’da gösterilmektedir.

Tablo 5.8: Soğutma üniteleri güç tüketimi için YSA modelinin hata oranları.

MAE (Watt)	RMSPE (%)	sMAPE (%)	MAPE (%)	MASE
5752	5,5422	5,7112	5,5422	1,1534

Soğutma güç tüketimi karakteristiği Şekil 5.6’da görüldüğü gibi yaz döneminde daha da artan ve gün içerisinde de değişken bir yapıdadır.



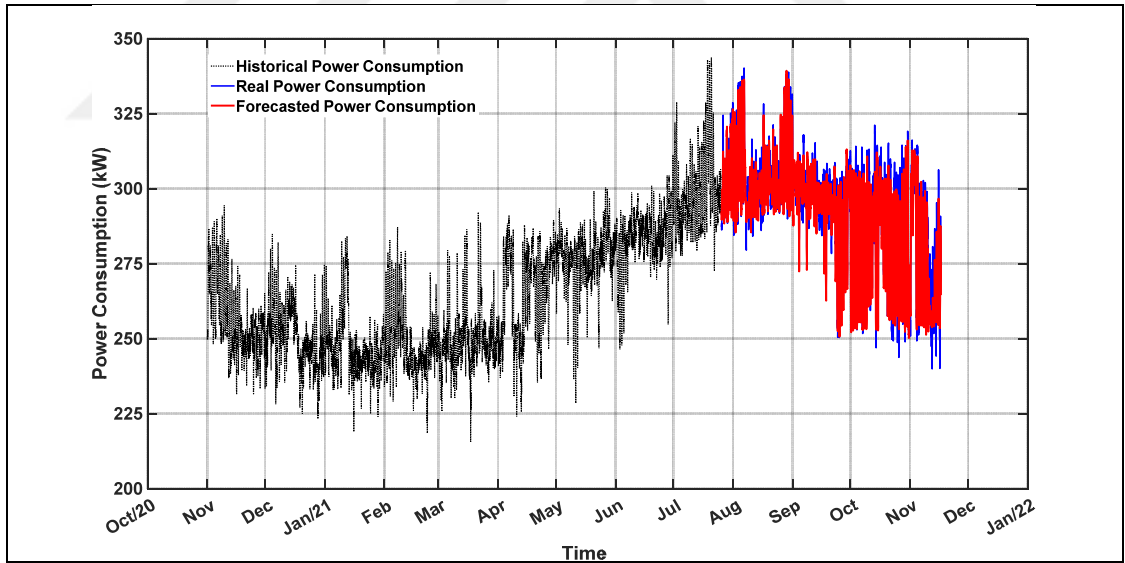
Şekil 5.6: Soğutma üniteleri güç tüketimi için oluşturulan YSA modeliyle gerçekleştirilen tahmin işlemi sonucu.

Tahmin işlemi için belirlenen test periyodu hem yaz dönemi hem de kış dönemini kapsamaktadır. Oluşturulan tahmin modeli her iki dönem için de makul seviyede bir hata oranı olan %5,54 MAPE değeri ile tahmin işlemini gerçekleştirmektedir. VM toplam güç tüketimi tahmini için oluşturulan YSA modelinin performansı Tablo 5.9'da, tahmin işlemi sonucu ise Şekil 5.7'de gösterilmektedir.

Tablo 5.9: VM toplam güç tüketimi için oluşturulan YSA modelinin hata oranları.

MAE (Watt)	RMSPE (%)	sMAPE (%)	MAPE (%)	MASE
4103	1,4179	1,4186	1,4179	1,1132

VM toplam güç tüketimi dalga şeklini soğutma üniteleri güç tüketimi karakteristiği etkilemekte ve benzer bir dalga şekli ile tahmin işlemi gerçekleştirilmektedir. Geliştirilen YSA modeli %1,41 MAPE değeri ile tahmin işlemini gerçekleştirmektedir.

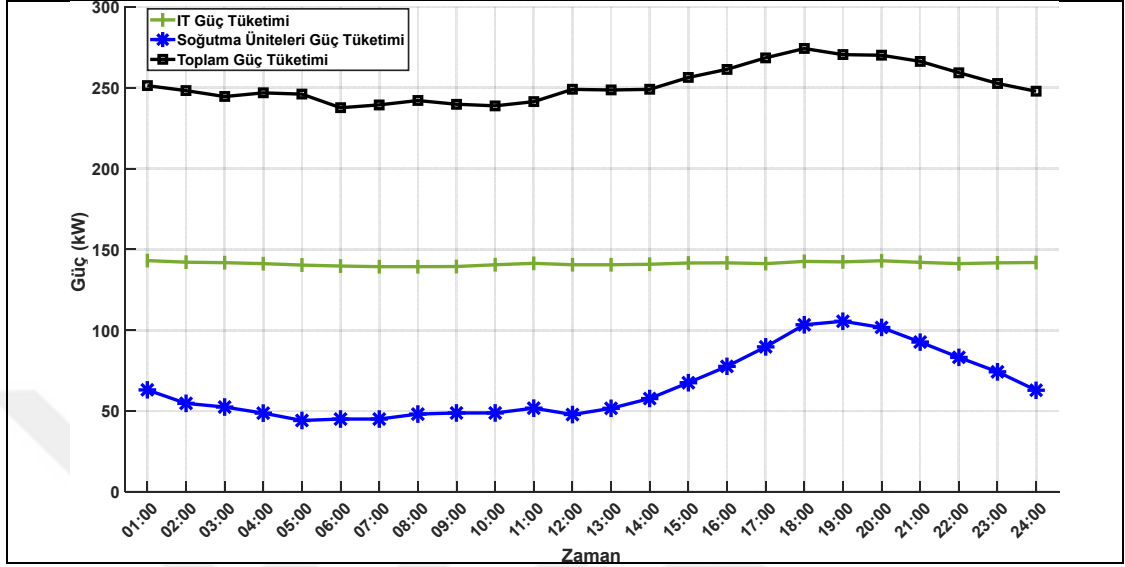


Şekil 5.7: VM toplam güç tüketimi için oluşturulan YSA modeliyle gerçekleştirilen tahmin işlemi sonucu.

5.4. Veri Merkezi Güç Tüketiminin 01 Ocak 2022 İçin Tahmin Edilmesi

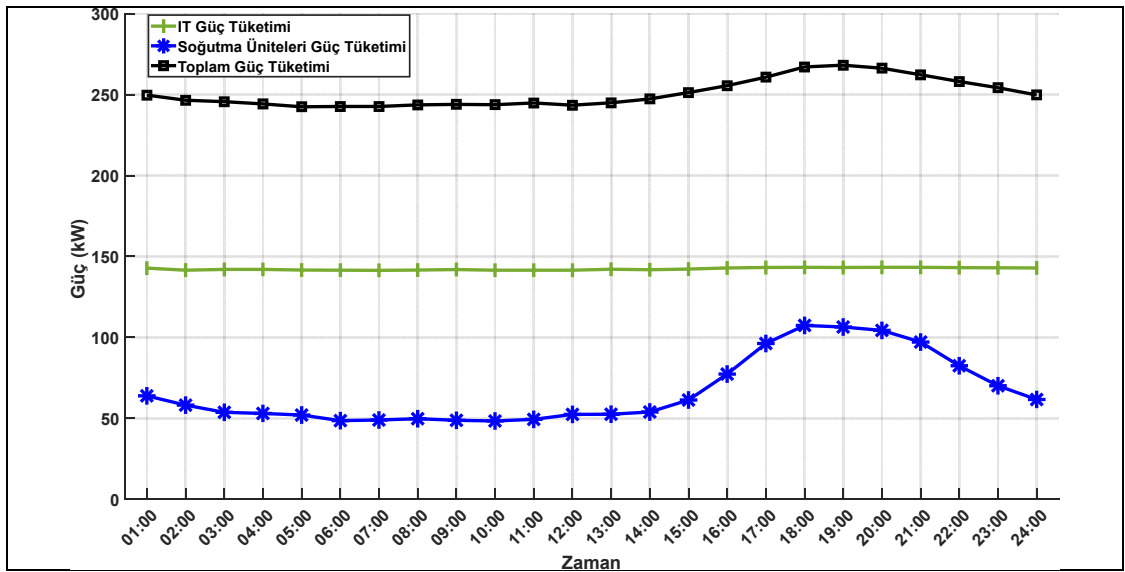
IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi tahmini için Bölüm 5.2'de belirlenmiş olan doğrusal olmayan regresyon modelleri kullanılarak, 01 Ocak 2022

tarihi için güç tüketimi tahmini yapılmıştır. Elde edilen 24 saatlik tahmin sonuçları Şekil 5.8’de gösterilmiştir. Elde edilen bu tahmin sonucu optimizasyon modülünde kullanılmıştır.



Şekil 5.8: Doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak 01 Ocak 2022 için gerçekleştirilen VM güç tüketimi tahminleri.

Bölüm 5.3’de belirlenen YSA modelleri kullanılarak 01 Ocak 2022 tarihi için IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi tahmini gerçekleştirilmiş olup, tahmin sonucu Şekil 5.9’da yer almaktadır.



Şekil 5.9: YSA modeli kullanılarak 01 Ocak 2022 için gerçekleştirilen VM güç tüketimi tahminleri.

Şekil 5.8 ile karşılaştırıldığında genel olarak tahmin işlemlerinin benzer olduğu ancak özellikle soğutma üniteleri güç tüketimi tahmin sonucunun gözle görülür derecede farklı olduğu görülmektedir.

5.5. Sonuç

Tahmin modülünde IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi tahmin işlemleri için doğrusal olmayan regresyon ve YSA modelleri geliştirilmiştir. Öncelikle tahmin işlemini etkileyen bağımsız değişkenler hem korelasyon analizi hem de her bir bağımsız değişkenin tahmin sonucuna olan etkisi göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Geçmiş veriler kullanılarak IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi tahmini için geliştirilen doğrusal olmayan regresyon ve YSA modelleri kaydedilerek, yeni tahmin işlemlerinde kullanılmaktadır. Oluşturulan tahmin modellerinin performans karşılaştırması Tablo 5.10'da gösterilmektedir.

Tablo 5.10 Tahmin modellerinin performans karşılaştırması.

Güç Tüketimi Tahminleri	Doğrusal Olmayan Regresyon Modeli		YSA Modeli	
	MAPE Oranı (%)	Çalışma Zamanı	MAPE Oranı (%)	Çalışma Zamanı
IT	0,6720	9 saniye	0,5252	1,86 dakika
Soğutma Üniteleri	7,5482	12 saniye	5,5422	4,25 dakika
VM Toplam	1,5121	8 saniye	1,4179	3,88 dakika

Tablo'dan da görüldüğü gibi YSA modeli bütün tahmin işlemlerinde doğrusal regresyona göre daha düşük hata değerlerine sahip sonuçların elde edilmesini sağlamasına rağmen, modelin oluşturulması için geçen süre doğrusal olmayan regresyon yöntemine göre daha fazladır. Ancak oluşturulan modeller yeni tahmin işlemleri için kaydedildiği için YSA ve doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak yapılan tahmin işlemleri hemen hemen aynı sürede (ortalama 20 saniye) gerçekleşmektedir. Her iki yöntem kullanılarak oluşturulan tahmin modelleri; hem dalga karakteristiği hem elde edilen hata oranları hem de tahmin sonuçları ile gerçek değerlerin birbiri ile tutarlılığı açısından kabul edilebilir ve gerçekçi sonuçlar üretmektedir. Bu bölümde geliştirilen tahmin modelleriyle gerçekleştirilen güç talebi tahminleri, optimizasyon modülünde giriş verisi olarak kullanılmaktadır.

6. OPTİMİZASYON MODÜLÜ

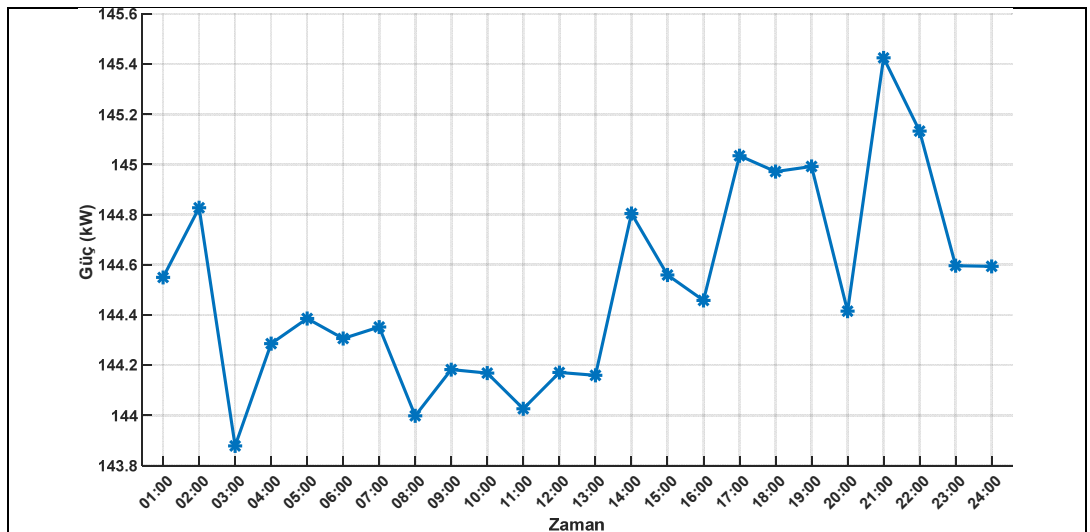
Bu bölümde, tahmin modülünde elde edilen IT, Soğutma ve VM Toplam Güç Tüketimi tahminleri, veri merkezinin sahip olduğu enerji kaynaklarıyla birlikte kullanılarak; veri merkezi yöneticilerine maliyeti minimize eden optimum enerji yönetim planları sunulmaktadır. Öncelikle optimizasyon modülüne ait genel bilgiler ve benimsenen yaklaşım anlatılmış, ardından VM enerji tüketimi maliyeti tek zamanlı ve üç zamanlı tarife için hesaplanmış ve sonrasında VM'nin *talep tarafı yönetimi*'ne katılmasını içeren 4 farklı senaryo altında enerji yönetim planları oluşturulmuştur.

6.1. Genel Bilgiler

Bu bölümde optimizasyon modülünde kullanılan değişkenlere ait temel bilgiler anlatılmış olup, benimsenen yaklaşımlar ve kabuller açıklanmıştır.

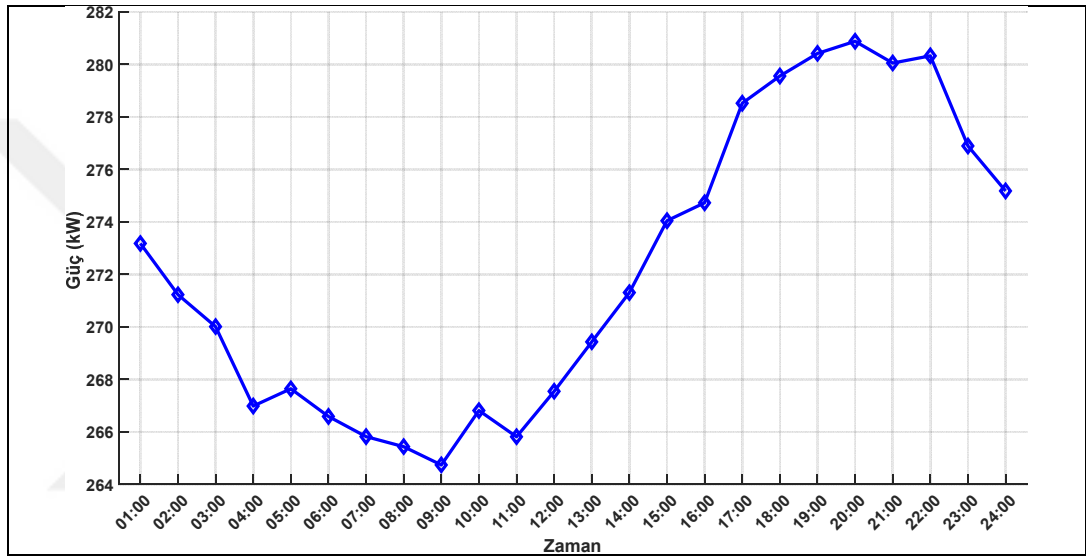
6.1.1. Optimizasyon Modülünde Kullanılacak Veri Merkezine Ait Değişkenlerin Yıllık Profilleri

Veri merkezine ait Kasım 2020 - 2021 tarihleri arasında ölçülen güç tüketim verileri kullanılarak 24 saatlik ortalama yük profili incelendiğinde, IT güç tüketimi için Şekil 6.1'deki sonuç elde edilmiştir.

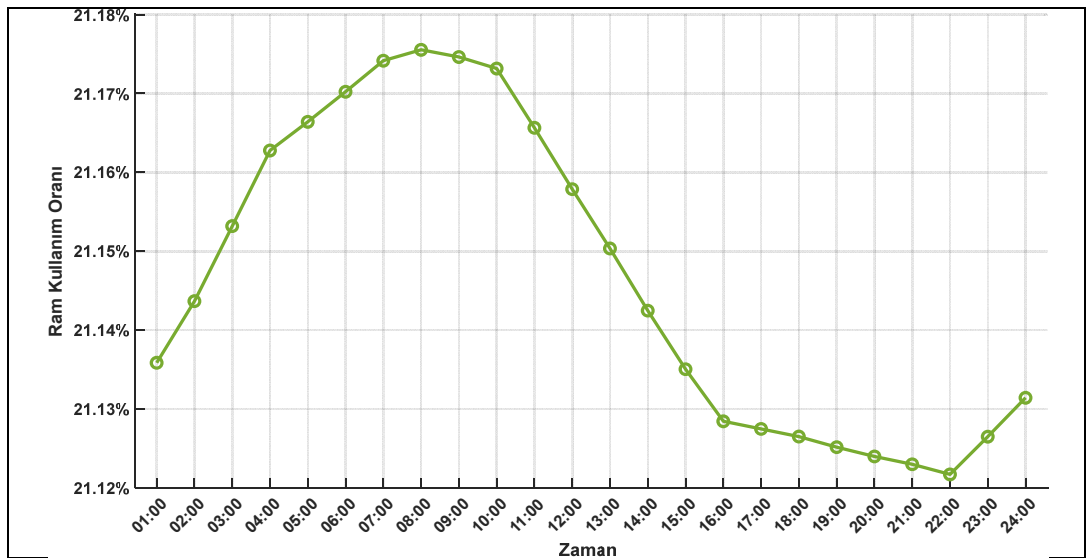


Şekil 6.1: Yıllık ortalama 24 saatlik IT güç tüketimi profili.

Şekil 6.1’de görüldüğü gibi IT güç tüketimi yıl içerisinde 143kW ile 145kW arasında değişmektedir. Saat 03.00’te gerçekleşen en düşük IT güç tüketimi değeriyle, saat 21.00’de gerçekleşen en yüksek IT güç tüketimi değeri arasındaki fark, yaklaşık %1’dir. Dolayısıyla gün içerisindeki IT güç tüketimi miktarları arasında çok fazla bir değişim söz konusu değildir. Veri merkezi toplam güç tüketiminin ortalama 24 saatlik profili ise Şekil 6.2’de gösterilmiştir. Ayrıca IT iş yükünü oluşturan ve IT güç tüketimini doğrudan etkileyen CPU ve RAM kullanım oranlarının yıllık 24 saatlik ortalama kullanım oranları Şekil 6.3 ve Şekil 6.4’te gösterilmiştir.

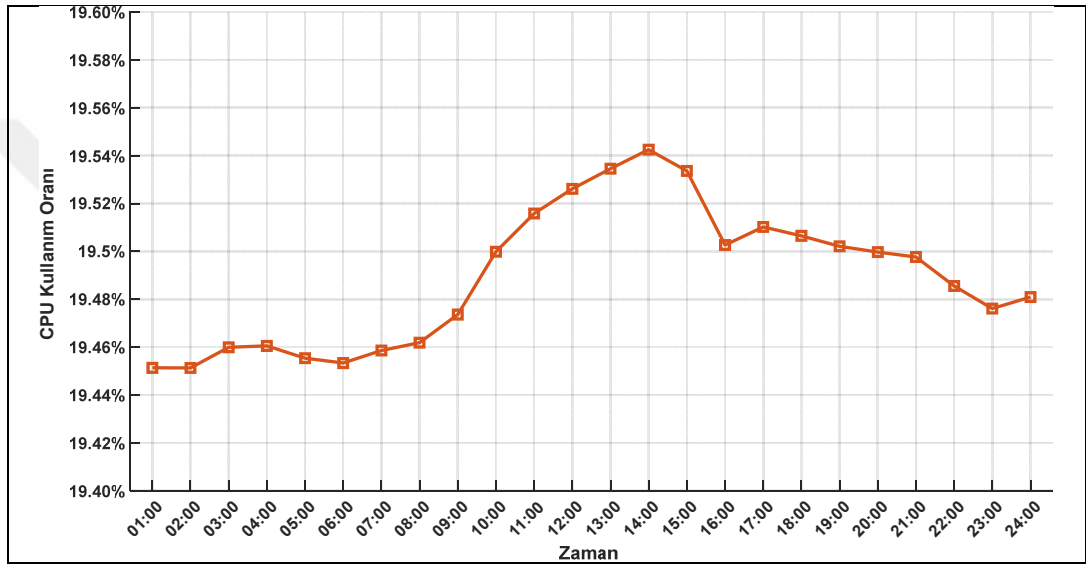


Şekil 6.2: Yıllık ortalama 24 saatlik VM toplam güç tüketimi profili.



Şekil 6.3: Yıllık ortalama 24 saatlik RAM kullanım oranı.

Veri Merkezi toplam güç tüketimi ortalaması gün içerisinde 264,7 kW ile 280,8 kW arasında değişmektedir. En düşük tüketim 09.00'da 264,7 kW olarak gerçekleşirken en yüksek tüketim saat 19.00'da 280,8 kW olarak gerçekleşmektedir. En düşük ve en yüksek tüketim arasındaki fark, yaklaşık %6'dır. Şekil 6.3 incelendiğinde ortalama RAM kullanım oranının %21 olduğu ve gün içerisinde değişimlerin yaşanmadığı görülmektedir. Benzer durum CPU kullanımı için de geçerlidir. Günlük ortalama CPU kullanım oranının %19 olduğu Şekil 6.4'te görülmektedir.



Şekil 6.4: Yıllık ortalama 24 saatlik CPU kullanım oranı.

6.1.2. Kaydırılabilir İş Yükü Hesabı

İş yükünün zaman içerisinde kaydırılması, kaydırılan iş yüküne karşılık gelen güç tüketiminin farklı bir zamana kaydırılması manasına gelmektedir. Optimizasyon algoritmasında bu ilişki kullanılmaktadır. IT güç talebinin, elektrik fiyatının pahalı olduğu zaman diliminden, ucuz olduğu zaman dilimine kaydırılmasıyla, aynı iş yükü için maliyetin azaltılması amaçlanmaktadır.

Sunucular çoğunlukla kapasitelerinin %25 ila %40'ı arasında bir yükte kullanılmaktadır [139]–[141]. Berlin Teknik Üniversitesi Hermann-Rietschel Enstitüsü'nde, 5 adet Rack-Kabin ve 80 sunucudan oluşan, 22 °C sabit sıcaklıkta tutulan veri merkezinde yapılan ölçümlere göre, IT iş yükünün %15'inin kısa süreli (1 dakikadan az) gecikmeye toleranslı, %45'inin ise uzun süreli gecikmelere (ör:8 saat)

toleranslı olduğu belirtilmektedir[40]. Ayrıca Zhao ve arkadaşlarının[142] “Alibaba” firmasının 2018 yılı iş yükü karakteristiğini inceleyen çalışmasına göre, 24 saatlik zaman dilimi içerisinde gelen iş yükünün, ortalama %11’i gecikme hassasiyetli yani yapılması zorunlu iş yükü olup, %89’u ise gecikme toleranslı yani zamanda kaydırılabilir karakteristiktir. Aynı çalışmada, gün içerisinde gelen iş yükü saatlere göre karşılaştırıldığında, 14.00-16.00 arasındaki iş yükünün diğer saatlere göre en yüksek seviyede olduğu, 24.00-11.00 arasında iş yükünün diğer zamanlara göre yarı yarıya daha az olduğu analiz edilmiştir. Aynı çalışmaya göre gecikme toleranslı iş yükü oranının en fazla olduğu zaman 12.00’dır ve bu saatte gelen iş yükünün yaklaşık %36’sının o anda yapılması zorunludur. Bu oran 11.00 için %19, 10.00 için %15’tir. Ayrıca 01.00-09.00 arasındaki gecikme toleranslı iş yükü oranı %13, 13.00-24.00 arasında %9’dur.

Optimizasyon modülü için kullanılacak saatlik kaydırılabilir iş yükü oranları, literatürdeki kaydırılabilir iş yükü ile alakalı bilgiler göz önüne alınarak ve Şekil 6.1, Şekil 6.3 ve Şekil 6.4 dikkate alınarak belirlenmiştir. Tez kapsamında kullanılan veri merkezindeki iş yükü oranları ve IT güç tüketimi incelendiğinde, gün içerisindeki değişimin çok yüksek miktarda olmadığı görülmektedir. Ancak [142] çalışmasında 10.00-12.00 arasında yapılması zorunlu iş yükü oranı diğer zamanlara göre daha fazla olduğu için, bu çalışmada da bu zaman diliminde gelen iş yükünün %60’ının o anda yapılması gerektiği, yani yapılması zorunlu iş yükü olduğu kabul edilmiştir. Zorunlu iş yüküne karşılık gelen güç talebinin ilgili saatte karşılanması gerekmektedir. Her “ t ” zamanı için karşılanması gereken zorunlu IT güç tüketimi, tahmin edilen IT güç tüketimi olan $P_{IT}^{est}(t)$ ’nin oranları şeklinde hesaplanmaktadır. Optimizasyon modülünde kullanılmak üzere her “ t ” anı için yeni IT güç tüketimi değerinin minimum ve maksimum sınırları Tablo 6.1’deki gibi belirlenmiştir. Yeni IT gücünün “ t ” anındaki minimum değerleri yapılması zorunlu iş yükünü temsil etmektedir. Buna göre 10.00-12.00 arasında tahmin edilen IT güç tüketiminin %60’ı zorunlu olarak gerçekleştirilmekte ve tahmin edilen IT güç tüketiminin ($P_{IT}^{est}(t)$) en az %60’ı kadar olmaktadır. Gün içerisinde 01.00-09.00 arasındaki zorunlu iş yükü, 13.00-24.00 arasına göre daha fazla olduğu için her iki zaman dilimi için yapılması zorunlu iş yükü oranları sırasıyla %40 ve %30 olarak belirlenmiştir.

Her “ t ” anı için diğer zamanlardan gelebilecek maksimum IT güç tüketimi sınırlarını belirlemek amacıyla, IT iş yükünün %100 olması durumunda tüketilecek maksimum gücün hesaplanması gerekmektedir. Bu amaçla, Tahmin Modülünde IT

güç tüketimi tahmini için kullanılan model revize edilerek IT güç tüketimi, yalnızca CPU ve RAM kullanımının fonksiyonu şeklinde yazıldığında denklem (6.1) elde edilmektedir. IT iş yükünün RAM ve CPU kullanım oranlarından oluştuğu kabul edilmiştir.

$$P_{IT}^{CPU, RAM} = (d_1 * X^{CPU} + d_2 * X^{RAM}) + (d_3 * X^{CPU} + d_4 * X^{RAM})^2 + d_5 \quad (6.1)$$

IT güç tüketimine ait geçmiş veriler kullanılarak doğrusal olmayan regresyon yöntemiyle denklem (6.1)'de yer alan d katsayıları hesaplanmıştır. Bu katsayılar yardımıyla X^{CPU}, X^{RAM} değerlerinin %100 olduğu durum olan maksimum IT güç tüketimi; P_{IT}^{max} 730 kW olarak hesaplanmaktadır. Her bir “t” anında yapılabilecek maksimum iş yükü sınırı, P_{IT}^{max} 'ın yüzdesi şeklinde belirlenmiştir ve Tablo 6.1'de gösterilmiştir. Yüzde oranları belirlenirken, Zhao ve arkadaşlarının[142] yapmış olduğu çalışma ve yukarıda anlatılan iş yükü miktarının gün içerisindeki dağılımı göz önünde bulundurulmuştur.

Tablo 6.1: Zamana göre iş yükü kaydırma sınırları.

Zaman	Yeni IT Gücünün Minimum Değeri	Yeni IT Gücünün Maksimum Değeri
01.00-09.00	$\%40 * P_{IT}^{est}(t)$	$\%70 * P_{IT}^{max}$
10.00-12.00	$\%60 * P_{IT}^{est}(t)$	$\%60 * P_{IT}^{max}$
13.00-20.00	$\%30 * P_{IT}^{est}(t)$	$\%50 * P_{IT}^{max}$
21.00-24.00	$\%30 * P_{IT}^{est}(t)$	$\%70 * P_{IT}^{max}$

6.1.3. Dizel Jeneratör Modeli

Veri Merkezinde üç adet 1000KVA dizel jeneratör bulunmaktadır. İki jeneratör acil durumlarda veri merkezinin olağan çalışmasını sürdürebilmesi için yedekte bırakılmıştır. Optimizasyon modülünde “t” zamanı için enerji kaynağı olarak kullanılmak üzere bir adet jeneratör sisteme dahil edilmiştir. Optimizasyon modülünde kullanmak üzere, her “t” zamanı için jeneratörün sağlayacağı güç miktarı ve buna bağlı olarak tüketileceği yakıt miktarının hesaplanması ve maliyet fonksiyonuna dahil

edilmesi gerekmektedir. Ancak pek çok jeneratörde katalog bilgisi olarak genelde %100, %75 ve %50 yüklenme durumu için jeneratörün tükettiği ortalama yakıt miktarı verilmekte, zamana bağlı veya güce bağlı bir maliyet fonksiyonu verilmemektedir. Dizel jeneratör güç tüketim modeli, sisteme sağladığı güç çıkışına bağlı polinom olarak modellenebilir ve denklem (6.2)'deki gibi ifade edilebilir [143]–[145].

$$C_{liter}(t) = a * P_{gen}^2(t) + b * P_{gen}(t) + c \quad (6.2)$$

$P_{gen}(t)$, jeneratörden sisteme sağlanan zamana bağlı çıkış gücüdür ve birimi kW'tır. $C_{liter}(t)$ ise, $P_{gen}(t)$ kadar güç sağlamak için gerekli olan zamana bağlı yakıt tüketimi miktarıdır ve litre olarak hesaplanır. Maliyet katsayıları ise a, b ve c ile gösterilmiştir. Bu katsayıları hesaplamak için [146]'da yer alan hesaplama aracı kullanılarak, jeneratörün 1kW'tan 1000kW'a kadar güç verdiği durumlar için yakıt tüketimi miktarı hesaplatılmış ve bir veri seti oluşturulmuştur. Bu veri setiyle doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak (6.2)'deki a, b ve c katsayıları hesaplanmış ve (6.3)'te gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} a &= 4,703396756082996 * 10^{-6} \\ b &= 0,263323701405753 \\ c &= 1,794782704678224 \end{aligned} \quad (6.3)$$

Kurulan modelin MAPE değeri %5,43 olarak hesaplanmıştır. Tablo 6.2'de farklı markalara ait 1000KVA dizel jeneratörler için farklı yüklenme tiplerine göre yakıt tüketimleri ve bu markalara ait tüketimlerin her bir yüklenme oranı için ortalamaları yer almaktadır. Ayrıca önerilen model için belirlenen (6.3)'deki a, b ve c katsayıları, (6.2)'de yerine konularak farklı yüklenme güçleri için yakıt tüketimi hesabı ve diğer markaların ortalama yakıt tüketimlerine göre hata hesabı Tablo 6.2'de gösterilmiştir. Jeneratörler %100 yüklenme durumunda 800kW güç sağlayabilmektedir. Veri Merkezi toplam güç tüketimi geçmiş verisi incelendiğinde anlık güç tüketimi miktarı 350kW'ı hiçbir zaman geçmemekte dolayısı ile olası jeneratör kullanımlarında yüklenme oranı %50'yi geçmemektedir. Önerilen jeneratör modeli yakıt tüketimi hata oranı ise bu durum için %2,27'dir.

Tablo 6.2: Farklı marka jeneratörlerin yakıt tüketimi ile önerilen jeneratör modeli yakıt tüketiminin karşılaştırılması.

Yüklenme Oranları	Jeneratör Marka ve Modellerine Göre Yakıt Tüketimi (Litre)						Bütün Markaların Ortalama Yakıt Tüketimi (Litre)	Önerilen Jeneratör Modeli Yakıt Tüketimi (Litre)	Bağıl Hata
	İndeks IND GM1000 L	Kohler KD1000F	Emsa E BD ST 1000/6	CAT 32	SDMO X1000	MTU 16V2000 DS1100			
%50	105	102,80	105,6	115.1	96	108,3	105,4	107,8	%2,27
%75	150	150,5	151,8	168	140	156,0	152,7	161,48	%5,74
%100	203	202,40	203,1	224.1	186	204,8	203,9	215,4	%5,64

Dolayısıyla önerilen model optimizasyon modülünde her “t” anı için jeneratörden sağlanacak güç miktarına göre yakıt tüketimi hesabı için kullanılabilir. Ayrıca yakıt tank kapasiteleri karşılaştırıldığında Kohler KD1000F modelinin 1035 litre, Emsa EBDST1000/6 modelinin 1928 litre, SDMO X1000 modelinin ise 930 litre yakıt depolayabildiği görülmüştür. Optimizasyon modülünde kullanılan jeneratörün yakıt kapasitesi C_{gen}^{Tank} , 1928 litre olarak kabul edilmiş ve %50 yükte çalışma durumunda 17 saat güç sağlayabildiği hesaplanmıştır.

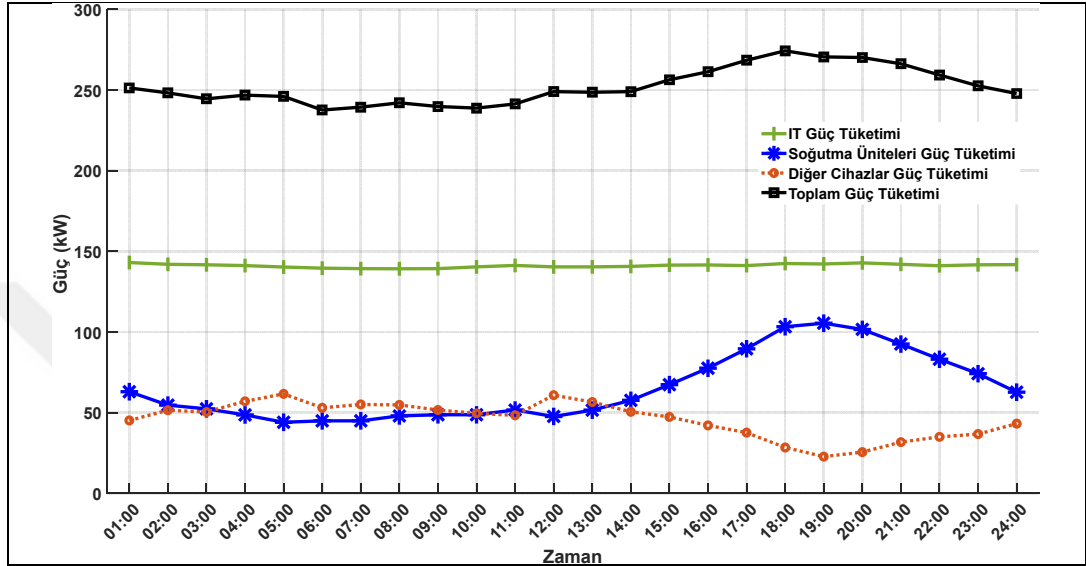
6.1.4. UPS Bilgileri

Kullanılan veri merkezinde iki adet 200KVA ve iki adet 320KVA UPS bulunmaktadır. Optimizasyon modülü için bir adet 320 KVA UPS sisteme dahil edilmiş, diğer UPS’ler olası acil durumlar için yedekte bırakılmıştır. Kullanılan UPS’in maksimum çıkış gücü 320kW’tır. Minimum deşarj gücü 18kW’tır. Maksimum şarj gücü 220kW’tır. UPS batarya grubu olarak kurşun-asit batarya kullanılmakta ve enerji kapasitesi 320kWh’tır. Şarj-deşarj verimliliği %85 olarak belirlenmiştir[147]. UPS’in enerji kaynağı olarak kullanılacağı durumlar için hem batarya ömrü hem de verimlilik açısından, batarya kapasitesinin %20’si ile %80’i arasındaki enerji miktarı kullanılmaktadır.

6.1.5. Optimizasyon Senaryolarında Kullanılan Veriler

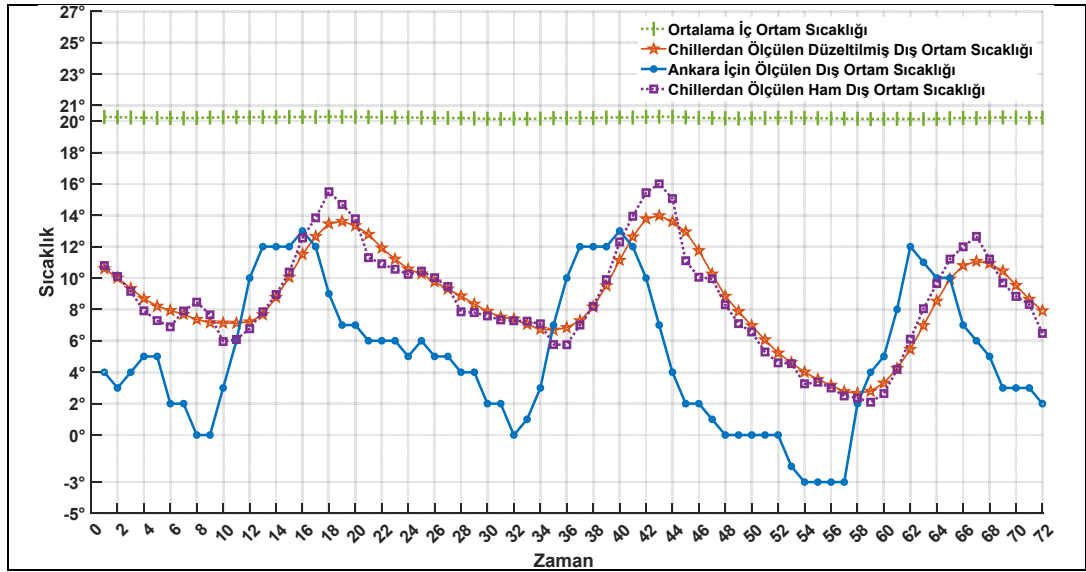
Veri merkezi enerji yönetim planlaması için incelenen farklı senaryolar, 01 Ocak 2022 tarihi için yapılan 24 saatlik tahmin sonuçları kullanılarak analiz edilmiştir.

Tahmin Modülünde geliştirilen tahmin algoritması kullanılarak 01 Ocak 2022 için IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi tahmini gerçekleştirilmiş olup, toplam güç tüketiminden IT ve soğutma güç tüketimi çıkarılarak “Diğer Cihazlar Güç Tüketim” verisi elde edilmiştir. 01 Ocak 2022 tarihine ait tahmin edilen saatlik güç tüketimi verileri Şekil 6.5’te gösterilmiştir.



Şekil 6.5: 1 Ocak 2022 veri merkezi güç tüketimi tahminleri.

Şekil 6.5’te görüldüğü gibi IT güç tüketimi gün içerisinde çok fazla değişmemektedir. Soğutma üniteleri güç tüketimi ise 17.00-23.00 arasında gündüz saatlerine göre daha fazladır. Optimizasyon algoritmasında kullanılan diğer önemli parametreler; veri merkezi ortalama iç ortam sıcaklığı ve dış ortamda yer alan Chiller’ların ölçmüş olduğu sıcaklık değeridir. Ocak ayına ait 72 saatlik sıcaklık ölçümü örneği Şekil 6.6’da gösterilmiştir. Mavi grafik Ankara ili için meteorolojik olarak ölçülen sıcaklık verisini göstermektedir. Buna göre hava sıcaklığı ilk gün için sabah 08.00-09.00 aralığında en düşük seviyede gözlenmiş, sonrasında saat 16.00’ya kadar sıcaklık değerinde bir artış izlenmiş ve gün içindeki en yüksek sıcaklığa ulaşmıştır. Sonrasında gece yarısına kadar sıcaklık değeri kademeli olarak düşmüştür. Şekil 6.6’da yeşil grafik ile veri merkezi iç ortam sıcaklığının 20,2 °C civarında sabit tutulduğu görülmektedir.



Şekil 6.6: Sıcaklık ölçümleri karşılaştırması.

Veri merkezi dış ortamında yer alan iki farklı chillerden ölçülen ham sıcaklık verisi, saatlik ölçüm aralığına senkronize edilerek ve ortalaması alınarak çizdirilmiş ve Şekil 6.6'da mor grafik ile gösterilmiştir. Buna göre ilk gün için gece yarısından sabah 06.00'ya kadar sıcaklık değerinde bir düşüş gözlenmiş, ardından 08.00'e kadar artmış ve yeniden 10.00'a kadar düşmüştür. Sonrasında gün içerisindeki en yüksek sıcaklık değerinin gözlemlendiği 18.00'e kadar sıcaklık değeri artmış ve ardından yeniden gece yarısına doğru azalmıştır. Tahmin algoritmasında veri ön işleme sürecinde bütün verilerle birlikte sıcaklık verisi de gürültüden ayıklanmış, kayıp değerler tamamlanmış, senkronize edilmiş ve en önemlisi düzeltilmiştir (data smoothing). Bu işlemler yapıldıktan sonra elde edilen sıcaklık verisi Şekil 6.6'da turuncu grafik ile gösterilmiştir. Optimizasyon algoritmasında da veri ön işleme sürecinden sonra elde edilen veriler kullanılmaktadır. Turuncu grafik ile gösterilen yeni sıcaklık verisi ilk gün için incelendiğinde ham veriler kullanılarak elde edilen grafiğe göre en yüksek sıcaklık değerinin yaklaşık 1 °C azaldığı ve zaman diliminin 1 saat ötelenerek 19.00'da gerçekleştiği görülmektedir. Şekil 6.6'daki sıcaklık verileri diğer saatler için de ilk günküne benzer karakteristiktir. Şekilden de görüldüğü gibi meteorolojiden elde edilen ölçüm verileri ile veri merkezinde bulunan chillerlerin ölçtüğü sıcaklık değerleri arasında grafiksel olarak benzerlik olsa da sıcaklık değerlerinde ve gözlemlendiği saat dilimlerinde farklılık bulunmaktadır. Bu farklılığın sebeplerinden biri meteorolojik ölçümün Ankara ili için genel değerleri içermesi ve ölçüm yapılan konum ile veri merkezinin bulunduğu konumun birbirinden farklı olmasıdır. Meteorolojik ölçümler

için kullanılan ölçüm kurallarının (gölgede, açık havada veya belli basınç ve yükseklikte vb), chillerlardaki sensörlerin sıcaklık ölçümü esnasında aranmaması da iki ölçüm arasında fark olmasının sebeplerindendir. Ayrıca meteorolojik ölçümlerde kullanılan sensör ve cihazların sahip olduğu hassasiyet ve kalibrasyon, chillerlarda bulunan sıcaklık sensörlerinden çok daha gelişmiş olması, iki ölçüm arasında farklılıklar oluşmasına sebep olabilmektedir. Bunlara ek olarak VM chillerlarındaki sensörlerde senkronizasyon problemi olmuş olabilir veya kış saati/yaz saati uygulaması sebebi ile zaman damgasında kaymalar yaşanmış olabilir.

Optimizasyon modülünde maliyet hesaplamaları için hem tek zamanlı hem de üç zamanlı elektrik tarifesi kullanılmıştır. 1 Ocak 2022 için tek terimli tek zamanlı sanayi tipi elektrik birim fiyatı, vergiler dahil 2.4568395 TL/kWh olarak belirlenmiştir[148]. Veri merkezinin ikili anlaşmalar yoluyla Ocak 2022 için kullandığı tarife ise vergiler dahil 2.147376185 TL/kWh'tir. 1 Ocak 2022 için sanayi tipi üç zamanlı elektrik tarifesinin vergiler dahil fiyatları ise Tablo 6.3'te gösterilmiştir [148]. Ayrıca 1 Ocak 2022 için jeneratör yakıt fiyatı 11TL olarak belirlenmiştir.

Tablo 6.3: Üç zamanlı elektrik tarifesi birim fiyatları.

Zaman	Birim Fiyat TL/kWh
06.00 - 17.00	2,3858
17.00 - 22.00	3,552695797
22.00 - 06.00	1,443971074

Optimizasyon modülünde, IT güç tüketiminin elektrik fiyatının daha ucuz olduğu zaman dilimine kaydırılması prensibine dayanan yük kaydırmanın yapıldığı senaryolar için, 01 Ocak 2022 tarihinde her “ t ” anına kaydırılabilecek maksimum IT gücünün sınırı, denklem (6.1) kullanılarak belirlenmiştir. Denklemden RAM ve CPU kullanım oranları %100 olarak girildiğinde P_{IT}^{max} , 730 kW olarak hesaplanmaktadır.

Enerji maliyeti hesaplarında güç tüketimiyle birlikte kullanılan zaman aralığı Δt , bütün senaryolar için 1 saat olarak belirlenmiştir. İşlem yapılan anı gösteren zaman, “ t ” ile gösterilmektedir. Optimizasyon zaman periyodu kümesi Z , örnek senaryolar için 24 saat olarak belirlenmiştir ve $Z = \{1,2,3, \dots 24\}$ olarak gösterilmektedir. Ayrıca $\nabla t \in Z$ 'dir. Ancak bazı denklemlerde optimizasyon periyoduna başlamadan önceki başlangıç anını temsil etmek için “ $t=0$ ” ifadesi kullanılmaktadır. Veri merkezinin sahip olduğu jeneratörlerin güç katsayısı (pf) 0.8'dir. Dolayısıyla acil durumlarda devreye

girerek veri merkezi enerji ihtiyacını karşılamak için kullanılan üç adet 1000KVA'lık jeneratörün anlık maksimum kapasitesi $P_{gen}^{capacity}$, 2400kW'tır.

6.2. Tek Zamanlı Elektrik Tarifesi ile Maliyet Hesabı

Tahmin Modülünde hesaplanan örnek senaryo olan ve Şekil 6.5'te yer alan IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Tüketimi verisi kullanılarak, öncelikle herhangi bir optimizasyon yaklaşımı benimsenmeden, mevcut durum için maliyet hesabı gerçekleştirilmiştir. Veri merkezinin Ocak 2022 için ikili anlaşmalar yoluyla dağıtım şebekesi firmasından almış olduğu elektrik birim fiyatı ile güç tüketimi değeri çarpılarak, 01 Ocak 2022 için toplam güç tüketimi maliyeti hesaplanmıştır. Kullanılan matematiksel model Bölüm 6.2.1'de, analiz sonuçları ise Bölüm 6.2.2'de açıklanmıştır.

6.2.1. Matematiksel Model

Veri merkezinin ikili anlaşma yoluyla ödemiş olduğu elektrik birim fiyatı M^s ile gösterilmiştir. Bu fiyat günün bütün zamanlarında aynıdır. Tahmin edilen IT güç tüketimi, $P_{IT}^{est}(t)$ ile gösterilirken, soğutma güç tüketimi $P_{AC}^{est}(t)$ ile gösterilmiştir. Tahmin edilen diğer cihazlar güç tüketimi ise $P_{OD}^{est}(t)$ ile gösterilmiştir. Tek zamanlı elektrik tarifi için IT güç tüketimi maliyeti denklem (6.4)'te, soğutma güç tüketim maliyeti denklem (6.5)'te ve diğer cihazlar güç tüketim maliyeti (6.6)'da hesaplanmaktadır. Veri merkezi toplam güç tüketimi maliyeti ise denklem (6.7) ile hesaplanmaktadır.

$$Cost_{grid}^{IT,singleT} = \sum_t P_{IT}^{est}(t) * \Delta t * M^s \quad (6.4)$$

$$Cost_{grid}^{AC,singleT} = \sum_t P_{AC}^{est}(t) * \Delta t * M^s \quad (6.5)$$

$$Cost_{grid}^{OD,singleT} = \sum_t P_{OD}^{est}(t) * \Delta t * M^s \quad (6.6)$$

$$Cost_{grid}^{DC,singleT} = Cost_{grid}^{IT,singleT} + Cost_{grid}^{AC,singleT} + Cost_{grid}^{OD,singleT} \quad (6.7)$$

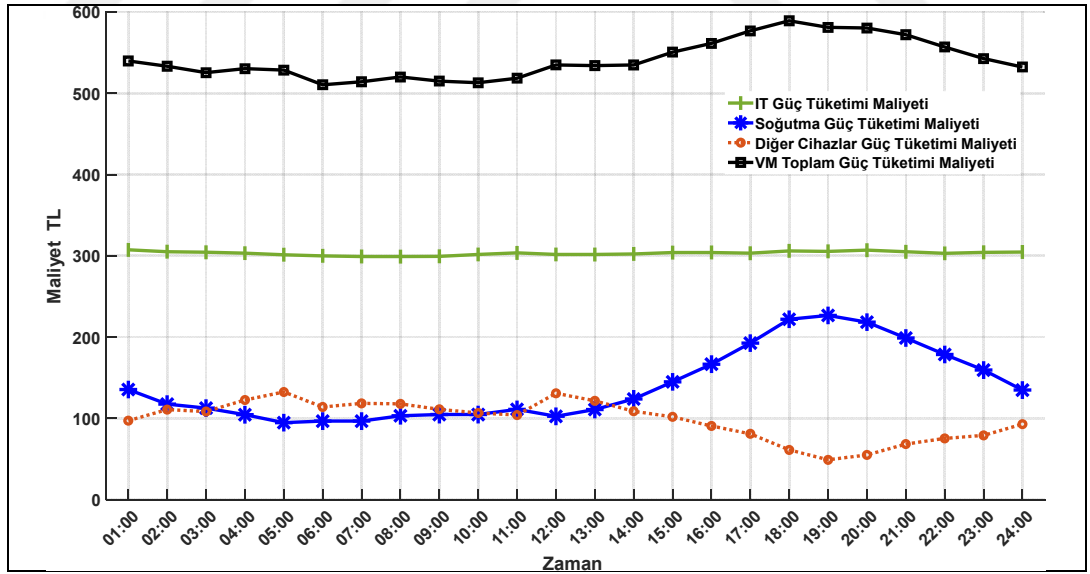
6.2.2. Analiz Sonuçları

Denklem 6.4 ve 6.7 arasındaki hesaplamalar MATLAB ortamında hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 6.4'te gösterilmiştir. Buna göre veri merkezi güç tüketim maliyeti tek zamanlı elektrik tarifiesi kullanıldığında 01 Ocak 2022 için 12.994 TL olmaktadır.

Tablo 6.4: Tek zamanlı elektrikli tarifiesi için hesaplanan maliyetler.

$Cost_{grid}^{IT,singleT}$	7.275 TL
$Cost_{grid}^{AC,singleT}$	3.362 TL
$Cost_{grid}^{OD,singleT}$	2.357 TL
$Cost_{grid}^{DC,singleT}$	12.994 TL

Veri merkezi güç tüketimi maliyetinin zamana göre değişimi Şekil 6.7'de gösterilmiştir. Günün farklı saatlerinde IT güç tüketiminde büyük değişiklikler olmadığı için ve tek zamanlı elektrik tarifiesi kullanıldığı için, IT güç tüketimi maliyeti gün içerisinde çok fazla değişmemektedir.



Şekil 6.7: Tek zamanlı elektrik tarifiesi ile hesaplanan güç tüketimi maliyetleri.

Diğer güç tüketim değerleri de tek zamanlı elektrik tarifiesi kullanıldığı için yalnızca güç tüketim dalga şeklinin sabit bir katsayı ile çarpılmış hali şeklindedir.

6.3. Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi ile Maliyet Hesabı

Bu bölümde, günün farklı zamanlarına göre farklı elektrik fiyatlarının uygulandığı üç zamanlı elektrik tarifi kullanılarak, veri merkezi güç tüketim maliyeti hesaplanmıştır. Herhangi bir optimizasyon yaklaşımı benimsenmeden, her “ t ” anı için tahmin edilen güç tüketim değeri kullanılarak maliyet hesaplanmıştır.

6.3.1. Matematiksel Model

Üç zamanlı elektrik tarifi $M^{ToU}(t)$ ile gösterilmiştir. Optimizasyon periyodu boyunca, önceden tahmin edilmiş olan IT güç tüketimi değeri ile $M^{ToU}(t)$ kullanılarak hesaplanan IT güç tüketim maliyeti, denklem (6.8)’de verilmiştir. Soğutma güç tüketim maliyeti denklem (6.9) ile, diğer cihazlar güç tüketim maliyeti denklem (6.10) ile hesaplanmaktadır. Denklem (6.11) ise veri merkezi toplam güç tüketim maliyeti hesabını göstermektedir.

$$Cost_{grid}^{IT,ToU} = \sum_t P_{IT}^{est}(t) * \Delta t * M^{ToU}(t) \quad (6.8)$$

$$Cost_{grid}^{AC,ToU} = \sum_t P_{AC}^{est}(t) * \Delta t * M^{ToU}(t) \quad (6.9)$$

$$Cost_{grid}^{OD,ToU} = \sum_t P_{OD}^{est}(t) * \Delta t * M^{ToU}(t) \quad (6.10)$$

$$Cost_{grid}^{DC,ToU} = Cost_{grid}^{IT,ToU} + Cost_{grid}^{AC,ToU} + Cost_{grid}^{OD,ToU} \quad (6.11)$$

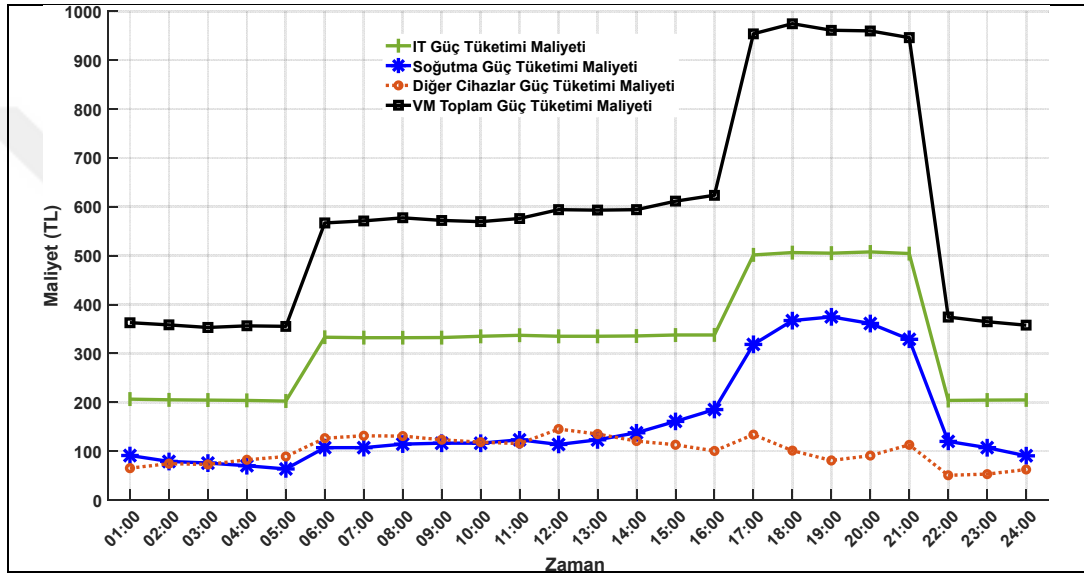
6.3.2. Analiz Sonuçları

Denklem 6.8 ile 6.11 arasındaki hesaplamalar MATLAB ortamında gerçekleştirilmiş ve sonuçlar Tablo 6.5’te gösterilmiştir. Buna göre veri merkezi toplam güç tüketim maliyeti üç zamanlı elektrik tarifi için 14.130 TL olarak hesaplanmıştır.

Tablo 6.5: Üç zamanlı elektrikli tarifiesi için hesaplanan maliyetler

$Cost_{grid}^{IT,ToU}$	7.845 TL
$Cost_{grid}^{AC,ToU}$	3.855 TL
$Cost_{grid}^{OD,ToU}$	2.430 TL
$Cost_{grid}^{DC,ToU}$	14.130 TL

Veri merkezi güç tüketimi maliyetinin zamana göre değişimi Şekil 6.8’de gösterilmiştir.



Şekil 6.8: Üç zamanlı elektrik tarifiesi ile hesaplanan güç tüketimi maliyeti.

Genel olarak maliyetlerin dalga şekli dikkate alındığında bunun üç zamanlı elektrik tarifesinin dalga şekli olduğu anlaşılmaktadır. Soğutma güç tüketimi maliyetinin minimum ve maksimum değeri arasındaki oran, IT güç tüketimi maliyetindeki orandan daha fazladır. Bunun sebebi soğutma güç tüketiminin elektrik fiyatının en yüksek olduğu zaman dilimlerinde diğer zamana göre daha fazla olmasıdır. IT güç tüketimi ise bütün zamanlarda neredeyse sabittir.

6.4. Senaryo 1: Üç Zamanlı Elektrik Tarifiesi Kullanılarak ve Yük Kaydırması Yapılarak Maliyet Hesabı

Bu bölümde yalnızca şebeke enerji kaynağı olarak kullanılmaktadır. Bu senaryoda üç zamanlı elektrik tarifiesiyle beraber Bölüm 6.1.2’de analiz edilen ve

Tablo 6.1’de verilen yük kaydırma oranları kullanılarak her “ t ” anı için IT güç tüketiminin zamanda kaydırılması yaklaşımı benimsenmiştir. Bölüm 6.1.5’te anlatıldığı üzere maksimum IT güç tüketim değeri, 01 Ocak 2022 için tahmin edilen IT güç tüketiminin yaklaşık 5 katıdır. Dolayısı ile elektrik fiyatının yüksek olduğu zamanlardan düşük olduğu zamanlara güç kaydırılması için oldukça büyük bir güç kapasitesi bulunmaktadır. Bölüm 6.4.1’de açıklanan matematiksel model, GAMS optimizasyon programında kullanılmış ve maliyeti minimize eden optimum çalışma planı belirlenmiştir.

6.4.1. Matematiksel Model

Bu senaryoda benimsenen optimizasyon amaç fonksiyonu, veri merkezi enerji tüketimi maliyetini minimize etmektedir ve (6.12)’de gösterilmektedir. Bu senaryoda soğutma ve diğer cihazlar güç taleplerinin her “ t ” anı için karşılanması zorunludur ve bu tüketimin zamanda kaydırılması söz konusu değildir. Dolayısıyla soğutma ve diğer cihazlar güç tüketim maliyeti, tahmin edilen güç tüketim değerleri ile üç zamanlı elektrik tarifesı kullanılarak sırasıyla (6.13) ve (6.14) denklemleriyle hesaplanmaktadır.

$$\min \{Cost_{grid}^{IT,LS} + Cost_{grid}^{AC,LS} + Cost_{grid}^{OD,LS}\} \quad (6.12)$$

$$Cost_{grid}^{AC,LS} = \sum_t P_{AC}^{est}(t) * \Delta t * M^{ToU}(t) \quad (6.13)$$

$$Cost_{grid}^{OD,LS} = \sum_t P_{OD}^{est}(t) * \Delta t * M^{ToU}(t) \quad (6.14)$$

IT güç tüketimi maliyeti ise her bir “ t ” anı için optimizasyon algoritmasının bulacağı yeni IT güç tüketimi olan $P_{ITnew}^{grid,LS}$,nin ve üç zamanlı elektrik tarifesı $M^{ToU}(t)$ ’nin kullanılması ile denklem (6.15)’teki gibi hesaplanmaktadır. Optimizasyon sonunda her “ t ” anı için bulunan yeni IT güç tüketiminin toplam değeriyle, tahmin edilen IT güç tüketimi toplamının birbirine eşit olması (6.16) kısıtı ile sağlanmaktadır. Böylelikle yük kaydırma yapıldıktan sonra bütün iş yükünün, optimizasyon periyodu olan 24 saatlik dilim içerisinde yapılması garanti edilmektedir.

Her “ t ” anı için yük kaydırma minimum ve maksimum sınırları kısıt (6.17)’de gösterilmiştir. Eşitsizliğin sol tarafı “ t ” anı için yapılması zorunlu IT iş yükü gücünü, sağ tarafı ise ilgili zaman diliminde IT ekipmanlarının kaldırabileceği maksimum güç miktarını belirlemektedir. Dolayısıyla her “ t ” anı için, belirlenen maksimum değere kadar diğer zamanlardan IT güç tüketimi kaydırılabilmektedir.

$$Cost_{grid}^{IT,LS} = \sum_t P_{ITnew}^{grid,LS}(t) * \Delta t * M^{ToU}(t) \quad (6.15)$$

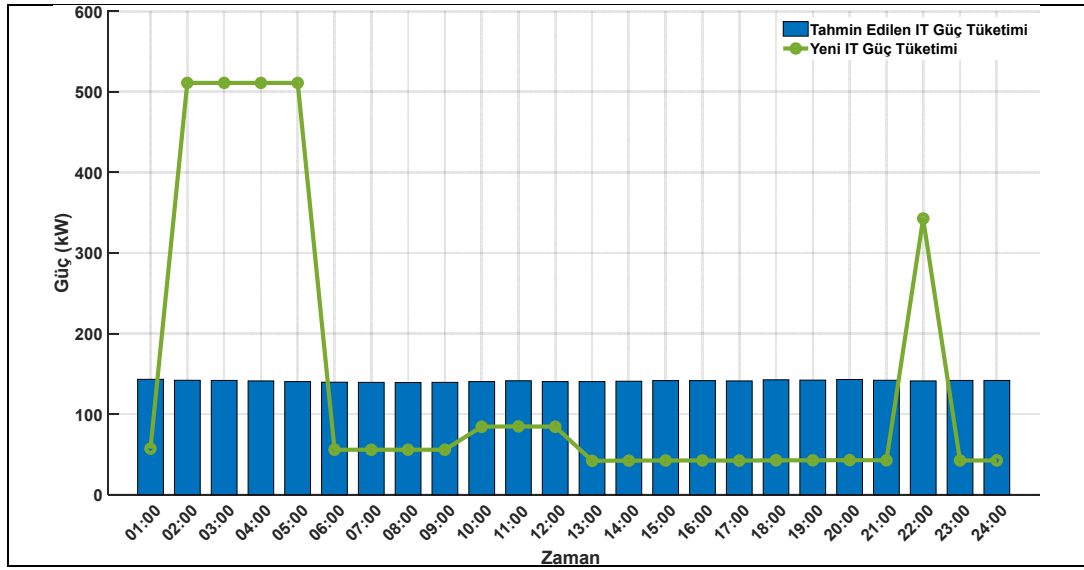
Kısıtlar:

$$\sum_t P_{IT}^{est}(t) = \sum_t P_{ITnew}^{grid,LS}(t) \quad (6.16)$$

$$\begin{aligned} 0.4 * P_{IT}^{est}(t) &\leq P_{ITnew}^{grid,LS}(t) \leq 0.7 * P_{IT}^{max}, & 1 \leq t \leq 9 \\ 0.6 * P_{IT}^{est}(t) &\leq P_{ITnew}^{grid,LS}(t) \leq 0.6 * P_{IT}^{max}, & 10 \leq t \leq 12 \\ 0.3 * P_{IT}^{est}(t) &\leq P_{ITnew}^{grid,LS}(t) \leq 0.5 * P_{IT}^{max}, & 13 \leq t \leq 20 \\ 0.3 * P_{IT}^{est}(t) &\leq P_{ITnew}^{grid,LS}(t) \leq 0.7 * P_{IT}^{max}, & 21 \leq t \leq 24 \end{aligned} \quad (6.17)$$

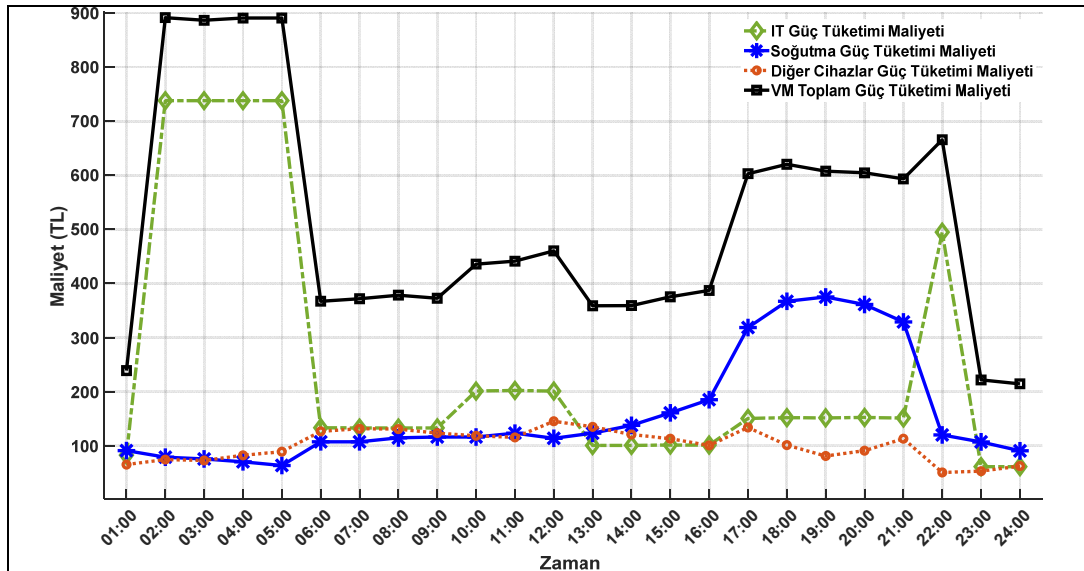
6.4.2. Analiz Sonuçları

Optimizasyon algoritmasının çalıştırılmasıyla 24 saatlik zaman dilimi için veri merkezi enerji maliyetini minimize eden yeni IT güç tüketimi planlaması yapılmaktadır. Üç zamanlı elektrik tarifi kullanılarak, IT yükünün zaman içerisinde kaydırılması ile her “ t ” anı için belirlenen yeni IT güç tüketimi planlaması Şekil 6.9’da verilmektedir. Yük kaydırma işleminin elektrik fiyatının pahalı olduğu zaman dilimlerinden ucuz olduğu zaman dilimlerine denklem (6.17)’deki kısıtlar göz önünde bulundurularak kaydırıldığı görülmektedir.



Şekil 6.9: Üç zamanlı elektrik tarifesi ve yük kaydırma yapıldığı durum için IT güç tüketimi planlaması.

Optimizasyon sonucunda elde edilen yeni IT güç tüketimi planı için enerji maliyeti 5.950 TL olarak hesaplanmıştır. Soğutma güç tüketimi maliyeti 3.854 TL, diğer cihazlar güç tüketimi maliyeti 2.431 TL olarak elde edilmiştir. Toplam maliyet ise 12.235 TL'dir. Ayrıca veri merkezi güç tüketimi maliyetinin zamana göre değişimi Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



Şekil 6.10: Veri merkezi enerji maliyeti.

6.5. Senaryo 2: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi ve Alternatif Enerji Kaynakları Kullanılarak Maliyet Hesabı

Bu senaryoda üç zamanlı elektrik tarifiesi kullanımına ek olarak veri merkezinin sahip olduğu diğer enerji kaynakları da optimizasyon algoritmasına dahil edilmiştir. Ancak bu senaryoda yük kaydırma işlemi yapılmamakta, veri merkezi IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç talebinin her “ t ” anında farklı enerji kaynaklarından karşılanması zorunludur. Bu bölümde şebekeye ek olarak Bölüm 6.1.3 ve 6.1.4’te detaylı bilgileri verilen bir adet dizel jeneratör ve 1 adet UPS, alternatif enerji kaynağı olarak kullanılmıştır.

6.5.1. Matematiksel Model

Optimizasyon algoritması veri merkezi enerji maliyetini minimize eden, her saat için hangi kaynaktan ne kadar güç tüketimi sağlanması gerektiğini gösteren 24 saatlik optimum çalışma planı oluşturmaktadır. Enerji maliyetini minimize eden amaç fonksiyonu (6.18)’te gösterilmektedir. Veri merkezi toplam enerji tüketim maliyeti; IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Talebi için şebekeden, jeneratörden ve UPS’ten sağlanan güç için hesaplanan maliyetlerin toplamıdır. Şebekeden sağlanan enerji maliyeti (6.19) ile (6.21) arasındaki denklemler, jeneratörden sağlanan enerji maliyeti ise (6.22) ile (6.27) arasındaki denklemlerle hesaplanmaktadır. İkili karar değişkenleri $U_{gen}^{IT}(t)$, $U_{gen}^{AC}(t)$ ve $U_{gen}^{OD}(t)$ jeneratörden güç sağlandığı durum için 1, sağlanmadığı durum için 0 değerlerini almaktadır. Jeneratörden IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar için sağlanan güç miktarına bağlı olarak jeneratörün harcadığı yakıt tüketimi, sırasıyla $C_{liter}^{IT}(t)$, $C_{liter}^{AC}(t)$, $C_{liter}^{OD}(t)$ ile gösterilmiştir. UPS’ten veri merkezine IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar için sağlanan gücün toplam maliyeti, bataryaları şarj etmek için şebekeden çekilen güç olan $P_{UPS}^{ch}(t)$ kullanılarak (6.28)’de hesaplanmaktadır.

$$\min\{Cost_{grid}^{IT} + Cost_{grid}^{AC} + Cost_{grid}^{OD} + Cost_{gen}^{IT} + Cost_{gen}^{AC} + Cost_{gen}^{OD} + Cost_{UPS}\} \quad (6.18)$$

$$Cost_{grid}^{IT} = \sum_t P_{grid}^{IT}(t) * \Delta t * M^{ToU}(t) \quad (6.19)$$

$$Cost_{grid}^{AC} = \sum_t P_{grid}^{AC}(t) * \Delta t * M^{ToU}(t) \quad (6.20)$$

$$Cost_{grid}^{OD} = \sum_t P_{grid}^{OD}(t) * \Delta t * M^{ToU}(t) \quad (6.21)$$

$$Cost_{gen}^{IT} = \sum_t C_{liter}^{IT}(t) * \Delta t * C_d * U_{gen}^{IT}(t) \quad (6.22)$$

$$C_{liter}^{IT}(t) = a * (P_{gen}^{IT}(t))^2 + b * P_{gen}^{IT}(t) + c, \quad \forall t \in Z \quad (6.23)$$

$$Cost_{gen}^{AC} = \sum_t C_{liter}^{AC}(t) * \Delta t * C_d * U_{gen}^{AC}(t) \quad (6.24)$$

$$C_{liter}^{AC}(t) = a * (P_{gen}^{AC}(t))^2 + b * P_{gen}^{AC}(t) + c, \quad \forall t \in Z \quad (6.25)$$

$$Cost_{gen}^{OD} = \sum_t C_{liter}^{OD}(t) * \Delta t * C_d * U_{gen}^{OD}(t) \quad (6.26)$$

$$C_{liter}^{OD}(t) = a * (P_{gen}^{OD}(t))^2 + b * P_{gen}^{OD}(t) + c, \quad \forall t \in Z \quad (6.27)$$

$$Cost_{UPS} = \sum_t P_{UPS}^{ch}(t) * \Delta t * M^{ToU}(t) \quad (6.28)$$

6.5.1.1. UPS Kısıtları

UPS bataryalarının şarj ve deşarj güçlerinin, minimum ve maksimum sınır değerleri (6.29)-(6.35) arasındaki eşitsizliklerde gösterilmiştir. Şarj gücünün her zaman pozitif değerde ve izin verilen maksimum değerden küçük olması (6.29) kısıtı ile sağlanmaktadır. Deşarj gücünün, katalog verilerine göre izin verilen minimum ve maksimum değer arasında olması (6.30) ile (6.35) arasındaki kısıtlarla garanti edilmektedir.

$$0 \leq P_{UPS}^{ch}(t) \leq P_{UPS}^{ch,max} * U_{ch}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.29)$$

$$P_{UPS}^{IT,disCh}(t) \leq P_{UPS}^{disCh,max} * U_{disCh}^{IT}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.30)$$

$$P_{UPS}^{IT,disCh}(t) \geq P_{UPS}^{disCh,min} * U_{disCh}^{IT}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.31)$$

$$P_{UPS}^{AC,disCh}(t) \leq P_{UPS}^{disCh,max} * U_{disCh}^{AC}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.32)$$

$$P_{UPS}^{AC,disCh}(t) \geq P_{UPS}^{disCh,min} * U_{disCh}^{AC}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.33)$$

$$P_{UPS}^{OD,disCh}(t) \leq P_{UPS}^{disCh,max} * U_{disCh}^{OD}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.34)$$

$$P_{UPS}^{OD,disCh}(t) \geq P_{UPS}^{disCh,min} * U_{disCh}^{OD}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.35)$$

UPS'in şarj vedeşarj durumlarını belirlemek için ikili karar değişkenleri kullanılmaktadır. Şarj durumunda $U_{ch}(t)$ 1 değerini almakta,deşarj durumunda ise $U_{disCh}^{IT}(t), U_{disCh}^{AC}(t)$ veya $U_{disCh}^{OD}(t)$, 1 değerini almaktadır. Aynı anda şarj vedeşarj durumunu önlemek için (6.36) ile (6.38) arasındaki kısıtlar kullanılmaktadır. Her “ t ” anında IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar güç talebinin UPS'ten sağlanma durumunda, UPS'ten sağlanabilecek güç sınırı (6.39) kısıtı ile belirlenmektedir.

$$U_{ch}(t) + U_{disCh}^{IT}(t) \leq 1, \quad \forall t \in Z \quad (6.36)$$

$$U_{ch}(t) + U_{disCh}^{AC}(t) \leq 1, \quad \forall t \in Z \quad (6.37)$$

$$U_{ch}(t) + U_{disCh}^{OD}(t) \leq 1, \quad \forall t \in Z \quad (6.38)$$

$$P_{UPS}^{IT,disCh}(t) + P_{UPS}^{AC,disCh}(t) + P_{UPS}^{OD,disCh}(t) \leq P_{UPS}^{disCh,max}, \quad \forall t \in Z \quad (6.39)$$

UPS batarya enerjisi optimizasyon periyodu başlangıcında ($t=0$) ve bitişinde ($t=24$) aynı enerji seviyesine sahiptir ve bu enerji derin şarjı önlemek amacıyla belirlenen, minimum batarya enerjisine eşittir. Bu durum (6.40) ile (6.42) arasındaki kısıtlarla ifade edilmiştir. Her “ t ” anı için UPS bataryalarından sağlanabilecek minimum ve maksimum enerji miktarı (6.43) kısıtı ile sağlanmaktadır. Bu sınırlar toplam batarya enerjisinin %20'si ile %80'i olacak şekilde ayarlanmıştır. UPS bataryalarındaki her “ t ” anındaki enerji durumu ($SoE_{UPS}(t)$), şarj-deşarj durumuna göre, şarj enerjisi ile ($t-1$) anındaki batarya enerjisinin ($SoE_{UPS}(t-1)$) toplanarak veyadeşarj enerjisinin, ($t-1$) anındaki batarya enerjisinden çıkarılmasıyla bulunur. Bu işlem (6.44) kısıtı ile sağlanmaktadır.

$$SoE_{UPS}(t) = SoE_{UPS}^{init}, \quad t = 0 \quad (6.40)$$

$$SoE_{UPS}(t) = SoE_{UPS}^{init}, \quad t = 24 \quad (6.41)$$

$$SoE_{UPS}^{init} = SoE_{UPS}^{min} \quad (6.42)$$

$$SoE_{UPS}^{min} \leq SoE_{UPS}(t) \leq SoE_{UPS}^{max}, \quad \forall t \in Z \quad (6.43)$$

$$SoE_{UPS}(t) = SoE_{UPS}(t-1) + \Delta t * \gamma_{ch} * P_{UPS}^{ch}(t) - \Delta t * \left[\frac{P_{UPS}^{IT,disCh}(t)}{\gamma_{disCh}} + \frac{P_{UPS}^{AC,disCh}(t)}{\gamma_{disCh}} + \frac{P_{UPS}^{OD,disCh}(t)}{\gamma_{disCh}} \right], \quad (6.44)$$

$$\forall t \in Z$$

6.5.1.2. Jeneratör ve Güç Dengesi Kısıtları

Bu senaryoda yük kaydırma vb. bir yaklaşım kullanılmadığı için, tahmin edilen IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar güç tüketimi miktarının, her bir “t” zamanı için şebekeden, jeneratörden ve UPS’ten sağlanan güç tüketimine eşit olması gerekmektedir. Bu durum (6.45) ile (6.47) arasındaki kısıtlarla sağlanmaktadır. Böylelikle optimizasyon öncesinde her “t” anı için belirlenmiş olan veri merkezi güç talebinin, optimizasyon sonrasında farklı enerji kaynakları kullanılarak karşılanması garanti edilmektedir. Ayrıca herhangi bir acil durum sebebi ile şebekeden enerji sağlanamaması durumu için, veri merkezinin sahip olduğu jeneratör kapasitesinin her “t” anı için ihtiyaç duyulan bütün güç talebine yetiyor olması, (6.49) kısıtı ile sağlanmaktadır. Şebekeden sağlanan güç tüketiminin her “t” anı için pozitif değerde olması (6.48) kısıtı ile sağlanmaktadır.

$$P_{IT}^{est}(t) = P_{grid}^{IT}(t) + P_{gen}^{IT}(t) + P_{UPS}^{IT,disCh}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.45)$$

$$P_{AC}^{est}(t) = P_{grid}^{AC}(t) + P_{gen}^{AC}(t) + P_{UPS}^{AC,disCh}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.46)$$

$$P_{OD}^{est}(t) = P_{grid}^{OD}(t) + P_{gen}^{OD}(t) + P_{UPS}^{OD,disCh}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.47)$$

$$0 \leq P_{grid}^{IT}(t), P_{grid}^{AC}(t), P_{grid}^{OD}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.48)$$

$$\begin{aligned}
& P_{grid}^{IT}(t) + P_{gen}^{IT}(t) + P_{UPS}^{IT,disCh}(t) + P_{grid}^{AC}(t) + P_{gen}^{AC}(t) \\
& + P_{UPS}^{AC,disCh}(t) + P_{grid}^{OD}(t) + P_{gen}^{OD}(t) + P_{UPS}^{OD,disCh}(t) \\
& \leq P_{gen}^{capacity}, \quad \forall t \in Z
\end{aligned} \tag{6.49}$$

IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç talebi için jeneratörden sağlanan gücün her zaman pozitif değerde olması, belirlenen maksimum güç kapasitesinden küçük olması (6.50) ile (6.52) arasındaki kısıtlarla sağlanmaktadır. Ayrıca bütün güç taleplerinin aynı anda jeneratörden sağlandığı durum için (6.53) kısıtı kullanılmaktadır. Optimizasyon periyodu boyunca jeneratörden sağlanabilecek güç için harcanan toplam yakıt miktarının, jeneratörün sahip olduğu yakıt tankı kapasitesinden az olması gerekmektedir. Bu durum kısıt (6.54) ile sağlanmaktadır.

$$0 \leq P_{gen}^{IT}(t) \leq P_{gen}^{max}, \quad \forall t \in Z \tag{6.50}$$

$$0 \leq P_{gen}^{AC}(t) \leq P_{gen}^{max}, \quad \forall t \in Z \tag{6.51}$$

$$0 \leq P_{gen}^{OD}(t) \leq P_{gen}^{max}, \quad \forall t \in Z \tag{6.52}$$

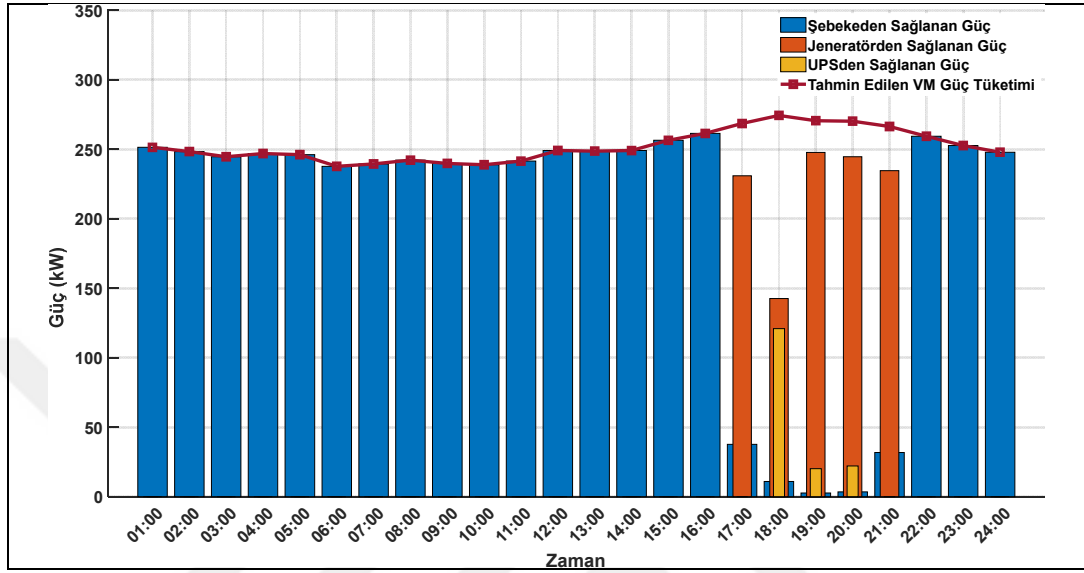
$$P_{gen}^{IT}(t) + P_{gen}^{AC}(t) + P_{gen}^{OD}(t) \leq P_{gen}^{max}, \quad \forall t \in Z \tag{6.53}$$

$$\sum_t C_{liter}^{IT}(t) + C_{liter}^{AC}(t) + C_{liter}^{OD}(t) \leq C_{gen}^{Tank} \tag{6.54}$$

6.5.2. Analiz Sonuçları

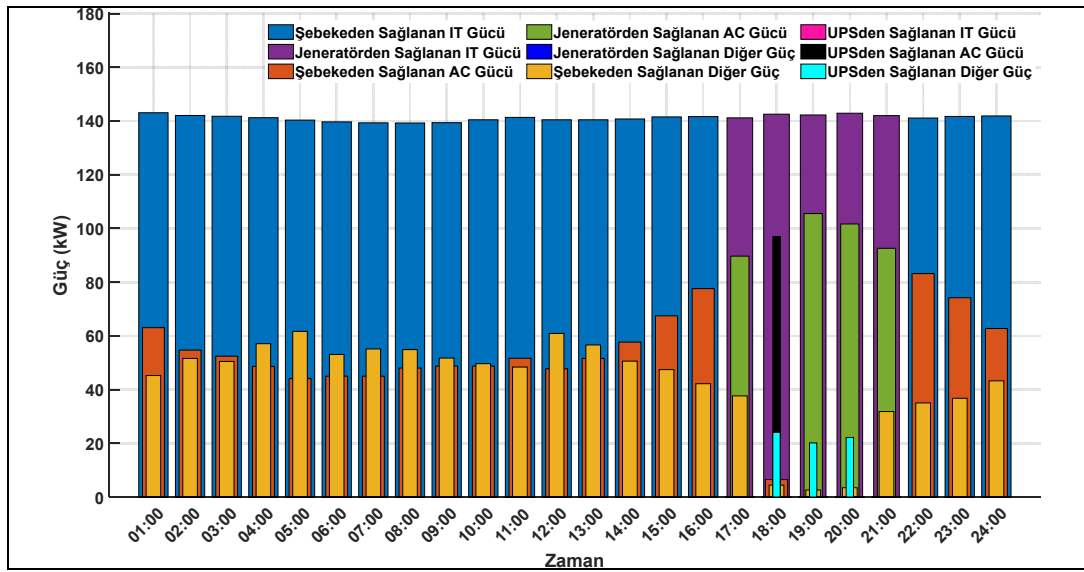
Bu senaryoda IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar güç talebi; enerji kaynağı olarak şebeke, jeneratör ve UPS kullanılarak karşılanmış ve toplam enerji maliyeti minimize edilmiştir. Optimizasyon problemi GAMS yazılımı ve BONMIN çözücüsü kullanılarak karışık tam sayı doğrusal olmayan programlama yöntemi (mixed integer nonlinear programming-MINLP) ile çözülmüştür. Çözüm sonunda veri merkezi toplam maliyeti 13.340TL olarak hesaplanmıştır. Veri merkezi enerji maliyetini minimize eden enerji kaynaklarının optimum kullanım planı Şekil 6.11'de gösterilmektedir. 24 saatlik optimizasyon periyodu için saatlik olarak hangi enerji kaynağından ne kadar gücün temin edilmesi gerektiği çubuk grafiklerle gösterilmiştir.

Veri merkezi toplam güç talebi bordo çizgi grafik ile gösterilmiştir. Optimizasyon algoritması elektrik fiyatının en pahalı olduğu puant zaman diliminde ana enerji kaynağı olarak UPS ve Jeneratörü kullanmakta, arta kalan ihtiyacı ise şebekeden sağlamaktadır



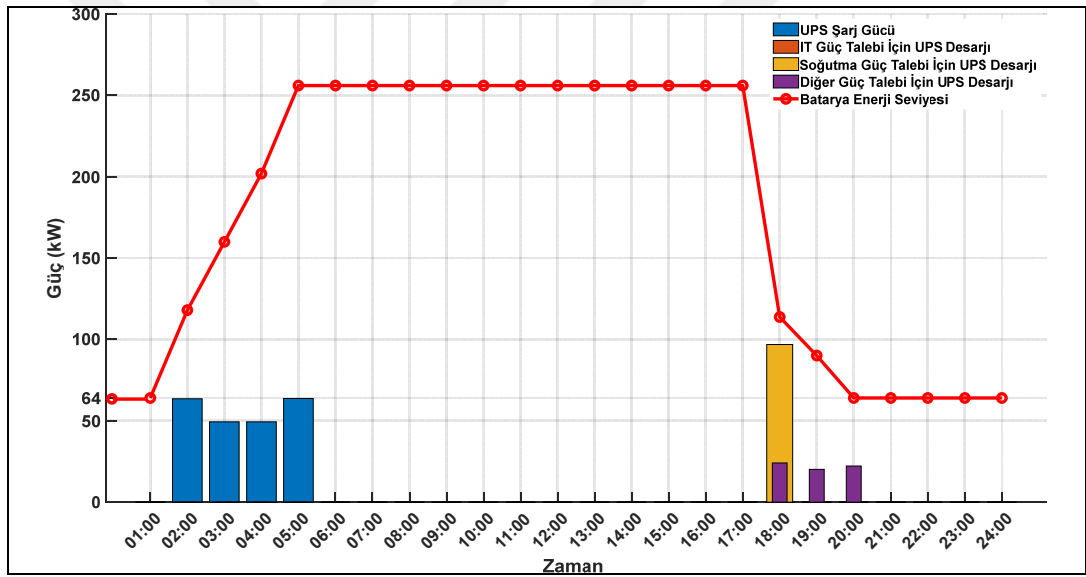
Şekil 6.11: Senaryo 2 için kaynaklara göre veri merkezi enerji yönetim planı.

IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar güç talebi için şebekeden, jeneratörden ve UPS'den sağlanan güç miktarları detaylı olarak Şekil 6.12'de gösterilmiştir.



Şekil 6.12: Kaynaklara ve tüketim cinsine göre enerji yönetim planı.

Puant zaman diliminde veri merkezi güç talebini karşılamak için kullanılan jeneratörden sağlanan enerji ile UPS'ten sağlanan enerji incelendiğinde, jeneratörün çok daha fazla güç talebini karşıladığı görülmektedir. Optimizasyon periyodu boyunca saatlik UPS şarj – deşarj durumu ve UPS batarya enerji durumu Şekil 6.13'te gösterilmiştir. UPS'in şarj olma durumu mavi çubuk grafikte, UPS'in enerji kaynağı olarak kullanılması durumu olan deşarj durumu turuncu, mor ve sarı çubuk grafikte gösterilmiştir. UPS batarya enerji durumu ise kırmızı çizgi grafikte gösterilmiştir. Optimizasyon başlangıç anında minimum enerji seviyesinde olan UPS bataryaları, elektrik fiyatının diğer zaman dilimlerinden daha ucuz olduğu 02.00-05.00 aralığında şarj edilmiştir. Şarj işlemi sonucunda batarya enerji miktarı izin verilen maksimum seviyeye gelmiş ve bu enerji, elektrik fiyatının daha pahalı olduğu zaman dilimlerinde kullanılmıştır.



Şekil 6.13: Senaryo 2 için UPS şarj - deşarj durumu.

6.6. Senaryo 3: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi, Alternatif Enerji Kaynakları Kullanılarak ve Yük Kaydırması Yapılarak Maliyet Hesabı

Bu senaryoda, Senaryo 2'deki yaklaşıma ek olarak IT güç tüketiminin zamanda kaydırılması yaklaşımı da benimsenmiştir. Tahmin edilen soğutma ve diğer cihazlar güç talebi, her “t” anı için şebeke, jeneratör veya UPS olmak üzere herhangi bir enerji kaynağından o anda karşılanmak zorundadır. IT güç talebi ise zamanda

kaydırılabilmekte ve herhangi bir “t” anında şebeke, jeneratör veya UPS’ten sağlanan enerji ile karşılanabilmektedir.

6.6.1. Matematiksel Model

Bu senaryoda, Senaryo 2’de yer alan denklem ve kısıtlara ek olarak yük kaydırma ile alakalı kısıtlar da kullanılmıştır. Veri merkezi toplam enerji maliyetini minimize eden amaç fonksiyonu, IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Talebi için hesaplanan şebeke, jeneratör ve UPS maliyetlerinden oluşmakta ve Senaryo 2’de (6.18)’de gösterilen amaç fonksiyonu ile aynıdır. Şebekeden sağlanan güç için maliyet (6.19)-(6.21) arasındaki denklemlerle, jeneratörden sağlanan enerji maliyeti (6.22)-(6.27) arasındaki denklemlerle, UPS maliyeti ise (6.28)’deki denklemle hesaplanmaktadır.

6.6.1.1. Yük Kaydırma ve Güç Dengesi Kısıtları

Her “t” zamanı için tahmin edilen soğutma ve diğer cihazlar güç talebinin, şebekeden, jeneratörden ve UPS’ten sağlanan güç miktarına eşit olması ve güç talebinin o anda karşılanması gerekmektedir. Bu durum Senaryo 2’de yer alan (6.46) ve (6.47)’deki kısıtların kullanılmasıyla sağlanmaktadır. Ancak (6.45)’de yer alan IT güç tüketimi ile alakalı güç dengesi kısıtı bu senaryoda kullanılmamaktadır. Onun yerine (6.55) kısıtı kullanılmıştır. Bu kısıt, IT güç tüketiminin zamanda kaydırılmasına olanak sağlayarak, her bir “t” anı için şebekeden, jeneratörden ve UPS’ten karşılanacak yeni IT güç tüketiminin optimizasyon periyodu sonundaki toplamının, tahmin edilen IT güç tüketiminin toplamına eşit olmasını sağlamaktadır. Böylelikle gelen iş yükünün optimizasyon periyodu içerisinde gerçekleştirilmesi garantilenmektedir. Her “t” anı için yeni IT güç tüketimi değeri $P_{ITnew}(t)$, şebekeden, jeneratörden ve UPS’ten sağlanan güç miktarı toplamıdır ve (6.56)’da gösterilmektedir. Yük kaydırma sınırları “t” zamanı için (6.57) ile belirlenmektedir. Şebekeden karşılanan gücün her zaman pozitif değerde olması (6.58) kısıtı ile sağlanmaktadır. Herhangi bir t anında meydana gelebilecek acil durumlarda, veri merkezi enerji talebini var olan jeneratör kapasitesinin karşılayabilmesi (6.49)’da yer alan kısıtla sağlanmaktadır.

$$\sum_t P_{IT}^{est}(t) = \sum_t P_{ITnew}(t) \quad (6.55)$$

$$P_{ITnew}(t) = P_{grid}^{IT}(t) + P_{gen}^{IT}(t) + P_{UPS}^{IT,disCh}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.56)$$

$$\begin{aligned} 0.4 * P_{IT}^{est}(t) &\leq P_{ITnew}(t) \leq 0.7 * P_{IT}^{max}, & 1 \leq t \leq 9 \\ 0.6 * P_{IT}^{est}(t) &\leq P_{ITnew}(t) \leq 0.6 * P_{IT}^{max}, & 10 \leq t \leq 12 \\ 0.3 * P_{IT}^{est}(t) &\leq P_{ITnew}(t) \leq 0.5 * P_{IT}^{max}, & 13 \leq t \leq 20 \\ 0.3 * P_{IT}^{est}(t) &\leq P_{ITnew}(t) \leq 0.7 * P_{IT}^{max}, & 21 \leq t \leq 23 \\ 0.3 * P_{IT}^{est}(t) &\leq P_{ITnew}(t) \leq 0.7 * P_{IT}^{max}, & t = 24 \end{aligned} \quad (6.57)$$

$$0 \leq P_{grid}^{IT}(t), P_{grid}^{AC}(t), P_{grid}^{OD}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.58)$$

6.6.1.2. UPS Kısıtları

Senaryo 3'te kullanılan UPS kısıtları Senaryo 2'de kullanılan kısıtlarla aynıdır. UPS bataryalarının şarj gücünün sınırları Senaryo 2'de yer alan (6.29) kısıtıyla belirlenmektedir. IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Talebi için UPS'ten sağlanacak güçlerin minimum ve maksimum sınır değerleri (6.30) ile (6.35) arasındaki kısıtlar kullanılarak belirlenmektedir. Her t anı için, bütün güç taleplerinin aynı anda UPS'ten sağlanması durumunda, UPS'ten sağlanabilecek maksimum güç (6.39) kısıtıyla belirlenmektedir. Aynı anda şarj-deşarj durumunu engellemek için Senaryo 2'de yer alan (6.36) ile (6.38) arasındaki kısıtlar kullanılmıştır. Batarya enerji yönetimi ise (6.40) ile (6.44) arasındaki kısıtlar kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

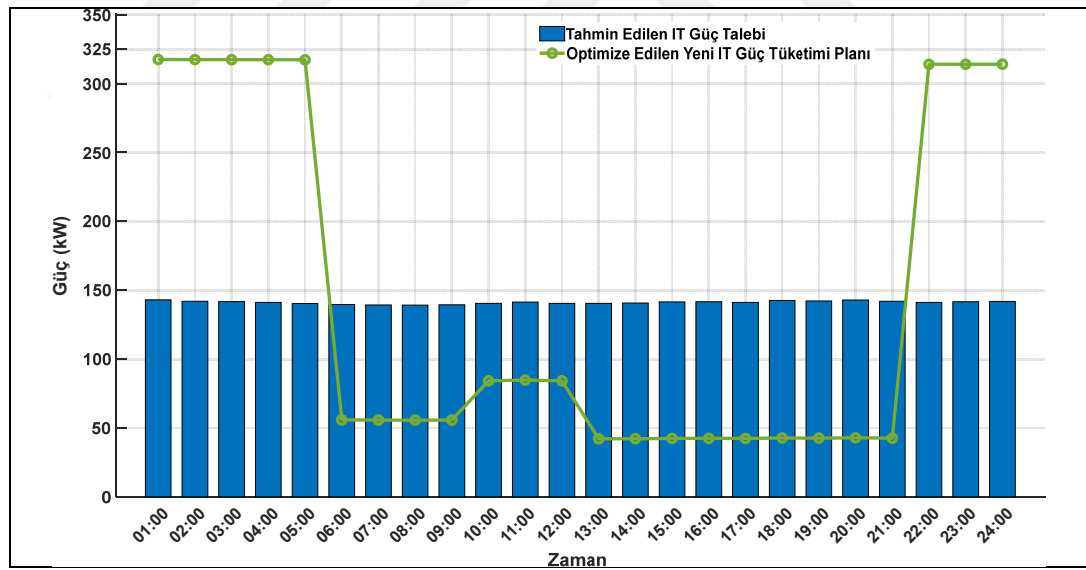
6.6.1.3. Jeneratör Kısıtları

Senaryo 2'de kullanılan (6.50) ile (6.52) arasındaki kısıtlar, bu senaryoda da jeneratörden sağlanabilecek gücün minimum ve maksimum sınırlarını belirlemek için kullanılmıştır. Her “t” anında IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Talebinin aynı anda jeneratörden sağlanması durumu için, toplam güç talebi değerinin jeneratörden sağlanabilecek maksimum güç değerinden düşük olması gerekmektedir.

Bu durum (6.53) kısıtı kullanılarak sağlanmaktadır. Ayrıca optimizasyon periyodu boyunca jeneratörden sağlanabilecek güç için harcanan toplam yakıt miktarının, jeneratörün sahip olduğu yakıt tankı kapasitesinden az olması gerekmektedir. Bu durum (6.54)'de yer alan kısıt ile sağlanmaktadır.

6.6.2. Analiz Sonuçları

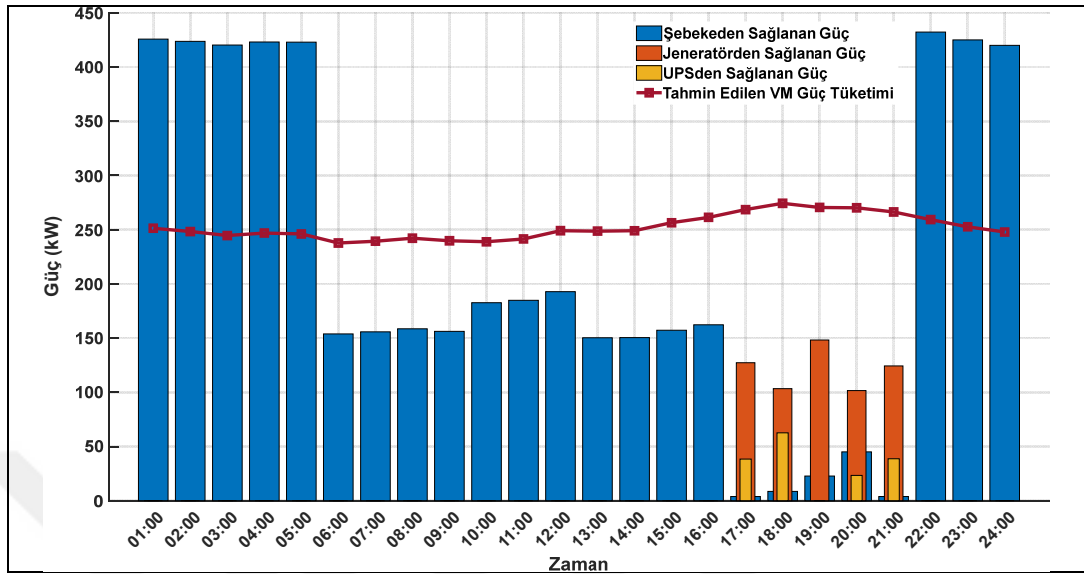
Bölüm 6.6.1'de tanımlanan optimizasyon problemi GAMS programı ve Bonmin çözücüsü kullanılarak çözüldüğünde veri merkezi toplam enerji maliyeti 11.745 TL olmaktadır. Yük kaydırma stratejisinin belirlendiği optimizasyon süreci sonunda yeni elde edilen IT güç tüketimi planlaması Şekil 6.14'te yer almaktadır. Optimizasyon öncesinde bütün zaman dilimlerinde neredeyse aynı IT güç tüketimi miktarı gözlenirken, optimizasyondan sonra (6.57)'deki yük kaydırma kısıtlarına göre IT güç tüketiminin elektrik fiyatının pahalı olduğu zamanlardan, ucuz olduğu zamanlara kaydırıldığı görülmektedir.



Şekil 6.14: Optimizasyon sonrası yeni IT güç tüketimi planlaması.

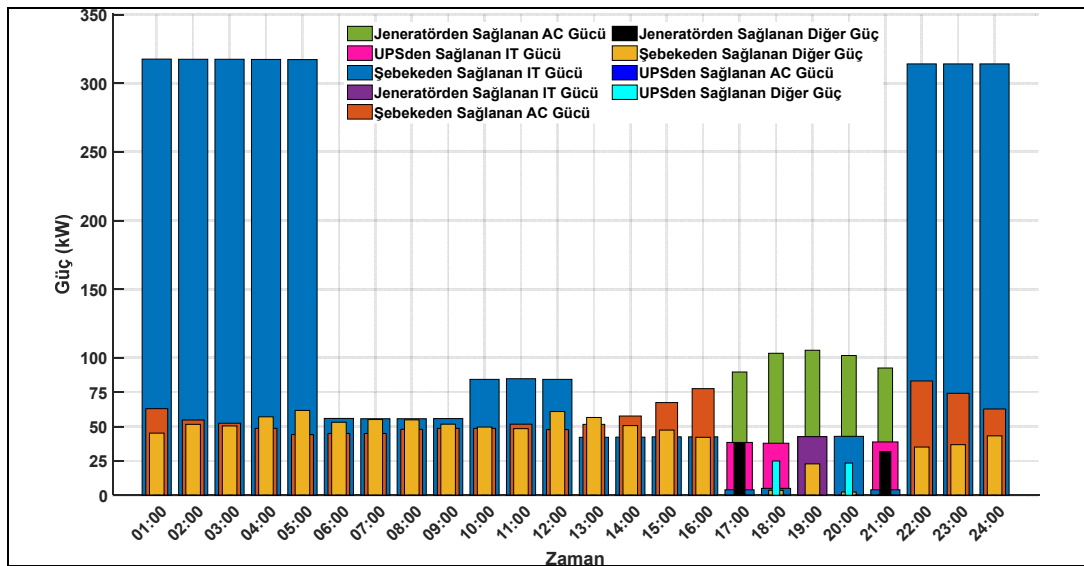
Veri merkezi güç talebinin karşılanması için, optimizasyon algoritmasının enerji kaynaklarına göre önerdiği yeni güç planı Şekil 6.15'te yer almaktadır. Şekilden görüldüğü gibi elektrik fiyatının en pahalı olduğu puant zaman diliminde şebeke yerine jeneratör ve UPS ana güç kaynağı olarak kullanılmış, diğer zamanlarda ise yalnızca

şebeke kullanılmıştır. IT güç tüketiminin zamanda kaydırılması toplam güç tüketiminin de zaman içerisindeki değişimini etkilemiştir.



Şekil 6.15: Senaryo 3 için kaynaklara göre veri merkezi enerji yönetim planı.

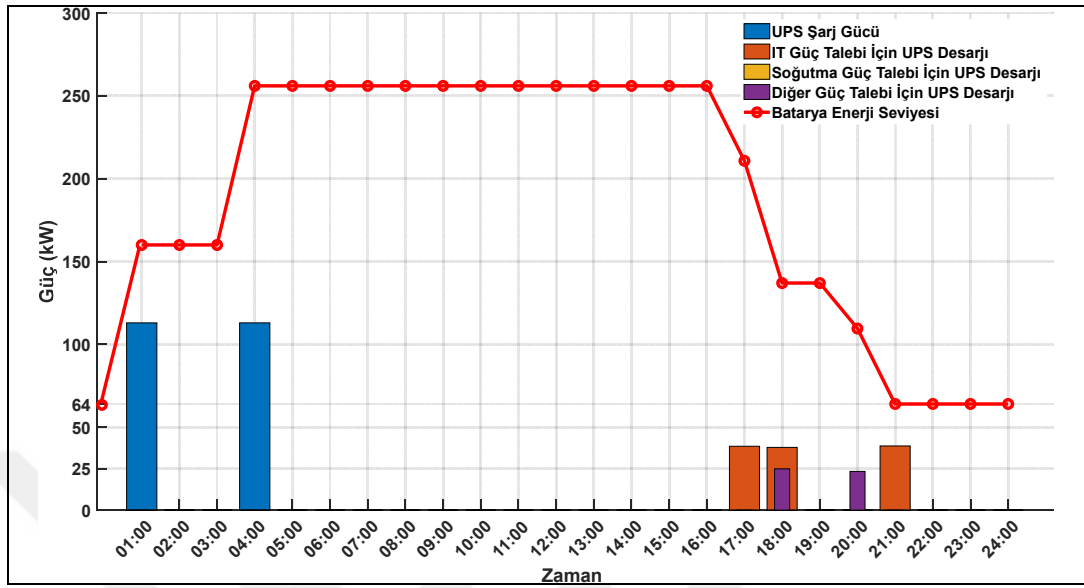
Optimizasyon algoritmasının her “t” anı için, IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Talebini karşılamak için belirlediği enerji yönetim planı, kaynaklara göre detaylı olarak Şekil 6.16’da gösterilmiştir.



Şekil 6.16: Kaynaklara ve tüketim cinsine göre enerji yönetim planı.

Şekil 6.17’de UPS’in şarj ve deşarj olduğu zamanlar ve güç miktarı ile batarya enerji durumu gösterilmektedir. İzin verilen minimum enerji seviyesi ile optimizasyon

sürecine başlayan UPS, elektrik fiyatının düşük olduğu 01.00 ve 04.00 saatlerinde şarj olmuştur. Elektrik fiyatlarının pahalı olduğu zaman diliminde ise deşarj olmuştur.



Şekil 6.17: Senaryo 3 için UPS şarj - deşarj durumu.

6.7. Senaryo 4: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi, Alternatif Enerji Kaynakları, Yük Kaydırma Yöntemi ve Termal Enerji Depolama Kullanılarak Maliyet Hesabı

Enerjinin termal olarak depolanmasının talep tarafı yönetim aracı olarak kullanılması, literatürde uzun yıllardır var olan etkili ve efektif bir yöntemdir. Özellikle termostat kontrolü mümkün olan klimalar ve soğutma için kullanılan su tankları, talebin yönetilmesi ve zamanda kaydırılması açısından oldukça elverişli yük tipleridir. Veri merkezlerinde yer alan büyük ölçekli soğutma üniteleri ve su tankları, hem veri merkezi iç sıcaklığının diğer kullanıcı tiplerine göre daha özgürce değiştirilebilir olması hem de yüksek enerji tüketim karakteristiği açısından Talep Tarafı Yönetimine katılım için oldukça elverişlidir. Senaryo 3'e ek olarak, soğutma gücünün de sıcaklık ayarlamaları ile zamanda kaydırılmasının optimizasyon algoritmasına dahil edildiği bu senaryonun temel prensibi, enerjinin termal olarak depolanması yaklaşımıdır. Veri merkezinin iç ortam sıcaklığının izin verilen sınırlar aralığında soğutulmuş veya ısınmasına izin verilerek, soğutma için harcanacak gücün zaman içerisinde kaydırılması yaklaşımı benimsenmiştir. Ayrıca veri merkezinde bulunan ve acil durumlarda veri merkezinin soğutma ihtiyacını karşılamak amacıyla

devreye giren su tankı, termal enerji depolama aracı olarak kullanılmıştır. Belirlenen optimizasyon periyodu içerisinde, saatlik aralıklarla veri merkezi iç ortam sıcaklığı ve su tankındaki su sıcaklığı, maliyeti minimize edecek şekilde ayarlanmaktadır. Veri merkezinin efektif olarak çalışması için Amerikan Isıtma, Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Birliğinin (ASHRAE) belirlemiş olduğu tavsiye edilen iç ortam sıcaklığı minimum 18°C, maksimum 27°C'dir[149]. Bu sıcaklıklar ASHRAE'nin veri merkezi karakteristiğine göre ayırmış olduğu A1, A2, A3 ve A4 sınıflarındaki veri merkezleri için genel sıcaklık aralığıdır. Ancak kurumsal sunucular ve depolama ünitelerinin yer aldığı A1 sınıfı için (Tez kapsamında çalışılan veri merkezi bu sınıfta yer almaktadır) izin verilen sıcaklık aralığı, 15°C ile 32°C arasındadır [149],[150]. Ayrıca sunucularda yer alan CPU ve RAM gibi yarı iletken malzemelerin maksimum sıcaklık değerleri 70°C ile 85°C arasındadır [151],[152]. Dolayısıyla veri merkezi sıcaklığını bu aralıklar arasında değiştirmek mümkündür. Veri merkezi soğutma ünitelerinin ve su tankının optimizasyon algoritmasına entegre edilmesi için öncelikle veri merkezinin termal modelinin oluşturulması ve iç ortam sıcaklığını etkileyen faktörlerin analiz edilmesi gerekmektedir.

6.7.1. Veri Merkezi Termal Modeli

Isı transferi ve ortam sıcaklığı hesaplamaları için kullanılan en temel formül, $Q = m * c * \Delta T$ denklemidir. Herhangi bir maddeye veya maddeden transfer edilen ısı miktarı Q ile gösterilmektedir. Maddenin kütlesi m ile, maddenin olduğu materyalin spesifik ısı kapasitesi c ile gösterilmektedir. ΔT ise maddenin üzerindeki son sıcaklık değerinden ilk sıcaklık değerinin çıkarılmasıyla elde edilen sıcaklık değişimidir[153]. Genel olarak ısı transferini içeren [153]–[156]'da yer alan termodinamik denklemleri kullanılarak bu senaryo için ihtiyaç duyulan ısı transferi denklemleri elde edilmiştir. Veri merkezi iç ortam sıcaklığı değişimi için gerekli ısı transferi denklemi (6.59) ile gösterilmiştir.

$$q^{air} = M_{air}^{DC} * C_{air}^{DC} * \frac{dT^{DC}(t)}{dt} \quad (6.59)$$

Veri Merkezi iç ortam hava kütlesi M_{air}^{DC} ile, bu havanın özgül ısı kapasitesi C_{air}^{DC} ile gösterilmiştir. Veri merkezi iç ortam sıcaklığı değişimi $dT^{DC}(t)/dt$ ile, bu değişim için gerekli olan ısı miktarı ise $q^{air}(kW)$ ile gösterilmiştir. Veri merkezinde gerçekleşen ısı transferi hesaplamaları ve güç dengesi (6.60) ile (6.63) arasındaki denklemlerle ifade edilmiştir [153]–[155] Veri merkezi iç ortam sıcaklığını etkileyen parametrelerden ilki, dış ortam ile veri merkezi iç ortamı arasında gerçekleşen ısı transferi q_{wall}^{out} , ikincisi veri merkezindeki toplam IT kabinlerinin sebep olduğu ısı transferi miktarı q^{IT} ve sonuncusu ise soğutma için sağlanan ısı miktarıdır. Veri merkezinde soğutma ünitelerinden sağlanan soğutma miktarı q^{AC} ile termal enerji depolama (TES) tankı kullanılarak sağlanan soğutma miktarı ise q^{TES} ile gösterilmiştir. Denklem (6.6)'da yer alan bütün değişkenlerin birimleri “kW” olacak şekilde gerekli dönüşümler yapılarak güç dengesi eşitliği sağlanmıştır.

$$q_{air} = q_{wall}^{out} + q^{IT} - (q^{AC} + q^{TES}) \quad (6.60)$$

$$q_{wall}^{out} = \frac{k_{wall}}{L_{wall}} * A_{wall} * (T^{out} - T^{DC}) \quad (6.61)$$

$$q^{AC} = m_{AC}^{DC} * C_{air}^{DC} * [T^{DC} - T^{AC}] \quad (6.62)$$

$$q^{TES} = M_{water}^{TES} * C_{water} * \frac{T^{DC} - T^{TES}}{\Delta t} \quad (6.63)$$

Kararlı hal tek yönlü dış ortam ile iç ortam arasındaki duvarlar vasıtasıyla gerçekleşen ısı transferi hesabı (6.61)'da gösterilmiştir[153]. Dış ortam sıcaklığı $T^{out}(t)$ ile, duvarın termal iletkenlik katsayısı ve kalınlığı sırasıyla k_{wall} ve L_{wall} ile gösterilmiştir. Isı transferinin gerçekleştiği toplam duvar alanı ise A_{wall} ile gösterilmiştir. Soğutma ünitesinden gelen havanın sıcaklığı T^{AC} , Soğutma ünitesinden gelen hava kütlesi akış hızı m_{AC}^{DC} ile gösterilmiştir. Termal enerji depolama için kullanılan su tankındaki su kütlesi M_{water}^{TES} ile, suyun özgül ısı kapasitesi C_{water} ile ve su sıcaklığı T^{TES} ile gösterilmiştir.

Denklem (6.60)'i kullanarak termal gücü talep tarafı yönetimine dahil edebilmek için, (6.62) ve (6.63) denklemlerinin soğutma için harcanan güç cinsinden ifade edilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Denklem (6.62) aynı zamanda soğutma üniteleri ile veri merkezi iç ortamı arasında olan ısı transferini ifade ettiği için, soğutma

ünitelerinin performans katsayısı olan COP (Coefficient of Performance) yardımıyla denklemi (6.64)'de görüldüğü gibi dönüştürmek mümkündür[155],[157], [158].

$$m_{AC}^{DC} * C_{air}^{DC} * [T^{DC} - T^{AC}] = P_{AC} * COP \quad (6.64)$$

Ayrıca enerjinin termal olarak depolanması için su sıcaklığı değişimlerinin kullanıldığı su tankını, sanki bir UPS gibi düşünmek mümkündür. Böylelikle şarj ve deşarj olma durumlarına göre enerji yönetimi yapılabilmektedir. Şarj durumu, (t-1) anındaki su sıcaklığı değerinin, (t) anına kadar daha düşük değere getirilmesidir. Böylelikle enerji, suyu soğutarak depolanmaktadır. Deşarj durumunda ise (t-1) anındaki sıcaklık değerinin, (t) anına kadar yükselmesi sağlanarak, aradaki sıcaklık farkına karşılık gelen enerji miktarının kullanılması sağlanmaktadır. Bu durum denklem (6.65) ile gösterilmiştir[107].

$$\begin{aligned} M_{water}^{TES} * C_{water} * [T^{TES}(t) - T^{TES}(t-1)] \\ = P_{TES}^{disCh} * \Delta t - P_{TES}^{Ch} * COP * \Delta t \end{aligned} \quad (6.65)$$

Su tankının içerisindeki su sıcaklığı $T^{TES}(t)$ ile gösterilmiştir. Su tankını şarj etmek için harcanan güç tüketimi P_{TES}^{Ch} , su tankının deşarj olmasıyla ortama sağlamış olduğu güç miktarı ise P_{TES}^{disCh} ile ifade edilmiştir. Deşarj gücü soğutma için kullanılabilecek güç miktarını temsil ettiği için (6.63)'teki ifadeyi (6.66)'daki gibi dönüştürmek mümkündür.

$$M_{water}^{TES} * C_{water} * \frac{T^{DC} - T^{TES}}{\Delta t} = P_{TES}^{disCh} \quad (6.66)$$

Bütün bu dönüşümler (6.60)'daki denklemde yerine yazıldığında elde edilen yeni denklem (6.67)'de gösterilmiştir. Bu denklemle veri merkezinin iç ortam sıcaklığının optimum değerde sabit tutulması yerine, optimizasyon periyodu içerisinde belirlenen sınırlar arasında değiştirilerek veri merkezi termal kapasitesinin kullanımı mümkündür. Ayrıca elektrik fiyatlarının yüksek olduğu zamanlarda soğutma ihtiyacının, TES tankı kullanılarak karşılanmasıyla maliyet tasarrufu yapmak mümkündür.

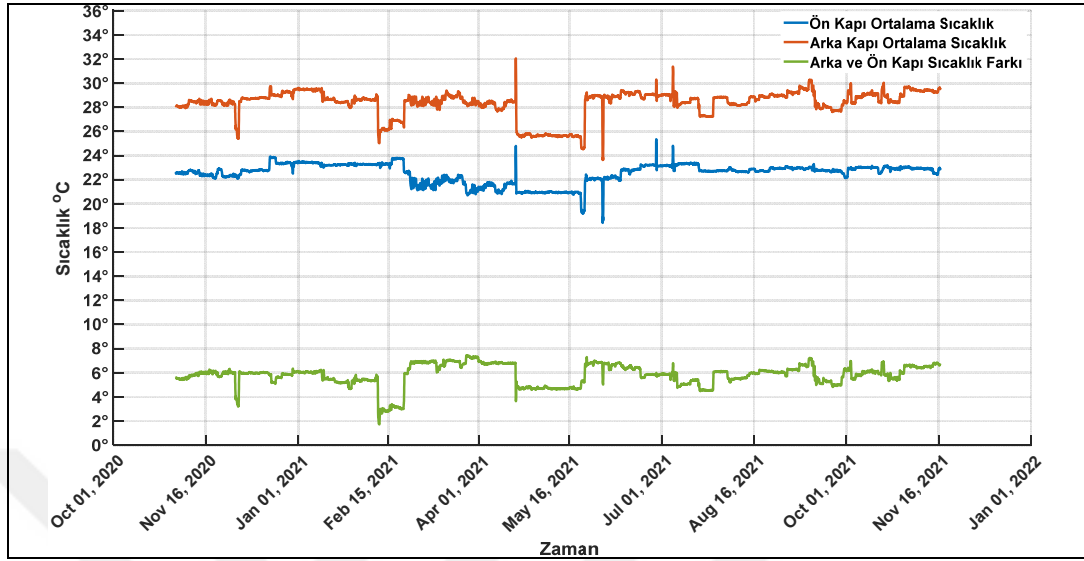
$$\begin{aligned}
& M_{air}^{DC} * C_{air}^{DC} * \frac{dT^{DC}(t)}{dt} \\
& = \left[\frac{k_{wall}}{L_{wall}} * A_{wall} * (T^{out} - T^{DC}) \right] + [q^{IT}] \\
& - [P_{AC} * COP] - [P_{TES}^{disCh}]
\end{aligned} \tag{6.67}$$

Önerilen bu yaklaşımın kullanılabilmesi için (6.67)'de yer alan ve IT güç tüketiminin termal etkisini temsil eden q^{IT} ifadesinin hesaplanması gerekmektedir. Bu değer veri merkezinde yapılan ölçümler kullanılarak Bölüm 6.7.2'de hesaplanmaktadır.

6.7.2. IT Güç Tüketiminin Termal Etkisi

Veri merkezleri iç ortam sıcaklığını etkileyen en önemli parametrelerden biri, yüksek performanslı sunucuların tükettiği yüksek güç tüketimidir. Sunucuların yer aldığı IT kabinler, soğuk ve sıcak hava koridorları oluşturacak şekilde sıralanmakta, soğuk hava koridorundan IT kabinlere girişlerine üflenerek, IT kabin içerisinde yer alan sunucuların çalışma performansı sebebi ile ısınmakta ve IT kabinden ayrılırken daha yüksek sıcaklığa sahip olarak ayrılmaktadır. Isınan hava veri merkezi iç ortamının ısınmasına sebep olmaktadır. Veri merkezinde ölçüm için kullanılan sunucu kabinlerinden biri olan “ARGE Rack” için kabinin ön kısmındaki kapıya yerleştirilen sıcaklık sensörlerinin ölçtüğü ortalama sıcaklık değeriyle, kabinin arka kapısında yer alan sıcaklık sensörlerinin ölçtüğü ortalama sıcaklık değeri ve birbirleri arasında fark, Şekil 6.18'de gösterilmektedir. Buna göre ARGE Rack girişinde ölçülen sıcaklık değeri 18,4°C ile 25,3°C arasında değişmekte, çıkışında ölçülen sıcaklık değeri ise 24°C ile 32°C arasında değişmektedir. Ölçüm aralığı boyunca ARGE RACK'ın ön kapısından ölçülen sıcaklığın ortalama değeri 22,5 °C olarak hesaplanmış, arka kapısından ölçülen ortalama sıcaklık değeri 28,3 °C olarak hesaplanmıştır. Giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki farkın bütün ölçüm periyodu boyunca ortalaması 5,8°C olarak hesaplanmıştır. Dolayısı VM'de yer alan bütün IT kabinlerin veri merkezi iç ortam sıcaklığını etkileyen ısı transferi miktarı, termal modele dahil edilmelidir. Bunun için ölçüm verileri ve enerji dengesi prensibi kullanılmıştır. Ölçüm periyodu boyunca veri merkezi iç ortam sıcaklığının değişim

grafığı Şekil 6.19’da gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi ölçüm aralığı boyunca ortalama iç ortam sıcaklığı çok fazla değişmemektedir.



Şekil 6.18: ARGE rack ön ve arka kapı ortalama sıcaklık değerleri.

. En düşük sıcaklık 19,3 °C , en yüksek sıcaklık 21,1 °C olmaktadır. Ortalama iç ortam sıcaklığı ise 20.2 °C’dir. Ölçüm yapılan veri merkezinde soğutma kaynağı olarak yalnızca chiller ve klima sistemi kullanılmakta, TES tankı acil durumlar için yedekte bekletilmektedir. Dolayısıyla ölçüm verileri kullanılarak IT güç tüketiminin sebep olduğu ısı transferinin hesaplanması için (6.67) denklemi yeniden düzenlendiğinde (6.68) denklemi elde edilmektedir.



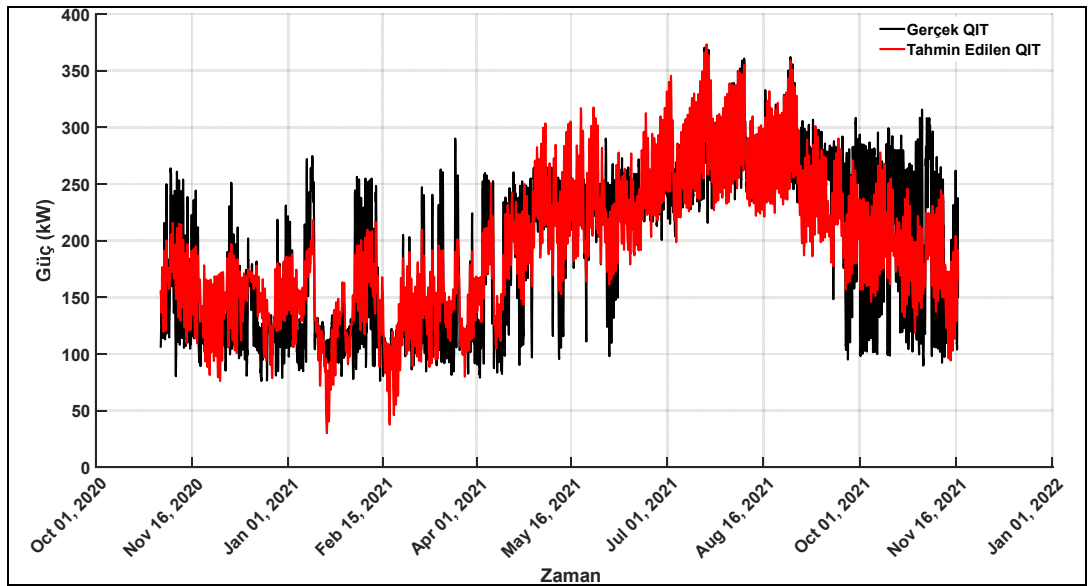
Şekil 6.19: Veri merkezi ortalama iç ortam sıcaklığı değişimi.

$$q^{IT} = \left[M_{air}^{DC} * C_{air}^{DC} * \frac{dT^{DC}(t)}{dt} \right] - \left[\frac{k_{wall}}{L_{wall}} * A_{wall} * (T^{out} - T^{DC}) \right] + [P_{AC} * COP] \quad (6.68)$$

Denklemdeki değişkenlerin değerleri ölçüm verileri kullanılarak yerine konulmuş ve ölçüm aralığı boyunca veri merkezi iç ortamını ısıtıcı etkiye sahip q^{IT} değeri hesaplanmıştır. Ardından q^{IT} , doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak IT güç tüketimi ve dış ortam sıcaklığının fonksiyonu şeklinde hesaplanmıştır. Kullanılan denklem (6.69)'da gösterilmiştir.

$$q_{T^{out}, PIT}^{IT}(t) = (e_1 * T^{out} + e_2 * P_{IT}^{est}) + (e_3 * T^{out} + e_4 * P_{IT}^{est})^2 + e_5 \quad (6.69)$$

Ölçüm verileri ve doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak $e_1, e_2, \dots, e_5$ katsayıları MAPE değeri %15,2 olacak şekilde tahmin edilmiştir. Gerçek q^{IT} ile tahmin edilen q^{IT} Şekil 6.20'de gösterilmiştir. Böylelikle IT güç tüketiminin veri merkezinde sebep olduğu ısı transferi, dış ortam sıcaklığı ve IT güç tüketimine bağlı bir fonksiyon olan $q_{T^{out}, PIT}^{IT}(t)$ ile hesaplanabilmekte ve optimizasyon algoritmasında kullanılabilmektedir.



Şekil 6.20: Tahmin edilen ve gerçek $q_{T^{out}, PIT}^{IT}$ değeri.

6.7.3. Matematiksel Model

Senaryo 4 için kullanılan matematiksel model önceki bölümlerle benzer olmakla beraber, veri merkezi iç ortam sıcaklığının sabit tutulması yerine, gün içinde değiştirilmesi prensibi benimsendiği için, soğutma için harcanan güç tüketimi her “ t ” anı için sabit olmayıp zamanda değiştirilmektedir. Ayrıca TES tankı, soğutma aracı olarak kullanılarak optimizasyon algoritmasına dahil edilmiştir. Veri merkezi toplam enerji maliyetini minimize eden amaç fonksiyonu, IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Talebini karşılamak için, şebeke, jeneratör ve UPS’ten sağlanan enerji maliyetlerinin ve TES tankı şarj maliyetinin toplamından oluşmaktadır. Dolayısıyla bu senaryoda kullanılan amaç fonksiyonu, Senaryo 2’de (6.18)’de yer alan amaç fonksiyonuna (6.70)’da yer alan TES tankı şarj maliyetinin eklenmiş halidir. IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Talebini için şebekeden karşılanan enerji maliyeti (6.19) ile (6.21) arasındaki denklemler, jeneratörden sağlanan enerji maliyeti (6.22)-(6.27) arasındaki denklemler kullanılarak, UPS’den sağlanan enerji maliyeti ise (6.28) kullanılarak hesaplanmaktadır. TES tankındaki suyun soğutularak şarj edilmesi işlemi yalnızca şebeke kullanılarak yapılmaktadır ve şarj için harcanan güç, $P_{TES}^{ch}(t)$ ile gösterilmiştir.

$$Cost_{TES} = \sum_t P_{TES}^{ch}(t) * \Delta t * M^{ToU}(t) \quad (6.70)$$

6.7.3.1. Yük Kaydırma, Güç Dengesi, Jeneratör ve UPS Kısıtları

Bu senaryoda ihtiyaç duyulan ve kullanılan jeneratör ve UPS kısıtları senaryo 2’de tanımlanan kısıtlarla aynıdır. UPS bataryalarının şarj gücünün sınırları, IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Talebi için UPS’ten sağlanacak güçlerin minimum ve maksimum sınır değerleri, aynı anda şarj-deşarj durumunu engellenmesi, batarya enerji yönetiminin sağlanması için, (6.29) ile (6.44) arasındaki kısıtlar kullanılmıştır. Şebekeden sağlanan güç tüketiminin her “ t ” anı için pozitif değerde olması (6.48) kısıtı ile sağlanmaktadır. Jeneratörden sağlanabilecek gücün minimum ve maksimum sınırları, IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Talebinin aynı anda jeneratörden sağlanması durumu için toplam güç talebi değerinin jeneratörden

sağlanabilecek maksimum güç değerinden düşük olması, jeneratörden sağlanabilecek güç için harcanan toplam yakıt miktarının, jeneratörün sahip olduğu yakıt tankı kapasitesinden daha az olması koşulları, (6.50) ile (6.54) arasındaki kısıtlarla sağlanmaktadır. Güç dengesi kısıtlarından ise yalnızca diğer cihazlar güç tüketimi için belirlenmiş olan (6.47) kısıtı kullanılmıştır. Senaryo 2’de yer alan (6.45) ve (6.46) kısıtları ise kullanılmamıştır. Çünkü bu senaryoda hem IT iş yükü kaydırma hem de soğutma gücünün zamanda kaydırılması ve termal depolama yaklaşımı kullanılmıştır. Bu yüzden IT iş yükü kaydırma için Senaryo 3’te yer alan (6.55) ile (6.57) arasındaki kısıtlar kullanılmıştır. Soğutma için kullanılan kısıtlar ise Bölüm 6.7.3.2’te anlatılmıştır. Ayrıca herhangi bir “t” anında meydana gelebilecek acil durumlarda, veri merkezi enerji talebini var olan jeneratör kapasitesinin karşılaması için (6.71) kısıtı kullanılmaktadır.

$$\begin{aligned}
& P_{grid}^{IT}(t) + P_{gen}^{IT}(t) + P_{UPS}^{IT}(t) + P_{grid}^{AC}(t) + P_{gen}^{AC}(t) + P_{UPS}^{AC}(t) \\
& + P_{grid}^{OD}(t) + P_{gen}^{OD}(t) + P_{UPS}^{OD}(t) + P_{TES}^{disCh}(t) \\
& \leq P_{gen}^{capacity}, \quad \forall t \in Z
\end{aligned} \tag{6.71}$$

6.7.3.2. Soğutma ve İç Ortam Sıcaklığı Kısıtları

Veri merkezi iç ortam sıcaklığının kontrolü ve bunun için harcanan soğutma gücü hesabı için (6.65),(6.67) ve (6.69)’da gösterilen denklemler, zamana bağlı olarak yeniden düzenlenerek optimizasyon algoritmasında kullanılabilir hale getirilmiştir [159]. Denklem (6.67)’deki dT^{DC}/dt ifadesinin, veri merkezi iç ortam sıcaklığının ardışık iki zaman aralığı arasındaki farkını temsil ettiği kabul edilmiştir [156],[155],[105].

Zaman çözünürlüğü Δt ile ifade edilmiştir. Bu çalışmada 1 saat olarak kabul edilmektedir. Gerekli dönüşümler yapıldıktan sonra optimizasyon algoritmasında kullanılan soğutma üniteleri ve sıcaklık ayarlamaları ile alakalı kısıtlar (6.72) ile (6.83) arasında gösterilmektedir. Veri merkezi iç ortam ısı transferi güç dengesi (6.72) kısıtı ile sağlanmaktadır. Soğutma ünitelerinin harcadığı güç tüketimi $P_{DC}^{AC}(t)$, şebekeden, jeneratörden ve UPS’ten sağlanan güçlerin toplamı olup (6.73)’teki denklemle gösterilmiştir. Veri merkezinde yer alan Chiller, CRAC, klima vb soğutma

ekipmanları bütüncül bir yaklaşımla, “soğutma üniteleri” olarak adlandırıldığı için bunların tükettiği güç tüketimi için de tek bir nominal güç tüketimi değeri belirlenmemektedir. Bunun yerine, soğutma üniteleri güç tüketim değeri için maksimum güç değeri (6.76) kısıtı ile belirlenmiştir. IT güç tüketiminin termal etkisi (6.74) ile, su tankındaki su sıcaklığının değişimi ile enerji depolanması ve deşarj edilmesini sağlayan kısıt (6.75) ile gösterilmiştir. Bu kısıtlar kullanılarak veri merkezi iç ortam sıcaklığı ve su tankı sıcaklığı her “ t ” anı için ayarlanmaktadır.

$$M_{air}^{DC} * C_{air}^{DC} * \frac{T^{DC}(t) - T^{DC}(t-1)}{\Delta t} = \left[\frac{k_{wall}}{L_{wall}} * A_{wall} * (T^{out}(t-1) - T^{DC}(t-1)) \right] + [q_{T^{out}, PIT}^{IT}(t)] - [P_{DC}^{AC}(t) * COP] - [P_{TES}^{disCh}(t)], \quad \forall t \in Z \quad (6.72)$$

$$P_{DC}^{AC}(t) = P_{grid}^{AC}(t) + P_{gen}^{AC}(t) + P_{UPS}^{AC, disCh}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.73)$$

$$q_{T^{out}, PIT}^{IT}(t) = (e_1 * T^{out}(t) + e_2 * P_{ITnew}(t)) + (e_3 * T^{out}(t) + e_4 * P_{ITnew}(t))^2 + e_5, \quad \forall t \in Z \quad (6.74)$$

$$M_{water}^{TES} * C_{water} * [T^{TES}(t) - T^{TES}(t-1)] = P_{TES}^{disCh}(t) * \Delta t - P_{TES}^{Ch}(t) * COP * \Delta t, \quad \forall t \in Z \quad (6.75)$$

$$P_{DC}^{AC}(t) \leq P_{AC}^{max}, \quad \forall t \in Z \quad (6.76)$$

Su tankı şarj ve deşarj güçleri limitleri (6.77) ve (6.78) kısıtları ile belirlenmektedir. (6.79) kısıtıyla aynı anda şarj ve deşarj durumu önlenmektedir. Su tankı ve iç ortam hava sıcaklıkları sınır değerleri (6.80) ile (6.83) arasındaki kısıtlarla belirlenmiştir. Dış ortam sıcaklığı $T^{out}(t)$, iç ortam sıcaklığı $T^{DC}(t)$, su tankındaki su sıcaklığı $T^{TES}(t)$ ile gösterilmiştir. $T^{TES}(t)$ ’nin minimum ve maksimum sıcaklık değerleri, 0,1°C ve 28°C olarak belirlenmiştir. TES tankı kütlesi $M_{water}^{TES} = 20.000 \text{ kg}$ olarak, suyun özgül ısı kapasitesi $C_{water} = 1,1627 * 10^{-3} \text{ kWh/kg}^\circ\text{C}$ olarak belirlenmiştir[153],[160].

$$0 \leq P_{TES}^{Ch}(t) \leq P_{TES}^{Ch,max} * U_{TES}^{Ch}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.77)$$

$$0 \leq P_{TES}^{disCh}(t) \leq P_{TES}^{disCh,max} * U_{TES}^{disCh}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.78)$$

$$U_{TES}^{Ch}(t) + U_{TES}^{disCh}(t) \leq 1, \quad \forall t \in Z \quad (6.79)$$

$$T_{min}^{DC} \leq T^{DC}(t) \leq T_{max}^{DC}, \quad \forall t \in Z \quad (6.80)$$

$$T^{DC}(t) = T_{init}^{DC}, \quad t = 0 \quad (6.81)$$

$$T_{min}^{TES} \leq T^{TES}(t) \leq T_{max}^{TES}, \quad \forall t \in Z \quad (6.82)$$

$$T^{TES}(t) = T_{init}^{TES}, \quad t = 0 \quad (6.83)$$

Veri merkezinde pencere bulunmayıp zemin, tavan ve yan duvarların aynı malzeme kullanılarak ve aynı kalınlıkta yapıldığı kabul edilmiştir. Veri merkezi toplam duvar alanı A_{wall} ile gösterilmiştir. Veri merkezinin uzunluk, genişlik ve yükseklik değerleri sırasıyla; $h_1 = 19,08m$, $h_2 = 10,65m$, $h_3 = 5.2m$ 'tir. Buna göre toplam duvar alanı (6.84) ile hesaplanmaktadır[153].

$$A_{wall} = 2 * (h_1 * h_2 + h_2 * h_3 + h_1 * h_3) \quad (6.84)$$

Duvar kalınlığı $L_{wall} = 0.1m$ olarak kabul edilmiştir. Duvar için termal iletkenlik katsayısı $k_{wall} = 1.136 * 10^{-4} kW/m * C^\circ$ olarak belirlenmiştir[157]. Veri merkezi iç ortam hava kütlesi olan M_{air}^{DC} , ise veri merkezi hacmi V_{DC} ile hava yoğunluğu δ_{air} 'in çarpımı ile elde edilir. Bu işlem (6.85) ve (6.86)'da gösterilmiştir.

$$M_{air}^{DC} = V_{DC} * \delta_{air} \quad (6.85)$$

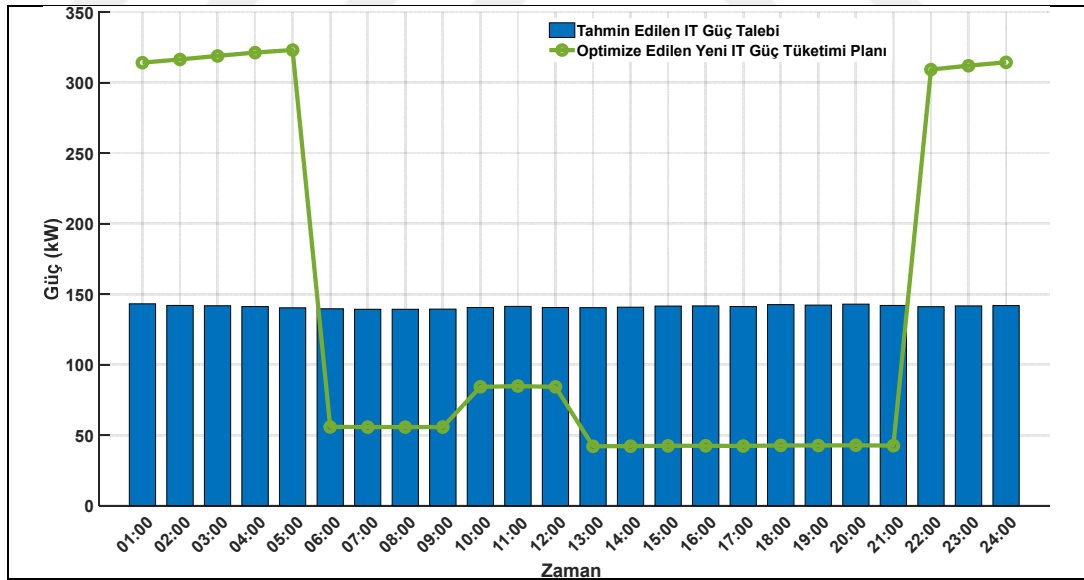
$$V_{DC} = L1 * L2 * L3 + \tan\left(\beta * \frac{\pi}{180}\right) * L1 * L2 \quad (6.86)$$

Hava yoğunluğu $\delta_{air} = 1,225 kg/m^3$, veri merkezi iç ortam havasının özgül ısı kapasitesi $C_{air}^{DC} = 2,79410^{-4} kWh/kg^\circ C$ olarak kabul edilmiştir[161]. Çatı açısı β ile

gösterilmiştir. Veri merkezi tek bir oda şeklindedir, herhangi bir penceresi veya eğimli bir çatısı bulunmamaktadır. Dolayısı ile β değeri “0” olarak kabul edilmektedir. Bu çalışmada veri merkezi iç ortam sıcaklığının 15°C ile 28°C derece arasında değişmesine izin verilmiştir[149],[150]. Bu çalışmada COP değeri 2 olarak belirlenmiştir [162].

6.7.4. Analiz Sonuçları

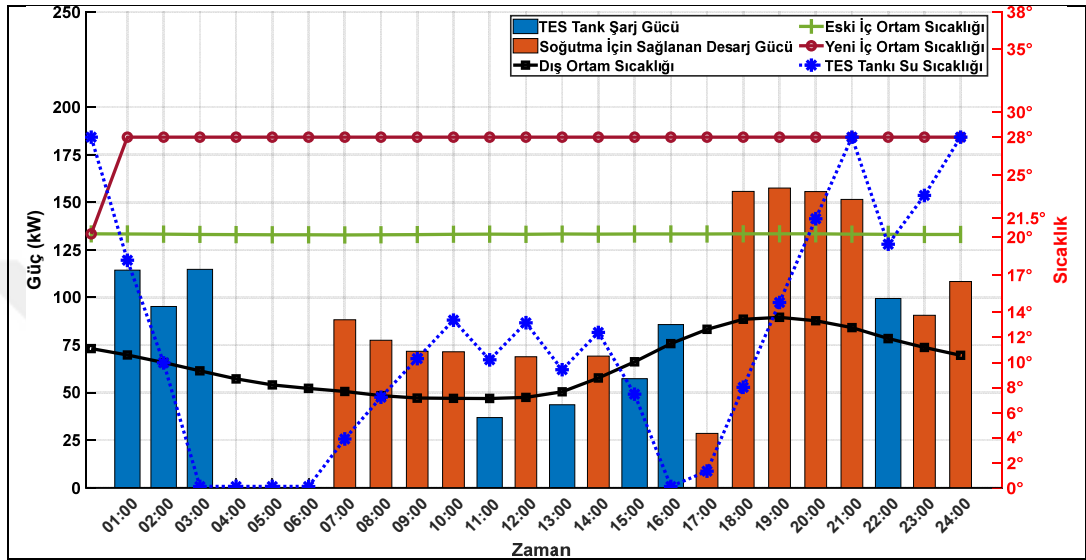
Senaryo 3’e ek olarak bu senaryoda, veri merkezi iç ortam termal kapasitesi ve termal enerji depolama (TES) tankı kullanılarak veri merkezi enerji maliyetini minimize eden optimum çalışma planı oluşturulmuştur. Optimizasyon sonunda hesaplanan maliyet 11.295 TL’dir. IT yükünün zamanda kaydırması yaklaşımı sonucu elde edilen yeni IT güç tüketimi planı ve tahmin edilen IT güç talebi Şekil 6.21’de gösterilmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi optimizasyon sonrasında IT yük, elektrik fiyatlarının daha ucuz olduğu zaman dilimlerine kaydırılmıştır.



Şekil 6.21: Optimizasyon sonrası yeni IT güç tüketimi planlaması.

Soğutma gücünün enerji kaynağı olarak kullanılması yaklaşımı sonucu veri merkezi iç ortam sıcaklığı değiştirilmiş, bazı zamanlarda veri merkezinin ihtiyaç duyduğu soğutma gücü TES tankı vasıtasıyla depolanmış olan enerjiden karşılanmıştır. Optimizasyon periyodu boyunca gerçekleşen bu işlemlerin sonucu

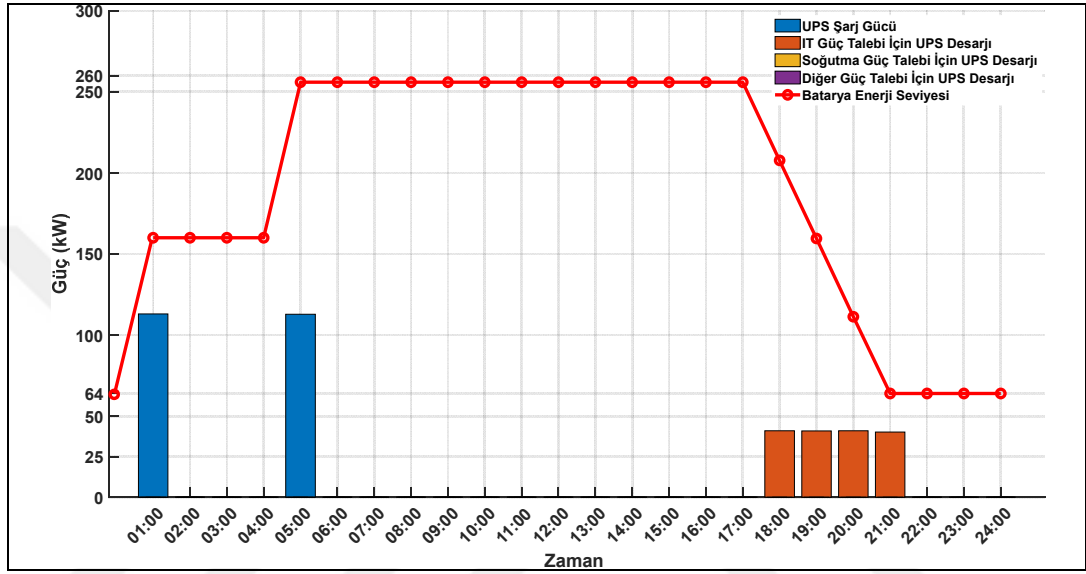
Şekil 6.22’de gösterilmiştir. Başlangıç anında 20,2 °C olan veri merkezi iç ortam sıcaklığının ilk saatin sonunda 28 °C’ye kadar yükselmesine izin verilerek aradaki 7,8°C’lik farka karşılık gelen güç miktarı kadar soğutma gücünün azalması sağlanmıştır. Sonrasında iç ortam sıcaklığı izin verilen maksimum sıcaklıkta sabit tutulmuştur.



Şekil 6.22: TES tankı şarj desarj durumu ve sıcaklık değişimleri.

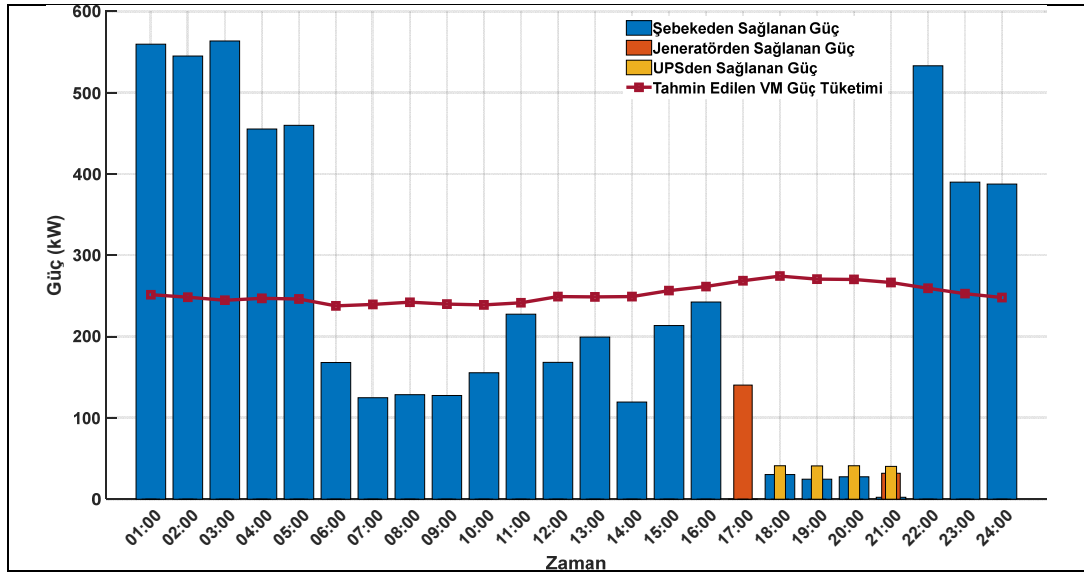
Termal enerjinin elektrik fiyatının ucuz olduğu zaman diliminde depolanarak, elektrik fiyatının pahalı olduğu zaman dilimlerinde kullanılması amacıyla kullanılan TES tankının şarj ve desarj durumu Şekil 6.22’de görülmektedir. Başlangıç anında maksimum su sıcaklığı olarak belirlenmiş olan 28°C’deki TES Tankı su sıcaklığı ilk üç saatte, minimum su sıcaklığı olarak belirlenen 0,1 °C’ye getirilerek enerji termal olarak depolanmıştır. Sonrasında kademeli olarak 07.00-10.00 arasında su sıcaklığının 13,3 °C’ye kadar ısınmasına izin verilerek, aradaki sıcaklık farkına karşılık gelen güç miktarı soğutma için kullanılmıştır. Saat 11.00’de su tankı, veri merkezi iç ortamını soğutmaya yetecek kadar enerjiye sahip olmasına rağmen şarj edilerek su sıcaklığının 10,2 °C’ye gelmesi sağlanmıştır. Buna benzer durum sonraki saatlerde de gerçekleşmiştir. Bunun sebebi denklem (6.75)’de gösterildiği gibi, su tankının desarj durumunda sağlayacağı güç miktarının, COP’tan dolayı şarj etmek için harcanan güç miktarından 2 kat daha fazla olmasıdır. Dolayısı ile aynı elektrik fiyatının geçerli olduğu 11.00’de şarj etmek için harcanan gücün 2 katı kadar güç miktarı saat 12.00’de soğutma için sağlanarak yine de kar edilmiştir. Şarj edilmeden su tankının bütün

enerjisinin ilgili zaman diliminde deşarj olmamasının sebebi ise elektrik fiyatının en pahalı olduğu zaman diliminde veri merkezi soğutma ihtiyacını karşılayabilmektir. Şekil 6.22’de görüldüğü gibi TES tankı su sıcaklığı 21.00’de maksimum değer olan 28 °C’ye ulaşmış, 22.00’de son kez şarj edilmiş ve sonrasında deşarj olarak optimizasyon periyodu sonunda yeniden 28 °C’ye gelmiştir. Bir diğer enerji kaynağı olarak kullanılan UPS şarj deşarj durumu ise Şekil 6.23’te gösterilmiştir.



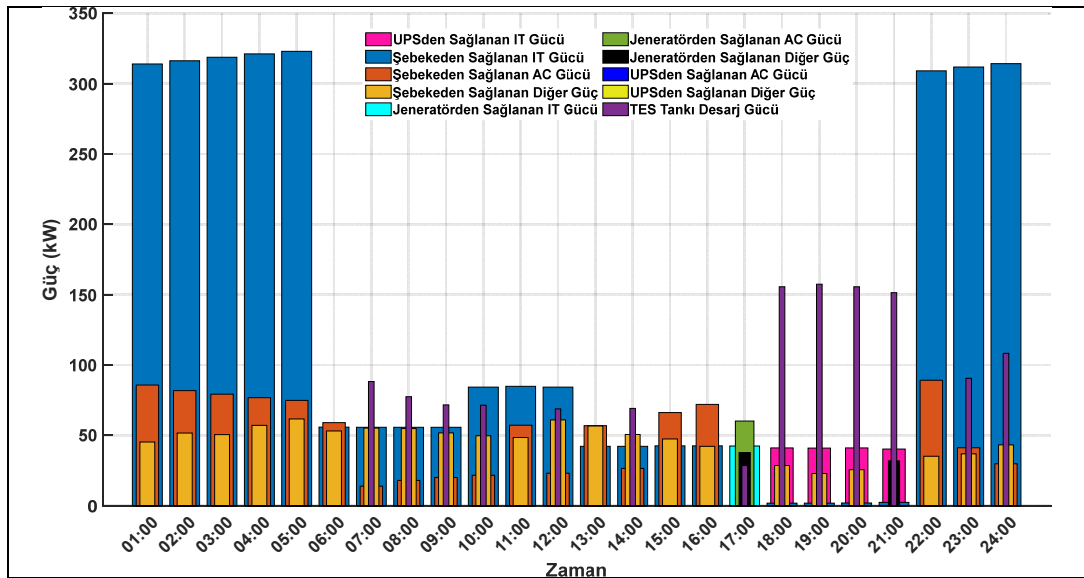
Şekil 6.23: UPS şarj-deşarj durumu

UPS bataryaları optimizasyon algoritmasında yer alan kısıtlar ve verimlilik değerleri dikkate alınarak izin verilen aralıkta şarj ve deşarj olmuştur. Elektrik fiyatının ucuz olduğu zaman diliminde maksimum enerji seviyesine gelene kadar şarj olan UPS, puant zaman diliminde kullanılarak optimizasyon periyodu sonunda izin verilen minumum enerji seviyesine gelmiştir. Optimizasyon periyodu boyunca ihtiyaç duyulan güç talebinin, maliyeti minimize edecek şekilde zamana ve kaynaklara göre karşılanması planı Şekil 6.24’te yer almaktadır.



Şekil 6.24: Kaynaklara göre veri merkezi enerji yönetim planı.

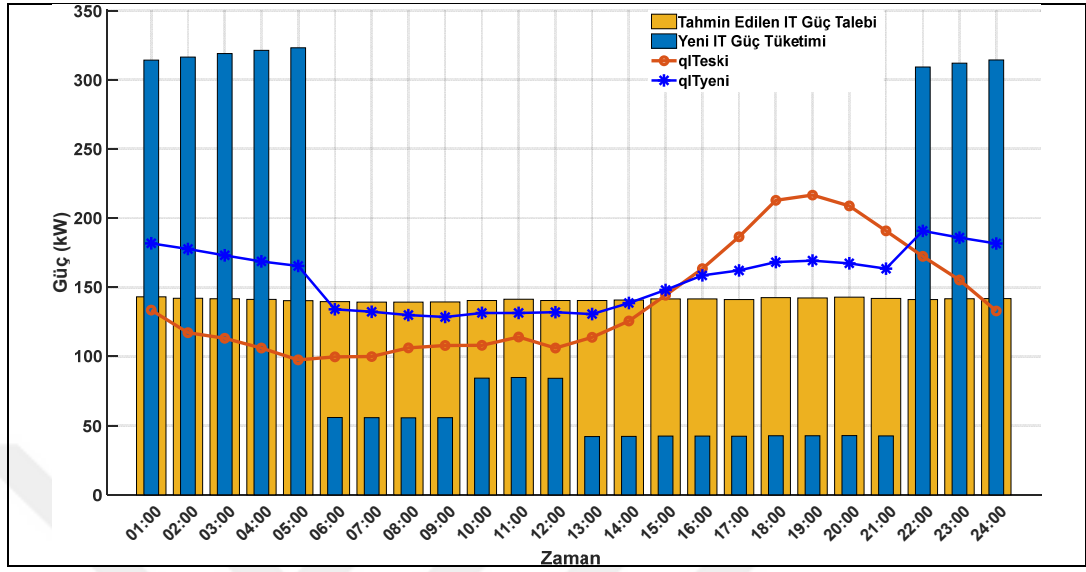
Puant zaman diliminde şebekeden sağlanan güç minimum değerinde olup, alternatif enerji kaynakları limitler dahilinde kullanılmıştır. Diğer zamanlarda ise şebeke, ana enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Enerji kaynaklarından IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Tüketimi için sağlanan güçler Şekil 6.25'te detaylı olarak gösterilmiştir.



Şekil 6.25: Kaynaklara ve tüketim cinsine göre enerji yönetim planı.

IT yük kaydırmasının, soğutma gücüne olan etkisini incelemek için, öncelikle veri merkezi iç ortamının ısınmasına olan katkısının incelenmesi gerekmektedir. Bu

amaçla IT yükünün kaydırılmadığı durum ile kaydırıldıktan sonraki $q_{T_{out},PIT}^{IT}(t)$ değerleri ve IT güç tüketimi değerleri Şekil 6.26’da gösterilmiştir.



Şekil 6.26: IT güç tüketiminin veri merkezi ısınmasına etkisi.

Yeni ve eski $q_{T_{out},PIT}^{IT}(t)$ değerleri karşılaştırıldığında, yük kaydırmasının etkisi görülmektedir. Ancak 06.00-21.00 aralığındaki yeni IT güç miktarı ile diğer zamanlara kaydırılmış olan IT güç miktarı oranı dikkate alındığında, aynı oranın $q_{T_{out},PIT}^{IT}(t)$ değişiminde gözlenmediği anlaşılmaktadır. Bu durumun sebeplerinden biri denklem (6.68)’e göre, diğer etkenlere dair herhangi bir ölçüm verisi olmadığı için yalnızca IT güç tüketiminin veri merkezi iç ortamının ısınmasına sebep olduğunun kabul edilmesidir. Dolayısıyla VM aydınlatması, kapının açılıp kapanması, PC, laptop vb cihazların kullanımı ile insan etkinliği gibi faktörlerin iç ortam sıcaklığına olan etkisi ölçüm verilerinde olmasına rağmen denklemde modellenememiştir. Ayrıca Bölüm 6.7.2 de elde edilen IT güç tüketimi ve dış ortam sıcaklığına bağlı $q_{T_{out},PIT}^{IT}(t)$ denklemine göre hesaplanan ısı miktarının %15,2 hatalı sonuç bulması da bir diğer sebeptir. Dolayısı ile yük kaydırma yapıldığında IT güç tüketiminin soğutma gücüne olan etkisi kaydırılan yük miktarı oranından çok daha az gözlenmiştir.

6.8. Jeneratör, UPS ve VM Termal Kapasitesinin Bireysel Olarak Kullanımı

Bu bölümde önceki bölümlerde optimizasyon algoritmasına farklı senaryolar aracılığı ile dahil edilen jeneratör, UPS ve VM termal kapasitesinin optimizasyon algoritmasında tek tek kullanılmasının sonuçları incelenmiştir.

6.8.1. Jeneratör Kullanımının Bireysel Katkısı

Bu bölümde üç zamanlı elektrik tarifiesiyle beraber şebekeye alternatif olarak yalnızca jeneratör enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. VM enerji maliyetini minimize eden amaç fonksiyonu (6.87)'de gösterilmiştir.

$$\min\{Cost_{grid}^{IT} + Cost_{grid}^{AC} + Cost_{grid}^{OD} + Cost_{gen}^{IT} + Cost_{gen}^{AC} + Cost_{gen}^{OD}\} \quad (6.87)$$

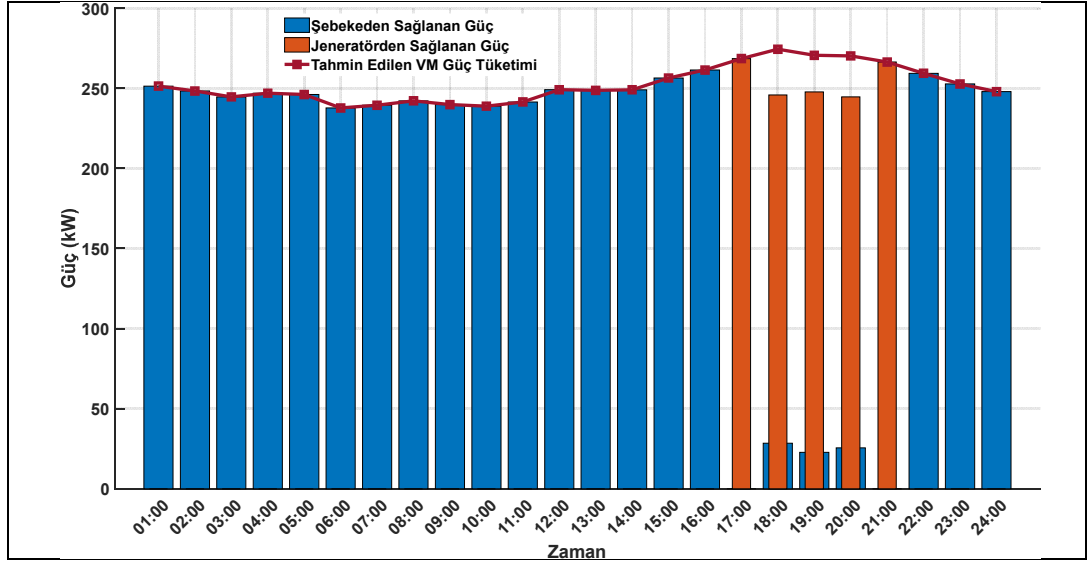
Şebekeden veya jeneratörden IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar için sağlanan güç için maliyet hesabı (6.19) ile (6.27) arasındaki denklemler kullanılarak yapılmaktadır. IT gücünün veya soğutma gücünün zamanda kaydırılması durumu söz konusu olmadığı için, her t anında tahmin edilen IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Tüketiminin şebekeden veya jeneratörden sağlanması gerekmektedir. Bu durum (6.88) ile (6.90) arasındaki kısıtlarla sağlanmıştır. Jeneratörün optimizasyon algoritmasına dahil olması için gerekli olan diğer bütün kısıtlar Senaryo 2'de (6.48) ile (6.54) arasında yer alan kısıtlarla aynıdır.

$$P_{IT}^{est}(t) = P_{grid}^{IT}(t) + P_{gen}^{IT}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.88)$$

$$P_{AC}^{est}(t) = P_{grid}^{AC}(t) + P_{gen}^{AC}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.89)$$

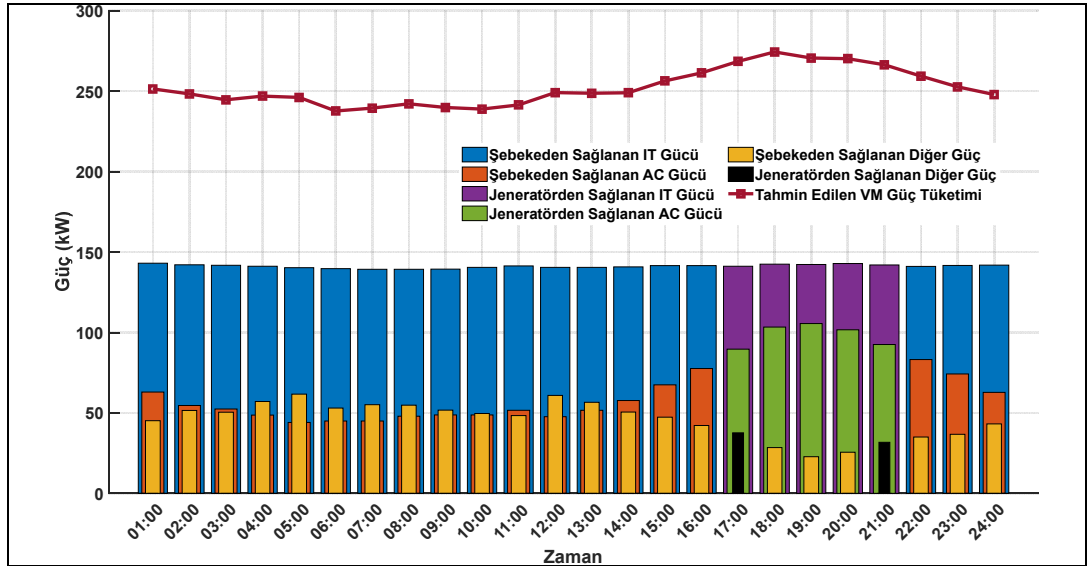
$$P_{OD}^{est}(t) = P_{grid}^{OD}(t) + P_{gen}^{OD}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.90)$$

Optimizasyon sonucunda elde edilen optimum enerji kullanım planı Şekil 6.27 ve Şekil 6.28'de gösterilmektedir. Toplam maliyet 13.540 TL olarak hesaplanmaktadır.



Şekil 6.27: Jeneratör ve şebeke kullanıldığı durum için VM enerji yönetim planı.

Şekil 6.27’de görüldüğü gibi tahmin edilen toplam güç tüketimi ile optimizasyon sonrası şebeke ve jeneratörden sağlanan toplam güç tüketimi her saat için birbirine eşittir. Ayrıca saat 17.00 ile 21.00 saatleri arasında jeneratör şebeke yerine birincil enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. Şekil 28’de ise şebekeden ve jeneratörden karşılanan IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Tüketim planlaması detaylı olarak görülmektedir.



Şekil 6.28: Jeneratör ve şebeke kullanıldığı durum için tüketim cinsine göre VM enerji yönetim planı.

6.8.2. UPS Kullanımının Bireysel Katkısı

Bu bölümde ise üç zamanlı elektrik tarifiesiyle beraber şebekeye alternatif olarak yalnızca UPS alternatif enerji kaynağı olarak kullanılmıştır. VM enerji maliyetini minimize eden amaç fonksiyonu (6.91)'de gösterilmiştir. Tahmin edilen IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Tüketimi miktarının, her bir “t” zamanı için şebekeden ve UPS'ten sağlanan güç tüketimine eşit olması için (6.92) ile (6.94) arasındaki kısıtlar kullanılmıştır. Şebekeden veya jeneratörden IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar için sağlanan güç için maliyet hesabı (6.19) ile (6.21) arasındaki denklemler ve (6.28) denklemi kullanılarak yapılmaktadır. UPS'in optimizasyon algoritmasına dahil edilmesi için Senaryo 2'de yer alan (6.29) ile (6.44) arasındaki kısıtlar ve (6.48) kısıtı kullanılmıştır.

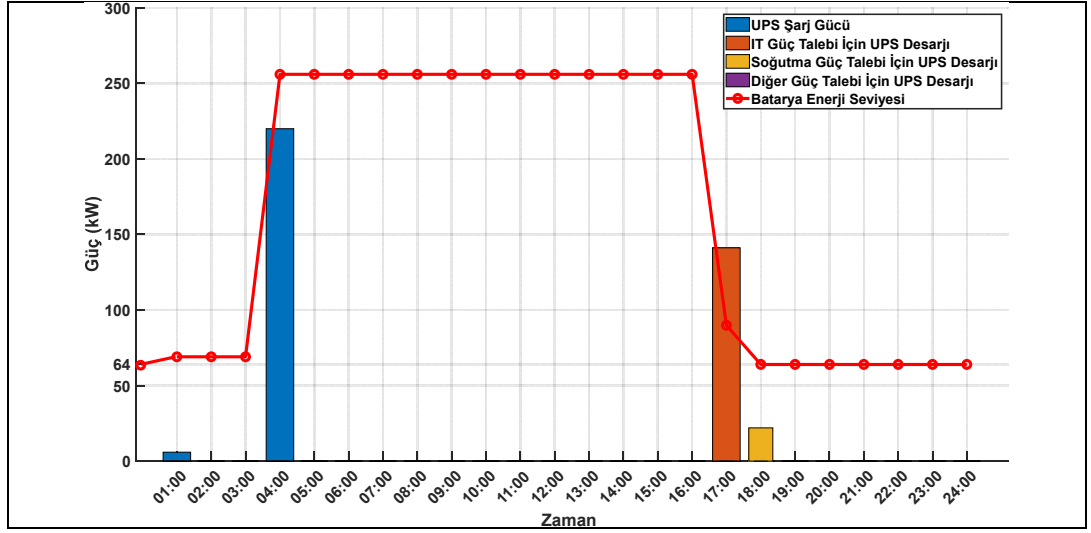
$$\min\{Cost_{grid}^{IT} + Cost_{grid}^{AC} + Cost_{grid}^{OD} + Cost_{UPS}\} \quad (6.91)$$

$$P_{IT}^{est}(t) = P_{grid}^{IT}(t) + P_{UPS}^{IT,disCh}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.92)$$

$$P_{AC}^{est}(t) = P_{grid}^{AC}(t) + P_{UPS}^{AC,disCh}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.93)$$

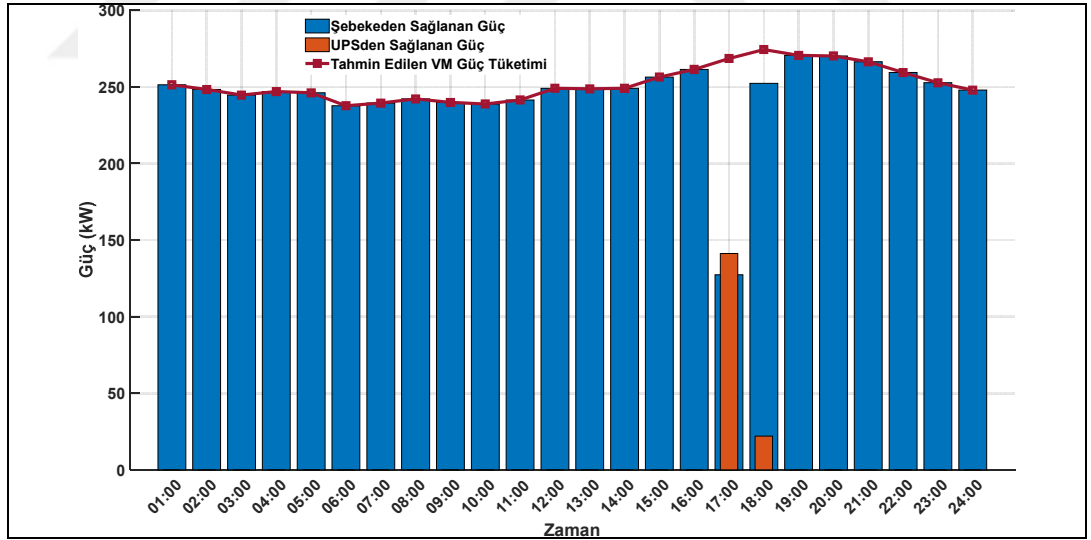
$$P_{OD}^{est}(t) = P_{grid}^{OD}(t) + P_{UPS}^{OD,disCh}(t), \quad \forall t \in Z \quad (6.94)$$

Optimizasyon periyodu boyunca saatlik UPS şarj – deşarj durumu ve UPS batarya enerji durumu Şekil 6.29'da, enerji kullanım planı ise Şekil 6.30'da gösterilmiştir. Şekil 6.29 incelendiğinde elektrik fiyatının ucuz olduğu zaman dilimlerinde UPS'in şarj edildiği, pahalı zaman dilimlerinde ise UPS'in deşarj edilerek enerji seviyesinin başlangıç durumuna gelmesi sağlanmıştır.



Şekil 6.29: UPS şarj-deşarj grafiği.

Şekil 6.30'da ise UPS enerjisinin her ne kadar puant zamanlarda kullanılsa da VM enerji talebinin daha yüksek olması sebebi ile ilgili zaman aralığında şebekenin de kullanıldığı görülmektedir. Toplam enerji maliyeti ise 13.877 TL olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.30: UPS ve şebeke kullanıldığı durum için VM enerji yönetim planı.

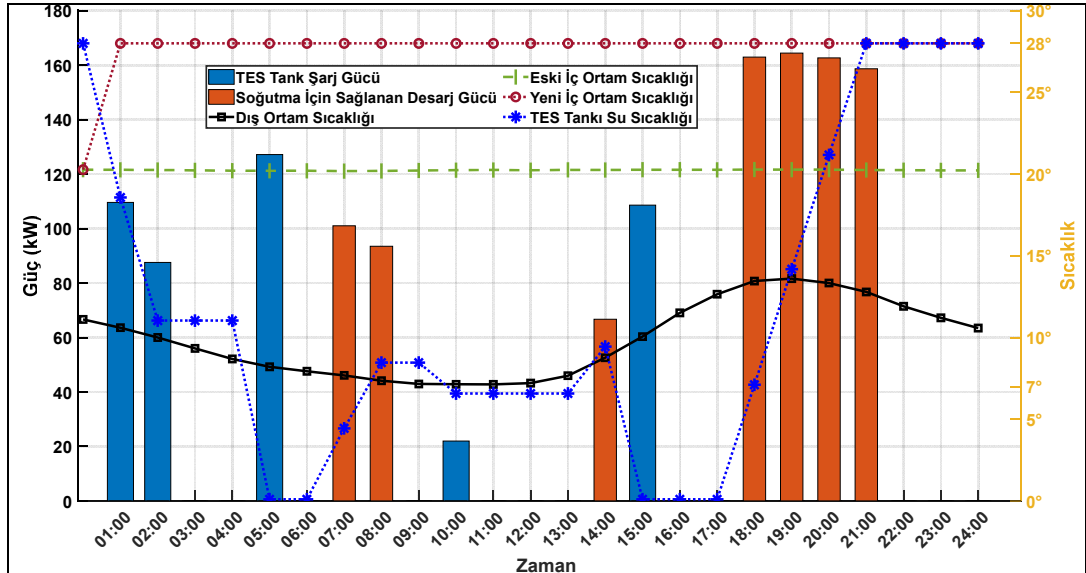
6.8.3. VM Termal Kapasitesi Kullanımının Bireysel Katkısı

Bu bölümde üç zamanlı elektrik tarifesiyile beraber VM termal kapasitesi kullanılmıştır. VM iç ortam sıcaklığının sabit tutulması yerine, gün içinde değiştirilmesi prensibi benimsendiği için, soğutma için harcanan güç tüketimi her “t”

anı için sabit olmayıp zamanda değiştirilmektedir. Ayrıca TES tankı, soğutma aracı olarak kullanılarak optimizasyon algoritmasına dahil edilmiştir. IT, Soğutma Üniteleri ve Diğer Cihazlar Güç Talebi için şebekeden sağlanan enerji maliyeti ve TES tankı şarj maliyeti toplamı bu bölümde amaç fonksiyonu olarak belirlenmiş ve (6.95)'te gösterilmiştir. Şebekeden sağlanan IT ve diğer cihazlar güç tüketimi tahmin edilen güç talebi kullanılarak denklem (6.8) ve (6.10)'daki gibi hesaplanmaktadır. $Cost_{grid}^{AC}$ hesabı için (6.20)'deki denklem kullanılmaktadır. VM termal kapasitesinin optimizasyon algoritmasına dahil edilmesi süreci Senaryo 4'te tanımlanan denklem ve kısıtlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

$$\min\{Cost_{grid}^{IT} + Cost_{grid}^{AC} + Cost_{grid}^{OD} + Cost_{TES}\} \quad (6.95)$$

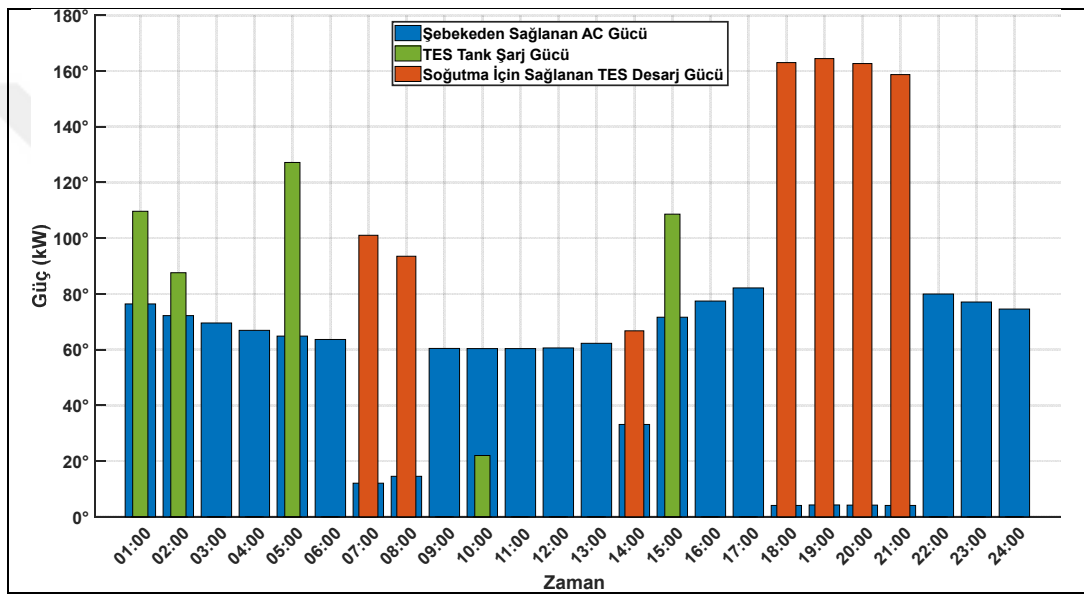
Soğutma gücünün enerji kaynağı olarak kullanılması yaklaşımı sonucu veri merkezi iç ortam sıcaklığı değiştirilmiş, bazı zamanlarda veri merkezinin ihtiyaç duyduğu soğutma gücü TES tankı vasıtasıyla depolanmış olan enerjiden karşılanmıştır. Optimizasyon periyodu boyunca gerçekleşen bu işlemlerin sonucu Şekil 6.31 ve Şekil 6.32'de gösterilmiştir.



Şekil 6.31: VM termal kapasitesi ve şebeke kullanılarak elde edilen TES tankı şarj deşarj durumu ve sıcaklık değişimleri.

Şekil 6.31 incelendiğinde Senaryo 4'te ulaşılan benzer sonuçların elde edildiği görülmektedir. Öncelikle VM iç ortam sıcaklığı başlangıçta 20,2 °C olan veri merkezi

iç ortam sıcaklığının ilk saatin sonunda 28 °C'ye kadar yükselmesine izin verilerek soğutma için harcanacak enerjiden tasarruf edilmiştir. Sonrasında ise iç ortam sıcaklığı sabit tutulmuştur. TES tankı içerisindeki su sıcaklığı ise öncelikle elektrik fiyatının en ucuz olduğu dönemde şarj edilerek 28°C'den 0,1 °C'ye getirilmiştir. Sonrasında deşarj olmasına izin verilmiş yani soğutma ihtiyacı TES tankı aracılığı ile gerçekleşmiş ve tekrar şarj ve deşarj olmuştur. Son şarj işlemi TES tankının soğutma kapasitesinin puant zaman diliminde VM'yi soğutacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.32'de görüldüğü gibi puant zaman diliminde VM soğutma işlemi için birincil olarak TES tankı kullanılmıştır. Toplam maliyet ise 13.622 TL olarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.32: Şebekeden sağlanan soğutma gücü ile TES tankı şarj-desarj gücü grafiği.

6.9. Genel Değerlendirme

Optimizasyon modülünde gerçekleştirilen bütün senaryolar için hesaplanan maliyetlerin karşılaştırılması Tablo 6.6'da gösterilmektedir. Öncelikle tek zamanlı elektrik tarifi (TZET) kullanılarak ve herhangi bir optimizasyon yaklaşımı benimsenmeden, veri merkezi güç tüketimi maliyeti hesaplanmıştır. Ardından üç zamanlı elektrik tarifi (ÜZET) kullanılarak maliyet hesaplanmış ancak TZET'e göre maliyetin %8,7 daha fazla olduğu görülmüştür. Bunun temel sebebi veri merkezi güç talebi karakteristiğinin ÜZET kullanım mantığına uygun olmamasıdır. Çünkü IT güç talebi zaman içerisinde neredeyse değişmemekte, IT olmayan güç talebi ise puant zamanlarda daha çok artış göstermektedir. Dolayısıyla puant zamanlarda daha pahalı,

diğer zamanlarda kademeli olarak daha ucuz olan üç zamanlı elektrik tarifesinde veri merkezi güç tüketim maliyeti daha fazla olmaktadır. ÜZET kullanım mantığına uygun bir yaklaşım, veri merkezi IT güç talebinin zamanda kaydırılması ile sağlanabilmektedir. Bu yaklaşım Senaryo 1’de benimsenmiştir. Soğutma ve diğer cihazlar güç tüketim talebi her “t” anında şebeke tarafından karşılanmakta ancak IT güç talebi belli sınırlar altında elektrik tarifesinin pahalı olduğu saatlerden ucuz olan zamanlara kaydırılmaktadır.

Tablo 6.6: Kullanılan senaryoların maliyet performansı karşılaştırması.

Senaryo	Enerji Maliyeti (TL)	% Değişim
Tek Zamanlı Elektrik Tarifesi ile Maliyet Hesabı	12.994	-
Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi ile Maliyet Hesabı	14.130	TZET’e göre %8,7 daha pahalı
Senaryo 1: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi Kullanılarak ve Yük Kaydırması Yapılarak Maliyet Hesabı	12.235	TZET’e göre %5,8 daha ucuz ÜZET’ye göre %13,4 daha ucuz
Senaryo 2: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi ve Alternatif Enerji Kaynakları Kullanılarak Maliyet Hesabı	13.340	TZET’e göre %2,6 daha pahalı ÜZET’e göre %5,6 daha ucuz 1’e göre %9 daha pahalı
Senaryo3: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi, Alternatif Enerji Kaynakları Kullanılarak ve Yük Kaydırması Yapılarak Maliyet Hesabı	11.745	TZET’e göre %9,6 daha ucuz ÜZET’e göre %16,9 daha ucuz 1’e göre %4 daha ucuz 2’e göre %11,2 daha ucuz
Senaryo 4: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi, Alternatif Enerji Kaynakları, Termal Enerji Depolama Yaklaşımı Kullanılarak ve Yük Kaydırması Yapılarak Maliyet Hesabı	11.295	TZET’e göre %13,1 daha ucuz ÜZET’e göre %20 daha ucuz 1’e göre %7,7 daha ucuz 2’e göre %15,3 daha ucuz 3’e göre %3,9 daha ucuz
Jeneratör ve Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi Kullanımı ile Maliyet Hesabı	13.540	ÜZET’e göre %4,2 daha ucuz
UPS ve Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi Kullanımı ile Maliyet Hesabı	13.877	ÜZET’e göre %1,8 daha ucuz
VM Termal Kapasitesi ve Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi Kullanımı ile Maliyet Hesabı	13.622	ÜZET’e göre %3,6 daha ucuz

Böylelikle Senaryo 1’de elde edilen 24 saatlik enerji yönetim planı uygulandığında maliyet, TZET’e göre %5,8 daha ucuz, ÜZET’e göre ise %13,4 daha ucuz olarak hesaplanmıştır. Senaryo 2’de ise veri merkezinin sahip olduğu alternatif

enerji kaynakları optimizasyon algoritmasına dahil edilmiştir. Veri merkezinde enerji kaynağı olarak kullanılabilen dizel jeneratör ve UPS olduğu için belli kısıtlar altında bu kaynaklar şebekeye alternatif olarak kullanılmıştır. Bu senaryoda yük kaydırma işlemi yapılmamış olup yalnızca üç zamanlı elektrik tarifi kullanılmıştır. Elde edilen veri merkezi optimum enerji karşılama planına göre hesaplanan maliyet; TZET'e göre %2,6 daha pahalıdır. Çünkü maliyet, dağıtım firması ile yapılan ikili anlaşmalara göre belirlenen uygun fiyatlı elektrik tarifi üzerinden hesaplanmaktadır. Dolayısıyla Senaryo 2'de puant zamanlarda şebekeye alternatif kaynaklar kullanılsa da maliyeti düşürmeye yetmemektedir. Yalnızca üç zamanlı elektrik tarifi kullanılan duruma göre %5,6 daha ucuz gerçekleşmesinin sebebi ise puant zamanlarda kullanılan alternatif enerji kaynaklarıdır. Senaryo 1'e göre %9 daha pahalı olmasının sebebi ise yük kaydırmanın maliyete olan etkisinin yüksek olmasıdır.

Senaryo 3 ile hem yük kaydırması yapılarak hem de alternatif enerji kaynakları kullanılarak üç zamanlı elektrik tarifesinin uygulandığı durum için, veri merkezi güç tüketim talebinin karşılandığı optimum enerji yönetim planı elde edilmiştir. Hesaplanan maliyet, TZET'e göre %9,6 daha ucuz, ÜZET'e göre %16,9 ve senaryo 1'e göre %4 daha ucuzdur. Senaryo 2'e göre ise %11,2 daha ucuz maliyetin elde edilmesiyle yük kaydırmanın maliyete olan azaltıcı etkisinin büyüklüğü ayrıca görülmektedir. Senaryo 3'e ek olarak enerjinin termal olarak depolanması yaklaşımının benimsendiği Senaryo 4'te hesaplanan maliyet, veri merkezinin mevcut kullandığı tarife olan tek zamanlı elektrik maliyetine göre %13,1 daha ucuz, ÜZET'e göre %20 daha ucuzdur. Enerjinin termal olarak depolanıp puant zamanlarda maliyeti minimize etmek için kullanılması, Senaryo 3 ile karşılaştırıldığında maliyetin %3,9 oranında düşmesine sebep olarak bütün senaryolar arasında maliyet açısından senaryo 4'ün en iyi sonuç vermesini sağlamıştır.

VM maliyetini minimize eden farklı senaryolara ek olarak, kullanılan argümanların maliyeti etkileme açısından birbiri arasındaki üstünlükleri ise jeneratörün, UPS'in ve VM termal kapasitesinin optimizasyon algoritmasında tek tek kullanılmasıyla analiz edilmiştir. Buna göre herhangi bir optimizasyon yaklaşımı benimsenmeyen durum olan ÜZET'e göre karşılaştırıldığında UPS kullanımı, maliyeti %1,8 azaltırken, VM termal kapasitenin kullanımı %3,6 azaltmakta ve jeneratör ise %4,2 azaltmaktadır. Senaryo 1'e göre ise yalnızca yük kaydırma yapıldığında maliyet ÜZET'e göre %13,4 azaltılmaktadır. Dolayısıyla yük kaydırmanın maliyet üzerindeki

etkisinin diğer argümanlarla karşılaştırıldığında oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Farklı senaryolar ile VM'nin TTY'ye katılması sonucunda puant zaman aralığında şebekeden karşılanan enerji tüketimi de azalmaktadır. Puant zamanda şebekeden çekilen enerjiye göre senaryolar karşılaştırıldığında ise Tablo 6.7'de yer alan sonuç elde edilmektedir.

Tablo 6.7: VM'lerin optimizasyon senaryoları vasıtasıyla TTY'ye katılma miktarları.

Senaryo	Puant Zamanlar Şebekeden Çekilen Enerji Miktarı (MWh)	Azalan Enerji Miktarı MWh	Türkiye İçin DSM_{ratio} Karşılığı
Tahmin Edilen VM Güç Tüketimi	1,350	-	-
Senaryo 1: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi Kullanılarak ve Yük Kaydırması Yapılarak Maliyet Hesabı	0,214	1,136	%0.0142
Senaryo 2: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi ve Alternatif Enerji Kaynakları Kullanılarak Maliyet Hesabı	0,087	1,263	%0.0158
Senaryo3: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi, Alternatif Enerji Kaynakları Kullanılarak ve Yük Kaydırması Yapılarak Maliyet Hesabı	0,085	1,265	%0.0158
Senaryo 4: Üç Zamanlı Elektrik Tarifesi, Alternatif Enerji Kaynakları, Termal Enerji Depolama Yaklaşımı Kullanılarak ve Yük Kaydırması Yapılarak Maliyet Hesabı	0,085	1,265	%0.0158

VM'nin TTY'ye katılarak puant zamanlarda şebekeden tüketilen enerjinin azaltılması VM'ye enerji maliyeti tasarrufu sağladığı gibi şebeke açısından da Bölüm 3'te anlatılan faydalara sebep olmaktadır. Tablo 6.7'ye göre VM'nin 01 Ocak 2022 tarihi için puant zamanlarda şebekeden karşılanan enerji talebi 1,350 MWh'tır. Bu miktar Senaryo 4 ile yaklaşık %94 oranında azaltılmış ve 0,085 TWh'a düşmüştür. Benzer şekilde Senaryo 1 ile %84 oranında azaltılmış ve şebekeden 0,214 MWh çekilmiştir. Geriye kalan 1,136 MWh ise TTY'ye katılım için kullanılmıştır. Bu

miktar, tezin 3. bölümünde yer alan Tablo 3.1'deki %10 DSM_{ratio} için elde edilen değerler ile karşılaştırıldığında, sanki bütün VM'lerin %0.0142 oranında TTY'ye katılması gibi bir etki yaratmaktadır. Bu oran her ne kadar küçük gibi görünse de yalnızca bir gün için VM'nin TTY'ye katılmasının sonucu olduğu düşünüldüğünde, bütün bir yıl için katılım olduğunda kümülatif olarak oldukça önemli etkilere sahip olacağı görülmektedir. Benzer şekilde Senaryo 2, 3 ve 4 sonucunda VM'nin TTY'ye katılımının etkisi, Tablo 3.1'deki hesaplamalara göre bütün VM'lerin TTY'ye %0.0158 oranında katılması durumunda oluşacak etkiyle aynıdır. Buna göre doğrusal bir ilişki kurulursa sadece iletim kayıpların azaltılmasından elde edilmesi muhtemel günlük tasarruf 341\$ olarak hesaplanmaktadır. Dolayısıyla VM'lerin TTY'ye katılmasının hem VM açısından hem de şebeke açısından ekonomik kazanç sağladığı görülmektedir.

6.10. Sonuç

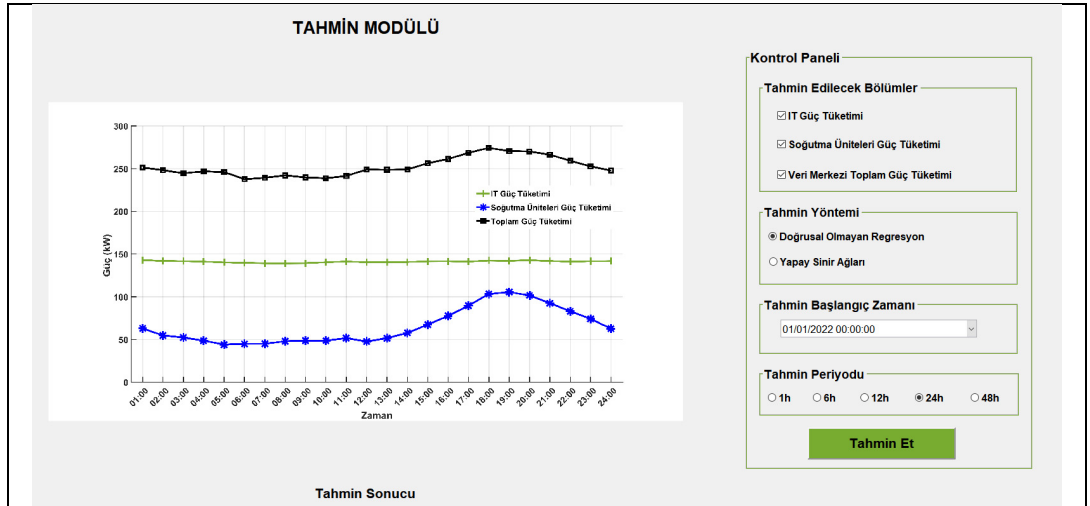
Bu bölümde tahmin modülünde elde edilen IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi tahmin sonuçları giriş verileri olarak kullanılmış veri merkezi optimum enerji yönetimi için maliyeti minimize eden optimizasyon yaklaşımlarının performansı, farklı senaryolar aracılığı ile karşılaştırılmıştır. Bütün senaryoların performansı 01 Ocak 2022 için veri merkezinin tahmin edilen güç talebi kullanılarak analiz edilmiştir. En karlı yaklaşımın, TZET'e göre hesaplanan enerji maliyetini %13,1 azaltan Senaryo 4 olduğu görülmüştür. Ancak TZET'e göre hesaplanan maliyet ile karşılaştırıldığında Senaryo 2 hariç diğer senaryoların da kullanılabilir olduğu anlaşılmaktadır. Bu sonuç yalnızca üç zamanlı elektrik tarifesini kullanmanın veya yalnızca farklı enerji kaynakları kullanmanın tek başına yeterli olmadığını, bütüncül bir yaklaşım ile mutlaka yük kaydırma prensibinin de benimsenmesi gerektiğini göstermektedir. Optimizasyon senaryolarında kullanılan argümanların şebekeyle birlikte tek tek kullanılmasıyla, her bir yaklaşımın bireysel olarak maliyet tasarrufu üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sonuç olarak maliyeti en çok düşüren yaklaşımın IT iş yükü kaydırma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca dört farklı senaryo sonucunda VM'nin puant zamanlarda şebekeden çektiği enerji miktarının %84 ile %94 arasında azaltılabileceği sonucuna varılmıştır. Bu miktar Bölüm 3.'te Türkiye için yapılan analizle karşılaştırıldığında, bütün VM'lerin TTY'ye sanki %0.0142 ve %0.0158 oranında katıldıkları durumdaki sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır.

7. SİMÜLATÖR TASARIMI

Tahmin ve Optimizasyon modülünde arka planda gerçekleştirilen matematiksel işlemler ve süreçler Tezin 5. ve 6. bölümünde detaylıca anlatılmıştır. Bu bölümde ise tahmin ve optimizasyon modülünün kullanıcı tarafından yönetildiği ara yüz tasarımları anlatılmaktadır. Tahmin ve Optimizasyon modülü ara yüz tasarımları MATLAB-GUI kullanılarak geliştirilmiştir.

7.1. Tahmin Modülü Ara Yüzünün Tasarlanması

Tahmin etme sürecinde ihtiyaç duyulan giriş verilerinin kullanıcı tarafından girilebileceği bir tahmin modülü ara yüz tasarımı gerçekleştirilmiştir. Geliştirilen ara yüz tasarımı Şekil 7.1’de gösterilmektedir. Tahmin modülü ara yüz tasarımında kullanıcıdan, “kontrol panelinde” yer alan farklı seçenekleri kullanarak bir seçim yapması beklenmektedir. Öncelikle kullanıcı, tahmin işlemini hangi bölüm için yapacağına karar vermektedir. Kullanıcı IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi tahmin işlemlerini tek tek veya birlikte seçebilmektedir.



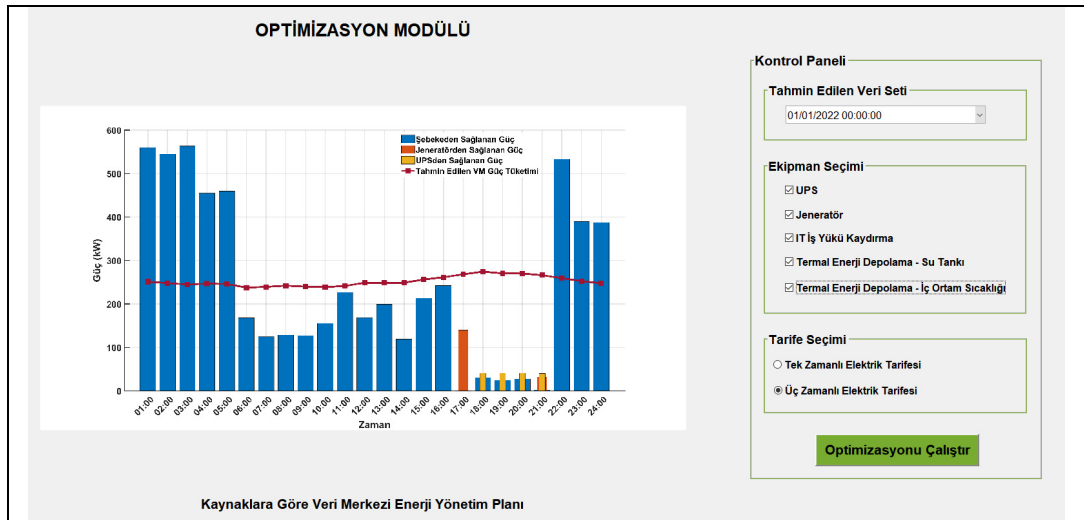
Şekil 7.1: Tahmin Modülü Ara Yüzü

Sonrasında kullanılmak istenen tahmin yönteminden yalnızca biri kullanıcı tarafından seçilmektedir. Seçilen yöntemine göre, doğrusal olmayan regresyon yöntemi ve yapay sinir ağları yöntemi için Bölüm 5’te anlatılan ve arka planda ayrı ayrı

oluşturulmuş MATLAB dosyaları çağrılmaktadır. Tahmin yöntemi seçiminden sonra kullanıcının tahmin işlemini yapmak istediği başlangıç zamanını seçmesi gerekmektedir. Sonrasında tahmin periyodunu belirlemesi gerekmektedir. Tahmin periyodu, tahmin zamanından başlayarak en az 1 saat en fazla ise 48 saatlik süre için tahmin işleminin gerçekleşmesini sağlamaktadır. Bütün seçimler yapıldıktan sonra ise “tahmin et” butonu kullanılarak kullanıcı tahmin işlemini başlatmaktadır. Yapılan seçimlere göre oluşturulan tahmin sonuçları ara yüzde ayrılan “tahmin sonucu” bölümünde gösterilmektedir. Şekil 7.1’de gösterilen tahmin sonucu 01 Ocak 2022 için ve ara yüzde işaretlenen tercihlere göre yapılmış tahmin sonucunu göstermektedir. Gerçekleştirilen tahmin işlemlerinin sonucu arka planda kaydedilerek optimizasyon modülünde kullanılmaktadır.

7.2. Optimizasyon Modülü Ara Yüzünün Tasarlanması

Optimizasyon modülü için tasarlanan ara yüz tasarımı Şekil 7.2’de gösterilmektedir. Optimizasyon modülünde öncelikle kullanıcı hangi tahmin işlemi sonucu için optimizasyon algoritmasını çalıştırmak istiyorsa “Tahmin Edilen Veri Seti” bölümünden ilgili tahmin işlemini seçmektedir. Sonrasında optimizasyon sürecine dahil edilmek istenen ekipmanlar tek tek veya birlikte seçilmektedir.



Şekil 7.2: Optimizasyon Modülü Ara Yüzü

Bölüm 6’da farklı senaryolar kullanılarak UPS, Jeneratör ve IT iş yükü kaydırmanın optimizasyona dahil edilmesi süreçleri matematiksel olarak anlatılmış ve

sonuçları verilmiştir. Ara yüz üzerinden bu senaryolar gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca kullanıcı, optimizasyon algoritmasına dahil etmek için termal enerji depolama ünitesi olarak veri merkezinde bulunan su tankını veya veri merkezi iç ortam sıcaklığını, belirlenen sınırlar içerisinde değiştirerek havanın termal kapasitesini kullanabilmektedir. Kullanıcı, optimizasyona dahil etmek istediği ekipmanları seçtikten sonra VM'nin kullanacağı elektrik tarifesini seçmektedir. Kullanıcı, ikili anlaşmalar yoluyla elde edilen ve günün bütün zamanı aynı olan tek zamanlı elektrik tarifi ile, günün farklı zamanlarında farklı elektrik fiyatlandırılmasının yapıldığı üç zamanlı elektrik tarifesini seçebilmektedir. Bütün bilgiler girildikten sonra “Optimizasyonu Çalıştır” butonu ile optimizasyon süreci başlar ve sonuç olarak kaynaklara göre VM optimum enerji yönetim planı oluşturulur ve görsel olarak ara yüzde gösterilir. Ayrıca Bölüm 6’da farklı senaryo başlıkları altında gösterilen UPS şarj- deşarj planlaması, TES tankının sıcaklık değişimleri vb. detaylı sonuçlar sayısal sonuç olarak kaydedilmektedir. Dolayısıyla kullanıcı, detaylı olarak görmek istediği sonucu grafiksel olarak ayrıca çizdirebilmektedir.

7.3. Sonuç

Bu bölümde kullanıcının, VM enerji talebi tahmini ve enerji yönetimi için kullanılan optimizasyon modülünün yönetildiği ara yüz tasarımları anlatılmıştır. MATLAB - GUI ortamında geliştirilen ara yüz üzerinden kullanıcı, tahmin ve optimizasyon modülü için belirlediği tercihlere göre süreci yönetmektedir. Geliştirilen ara yüz tasarımı arka planda Bölüm 5 ve 6’da anlatılan tahmin ve optimizasyon için gerçekleştirilen işlemlerin sonucunu çağırmakta ve sonuçlar ara yüz üzerinde belirlenen alanda gösterilmektedir.

8. SONUÇLAR

Bu çalışmada veri merkezlerinin talep tarafı yönetimine katılmasının hem şebeke açısından hem de veri merkezi açısından sağlayabileceği faydalar, gerçek bir veri merkezinde yapılan ölçümler sonucunda elde edilen veriler kullanılarak analiz edilmiştir. Veri merkezinin talep tarafı yönetimine katılımı için gerekli olan, doğru ve güvenilir enerji tüketimi tahmini yapan ve maliyeti minimize edecek şekilde optimum enerji yönetim planları sunan, dolaylı yoldan enerji verimliliği sağlayarak karbon emisyonunun azaltılmasına katkıda bulunan bir karar destek mekanizması geliştirilmiştir. Geliştirilen simülatör ara yüzü üzerinden kullanıcılar farklı zaman aralıkları için VM enerji talebini tahmin ederek analiz edebilmekte, optimizasyon modülü aracılığı ile maliyeti minimize eden farklı enerji kullanım stratejileri arasından uygun olanı seçebilmektedir. Geliştirilen karar destek mekanizması, yeni yatırım maliyeti gerektirmeden, yalnızca VM'lerin sahip olduğu mevcut argümanların sisteme entegre edilerek TTY'ye katılmalarını amaçlamakta ve optimizasyon yaklaşımlarında mevcut kaynakları alternatif enerji kaynağı olarak kullanmaktadır. Farklı optimizasyon senaryoları sonucunda veri merkezinin puant zamanlarda şebekeden çektiği enerji miktarının azaltılmasıyla, dolaylı yoldan enerji verimliliğinin artırılması ve karbon emisyonunun azaltılmasına katkı sağlanması amaçlanmıştır. Böylelikle tez kapsamında geliştirilen karar destek mekanizmasının entegre edildiği veri merkezlerinin, karbon ayak izi açısından daha yeşil olması ve sürdürülebilir enerji yönetim sistemine sahip olması sağlanmaktadır.

Tez kapsamında öncelikle VM'lerin TTY'ye katılmasının önemi ve nedenleri analiz edilmiştir. VM'lerin TTY'ye katılımı Türkiye ölçeğinde incelenmiş ve elde edilebilecek hem maddi hem de çevresel faydalar analiz edilmiştir. Türkiye'deki VM'lerin TTY'ye katılmasıyla tepe noktasının %2,18'e kadar iletim sistemi kayıplarının ise %4,13'e kadar azaltılabileceği gösterilmiştir. Kayıplardaki azalmanın 254.240 tCO₂ azaltılmasına sebep olacağı analiz sonuçlarıyla gösterilmiştir. Türkiye için yapılan çalışma ölçeklenerek bütün dünya için de gerçekleştirilmiştir.

Sonrasında gerçek bir veri merkezinde ölçümler yapılarak veri merkezi enerji tüketimi analiz edilmiş, güç tüketimini etkileyen değişkenler belirlenmiştir. Ölçülen ham veriler, veri ön işleme sürecinden sonra etiketlenerek güç tüketim modellerinde kullanılabilecek forma getirilmiştir. Ardından güç tüketimini etkileyen bağımsız

değişken seçimi için (feature selection) hibrit bir yöntem belirlenmiştir. Literatürde yer alan geleneksel yöntemlerin aksine, tez kapsamında geliştirilen tahmin algoritmalarında kullanılan bağımsız değişkenlerin seçim sürecinde, öncelikle korelasyon matrisi oluşturularak değişkenlerin birbiri üzerindeki etkileri ve ilişkileri incelenmiş, ardından her bir bağımsız değişkenin ilgili güç tüketimi tahmin sonucuna etkisi analiz edilmiştir. Bağımsız değişkenlerin bireysel ve grup olarak kullanıldıklarında tahmin sonucuna olan etkilerine göre seçim süreci tamamlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda, bağımlı değişken ile arasında yüksek korelasyon katsayısı bulunan bağımsız değişkenlerin tahmin modelinde kullanılmasının, tahmin sonucunu iyileştireceği yaklaşımının genelleştirilemeyeceği gösterilmiştir. Veya tam tersi şekilde bir bağımsız değişkenin bağımlı değişken ile arasında düşük korelasyon olması, tahmin sonucunu kötü yönde etkileyeceği manasına gelmemektedir. Ayrıca, bağımsız değişken seçilirken yalnızca hata metriklerinin sonucu incelenerek en düşük hata oranına sahip değişkeni tahmin modeli için belirlenmenin doğru bir yaklaşım olmadığı gösterilmiş, tahmin hata oranıyla birlikte, tahmin edilen verinin karakteristiği ve dalga formunun da dikkate alınması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Geliştirilen bağımsız değişken seçim metodolojisi, IT, Soğutma Üniteleri ve VM Toplam Güç Tüketimi tahminini etkileyen bağımsız değişkenlerin seçilmesi sürecinde de kullanılmıştır. Güç tüketimi tahminleri için doğrusal olmayan modeller geliştirilmiş ve tahmin işlemi için yapay sinir ağları ve doğrusal olmayan regresyon yöntemleri kullanılmıştır. Doğrusal olmayan regresyon yöntemi kullanılarak yapılan tahmin işlemi süresi, yapay sinir ağları yönteminde ilk modelin oluşturulma süresinden oldukça kısadır. Ancak her iki model de oluşturulduktan sonra kaydedilerek yeni tahmin işlemlerinde kullanıldıkları için tahmin süresi her iki modelde de benzer olmaktadır. Her iki yöntem kullanılarak oluşturulan tahmin sonuçlarının hem gerçek değerlerle tutarlılığı açısından hem de dalga karakteristiği açısından kabul edilebilir ve gerçekçi sonuçlar olduğu gösterilmiştir.

Tahmin modülünde gerçekleştirilen güç tüketimi tahminleri, optimizasyon modülünün giriş verileri olarak kullanılmaktadır. Geliştirilen simülatör ara yüzü üzerinden kullanıcının belirlediği tercihlere göre farklı enerji yönetim planları oluşturulmaktadır. Örnek bir tarih olan 01 Ocak 2022 için yapılan analizler sonucunda veri merkezinin mevcut durumda, herhangi bir optimizasyon yaklaşımı benimsenmeden, ikili anlaşmalar yoluyla kullanılan elektrik tarifesine göre (TZET)

güç tüketim maliyetinin 12.994 TL olduğu hesaplanmıştır. Bu maliyet üç zamanlı elektrik tarifi ve IT yük kaydırma yaklaşımı kullanıldığında %5,8 azalmaktadır. Ayrıca üç zamanlı elektrik tarifi ve IT yük kaydırma yaklaşımıyla birlikte, veri merkezinin sahip olduğu jeneratör ve UPS alternatif enerji kaynağı olarak kullanıldığında maliyet bir önceki duruma göre %4 daha da azalmıştır. Bu maliyet TZET'e göre %9,6 daha ucuzdur. Bütün bu yaklaşımlara ek olarak veri merkezi termal kapasitesinin kullanılmasıyla birlikte maliyet, TZET'e göre %13,1 daha ucuz hale gelmektedir. Veri merkezi termal kapasitesinin optimizasyon algoritmasına dahil edilme sürecinde, hem veri merkezi iç ortam hava sıcaklığının değiştirilerek havanın termal ısı kapasitesi kullanılarak enerji depolanmış hem de veri merkezinde yer alan ve soğutma için yedekte bekletilen su tankı, termal enerji depolama tankı olarak kullanılmıştır. Optimizasyon argümanları arasında IT iş yükü kaydırmanın diğerlerine göre çok daha fazla maliyet tasarrufu sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca 1 Ocak 2022 için gerçekleştirilen bu optimizasyon senaryoları sonucunda, VM'lerin puant zamanda şebekeden çekecekleri enerji miktarının, %84 ile %94 arasındaki oranlarda azaltılabileceği gösterilmiştir. Bu oranlar Türkiye'deki bütün VM'lerin TTY'ye sanki %0.0142 ve %0.0158 oranlarında katıldıkları durum gibi ekonomik ve çevresel faydalar sağlamaktadır.

VM enerji tahmini ve optimizasyon süreci, geliştirilen simülatör ara yüz ekranından yönetilmektedir. Kullanıcı bu ekran sayesinde VM'nin gelecek enerji talebini görüntülemekte ve istediği optimizasyon argümanını kullanarak (IT iş yükü kaydırma, UPS, jeneratör, termal kapasite dahil etme) maliyeti minimize edecek en uygun enerji yönetim planını elde etmektedir.

Sonuç olarak bu çalışmada veri merkezleri için ekstra kurulum maliyeti gerektirmeyen, mevcut altyapının ve sahip olunan kaynakların efektif olarak ve birbiriyle entegre edilerek kullanılmasına dayanan, hem veri merkezi enerji maliyetini azaltan hem de enerji verimliliğini artırarak dolaylı yoldan VM karbon ayak izinin azaltılmasına katkı sağlayan, sürdürülebilir enerji yönetim sistemi geliştirilmiştir.

Bu çalışmada VM enerji tüketiminin TTY'ye katılması kullanım zamanına göre fiyatlandırma (ToU) yaklaşımı kullanılarak gerçekleştirilmiş, VM'nin piyasa mekanizmasına katılması değerlendirilmemiştir. Gelecek çalışmalarda, yalnızca enerji maliyetinin düşürülerek tasarruf edilmesine ek olarak, yan hizmetler yönetmeliği aracılığı ile VM'nin piyasa mekanizmasına katılıp şebekeden karşılanan gücü azaltma miktarına göre, sistem tarafından yapılacak ödeme ile ek gelir elde edilebilir ve bu

yaklaşım optimizasyon modeline dahil edilebilir. Ayrıca VM mevcut altyapısı için ve yeni kurulacak yenilebilir enerji kaynakları için amortisman giderleri maliyet fonksiyonuna dahil edilerek optimizasyon yaklaşımı genişletilebilir. Bunlara ek olarak TES Tankındaki suyun spesifik ısı kapasitesini artırmak için farklı yöntemler kullanılarak VM termal kapasitesi artırılabilir.



KAYNAKLAR

- [1] Cisco, (2020), “Cisco Annual Internet Report (2018-2023)”, Technical Report No: C11-741490-01, San Jose, California, USA.
- [2] Reinsel D., Gantz J., Rydning J., (2018), “The Digitization of the World - From Edge to Core,” International Data Corporation (IDC) & SEAGATE, Technical Report No:US44413318, Framingham, MA, USA.
- [3] Kim R. Y., (2020) “The Impact of COVID-19 on Consumers: Preparing for Digital Sales”, IEEE Engineering Management Review, 48 (3), 212-218.
- [4] Morning Consult, (2020), “National Tracking Poll March 24-26 Crosstabulation Results,” Morning Consult, Technical Report No:200394, New York City, USA.
- [5] Web 1, (2020), <https://www.forbes.com/sites/googlecloud/2020/04/08/covid-19-and-our-surprising-digital-transformation/#4495673420e7> (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [6] De R., Pandey N., Pal A., (2020), “Impact of Digital Surge during Covid-19 Pandemic: A Viewpoint on Research and Practice,” International Journal of Information Management, 55, 102171.
- [7] Jung G., Hiltunen M. A., Joshi K. R., Schlichting R. D., Pu C., (2010), “Mistral: Dynamically managing power, performance, and adaptation cost in cloud infrastructures,” 2010 IEEE 30th International Conference on Distributed Computing Systems, 62-73, Genova, Italy, 21-25 June.
- [8] Yao Y., Huang L., Sharma A., Golubchik L., Neely M., , (2012), “Data centers power reduction: A two time scale approach for delay tolerant workloads,” the 31st Annual IEEE International Conference on Computer Communications, 1431–1439, Orlando, Florida, USA, 25-30 March.
- [9] Lei R., Xue L., Le X., Wenyu L., (2010), “Minimizing electricity cost: Optimization of distributed internet data centers in a multi-electricity-market environment,” the 29th Annual IEEE International Conference on Computer Communications, 1–9, San Diego, CA, USA, 15-19 March.
- [10] Li J., Bao Z., Li Z., (2015), “Modeling demand response capability by internet data centers processing batch computing jobs,” IEEE Transactions on Smart Grid, 6 (2), 737–747.
- [11] Web 2, (2015), <https://www.jisc.ac.uk/guides/improving-energy-efficiency-in-your-data-centre> , (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [12] Web 3, 2008, https://www.itu.int/dms_pub/itu-t/oth/06/0F/T060F0000090015PDFE.pdf , (Erişim Tarihi: 11/06/2022).

- [13] Brown R., Chan P., Eto J., Jarvis S., Koomey J., Masanet E., Nordman B., Sartor D., Shehabi A., Stanley J., Tschudi B., (2018), "Report to Congress on Server and Data Center Energy Efficiency: Public Law 109-431," U.S. Environmental Protection Agency Lawrence Berkeley Nat. Lab., Technical Report No: LBNL-363E, Berkeley, CA, USA
- [14] Mathew V., Sitaraman R. K., Shenoy P., (2012), "Energy-aware load balancing in content delivery networks," the 31st Annual IEEE International Conference on Computer Communications, 954–962, Orlando, Florida, USA, 25-30 March
- [15] Web 4, (2014), <https://www.nrdc.org/sites/default/files/data-center-efficiency-assessment-IB.pdf>, (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [16] Shuja J., Bilal K., Madani S., Othman M., Ranjan R., Balaji P., Khan S. U., (2016), "Survey of Techniques and Architectures for Designing Energy-Efficient Data Centers", IEEE Systems Journal, 10 (2), 507–519.
- [17] Qureshi A., Weber R., Balakrishnan H., Gutttag J., Maggs B., (2009) "Cutting the electric bill for internet-scale systems", ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 39(4),123–134, Barcelona, Spain, 17-21 August.
- [18] Mills M. P., (2013), "The cloud begins with coal," Digital Power Group, National Mining Association American Coalition for Clean Coal Electricity, USA.
- [19] Koomey J., (2011), "Growth in Data Center Electricity use 2005 to 2010," Analytics Press., Oakland, CA,USA.
- [20] Web 5, <https://www.iea.org/reports/data-centres-and-data-transmission-networks> (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [21] Web 6, <https://www.se.com/ww/en/work/solutions/system/s1/data-center-and-network-systems/trade-off-tools/data-center-and-edge-global-energy-forecast/> (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [22] Huang P., Copertaro B., Zhang X., Shen J., Löfgren I., Rönnelid M., Fahlen J., Andersson D., Svanfeldt M., (2019), "A review of data centers as prosumers in district energy systems: Renewable energy integration and waste heat reuse for district heating," Applied Energy, 258, 114109.
- [23] Takcı M.T., Öztürk O., Şeker A.A., Köksoy A., Gözel T., Hocaoglu M. H., Lee H., Choi Y., Pournaris M., Yovchev S., Karatana F., Uzuner K., Medeni T., Yeşilçimen H., (2018), "Designing of a Simulator Architecture for Greener Data Center Through Knowledge Transfer by Partners in Different Sectors," 12th International Technology, Education and Development Conference, 1, 4069–4076, Valencia, Spain. 5-7 March.

- [24] Takci M. T., Gozel T., Hocaoglu M. H., (2019), "Forecasting Power Consumption of IT Devices in a Data Center," in 20th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, 1–8, New Delhi, India, 10-14 December.
- [25] Kang D. K., Yang E. J., Youn C. H., (2019), "Deep Learning-Based Sustainable Data Center Energy Cost Minimization with Temporal MACRO/MICRO Scale Management," *IEEE Access*, 7, 5477–5491.
- [26] Ahmad S., Ahmad A., Naeem M., Ejaz W., Kim H. S., (2018), "A compendium of performance metrics, pricing schemes, optimization objectives, and solution methodologies of demand side management for the smart grid," *Energies*, 11(10), 1–33.
- [27] Al-Iriani M. A., (2005), "Climate-related electricity demand-side management in oil-exporting countries - The case of the United Arab Emirates," *Energy Policy*, 33 (18), 2350–2360.
- [28] Yilmaz P., Hocaoglu M. H., Konukman A. E. S., (2008), "A pre-feasibility case study on integrated resource planning including renewables," *Energy Policy*, 36(3), 1223–1232.
- [29] Clausen A., Ghatikar G., Jorgensen B. N., (2015), "Load management of data centers as regulation capacity in Denmark," 2014 International Green Computing Conference, Dallas, TX, USA, 3-5 November.
- [30] Verzijlbergh R., De Vries L. J., Lukszo Z., (2014), "Renewable Energy Sources and Responsive Demand. Do We Need Congestion Management in the Distribution Grid?" *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(5), 2119–2128.
- [31] Li J., Bao Z., Li Z., Member S., (2015) "Modeling demand response capability by internet data centers processing batch computing jobs," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2), 737–747.
- [32] Arroyo J. M., Conejo A. J., (2002), "Multiperiod auction for a pool-based electricity market," *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(4), 1225–1231.
- [33] Borghetti A., Gross G., Nucci C. A., (2001), "Auctions with explicit demand-side bidding in competitive electricity markets," In: Hobbs, B.F., Rothkopf, M.H., O'Neill, R.P., Chao, H., Editors, "The Next Generation of Electric Power Unit Commitment Models. International Series in Operations Research & Management Science", Springer, Boston, MA.
- [34] Ghatikar G., Ganti V., Matson N., (2012), "Demand Response Opportunities and Enabling Technologies for Data Centers: Findings from Field Studies", Technical Report No: LBNL-5763E, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA.

- [35] Mahmoudi N., Saha T. K., Eghbal M., (2014), "A new trading framework for demand response aggregators", IEEE PES General Meeting | Conference & Exposition., 1-5, National Harbor, Maryland, USA, 27-31 July.
- [36] Kantarci B., Mouftah H. T., (2012), "The impact of time of use (ToU)-awareness in energy and opex performance of a cloud backbone", IEEE Global Telecommunications Conference, 3250–3255, Anaheim, CA, USA, 03-07 December.
- [37] Kantarci B., Mouftah H. T., (2013), "Time of use (ToU)-awareness with inter-data center workload sharing in the cloud backbone," IEEE International Conference on Communications, 4207–4211, Budapest, Hungary, 09-13 June.
- [38] Yang T., Zhao Y., Pen H., Wang Z., (2018) "Data center holistic demand response algorithm to smooth microgrid tie-line power fluctuation," Applied Energy, 231, 277–287.
- [39] Dabbagh M., Hamdaoui B., Member S., (2019), "Shaving Data Center Power Demand Peaks Through Energy Storage and Workload Shifting Control," IEEE Transactions on Cloud Computing, 7(4), 1095–1108.
- [40] Cupelli L., Schutz T., Jahangiri P., Fuchs M., Monti A., Muller D., (2018) "Data center control strategy for participation in demand response programs", IEEE Transactions on Industrial Informatics, 14(11), 5087–5099.
- [41] Zhang W. Z., Xie H. C., Hsu C. H., (2017), "Automatic Memory Control of Multiple Virtual Machines on a Consolidated Server", IEEE Transactions on Cloud Computing., 5(1), 2–14.
- [42] Zhang W., Han S., He H., Chen H., (2017), "Network-aware virtual machine migration in an overcommitted cloud", Future Generation Computer Systems, 76, 428–442.
- [43] Ammar A. M., Luo J., Tang Z., Wajdy O., (2019), "Intra-Balance Virtual Machine Placement for Effective Reduction in Energy Consumption and SLA Violation," IEEE Access, 7, 72387–72402.
- [44] Li J., Qi W., (2018), "Toward optimal operation of internet data center microgrid", IEEE Transactions on Smart Grid, 9(2), 971–979.
- [45] Guo Y., Li H., Pan M., (2018), "Colocation Data Center Demand Response Using Nash Bargaining Theory", IEEE Transactions on Smart Grid, 9(5), 4017–4026.
- [46] Zhan Y., Ghamkhari M., Xu D., Ren S., Mohsenian-Rad H., "Extending Demand Response to Tenants in Cloud Data Centers via Non-Intrusive Workload Flexibility Pricing", IEEE Transactions on Smart Grid, 9(4), 3235–3246.

- [47] Fridgen G., Keller R., Thimmel M., Wederhake L., (2017), "Shifting load through space – The economics of spatial demand side management using distributed data centers," *Energy Policy*, 109, 400–413.
- [48] Thimmel M., Fridgen G., Keller R., Roevekamp P., (2019), "Compensating balancing demand by spatial load migration – The case of geographically distributed data centers," *Energy Policy*, 132, 1130–1142.
- [49] Moghaddam M. M., Manshaei M. H., Saad W., Goudarzi M., (2019), "On data center demand response: A cloud federation approach," *IEEE Access*, 7, 101829–101843.
- [50] Liu Q., Chen S., Wu G., Gao C., (2018) "Congestion Management in Cross-Region Grid Considering Spatially Transferable Characteristic of Data Center Load," *IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration*, 1–6, Beijing, China, 20-22 October.
- [51] Yu L., Jiang T., Zou Y., (2018), "Distributed Real-Time Energy Management in Data Center Microgrids," *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9 (4), 3748–3762.
- [52] Islam M. A., Mahmud H., Ren S., Wang X., (2020), "A Carbon-Aware Incentive Mechanism for Greening Colocation Data Centers," *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 8(1), 4–16.
- [53] Yi Y., Zheng A., Shao X., Cui G., Wu G., Tong G., Gao C., (2018), "Joint adjustment of emergency demand response considering data center and air-conditioning load", *IEEE International Conference on Energy Internet*, 72–76, Southampton, United Kingdom, 27-29 September.
- [54] Joshi Y., Kumar P., (2012), "Energy Efficient Thermal Management of Data Centers". Springer.
- [55] Pelley S., Meisner D., Wenisch T. F., VanGilder J. W., (2009), "Understanding and Abstracting Total Data Center Power," *Workshop on Energy-Efficient Design*, 1–6.
- [56] Roy S., Rudra A., Verma A., (2013), "An energy complexity model for algorithms," *The 4th conference on Innovations in Theoretical Computer Science*, 283, Berkeley, California, USA, 9 - 12 January.
- [57] Shin D., Kim J., (2009), "Energy-Optimal Dynamic Thermal Management for Green", *the 2009 International Conference on Computer*, 652–657, San Jose, California, USA, 2–5 November.
- [58] Bertran R., Gonzelez M., Martorell X., Navarro N., Ayguade E., (2013), "A systematic methodology to generate decomposable and responsive power models for CMPs", *IEEE Transactions on Computers*, 62 (7), 1289–1302.

- [59] Dayarathna M., Wen Y., Fan R., (2016), "Data Center Energy Consumption Modeling: A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 732–794.
- [60] Ge R., Feng X., Cameron K. W., (2009), "Modeling and evaluating energy-performance efficiency of parallel processing on multicore based power aware systems", *IEEE International Symposium on Parallel & Distributed Processing* Rome, Italy, 23-29 May.
- [61] Song S. L., Barker K., Kerbyson D., (2013), "Unified Performance and Power Modeling of Scientific Workloads," *1st International Workshop on Energy Efficient Supercomputing*, New York, NY, USA, 17 – 21 November.
- [62] Tang M., Pan S., (2015), "A Hybrid Genetic Algorithm for the Energy-Efficient Virtual Machine Placement Problem in Data Centers", *Neural Processing Letters*, 41, 211–221.
- [63] Zhang X., Lu J. J., Qin X., Zhao X. N., (2013), "A high-level energy consumption model for heterogeneous data centers," *Simulation Modelling Practice and Theory*, 39, 41–55.
- [64] Jin C., Bai X., Yang C., Mao W., Xu X., (2020), "A review of power consumption models of servers in data centers," *Applied Energy*, 265, 114806.
- [65] Yao J., Liu X., He W., Rahman A., (2012), "Dynamic control of electricity cost with power demand smoothing and peak shaving for distributed internet data centers", *IEEE 32nd International Conference on Distributed Computing Systems*, 416–424, Macau, China, 18-21 June.
- [66] Horvath T., Skadron K., (2008), "Multi-mode energy management for multi-tier server clusters," *17th International Conference on Parallel Architectures and Compilation Techniques.*, 270–279, New York, NY, USA, 25 – 29 October.
- [67] Latouche G., Ramaswami V., (1999), *Introduction to Matrix Analytic Methods in Stochastic Modeling*, Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [68] Pacheco-Sanchez S., Casale G., Scotney B., McClean S., Parr G., Dawson S., (2011), "Markovian workload characterization for QoS prediction in the cloud," *IEEE 4th International Conference on Cloud Computing*, Washington, DC, USA, 04-09 July.
- [69] Mazzucco M., Dyachuk D., (2012), "Balancing electricity bill and performance in server farms with setup costs," *Future Generation Computer Systems*, 28(2), 415–426.
- [70] Gandhi A., Harchol-Balter M., Adan I., "Server farms with setup costs," *Performance Evaluation*, 67(11), 1123–1138.
- [71] Gandhi A., Harchol-Balter M., Das R., Lefurgy C., (2009), "Optimal power allocation in server farms," *The Eleventh International Joint Conference on*

Measurement and Modeling of Computer Systems, 157, Seattle, WA, USA, 15-19 June.

- [72] Berezovskaya Y., Yang C. W., Mousavi A., Vyatkin V., Minde T. B., et al., 2020, "Modular model of a data centre as a tool for improving its energy efficiency," IEEE Access, 8, 46559–46573.
- [73] Daraghmeh M., Al Ridhawi I., Aloqaily M., Jararweh Y., Agarwal A., (2019), "A power management approach to reduce energy consumption for edge computing servers", Fourth International Conference on Fog and Mobile Edge Computing, 259–264, Rome, Italy, 10-13 June.
- [74] Radulescu C. Z., Radulescu D. M., (2020), "A performance and power consumption analysis based on processor power models," the 12th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, 38–41, Bucharest, Romania, 25-27 June.
- [75] Vasques T. L., Moura P., Almeida A. de, (2019), "A review on energy efficiency and demand response with focus on small and medium data centers", Energy Efficiency, 12(5), 1399–1428.
- [76] Zhou Z., Abawajy J. H., Li F., Hu Z., Chowdhury M. U., Alelaiwi A., Li K., (2017), "Fine-Grained Energy Consumption Model of Servers Based on Task Characteristics in Cloud Data Center," IEEE Access, 6, 27080–27090.
- [77] Lin W., Wu G., Wang X., Li K. (2020), "An Artificial Neural Network Approach to Power Consumption Model Construction for Servers in Cloud Data Centers," IEEE Transactions on Sustainable Computing, 5(3), 329–340.
- [78] Duan L., Zhan D., Hohnerlein J., (2015), "Optimizing Cloud Data Center Energy Efficiency via Dynamic Prediction of CPU Idle Intervals", IEEE 8th International Conference on Cloud Computing, 985–988, New York, NY, USA, 27 June - 02 July.
- [79] Hlavacs H., Treutner T., (2012), "Genetic algorithms for energy efficient virtualized data centers", 8th International Conference on Network and Service Management, 422–429, Las Vegas, NV, USA, 22-26 October.
- [80] Shaw S. B., Kumar C., Singh A. K., (2018), "Use of time-series based forecasting technique for balancing load and reducing consumption of energy in a cloud data center," International Conference on Intelligent Computing and Control, 1–6, Coimbatore, India, 23-24 June.
- [81] Hafeez G., Alimgeer K. S., Qazi A. I. B., Khan I., Usman M., Khan F. A., Wadud, Zahid (2020), "A hybrid approach for energy consumption forecasting with a new feature engineering and optimization framework in smart grid," IEEE Access, 8, 96210–96226.

- [82] Pirbazari A. M., Chakravorty A., Rong C., (2019), "Evaluating Feature Selection Methods for Short-Term Load Forecasting", IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing, 1–8, Kyoto, Japan, 27 February - 02 March.
- [83] Baig S. U. R., Iqbal W., Berral J. L., Erradi A., Carrera D., (2019), "Adaptive Prediction Models for Data Center Resources Utilization Estimation", IEEE Transactions on Network and Service Management, 16(4), 1681–1693.
- [84] Hsu Y. F., Matsuda K., Matsuoka M., (2018), "Self-aware workload forecasting in data center power prediction," 18th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing, 321–330, Washington, DC, USA, 01-04 May.
- [85] Wang K., Xu C., Zhang Y., Guo S., Zomaya A. Y., (2017), "Robust Big Data Analytics for Electricity Price Forecasting in the Smart Grid", IEEE Transactions on Big Data, 5(1), 34–45.
- [86] Liang Y., Hu Z., (2019) "Prediction Method of Energy Consumption Based on Multiple Energy-related Features in Data Center," IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Big Data & Cloud Computing, Sustainable Computing & Communications, Social Computing & Networking, 140–146, Xiamen, China, 16-18 December.
- [87] Yu X., Zhang G., Li Z., Liang W., Xie G., (2019), "Toward Generalized Neural Model for VMs Power Consumption Estimation in Data Centers," IEEE International Conference on Communications, 1-7, Shanghai, China, 20-24 May.
- [88] Koprinska I., Rana M., Agelidis V. G., (2015), "Correlation and instance based feature selection for electricity load forecasting," Knowledge-Based Systems, 82, 29–40.
- [89] Kushal T. R. B., Illindala M. S., (2020), "Correlation-based feature selection for resilience analysis of MVDC shipboard power system," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 117, 105742.
- [90] Prevost J. J., Nagothu K., Kelley B., Jamshidi M., (2011), "Prediction of cloud data center networks loads using stochastic and neural models," 6th International Conference on System of Systems Engineering, 276–281, Albuquerque, NM, USA, 27-30 June.
- [91] Rossi M., Brunelli D., (2015), "Forecasting data centers power consumption with the Holt-Winters method," IEEE Workshop on Environmental, Energy, and Structural Monitoring Systems, 210–214, Trento, Italy, 09-10 July.
- [92] Bajracharya A., Khan M. R. A., Michael S., Tonkoski R., (2019), "Forecasting Data Center Load Using Hidden Markov Model", 2018 North American Power Symposium (NAPS), 1–5, Fargo, ND, USA, 09-11 September.

- [93] Smpokos G., Elshatshat M. A., Lioumpas A., Iliopoulos I., (2018), “On the Energy Consumption Forecasting of Data Centers Based on Weather Conditions: Remote Sensing and Machine Learning Approach,” 11th Int. Symp. Commun. Syst. Networks Digit. Signal Process. CSNDSP, 1–6, Budapest, Hungary, 18-20 July.
- [94] Tarutani Y., Hashimoto K., Hasegawa G., Nakamura Y., Tamura T., Matsuda K., Matsuoka M., (2016), “Reducing power consumption in data center by predicting temperature distribution and air conditioner efficiency with machine learning”, IEEE International Conference on Cloud Engineering , 226–227, Berlin, Germany, 04-08 April.
- [95] Niranjan U. V., Pillai K. K. G., (2019), “Energy Management of Cloud Data Center Using Neural Networks”, IEEE International Conference on Cloud Computing in Emerging Markets, 85–89, Bangalore, India, 23-24 November.
- [96] Samarasinghe S., (2007), “Neural networks for applied sciences and engineering: from fundamentals to complex pattern recognition”, 1st Edition, Auerbach Publications .
- [97] Liu K., Subbarayan S., Shoults R R., Manry M T., Kwan C., Lewis F I., Naccarino J., (1996), “Comparison of very short-term load forecasting techniques,” IEEE Transactions on Power Systems, 11(2), 877-882.
- [98] Yoldaş U. C., (2016), “Elektrik Enerjisinde Yük Tahmini Yöntemleri ve Türkiye’nin 2005–2020 Yılları Arasındaki Elektrik Enerjisi Talep Gelişimi ve Arz Planlaması”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi.
- [99] Pınarbaşı M., (2009), “Elektrik Enerji Sistemlerinde Talep Tahmin Yöntemleri ve Yapay Sinir Ağları Uygulaması”, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi.
- [100] Marsland S., (2014), Machine Learning: An Algorithmic Perspective, 2nd Edition, Chapman & Hall/CRC.
- [101] Elmas Ç., (2003), Bulanık Mantık Denetleyiciler, Seçkin Yayıncılık.
- [102] SOM A., (2010), “Uzun Dönem Yük Tahmini: Manisa Örneği”, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi.
- [103] Cios K. J., Swiniarski R. W., Pedrycz W., Kurgan L. A., et al., (2007), "Supervised Learning: Decision Trees Rule Algorithms and Their Hybrids" in “Data Mining”, Springer US.
- [104] Sutton R. S., A. G. Barto, (2015) “Reinforcement Learning : An Introduction”, 2nd Edition, The MIT Press.
- [105] Lyu J., Zhang S., Cheng H., Yuan K., Song Y., Fang S., (2021), “Optimal Sizing of Energy Station in the Multienergy System Integrated with Data Center,” IEEE Transactions on Industry Applications, 57(2), 1222–1234.

- [106] Galkin N., Yang C., Berezovskaya Y., Vesterlund M., Vyatkin V., (2022), “On Modelling of Edge Datacentre Microgrid for Participation in Smart,” IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 3, 50–64.
- [107] Zheng W., Ma K., Wang X., (2015), “TE-Shave : Reducing Data Center Capital and Operating Expenses with Thermal Energy Storage”, IEEE Transactions on Computers, 64(11), 3278–3292.
- [108] Zou B., Chen G., (2021), “Optimal Power Scheduling of Data Centers with Deferrable Computation Requests”, IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration, 721–726, Taiyuan, China, 22-24 October.
- [109] Liu Z., Chen Y., Bash C., Wierman A., Gmach D., Wang Z., Marwah M., Hyser C., (2012), “Renewable and cooling aware workload management for sustainable data centers” ,12th ACM International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems’, 175, Boston, MA, USA, 8 – 12 June.
- [110] Sayan Ö.F., (2017), “Türkiye Elektronik Haberleşme Sektörü Pazar Verileri Raporu 2017 Yılı 3. Çeyrek”, Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu.
- [111] Web 7, (2013), <https://slideplayer.biz.tr/slide/2012172/>, (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [112] Eymirli E. B., ÇİFTÇİ C., (2016), “Veri Merkezi Yatırımları Açısından TRA1 Bölgesinin Değerlendirilmesi,” Kuzeydoğu Anadolu Kalkınma Ajansı.
- [113] ResGaz 1, (2017), Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliği, 26 Kasım 2017 tarih ve 30252 sayılı Resmi Gazete.
- [114] Web 8, (2020), https://ytbsbilgi.teias.gov.tr/ytbsbilgi/frm_istatistikler.jsf, (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [115] Malmedal K., Sen P.K., (2008), “A Better Understanding of Load and Loss Factors,” IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1–6, Edmonton, AB, Canada, 05-09 October.
- [116] Gustafson M.W., Baylor J.S. (1988), “The equivalent hours loss factor revisited (power systems),” IEEE Transactions on Power Systems, 3(4), 1502–1508.
- [117] Şeker A. A., Gözel T., Hocaoglu M. H., (2018), “An Analytic Approach to Determine Maximum Penetration Level of Distributed Generation Considering Power Loss,” Twentieth International Middle East Power Systems Conference, 956–961, Cairo, Egypt, 18-20 December.
- [118] Gözel T., Hocaoglu M. H., (2009) “An analytical method for the sizing and siting of distributed generators in radial systems,” Electric Power Systems Research, 79(6), 912–918.

- [119] Sawyer R. L., (2011), “Calculating Total Cooling Requirements for Data Centers,” White Paper, Technical Report No: SPD_VAVR-5TDTEF_EN, Schneider Electric, Rueil-Malmaison, France.
- [120] TEİAŞ, (2018), “Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2018-2022)” .Türkiye Elektrik İletim A.Ş. Genel Müdürlüğü Planlama Ve Yatırım Yönetimi Dairesi Başkanlığı, Ankara, Türkiye.
- [121] Web 9, (2022), <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>, (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [122] Yılmaz M., (2018), “Elektrik Piyasası Sektör Raporu 2018,” T.C Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Ankara, Türkiye.
- [123] Yılmaz M., (2019), “Elektrik Piyasası Sektör Raporu- Aralık 2019,” T.C Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, Ankara, Türkiye.
- [124] EIA, (2020), “Capital Cost and Performance Characteristic Estimates for Utility Scale Electric Power Generating Technologies”, Technical Report No: DC 20585, U.S. Energy Information Administration, U.S. Department of Energy, Washington.
- [125] Olivier J.G.J. Janssens-Maenhout G., Muntean M., Peters J.A.H.W., (2016), “Trends in global CO₂ emissions: 2016 report”, Technical Report No:103428, PBL Netherlands Environment Assessment Agency, The Hague, The Netherlands.
- [126] Birol F., (2019), CO₂ Emissions From Fuel Combustion – Highlights, International Energy Agency, Paris, France.
- [127] Jiang T., Shen Z., Liu Y., Hou Y., (2018), “Carbon footprint assessment of four normal size hydropower stations in China,” Sustainability, 10(6), 1–14.
- [128] Web 10, (2020), www.sciencedaily.com/releases/2007/11/071114163448.htm, (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [129] Dudley B., (2019), “BP Statistical Review of World Energy-2019”, Technical Report No: 68th Edition, BP, London, UK.
- [130] Web 11, (2018), <https://data.worldbank.org/indicator/EG.ELC.LOSS.ZS> , (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [131] Lazar J., Baldwin X., (2011), “Valuing the Contribution of Energy Efficiency to Avoid Marginal Line Losses and Reserve Requirements,” The Regulatory Assistance Project, Montpelier, Vermont, USA.

- [132] Aburn G., Hough M., (2015) “Implementing EPA's Clean Power Plan:A Menu of Options”, National Association of Clean Air Agencies (NACAA), Arlington, VA, USA.
- [133] Crippa M., Oreggioni G., Guizzardi D., Muntean M., Schaaf E., Lo Vullo E., Solazzo E., Monforti-Ferrario F., Olivier J.G.J., Vignati E., (2019), “Fossil CO₂ and GHG emissions of all world countries-2019 Report”, Technical Report No: EUR 29849 EN, European Commission, Joint Research Centre, Ispra (VA), Italy.
- [134] Web 12, <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/installed-power-generation-capacity-in-the-stated-policies-scenario-2000-2040>, (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [135] Song H., Qin A. K., Salim F. D., (2018), “Evolutionary Multi-objective Ensemble Learning for Multivariate Electricity Consumption Prediction”, The International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN), 1–8, Rio de Janeiro, Brazil, 08-13 July.
- [136] Chen P. Y., Popovich P. M., (2011), “Correlation: Parametric and Nonparametric Measures”, Sara Miller McCune, Sage Publications, Inc.
- [137] Botchkarev A., (2019), “Performance Metrics (Error Measures) in Machine Learning Regression, Forecasting and Prognostics: Properties and Typology”, Interdisciplinary Journal of Information, Knowledge, and Management, 14, 045-076.
- [138] Hyndman R. J., Koehler A. B., (2006), “Another look at measures of forecast accuracy”, International Journal of Forecasting, 22(4), 679–688.
- [139] Schall D., Hoefner V., Kern M., (2012), “Towards an enhanced benchmark advocating energy-efficient systems”, Ronan Nugent, Editor, in Lecture Notes in Computer Science, Springer.
- [140] Barroso L. A., Hölzle U., (2007), “The Case for Energy-Proportional Computing”, Computer, 40(12), 33–37.
- [141] Cheng Y., Chai Z., Anwar A., (2018), “Characterizing co-located datacenter workloads: An alibaba case study”, Proceedings of the 9th Asia-Pacific Workshop on Systems, New York, NY, United States, 27 - 28August.
- [142] Zhao M., Wang X., (2021), “A synthetic approach for datacenter power consumption regulation towards specific targets in smart grid environment,” Energies, 14(9), 2602.
- [143] Sahu N. C., Nanda A. B., Bhol S., Jena A. K., Rout P., (2020), “Reliability Assessment and Cost Estimation of a Hybrid Renewable Micro-grid System, In: Sharma, Ret al., Editors, “Green Technology for Smart City and Society”, Springer.

- [144] Yang Q., Yang T., Li W., (2021) “Renewable Energy Microgeneration Systems”, Academic Press, Elsevier.
- [145] Goudarzi A., Swanson A. G., Van C. J., Siano P., (2017), “Smart real-time scheduling of generating units in an electricity market considering environmental aspects and physical constraints of generators,” Applied Energy, 189, 667–696.
- [146] Web 13, (2022), <https://www.globalpwr.com/power-calculator/>, (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [147] Köhler U., (2009), “Applications—transportation/hybrid electric vehicles: batteries”, In: Garche J, Editor, “Encyclopedia of electrochemical power sources”, Elsevier.
- [148] Web 14, (2022), <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari> , (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [149] ASHRAE, (2016), “Data Center Power Equipment Thermal Guidelines and Best Practices”, ASHRAE Technical Committee (TC) 9.9 Mission Critical Facilities, Data Centers, Technology Spaces, and Electronic Equipment, New York City, NY, USA.
- [150] ASHRAE, (2015), “Equipment Thermal Guidelines for Data Processing Environments”, ASHRAE Technical Committee (TC) 9.9, New York City, NY, USA.
- [151] Web 15, https://media-www.micron.com/-/media/client/global/documents/products/data-sheet/modules/unbuffered_dimm/ddr4/ddr4_udimm_core.pdf?rev=95ba3ab644944312b8d9680beb6dafc6 , (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [152] Web 16, <https://ark.intel.com/content/www/us/en/ark/products/84678/intel-xeon-processor-e74830-v3-30m-cache-2-10-ghz.html>, (Erişim Tarihi: 11/06/2022).
- [153] Bergman T. L., Lavine A. S., Incropera F. P., Dewitt D. P., School (2011), “Introduction to Heat Transfer”, 6th Edition, John Wiley & Sons, INC .
- [154] Hubert T., Grijalva S., (2012), “Modeling for residential electricity optimization in dynamic pricing environments,” IEEE Transactions on Smart Grid, 3(4), 2224–2231.
- [155] Wang H., Meng K., Luo F., Dong Z.Y., Verbič G., Xu Z., Wong K. P., (2013), “Demand response through smart home energy management using thermal inertia,” Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 1–6, Hobart, TAS, Australia, 29 September - 03 October.

- [156] Zhao Z., Verbic G., Fiorito F., (2014), “Investigating thermal inertia in lightweight buildings for demand response”, Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC), 1–6, Perth, WA, Australia, 28 September - 01 October
- [157] Owen M. S., (2009), ASHRAE Handbook FUNDAMENTALS, SI Edition, American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers INC., New York City, NY, USA.
- [158] Rahimpour Z., Verbi G., Chapman A. C., (2020) “Actor-critic learning for optimal building energy management with phase change materials”, Electric Power Systems Research, 188, 106543.
- [159] Erenoğlu A. K., Şengör İ., Erdiñç O., Taşcıkaraoğlu A., Catalão J. P.S., (2022), “Optimal energy management system for microgrids considering energy storage, demand response and renewable power generation”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 136, 107714.
- [160] Brännvall R., Siltala M., Gustafsson J., Sarkinen J., Vesterlund M., Summers J., (2020) “EDGE: Microgrid Data Center with Mixed Energy Storage,” Eleventh ACM International Conference on Future Energy Systems, 466–473, New York, NY, USA, 22 – 26 June.
- [161] Angelis F. De, (2013), “Optimal home energy management under dynamic electrical and thermal constraints”, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 9(3), 1518–1527.
- [162] Web 17, (2022), <https://www.vertiv.com/en-emea/products-catalog/thermal-management/free-cooling-chillers/liebert-hpc-l-and-hpc-m-freecooling-chillers/>, (Erişim Tarihi: 11/06/2022)

ÖZGEÇMİŞ

Mehmet Türker TAKCI 2006 yılında başladığı Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Bölümünü 2011 yılında başarıyla tamamladı. 2015 yılında Gebze Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalından mezun olarak aynı yıl aynı bölümde doktora eğitimine başladı. 2012-2013 yılları arasında *Harmonik Üreten Yüklerin Tespit Edilmesi İçin Yeni Bir Metot Geliştirmek* isimli TUBİTAK 1001 projesinde, 2017-2018 yılları arasında *Yüksek Oranda Yerel Elektrik Santralleriyle Beslenmekte Olan Dağıtım Şebekelerinin Etki Haritalarının Çıkarılması* isimli TUBİTAK 1001 projesinde bursiyer olarak görev aldı. 2017 yılından itibaren *Sustainable Energy Demand Side Management for Green Data Centers (GreenDC)* isimli Avrupa Birliği Horizon 2020-MSCA-RISE tarafından desteklenen projede araştırmacı olarak çalışmaktadır.

EKLER

Ek A: Tez Çalışması Kapsamında Yapılan Yayınlar

Takci M. T., Gözel T., Hocaoglu M. H., (2021), "Quantitative Evaluation of Data Centers' Participation in Demand Side Management," IEEE Access, 9, 14883-14896.

Takci M. T., Şeker A. A., Gözel T., Hocaoglu M. H., Lee H., (2019), "Forecasting and Optimization Process of GREEDC DSS with Artificial Intelligence", Poster presented at: "Horizon 2020 MSCA cluster event Artificial Intelligence", Brussels, Belgium, 10-11 December.

Takci M. T., Gozel T, Hocaoglu M. H., (2019), "Forecasting Power Consumption of IT Devices in a Data Center," 20th International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, 1–8, New Delhi, India, 10-14 December.

Takci M.T., Gözel T., Hocaoglu M.H., (2019), "Forecasting Data Centre Power Consumption with Artificial Neural Network Method and Designing Simulator User Interface", 2nd International Turkish World Engineering and Science Congress, 465-473, Antalya, Turkey, 7-10 November.

Takci M. T., Öztürk O., Şeker Ayşe A., Köksoy A., Gözel T., Hocaoglu M. H., Lee H., Choi Y., Pournaris M., Yovchev S., Karatana F., Uzuner K., Medeni T., Yeşilçimen H., (2018), "Designing of a Simulator Architecture for Greener Data Center Through Knowledge Transfer by Partners in Different Sectors," 12th International Technology, Education and Development Conference, 1, 4069–4076, Valencia, Spain, 5-7 March.

Hocaoglu M.H., Gozel T., Takci M.T., (2017), "Data Centre Energy Management in Smart Grids [abstract] " - 1st International Turkish World Engineering and Science Congress, 50, Antalya, Turkey 7-10 December.

Hocaoglu M.H., Gozel T., Takci M.T., (2017), "Demand Side Management; a New Opportunity for Energy Efficient Data Centres [abstract]", International Conference on eBusiness and eGovernment (IceBeG), Ankara, Turkey, November.