



**ŞEBEKE ESNEKLİĞİ AÇISINDAN TALEP KATILIMININ VERİ
ANALİTİĞİ VE METASEZGİSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ**

Ümit ÇETİNKAYA

DOKTORA TEZİ

ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2023

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Ümit ÇETİNKAYA

30/12/2023

ŞEBEKE ESNEKLİĞİ AÇISINDAN TALEP KATILIMININ ANALİTİK VE METASEZGİSEL YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

(Doktora Tezi)

Ümit ÇETİNKAYA

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2023

ÖZET

Küresel olarak uygulanan sıfır karbon ve enerji arzında öncelikle yeşil enerji uygulamalarıyla yaşanan enerji dönüşümü güç sistemlerini önemli değişime zorlamaktadır. Fosil yakıtların yerini konvertör tabanlı rüzgar ve güneş kaynaklı yenilenebilir enerji kaynakları (YEK) almaktadır. Bu değişken üretim doğasına sahip olan kaynakların artışı, güç sistemlerinde meydana gelen dengesizliklerde şebekenin ihtiyacı olan esnekliğin azalmasına neden olmaktadır. Esneklik ihtiyacın karşılanabilmesi için yeni esneklik araçlarından biri olan tüketim kontrolü, yani talep katılım uygulamaları önemli hale gelmektedir. Ancak bir ülke ölçeğinde talep katılımının şebeke ve piyasa işletmesinde kullanılması için mevcut şebeke tüketimlerinin ulusal ve bölgesel olarak veri analizlerinin yapılması; zaman bazlı tüketim profillerinin bireysel ya da tüketici gruplarına göre bilinmesi gerekmektedir. Bu tez çalışmasında ilk olarak, talep katılım uygulamalarının belirlenmesi amacıyla tüketim veri analitiğinde kullanılan yöntemler araştırılarak, Türkiye açısından talep katılımının mevcut durumunun incelenmesi ve potansiyelinin belirlenmesi üzerine durulmaktadır. Elektrik şebekelerinde oluşabilecek üretim-tüketim dengesizliğinde, şebekenin frekans kontrolü konvansiyonel kaynaklardan karşılanmaktadır. Artan YEK'le birlikte şebekenin ataleti azalırken, düşük rezerv koşullarında frekans kararlılığının sağlanabilmesi için hızlı yanıt verebilecek uygulamaların geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Yapılan tez çalışmasında ikinci olarak, güç sistemlerinde şebekenin düşük atalet koşullarında talep katılımı, yapılan araştırmalara göre oluşturulan Türkiye şebekesinin eşlenik şebeke modeli ve yük frekans kontrol modelleri üzerinde farklı şebeke senaryolarında ele alınmıştır. Yapılan analizlerde optimum talep katılımıyla frekans kontrolü geliştirilen metasezgisel yöntemlerle sağlanmıştır. Elde edilen sonuçlarda Türkiye şebekesinde gelecek yıllarda artan YEK koşullarında frekans kontrolünde talep katılımının önemli bir araç olabileceği gösterilmiştir. Son olarak yapılan veri analitiği ve şebeke analizleri ışığında Türkiye'de talep katılımın uygulanmasında politika önerileri yapılmıştır.

Bilim Kodu : 90513

Anahtar Kelimeler : Şebeke esnekliği, talep katılımı, frekans kontrolü, veri analitiği, optimizasyon.

Sayfa Adedi : 125

Danışman : Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Ezgi AVCI

INVESTIGATION OF DEMAND RESPONSE IN TERMS OF GRID FLEXIBILITY
USING DATA ANALYTICS AND METAHEURISTIC METHODS

(Ph. D. Thesis)

Ümit ÇETİNKAYA

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2023

ABSTRACT

Globally, the energy transition implemented with together green energy applications in net zero carbon and energy supply forces power systems to change significantly. Converter-based wind and solar renewable energy sources (RES) are replacing fossil fuels. This increase in RES, which has a variable production nature, causes the flexibility needed by the grid to decrease in case of imbalances in power systems. To ensure the need for flexibility, consumption control, that is, demand response, which is one of the new flexibility tools, becomes more important. However, to use demand response in the grid and market operation on a country scale, national and regional data analysis of current consumption must be carried out; time-based consumption profiles need to be known for individuals or consumer groups. In this thesis, firstly, the focus is on examining the current situation of demand response in Turkey and determining its potential by investigating the methods used in data analytics to determine demand participation applications. Also, with the production-consumption imbalance that may occur in the grid, the frequency control is mainly provided by conventional sources. While the inertia of the grid decreases with increasing RES, there is a need to develop applications that can respond quickly to ensure frequency stability in low reserve conditions. Secondly, in the thesis study, demand response in low inertia conditions of power systems is discussed in different grid scenarios on the simplified network model and load frequency control models of the Turkish grid, which were created according to the methods in the research. In the analyses, frequency control with optimum demand participation was provided by developed metaheuristic methods. The results obtained show that demand response can be an important tool in frequency control under increasing RES conditions in the Turkish grid in the coming years. Finally, according to the results of data analytics and frequency control analysis, policy recommendations were made for the implementation of demand response in Turkey.

Science Code : 90513

Key Words : Grid flexibility, demand response, frequency control, data analytic, optimization.

Page Number : 125

Supervisor : Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR

Co-Supervisor : Dr. Ezgi AVCI

TEŞEKKÜR

Öncelikle şükür Allah’a teşekkürdür, şükrolsun.

Bu oldukça zorlu süreçte, akademik hayatımın başlangıcından bugüne kadar sahip olduğu hayat deneyimi, ileri görüşleri ve yönlendirmeleriyle bir bilim insanı olarak çalışmalarımda rehber olan kıymetli değerli hocam Prof. Dr. Ramazan BAYINDIR’a, yine akademik hayatım boyunca dostluğunu ve desteğini esirgemeyen hocam Prof. Dr. Erdal IRMAK’a, doktora tez çalışmalarım aşamasında kıymetli vakitlerinin ayırarak, her dönem görüşleriyle çalışmalarına katkı sağlayan tez izleme jürisi hocalarım Prof. Dr. Kamil Çağatay BAYINDIR’a, Doç Dr. Ahmet Önen’e ve Dr. Ezgi AVCI’ya çok teşekkür ederim.

İnsanın hayatı doğum ile başlar, emekleyerek çıktı hayat yolculuğunda heybesine doldurduğu en kıymetli hazinesi sevdikleridir. Bugüne kadar hayatımın her safhasında beni destekleyen anneme, babama, kardeşlerime; doktora sürecinde bilgi ve desteklerini esirgemeyen sevgili dostlarım Mustafa CANAY’a ve Merden YEŞİL’e; yeni konuları öğrenmeye çalıştığım süreçlerde en önemli katkılar ile çözümü bulmamı sağlayan Dr. Yaşar Kemal ALP hocama teşekkürü bir borç bilirim. Doktora çalışmalarım sürecinde çalışmakta olduğum TEİAŞ Genel Müdürlüğü’nün değerli yöneticilerine desteklerinden ve olumlu kanaatlerinden dolayı sonsuz teşekkür ediyorum.

Son ve en önemlisi olan, akademik çalışmalarım boyunca gösterdiği sevgisi ve hoşgörüsüyle her zaman destek olan bana katlanan, sevgisini ve ilgisini hiç eksik etmeyen hayat arkadaşım, kıymetli eşim Hatice’ye ve çok sevdiğim kızlarım Betül, Aybüke ve Gökçen’e sonsuz teşekkürlerimi ve sevgilerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. TALEP TARAĞI KATILIMI VE TALEP TARAĞI KATILIMININ ANALİTİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ.....	9
2.1. Talep Tarağı Katılımı Kavramı Nedir?.....	9
2.2. Talep Tarağı Katılımının Analitik Yöntemlerle İncelenmesi	14
2.3. Teorik Altyapı ve Literatür Taraması	16
2.3.1. Veri madenciliğı.....	16
2.3.2 Veri analizi yöntemleri.....	17
2.3.3. Zaman serileri ve kümeleme	19
2.3.4. Literatür özeti	23
2.4. Analiz ve Sonuçlar	27
2.4.1. Tüketim verilerinin bölgesel olarak incelenmesi	27
2.4.2. Dağıtım bölgelerinin tüketici bazlı incelenmesi	34
2.4.3. Büyük tüketici verilerinin incelenmesi	40
3. ARTAN YEK KOŞULLARINDA TALEP KATILIMIYLA FREKANS KONTROLÜNÜN İNCELENMESİ.....	47
3.1. Şebeke Test Modeli Oluşturma ve Düşük Rezerv Koşullarında Talep Katımıyla Frekans Kontrolü.....	53

Sayfa

3.1.1. Şebeke ataleti, kaynak bazlı atalet katsayısı, frekans değişim oranı ve matematiksel modeli	57
3.1.2. Türkiye şebekesinde frekans kontrolünde talep katılımının incelenmesi.....	59
3.2. Yük Frekans Kontrolü Modelinin Oluşturulması ve Talep Katılımıyla Frekans Kontrolünün Metasezgisel Yöntemler Kullanılarak Optimizasyonu	70
3.2.1. Yük frekans kontrolünde imparator penguen optimizasyon (EPO) algoritmasının test edilmesi ve duyarlılık analizi	76
3.2.2. Türkiye şebekesinde artan YEK koşullarının farklı şebeke durumlarında incelenmesi ve frekans kontrolüne optimum talep katılımının belirlenmesi	84
4. POLİTİKA ÖNERİLERİ	97
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	103
KAYNAKLAR	109
ÖZGEÇMİŞ	125

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Uzaklık ve benzerlik ölçütlerinin sınıflandırılması	21
Çizelge 2.2. 2019 yılı tüketici türlerinin ortalama, minimum ve maksimum tüketim bilgileri.....	36
Çizelge 2.3. Tahmini kontrol edilebilir ortalama tüketim kapasiteleri	40
Çizelge 3.1. Artan YEK koşullarında esneklik gereksinimi üzerindeki etkileri.....	51
Çizelge 3.2. Referans kontrolcü modelleri	60
Çizelge 3.3. Hesaplanan kaynak bazlı atalet katsayıları	60
Çizelge 3.4. Farklı RES-GES katılım oranına göre yapılan analiz sonuçları	63
Çizelge 3.5 Analiz senaryo özetleri	66
Çizelge 3.6. Senaryo analiz sonuçları	69
Çizelge 3.7. EPO algoritması için belirlenen ideal sabit parametreler	79
Çizelge 3.8. Duyarlılık analiz sonuçları.....	81
Çizelge 3.9. Analiz sonuçları	84
Çizelge 3.10. Senaryo 1- Analiz sonuçları.....	89
Çizelge 3.11. Senaryo 2 Analiz sonuçları.....	91
Çizelge 3.12. Senaryo 3 Analiz sonuçları.....	93

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Talep tarafı katılımı yöntemleri	11
Şekil 2.2. Talep tarafı katılımının faydaları	13
Şekil 2.3. Talep tarafı katılımı sınıflandırması	14
Şekil 2.4. Veri madenciliği bölümleri	16
Şekil 2.5. Veri madenciliği metotları.....	18
Şekil 2.6. Kümeleme teknikleri	22
Şekil 2.7. Kümeleme analizlerinin görselleştirilmesi a) Çoklu uzaklık ölçümleri yöntemi, b) Dendrogram gösterimi	24
Şekil 2.8. Kümeleme analizi akış diyagramı	25
Şekil 2.9. Günlük tüketim eğrisi ve özdüzenleyici haritalandırma	26
Şekil 2.10 2020 yılı güncel uygulanan tarife bilgileri.....	28
Şekil 2.11. Veri matrisi	29
Şekil 2.12. Kümeleme analizi sonuç ekranı.....	31
Şekil 2.13. Kümeleme analizi sonuçları, a) Üç yıl için kümeleme analiz sonuçları, b) Yıllara göre kümeleme analiz sonuçları.....	32
Şekil 2.14. Aylara göre kümeleme analizi sonuçları	33
Şekil 2.15. Özet analiz sonucu.....	34
Şekil 2.16. Tüketim veri matrisi	35
Şekil 2.17. 2019 yılı maksimum ve minimum tüketim zamanı tüketici katılım oranları	35
Şekil 2.18. 2019 yılı saatlik tüketimi	36
Şekil 2.19. Tüketici bazlı aylık-günlük-saatlik maksimum-minimum tüketim eğilimleri	37
Şekil 2.20. Aylara göre toplam şebeke ve dağıtım yükleri	38
Şekil 2.21. Dağıtım bölgelerinin ortalama saatlik tüketim grafikleri	39
Şekil 2.22. Sektörel talep gücü dağılımı	41

Şekil	Sayfa
Şekil 2.23. Sektörel tüketim grafiği	41
Şekil 2.24. Demir çelik tüketicileri talep profili	42
Şekil 2.25. Çimento tüketicileri talep profili	43
Şekil 2.26. Maden tüketicileri talep profili	43
Şekil 2.27. Otomotiv tüketicileri talep profili	44
Şekil 2.28. Pompa istasyonları profili	44
Şekil 3.1. Örnek iletim şebeke olayı	49
Şekil 3.2. Tek bara frekans modeli genel görünümü	54
Şekil 3.3. Basitleştirilmiş test şebeke modeli	56
Şekil 3.4. Şebeke üretim profili kaynak bazlı dağılımı	59
Şekil 3.5. Test şebeke modeli tek hat şeması	60
Şekil 3.6. Dinamik kontrolcülerin frekans değişimine etkisi	61
Şekil 3.7. Kaynak modellerinin aktif güç değişimi	61
Şekil 3.8. Farklı YEK katılım oranına göre şebeke frekans değişimi	62
Şekil 3.9. Farklı YEK katılım oranına göre RoCoF	62
Şekil 3.10. 2020 yılı saatlik üretim profili	65
Şekil 3.11. Toplam konvansiyonel ve toplam RES-GES üretim profili ile RES-GES katılım oranı	65
Şekil 3.12. Mevcut Durum Senaryosu-Şebeke Frekans Değişimi	67
Şekil 3.13. Mevcut Durum Senaryosu-Şebeke Frekans Değişim Oranı	67
Şekil 3.14. RES-GES üretim artış senaryosu-şebeke frekansı değişimi	68
Şekil 3.15. RES-GES üretim artış senaryosu-şebeke frekans değişim oranı	68
Şekil 3.16. Tek bölge şebeke YFK diyagramı	71
Şekil 3.17. İki bölge YFK diyagramı	71
Şekil 3.18. Metasezgisel optimizasyon algoritmalarının sınıflandırması	73

Şekil	Sayfa
Şekil 3.19. EPO algoritması davranışsal şekli	77
Şekil 3.20. Referans güç sistem modeli	78
Şekil 3.21. Tg ve Ts'nin oransal değişimiyle meydana gelen frekans değişimi.....	80
Şekil 3.22 Tp ve Kp'nin oransal değişimiyle meydana gelen frekans değişimi.....	80
Şekil 3.23. GWO analiz sonucu	82
Şekil 3.24. PSO analiz sonucu	83
Şekil 3.25. EPO analiz sonucu	83
Şekil 3.26. Türkiye şebekesi eş değer YFK modeli.....	85
Şekil 3.27. Talep katılımı yük frekans kontrol modeli	87
Şekil 3.28. Senaryo 1-Değişen şebeke ataleti ile frekans değişimi.....	88
Şekil 3.29. Senaryo 1- Minimum yük durumunda talep katılımının şebeke frekans değişimine etkisi	88
Şekil 3.30. Senaryo 2- Değişen şebeke ataleti ile frekans değişimi.....	90
Şekil 3.31. Senaryo 2- Maksimum RES ve GES koşullarında talep katılımının şebeke frekans değişimine etkisi.....	90
Şekil 3.32. Senaryo 3-Değişen şebeke ataleti ile frekans değişimi.....	92
Şekil 3.33. Senaryo 3 – Maksimum YEK koşullarında talep katılımının şebeke frekans değişimine etkisi	93
Şekil 4.1. 2020 ve 2030 yılları için talep katılımı hedefleri.....	97
Şekil 4.2. Talep katılım mimarisi.....	101

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile aşağıda sunulmuştur.

Simgeler

GW

Gigavat

Hz

Hertz

MVar

Megavar

MW

Megavat

MW/s

Birim saniyedeki megavat değişimi

MWh

Megavatsaat

Kısaltmalar

AVR

Automatic voltage control

CIGRE

International Council on Large Electric Systems

EPIAŞ

Elektrik Piyasaları İşletme Anonim Şirketi

GES

Güneş enerji santrali

ID

İntegral türev

IEA

International Energy Agency

IEEE

Institute of Electrical and Electronics Engineers

F_{nadir}

En düşük frekans değeri

GOV

Governor

PI

Oransal integral

PID

Oransal integral türev

PSO

Parçacık sürüsü optimizasyonu

PSS

Power system stabilizer

RES

Rüzgar enerji santrali

RoCoF

Rate of change of frequency

TEİAŞ

Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi

YEK

Yenilenebilir enerji kaynakları

YFK

Yük frekans kontrolü



1. GİRİŞ

Son yıllarda ekonomik büyümeyi ve sosyal kalkınmayı destekleyen sürdürülebilir ve güvenilir enerji kaynaklarının kullanılmasını, geleneksel fosil yakıt bazlı enerji kaynakları yerine çevre dostu ve düşük karbon salınlı enerji sistemlerinden daha fazla faydalanmasını amaçlayan küresel olarak enerji dönüşümü yaşanmaktadır. Bu enerji dönüşümünü iklim değişikliği endişeleri, YEK kullanımında ortaya çıkan teknolojik ilerlemeler ve enerji kullanımında tüketici profilinde meydana gelen değişimler zorunlu hale getirmektedir. Fakat bu dönüşümün sağlanabilmesi pek çok yeni anlayışın kabul edilmesine ve bireyler arasında karmaşık ilişkilerin yeniden düzenlenmesine bağlı olduğu için oldukça karmaşık bir süreç olacaktır. Yeni teknolojilerinin kullanımında ileri seviyede sonuçların elde edilebilmesi, mevcut alt yapılarının modernizasyonu ve istikrarlı politika uygulamalarına ihtiyaç duyulacaktır. Enerji dönüşüm sürecini gerçekleştirilmesinde önemli temel yapı taşları aşağıdaki gibi sıralanabilir [1–3];

- İklim değişikliğinin önlenmesi ve enerji arz güvenliğinin sağlanması amacıyla güneş, rüzgar, hidro, jeotermal ve biyokütle gibi YEK'lerin yaygınlaştırılması.
- Enerji kullanımında yeni teknolojik ürünler ve tasarruflu cihazların kullanılmasıyla enerji maliyeti azaltılır ve tüketici tarafında enerji verimliliğinin artırılması.
- Yüksek kapasiteli YEK'lerin elektrik şebekesine entegrasyonu, arz ve talebin gerçek zamanlı olarak kontrol edilebilmesi için şebeke esnekliğini artırılması gerekir. Bu nedenle ulaşım, sanayi ve tüm tüketicileri kapsayan modern elektrifikasyon altyapısının oluşturulması.
- Konvansiyonel santrallerin esneklik yeteneğini sağlayabilecek batarya, pompaj hidro gibi enerji depolama sistemlerinin kullanımının artırılması ve talep kontrol sistemlerinin geliştirilmesi.
- Enerji dönüşümü sürecini hızlandırmak ve teşvik etmek amacıyla destekleyici politikalar ve eylem planlarının hazırlanması.

Enerji dönüşüm süreçlerinin başarılı şekilde yürütülmesinde ulusal ve uluslararası eylem planlamaları uygulanmaktadır. Bunların en önemlisi enerji geçişi için 2015 yılında 196 ülke tarafından imzalanan Paris Anlaşması olup, insan kaynaklı nedenlerden dolayı sıcaklık artışının uzun vadede sanayileşme öncesi döneme kıyasla 2 santigrat derecenin altıyla

sınırlamayı hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda anlaşmayı kabul eden ülkeler sera gazı emisyonlarını azaltma ve düşük karbon ekonomisine geçiş hedeflerini içeren ulusal planlamalarını hazırlamışlardır. Bu kapsamda örnek olarak 2053 Net Sıfır Emisyon Hedefi Türkiye’de 2020 -2035 yılları arasında dönemi kapsayan; nüfus artışı, ekonomik değişkenler gibi temel esaslara göre enerji talebini oluşturan tüm sektörler için tahminler ve hedefler ortaya koyulmuştur. Bu hedefler elektrik arz güvenliğinin sağlanması amacıyla kurulu gücün 190 GW seviyelerine çıkarmak, YEK’in toplam kurulu güce oranının %60’ın üzerinde olması ve şebeke esnekliğinin sağlanması amacıyla batarya, elektroliz kapasiteleri ile talep tarafı katılımı faaliyetlerinin sağlanmasıdır [4]. Öte yandan Türkiye’nin 2053 yılında YEK üretim %90’ı geçmesi öngörülmektedir. Bu artışın büyük çoğunluğunu karasal ve deniz üstü RES’ler ve GES’lerin oluşturacaktır. Şebekenin ihtiyaç duyacağı esnekliğin garanti edilmesi şebekede var olabilecek hidroelektrik ve jeotermal kaynaklı konvansiyonel üretimlere ilave olarak depolama, uluslararası enterkonneksiyon bağlantıları ve talep katılım var olabilecektir. Ayrıca hidrojen teknolojisiyle birlikte elektroliz sistemler YEK üretimleriyle birlikte işletilebileceği düşünülmektedir. Bu değişimin neticesinde kömür ve petrol kaynaklı santrallerin şebekeden çıkması, kısmen doğal gaz santrallerin şebekede var olacağı ve bu santrallerin öncelikle rezerv hizmetlerinde kalması beklenmektedir [5].

Yaşanan enerji dönüşümü elektrik şebekelerinin geleneksel planlama ve işletme anlayışını da değiştirmektedir. Geçmişten günümüzde merkezi olarak elektrik şebekesinde, elektrik akışı elektrik santrallerinden veya üretim kaynaklarından tüketicilere tek yönlü sağlanması anlayışı kabul edilmiş, daha çok tüketimi karşılamak üzere üretim kaynaklarının planlanmasına ve işletilmesine odaklanmaktadır. Bu temel anlayışta, ihtiyaç duyulan şebeke esnekliğinin öncelikli olarak konvansiyonel büyük ölçekli üretim kaynaklarıyla sağlanmasına dayanmaktadır. Ancak artan küçük ve orta ölçekli dağıtık YEK’lerin üretimi entegrasyonu ile şebekenin elektriği akış yönünün değiştirmiştir. Tüketime entegre üretim olanakları, güneş ve rüzgar gibi değişken üretim koşulları ile küçük ölçekli üretimlerin gelir elde fırsatlarının oluşmasıyla birlikte şebeke planlama ve işletmecilik faaliyetleri öncelikli olarak talep tarafının sahip olduğu üretim ve tüketim davranışlarına bağlı olarak yönetilebilmesine zorlamaktadır. Talep tarafında her ölçekte meydana gelen değişimi enterkonnekte şebekenin bölgesel ve ulusal şebekesinin elektrik talep profilinin değişimine neden olmaktadır.

Bununla birlikte gerçek zamanlı üretim koşullarında özellikle rüzgar, güneş enerji kaynaklarının oranının artması döner makinelerden sağlanacak üretimin azalmasına sebep olmaktadır. Şebekenin ihtiyaç duyduğu ataleti sağlayan senkron makinelerin yerini güç elektroniği tabanlı işletilen yenilebilir enerji kaynakları almaktadır. Bu nedenle gelecekte güç sistemlerinin nasıl işletileceği yeniden değerlendirilmektedir. Yüksek rüzgar ve güneş enerjisi kaynaklı üretimin olduğu koşullarda şebekenin frekans, gerilim ve açısız kararlılığını sağlayacak ve şebekenin dinamik reaksiyonlarına hızlı yanıt verecek sistemlere ihtiyaç duyulmaktadır [6–8].

Problem tanımı

Elektrik şebekelerinde işletme koşullarında özellikle güneş ve rüzgar gibi değişken üretim doğasına sahip YEK'lerin üretim kapasitesi oranı artmaktadır. Buna paralel olarak şebekede meydana gelebilecek arz talep dengesizliklerinde, özellikle şebeke frekans kontrolünün sağlanmasında emre amade olabilecek ve sistem kararlılığının sağlanabilmesi amacıyla toplam döner rezerv ihtiyacını karşılayacak konvansiyonel kaynakların oranı azalmaktadır. Güç sistemlerinde üretim ve tüketim dengesi gün öncesi programlarında piyasa katılımcılarına göre belirlenmektedir. Ancak sistemde oluşacak dengesizliğin giderilmesine yönelik öncelikle frekans rezerv miktarları belirlenir ve bu kapsamda dengeleme piyasasına dahil olacak katılımcılar oluşturulur. Burada temel amaç şebeke işletme koşullarına meydana gelebilecek herhangi bir frekans değişimine karşı atalet tepkisi verebilecek karakteristiğe sahip şebeke unsurlarının etkin olmasıdır. Günümüz şartlarında bu hizmet, dengeleme piyasa faaliyetlerinde daha çok konvansiyonel santrallerden yani döner rezerv kapasitesine sahip kaynaklardan sağlanabilmekte olup, bu kaynaklar kömür, linyit, doğal gaz ve hidroelektrik santrallerdir. Gün öncesi piyasa programında belirlenen yük talebine göre kaynak dağılımında döner rezerv sağlayabilecek kapasite oranının azalması ise şebeke dengeleme faaliyetlerinde farklı yöntemlerin araştırılmasına ve kullanılmasına neden olmaktadır.

Özetle yük talebinin gün öncesinde programlanarak farklı enerji kaynaklarının değişken oranlarda dağılımıyla tedarik edilmesi mümkün olsa da; sistemin geçici hal koşullarında kararlı bir şekilde işletilebilmesi için dengeleme faaliyetlerinde şebekenin döner rezerv miktarına katkıda sağlayacak ve şebekenin toplam ataletini artıracak yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

2022 IEA raporuna göre, talep katılımı programların genişletilmesi ve daha küçük kaynakların katılımına izin verilmesi dahil olmak üzere, 2020'den bu yana bazı ülkelerde talep yanıtının düzenlenmesi ve uygulanmasında olumlu bir eğilim devam ettiği, sıfır karbon politikalarının sağlanabilmesi için uygulama ve teknoloji yayılımının hızlanması gerektiği ifade edilmektedir. Mevcut durumda mevcut potansiyelin %3'ünden daha azı kullanılmaktadır [9].

Talep katılımı esnekliğinin sağlanmasında başlıca kaynaklar, endüstriyel ve ticari tüketimler, mesken tüketimlerinde ısı ve elektrik tüketimleri, elektrikli araçların şarj edilmesi ve enerji depolama sistemleridir. Talep yönünde esneklik hizmetleri doğrudan tüketicilerden ya da talep toplayıcılar vasıtasıyla yürütülebilir. Bugün günümüzde talep tarafı katılımıyla esneklik ihtiyacının karşılanabileceği pek çok çalışma ile kanıtlanmıştır [10–13]. Günümüzde konut, ticaret ve sanayi sektörlerindeki talep katılımı uygulamaları Türkiye'ye benzer şekilde diğer ülkelerde nispeten düşüktür. Talep katılım programlarının başlatılabilmesi için öncelikle mevcut potansiyelin sektör ve tüketici bazında incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu amaçla talep katılım varlıklarının potansiyelinin belirlenmesi ve uygulama modellerinin araştırıldığı çalışmaları yapılmaktadır. Talep katılım hizmetlerinin öncelikle uygulama belirsizliklerinin ortadan kaldırılması, performans ve güvenilirlik potansiyellerinin belirlenmesi önemlidir.

Piyasa ve işletme faaliyetleri açısından mevcut potansiyellerinin bilinirliği uygulama şeklinin karar verilmesine, toplumsal ve tüketici tarafında kabullenilmesine fayda sağlamaktadır. Bu çalışmalar temel olarak yapay zeka ve makine öğrenmesi yöntemlerini içeren veri analitik çalışmalarına dayanmaktadır [14]. Tüketicilerin potansiyel esnek tüketimleri ve dağıtık üretimleri bütünsel olarak düşünüldüğünde enerji pazarında önemli bir etkiye sahip olabilir. Küçük ölçekli yapılar dikkate alındığında bu karmaşık olabilir ancak gelişen iletişim ve kontrol teknolojileriyle mümkün kılınabilir. Bu yaklaşımla talep katılımının mevcut varlığı ve etkisinin belirlenmesi için fırsatların, zayıflıkların ve zorlukların analitik olarak ele alınması faydalı olacaktır [15, [16]. Şebeke esnekliği açısından önemli bir fırsat olarak görülen talep katılımının, yeni uygulayacak şebekelerde enerji ve güç rezerv hizmetlerinde işletme ve piyasa uzlaştırması yönünden bilinmesi önemlidir. Bu amaçla talep katılımının dengeleme ve rezerv kontrol hizmetlerindeki kapasite ve performans testleri dikkate alınmaktadır [17–19].

Araştırmanın amacı, önemi ve katkısı

Küresel olarak yaşanan enerji dönüşümünün etkisiyle elektrik şebekelerinin ihtiyacı olan esneklik faaliyetlerinin incelenmesi önem arz etmektedir. Bu çalışmaların ulusal şebekeler açısından araştırılması, uygulanabilir esneklik faaliyetlerinin belirlenmesi ve yönlendirici politika eylemleri ortaya koyulmalıdır. Yapılacak tez çalışmasında elektrik şebekelerinin artan yenilebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile düşük rezerv koşullarında meydana gelebilecek geçici hal olaylarında frekans kontrolüne talep katılımının kullanılabilirliğini gösterilmesi amaçlanmaktadır. Bu kapsamda ilk olarak ulusal bir şebeke kapsamında talep katılım potansiyelinin belirlenmesi ve nasıl uygulanacağını incelenmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle öncelikle talep tarafı katılımı veri analitiği yöntemleriyle incelenmesi önerilmiş, şebeke ölçeğinde bölgesel ve ulusal açıdan talep katılımı potansiyeli gösterilmiştir. Elektrik şebekelerinde üretim ve tüketim potansiyellerinin incelendiği ya da tüketim ve tüketici odaklı uygulama araştırmalarında temel olarak tanımlayıcı veri analitiği yöntemleri kullanılmaktadır. Benzer olarak literatürde kullanılan hiyerarşik kümeleme analitiği yöntemiyle ulusal şebeke ölçeğinde dağıtım şebekelerinin saatlik tüketim bilgilerine göre gruplandırması gerçekleştirilmiştir. Aynı zaman büyük tüketicilerin tüketim profili sektörel olarak açısından incelenmiştir.

İkinci olarak artan yenilebilir enerji kaynaklarının entegrasyonun şebekenin düşük rezerv koşulları matematiksel olarak ortaya koyularak, rüzgar ve güneş enerji kaynaklarının yüksek olduğu üretim koşullarında şebekede meydana gelebilecek geçici hal olaylarında düşük frekans koşulları analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar üzerinde şebeke yük frekans kontrolünün talep katılımıyla sağlanabileceği yaklaşımı hedeflenmiştir. Bu kapsamda yük frekans kontrolünde literatürde kullanılan ve geliştirilen yeni metasezgisel yöntemlerin kullanılması önerilmiştir. Bu kapsamda Türkiye şebekesinin benzetimi ve elektrik üretim profil verileri referans alınarak düşük rezerv koşullarında talep katılımıyla frekans kontrolü metasezgisel yöntemlerle incelenmiş ve talep kontrolünün katkısı ortaya koyulmuştur. Tez kapsamında yük frekans kontrol çalışmalarında imparator penguen optimizasyonu ilk kez kullanılmıştır. Bu yöntem için öncelikle literatürde kullanılan güç sistem modeli üzerinde duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Yük frekans kontrol çalışmalarında yaygın olarak kullanılan parçacık sürüşü optimizasyonu ve gri kurt algoritmasıyla performans sonuçları karşılaştırılarak başarılı sonuçları gösterilmiştir. Tez kapsamında üç algoritma ile azalan

şebeke esneklik koşullarında frekans kontrolünün talep katılımının sağlanabilirliği gösterilmiştir.

Yapılan çalışmalarda esas olarak Türkiye şebekesi dikkate alınmıştır. Bu kapsamda veri analitiği ve talep katılımıyla frekans kontrolü analizler çalışmalarından elde edilen sonuçları ile farklı dünya uygulamaları da araştırılarak ülke kapsamında politika uygulama önerileri yapılmıştır. Yapılan çalışmalar bir bütün olarak ele alındığında, Türkiye için gelecek yıllarda hedeflenen yenilenebilir enerji kaynaklarının artışına paralel olarak şebeke esneklik ihtiyacının karşılanmasında talep katılımı uygulamalarının incelendiği önemli bir araştırma ortaya koyulmuştur.

Varsayımlar ve sınırlılıklar

Günümüzde her sektörde olduğu gibi yeni uygulanmaya konu olan araştırma alanlarında en önemli eksiklik bilgi ve deneyimdir. Yapılan tez çalışmalarında karşılaşılan en önemli kısıt mevcut şebeke alt yapısına ait akademik çalışmalarına uygun şebeke model temini ve şebeke işletme koşullarının inceleyebilme amacıyla geçmiş döneme ait üretim, tüketim, olay ve piyasa katılım verileridir. Çalışmalara temel olması için Türkiye’de şebeke ve işletme verilerinin teminine yönelik resmi taleplerde bulunulmuş, ancak tez sürecinde kesin sonuç alınamamıştır. Bu kapsamda yapılan talep katılımı analizlerinde açık kaynak olarak paylaşılan tüketim veriler referans alınmış, enerji sektöründe veri paylaşım şeffaflık platformunda bulunan bilgilerin doğru ve güvenilir olduğu kabul edilmiştir. Benzer şekilde yapılan resmi taleplerde Türkiye şebekesine örnek olabilecek şebeke modeli temini yapılamamıştır. Buna nedenle yapılan literatür araştırmaları dikkate alınarak, artan YEK koşullarında talep katılımının şebeke esneklik aracı olarak kullanılabilirliği basitleştirilmiş şebeke test modeli ve yük frekans kontrol modeli üzerinde gerçekleştirilmiştir. Literatürde yer alan matematik modellemeler ile yapılan analizlerin gerçek işletme koşullarına göre tekrar gözden geçirilmesi, gerçek şebeke modelleriyle doğrulanması ihtiyacı kabul edildiğinde, şebeke ölçeğinde talep katılımının öngörülebilmesi amacıyla yapılan modelleme ve analizlerin doğru olduğu kabul edilebilir. Öte yandan, mevcut işletme ve piyasa mekanizmaları, mevzuat alt yapısı bakımından Türkiye’de talep katılımı en yeni konu başlıklarındandır. Bu nedenle tez çalışmasında talep katılımı için öngörülen modeller, literatürde uygulanan modellere göre varsayım yapılmıştır.

Tez bölüm içerikleri

Yapılan tez çalışması giriş, üç ana bölüm ve sonuç kısımları olmak üzere beş bölüm halinde oluşturulmuştur. Giriş bölümünde tez çalışmasına ilişkin küresel ve ulusal ihtiyaçlar ile problem tanımı açıklanmış, çalışmanın amacı, katkısı vurgulanmış ve çalışma sürecinde karşılaşılan sınırlar belirtilmiştir.

İkinci bölümde, talep tarafı katılımı kavramı ve talep katılımının analitik yönden incelenmesine yönelik literatür çalışmaları sunulmuştur. Yapılan literatür araştırmasında veri madenciliği, analiz yöntemlerine dikkat edilerek; talep katılımının elektrik şebekelerinde bölgesel olarak, yani dağıtım şebeke bölgeleri açısından tüketici bazlı ele alınabilirliği dikkate alınmıştır. Bu kapsamda, dağıtım şebekelerinde tüketim verileri tüketici grupları da dikkate alınarak hiyerarşik kümeleme analiz gerçekleştirilmiştir.

Üçüncü bölümde, artan YEK koşullarında talep katılımıyla frekans kontrolünün incelenmesi sunulmuştur. Bu bölümde öncelikle güç sistemleri açısından frekans kontrolü ve yan hizmetler kavramları ile şebeke işletmeciliği açısından önemi anlatılmıştır. Artan YEK koşullarındaki esneklik, döner rezerv ihtiyacı ile yapılan literatür çalışmaları kapsamlı olarak ele alınmıştır. Yapılan araştırmalar neticesinde artan YEK koşullarında güç sistemlerinde oluşan düşük rezerv koşulların frekans kontrolü iki farklı şekilde incelenmiştir. İlk olarak literatürde yapılan literatür araştırmalarına benzer şekilde, gerçek bir güç sisteminin basitleştirilmiş şebeke test modeli, şebeke ataleti ve frekans değişimlerine matematiksel olarak yapılmıştır. Oluşturulan test şebeke modelinde ise düşük rezerv koşullarında talep katılımıyla frekans kontrolü analiz edilmiştir. İkinci olarak aynı problem, YFK modeli oluşturularak ele alınmıştır. Burada öncelikli hedef güç sistemlerinde düşük rezerv, yani düşük atalet koşullarını YFK bakış açısıyla incelemek ve frekans kontrolünde talep katılımının optimum koşullarını ortaya koymaktır. Bu kapsamda, öncelikle yapılan literatür araştırması doğrultusunda gerçek bir güç sisteminde YFK modelini oluşturulmuş, YEK artışına bağlı olarak değişen şebeke ataletine bağlı olarak frekans değişimleri incelenmiştir. Güç sistemlerinde artan YEK'lere bağlı olarak azalan ataletin etkisiyle şebekede meydana gelen düşük frekans koşullarında kontrolcü katsayılarının ayarlanması ve talep katılımının optimizasyonu metasezgisel yöntemlerle sağlanmıştır.

Dördüncü bölümde, elde edilen veri analitiği ve şebeke analizlerine göre Türkiye için talep katılımı uygulama politika öneriler ve yapılması gereken çalışmalar sunulmuştur. Yapılan önerilerde farklı ülke politika uygulamaları da dikkate alınmıştır.



2. TALEP TARAFI KATILIMI VE TALEP TARAFI KATILIMININ ANALİTİK YÖNTEMLERLE İNCELENMESİ

Elektrik şebekelerinde akıllı ölçüm sistemleri ve akıllı şebeke uygulamalarının yaygınlaşmasıyla, şebeke işletmecileri şebekenin her noktasından izleme ve ölçüm verileri temin edebilir, bu verileri planlama ve operasyonel faaliyetlerde kullanabilir. Gelişen iletişim ve otomasyon alt yapısıyla toplanan büyük veriler ile anlamlı, kullanılabilir modellerin oluşturulması ve işlenmesi süreci olan veri madenciliği, güç sistemlerinde de pek çok çeşitli alanda uygulanabilir. Güç sistemlerinde veri madenciliğinin amaçlarından ve uygulamalarından bazıları şunlardır: yük ve üretim tahmini, arıza tespiti, varlık yönetimi, enerji verimliliği, sınıflandırma. Şebeke işletmecileri veri madenciliği tekniklerinden yararlanarak güç sistemlerinin güvenilirliğini, verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırabilir [20–22]. Bu bölümde elektrik şebekeleri açısından talep tarafı katılımı kavramı ve çeşitleri, talep tarafı katılımının uygulanması amacıyla kullanılan analitik yöntemleri ele alınmaktadır.

2.1. Talep Tarafı Katılımı Kavramı Nedir?

Elektrik sektöründe talep tarafı katılımı 1970’li yıllarda yaşanan enerji krizi sonrasında ortaya çıkmaya başlamıştır. Küresel anlamda yaşanan petrol krizi elektrik dağıtım şebekelerinde fiyat artışına neden olmuştur. Bu süreç sonrasında yavaş yavaş talep katılımı yönetim programları stratejik planlamalara dâhil edilmiştir. İlk akademik tanımlaması EPRI (Electric Power Research Institute) tarafından “Yükte arzulanen değişiklikleri sağlayacak şekilde, tüketicinin elektrik kullanımını etkileyecek olayların planlanarak uygulanması ve görüntülenmesidir” şeklinde yapılmıştır [23]. Ancak günümüzde yapılan pek çok tanım sonrasında talep tarafı katılımı; elektrik fiyatlarındaki değişime tepki olarak son tüketicilerin teşvik edilmesini sağlayıp yüksek piyasa takas fiyatlarının varlığında veya şebeke güvenilirliğinin tehlikeye girdiği durumlarda elektrik arz ve talebinin dengelenmesini sağlayan tarifeler ya da programlardır [24,25]. Talep tarafı katılımı iki farklı yaklaşımla değerlendirilebilir. İlk olarak tüketicilerin değişen elektrik fiyatlarına doğrudan tepki verdiği kapalı talep tarafı katılımı yaklaşımıdır. Kapalı talep tarafı katılımı, piyasa sinyallerine saatlik ya da kısa süreli cevap verdikleri, gönüllü değişiklikler yapılması olarak ifade edilebilir. İkincisi ise açık talep tarafı katılımı yaklaşımıdır. Elektrik piyasalarında bireysel veya talep toplayıcılar ile talebin satılması olarak tanımlanır. Açık talep tarafı katılımı

tüketicilerin kendi başlarına veya talep tarafı katılımı toplayıcıları yoluyla, belirli bir zamanda, genellikle sistem işletmecisinin isteğine yanıt olarak, elektrik talebini değiştirme isteğidir. Açık talep tarafı katılımı, farklı enerji piyasalarına (toptan satış, dengeleme, sistem desteği ve rezerv pazarları) alım satım yapılabilmesiyle, üretim esnekliğine benzer şebeke esneklik sağlanabilmektedir. Bu nedenle açık talep tarafı katılımı, büyük tüketiciler arasında veya talep tarafı katılımı toplayıcıları tarafından yönetilebilir [26]. Her iki yaklaşım incelendiğinde talep toplayıcıların açık talep tarafı katılımında tüketiciler tarafından daha çok tercih ettiği görülmektedir. Ayrıca kapalı talep tarafı katılımının aynı anda uygulandığını da varsayarsak ilgili tüketiciler dinamik fiyatlama programlarından yararlanabilir. İki sistemdeki gereksinimler ve yararlar farklıdır. Genelde tüketiciler dinamik fiyat programlarında düşük fatura avantajına sahip olurken, açık talep tarafı katılımı ile doğrudan ödeme alma fırsatına sahip olacaktır. Açık talep tarafı katılımı sayesinde sistem işletmecisi yüklerin ayarlanmasını operasyonel bir araç yardımı ile yönetme imkânına sahipken, kapalı talep tarafı katılımı tüketicinin organize piyasaya katılmasına izin vermez. Ayrıca bu sistemde iletim sistemi işletmecisi ve dağıtım sistemi işletmecisi bölgesel talep tarafı katılımı hizmet sağlayıcısı olamayacaktır. Talep tarafı katılımında sözleşme kapsamlarının ayrımı, tüketicilerinin fiyat tahmin ve bildirim gereksinimlerinin giderilmesi nedeniyle piyasa yapısı içerisinde toplayıcı bir yapı olmasına neden olmuş, bu nedenle bazı sorumlulukların aracı unsura verilmesi gereği ortaya çıkmıştır. Talep toplayıcılar, doğrudan ve dolaylı bir şekilde tüketim birimlerine ait elektrik talebini elektrik piyasalarında yöneten bir hizmet sağlayıcısıdır. Pek çok tüketici elektrik piyasalarının karmaşık olması nedeniyle doğrudan bireysel işlem yapmak istemez, bu nedenle işlemlerinin yönetimini talep toplayıcıları vasıtasıyla sağlar. Talep toplayıcılar bu sayede bir nevi havuz yapısı oluşturabilir. Talep toplayıcılar bu sayede tek bir talep katılımcısı gibi iletim, dağıtım ve dengeleme hizmetlerine servis sağlayıcısı olabilir [27, 28]. Şekil 2.1’de gösterildiği gibi, talep katılımları uygulanacak tarife seçenekleri fiyat tabanlı olarak ya da farklı piyasa program seçenekleri ve teşvik tabanlı olarak uygulanabilir [29].



Şekil 2.1. Talep tarafı katılım yöntemleri

Fiyat tabanlı talep tarafı katılımı

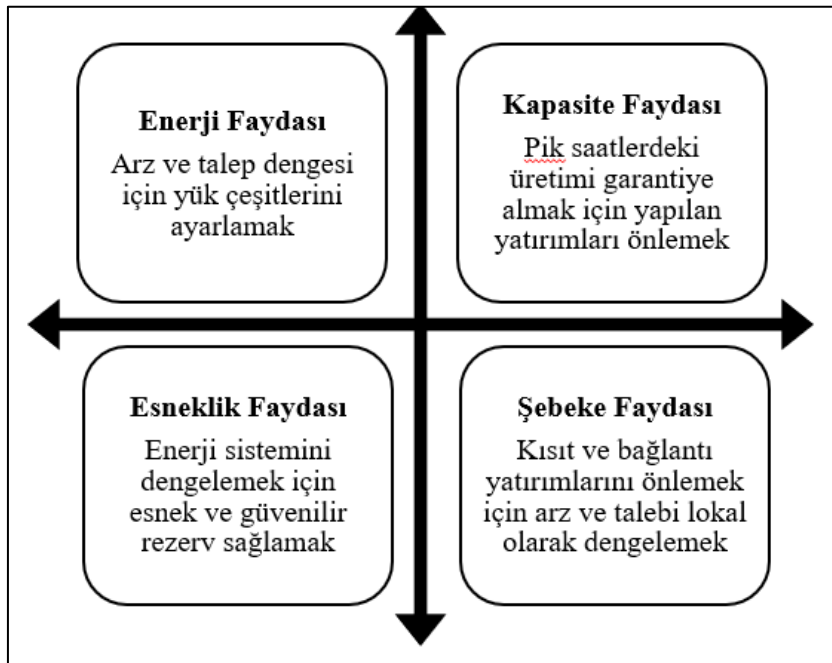
- **Kullanım zamanlı fiyatlandırma:** Tüketiciler gün içi farklı zaman aralıklarına ya da farklı mevsimler için belirlenen fiyatlar üzerinden kullandıkları elektrik bedelleri hesaplanır. Genellikle zaman aralıkları bir saatlik olarak belirlenir. Elektrik kullanımının yoğun olduğu zamanlar daha yüksek, az yoğun zamanlarda ise daha düşük fiyat tarifeleri uygulanır. Bu yöntem daha çok büyük güçlü ticari ve endüstriyel tüketiciler tarafından tercih edilir.
- **Gerçek zamanlı fiyatlandırma:** Tüketiciler fiyatları genellikle gün öncesi veya ilgili saat öncesinde öğrenirler. Toptan elektrik piyasasında meydana gelen değişimlerine göre belirlenen ve saatlik dalgalanan bir tarifiedir.
- **Kritik pik fiyatlandırması:** Kritik pik fiyatlandırma tarifeleri, sistem tarafından kritik pik periyodu olarak tanımlanan dönemdeki kullanım için önceden belirlenen yüksek tarifeyi içerir. Kritik pik fiyatlandırması vakaları sistemdeki beklenmedik durumlardan dolayı veya dağıtım şirketinin organize piyasadan elektrik alımında yüksek fiyatlarla karşılaşmasından dolayı gerçekleşebilir. Kritik pik fiyatlandırma tarifesi tüketicileri genellikle, kritik pik fiyatlandırma periyodu olmadığı zamanlarda fiyat indirimi alır.

Teşvik tabanlı talep tarafı katılımı

- Direkt yük kontrolü: Şebeke veya sistem operatörünün uzaktan bir tüketicinin elektrikli cihazını kısa süreliğine sistem veya lokal güvenlik durumları için kapatıp açtığı programlardır. Tüketiciler, katılım ödemelerini genellikle elektrik faturası kredisi şeklinde alırlar. Bazı programlar tüketicilerine kontrol müdahalesinin dışında kalma opsiyonu sunar. Direkt yük kontrol programları öncelikle evsel ve ufak ticari tüketicilere teklif edilir.
- Kesilebilir yük kontrol hizmeti: Sistemde beklenmeyen durumlarda, önceden belirlenen düzenli hizmet seviyesine kadar yükü azaltmayı kabul edenlere tarife indirimini veya fatura kredisi sağlayan, tüketici tarifeleriyle entegre programlardır. Yük azaltmayan tüketiciler genellikle beklenmeyen durumlarda geçerli olan çok yüksek elektrik fiyatları şeklinde ceza öderler veya programdan çıkarılırlar. Kesilebilir programlar genel olarak sadece büyük endüstriyel (veya ticari) tüketicilere teklif edilmektedir.
- Talep teklif etme/geri alma programları: Büyük tüketicilerin toptan elektrik piyasalarına teklif vermesini ve yük azaltmaya istekli oldukları bir fiyattan teklif vermelerini teşvik eder veya tüketicilerin şebekenin bildirdiği fiyat üzerinden ne kadar yük azaltmaya istekli olduklarını belirlemelerini teşvik eder. Yük azaltma teklifleri kabul edilen tüketiciler kontratlarına göre yüklerini azaltır, azaltmadıkları durumda ceza ile karşı karşıya kalırlar.
- Acil durum talep tarafı katılımı programları: Sistem güvenliği kaynaklı durumlarda, ölçülen yük azaltmaları için tüketicilere teşvik ödemeleri sağlayan programlardır. Acil durum talep tarafı katılımı programları, kayıtlı tüketicilerin katılım sağlamaması durumunda ceza içerebilir.
- Kapasite piyasası programları: Bu programlar genellikle sistemde beklenmedik durumlar olduğunda, önceden belirlenen miktarlarda yük azaltmayı taahhüt edebilen tüketicilere teklif edilmektedir. Teşvikler, genellikle kapasite piyasası fiyatlarınca belirlenen ön rezerv ödemesi ve ihtiyaç halinde yük azaltmaları için ek enerji ödemeleri içerir. Kapasite programları, ihtiyaç halinde katılım sağlamayan tüketiciler için kayda değer cezalar gerektirmektedir.
- Yan hizmetler piyasası programları: Bu programlar, tüketicilere bağımsız, bölgesel sistem operatörünün işlettiği piyasalara kısılabılır yüklerini işletme rezervi olarak teklif etmesine izin verir. Eğer teklifleri kabul edilirse, hazırda beklemeleri için kendilerine

piyasa fiyatı ödenir. Eğer yükün kısılması gerekirse, bağımsız/bölgesel sistem operatörü çağrıda bulunur ve katılım sağlayan tüketicilere enerji piyasası fiyatı ödenebilir.

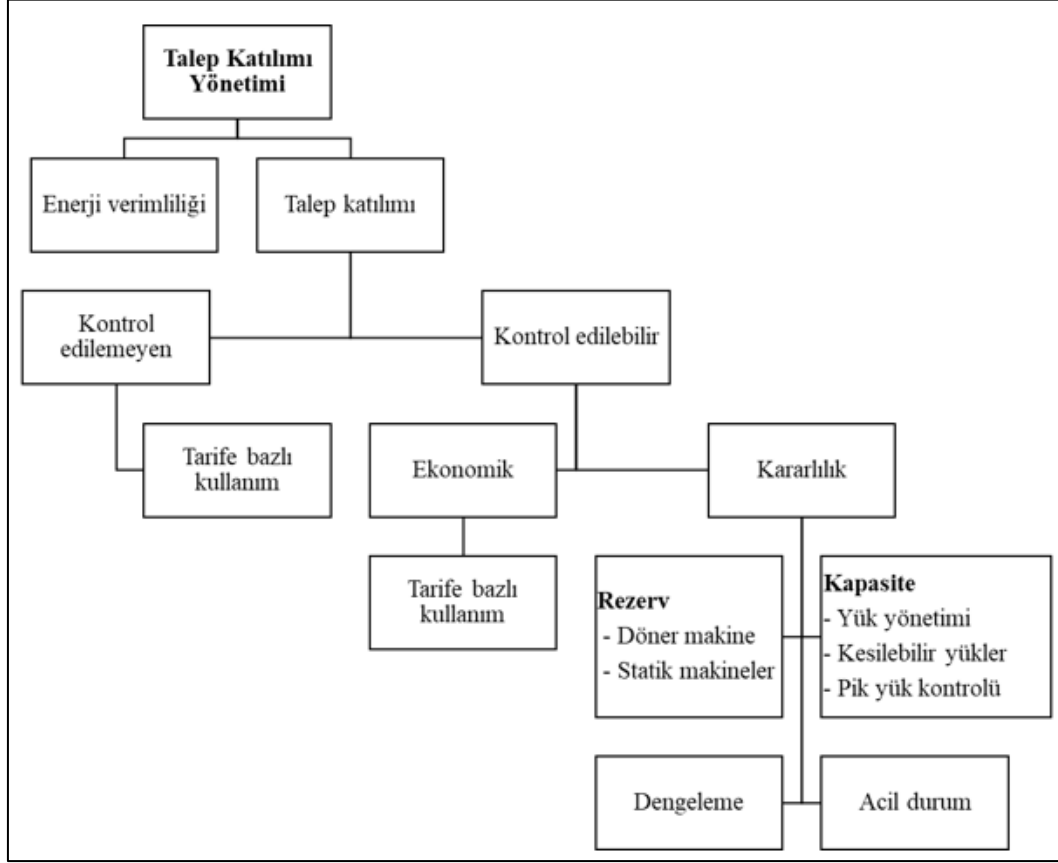
Genel olarak değerlendirildiğinde, talep tarafı katılımının üretim, tüketim ve piyasa faaliyetleri açısından birçok faydası bulunmak olup, Şekil 2.2’de görüldüğü gibi yatırımlarının azaltılması, enerji tasarrufu ve verimliliği, sistem güvenliğinin sağlanması, esnekliğinin artırılması, YEK’lerin kullanımının artırılması ve emisyon azaltımı gibi son yıllarda önemli sorunlarına fayda sağlayabilmektedir.



Şekil 2.2. Talep tarafı katılımının faydaları

Talep tarafı katılımı ile talep kontrolü kavramlarını içerik olarak karşılaştırıldığında; talep tarafı katılımında tüketici bireysel ya da yetkilendirilen talep toplayıcılar vasıtasıyla tüketim optimizasyonu yapabilir. Ancak talep kontrolü yada diğer bir ifadeyle talep katılımı sistem işletmecileri tarafından otomatik olarak yapılır. Genel olarak bu faaliyetler yan hizmetler kapsamında değerlendirilir. Benzer şekilde anlık talep kontrolü yapılarak şebeke frekansı kontrol edilebilir. Bu çerçeveden bakıldığında talep katılımını Şekil 2.3’teki gibi sınıflandırabiliriz. Bu sınıflandırma kapsamında talep katılım kaynaklarının elektrik sistemlerinin güvenliğini artırmak amacıyla kullanılması son yıllarda oldukça önemli hale gelmiştir. Talep tarafında yüklerin kesilebilir, kontrol edilebilir yapıda olması ya da artan YEK’lerin artışıyla azalan sistem ataletinin talep katılımıyla desteklenmesi oldukça önem

arz etmektedir. Özellikle yan hizmetler kapsamında yürütülen frekans kontrolü, döner rezerv ya da belirli sürelerde sabit yüklerin kontrol edilmesi gibi işletme faaliyetlerinde talep kontrolü uygulanabilir [30].



Şekil 2.3. Talep tarafı katılımı sınıflandırması

2.2. Talep Tarafı Katılımının Analitik Yöntemlerle İncelenmesi

Bilindiği üzere elektrik sistemlerinde en temel beklenti tüketim olduğu bölgede enerji üretebilmektedir. Ancak bu beklenti günümüzde halen tam olarak uygulanamamıştır. Bunun başlıca nedeni enerji üretim kaynaklarının coğrafik olarak farklılık göstermesi, tüketimlerin ise daha çok merkezi yaşam alanlarında yoğunlaşmasıdır. Son yıllarda YEK'lerin mikro seviyede tesis edilebilmesi ve dağıtık olarak şebekede yer alması geçmişte var olan şebeke altyapısını değiştirmiş, şebeke işletmesinde farklı planlama ve işletme yöntemlerinin bulunması ihtiyacını doğurmuştur. Dağıtık enerji üretim kaynaklarının güç sistemlerinde üretim kapasitelerinin planlamasında kaynağın türüne bağlı olarak bölgesel olarak değerlendirmekte, daha çok tüketicinin öz tüketimini karşılaması için uygulanan mikro şebekelerin kapasite tahsis hesaplamalarında elektrik tüketimine bağlı olarak kurulabilir

kaynak kapasiteleri oluşturulmaktadır. Şebeke mimarisi tüketimin karşılanmasına yönelik üretim kaynaklarının planlanması felsefesine dayanmaktadır. Benzer şekilde bir güç sisteminde nüfus yoğunluğu, sanayi alanları gibi değişkenliklere bağlı olarak elektrik tüketimi miktarı ile kullanım amaçları bölgesel olarak farklılık göstermektedir. Bu durum şebekenin lokal ve bölgesel tüketim profilinde bölgesel veya zamansal farklılıklar oluşturabilir. Bölgesel, tüketici bazlı farklı talep profili şebekenin arz talep dengesinin sağlanması açısından zorluklar getirmesinin yanı sıra özellikle güneş ve rüzgar enerji kaynaklarının değişken koşullarında doğru talep planlanmasıyla işletme kolaylığı sağlanabilir. Bu bölümde talep tarafı katılımının nasıl uygulanabileceği, talep katılımı işletme kapasitesinin belirlenmesinde nasıl bir yöntem izlemesi sorularına cevap olarak üretim kapasitelerinin planlamalarının hesaplama yöntemlerine benzer bir yol izlenebileceği düşünülmüştür. Bu sayede;

- Talebin yoğunluğuna göre tarife ve teşvik yöntemleri belirlenebilir.
- Talebin yoğun olduğu bölgelerde tüketimin kontrolü sağlanabilir.
- Bölgesel olarak tüketici karakterleri belirlenerek, bütün şebeke ölçekli tüketim etkisi ve kontrolü sağlanabilir.
- Tüketici tiplerine göre talep katılımı kapasitesi ve yöntemleri belirlenebilir.

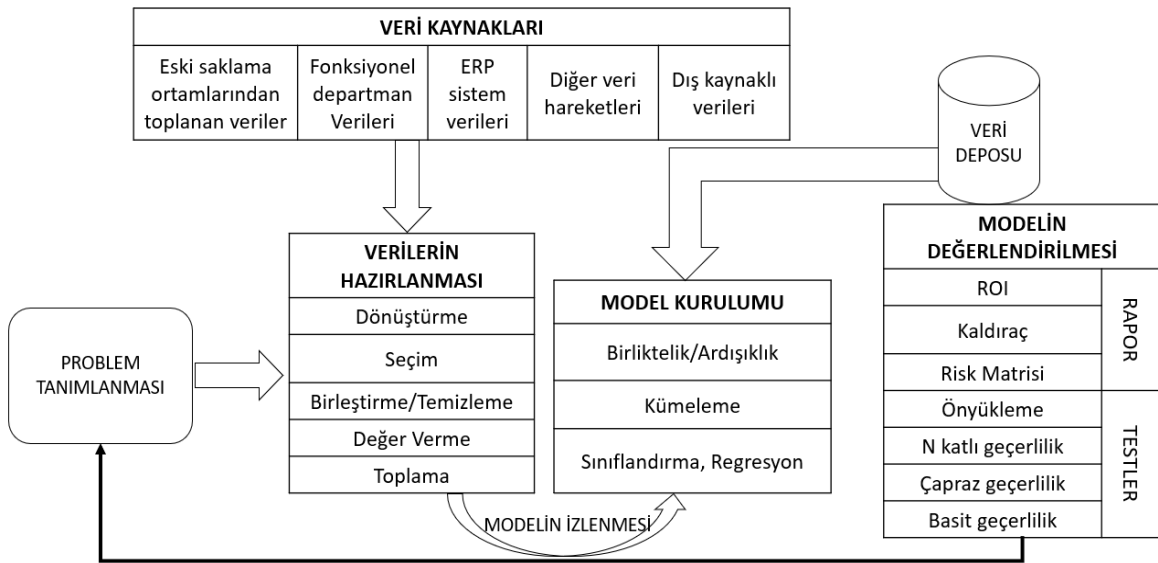
Günümüzde Türkiye’de dağıtım işletmecisi ile tedarikçi şirketlerin yapısını incelediğimizde; bölgesel dağıtım şirketleri öncelikle bölgelerindeki dağıtım şebekesinin işletmesinden sorumludur. Belirlenen serbest tüketici limiti altındaki tüketicilerin fatura mahsuplaşması doğrudan bölgesinden sorumlu tedarik şirketi tarafından yapılmaktadır. Ancak serbest tüketici olma hakkına sahip olan tüketiciler ise lisans toptan tedarikçi şirketlerini seçerek daha uygun tarife seçeneklerinden faydalanabilir. Bu uygulamalar ve hizmet sektörlerinin oluşması geçtiğimiz elektrik sistemlerinden yaşanan özelleştirme sonrasında oluşmuştur. Gelecek dönemlerde talep katılım modellerinde talep toplayıcılarına benzer şekilde oluşacağı ve öncelikle mevcut dağıtım bölgelerine göre belirleneceği düşünülmektedir. Bu maksatla; öncelikli olarak Türkiye elektrik tüketiminin geçmiş dönem verileri saatlik bazlı olarak incelenerek, bölgesel olarak talebin kontrol edilebilirliğinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Yapılan analizlerle dağıtım şebekesi tüketicilerinin talep katılımının bölgesel toplanabilirliği, saatlik değişim trendlerine göre tahmini kontrol edilebilir tüketim kapasitesinin elde edilebilirliği değerlendirilmiştir. Buna göre 2017-2019

yıllarına ait elektrik tüketimi verileri saatlik olarak dağıtım şirketi bazında incelenmiştir.

2.3. Teorik Altyapı ve Literatür Taraması

2.3.1. Veri madenciliği

Günümüzde her alanda kayıt altına alınan ve raporlanan büyük ve karmaşık verilerin öncelikle temizlenmesi, işlenmesi ve verileri arasında ilişkilerin analiz edilerek anlamlı hale getirilmesini veri madenciliği olarak tanımlanabilir, Şekil 2.4'te gösterildiği gibi veri madenciliği temel olarak dört bölümde incelenmektedir. İlk olarak problemin tanımlanır ve var olan veri kaynakları değerlendirilir. İkinci aşamada veriler işlenerek kullanılabilir hale getirilmelidir ve devamında amaca yönelik model hazırlanır. Son aşamada ise model değerlendirilerek kullanıma hazır hale getirilir [31].



Şekil 2.4. Veri madenciliği bölümleri [31]

Veri madenciliğinin genel kullanım alanları

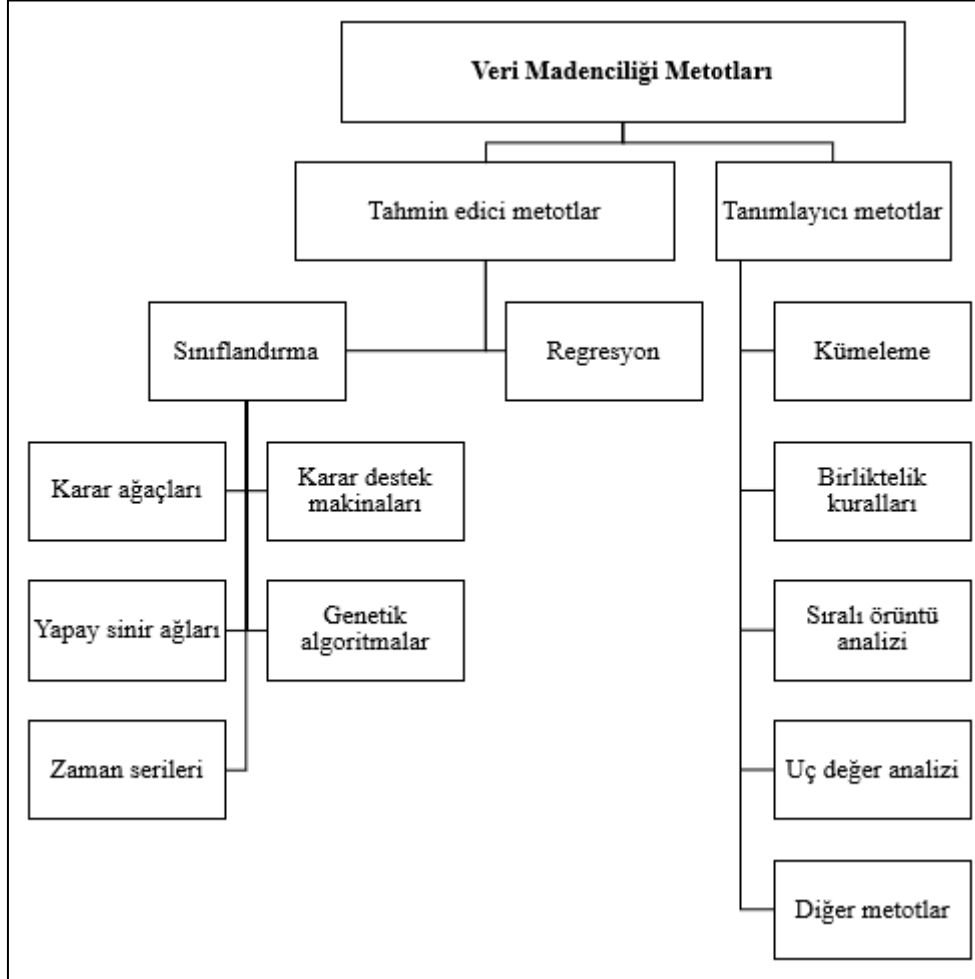
- Bankacılık; kredi risk analizleri, kredi kartı dolandırıcılık tespiti, harcamalarına göre tüketicilerin gruplandırılması
- Biyomedikal; gen gruplarının keşfi, genetik dizilimlerinin benzerlik analizi, gen grupları arasındaki ilişkilerin belirlenmesi
- Borsa; piyasa analizi, hisse senedi fiyat tahmini, alım-satım stratejilerinin optimizasyonu

- Eğitim; öğrenci davranışlarının tahmin edilmesi, öğrencilerin ders seçme eğilimlerinin belirlenmesi, öğrencilerin performanslarına göre gruplandırılması
- İnternet; elektronik postalara gelen yanıt oranlarının arttırılması, kullanıcılara göre ürün reklamlarının gösterilmesi, kullanıcıların web sayfası içerisindeki davranışlarının analizi
- İmalat; etkin kaynak kullanımı, ürün hatalarındaki nedenlerin belirlenmesi
- Mühendislik; benzetim, sinyal işleme, tahmin
- Pazarlama; satış tahminleri, pazar sepet analizi, tüketici ilişkileri yönetimi
- Sağlık; teşhis ve tedavi işlemleri, cerrahi süreçlerin etkinlik analizi, ilaçların hastalar üzerindeki etkilerinin tahmini

2.3.2. Veri analizi yöntemleri

Veri madenciliği yöntemleri, Şekil 2.5'te gösterildiği gibi tahmin edici ve tanımlayıcı olmak üzere iki ana başlık incelenir. Tahmin modellerinde, sonuçları bilinen verilerden hareket edilerek bir model geliştirilmesi ve kurulan bu modelden yararlanılarak sonuçları bilinmeyen veri kümeleri için sonuç değerlerin tahmin edilmesi; tanımlayıcı modellerde ise veri kümesindeki örüntülerin bulunması amaçlanmaktadır. Bu örüntülerin analiz edilmesiyle veri yapısının davranışsal etkileri öğrenilebilir. Kümeleme analizi, incelenen verinin özelliklerine bağlı olarak benzer kategorilerde veya kümelerde gruplandırmak için veri analizinde ve makine öğreniminde kullanılan bir tekniktir. Elektrik sistemlerinde, talep katılımı fırsatlarını belirlenmesinde benzer yük profilleri ya da davranış modellerine sahip tüketicileri gruplandırmak için kümeleme analizi kullanılabilir. Talep katılımında kümeleme analizi, fiyat sinyallerine veya diğer talep katılımı teşviklerine verdiklerine yanıtla göre bölümlere ayırmaktır. Örneğin, yüksek fiyatlara yanıt verme olasılığı daha yüksek olan tüketicileri bir kümede toplanabilirken, indirim veya yükleri kontrol edilebilme programları gibi diğer teşviklere yanıt verme olasılığı daha yüksek olan tüketiciler başka bir kümede gruplanabilir. Bu farklı gruplandırmalar, şebeke operatörlerinin veya kamu hizmetlerinde tüketici segmentleri ihtiyaçlarına ve tercihlerine göre şebeke işletme faaliyetlerinin geliştirmelerine yardımcı olabilir. Ayrıca kümeleme analizi benzer yük profillerine veya davranış modellerine tüketici kümelerini belirler, şebeke operatörlerinin yüksek talep dönemlerinde talebi azaltmada ve şebekeyi dengelemede daha etkili olan talep katılım programları tasarlamasına yardımcı olabilir. Örneğin, büyük endüstriyel veya elektrikli araçlara sahip tüketiciler gibi benzer kullanım modellerine sahip tüketiciler, bir kümede

gruplandırılabilir ve talebin yoğun olduğu dönemlerde şebeke üzerindeki etkilerini azaltmak için tasarlanmış özel talep katılım programları oluşturulabilir.



Şekil 2.5. Veri madenciliği metotları

Kümeleme analizi, incelenen verinin özelliklerine bağlı olarak benzer kategorilerde veya kümelerde gruplandırmak için veri analizinde ve makine öğreniminde kullanılan bir tekniktir. Elektrik sistemlerinde bakımından, talep katılımı fırsatlarını belirlenmesinde benzer yük profilleri ya da davranış modellerine sahip tüketicileri gruplandırmak için kümeleme analizi kullanılabilir. Talep katılımının kümeleme analizi uygulaması, fiyat sinyallerine veya diğer talep katılımı teşviklerine verdiklerine yanıtla göre bölümlere ayırmaktır. Örneğin, yüksek fiyatlara yanıt verme olasılığı daha yüksek olan tüketicileri bir kümede toplanabilirken, indirim veya yükleri kontrol edilebilme programları gibi diğer teşviklere yanıt verme olasılığı daha yüksek olan tüketiciler başka bir kümede gruplanabilir. Bu farklı gruplandırmalar, şebeke operatörlerinin veya kamu hizmetlerinde tüketici

segmentleri ihtiyaçlarına ve tercihlerine göre şebeke işletme faaliyetlerinin geliştirmelerine yardımcı olabilir. Ayrıca kümeleme analiz benzer yük profillerine veya davranış modellerine tüketici kümelerini belirlemektir; şebeke operatörlerinin yüksek talep dönemlerinde talebi azaltmada ve şebekeyi dengelemede daha etkili olan talep katılım programları tasarlamasına yardımcı olabilir. Örneğin, büyük endüstriyel veya elektrikli araçlara sahip tüketiciler gibi benzer kullanım modellerine sahip tüketiciler, bir kümede gruplandırılabilir ve talebin yoğun olduğu dönemlerde şebeke üzerindeki etkilerini azaltmak için tasarlanmış özel talep katılım programları oluşturulabilir.

2.3.3. Zaman serileri ve kümeleme

Zaman serileri, bir gözlem grubuna ait veri dizilerinin zaman içinden ardışık olarak alınmasıdır. İncelenmesi hedeflenen zaman serilerin belirli bir tarih aralığına (sınırlılık) sahip olması, bu tarih etiketiyle tanımlanan bir örnekleme içermesi gerekmektedir. Bu sayede onların zaman üzerinde bir örneklem olduğu kabul edilebilir. Elektrik üretim ve tüketim verileri genellikle sistem işletmecileri tarafından saatlik olarak kayıt altına alınmaktadır. Kullanılacak verinin türüne göre fider, trafo merkezi, il, bölge ve tüm şebeke olmak üzere her seviyede raporlamalar yapılmaktadır. Bu veriler kullanılarak gelecek dönem talep tahminleri, işletmesel olay analizleri ve gelecek dönem planlama koşulları teknik ve ekonomik yönden analiz ve hesaplamalar yapılabilmektedir.

Zaman serilerinin incelenmesinde öncelikle ele alınan zaman serilerinin birleri arasındaki bağlamsallık, ilişki durumunun bilinmesi önemlidir. Ele alınan verilerin zaman etiketleri birbiri arasında bağlamsal bir ilişki olup olmadığı ya da birbiri arasında davranışsal bir ilişki varlığı bilinmesi gerekir. Bazı durumlarda ele alınan ölçümler arasında zaman etiketi olmaksızın ortak uzayda birbirleri arasında bağlamsallık esas alınması gerekebilir. Ancak sıcaklık gibi verilerin farklı sensörler tarafından aynı zaman etiketinde toplanması, çok veri yapısında davranışsal veri ilişkisini oluşturabilir [32]. Verilerin kümelemesi ise incelenen veri topluluğunda birbirine benzeyenler gruplandırma işlemidir. Örnek olarak grup içerisinde herkes birbirine benzerdir ya da herkes birbirinden tamamen farklıdır. Bu tip bir gruplama yapılabilmesi için veriler arasında bir ölçütün tanımlanması gerekmektedir. Bu değerlendirme ölçütü veriler arasında benzerliğe dayalı yapılır, $N \times N$ matris yapısında incelenebilir. Yada verilerin öz nitelik ölçütleri belirlenerek $N \times D$ matris yapısında da oluşturulabilir. Benzerliğe dayalı kümeleme, verinin etki alanına özgü benzerliğin kolayca

belirlenmesini sağlarken, öznitelik bazlı kümeleme potansiyel bozucu verilere uygulanabilme avantajına sahiptir. Bu aşamada kümeleme işlemleriyle ilgili öncelikle belirli soru ve sorunlarla karşılaşılabilir; Veriler arasında doğal kümeleme var mı? Biliniyor mu? Veriler arasında kaç küme aranmalı? Öncelikli bir küme sayısı verilmeli mi yoksa veriye dayalı bir küme mi belirlenmeli? Küme sayısının miktarı sonuçları ne kadar anlamlı hale getiriyor? Küme sayısı mı yoksa nesnel sonuçlar mı daha önemli? Buna benzer pek çok soru kümeleme öncesi ve sonrasında akla gelebilecektir. Çünkü kümeleme her ne şekilde yapılacak olursa olsun; veri kümeleme analizinin sonuçlarının anlamlı olup olmadığı uygulamaya ve analizin amacına bağlıdır [33]. Diğer bir ifadeyle kümeleme işlemi sonucunda bir sonuç değişkeni olmadığı için kümeleme işlemi denetimsiz öğrenme metodu olarak tanımlanabilir. Verileri benzerlik ve uzaklık verilerine göre özet gruplar halinde analizi yapan kişiye sunar ve kullanım amacına yönelik fayda sağlayabilir.

Benzerlik ve uzaklık ölçütleri

Bilimsel ve matematiksel iki nesnenin birbirlerine olan uzaklığı nicel olarak değerlendirilebilir ve bu uzaklık benzerlik ya da benzemezlik olarak tanımlanabilir. Birim ölçüt olarak kullanılabilecek bu uzaklık metrik olarak adlandırılmaktadır. Benzerlik ise hem yakınlık hem de benzerlik kavramlarını kapsamakta olup, yakınlık ve benzerlik ölçütleri genellikle katsayı olarak adlandırılmaktadır. Kümeleme analizinde kullanılan birçok uzaklık ve benzerlik ölçüsü mevcuttur. Genel sınıflandırma tablosu Çizelge 2.1’de verilmektedir [34]. Kümeleme analizinde kullanılabilecek pek çok farklı kümeleme algoritması vardır. Bu algoritmaların seçimi, verilerin yapısına ve hedeflenen analize göre belirlenir. Kümeleme analizinde ilk olarak, bir benzerlik veya uzaklık ölçüsünün seçilmesidir. İkinci olarak ise kullanılacak kümeleme tekniğine (hiyerarşik veya hiyerarşik olmayan gibi) karar verilmesidir. Üçüncü aşamada ise seçilen teknik için kullanılacak olan kümeleme yöntemi türü seçilmektedir (Hiyerarşik kümeleme tekniğinde centroid yöntemi gibi). Son aşamada ise küme sayısı belirlenerek kümeleme sonucu yorumlanır. Kümeleme analizinin en önemli iki adımı ise; uzaklık ölçüsünün seçimi ve kümeleme tekniğinin seçilmesidir [35].

Yaygın kullanılan uzaklık fonksiyonları; $d(i, j)$ fonksiyonu negatif olmayan bir fonksiyon tanımlamakta olup; i ve j gözlem vektörleri arasındaki uzaklığı ifade eder. Gözlemler arasındaki benzerlikleri belirlemek amacıyla Öklid, Manhattan ve Minkowski uzaklık bağıntıları uygulamada kullanılmaktadır. p değişken sayısı olmak üzere $i, j=1, 2, \dots, n$ ve

$k=1,2,\dots,p$ için öklid uzaklık bağıntısı Eş. 2.1’de, manhattan uzaklığı bağıntısı Eş. 2.2’de ve minkowski uzaklık bağıntısı Eş. 2.3’te verilmiştir.

Çizelge 2.1. Uzaklık ve benzerlik ölçütlerinin sınıflandırılması [34]

	Uzaklık Ölçütleri	Benzerlik Ölçütleri
Nicel veriler	Öklit uzaklığı	Pearson ilişki katsayısı
	Kareli öklit uzaklığı	Kosinüs ölçüsü
	Chebchev uzaklığı	
	Manhattan uzaklığı	
	Minkowski uzaklığı	
	Karl-pearson uzaklığı	
	Korelasyon uzaklığı	
Sıklık sayılar	Ki-kare uzaklığı	Russel ve Rao
	Phi-kare uzaklığı	Basit benzerlik
İkili veriler	Kareli öklit uzaklığı	Jaccard
	Öklit uzaklığı	Parçalı benzerlik
	Büyüklik farkları	Rogers ve Tanimoto
	Biçim farkları	Sokal ve Sneath benzerliği
	Değişim farkları	Kulczynski benzerliği
	Durum uzaklık	Hamann benzerliği
	Lance ve Williams	Anderberg D benzerliği

Minkowski uzaklık bağıntısında $m=1$ alınırsa Manhattan uzaklığı; $m=2$ alınırsa Öklid uzaklığı elde edilir. Bununla birlikte, benzerlik analizindeki hata oranının artmaması için Minkowski uzaklık bağıntısındaki m değeri, çoğunlukla, 3 olarak alınır [36–38].

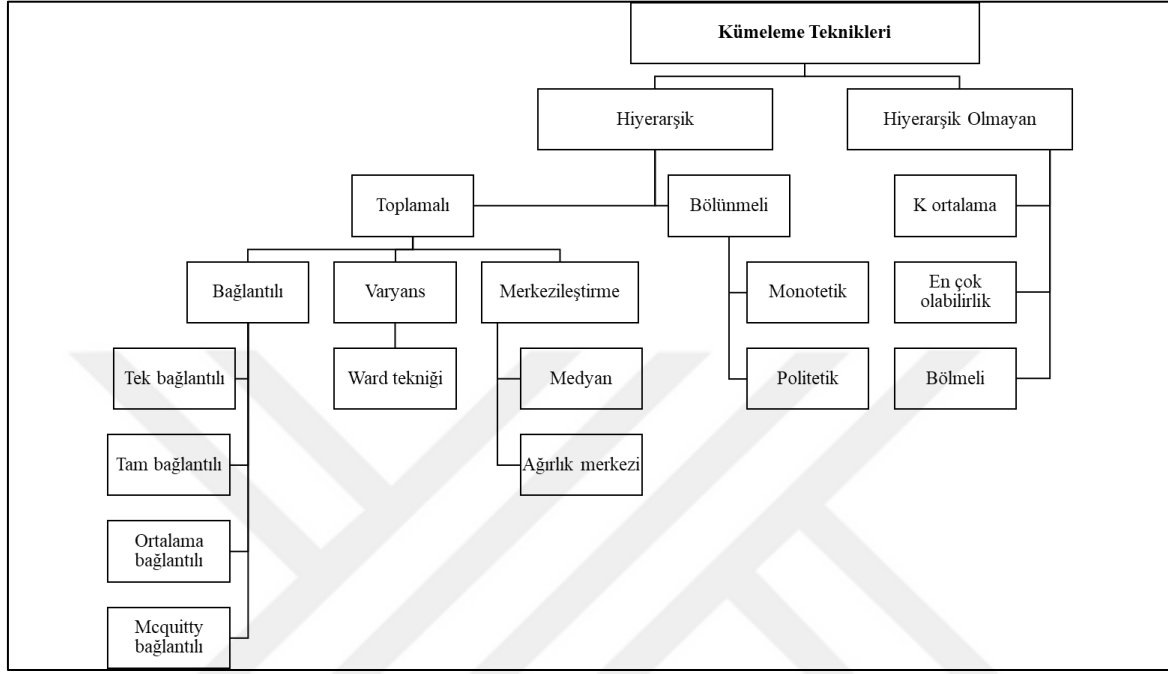
$$\text{Öklid uzaklık bağıntısı:} \quad d(i, j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p (X_{ik} - X_{jk})^2} \quad (2.1)$$

$$\text{Manhattan uzaklık bağıntısı:} \quad d(i, j) = \sum_{k=1}^p (|X_{ik} - X_{jk}|) \quad (2.2)$$

$$\text{Minkowski uzaklık bağıntısı:} \quad d(i, j) = \left[\sum_{k=1}^p (|X_{ik} - X_{jk}|^m) \right]^{1/m} \quad (2.3)$$

Kümeleme analiz yöntemleri; yaygın olarak kullanılan kümeleme algoritmaları hiyerarşik ve hiyerarşik olmayan olarak iki kategoride incelenebilir. Hiyerarşik yaklaşımda en çok benzer iki birimi aynı gruba atamakla başlayıp tüm birimlerin aynı gruba atanmasıyla bitmektedir. Hiyerarşik olmayan yaklaşım ise; tüm verilerin ortalama değerlerine en yakın değerlere sahip birimlerin aynı kümeye atanması esasına dayanır. Bunların haricinde ise

diğer yaklaşımlarda en önemli ölçüt, kümeler arası farklar ile kümeler içi benzerliklerin maksimum olmasını sağlamaktır [39,40]. Kümeleme teknikleri Şekil 2.6'da gösterilmektedir.



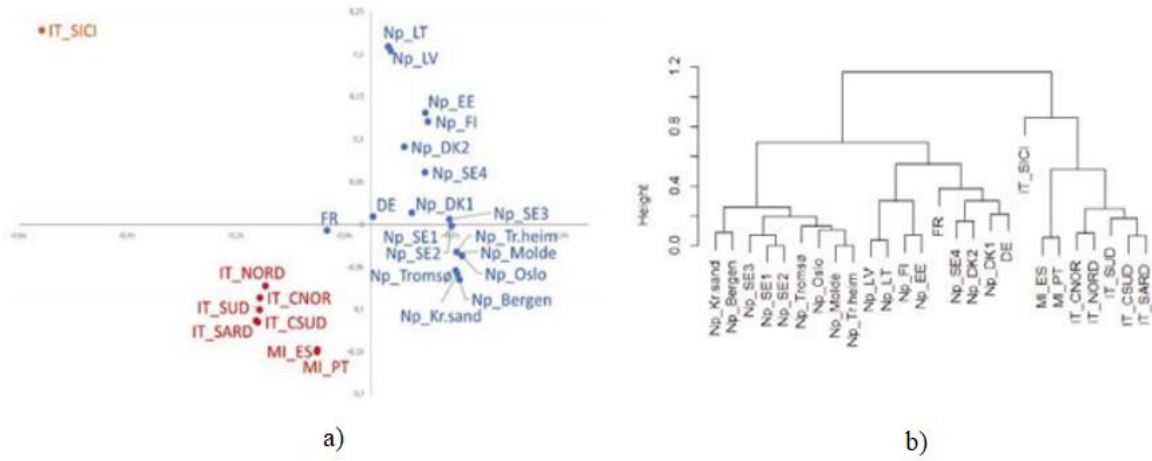
Şekil 2.6. Kümeleme teknikleri [41]

Talep katılımında kullanılan yaygın kullanılan hiyerarşik kümeleme; kendi kümesindeki her veri noktasından başlayarak ve benzerliklerine göre kümeleri yinelemeli olarak birleştirerek bir küme hiyerarşisi oluşturarak çalışan bir kümeleme algoritmasıdır. İki ana hiyerarşik kümeleme türü vardır; kendi kümesindeki her veri noktasıyla başlayan ve kümeleri yakınlıklarına göre birleştiren toplamalı/birleştirici kümeleme, diğeri ise tek bir kümedeki tüm veri noktalarıyla başlayan ve kümeleri benzerliklerine göre yinelemeli olarak bölünmeli kümelemedir. Kümeleme analizleri pek çok birbirine benzer veri grubu ve büyük veriler kullanılarak yapıldığı için analiz sonuçlarının kolaylık anlaşılması için görselleştirme yöntemleri çok önemlidir. Kullanılan görselleştirmeler ile verilerin yapısını ve kümeler arasındaki ilişkileri daha iyi anlayabiliriz. Görselleştirmeler, verilerdeki kalıpları tanımlamamıza, aykırı değerleri veya anormallikleri tespit etmemize ve farklı olası kümelemeleri ayırt etmemizi sağlayabilir. Ayrıca kümeleme analizinin sonuçlarını başkalarına sunmayı ve açıklamayı kolaylaştırabilir, doğru yorumlamayı ve karar almayı sağlayabilir [42]. Kümeleme analizlerinde yaygın kullanılan görselleştirme; dağıtım grafikleri, ısı haritaları, dendogramlar, radar çizgileri ve özdüzenleyici haritalardır.

Dendrogramlar, kümeler arasındaki ağaç yapısına benzeri bir hiyerarşik ilişkiler ile gösteren diyagramlardır. Bu diyagram sayesinde küme sayısının belirlenmesi daha kolay olabilir. Isı haritaları, kümeler arasında ilişki satır ve sütun olarak verilir ve her karenin renginin iki veri noktası arasındaki benzerliği veya farklılığı temsil edecek şekilde renk toplaması oluşturulur. Kümeleme analizlerinin uygulandığı veri yapısı ve büyüklüğüne göre seçilen algoritma sonucunu en iyi temsil edecek görselleştirme aracını seçmek önemlidir. Örneğin hiyerarşik kümelemelerin uygulandığı analizlerde birleştirici ya da bölümleyici bağlantılarının kolaylıklar anlaşılabilmesi için dendrogramlar tercih edilmektedir [43–45].

2.3.4. Literatür özeti

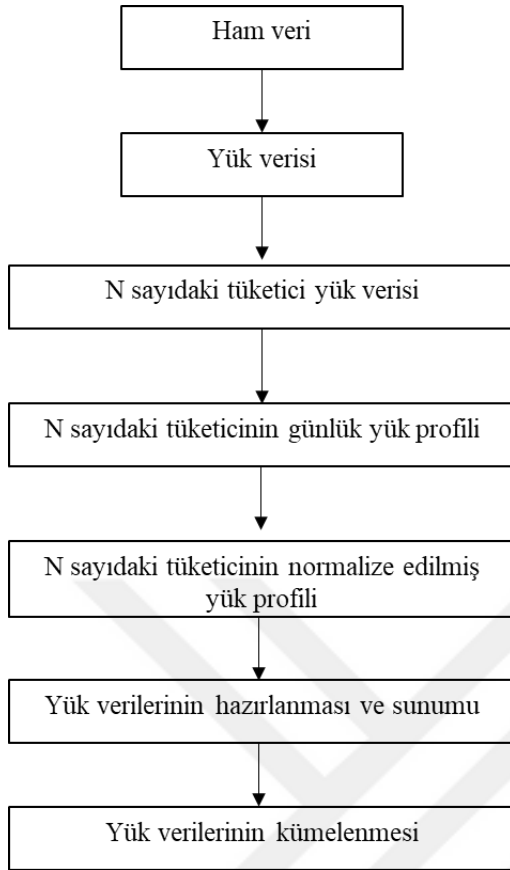
Kümeleme analizleri pek çok farklı çalışma alanında kullanılmaktadır. Sağlık sektöründe Türkiye genelinde sağlık yapıları istatistiksel veriler kullanılarak il bazlı kümeleme analizleri gerçekleştirilmiştir [39,46]. Türkiye’de konut satışlarını etkileyen faktörler dengeli panel veri analiz yöntemleri ile il bazlı kümelendiği görülmüştür. Borsada işlem gören hisse senetlerinin gruplandırarak, portföy bazlı işlemlerin yapılabilmesi amacıyla borsa verileri kareli öklid uzaklık ölçüsüyle ile hiyerarşik (ward) ve hiyerarşik olmayan (k-ortalama) yöntemleriyle karşılaştırmalı olarak kümeleme analizi yapılmış [40], benzer diğer bir çalışmada finansal zaman seri verilerinin kümelendiği bulanık c-ortalamalar, gustafson-kessel ve bulanık k-medoid algoritmalarıyla incelenmiştir [47]. Konut talebini belirleyen sabit ve rassal etkili modeller, panel veri analizi yöntemleri ile tahmin edilmiş, öklid uzaklığı ve ward yöntemi ile hiyerarşik kümeleme yapılmıştır [41]. Bir ilin hayvansal atıkların potansiyeline bağlı olarak biyogaz tesisi kurulabilmesi hesaplanması k-ortalama kümeleme incelenmiş ve konumlarına göre optimum tesis bölgeleri tespit edilmiştir [48]. İkili veri yapısında karşılaştırmalar yapılarak, zaman serilerine bağlı benzerlik ve farklılıklara göre kümeleme yapılabilir. Avrupa enerji piyasalarına ait gün öncesi fiyat verileri öklid uzaklık, pearson korelasyon ölçütlerine göre kümeleme analizleri yapılmış, dendrogram görselleri kullanılmıştır. Elde edilen uzaklık hesaplamalarına göre ülkeler çoklu boyutlu ölçeklendirme (multi dimensional scaling) ve dendrogram yöntemleri ile gösterilmiştir. Kümeleme sonuçlarının çoklu boyutlu ölçeklendirme ve dendrogram gösterimleri Şekil 2.7’de verilmiş olup, analiz sonuçlarının her iki görselde birbiriyle uyumlu olduğu görülmektedir [49].



Şekil 2.7. Kümeleme analizlerinin görselleştirilmesi a) Çoklu uzaklık ölçümleri yöntemi, b) Dendrogram gösterimi [49]

İspanya’da mesken tüketicilerinin yük profillerinin dinamik kümeleme yöntemleriyle benzerliklerini incelemiş [50], konut tüketim verilerini geliştirilen algoritma (density grid-based clustering algorithm) farklı senaryolarda sınıflandırmıştır [51]. Talep katılımı uygulamaları açısından ısınma ve klima tüketim verileri spektral kümeleme yöntemiyle çok sayıda tüketici gruplandırılmıştır. Bu çalışmada hem uzaklık ve hem de benzerlik ölçütleri hesaplanarak, Şekil 2.8’de verilen akış diyagramına göre tüketiciler kümelenecek, toplam yük profilleri elde edilmiştir [52].

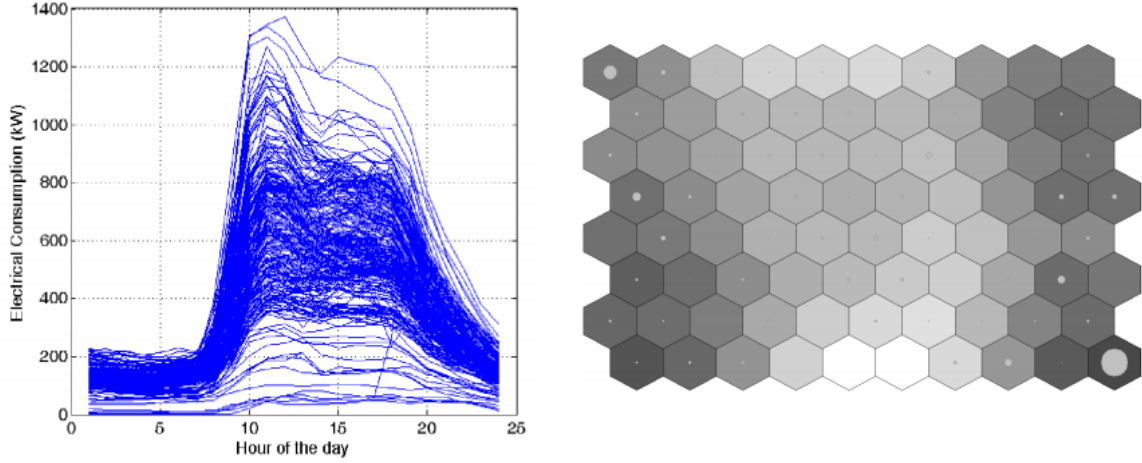
Talep katılım programlarının sanal güç santrallerinin uygulanabilmesi, dağıtık üretim ve tüketimleri birlikte kontrol edebilen ve şebeke işletmecisine dengeleme faaliyetlerinde sunabilmek amacıyla tüketim verilerinin k-ortalama yöntemiyle kümeleme analizleri yapılmıştır [53]. Talep katılımında dağıtık üretimler enerji kapasiteleri ve işletme maliyet bilgilerine farklı kümeleme metodlarıyla uygulanmış, dağıtım şebekesinde bulunan üretimlerin uygun zamanlama planlamasıyla ve enerji kapasiteleri kümeleneceği sonucunda talep toplayıcılarının maliyetlerin azaldığı görülmüştür [54]. Benzer şekilde mesken tüketicilerinin kontrol edilebilir yüklerinin kümelenecek, toplu talep kontrolünün yapılması ekonomik fayda sağlayabilmektedir [55]. Mesken, kamusal binalar ve farklı konut tüketim yüklerinin talep katılım modeli oluşturması amacıyla k-ortalama, dinamik zaman bükülmesi, birleştirici hiyerarşik kümeleme yöntemleriyle incelenmiştir [56–61]. İsveç’te yapılan bir projede dağıtım şebekelerinde öztüketime güneş enerji üretimlerinin kapasitelerinin belirlenmesi ve şebeke güvenliğinin sağlanması amacıyla mesken tüketimleri incelenmiştir.



Şekil 2.8. Kümeleme analizi akış diyagramı [52]

Talep katılımı uygulamaları açısından diğer bir önemli husus zamansal olarak tüketim profillerinin bilinmesidir. Elektrik tüketimleri gün içerisinde saatlik, haftalık ve mevsimsel olarak değişken profile sahiptir. Mesken tüketim verileri öncelikle günlük, haftalık ve mevsimlik olarak ayrıştırılmış, tüketimler arasında benzerlik ilişkisini k-ortalama yöntemiyle belirleyerek dönemsel saatlik tüketim profilleri incelenmiştir [62]. Şebekenin sahip olduğu baz yükün tahminin yapılması amacıyla, talep artışının olduğu saatlerinde talep kontrol edilebilmesi için denetimsiz öğrenme tekniği ile kümeleme analizi gerçekleştirmiştir. 2500 endüstri tüketicisinin akıllı sayaç ölçümleri ile zamansal tüketim kümelenmiştir. Bu sayede Şekil 2.9'da verilen tüketim profili ile özdüzenleyici haritalandırma (self organizing map) oluşturulmuştur [63]. Hindistan'da bir dağıtım bölgesindeki tüketiciler için günlük tüketim modelleri kümelenecek, baz yük profil miktarına göre talep katılım modelleme çalışmaları gösterilmiştir [64]. Talep katılımı ve enerji verimliliği uygulamalarında tüketim kaynaklarının türleri, zamansal kullanım dönemleri ve toplumsal alışkanlıklar açısından incelenmesi faydalı olabilir. Özellikle günlük yüksek tüketim saatlerinin belirlenmesinde ve kullanım zamanına göre tarife modellerinin

yapılmasında çok fayda sağlayabilir. Bununla ilgili olarak İngiltere’de yemek hazırlama, bulaşık, temizlik, TV ve bilgisayar kullanımlarının istatistikleri incelenerek, zamansal açıdan (haftanın günleri, gün saatleri ve aylar) yoğunluk, sıklık analizleri incelenmiştir [65].



Şekil 2.9. Günlük tüketim eğrisi ve özdüzenleyici haritalandırma [63]

Elektrik şebekelerinde talep katılımı uygulamalarının belirlenmesinde sektör bazlı tüketimlerin bilinmesi talep katılımını doğru şekilde modellenmesi ve şebekenin esnekliğinin artırılmasında oldukça önemlidir. Buna örnek olarak Çin’de talep katılımıyla yük kaydırma modelinin değerlendirilmesi ve sektör bazlı uygulanabilirliği incelenmiştir [66]. Talep katılımının uygulanmasında diğer önemli husus ise ihtiyaç durumunda talep kontrolünün emre amadeliğidir. Artan yenilenebilir kapasitesi için şebeke esnekliğinde talep kontrolü büyük bir fırsat oluştursa bile, istenilen zamanda yeterli kullanılabilirliğin sağlanması gerekmektedir. Bu amaçla Almanya’nın saatlik bazda talep katılımı potansiyeli bugün ve gelecek yıllar için hesaplanmış ve talep katılımının farklı yenilenebilir paylarına sahip bir elektrik sisteminde kullanımı incelenmiştir. Nihayetinde talep katılımıyla yenilenebilir kaynak kısıtlamalarının azaldığı gösterilmiştir [67].

2.4. Analiz ve Sonuçlar

2.4.1. Tüketim verilerinin bölgesel olarak incelenmesi

Elektrik sistemlerinde talep katılımının piyasa ve işletme koşullarına hangi model ve kapasite ölçüsünün öngörülebilmesi amacıyla mevcut tüketici ve tüketim kapasitelerinin incelenmesi gerekmektedir. Frekans kontrolü, talep kontrolü gibi yan hizmet piyasaları dünya genelinde iletim sistem operatörleri tarafından işletilmektedir. İletim şebekesi açısından talep katılımı incelendiğinde; iletim şirketlerinin başlıca tüketici grubu bölgesel dağıtım şirketleridir. Daha sonra ise iletim şebekesine bağlı büyük ölçekli tüketim kapasitesine sahip serbest tüketici olarak sınıflandırılan tüketiciler bulunmaktadır.

Dağıtım bölgeleri tüketimlerinin bölgesel kümeleme ihtiyacı?

Bilindiği üzere elektrik şebeke yapısı ve ticari uygulamaları her geçen gün değişmektedir. Özellikle kamudan özel teşebbüslere geçen elektrik şebeke işletmecileri tüketicilere yönelik pek çok tarife modeli sunmayı hedeflemektedir. Bu tarife modelleri tüketicileri faaliyet alanlarına, tüketim zamanlarına, şebeke gelirim seviyelerine vb. durumlarına göre düzenleme kurumları tarafından belirlenmektedir. Bu tarife modelleri her yıl güncellenirken, gerekli durumlarda teşvik mekanizmaları veya sözleşme modelleri de oluşturulmaktadır. Örnek olarak mevcut durumda ülkemizde uygulanan tarife bilgileri Şekil 2.10'da gösterilmektedir. Güncel olarak Türkiye'de dağıtım lisansına sahip dağıtım şirketleri, organize sanayi bölgeleri ve 50 MW ve üzeri tüketim gücünü taahhüt eden tüketiciler (serbest tüketiciler) iletim sistemine bağlı tüketici olabilmektedir. Dağıtım şebekesinde ise faaliyet grubuna göre taban birim fiyatlar uygulanmaktadır ancak kamu tarafından her yıl belirlenen serbest tüketici limitine göre (2020 yılı için yıllık tüketimi 1400 kWh ve üzeri) tüketiciler tedarikçi seçme imkanı bulunmaktadır. Ayrıca iletim işletmesi açısından gelecek dönem talep tahminleri geçmiş dönem tüketim verilerine ve dağıtım şirketlerinin gelecek dönem projeksiyonlarını baz almaktadır. Burada toplam talep tahmininin herhangi bir sınıflandırma ihtiyacı olmasa da talep gelişiminin tüketici ve bölgesel bazlı gruplandırılması işletme ve planlama koşullarına fayda sağlayabilmektedir. Öte yandan, iletim şebeke işletmecileri için geçmiş tüketim verilerine göre talep gelişiminin bölgesel ve daha kısa zaman aralıklarında bilinmesi işletmesel açıdan oldukça önemli hale gelmektedir. Gelecek dönemlerde talep katılımlarının şebeke piyasalarına dahil olmasıyla, iletim şebekesi

açısından tüketici gruplarının bilinmesi, bölgesel ve tüketici bazlı tüketim kapasiteleri kontrol edilmesi oldukça önemli hale gelecektir. Bunun en güzel örneğini sistem işletmecileri YEK'lerin ve dağıtık üretim santrallerinin şebekede artışıyla tecrübe etmiştir.

EPDK Tarafından Onaylanan ve 1/4/2020 Tarihinden İtibaren Uygulanacak Faaliyet Bazlı Tarifeler									
1/4/2020		Faaliyet Bazlı Tüketici Tarifeleri (kr/kWh)					Güç Bedeli Hariç Toplam Tarifeler (kr/kWh)		
İletim Sistemi Kullanıcıları	Görevli Tedarik Şirketinden Enerji Alan İletim Sistemi Kullanıcıları	Perakende Tek Zamanlı Enerji Bedeli	Perakende Gündüz Enerji Bedeli	Perakende Puan Enerji Bedeli	Perakende Gece Enerji Bedeli	Dağıtım Bedeli	Tek Zamanlı	Gündüz	Puant
	Tüketici	48,7941	49,4665	81,6195	23,5159	0,0000	48,7941	49,4665	81,6195
Dağıtım Sistemi Kullanıcıları	Dağıtım Sistemi Kullanıcıları	Perakende Tek Zamanlı Enerji Bedeli	Perakende Gündüz Enerji Bedeli	Perakende Puan Enerji Bedeli	Perakende Gece Enerji Bedeli	Dağıtım Bedeli	Tek Zamanlı	Gündüz	Puant
	Tüketici	48,7941	49,4665	81,6195	23,5159	0,0000	48,7941	49,4665	81,6195
Dağıtım Sistemi Kullanıcıları	Orta Gerilim Çift Terimli					Orta Gerilim Çift Terimli			
	Sanayi	48,3973	49,0698	81,2229	23,1192	9,9696	58,3669	59,0394	91,1925
	Ticarethane	52,4258	53,0367	88,0270	25,1962	15,5373	67,9631	68,5740	103,5643
	Mesken	35,9113	36,6378	63,0977	15,4783	15,3897	51,3010	52,0275	78,4874
	Tarımsal Sulama	47,5510	48,1023	79,5690	22,9573	12,7962	60,3472	60,8985	92,3652
	Aydınlatma	47,9389				14,9125	62,8514		
	Tek Terimli					Tek Terimli			
	Sanayi	48,1767	48,8494	81,0025	22,8987	11,0122	59,1889	59,8616	92,0147
	Ticarethane	52,4391	53,0499	88,0404	25,2094	19,3810	71,8201	72,4309	107,4214
	Mesken	35,2873	36,0138	62,4735	14,8541	19,0023	54,2896	55,0161	81,4758
	Tarımsal Sulama	47,5082	48,0595	79,5262	22,9143	15,9326	63,4408	63,9921	95,4588
	Aydınlatma	47,9402				18,6021	66,5423		
	Alçak Gerilim Çift Terimli					Alçak Gerilim Çift Terimli			
	Sanayi	48,6812	49,3537	81,5068	23,4031	17,0382	65,7194	66,3919	98,5450
	Ticarethane	52,7326	53,3434	88,3338	25,5029	23,0904	75,8230	76,4338	111,4242
	Mesken	34,8202	35,5468	62,0066	14,3870	22,5831	57,4033	58,1299	84,5897
	Sehit Aileleri ve Muharip Malul Gaziler	12,2380				15,3166	27,5546		
	Tarımsal Sulama	47,7486	49,1923	79,7667	23,1547	18,9729	66,7215	68,1652	98,7396
	Aydınlatma	48,2177				22,1156	70,3333		
	Genel Aydınlatma	28,6562				22,1156	50,7718		

Şekil 2.10. 2020 yılı güncel uygulanan tarife bilgileri

Geçmiş şebeke işletmeciliğini aksine, gün geçtikçe şebeke kararlılığını sağlayabilmek ve değişken üretim koşullarını tahmin edebilmek için pek çok açıdan veri izleme, tahmin ve gelecek durum kestirimlerinin yapılması ihtiyacı doğurmaktadır. Benzer durum talep tarafı yönetimlerinde meydana gelecektir. Bununla birlikte iletim şebekeleri açısından talep katılımı uygulamaları öncelikle büyük tüketici grupları tarafından başlayabilecektir. İletim sistemi tüketici grubunu dağıtım şirketleri ile serbest tüketiciler oluşturmaktadır. Bu iki talep oyuncusunu baz aldığımızda ise iletim şebekesine bağlı piyasalara öncelikle talep toplayıcıların rol üstleneceği muhtemeldir. Öncelikli olarak talep toplayıcı organları ise mevcut dağıtım şirketlerine benzer yapıda oluşabilecektir. Bu doğrultuda; iletim şebekesi açısından, farklı bölgelerdeki dağıtım şirketlerinin tüketim verileri incelenerek dağıtım şirketleri tüketim benzerliği yönünden gruplandırılması hedeflenmiştir. Bu sayede talep toplayıcıların dağıtım şirketlerine benzer yapıda oluşabileceği düşünüldüğünde; tüm iletim şebekesi topolojisinde talep katılımı şekli ve talep katılımının bölgesel kapasitelerinin

belirlenmesi kolaylaşabilecektir. Bu durumda öncelikli olarak dağıtım şirketlerinin geçmiş dönem tüketim verilerinin incelenmesi talep tarafı katılımı uygulamalarının belirlenmesine faydalı olabilecektir. Bu doğrultuda 21 farklı dağıtım bölgesinin 2017-2019 yıllarına ait saatlik elektrik tüketim verileri ele alınmış, her yıl için 21x8760 boyutunda tüketim veri matrisi python yazımıyla düzenlenmiştir. Şekil 2.11’de zaman etiketli veri matrisi gösterilmektedir.

Time	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
2019-01-01 00:00	1047.5	933.64	832.14	997.26	667.42	607.17	658.97	1387.26	2381.52	2442.68
2019-01-01 01:00	976.08	872.02	807.82	907.25	643.48	556.69	634.48	1287.19	2262.39	2247.57
2019-01-01 02:00	905.95	857.15	781.83	856.46	616.47	516.95	638.78	1181.29	2127.17	2084.73
2019-01-01 03:00	852.12	833.46	762.55	812.15	598.93	497.19	623.28	1102.28	2085.92	1946.6
2019-01-01 04:00	829.73	823.54	744.97	799.43	579.41	495.59	611.08	1061.99	2074.56	1889.71

Time	D12	D13	D14	D15	D16	D17	D18	D19	D20	D21
2019-01-01 00:00	2203.6	1439.16	1478.61	2750	408.8	272.04	375.73	349.16	280.5	478.78
2019-01-01 01:00	2165.5	1548.33	1382.25	2567.71	387.49	249.59	338.3	337.97	266.5	453.65
2019-01-01 02:00	1877.38	1497.83	1285.05	2419.48	373.32	245.7	310.58	333.22	250.2	434.74
2019-01-01 03:00	1940.54	1492.62	1241.65	2304.34	365.26	232.22	310.71	323.61	242.45	422.61
2019-01-01 04:00	1880.48	1208	1211.87	2284.77	359.47	232.57	304.17	320.15	235.77	419.61

Şekil 2.11. Veri matrisi

Hazırlanan veri setleri dağıtım bölgelerine göre talep katılım şeklinin talep toplayıcılar açısından değerlendirilebilmesi amacıyla dağıtım bölgeleri saatlik tüketim verilerine göre benzerlik ve uzaklık ölçülerine göre kümelendirilmiştir. Bu sayede iletim şebekesi açısından dağıtım bölgelerinin birbirleri arasındaki benzerliği ve farklılıkları dikkate alınarak talep katılımın kapasitesi ve modelleri daha kolay tanımlanabilecektir. Aynı zamanda sistem işletmecileri açısından bir iletim şebekesine bağlı dağıtım şebekelerinin talep davranışı daha anlaşılır biçimde ele alınabilecektir. Yapılan kümeleme analizleri zaman seri verileri benzerlik ve uzaklık ölçü hesaplamaları pearson korelasyon analizi ve kareli öklid uzaklık bağıntıları kullanılarak yapılmıştır. Korelasyon analizi sonucu ilk olarak bölgesel olarak veri grupları arasındaki benzerlik ilişkisini göstermek için yapılmıştır. Ancak kümeleme analizinde ise bölgeler arasında benzerlik ya da benzememezlik ölçütü uzaklık kullanılmıştır. Yani birbirine en yakın uzaklıkta olan vektör grupları aynı kümede yer alacaktır [68]. Eş. 2.4’te uzaklık ölçütü verilmiştir.

$$d_{k(ij)} = \text{Min} (d_{ki}, d_{kj}) \quad (2.4)$$

Kümeleme analizinde her dağıtım bölgesi için (N), p adet ölçüm yapılmıştır. Yani Nx p ölçüsündeki matrisdeki her iki vektör için hesaplamalar yapılarak nihai durumda NxN boyutunda bir matris elde edilir. Nümerik hesaplamalar sonucunda oluşturulan uzaklık ölçülerine göre matris grafikleri oluşturularak, görsel olarak küme yapıları görülebilir. Bu sayede veri vektörleri arasında homojen ve heterojen grupları ayırtırmak kolaylaşmaktadır. Matris grafikleri kümeleme hesaplama sonucuna göre sıralanır ve bu sıralama ölçeği renk skalası ile gösterilebilir. Hazırlanan veri setlerine göre; istenilen her dönem aralığı için analiz hesaplamalarının yapılabilmesi için Matlab uygulaması yapılmıştır. Yapılan uygulama ile istenilen tüketim yılına ait verilerin uygulamaya yüklenmesi sonrasında, tüm yıl olarak ya da ay ve saat aralığı filtrelenerek korelasyon ve uzaklık analizleri yapılabilir. Elde edilen nümerik sonuçlara göre grafiksel gösterimlerden yararlanılarak öncelikle bölgeler arasında benzerlik sonuçları Eş. 2.5'te verilen pearson korelasyon analizi ile kümeleme sonuçları ise Eş. 2.6'da verilen kareli öklid bağıntısıyla görülebilmektedir.

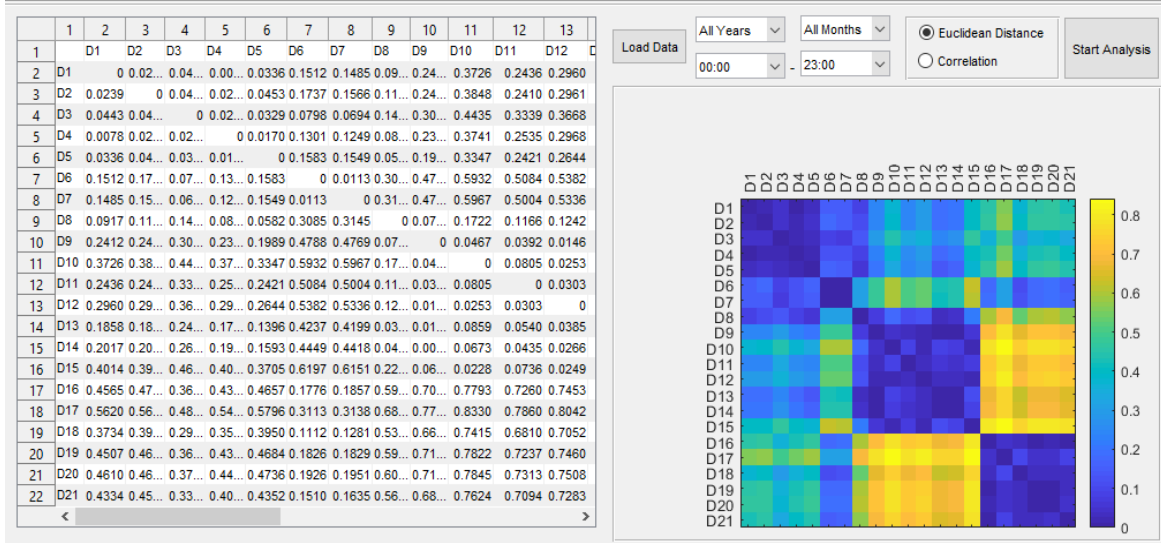
Pearson korelasyon analizi:

$$r = \frac{\sum x_i y_i}{\sqrt{\sum x_i^2 \sum y_i^2}} \quad (2.5)$$

Kareli öklid uzaklık bağıntısı:

$$d(i, j) = \sum_{k=1}^p (X_{ik} - X_{jk})^2 \quad (2.6)$$

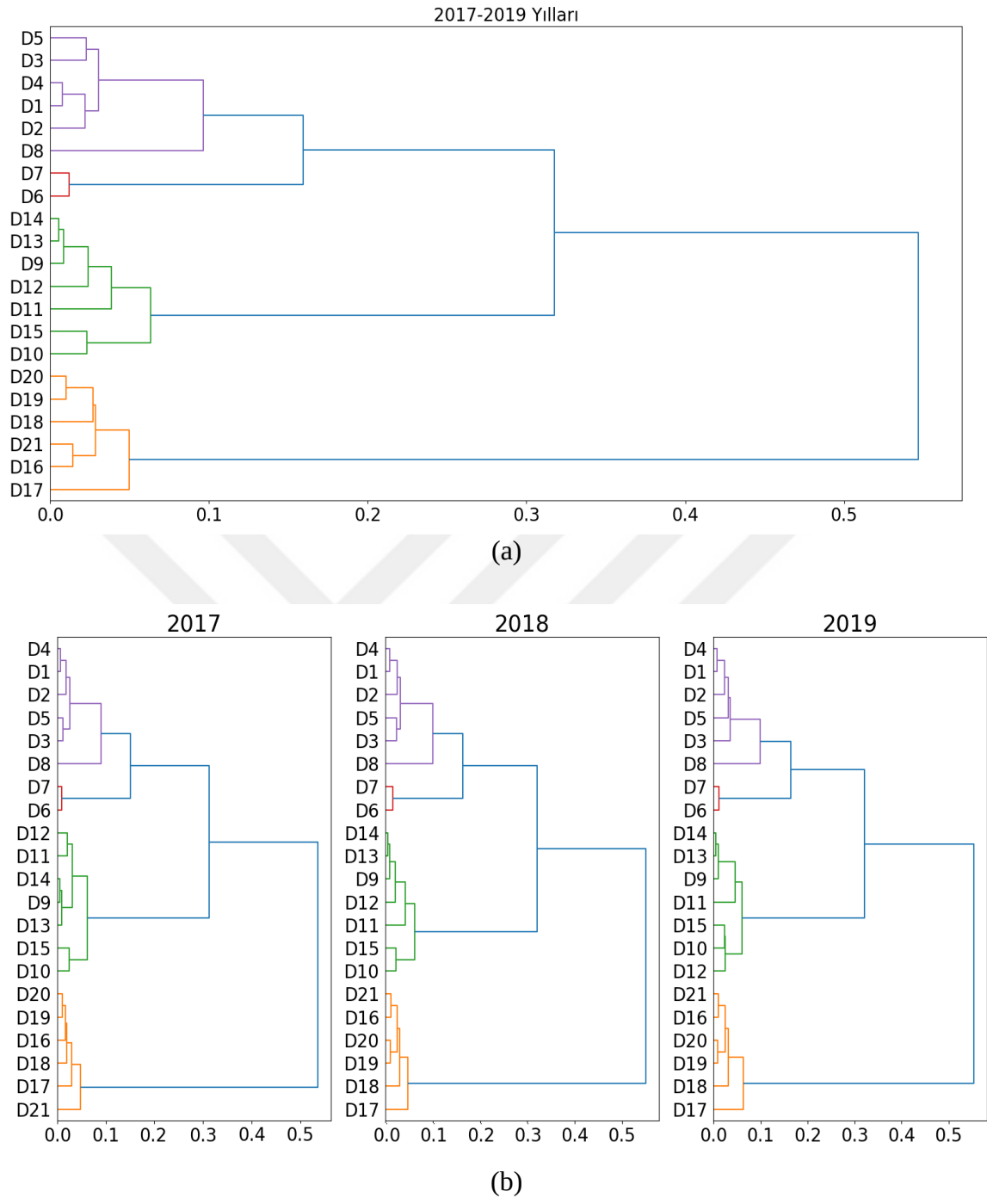
Bu uygulama ile istenilen zaman aralıklarında bölgesel kümeleme analiz sonuçları test edilebilmektedir. Şekil 2.12'de uygulama arayüzü ile elde edilen benzerlik sonucu gösterilmektedir. 2017-2019 yılında ait veriler için yapılan tüm hesaplamalar sonrasında 21 dağıtım bölgesinin, coğrafik olarak farklı bölgelerde olmasına rağmen ağırlıklı olarak üç kümede gruplandığı gözlemlenmiştir. Yapılan analiz sonuçlarında dağıtım şirketleri kodlanarak gösterilmektedir. Yapılan korelasyon sonuçlarında bölgesel tüketimlerin arasında benzerlik katsayısı 0,9-1,0 arasında olduğu gözlemlenmiş olup, iletim şebekesi açısından tüketimlerin benzerlik ilişkisinin yüksek olduğu söylenebilmektedir. Dağıtım şirketlerinin saatlik tüketim bilgilerine göre oluşan kümeler arasında gruplandırma yapılması için hiyerarşik kümeleme yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Uzaklık ölçüsüne göre yapılan analiz sonuçlarına göre toplamalı-tam bağıntılı kümeler, dağıtım şirketlerinin aşağıdan-yukarıya oluşan küme ağacı olarak ele alınmış ve dendogramlar ile gösterilmiştir.



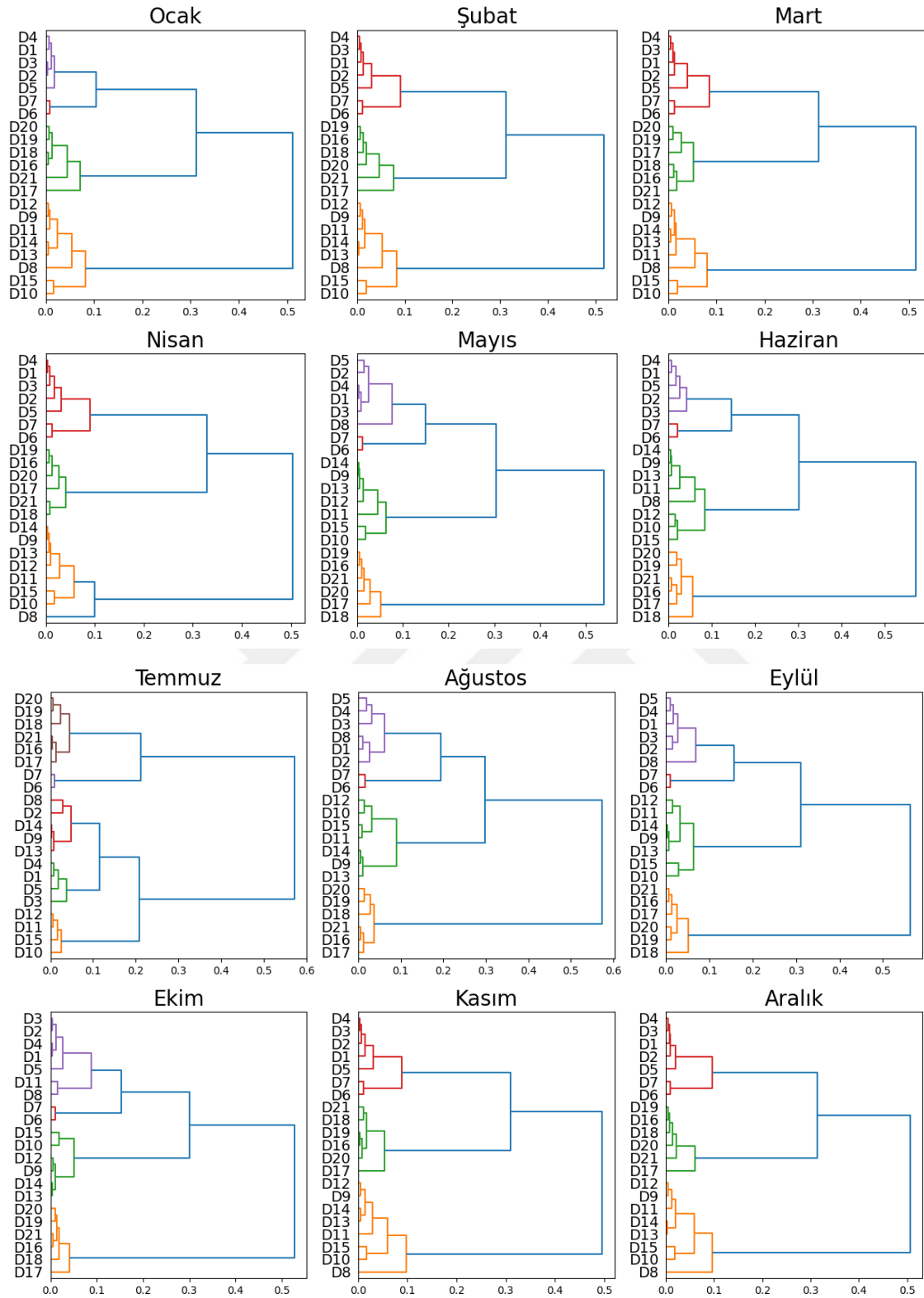
Şekil 2.12. Kümeleme analizi sonuç ekranı

2017-2019 yılları için yıllık olarak veriler incelendiğinde elde edilen sonuç grafikleri Şekil 2.13'te yer almaktadır. Yıllık tüketim verilerine göre benzerlik limitinin 0,1 olarak kabul edildiğinde ağırlıklı olarak dağıtım şirketlerinin dört kümede gruplanabilmektedir.

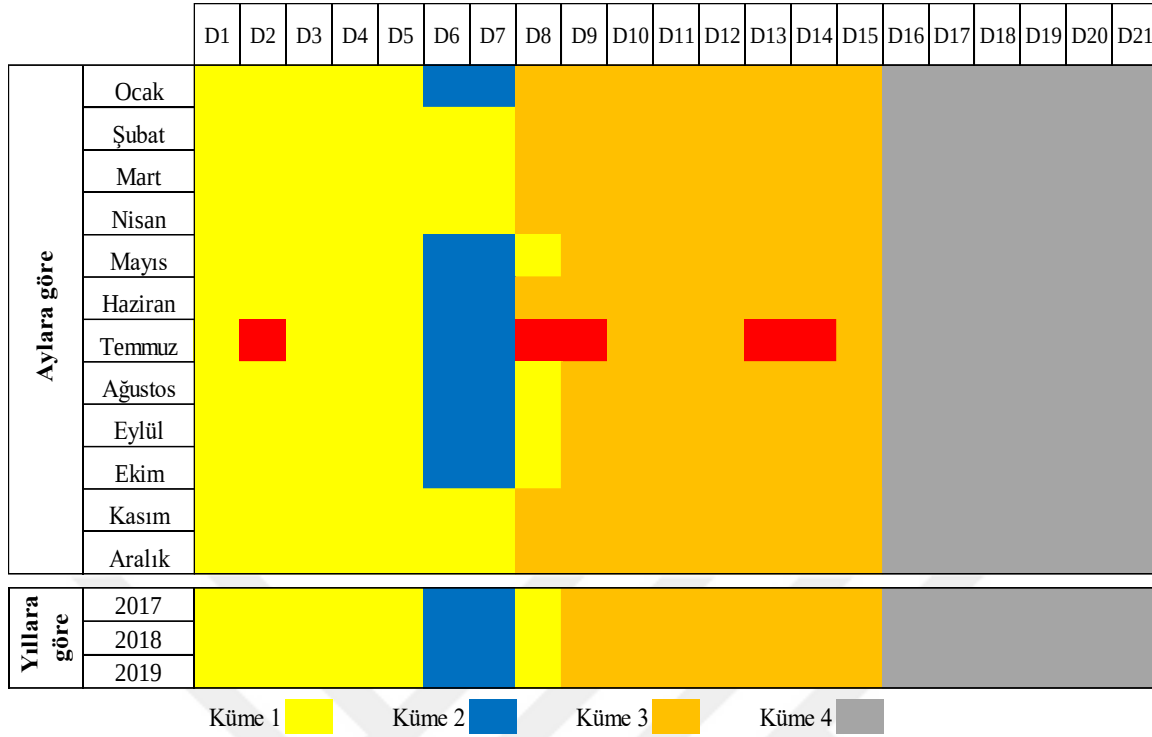
Dağıtım şirketleri arasında gruplandırma ilişkisini mevsimsel olarak ele almak için aylık olarak kümeleme analizleri incelenmiştir. Aylara göre yapılan analiz sonuçları Şekil 2.14 'te verilmiştir. Aylık analiz sonuçlarında yıllık sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Ancak bazı aylarda kümeleme limiti 0,1 kabul edildiğinde dağıtım şirketlerinin dört grupta toplandığı görülmektedir. Aylık olarak kümeleme analizlerinde bazı dağıtım şirketlerinin farklı kümeler ile eşleşebilmektedir. Tüm sonuçların özeti Şekil 2.15 'te verilmiştir. Temmuz ayı verilerine göre D2, D8, D9, D13 ve D14'ün dört kümenin dışında gruplanmaktadır.



Şekil 2.13. Kümeleme analizi sonuçları, a) Üç yıl için kümeleme analiz sonuçları, b) Yıllara göre kümeleme analiz sonuçları



Şekil 2.14. Aylara göre kümeleme analizi sonuçları



Şekil 2.15. Özet analiz sonucu

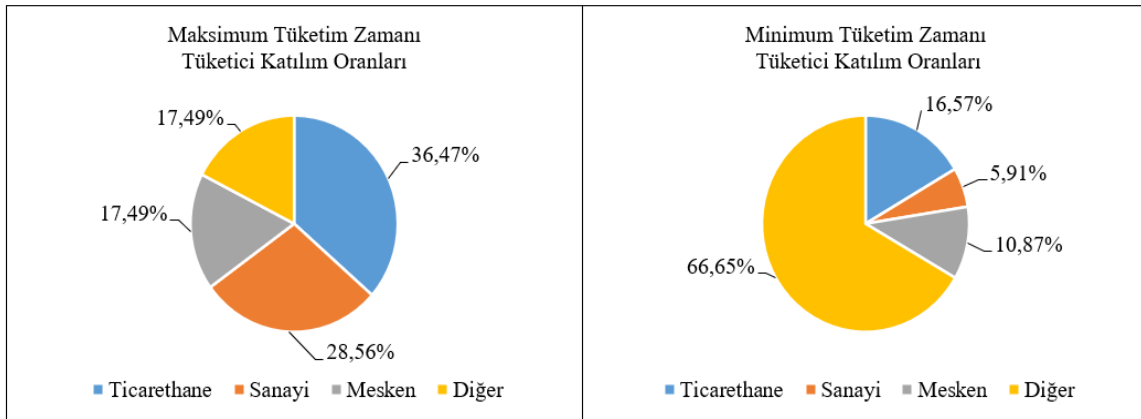
2.4.2. Dağıtım bölgelerinin tüketici bazlı incelenmesi

İletim şebekesi açısından talep katılım kapasitesinin ve tüketici bazlı değerlendirilmesi için tüketim verileri; her dağıtım şirketinin abone grubuna, sayaç okuma türüne göre saatlik bazlı olarak EPIAŞ şeffaflık platformundan tahmin edilmiş, dağıtım bölgeleri bazında mesken, sanayi ve ticarethane olarak ayrıştırılmıştır. Nihai durumda mesken, sanayi ve ticarethane olarak 21x8760 boyutlarında veri matrisi oluşturulmuştur. Hazırlanan veri seti ilk olarak 2019 yılında toplam elektrik tüketim ile mesken-sanayi-ticarethane tüketimlerinin toplamlarına göre incelenmiştir. Bu sayede dağıtım yüklerinin tüketici bazlı toplam elektrik tüketimindeki kapasite oranı zamansal olarak değerlendirilmiştir. Daha sonra aynı işlem her dağıtım şirketi için yapılmıştır. Temel olarak günlük, aylık ve mevsimsel incelemeleri tüketici bazlı tüketim kapasiteleri tüm şebeke ve dağıtım şirketleri açısından ortaya koyulmuştur. 2019 yılına ait tüketici grubuna göre saatlik bazlı tüketim verileri; EPIAŞ platformunda profil katsayıları saatlik forma indirilmiş, python yazılımı ile veri matrisleri oluşturulmuştur. 2019 yılına toplam tüketimi ile mesken-sanayi-ticarethane tüketimlerinin toplamlarını gösteren 4x8760 boyutlarındaki veri matrisinin bir bölümünün örneği Şekil 2.16'da verilmektedir.

Index	Toplam_Tüketim	Mesken_Toplam	Sanayi_Toplam	Ticarethane_Toplam
2019-01-01 00:00:00	27399.6	5843.91	3852.75	8374.26
2019-01-01 01:00:00	26012.2	5082.23	3815.53	7799.99
2019-01-01 02:00:00	24548.7	4442.37	3508.38	7260.03
2019-01-01 03:00:00	23446.9	3938.69	3332.36	6873.75
2019-01-01 04:00:00	22850.3	3661.79	3201.84	6723.56
2019-01-01 05:00:00	22714.1	3573.55	3231.74	6801.79

Şekil 2.16. Tüketim veri matrisi

2019 yılında saatlik görülen maksimum tüketim yükü 45.346 MW olup, aynı zaman diliminde toplam mesken tüketimi 7.929 MW, sanayi tüketimi 12949 MW ve ticarethane tüketimi 16.536 MW'tır. Minimum tüketim ise 1.8203 MW olup, toplam mesken tüketimi 1.978 MW, sanayi tüketimi 1.075 MW ve ticarethane tüketimi 3017 MW'tır. Buna göre maksimum-minimum tüketim şebeke işletme koşullarında, tüketici tiplerine göre katılım oranları Şekil 2.17'de gösterilmektedir.



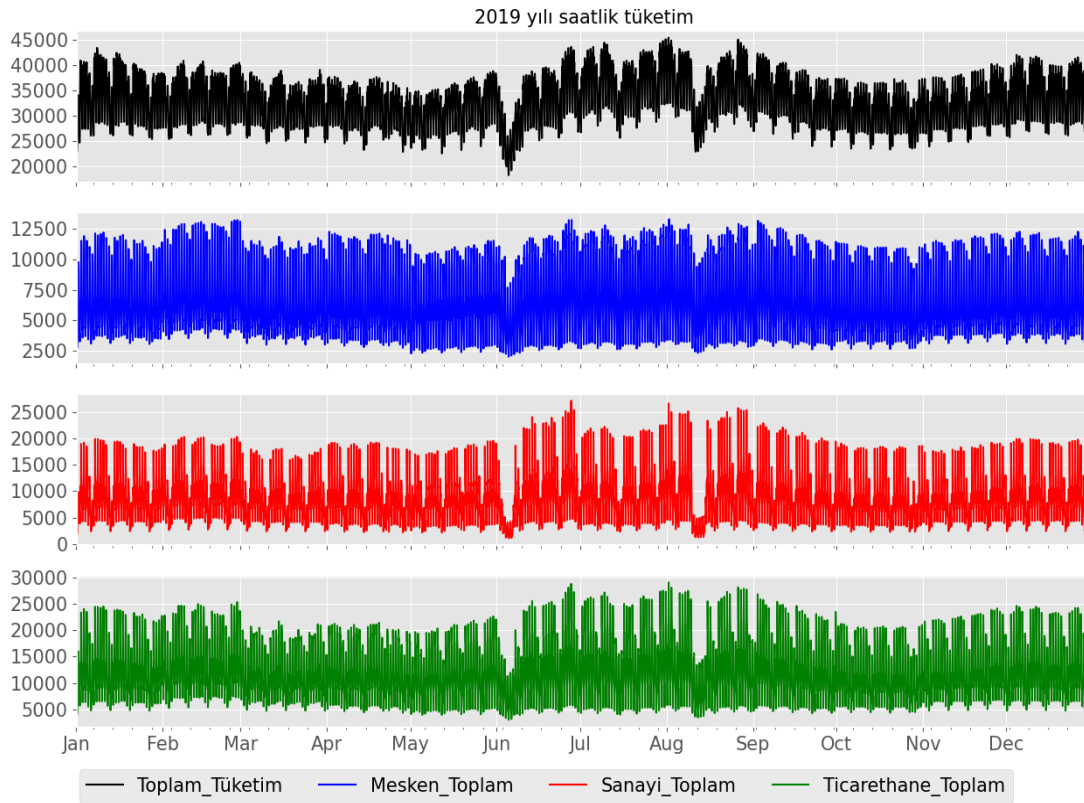
Şekil 2.17. 2019 yılı maksimum ve minimum tüketim zamanı tüketici katılım oranları

2019 yılında minimum tüketim gerçekleştiği tarih bayram tatil olup, genel olarak ülkemizde minimum tüketim resmi tatil günlerine denk geldiği bilinmektedir. Diğer olarak tanımlanan tüketim grubu ise ağırlıklı olarak iletme bağlı serbest tüketiciler, organize sanayi bölgesi tüketimleri ile dağıtım şebekeleri kapsamında aydınlatma ve tarımsal sulama tüketimlerini içermektedir. Ayrıca 2019 yılındaki gerçekleşen tüketim bilgilerine göre tüketici türlerine ait ortalama, minimum ve maksimum tüketim hesaplamaları Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2. 2019 yılı tüketici türlerinin ortalama, minimum ve maksimum tüketim bilgileri

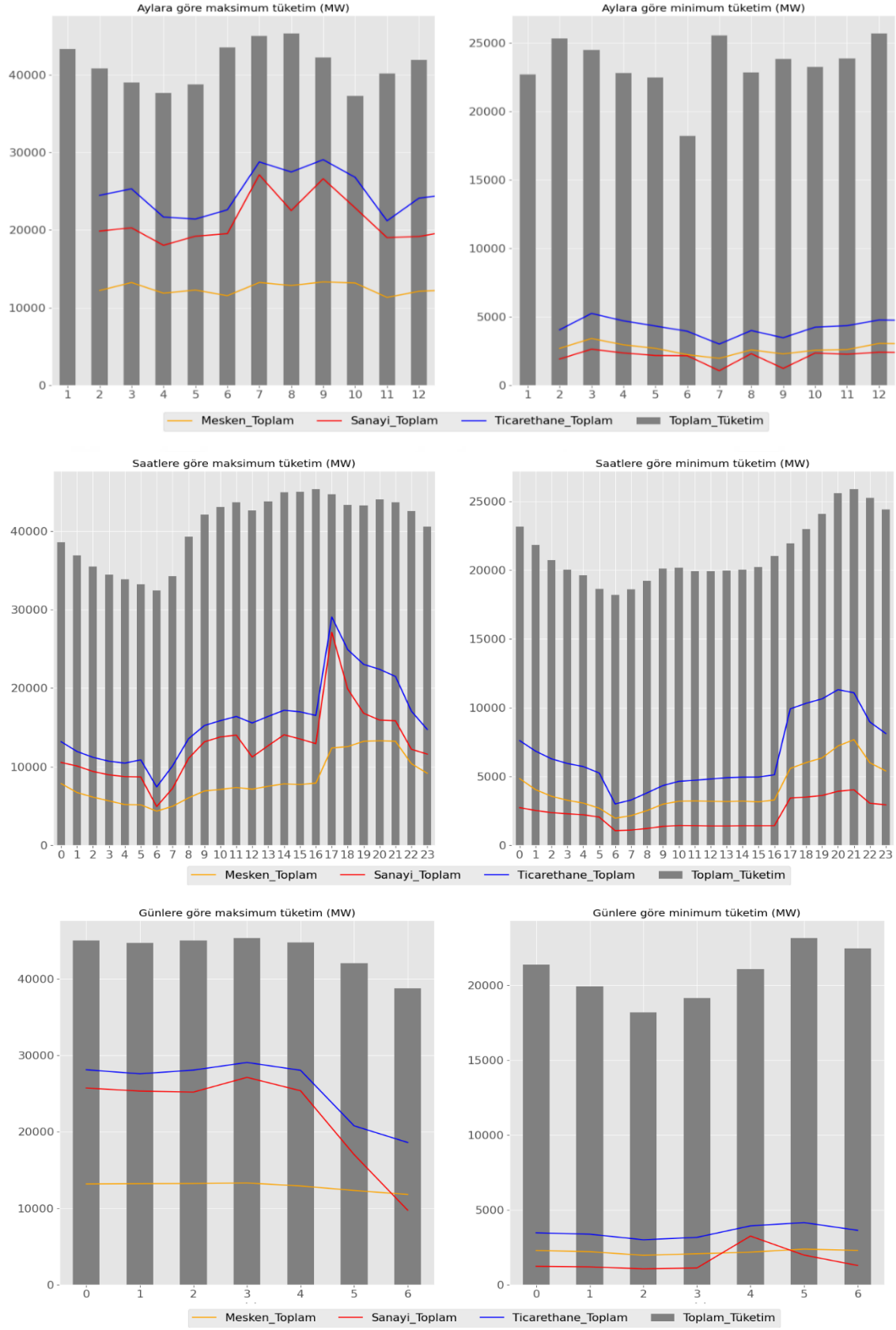
	Ortalama (MW)	Minimum (MW)	Maksimum (MW)
Toplam tüketim	33.156	18.204	45.346
Toplam ticarethane tüketimi	11.880	3.017	29.063
Toplam sanayi tüketimi	8.422	1.075	27.116
Toplam mesken tüketimi	6.473	1.979	13.317

Şekil 2.18’de 2019 yılı boyunca saatlik tüketim grafiği gösterilmektedir. Toplam tüketimin saatlik gelişimine bakıldığında gece-gündüz saatleri ile hafta içi-hafta sonu günleriyle bağımlı olarak tüketim değişiminin eğilimi görülebilmektedir. Haziran ve ağustos aylarında bayram tarihlerinde tüketim önemli ölçüde azalmakta olup, bu azalma daha çok ticarethane ve sanayi yüklerinde görülmektedir.



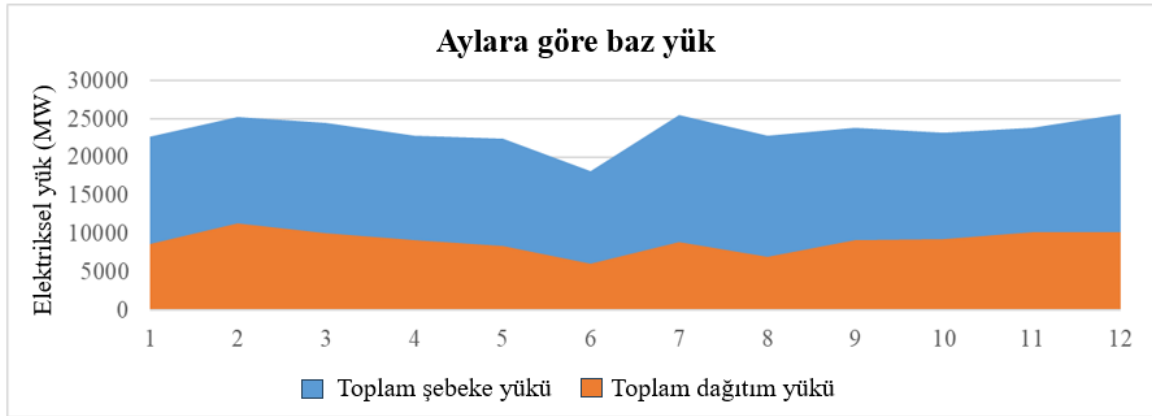
Şekil 2.18. 2019 yılı saatlik tüketimi

Bölgesel ve iletim şebekesi açısından talep gelişiminin ön görülebilmesi ve talep katılımını belirlenmesi amacıyla aylık, günlük ve saatlik maksimum-minimum tüketim eğilimleri tüketici tipine göre Şekil 2.19’da verilmiştir.



Şekil 2.19. Tüketici bazlı aylık-günlük-saatlik maksimum-minimum tüketim eğilimleri

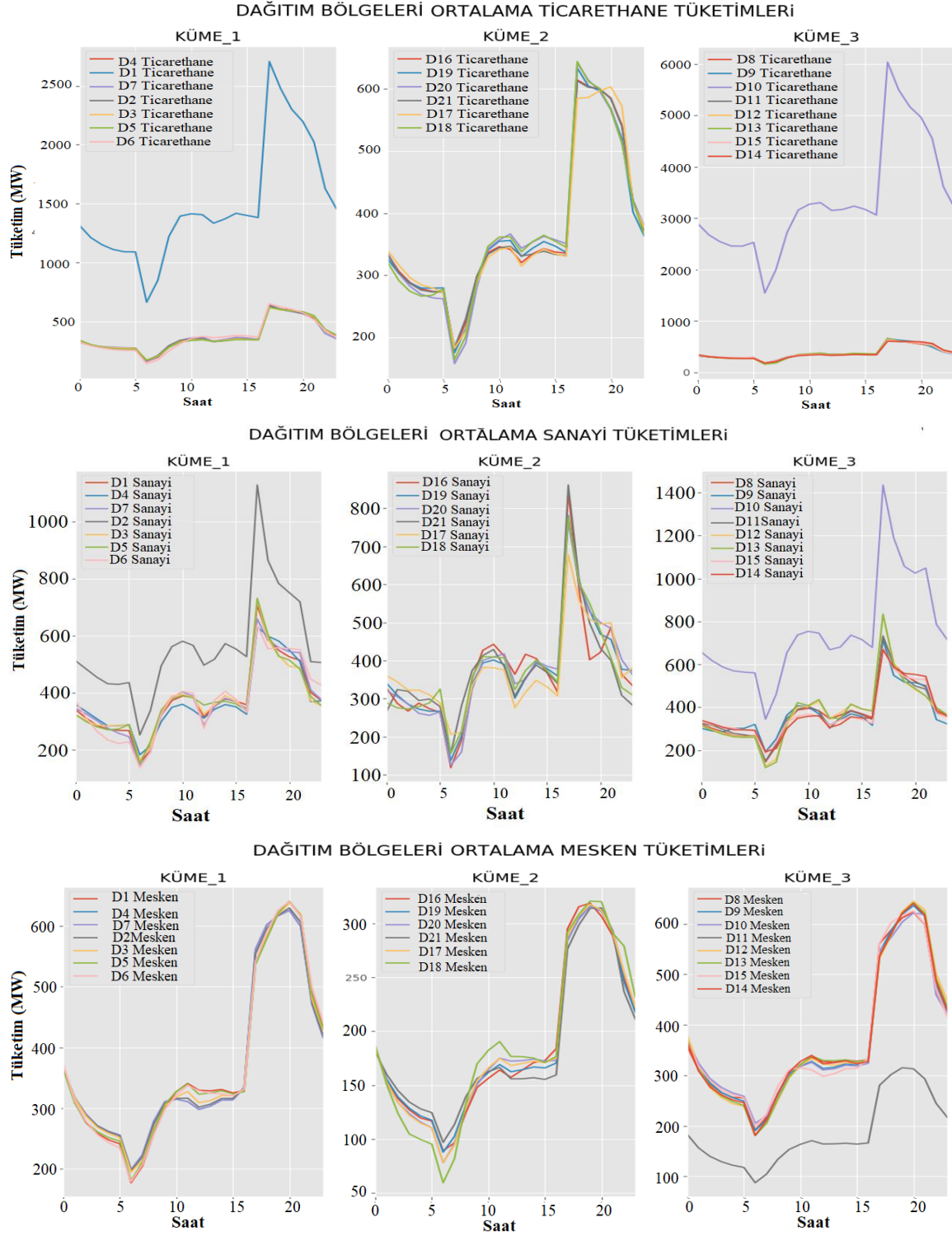
Ulusal şebeke tüketimi açısından mesken tüketimin aylık maksimum ve minimum tüketimi çok değişmemektedir. Sanayi ve ticarethane aylık tüketimleri yaz aylarında artarken, aylık bazlı minimum yüklerinin yıl boyunca durağan olduğu söylenebilir. Saatlik tüketim eğilimleri incelendiğinde; 06:00 saatleri, yani gün başlangıcı ve genel olarak vardiya değişim vakitlerinde genel olarak en düşük tüketimin olduğu, 17:00'de ise aksi yönde genel olarak tüketimin yüksek olduğu görülmektedir. Ulusal şebeke açısından tüketim özellikle akşam saatlerinde yükselmektedir. Benzer şekilde 2019 yılında maksimum tüketim ağustos ayında saat 16:00'da perşembe gününde gerçekleşmiştir. Haftanın günleri bakımından, minimum tüketim trendi her gün için aynı seviyede olduğu söylenebilir. Ancak maksimum tüketim eğilimine bakıldığında ise hafta içi günlerinde tüketim daha yüksektir.



Şekil 2.20. Aylara göre toplam şebeke ve dağıtım yükleri

Nihai olarak kümeleme analizi sonuçlarına göre belirlenen bölgesel kümelerin saatlik ortalama tüketim seviyeleri incelenmiş, elde edilen tüketici bazlı tüketim kapasiteleri Şekil 2.21'de gösterilmiştir. Ticarethane tüketim kapasitesi en fazla olan dağıtım bölgeleri D1 ile D10 dağıtım bölgeleridir. Bu iki bölge belirlen küme içerisindeki diğer bölgelere göre kapasitelerinin oldukça fazla olduğu görülmüştür. Benzer durum sanayi tüketimlerinde D1 ve D10 bölgeleri için oluşmuştur. Mesken tüketimlerinde ise D11 bölgesi kapasite açısından diğer bölgelere göre daha azdır. Küme 2'de yer alan dağıtım bölgelerinin saatlik ortalama tüketimlerinin de benzer olduğu açıkça görülebilmektedir. Mesken tüketim sonuçlarına göre; Küme 1 ve Küme 3'ün saatlik ortalama tüketimlerinin benzer olduğu, D11 bölgesinin ise Küme 2'de yer alan dağıtım bölgeleriyle benzer olduğu görülmektedir. Sanayi tüketimleri açısından, D2 ve D10 bölgeleri haricinde tüm dağıtım bölgelerini saatlik ortalama tüketim kapasitelerinin özdeş olduğu söylenebilir. Benzer durum Ticarethane

tüketimleri açısından, D1 ve D10 bölgeleri haricinde tüm dağıtım bölgelerini saatlik ortalama tüketim kapasitelerinin özdeş olduğu söylenebilir.



Şekil 2.21. Dağıtım bölgelerinin ortalama saatlik tüketim grafikleri

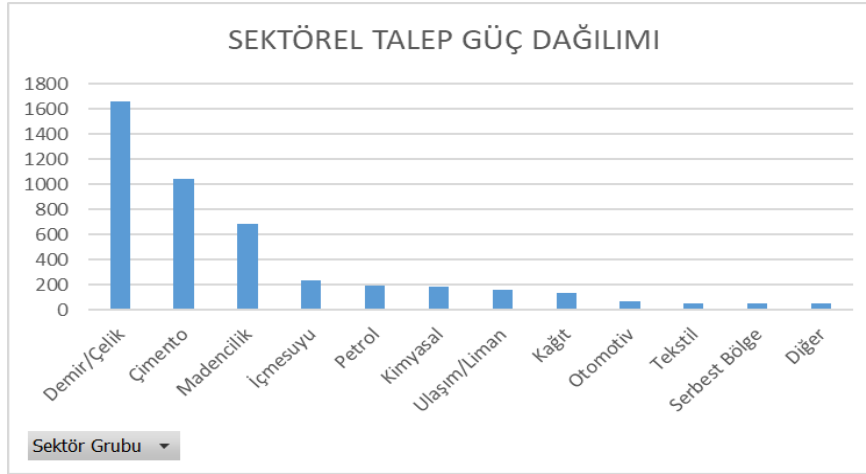
Nihai olarak tüketici bazlı saatlik ortalamalara göre kümeleme analiz sonuçlarının başarılı olduğu söylenebilir. Ayrıca saatlik ortalama tüketimi değerlerine göre, kısmi farklılıklar tekrar gözden geçirilmesi koşuluyla; saatlik tüketici bazlı kontrol edilebilir ortalama tüketim kapasiteleri Çizelge 2.3’de verilmiştir.

Çizelge 2.3. Tahmini kontrol edilebilir ortalama tüketim kapasiteleri

Tüketici grubuna göre tüketim bilgileri (MW)	Saatlik Periyot				
	00:00-05:00	05:00-07:00	07:00-16:00	16:00-18:00	18:00-00:00
Mesken	200-300	100	300-400	500	600-650
Sanayi	300	150	400	700	400-500
Ticarethane	250-350	200	350	500	600
Tahmini toplam	850	550	1100	1700	1750

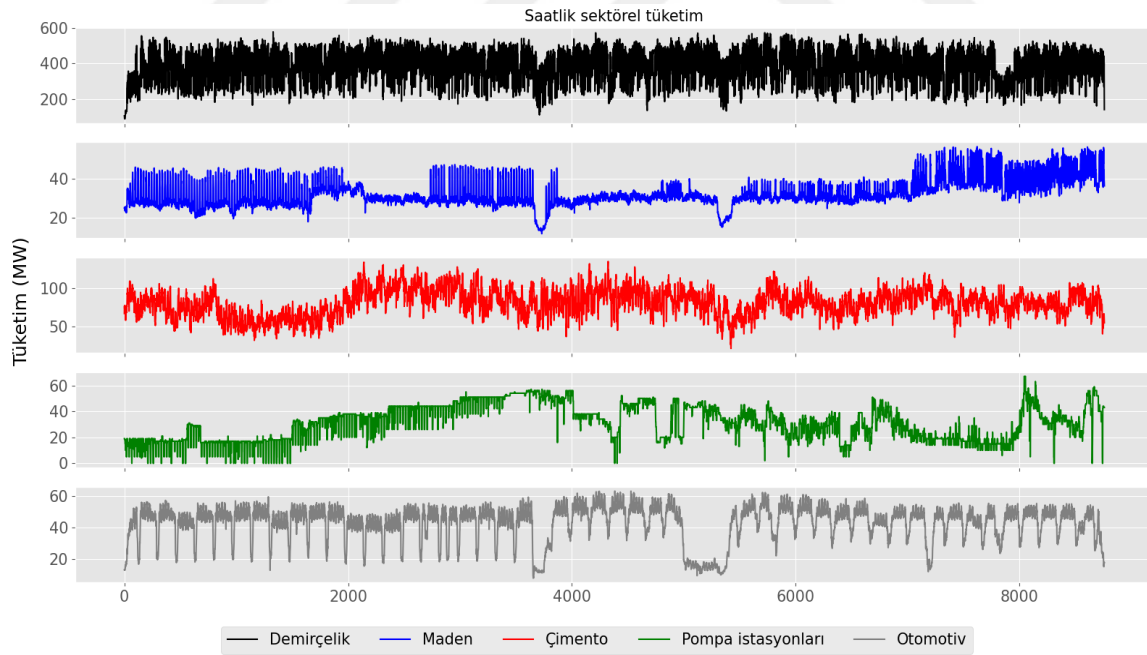
2.4.3. Büyük tüketici verilerinin incelenmesi

Elektrik şebekelerinde tüketicilerin şebeke bağlantıları ve işletilmesi tüketim gücüne göre belirlenmektedir. Güncel uygulanan şebeke mevzuat kurallarına göre iletim şebekesine bağlı bir tüketici olunabilmesi için tüketicileri belirlenen bağlantı gücünü taahhüt etmesi ve direkt olarak iletim şebekesi gerilim seviyesinden bağlantı sağlaması gerekmektedir. Benzer şekilde dağıtım şebekesine bağlı tüketicileri ise belirlenen tüketim alt limitine göre orta gerilim şebekesine bağlı olarak farklı tarife ya da piyasa katılım imkanları verilebilmektedir. Türkiye’de küresel uygulamalara benzer tüketici gruplandırmaları yapılmaktadır. Genel olarak büyük tüketiciler maksimum elektrik talep güçlerine göre sektörel gruplandığıımızda toplam talep güçleri Şekil 2.22 ‘de verilmiştir. Güncel durumda edinilen bilgilere göre iletim tüketicisi talep portföyünün toplam 4500 MW civarında olduğu, bunların ağırlıklı olarak demir çelik, çimento ve madencilik sektörleri oluşturmaktadır.



Şekil 2.22. Sektörel talep gücü dağılımı

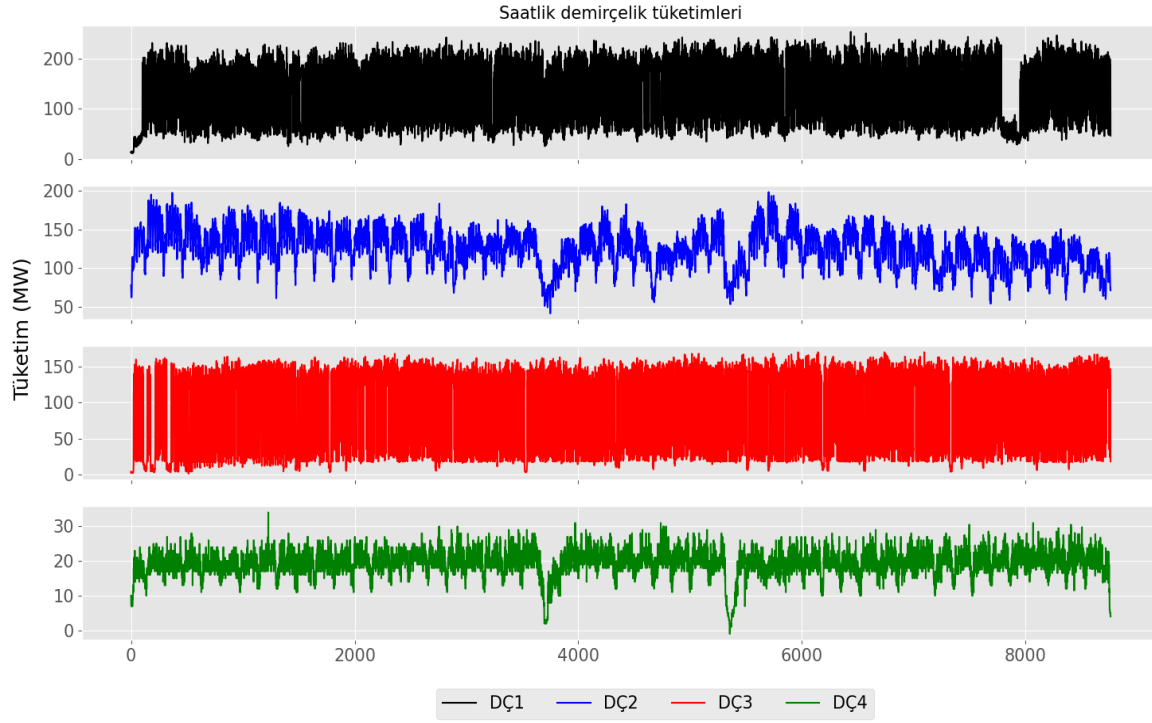
Sektör gruplarından seçilen büyük tüketicilerin 2019 yılına ait saatlik tüketimleri talep katılımı açısından incelenmiştir. Tüm tüketicilere ait tüketim bilgileri temin edilemediği için, var olan 23 tüketicinin verileri kullanılmıştır. Bu tüketiciler sektörel olarak gruplandırılmıştır. Sektörel saatlik toplam tüketim grafiği Şekil 2.23'te verilmiştir.



Şekil 2.23. Sektörel tüketim grafiği

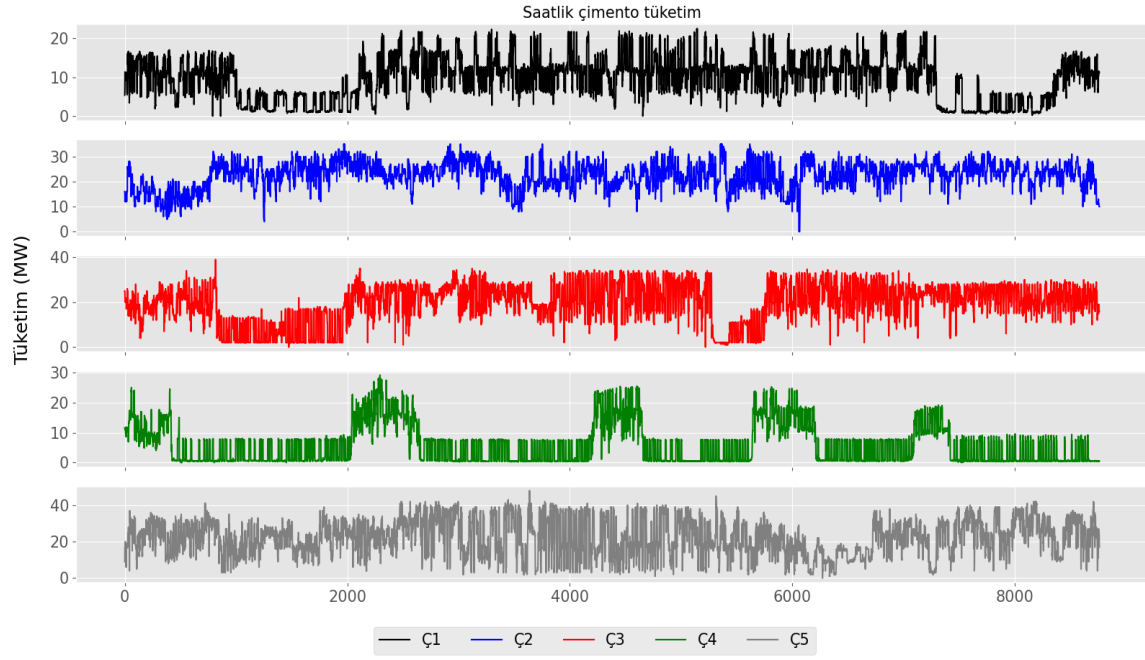
Genel olarak madencilik, kağıt/orman ve pompa istasyon yüklerinin diğer sektörlere göre daha düzensiz tüketim profiline sahip olduğu görülmektedir. Demir çelik ve çimento sektörlerinin yıl boyunca tüketimlerinin daha yüksek olduğu ve mevsimsel olarak büyük farkların olmadığı söylenebilir. Ancak her sektör grubunu oluşturan büyük tüketicilerin

saatlik tüketim profiline bakıldığında ise sektörel olarak aynı grupta yer alsalar bile talep zamanlarının birbirleriyle benzer değildir. Aynı ayrı her sektör grubundaki büyük tüketicilerin 2019 yılına ait saatlik talep grafikleri Şekil 2.24 , Şekil 2.25, Şekil 2.26, Şekil 2.27, ve Şekil 2.28 ‘de verilmiştir.



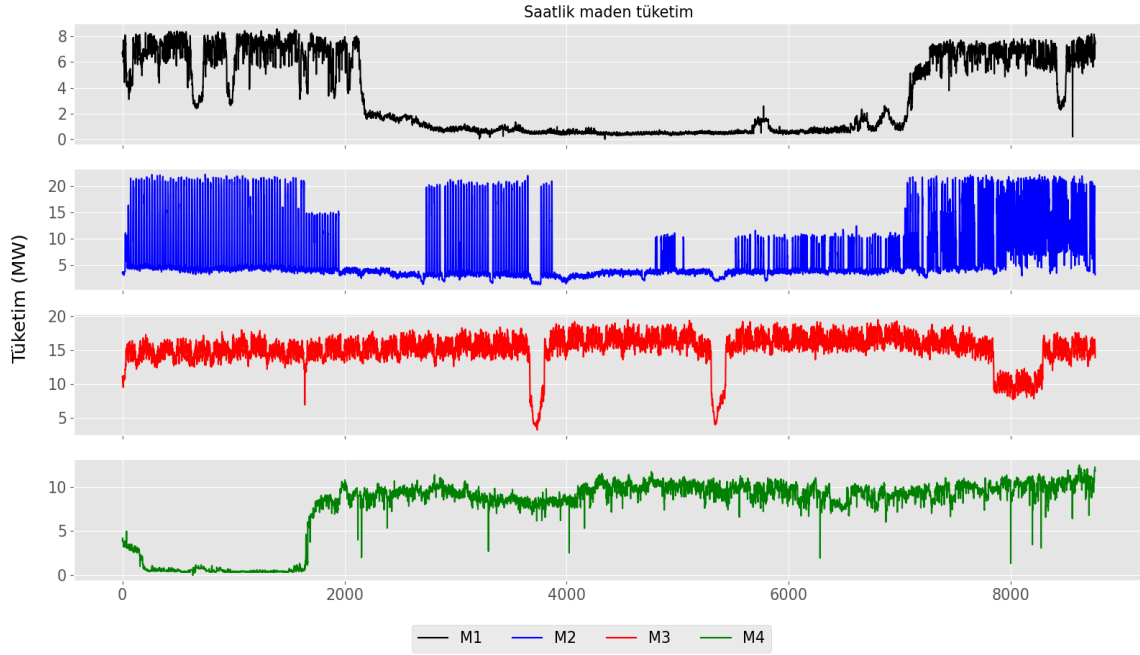
Şekil 2.24. Demir çelik tüketicileri talep profili

Farklı tüketim kapasitelerine sahip demir çelik tüketicilerinin saatlik talep profilleri yıl boyunca bireysel olarak sürekli olduğu, ancak dönemsel olarak birbirleri arasında benzerlikten uzaklaşmaktadır. Diğer sektörlerden farklı olarak demir çelik tüketicilerinin talep profili mevsimsel olarak düzenli ancak gün ve saatlere göre değişkenlik göstermektedir. Çimento tüketicilerin talep profillerinin oldukça değişken olduğu söylenebilir. Bazı çimento tüketicilerin (Ç4) yılın belirli dönemlerinde yoğun çalıştığı, pek çok saat talebi sıfırdır. Öte yandan bazılarının ise (Ç1-Ç5) yıl boyunca enerji talebinin olduğu ancak bu talep oldukça değişkendir.

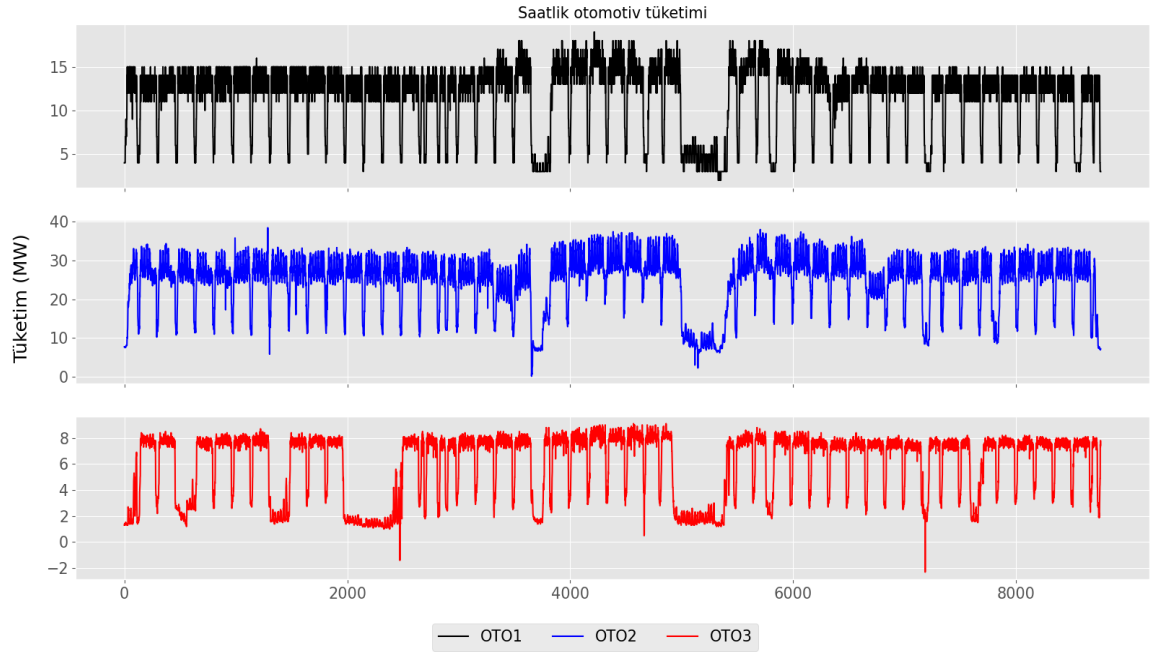


Şekil 2.25. Çimento tüketicileri talep profili

Maden endüstrisinde yer alan tüketicilerin talep profillerine bakıldığında, dönemsel talep artışlarının olduğu açıkça görülmektedir. Yalnız kamuya ait maden işletmesi olan M3'ün talebinin yıl boyunca sürekli olduğu söylenebilir.

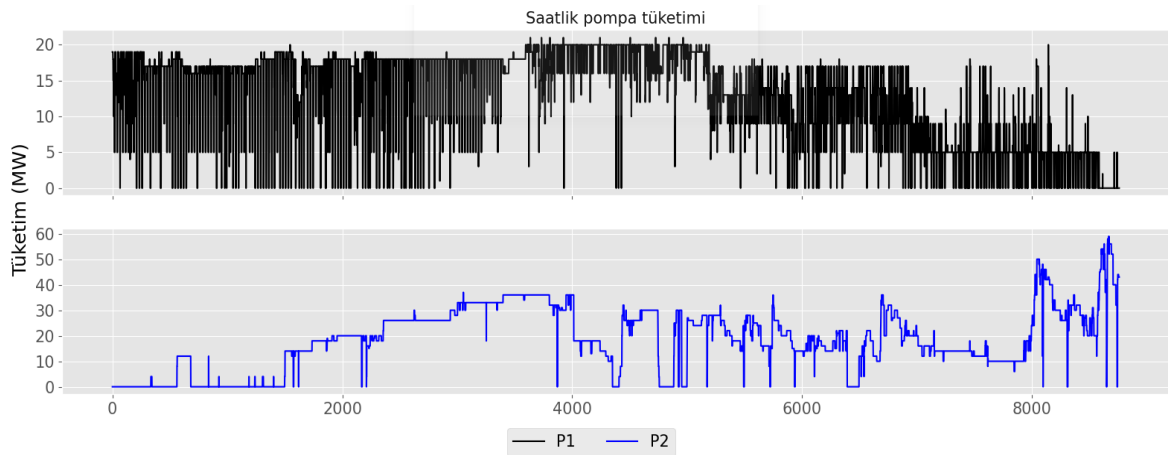


Şekil 2.26. Maden tüketicileri talep profili



Şekil 2.27. Otomotiv tüketicileri talep profili

Otomotiv tüketimlerinin yıl boyunca taleplerinin belirli kapasite aralığında ve sürekli olduğu, ancak bayram tatillerinde talebinin azaltıldığı görülmektedir. Ancak bazı tüketicilerin (OTO3) belirli dönemlerde taleplerinin minimum seviyede devam edebildiği söylenebilir.



Şekil 2.28. Pompa istasyonları profili

Genellikle kamuya ait içme suyu, doğalgaz ve petrol arama pompa istasyonlarının talep profillerine bakıldığında oldukça düzensiz olduğu, talep değişiminin sıfırdan başladığı görülmektedir. Nihai olarak büyük tüketicilerinin saatlik talep profillerini talep katılım modelleri açısından değerlendirecek olursak;

- Demir çelik yükleri, büyük tüketici kapasitelerinde büyük pay sahibi olduğundan talep kontrolünde kullanılabilir. Ancak şirketler arasındaki kapasite ve zaman bazlı değişkenlikler nedeniyle tüketici bazlı talep katılımı daha uygun görülmektedir. Yıl boyunca sürekli talep ihtiyaçları göz önüne alındığında; belirlenen zaman aralıklarına göre talep kaydırma ya da yan hizmetlere katılım potansiyelleri yüksektir.
- Çimento tüketicilerinin talep kapasiteleri bakımından talep katılım uygulamalarında yer alması önemlidir. Ancak saatlik ve dönemsel yük değişimleri açısından özellikle ani talep kontrollerinde, yan hizmetler ve dengeleme piyasalarında önceden teklif ve ihale usulü yöntemleriyle talep katılımı uygulamalarında değerlendirilebilir. Benzer uygulama maden endüstrisi tüketicileri içinde uygun olacaktır.
- Demir çelik, çimento ve maden tüketicilerinin şirket ya da tekil olarak tüketim seviyeleri 10 MW'tan ile 200 MW üzerine tüketimlerinin olduğu görülmektedir. Ulusal ya da bölgesel arz talebin dengelenmesinde ya da meydana gelebilecek şebeke kısıtlarında talep katılımında tek bir tüketicinin talep kontrolü ile önemli esneklik faaliyeti sağlanabilir. Ayrıca bu tür tüketicilerin sahip oldukları motor yüklerinin şebeke frekans değişimine bağlı kontrol mekanizmaları sağlanarak, şebeke frekans kontrolünde kaynak rezervine ek rezerv olarak dahil edilebilir. Bu mekanizmalar azalan döner rezerv koşullarına önemli bir ters atalet potansiyeli olarak sağlayabilir
- Pompa istasyon yüklerinin saatlik ani yük değişimleri planlı olarak yürütülmesi durumunda özellikle dengeleme piyasalarında yük al ve yük atma faaliyetlerinde kullanılabilir. Bununla ilgili planlı çalışma ya da günlük kullanım zamanına özgü teşvik, tarife modeli geliştirilebilir.



3. ARTAN YEK KOŞULLARINDA TALEP KATILIMIYLA FREKANS KONTROLÜNÜN İNCELENMESİ

Elektrik güç sisteminin sağlam ve güvenilir bir şekilde işletilebilmesi için temel şart her zaman arz ve talep arasındaki dengenin sağlanmasıdır. Elektrik sistemlerinde yan hizmetler; üretim ve iletim sistemlerinin ötesinde şebekenin kararlılığını ve güvenliğini sağlamak için gereken çeşitli işletme faaliyetlerini ifade etmek için kullanılır. Güç sistemlerinin sürdürülebilir şekilde işletilebilmesi için gerekli olan tüm hizmetler yan hizmetler kapsamında belirlenmektedir. Bu çerçeveden bakıldığında enerji üretim, iletim ve dağıtım kavramlarından farklı değerlendirilebilir [69, 70]. Tarihsel açıdan bakıldığında, elektrik sistemi başlangıçta üretimden tüketime dikey bir mimariden oluşması nedeniyle yan hizmetlerin sağlanması oldukça basitti. Ancak liberalleşmeyle birlikte ayrılan üretim, iletim ve dağıtım sistemleriyle birlikte yan hizmetlerin sağlanması şeklinin karmaşıklaşmasına neden olmuştur. Yan hizmetlerin kimin sağlayacağı, hangi hizmetleri ve nasıl sağlanması gerektiği, enerji piyasasındaki şekli gibi pek çok sorular ortaya çıkmıştır. Bu süreç içerisinde pek çok tanımlamalar ve değişiklikler yapılmış olsa da yan hizmetler kavramı 2004 yılında hazırlanan raporda; “Yan hizmetler; iletim veya dağıtım sistemi operatörünün, iletim veya dağıtım sisteminin bütünlüğünü ve stabilitesini güç kalitesiyle birlikte sürdürebilirliğini sağlamak için gerekli olan tüm hizmetlerdir” olarak net olarak tanımlamıştır [71]. Yan hizmetler kapsamında yer alan şebeke faaliyet sınıflandırmaları üretim kaynak çeşitliliği, topoloji ve işletmesel farklılıklar nedeniyle ülkelerde farklı uygulanabilir. Ancak temel sınıflandırma yapılması gerekirse, yan hizmetler kapsamında yer alan hizmetler [72];

- Kayıp Dengeleme
- Frekans Kontrolü
- Black-start yeteneği
- Gerilim/Reaktif Güç Kontrolü
- Kısıt Yönetimi
- Salınım Sönümleme

Türkiye’de Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliği ve Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği hükümleri uyarınca sunulan yan hizmetler kapsamı ve koşulları belirlenmektedir.

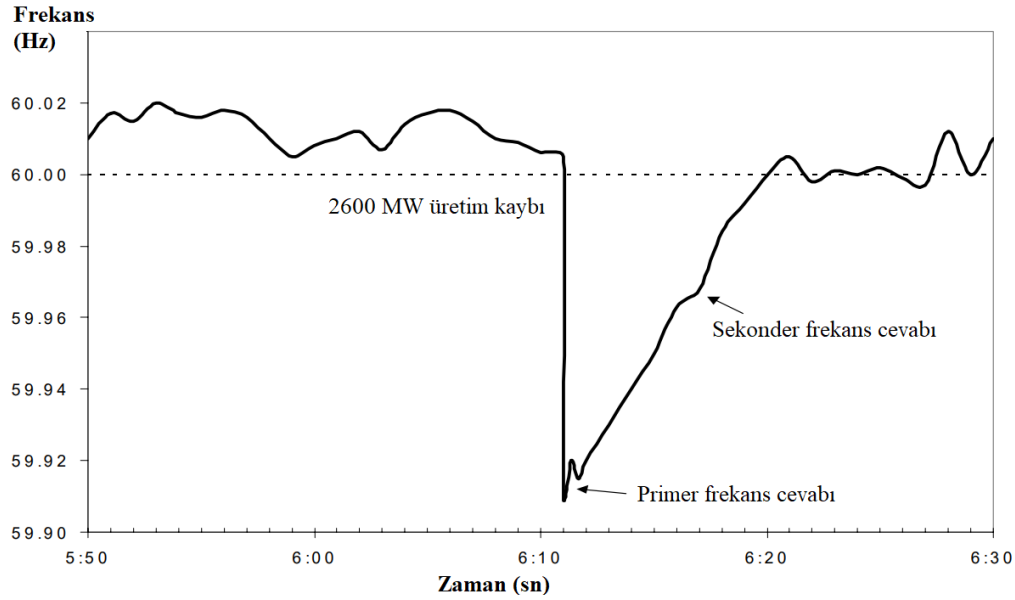
- Primer frekans kontrolü
- Sekonder frekans kontrolü
- Anlık talep kontrolü
- Reaktif güç kontrolü
- Oturan sistemin toparlanması
- Bölgesel kapasite kiralama

Frekans kontrolü temel olarak üç birimden oluşmaktadır Bunlar; primer, sekonder ve tersiyer frekans kontrolü olarak adlandırılır. Enterkonnekte iletim sistemlerinde her üç birim de bulunmaktadır.

- Primer frekans kontrol (PFK) birimi: Birincil frekans kontrolünün temel amacı, birkaç saniye içerisinde herhangi bir frekans sapmasına tepki vermek ve üretilen ve tüketilen enerji arasındaki dengeyi yeniden kurmaktır.
- Sekonder frekans kontrol (SFK) birimi: Merkezi kontrol sistemidir, frekansı hedeflenen değerine geri getirmek için yedek güç sağlar. PFK rezervi ile değişimi sabitlenen frekansın nominal seviyesine getirilmesi amacıyla otomatik üretim kontrol programı vasıtasıyla kullanılan birimdir. Güç sistemleri ile enerji transferinin planlanan seviyede sağlanması amacıyla yeterli olacak şekilde seçilen kısımdır.
- Tersiyer kontrol birimi: Bağlantı ve sevkte manuel kontrol sistemidir, sekonder kontrol rezervini geri yüklemeyi ve nihai kısıt yönetimini sağlar. SFK rezervinin yeterli olmadığı zaman frekansı hedeflenen değerine geri getirmek için kullanılan yedek güç sağlar.

Güç sistemlerinin üretim ve tüketimin eşit seviyede olacak seviyede dengeli işletilebilmesi için üretim kaynaklarının sürekli olarak sağlanması gerekmektedir. Şebeke de meydana gelebilecek üretim kaybı ya da hat arızası gibi durumlarda derhal sistemin tepki vereceği bir kapasitesi yani rezervi bulunması gerekmektedir. Aksi durumda sistemin kaybetmiş olduğu enerji sağlanamazsa hızla dengesizliğe, sistemin çöküşüne kadar sebep oluşabilir. Örneğin Şekil 3.1’de bir iletim şebekesinde meydana gelen bir üretim kaybı durumu gösterilmektedir. Bu durumda kaybedilen üretim kapasitesini var olan rezerv kapasitelerinin devreye alınmasıyla 10 dk içerisinde sağlandığı görülmektedir. Bu tip durumlarda şebekenin sağlandığı bu reaksiyon sadece bir üniteden ya da bir unsurdan sağlanabilmesi mümkün olamaz. Bunun yerine birbirini takip eden, yedekli ve koordinasyon içerisinde kontrol

edilebilen kapasite rezervleri oluşturulur. Nihai durumda geçici hal koşullarında şebekenin ihtiyaç duyacağı ataleti sağlamak üzere kontrol edilen ve belirlenen kapasite döner rezerv olarak tanımlanmaktadır [73, 74].



Şekil 3.1. Örnek iletim şebeke olayı [74]

İşletme koşullarında döner rezervlerin kaybı ya da zaman içerisinde azalması şebekenin frekans dengesizliği kavramını farklı bir noktaya getirmiştir. Çünkü düşük döner rezerv koşullarında şebeke ve frekans dengesi daha fazla riskli olabilir. Bu koşullarda meydana gelebilecek şebeke frekans değişiminde, şebekenin toplam döner rezerv oranı toplam üretime göre azaldığı için sistem dengesi sağlanamayabilir. Şebekenin toplam döner rezervi şebekeye bağlı bulunan döner senkron makineler ve şebekeye bağlı yükleri kapsamaktadır. Bir generatörün ya da yükün şebekenin toplam ataletine olan etkisi sahip oldukları döner hıza ya da kinetik enerjisine bağlıdır. Bu nedenle sistemdeki ya da herhangi bir şebeke unsurunun kinetik enerji değişimi şebeke tarafından dengelenmektedir ve buna atalet tepkisi olarak tanımlanır [75]. Şebekeye bağlı durumda bulunan döner makinaların frekans değişimine olan atalet tepkisi ise şebekenin frekans değişim oranını (RoCoF) belirler. Sistem frekansının olay sonrasında ise sırasıyla koordineli olarak şebeke rezerv tepkileri kontrol edilmektedir. Birincil tepki sistem ataleti ile primer rezervlerden yapılmaktadır. Bu kısımda ilk olarak dinamik döner rezervler devre girerken, eğer frekans değişim oranı fazla ve frekans sınır noktası alt frekans sınırının altına düşmesini önlemek amacıyla ilave yük atma tepkileri de yapılmaktadır. Devamında ise frekans tepkisi sonrasında sürekli hal

koşullarına geçildiğinde ikincil sekonder rezervler tepki vermektedir. Yük kontrolü ya da sanal atalet kaynakları bu aşamada da kullanılabilir [76, 77].

Küresel uygulanan iklim değişikliği politikaları ve yaşanan enerji dönüşümü güç sistemlerinde geleneksel kontrol sistemleri zorlaştırmaktadır. Bunun en büyük etkeni oluşan liberal elektrik piyasalarında kömür, doğal gaz gibi fosil kaynaklı üretim santrallerinin faaliyetlerinin azalmasıyla, enerji arzının birincil olarak rüzgar ve güneş kaynaklı invertör tabanlı santrallerinde sağlanmasından kaynaklanmaktadır. Ülke olarak enerji dönüşümü ve sıfır karbon emisyon hedeflerine uyulması ve artan enerji arzının karşılanabilmesi için en güvenilir ve ekonomik yöntemin YEK'lerin olduğu tüm uluslar tarafından kabul edilmektedir. Ancak rüzgâr ve güneş enerji kaynaklarının doğası gereği sahip oldukları değişken üretim davranışı mevcut şebeke sistemlerinde yeni esneklik araçlarının oluşturulmasına neden olmaktadır [78]. Şebeke açısından işletme esnekliği arz ve talepteki değişimine bütünsel olarak cevap verebilme karakteri olarak tanımlanabilir. Yaşanan yüzyılda küresel olarak en önemli araştırma konularından biridir [79]. Şebeke işletmeciliği açısından pek çok farklı tanımlar yapılmış olup günümüz şartlarına en uygun tanımlama; *“Bir enerji sisteminin, değişken YEK'lere dayalı kesintili elektrik enerjisi üretiminin, kısa veya uzun olmak üzere farklı zaman ölçeklerinde, sistemde yarattığı değişkenlik ve belirsizlik ile, değişken YEK'lere dayalı üretimde kısıntı ve/veya kesinti yapmaksızın, kullanıcıların talebini karşılayacak kadar enerjiyi arz edecek ve şebekeyi güvenilir bir biçimde işletecek şekilde yönetebilme kabiliyetidir”* olarak kabul edilebilir [80, 81].

Artan YEK koşullarında şebekenin ihtiyaç duyabileceği esneklik çözümleri kullanılması gereken amaca yönelik ortaya çıkmaktadır. Elektrik şebekeleri kısa ve uzun dönemli olarak oluşan elektrik arz talebini dikkate alınarak planlanmaktadır. Bu amaçla öncelikle şebeke hat, trafo gibi elektriksel alt yapısı ile enerji üretim kaynaklarının planlamaları dikkate alınır. Oluşan enerji üretim potansiyeli ve elektrik piyasa katılım olasılıklarına göre saatlik bazlı şebeke işletme koşulları gelecek dönemler içinde çalışılmaktadır. Buna göre artan YEK koşullarında meydana gelebilecek üretim dengesizliklerinin önlenmesi ve şebeke rezerv kontrollerinin sağlanması için esneklik araçları oluşturulmalıdır. Esneklik araçları temel anlamda güç sistemlerinin kararlılık araçlarıdır. Bu nedenle güç sistemlerinin kararlılığını sınıflandıracak olursak; frekans kararlılığı, gerilim kararlılığı ve açı kararlılığıdır. Bu itibar ile artan YEK koşullarında artan invertör tabanlı sistemlerle birlikte rezonans ve konvertör bazlı kararlılıkları dikkate alınmaktadır [82]. Kararlılık açısından dikkate alındığında

esneklik araçları kullanılan amaca yönelik öncelikle zaman periyotuna bağlı olarak piyasa odaklı ele alınmaktadır. Buna göre artan YEK koşullarının zaman bazlı etkilerine karşı esneklik ihtiyaçlarını Çizelge 3.1’de özetlenmektedir. Temel anlamda güç sistemlerinin başlıca esneklik araçları; konvansiyonel üretim santralleri, enterkonneksiyon bağlantıları, talep tarafı kontrolü ve depolama sistemleridir [83].

Çizelge 3.1. Artan YEK koşullarında esneklik gereksinimi üzerindeki etkileri[83]

Kısa vadeli etki	- Fazla rezerv ve daha hızlı rampa/tepki ihtiyacı - Daha az konvansiyonel üretim kapasitesi ve maliyet artışı - Düşük atalet ve hızlı frekans değişimi
Orta vadeli etki	- Konvansiyonel kaynakların düşük piyasa katılımı ve amortisman artışı - YEK’lerin üretim dengesizlikleri
Uzun vadeli etki	Fosil yakıt ve çevresel kısıtlamalar ile yatırımlar daha çok nükleer üniteler, jeotermal gibi konvansiyonel baz yük üreten ünitelere doğru kaydıracaktır. Üretim miktarının yüksek olması ve rampa kapasitesinin düşük olması nedeniyle bu ünitelere olan yatırım hevesi azalacaktır. Böylelikle yüksek enerji fiyatına rağmen yüksek esnekliğe sahip hızlı müdahale birimleri daha yaygın hale gelecektir.

Teknik özelliklerine göre ise esneklik üç kısımda ele alınır; nicel teknik özellikler, niteliksel teknik özellikler ve kontrol teknik özellikler. Nicel ve kontrol özellikleri açısından incelendiğinde; dolaylı ve dolaysız kontrol edilmesi durumunda esneklik araçları güç (MW, MVar), enerji (MWh) ya da rezerv/rampa etkisi (MW/s) olarak dikkate alabiliriz. Buna göre esneklik çözümlerini arz ve talep tarafında olmak üzere gruplandırabilir, bu iki grup altında şebeke işletme ve piyasa faaliyetleri altında talep katılımı, depolama sistemleri, YEK ve konvansiyonel üretimler, dağıtık ve mobil sistemler ile uygulanabilir [84].

Şebeke esneklik çözümü olarak, özellikle frekans kontrolünde yükün kontrol edilmesi fikri geçmişten bugüne bilinmiş olsa da günümüzde önemli konuların arasında girmiştir. Artan YEK koşullarında yüklerin bireysel ya da küme halinde kontrol edilmesiyle rezerv tedariği sağlanabilir. Öncelikle büyük tüketiciler dikkate alınabilir ancak evsel yüklerinde gelişen

uzaktan kontrol teknolojisiyle birlikte toplu olarak kontrol aracı olarak kullanılabileceklerdir [85]. Ancak talep katılımının rezerv kaynağı olarak sağlanabilmesi için öncelikle yük karakteristikleri sınıflandırılmalı, merkezi ya da merkezi olmayan kontrol alt yapısıyla hiyerarşik kontrol düzeninin sağlanması önemlidir [86].

Esneklik çözümlerinin belirlenmesi amacıyla artan YEK koşulları ülke ölçeğinde ele alınmaktadır. Mısır, 2035 yılında enerji talebinin %42 'sini farklı YEK'lerden karşılamayı hedeflemekte olup, şebeke işletiminde yaşanabilecek frekans kontrol probleminde elektrikli araçlarıyla yük frekans kontrolünü incelemiştir [87]. Yunanistan, 2030 yılında YEK kapasite oranını %55 olarak hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda kurulması öngörülen 9 GW'lık YEK için değişken üretim koşullarında pompaj depolamalı santraller hakkında beklentileri ve önerileri değerlendirilmiştir [88]. Kore, 2030 yılına kadar toplam enerjinin %20'sine kadarını YEK'ten sağlamayı planlamaktadır. Buna göre uzun dönemli planlamalarda YEK'leri dikkate alarak konvansiyonel üretimleri minimum seviyede tutarak, frekans kontrol gereksinimlerine göre YEK tesis oranlarını belirlemiştir [89]. Ürdün, artan YEK koşullarında şebekenin düşük ve yüksek yük koşullarında meydana gelebilecek şebeke kararsızlıklarına yönelik esneklik çözümleri incelenmiştir [90]. YEK artışıyla birlikte şebekenin frekans kararlılığına olan atalet karakteristiği azalmaktadır. Bu nedenle yapılan planlamalarda değişen üretim karakteristiğine bağlı şebekenin frekans değişim davranışı incelenmelidir. 2030 yılına kadar %52 oranında YEK sahip olmayı planlayan Fas için artan YEK koşullarında şebeke frekans karakteristiği incelenmiştir.

Yapılan çalışmaların sonucunda artan YEK ile birlikte oluşan düşük atalet koşullarında şebeke frekans değişim limitinin 0,5 Hz/s aştığı görülmüştür [91]. Moğolistan'ın Altay bölgesi şebekesinde düşük frekans koşullarında bölgesel arızaların önüne geçebilmek için optimum yük kontrolünün sağlanması amacıyla Powerfactory yazılımıyla düşük frekans röle şeması tasarlanmıştır [92]. Rüzgar ve güneş enerji kaynaklarından gelişen konvertör teknolojileriyle birlikte şebeke frekans kontrolünde ve şebekeye atalet sağlanması yapılabilecektir. Bu amaçla rüzgar ve güneş santrallerinin düşük frekans olaylarında güç rezervi ve atalet emülasyonu teknikleri çalışılmaktadır [93]. Şebeke frekans dinamiklerini etkileyen YEK kapasite artışlarının sistemin dinamik davranışındaki önemli değişiklikleri tanımlamak için düşük ataletli güç sistemlerinde frekans kararlılığı analizler yapılmaktadır [94]. Benzer bir çalışmada düşük ataletli, YEK yaygın olduğu bir sistemde, üretim ve talep

arasındaki dengesizliklerin kontrolünde talep katılımıyla esneklik çözümü ele alınmış, şebekede talep katılımıyla etkin esneklik kazanımlarının oluşabileceği gösterilmiştir [95].

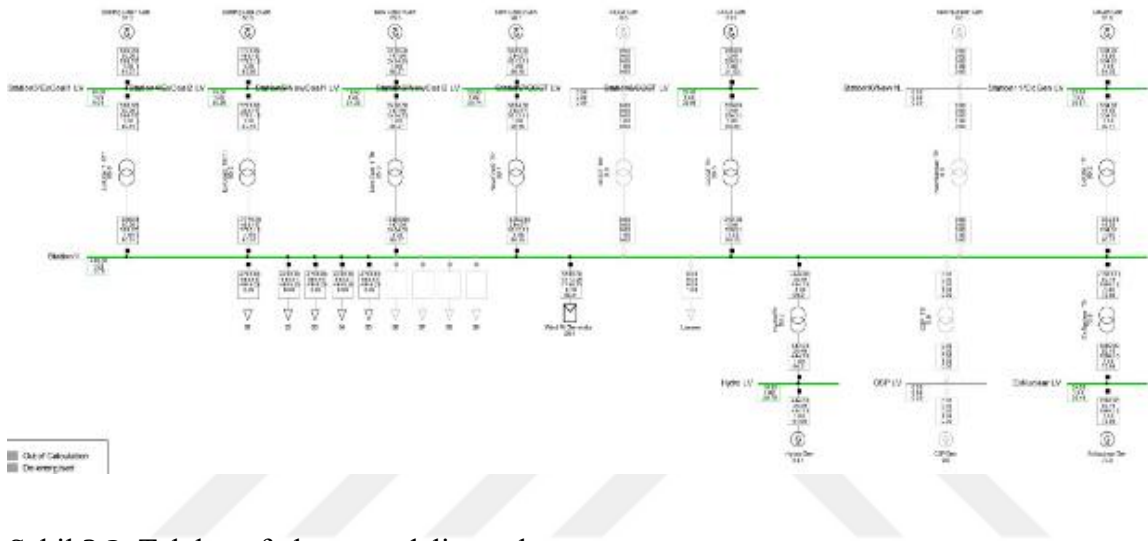
Bu bölümde artan YEK koşullarında güç sistemlerinde oluşan düşük rezerv koşulların frekans kontrolü iki farklı şekilde incelenmiştir. İlk olarak literatürde yapılan literatür araştırmalarına benzer şekilde, gerçek bir güç sisteminin basitleştirilmiş şebeke test modeli Powerfactory yazılımında oluşturulmuştur. Bu modeli gerçek bir güç sisteminin şebeke ataleti, kaynak bazlı atalet katsayısı, frekans değişim oranı matematik modelini baz alarak şebekenin temel benzetimi yansıtmaktadır. Yapılan test şebeke modelinin ilk olarak dinamik davranışları incelenmiş, daha sonra artan YEK koşullarında şebekenin frekans değişimi, frekans kararlılığı değerlendirilmiştir. Oluşturulan test şebeke modelinde sonra olarak ise düşük rezerv koşullarında talep katılımıyla frekans kontrolü analiz edilmiştir.

İkinci olarak aynı problem, YFK modeli oluşturularak ele alınmıştır. Burada öncelikli hedef güç sistemlerinde düşük rezerv, yani düşük atalet koşullarını YFK bakış açısıyla incelemek ve frekans kontrolünde talep katılımının optimum koşullarını ortaya koymaktır. Bu kapsamda, öncelikle yapılan literatür araştırması doğrultusunda gerçek bir güç sisteminde YFK modelini oluşturulmuş, YEK artışına bağlı olarak değişen şebeke ataletine bağlı olarak frekans değişimleri incelenmiştir. Güç sistemlerinde artan YEK'ler bağlı olarak azalan ataletin etkisiyle şebekede meydana gelen düşük frekans koşullarında kontrolcü ayarlaması ve talep katılımının optimizasyonu metasezgisel yöntemlerle sağlanmıştır.

3.1. Şebeke Test Modeli Oluşturma ve Düşük Rezerv Koşullarında Talep Katımıyla Frekans Kontrolü

Modern güç sistemlerinde büyük kapasiteli güneş ve rüzgar enerji santrallerinin entegrasyonu ile işletme koşullarının yeniden incelenmesi ihtiyacı doğmuş, bu kapsam şebeke işletme kurallarının belirlenmesi ve YEK santrallerinin şebeke uyumluluk çalışmaları için referans test şebeke modeli oluşturulmaktadır. Yüksek gerilim şebeke modeli olarak IEEE 12 bara modeli, orta gerilim modeli olarak ise CIGRE modeli kullanılmaktadır [96]. Benzer şekilde rüzgar santrallerinden sağlanabilecek atalet desteğini analiz edilebilmesi için kuramsal basitleştirilmiş test şebeke modeli oluşturulabilir. Konvansiyonel santraller IEEE AVR ve GOV tip modelleri ile basitleştirilmiş olarak iletim hatları ile yük modellemeleri 0,1 sn zaman sabiti ile tamamen frekans değişimine bağlı

olarak modellenebilir ve şebeke modeli üzerinde farklı RES katılım oranına göre şebekenin frekans tepkisi incelenmiştir [97]. Şebeke test modeli olarak tek bara şebeke modeli önerilmektedir. Ülke şebeke ölçeğinde düşük frekans koşullarında yük atma analizlerinin yapılması için oluşturulan tek bara test modelinde gelecek yıllarda kurulması planlanan üretim kaynakları, kaynak türüne göre tipik atalet katsayılarına göre modellenerek frekans değişim oranına etkisi incelenebilir [98]. Şekil 3.2’de tek bara şebeke frekans modeli verilmiştir.



Şekil 3.2. Tek bara frekans modeli genel görünümü

CIGRE tek bara frekans modeline benzer olarak, Britanya şebekesi için YFK test şebeke modeli geliştirilmiştir. Temel olarak şebekede yer alan generatörlerin frekans tepkisi ile frekansa bağlı yük karakteristikleri dikkate alınır ve modelde yer alan tüm senkron generatörlerin frekansa kontrolüne katıldığı kabul edilmiştir. Bu model 2008 yılında oluşturulmuş olup, benzer yöntem ile güncel şebeke yapısına göre revize edilerek farklı çalışmalarda kullanılmış ve doğrulanmıştır [99–101]. IEEE Güç ve Enerji Topluluğu tarafından şebeke kararlılık çalışmaları için hazırlanan referans şebeke modelleri vardır. IEEE 39 bara modeli; İngiltere iletim şebekesinin basitleştirilmiş modeli olup, pek çok akademik çalışmada sürekli durum ve geçici durum analizlerinde kullanılmıştır. Temel olarak bu modelde yer alan kaynaklar dinamik modellemeleri (AVR, GOV, PSS) IEEE tip modellerine referans almaktadır. Yük modelleri gerilime bağlı olmayan sabit aktif, reaktif güç değerine göre belirlenmiştir. Burada amaç yüke bağlı olarak şebeke kararlılığının değişmemesidir. IEEE 39 bara modelini referans alarak yapılan çalışmalar; olasılıksal olarak belirlenen yük atma senaryoları oluşturulmuş ve örnek şebeke üzerinde incelenmiştir. İrlanda şebeke modeli, IEEE 39 bara modeline göre benzetilerek düşük frekans koşullarında

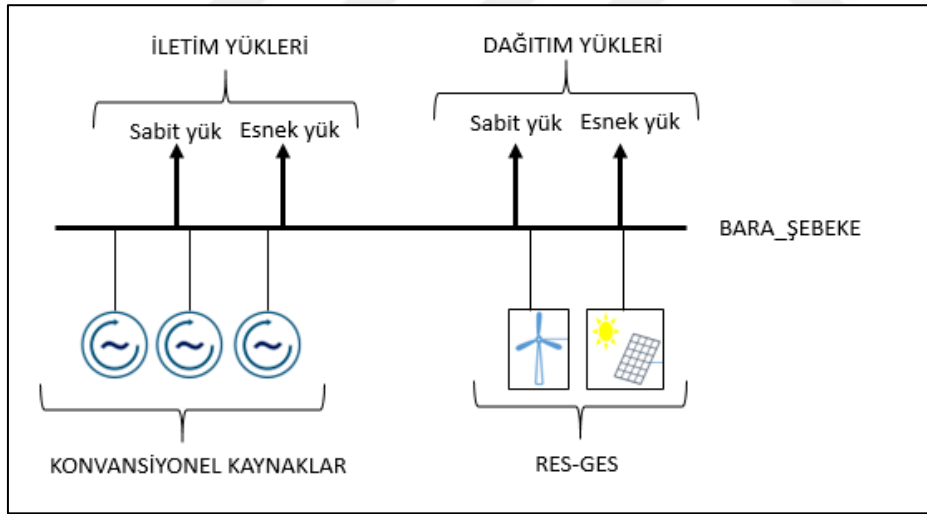
batarya etkilerini [102], İran şebeke modelinde düşük frekans rölesi incelenmiştir [103]. Düşük frekans koşulları için yük atma yöntemi geliştirilmiş ve doğrulaması yapılmıştır [104]. Ülke ölçeğinde şebeke test modelleri oluşturularak şebeke ölçeğinde kararlılık analizleri yapılmıştır. Japonya güç sisteminin benzer şekilde şebeke modeli oluşturularak, 2030 yılı yenilenebilir enerji entegrasyon koşulları incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada yüksek RES-GES üretim koşullarında en büyük ünite kaybı durumunda yaşanabilecek frekans değişiklikleri gözlemlenmiştir. Bu nedenle kaynak bazlı generatörlerin dinamik modelleri ayrı ayrı yapılmıştır [105]. Benzer şekilde İskandinav şebekesi için oluşturulan test şebeke modeli Powerfactory yazılımı ile modellenerek, yapılan modellemenin doğrulaması gerçekleştirilmiştir [106]. Ayrıca şebeke ölçekli frekans analizlerinin basitleştirilmiş şebeke modelleri üzerinde yapıldığı analizler bulunmaktadır. Temel olarak şebekede yer alan kaynakların frekans tepkisi kaynak bazlı ya da toplam olarak hesaplandığı şebekenin frekans tepkisi modellenerek; üretim-tüketim koşullarına göre frekans analizler yapılmaktadır. Generatörün ve yük modellerinin yapıldığı test şebeke üzerinde şebeke ölçekli bataryaların şebeke ataletine etkisi incelenmiştir. İletim-dağıtım şebekelerinin birbirleri ile bağlantılı olarak analiz edilebilmesi için referans test modelleri kıyaslanarak incelenmiştir [107]. Öncelikle iletim ve dağıtım şebeke referans test modelleri incelenmiştir. Temel olarak dağıtım şebekelerinde iletim barası baz alınarak toplam üretim ve yükleri oluşturulmuştur. İletim seviyesinde ise yük ve üretim noktaları arasında sınırların öncelikle belirlenmesi gerekmektedir [108].

Şebeke test modellerinin oluşturulmasıyla ilgili yapılan araştırmalar neticesinde; şebeke frekans analizlerinin incelenmesinde basitleştirilmiş şebeke modellerinin kullanılabilirliği ve doğru sonuçlar elde edildiği anlaşılmıştır. Özellikle ülke şebeke ölçeğinde bir frekans değişim analizi yapılması hedefleniyorsa; şebekenin frekans tepkisinin analitik olarak belirlenip, basitleştirilmiş tek bara üzerinde yeni uygulamaların etkilerinin incelenmesi yapılabilmektedir. Bu doğrultuda tez kapsamında mevcut şebekenin gerçek işletme döneminde yer alan üretim kaynaklarına göre şebekenin frekans tepkisinin hesaplanması durumunda; şebekenin gerçek zamana ait üretim, tüketim kapasitelerine göre talep katılım analizleri frekans kontrolü açısından incelenebilecektir. Bu yöntem ile şebekenin üretim profilinde yer alan santrallerin frekans tepkisi kaynak türüne göre belirlenecektir. Benzer şekilde, aynı şebeke zamanına ait toplam yükler iletim ve dağıtım yükü olarak ele alınabilecektir. Güç sistemlerinde talep katılımıyla frekans kontrolünün incelenmesi

amacıyla, mevcut şebekenin üretim-tüketim koşullarına frekans tepkisini analiz edebilecek test modelinin oluşturulması hedeflenmiştir.

Bu kapsamda, şebekenin üretim-tüketim koşullarının frekans tepkisini modellemek ve inceleyebilmek için CIGRE tarafından yapılan frekans şebeke test modeli referans alınarak Türkiye şebekesinin analizlerinin yapılabilmesi amacıyla frekans test modeli oluşturulmuştur. Şebekedeki üretim ve tüketim profilleri aşağıdaki metodolojiye göre tespit edilerek test modeli oluşturulacaktır.

1. Üretim profilinde yer alan kaynaklar, kaynak bazlı ve toplam güç kapasitelerine göre dikkate alınır.
2. Kaynak bazlı konvansiyonel kaynaklar, IEEE standart tip kontrolcü yapılarına göre dinamik modellenir ve kaynak bazlı eş değer ataleti hesaplanır.
3. Şebekenin toplam yükü, iletim ve dağıtım şebekesine bağlı toplam yük kapasitelerinin belirlenir.



Şekil 3.3. Basitleştirilmiş test şebeke modeli

Genel kabuller

- Şebeke modeli oluşturulurken şebeke kayıpları ihmal edilmiştir.
- Genel olarak şebekede yer alan yükler gerilime bağımlı olarak, P ve Q değerlerine göre ayarlanır. Gerilim limitleri dışında, akımın sıfır gerilimde sonsuz değerlere yükselmesi nedeniyle geçici durum analizlerinde yük sabit olarak modellenenecektir.

- Rüzgar ve güneş üretim santralleri invertör tabanlı üretim kaynaklarıdır ve şebeke frekans davranışı daha çok invertör türüne göre belirlenmektedir. Yapılan test analizlerinde talep katılım uygulamaları esas çalışılacağı için invertör tabanlı kaynaklar statik üretim kaynağı olarak modellenmiştir.

3.1.1. Şebeke ataleti, kaynak bazlı atalet katsayısı, frekans değişim oranı ve matematiksel modeli

Bir güç sisteminin senkron ataleti şebekede arz-talep dengesizliğinden meydana gelen frekans değişimine olan doğal tepkisidir. Bu tepki şebekede yer alan senkron makinaların döner hız büyüklüğüyle ilişkilidir. Şebeke frekansı azaldığı koşullarda hız ve aktif güç artar, frekans artışında ise hız azalır. Temel olarak senkron generatörlerin eylemsizlik tepkisi kinetik enerji ile hesaplanır. Sistemin dönme kütlesinin kinetik enerjisi Eş. (3.1'e göre belirlenir. Ancak şebekenin frekans değişimi ile generatör atalet momenti arasındaki ilişkiyi Eş. (3.2) ile ifade edebiliriz. Burada, senkron generatör torku T_{gen} , şebekedeki toplam yükü ve kayıpları $T_{yük}$, şebeke ataleti J_{gen} ($kg.m^2$), Birim zamandaki döner makina açısal hız değişimi ω/t (rad/s) ifade eder.

$$E_{kinetik} = \frac{1}{2} J \omega^2 \text{ (s)} \quad (3.1)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{T_{gen} - T_{yük}}{J_{gen}} \quad (3.2)$$

Bir genaratörün atalet katsayısı yaygın olarak; generatörün senkronize hızda depolayabildiği kinetik enerjinin görünür güç değerine oranı olarak tanımlanabilir. Eş. (3.3 ve Eş. (3.4'de bir generatörün atalet katsayısı eşitliği gösterilmektedir [109–113]

$$H = \frac{1}{2} \frac{J \omega_n^2}{S_n} \text{ (s)} \quad (3.3)$$

$$H = \frac{1}{2} \frac{J (2\pi f_0)^2}{S_n} = \frac{E_{kin}}{S} \quad (3.4)$$

Bir şebeke eş zamanlı işletmede yer alan generatörlerin toplam eş değer atalet katsayısı ya da eş değer toplam kinetik enerjisi, generatör atalet katsayısı ve görünür güçlerine göre Eş.

(3.5)'e göre belirlenir. Böylece tüm senkron kaynaklar, eşdeğer bir ataletle eşdeğer bir dönen kütleyle indirgenir. Burada, şebekenin toplam atalet katsayısı $H_{\text{şebeke}}(s)$, şebekeye bağlı her i 'inci generatör atalet sabiti $H_i(s)$, şebekeye bağlı her i 'inci generatör görünür gücü $S_i(VA)$, şebekeye bağlı toplam generatör görünür gücü $S_{\text{şebeke}}(VA)$, şebekenin toplam kinetik enerjisi $E_{\text{kin_şebeke}}(VAs)$ ifade eder.

$$H_{\text{şebeke}} = \sum_{i=1}^n \frac{H_i S_i}{S_{\text{şebeke}}} = \frac{E_{\text{kin_şebeke}}}{S_{\text{şebeke}}} \quad (3.5)$$

Benzer yaklaşımla bir şebekede yer alan generatörlerin kaynak türlerine göre atalet katsayısını hesaplayabilir, böylece şebeke analizlerinde kaynak bazlı modellemeler yapılabilir. Buna göre aynı kaynak türüne ait eşdeğer atalet katsayısı hesabı Eş. (3.6)'da gösterilmektedir. Burada, j kaynak türüne göre hesaplanan eşdeğer atalet katsayısı $H_j(s)$, şebekeye bağlı işletmede olan j kaynak türündeki her i 'inci generatör atalet sabiti $H_i(s)$, şebekeye bağlı işletmede olan j kaynak türündeki her i 'inci generatör görünür gücü $S_j(VA)$, şebekeye bağlı j kaynak türüne ait toplam generatör görünür gücü $S_{j_toplam}(VA)$ ifade eder.

$$H_j = \sum_{i=1}^n \frac{H_{ji} S_{ji}}{S_{j_toplam}} \quad (3.6)$$

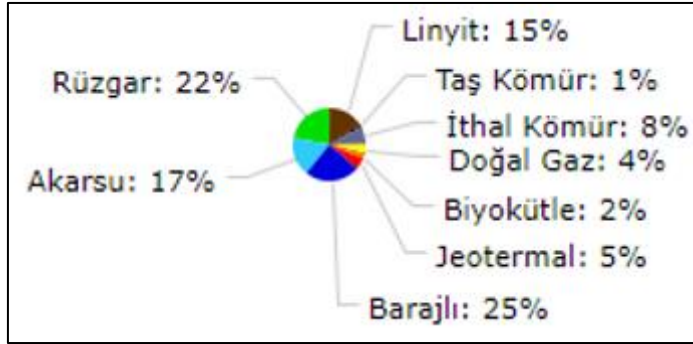
Şebekenin üretim profilinde yer alan senkron generatörlere göre, aktif güçte meydana gelen bir ani değişiklik olması durumunda (örneğin, jeneratör kesintisi, önemli yük kaybı ve sistem bölünmesi), şebekenin frekans değişim olarak generatörler döner kütlelerinde depolanan kinetik enerjideki değişikliğine göre hesaplanabilir. Şebeke ataleti ile frekans değişim oranı arasındaki salınım ilişkisi Eş. (3.7) ve Eş. (3.8) ile gösterebiliriz. Bu denkleme göre şebeke atalet katsayısı azalırken, frekans değişim oranı (df/dt) artmaktadır [114, 115]. Burada, aktif güç değişimi ΔP , şebeke atalet katsayısı $H_{\text{şebeke}}$, şebeke Frekansı f_0 , birim zamandaki frekans değişimi df/dt ifade eder.

$$2H \frac{df}{dt} = P_m - P_e \quad (3.7)$$

$$\Delta P = \left(\frac{2H_{\text{şebeke}}}{f_0} \right) \left(\frac{df}{dt} \right) \quad (3.8)$$

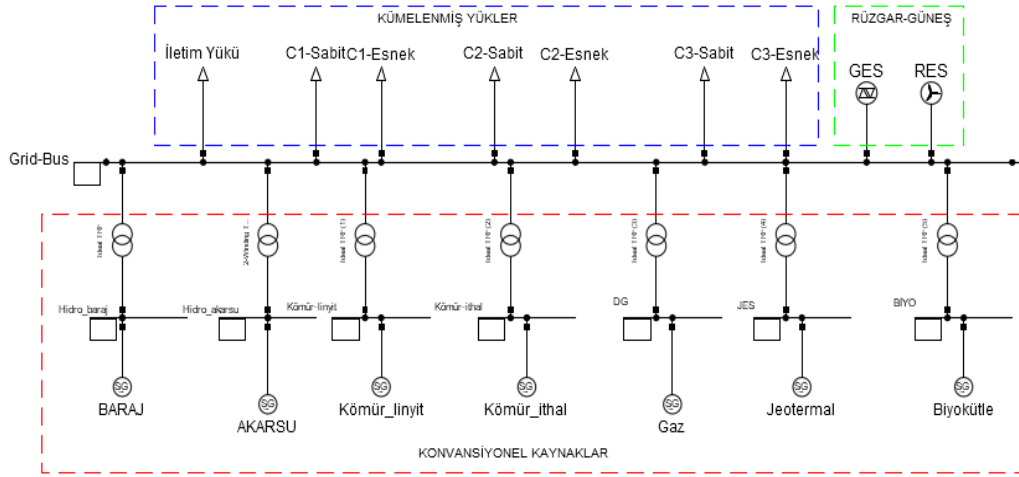
3.1.2. Türkiye şebekesinde frekans kontrolünde talep katılımının incelenmesi

Türkiye şebekesinde artan YEK koşullarının etkisinin gösterebilmek amacıyla test şebeke modeli Powerfactory programında oluşturulmuştur. Şebeke modeline örnek olarak 2020 yılında maksimum RES-GES üretiminin görüldüğü zamana ait şebeke verileri referans alınmıştır. RES-GES üretiminin toplam enerji üretimine en yüksek katılımın görüldüğü şebeke verisindeki kaynak bazlı genel dağılım Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Türkiye şebekesinin gerçek zamanlı üretim profili açık kaynak olarak EPIAŞ ve TEİAŞ bilgi sistemlerinde saatlik olarak kaynak bazlı yayınlanmaktadır [116, 117].



Şekil 3.4. Şebeke üretim profili kaynak bazlı dağılımı

Oluşturulan test şebeke modelinin eşlenik tek hat şeması Şekil 3.5'de gösterilmiştir. Şebeke üretim profiline göre test modelinde konvansiyonel generatör modelleri kaynak bazlı gruplanarak modellenmiştir. Temel olarak hidro, kömür ithal, doğal gaz, jeotermal, biyokütle kaynak türleri baz alınmıştır. Ancak hidro kaynaklar akarsu ve baraj tipi olarak, kömür kaynaklar ise ithal ve linyit olarak ayrı hesaplanmış ve modellenmiştir. RES ve GES kaynakları ise statik üretim olarak ayrıca modellenmiştir.



Şekil 3.5. Test şebeke modeli tek hat şeması

Konvansiyonel kaynakların senkron generatör tipi ve dinamik kontrolcü modelleri IEEE standart tip modellere göre yapılmıştır. Referans alınan kontrolcü modelleri Çizelge 3.2’de, konvansiyonel kaynaklar için hesaplanan kaynak bazlı atalet katsayıları Çizelge 3.3’te verilmektedir.

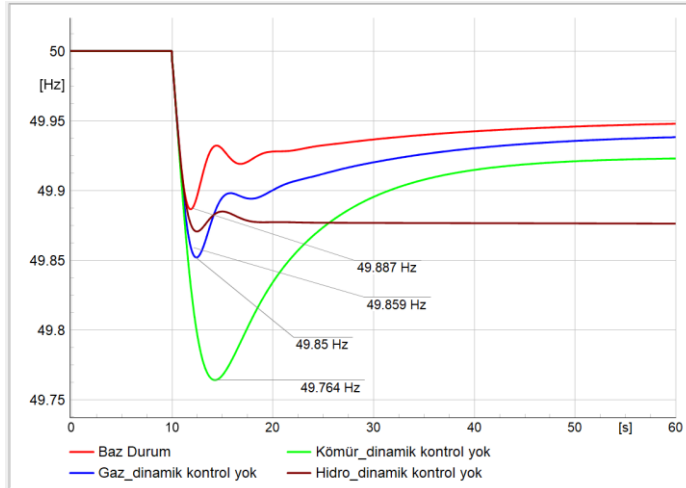
Çizelge 3.2. Referans IEEE kontrolcü modelleri

Kaynak Türü	AVR	GOV
Hidro	ESST1A	HGOV1
Kömür	ESST1A	TGOV4
Gaz	ESST4B	GGOV1

Çizelge 3.3. Hesaplanan kaynak bazlı atalet katsayıları

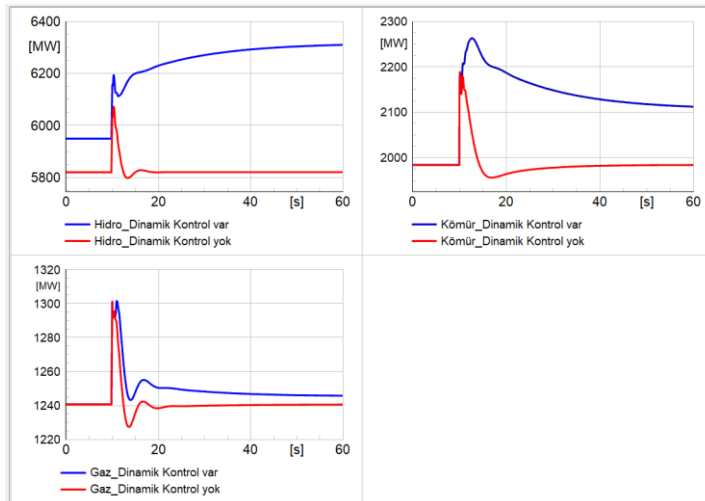
Kaynak Türü	Hesaplanan Atalet katsayısı- H(s)	Hesaplanan Toplam Kinetik Enerji (GVAs)	Toplam Aktif Güç (GW)
Hidro-akarsu	3,881	25,14	3,816
Hidro-baraj	3,797	31,34	5,414
Kömür-İnyit	3,774	20,71	3,423
Kömür-İthal	4,18	20,84	2,179
Jeotermal	3,716	6,60	1,158
Biyokütle	3,987	3,36	0,470
Doğalgaz	4	9,41	1,068

Yapılan modelleme üzerinde şebeke test modelinin doğrulaması için ilk olarak şebekede yer alan en büyük kapasiteli ünitenin servis harici olay durumlarında sırasıyla kaynakların dinamik kontrolcülerin frekansa etkileri test edilmiştir.



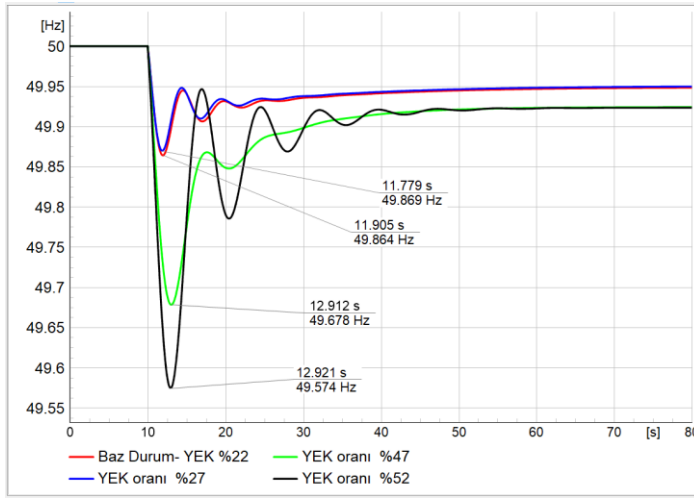
Şekil 3.6. Dinamik kontrolcülerin frekans değişimine etkisi

Kontrolcü modellerinin etkilerinin testleri için arıza koşullarında sırasıyla kaynak bazlı generatörlerin dinamik kontrolcülerini servis harici edilerek şebeke frekans etkileri incelenmiştir. Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de gerçekleştirilen doğrulama analizlerinde frekans değişimi ve kaynak bazlı aktif güç değişimleri gösterilmektedir. Test şebeke modelini doğrulamak için yapılan analizlerde görüldüğü üzere, kaynak bazlı aktif güç oranı, kaynak bazlı atalet katsayılarının ve kontrolcü modellerine göre şebeke frekansının farklı şekilde değiştiği görülmektedir.

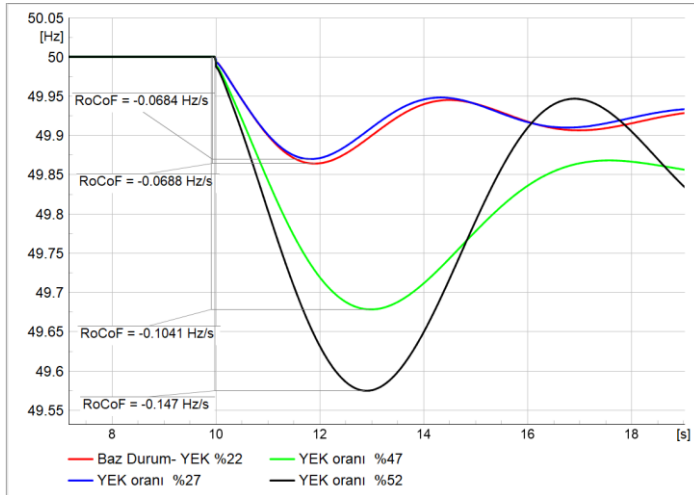


Şekil 3.7. Kaynak modellerinin aktif güç değişimi

Kaynak bazlı atalet katsayısının hesaplanma metodolojisinin test modeli üzerinde doğrulanması üretim profilindeki yenilebilir kaynak potansiyeline göre incelenmiştir. Bunun için sırasıyla konvansiyonel kaynakların yerine yenilebilir kaynak potansiyeli artırılarak şebekedeki frekans değişimi incelenmiştir. Sırasıyla doğalgaz, kömür kaynakları ve kömür-doğalgaz kaynaklarının olmadığı ve aynı kapasite de YEK'lerin olduğu şebeke koşulları analiz edilmiştir. Buna göre elde edilen şebeke frekansı ve frekans değişim oranları Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.8. Farklı YEK katılım oranına göre şebeke frekans değişimi.



Şekil 3.9. Farklı YEK katılım oranına göre RoCoF

Yapılan analizlerde toplam RES-GES katılım oranına göre esas olarak frekans değişim oranı RoCoF, en düşük frekans değeri $F_{nadır}$, frekans değişimi, frekans durdurma süresi değişiklikleri gözlemlenmiş, elde edilen sonuçlar Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4. Farklı RES-GES katılım oranına göre yapılan analiz sonuçları

Senaryolar	Toplam RES-GES katılım oranı (%)	RoCoF (Hz/s)	Durdurma süresi (sn)	F _{nadir} (Hz)	Frekans değişimi (Hz)
Baz Durum	%22	0,0684	1,779	49,869	0,095
DG kaynakları yok	%27	0,0688	1,905	49,864	0,101
Kömür kaynakları yok	%47	0,104	2,912	49,678	0,203
Kömür ve DG kaynakları yok	%52	0,147	2,921	49,574	0,234

Genel olarak gerçek şebeke işletme koşullarında üretim profilinde RES-GES potansiyeli arttıkça frekans değişim oranı, toplam frekans değişimi arıza koşuluna bağlı olarak değişiklik göstermekle beraber, normal olarak artması beklenmektedir. Benzer şekilde yapılan test modelinde benzer frekans tepkisi elde edilmiştir. Mevcut konvansiyonel kaynakların yerine RES-GES katılımını dahil ettiğimiz koşullarda frekans düşümüne neden olacak bir olay sonrası şebekenin frekans cevabı farklı olmaktadır. Baz durumda %22 RES-GES katılım oranında saniyede 0,095 Hz frekans düşümü meydana gelirken, bu oran katılım oranının artmasıyla oluşan düşük rezerv koşullarında 0,234 Hz kadar yükselebilmektedir. Artan RES-GES kapasitesi nedeniyle, RoCoF 0,0684 Hz/s'den 0,147 Hz/s 'e kadar yükselirken, frekansın durdurma süresi 2,921 s olmaktadır. Düşük rezerv koşullarında frekans kontrolünün talep katılımıyla sağlanabilirliği test şebeke modelinde analiz edilebilmesi için talep katılım modelinde öncelikli olarak Bölüm 2.4.1'de elde edilen dağıtım şebekelerinin bölgesel kümelenmesi dikkate alınmıştır. Yapılan kümeleme sonuçların göre, dağıtım şirketlerinin aynı şebeke zamanına ait yükler aynı kümede toplanarak değerlendirilecektir. Buna göre bir kümenin toplam dağıtım yükü Eş. (3.8)'e göre, iletim şebekesinde yer alan toplam dağıtım yükü ise Eş. (3.9) 'a göre belirlenmektedir.

$$P_{\text{küme}} = \sum_{i=1}^n P_{DG_i} \quad (3.8)$$

$$P_{\text{toplam_dağıtım_yükü}} = \sum_{j=1}^m P_{j_küme} \quad (3.9)$$

Burada, aynı kümede yer alan i 'inci dağıtım şebekesinin yükü P_{DG} (MW), aynı kümede yer alan dağıtım şebekelerinin sayısı n , bir kümenin toplam yükü $P_{küme}$ (MW), iletim şebekesinde yer alan toplam dağıtım yükü ise $P_{toplam_dağıtım_yükü}$ olarak ifade edilir. Test şebeke modelinde yer alan yükler, sabit yük ve esnek yük olarak modellenmiştir. Sabit yük modelleri şebekenin kontrol edilmeyen, talep katılımı kapsamında yer alamayan yükleri temsil etmektedir. Esnek yükler ise dağıtım şebekelerinde yer alan ve talep katılımı kapsamında kontrol edilen yükleri temsil etmektedir. Test şebeke modeli bölümünde detaylı olarak anlatıldığı gibi sabit yük modelleri frekans ve gerilim değişiminden bağımsız, sabit olarak modellenmiştir. Esnek yükler ise frekansa bağımlı dinamik olarak modellenmiştir. Şebekenin frekans değişimine bağlı olarak esnek yüklerin frekans kontrolüne katılımı frekans koruma rölelerini ile ayarlanmıştır. Bu kapsamda standart iki tip koruma rölesi farklı olarak incelenmiştir.

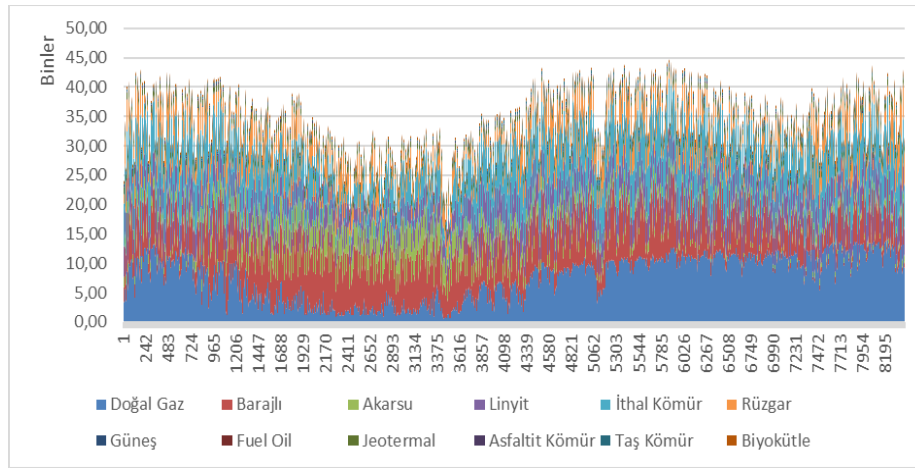
- 1) Standart F81 tipi frekans koruma rölesi: Frekans koruma eşik değerleri frekans değişimi ve zaman gecikmesine göre belirlenir.
- 2) Standart F81R tipi frekans koruma rölesi: Frekans koruma eşik değerleri birim zamandaki frekans değişim oranına göre belirlenir.

Genel kabuller ve varsayımlar

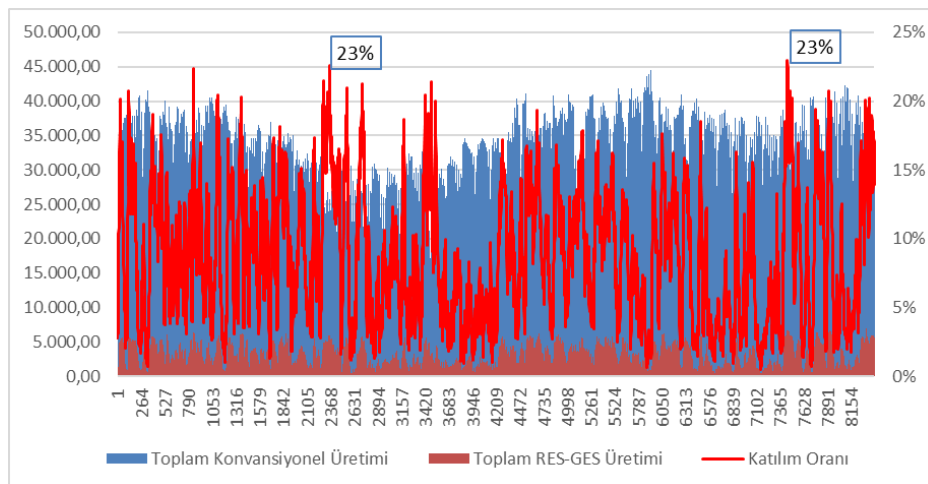
- Mevcut elektrik sistemi piyasa koşullarında iletim ve dağıtım şebekeleri arasında oluşturulmuş talep katılımı piyasası bulunmamaktadır. Bu kapsamda sadece ilgili kanun ve yönetmeliklerde anlık talep kontrolü uygulaması yer almaktadır. Ayrıca düşük frekans koşullarında ise şebeke güvenliği açısından otomatik olarak düşük frekans rölelerinin zorunlu olarak çalıştırılmaktadır. Bununla alakalı olarak herhangi bir piyasa, tarife mekanizması yoktur. Bu nedenle, tez kapsamında yapılan çalışmalarda iletim ve dağıtım şebekeleri arasında şebeke frekans kontrolü açısından talep katılım modeli kabul edilmiştir.
- Tez çalışmasında, Türkiye iletim şebekesi işletme koşulları, üretim-tüketim verileri referans olarak kullanılacak olup, talep katılımıyla ilgili alt teknik ve idari alt yapının var olduğu kabul edilmektedir. Bu doğrultuda yapılacak yorum ve değerlendirmelerde talep katılımıyla ilgili şebeke işletmecileriyle tüketiciler arasında tarife modellerinin varlığı, gerekli iletişim ve diğer teknik alt donanımların sağlandığı varsayılmaktadır.

Analiz

Artan YEK koşullarında talep katılımıyla frekans kontrolü, 2020 yılına ait gerçekleşen üretim profili saatlik bazlı verileri kullanılarak test şebeke modelinde analiz edilmiştir. 2020 yılına ait saatlik üretim profili Şekil 3.10'da verilmiş olup, bu bilgilere göre toplam konvansiyonel, toplam RES-GES üretim profili ile RES-GES katılım oranı Şekil 3.11'de gösterilmektedir. 2020 yılı verilerine göre RES-GES üretim profilinin en yüksek olduğu şebeke dönemi, tüketimin de en düşük olduğu işletme durumudur. En düşük tüketim bayram tatili dönemi ve sabah saatlerinde meydana gelmiştir.



Şekil 3.10. 2020 yılı saatlik üretim profili



Şekil 3.11. Toplam konvansiyonel ve toplam RES-GES üretim profili ile RES-GES katılım oranı

Analiz edilen şebeke döneminde RES-GES oranı %23 olup, konvansiyonel kaynaklar yerine daha fazla RES-GES üretiminin olma ihtimalinde şebekenin esneklik limitlerini zorlayacak, düşük konvansiyonel rezerv koşullarına daha fazla neden olabilecektir. Buna göre tüketimin en düşük olduğu dönem baz duruma ilave olarak daha sonra üretim profilinde yer alan konvansiyonel kömür ve doğalgaz kaynakların yerine RES-GES üretimini artığı koşullarda talep katılımının etkisi incelenmiştir. İncelenecek senaryoların özeti Çizelge 3.5'te verilmiştir

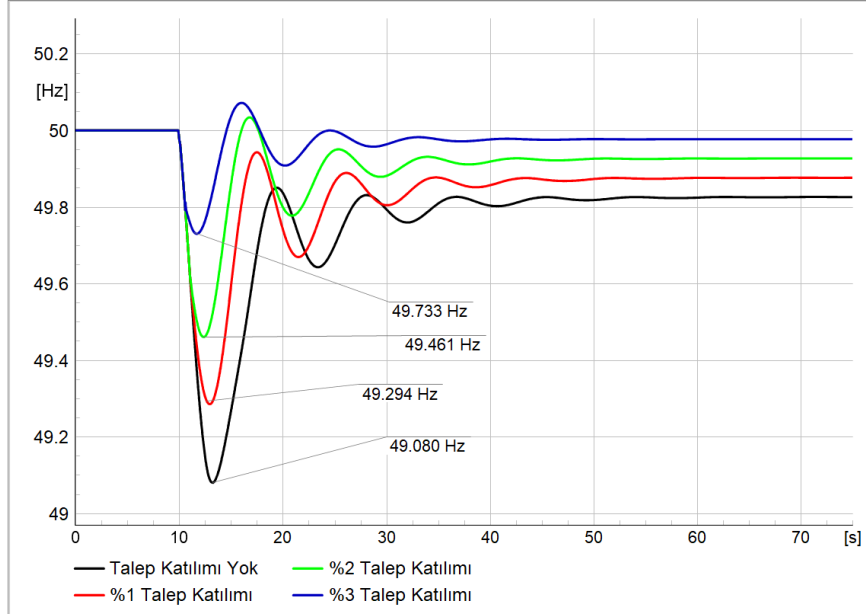
Çizelge 3.5 Analiz senaryo özetleri

Senaryo	Toplam Konvansiyonel Üretimi (GW)	Toplam RES-GES Üretimi (GW)	RES-GES Katılım Oranı (%)	Toplam Dağıtım yükü (GW)	Toplam İletim Yükü (GW)	Küme 1 Yükü (GW)	Küme 2 Yükü (GW)	Küme 3 Yükü (GW)
Baz Durum	12,392	3,375	%23	14,527	0,718	4,373	1,236	8,919
RES-GES Üretim Artışı	5,148	9,08	%63,8					

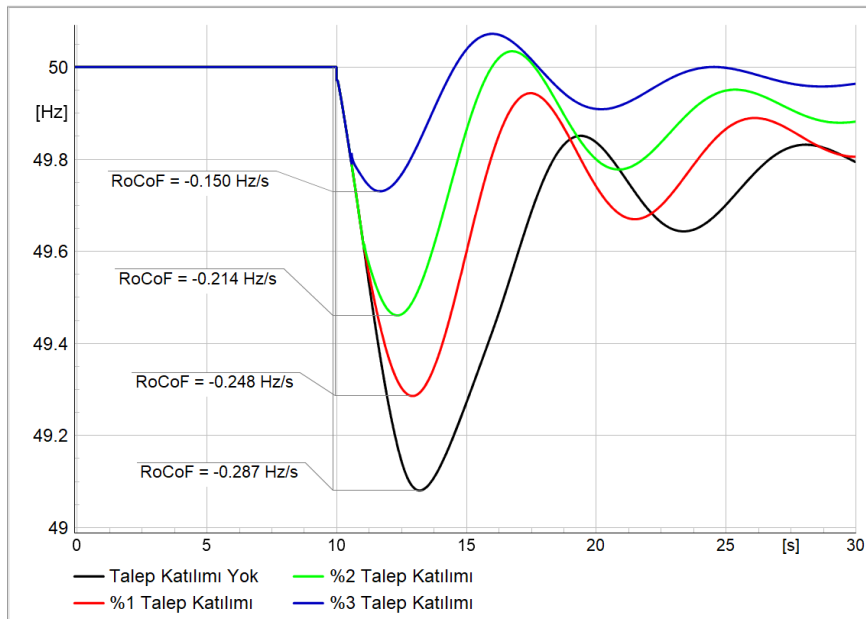
İncelenen şebeke dönemine ait toplam dağıtım yükü; her bir dağıtım şirketinin aynı döneme ait gerçek talep yükleri referans alınarak belirlen metodoloji doğrultusunda küme olarak ele alınmıştır. Nihai olarak belirlenen üretim ve tüketim metodoloji kullanılarak oluşturulan test şebeke üzerinde RES-GES oranının %63,8 olacağı şebeke koşullarında talep katılım analiz edilmiştir. Şebekenin frekans tepkisini test edebilmek için şebeke döneminde işletmede olan en büyük üretimli konvansiyonel kaynak (486 MW) servis harici edilerek arıza koşulu oluşturulmuştur. Arıza koşullarında talep katılımı oransal olarak frekans üç farklı açıdan incelenmiştir:

- Talep katılımı yok
- Talep katılımı var-Frekans değişimine göre
- Talep katılımı var-Frekans değişimin oranına göre

Bu kapsamda ilk olarak belirlen frekans değişimine göre talep katılımı incelenmiştir. F81 düşük frekans koruma rölesi 200 mHz'lik frekans hatasına bağlı olarak esnek yüklerin servis harici bırakacak şekilde ayarlanmıştır. Frekans limitine göre yapılan analiz sonuçları Şekil 3.12 ve Şekil 3.13'te verilmiştir.

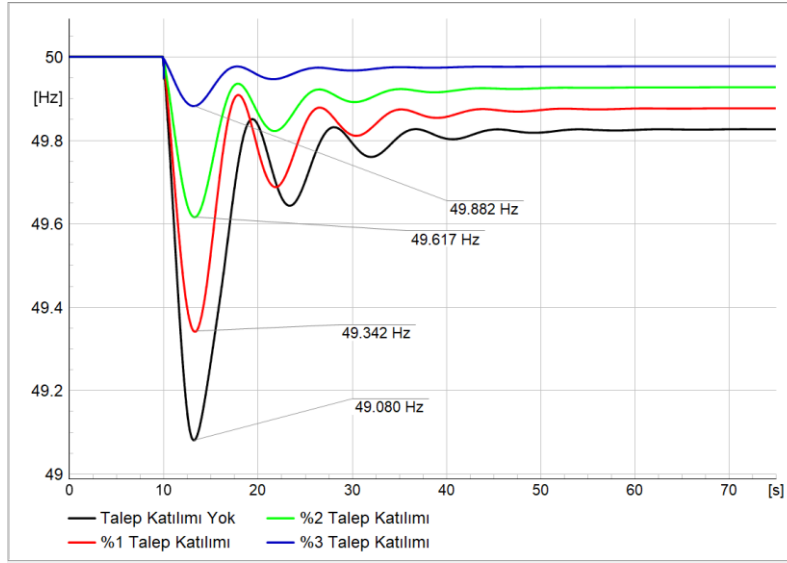


Şekil 3.12. Mevcut durum senaryosu-Şebeke frekans değişimi

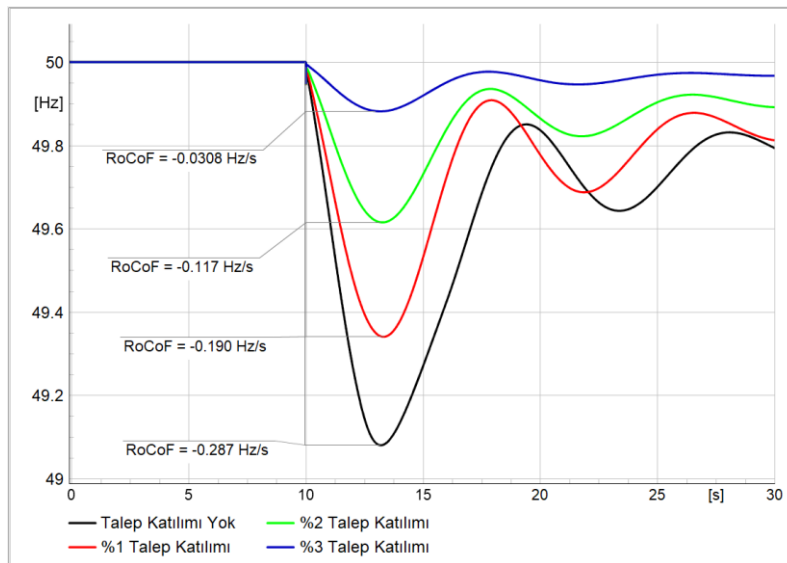


Şekil 3.13. Mevcut durum senaryosu-Şebeke frekans değişim oranı

RES-GES artışıyla birlikte, talep katılımı olmadığında ünite kaybı sonrasında yaklaşık 920mHz'lik, yaklaşık 1 Hz'e yakın frekans değişimi meydana gelmektedir. Bu değişimin temel nedeni frekans değişim oranının, RoCoF'un 0,266 Hz/s olarak gerçekleşmesidir. Aynı durumda talep katılımının oransal olarak frekans koruma rölesiyle uygulandığında ise meydana gelen frekans değişimi talep katılımına bağlı olarak azalmaktadır. Benzer oransal talep katılımının birim zamanda değişen frekans değişimi kontrol edilerek yapıldığında elde edilen analiz sonuçları Şekil 3.14 ve Şekil 3.15'de verilmiştir.



Şekil 3.14. RES-GES üretim artış senaryosu-şebeke frekansı değişimi



Şekil 3.15. RES-GES üretim artış senaryosu-şebeke frekans değişim oranı

RES-GES üretiminin artırılması şebekedeki konvansiyonel rezervin azalmasına ve buna bağlı olarak şebekenin toplam frekans kontrol esnekliğini azalmıştır. Buna bağlı olarak aynı arıza koşullarında şebekedeki frekans değişimi daha fazla görülmüştür. Her iki senaryo analiz sonuçlarında meydana gelen frekans değişimleri Çizelge 3.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 3.6. Senaryo analiz sonuçları

Senaryolar		RES-GES katılım oranı (%)	RoCoF (Hz/s)	F _{nadir} (Hz)	Frekans değişimi (Hz)
Talep katılımı yok		%63,8	0,287	49,080	0,920
Frekans limitine göre kontrol	%1 Talep katılım		0,190	49,342	0,658
	%2 Talep katılım		0,117	49,617	0,383
	%3 Talep katılım		0,030	49,882	0,118
Frekans değişim oranına göre kontrol	%1 Talep katılım		0,248	49,294	0,706
	%2 Talep katılım		0,214	49,461	0,539
	%3 Talep katılım		0,150	49,733	0,267

Her iki senaryoda talep katılımı uygulanmadığı, yani yük kontrolü sağlanmadığında daha yüksek frekans değişimi görülmektedir. RES-GES üretiminin artması ve şebekede yer alan konvansiyonel kaynak potansiyelinin azalması nedeniyle şebekede frekans değişimi hızını artırarak, daha yüksek frekans değişimine yol açmaktadır. Ancak her iki senaryoda, belirlenecek frekans limitlerine göre talep kontrolünün uygulanmasıyla şebekede görülebilecek hızlı ve yüksek frekans değişimlerinin azaltılabileceği görülmektedir.

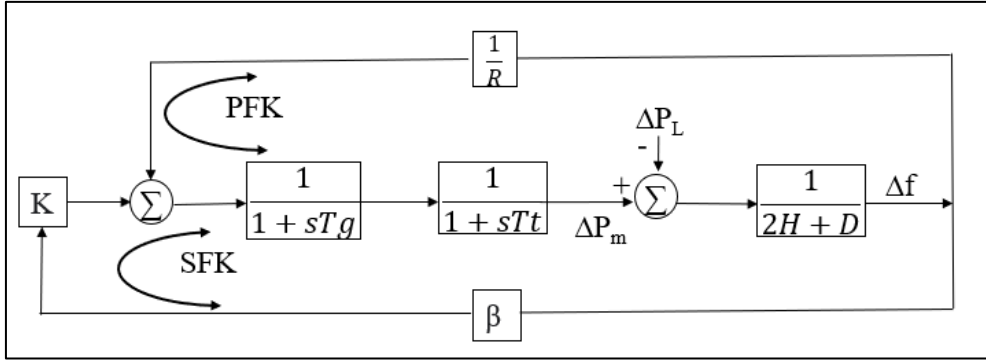
Çizelge 3.5.’te referans alınan şebeke dönemine ait üretim ve tüketim bilgileri verilmiştir. Bu bilgilere göre toplam dağıtım yükü 14,5 GW olup, yapılan frekans kontrol analizlerinde %1 talep katılımı ile 145,2 MW, %2 talep katılımı ile 290,1 MW ve %3 talep katılımı ile 435,8 MW talep katılımı dikkate alınmıştır. Şebekenin YEK oranının %60 ve üzerinde olduğu bir durumda oluşacak üretim kayıplarında yaşanabilecek dengesizliklerinde 1 Hz’e yakın frekans değişimlerinin olabileceği görülmektedir. Bu koşullarda %1 oranında talep katılımının frekans değişimlerini önemli seviyede azaltılabilmektedir. Talep katılımının

olmadığında şebekenin frekans değişim 920 mHz iken; %1 talep katılımı ile 658 mHz, %2 talep katılımı ile 383 mHz ve %3 talep katılımı ile 118 mHz düşmektedir. Yapılan analizlerde, oran talep katılımı belirlenen dağıtım şebeke kümelerinden, toplamsal olarak sağlandığı kabul edilmiştir. İhtiyaç duyulan oransal talep katılımı dikkate alındığında dağıtım şebeke kümelerinin tüketimlerinin toplu olarak kontrol edilebildiğinde, bütün bir şebeke açısında önemli bir esneklik sağlayabileceği görülmektedir. Çizelge 3.5.'te verilen kümelerin yükleri incelendiğinde, Küme 1'in toplam yükünün yaklaşık %3,3'ü ve Küme 3'ün toplam yükünün yaklaşık %1,6'sı ile ihtiyaç duyulan talep katılım esnekliği sağlanabilmektedir.

3.2. Yük Frekans Kontrolü Modelinin Oluşturulması ve Talep Katılımıyla Frekans Kontrolünün Metasezgisel Yöntemler Kullanılarak Optimizasyonu

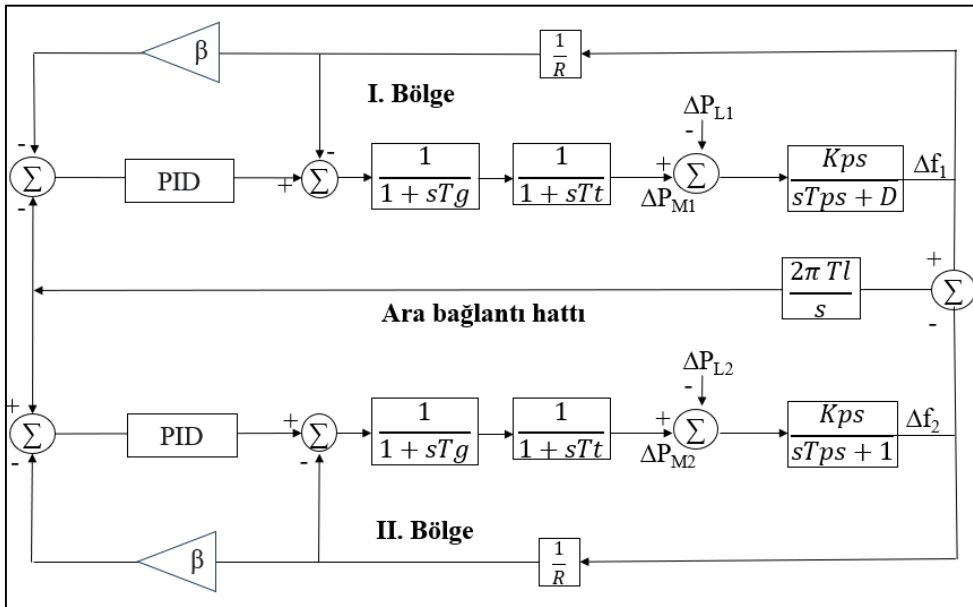
Yük frekansı kontrol (YFK) sistemleri, her bir kontrol alanında yük talebi ile üretim arasındaki dengeyi sağlamak ve bu sayede sistem frekansındaki sapmaları ortadan kaldırmak amacıyla elektrik güç sistemlerinin kontrolünde uzun yıllardan beri yaygın olarak kullanılmaktadır [118, 119]. Frekans kararlılığı, bir elektrik sistemleri için şebeke frekansını izin verilen, belirlenen nominal işletme karakteristiğini temsil ettiği için güç sistemlerinin frekans kontrol çalışmaları YFK modelleri üzerinde yapılmaktadır. Gerçek bir elektrik şebekesinde olduğu gibi, YFK modelleri, bir bölge ya da çok bölgeli güç sistemlerinde üretim ve tüketim arasındaki dengeyi sağlayarak sistem frekansını ve bölgeler arasındaki bağlantı hattındaki güç değişimini nominal işletme şartlarını temsil etmektedir. Böylelikle bir şebekenin kaynak ve üretim karakteristiğine göre frekans karakteristiği YFK modelleri ile yapılabilir. Bir güç sisteminde birbiriyle senkron çalışan ve belirli bölgeyi besleyen üniteler yer alır, temel olarak oluşan bu alanı bölgesel kontrol alanı olarak tanımlayabiliriz. Bu kontrol alanında yer alan ünitelerin aynı regülasyon yeteneklerine sahip olması ve aynı kontrol cevabının vermesi istenir. Örnek olarak, ülke ya da kıtasal olarak oluşturulan enterkonnekte güç sistemleri kapasite farklılıkları ve topolojik olarak uzaklıklar olsa da birbirleriyle olan ara bağlantı hatları vasıtasıyla frekans kontrolünün sağlanması ortak bir hareket ortaya koyarlar. Güç sistemlerinin frekans kontrolüne esas kapalı çevrim kontrol döngüsü Şekil 3.16'de verilmiştir [120].

$$\Delta P_m(t) - \Delta P_L(t) = 2H \frac{df}{dt} + D f(t) \quad (3.5)$$



Şekil 3.16. Tek bölge şebeke YFK diyagramı

Güç sistemlerinde tek bir kontrol alanı için şebeke frekans kontrol diyagramı ile zaman bazlı matematiksel modeli Eş. (3.5) 'de verilmiştir. Burada şebeke atalet sabitini H , sönümleme katsayısını D , türbin (Tt) ve governor (Tg) zaman sabitlerini, şebeke hız regülasyon sabiti R , frekans alan kontrol hatasını β ve kontrolcü kazanç katsayısını K ifade eder. Benzer şekilde farklı şebeke alanları için yada farklı kaynak tiplerine göre şebeke frekans kontrol modelleri eşdeğer kaynak transfer fonksiyonları ile bölge bağlantı hatları ile frekans-açı değişkenlikleri referans alınarak modellenmektedir. Şekil 3.17'te iki bölge ve ara bağlantı hattı olan YFK modeli verilmiş olup, burada ara bağlantıyı (Tl) ifade eder.



Şekil 3.17. İki bölge YFK diyagramı

Geleneksel bir güç sisteminde, dikey mimaride üretim, iletim ve dağıtım olarak entegre edilmiştir. Diğer bir ifadeyle iletim sistem operatörleri, dağıtım sistem operatörleri ve üretim

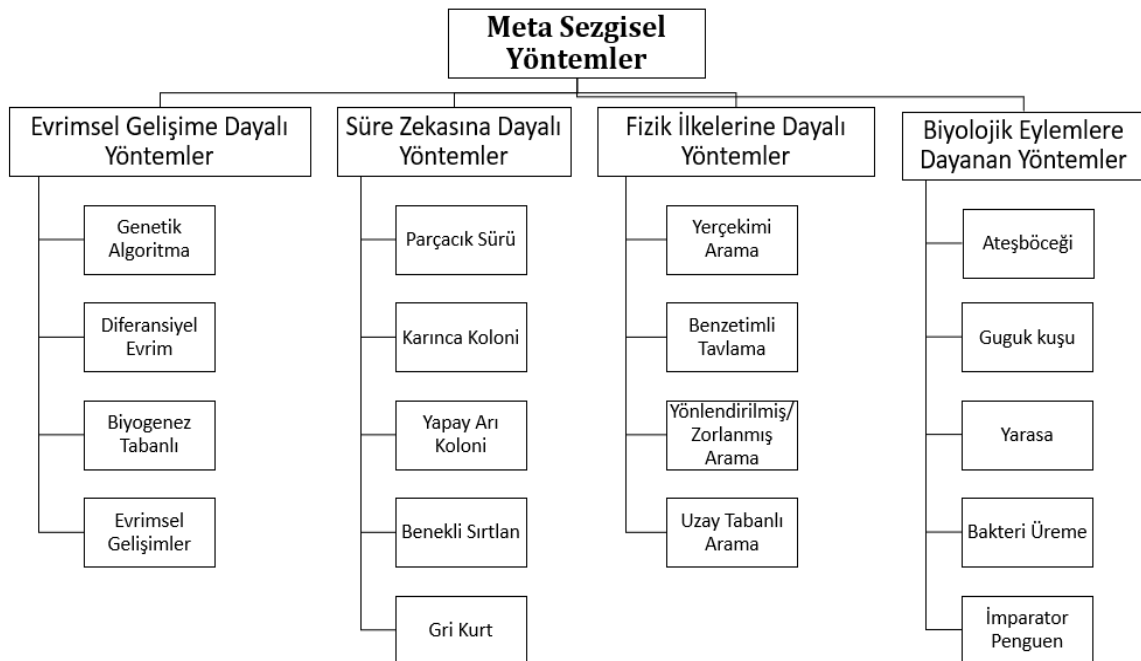
şirketleri olarak tanımlayabiliriz. Bu hiyerarşik yapı içerisinde çok sayıda üretim, tüketim ve bağlantı hatlarının yer aldığı büyük ölçekte rekabetçi bir piyasa ortamında üretimi ve tüketicinin kontrolünün sağlanabilmelidir. Güç sistemlerinde YFK, temel olarak sistemde yer alan her bir üretim ünitesinin gerçek güç çıkışının, sistem frekansı sapmasına ve bağlantı hattı güç değişimine göre belirlenen sınırlar dahilinde kontrol edilmesini amaçlamaktadır. Bu karmaşık güç sistem yapısında YFK problemi kritik işlevselliği geleneksel güç sistem modellerinde öncelikle termik, hidro ve gaz üretimlerinin olduğu modeller üzerinde incelenmiştir. İlk tasarımı ve uygulaması ilk olarak geçen yüzyılın başında termik/hidro/gaz tesislerinin doğrusallaştırılmış modeliyle tek alanlı konvansiyonel sistemlerle başlamıştır. Farklı şebekelerin birbiri ile bağlı olduğu enterkonnekte mimari için çok bölgeli YFK modelleri ile bir bölge birbirinden farklı kaynakları içeren çok kaynaklı YFK diyagramları kullanılmaktadır. Öte yandan değişen şebeke mimarisıyla YEK'lerin, elektrikli araçların, yüksek gerilim doğru akım ara bağlantı hatlarının YFK modellerinde dikkate alınmaktadır [121, 122].

YFK'da bulunan alt sistemlerinin birbiriyle ilişkili olarak çalışabilmesi için alt sistemlerinin kontrolünün etkinliğine bağlıdır. Güç ünitelerinin valf noktası, açma kapama yetkisi, rampa değerleri, bölgesel hata katsayılarının hesaplanması ve kontrolcü ayarları tasarlanmaktadır. Geleneksel anlamda YFK'da klasik oransal kontrolcü yöntemleri kullanılmaktadır. Oransal integral (PI), integral türev (ID), oransal integral türev (PID), çift integral ya da çift türevli kaskat kontrol türleri yaygındır [123]. Etkili ve başarılı bir YFK işletimi için önemli husus kullanılacak olan kontrolcü ve parametrelerinin belirlenmesi için kullanılan optimizasyon yöntemine bağlıdır.

Bir problemin en iyi şartlar altında çözüm uzağında en iyi sonuçlarının elde edilmesi optimizasyon işlemiyle sağlanır. Karmaşık problemler için en iyi sonuca ulaşmak ya da bazı kısıtlara dikkate edilerek sonuca optimizasyon araçlarıyla ulaşılabilir. Geçmişten günümüzde birçok problemin çözümünde farklı optimizasyon algoritmaları kullanılmaktadır. Geleneksel optimizasyon teknikleri doğrusal, doğrusal olmayan ve dinamik programlamayı içerir. Bu yöntemler belirli bir problem için deterministik sonuçların elde edilmesini sağlayabilir ancak karmaşık ve farklı problemler kullanılabilen, çözüm uzayının geniş alanlı düşük maliyetlerle çözebilen sezgisel algoritmalar ön plana çıkmaktadır. Sezgisel ve metasezgisel algoritmalara geniş alanlı durum uzayında, belirli kısıtlara dikkat ederek, sezgisel taramaları daha hızlı gerçekleştirilebilir ve en uygun sonuca

ulaşabilir. Bu yöntemler, problemin matematiksel yapısını tam olarak bilmeksizin, problem çözümü için mantıklı ve sezgisel adımlar kullanarak çözüm alanını keşfetmeye çalışır. Metasezgisel optimizasyon, genellikle evrimsel gelişim, sürü zekası, fiziksel ilkelere ve yaşamsal biyolojik eylemleri baz alarak oluşturulan kural bazlı matematik modellerdir [124–127]. Şekil 3.18 ‘de metasezgisel tekniklerin ilham aldığı yöntemlere göre sınıflandırılması ve son yıllarda bazı geliştirilen algoritmalar gösterilmektedir.

Metasezgisel optimizasyon algoritmaları, güç sistemleri alanında çok sayıda optimizasyon sorununu çözmek için kullanılabilir. Güç sistemlerinde optimizasyon çalışmalarında öncelikle çalışılan problem belirlenmesi ve problemin sonuçlarının test edilerek doğrulanabilmesi için optimize edici tarafından sağlanan aday çözümleri değerlendirmek için dikkate alınan güç sisteminin bir modeli gereklidir. Bu model sonunda istenilen hedeflere göre amaç fonksiyonu belirlenir. Dikkate alınan model ve hedeflerin özelliklerine göre sınırlar / kısıtlamalar kullanılabilir, bu sayede optimizasyon çözüm alanında sınırlar belirlenecektir. Son olarak amaç fonksiyonuna bağlı olarak, sonuçların uygunluğu hesaplayarak, her çözümün uygunluğuna göre aday çözümleri güncellemek için optimize ediciye tekrar gönderecektir. Bu tekrarlayan süreç, uygunluk değerinin durdurma kriterine ulaşana kadar devam eder [128].



Şekil 3.18. Metasezgisel optimizasyon algoritmalarının sınıflandırması [124]

Güç sistemlerinde YFK problemi, büyük ölçekli şebeke mimarisinde arz talep dengesini, yani sistemdeki herhangi bir arıza, bozulma gibi dengesizlik koşullarında yükün dengelenebilmesi ve frekansın istenilen aralıklarda tutulmasıdır. Buna göre Şekil 3.16 ve Şekil 3.17 de örnek olarak verilen YFK modellerinde, meydana gelen frekans değişimlerini etkin bir şekilde kontrolünün sağlanması için uygun kontrolcülerin seçilmesi ve ayar değerlerinin optimize edilmesi önemlidir. Şebekede bulunan generatör, türbin ve regülatör dinamikleri genellikle doğrusal olmayan özelliklere sahiptir, bu nedenle karmaşık doğası nedeniyle YFK lineer olmayan bir problem olarak kabul edilir [129]. Buna göre YFK probleminde metasezgisel optimizasyon yöntemleri daha uygun olabilir. Bu tür sistemlerde, doğrudan analitik çözümlerin bulunması zor olabilir ve metasezgisel yöntemler, karmaşık arama uzaylarında etkili bir şekilde gezinmeye ve optimize etmeye yönelik avantajlar sunabilir. YFK probleminde kullanılan pek çok metasezgisel yöntemi bulunmaktadır.

Genetik algoritmalar (GA), mantıksal seçim ve yetkin olanın hayatta kalması teorisini kabul eder. Kapsamlı bir çözüm alanından en uygun çözümü elde etmek için kullanılır [130 - 132]. Parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO), sürü topluluğunu içeren stokastik tabanlı optimizasyon algoritmasıdır [133,134]. Bu iki algoritma en yaygın ve ilk uygulanan yöntemler olduğu söylenebilir. Geliştirilen yeni metasezgisel yöntemler modern güç sistemlerinde etkili LFC için önerilmiştir. Bakteriyel toplayıcılık optimizasyonu algoritması [135, 136] , gri kurt optimizasyonu (GWO) algoritması [137, 138] , harmoni Arama algoritması [139, 140] , tabu arama algoritması (TSA) [140], diferansiyel evrim algoritması [141,142], ateşböceği algoritması (FA) [143,144], yapay arı koloni algoritması [145,146], salp sürüsü algoritması [147,148], yer çekim arama algoritması [149] geliştirilen algoritmalarından bazılarıdır. Güç sistemlerinde frekans kontrolünde talep katılımı uygulamalarını içeren çalışmalar yapılmıştır. İki bölgeli YFK modelinde talep katılımı PSO algoritmasıyla analiz edilmiştir. Bu çalışmada mevcut geleneksel frekans kontrol ve talep katılımının oransal olarak frekans kontrolüne katılımı karşılaştırılmış, elde edilen sonuçlarda talep katılımının önemli katkısı olduğu görülmüştür [150]. PSO ve FA yöntemleriyle kritik olan yükler ve hibrit araçların katılımıyla frekans kontrolünde talep katılımı incelenmiştir [151]. Bao ve ark. çok bölgeli YFK modelinde, talep katılımını belirlenen frekans değişim seviyesine göre oransal talep katılım rezervini GA yöntemiyle gerçekleştirmiştir [152]. Tek bölge YFK modelinde düşük frekans koşullarında talep katılımının oransal olarak katılımı incelenmiştir [153]. Şebekede dağıtık yapıdaki termik tüketimlerin bireysel ve

gruplandırılmış olarak frekans kontrolüne katılımı tek bölgesi çok kaynaklı YFK sisteminde ele alınmıştır [154].

Literatürde gerçek elektrik şebeke koşulları YFK modeli oluşturularak çalışmaktadır. Özellikle değişen şebeke kaynak profilinin değiştiği, YEK kaynaklarının artışıyla modern işletme koşullarında esneklik araçları YFK modelleriyle incelenmektedir. Zeyad yaptığı çalışmada, İngiltere'nin mevcut frekans kontrol yöntemlerini incelemiş, gelecek şebeke mimarisinde meydana değişimle şebekenin atalet değişimini dikkate almıştır. Bu değişim ile meydana gelecek yüksek frekans değişimlerinde talep katılımı ve depolama sistemleriyle frekans kontrolünü şebekenin YFK benzetim modeliyle incelemiştir [155]. Benzer bir diğer çalışmada 39 baralı İngiltere şebeke modeli baz alınarak iki bölgesi YFK modelinde kontrolcü optimizasyonu geliştirilen çok katmanlı yapay sinir ağlarıyla ele almıştır [156]. Ranjitha ve ark. Hindistan 62 baralı şebeke eş modelini dikkate alarak, artan rüzgar ve güneş kaynaklarıyla birlikte talep katılımı YFK modeliyle analiz etmiştir. Bu çalışmada kontrolcü parametreleri metasezgisel yöntemler ile ayarlanmıştır [157]. Wang ve ark. Avrupa kıtası senkron bölgesinin değişken YEK üretim koşullarında frekans kontrol çalışmaların tek bölgesi YFK modeli üzerinde gerçekleştirmiştir. Bu çalışmada YFK modelinde, ayrıntılı tüm konvansiyonel kaynak regülatörler verileri eksikliği nedeniyle doğru bir şekilde modellemek mümkün olmadı güç kaynakları toplulaştırılmış regülatör olarak modellenmiştir [158]. Muhssin ve ark. konut tipi ısıtma pompa ve buzdolabı yüklerinin toplamsal olarak frekans kontrolüne talep katılımı potansiyeli olarak çalışılmıştır. Bu çalışmada İngiltere'nin şebeke ünite ataletini, sönümleme katsayısını içeren basitleştirilmiş tek bölge YFK modeliyle yapılmıştır. Bu çalışmada şebeke olay arıza koşullarında talep katılımının yüksek, düşük olduğu durumlarda frekans kontrolüne etkisi analiz edilmiş, elde edilen sonuçlarda talep katılımının artan YEK koşullarında önemli bir araç olacağı ortaya koyulmuştur [159].

Tez çalışmasında güç sistemlerinde artan YEK koşullarında şebekenin atalet değişiminin gösterilmesi ve frekans değişimlerinin incelenmesi için hidro, termik ve doğal gazı kaynaklarının olduğu kabul edilen çok kaynaklı bir bölgesi YFK modeli ele alınmıştır. Belirli bir ülke ya da bir senkron bölgenin temel frekans kararlılığını inceleyen literatür çalışmaları da benzer yaklaşımlar, tüm kaynakların türbin ve regülatörlerini tekil olarak ele almıştır. Bu amaçla Türkiye şebekesi bir bölge olarak kabul edilmiş ve mevcut işletmede bulunan konvansiyonel kaynak türlerine odaklanıldığında, hidro, termik ve doğalgaz kaynakları frekans rezerv kaynağı olduğu düşünülmüştür. Detaylı YFK modeli bu bölümde

anlatılmaktadır. Tasarlanan YFK sisteminde, kontrolcü ayarlanması ve talep katılımının optimize edilmesi amacıyla yaygın kullanılan PSO ve GWO algoritmaları kullanılmıştır. Öte yandan tez çalışmasın YFK çalışmalarında imparator penguen optimizasyon algoritması ilk kez kullanılmak üzere modellenmiş, yapılan duyarlılık analizleriyle performans sonuçları ortaya koyulmuştur.

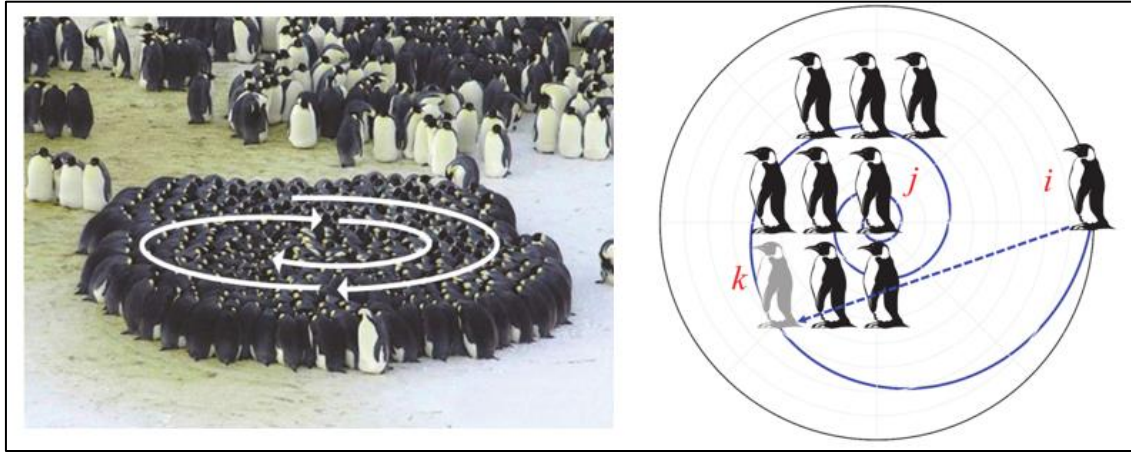
3.2.1. Yük frekans kontrolünde imparator penguin optimizasyon (EPO) algoritmasının test edilmesi ve duyarlılık analizi

YFK çalışmalarında yeni algoritmaların test edilmesi ve etkilerinin öğrenilebilmesi amacıyla referans güç sistem modeli üzerinde performans testleri, duyarlılık analizleri yapılmaktadır. Bir güç sistemini temsil eden YFK modelindeki her parametrede meydana gelebilecek değişimi, yani sistem parametrelerindeki ve çalışma koşullarındaki değişimin, kontrolcü ayarları ve sistem dinamik performansı üzerindeki etkisi bilinmelidir. Bu nedenle YFK’da kararlılığın sağlanabilmesi için uygun yöntemlerinde belirlenmesi için duyarlılık analizleri gerçekleştirilir [160, 161]. Bu tez çalışmasında, benzer şekilde YFK çalışmalarında ilk kez kullanılan EPO algoritmasının performans testi, duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Öncelikle EPO algoritmasının performans sonuçlarını ele alan akademik çalışmalara göre yük frekans kontrol çalışmalarına esas sabit parametrelerinin belirlenmesi amacıyla test çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

EPO algoritması esas olarak imparator penguenlerin yaşam şekillerine dayanır ve temel olarak çevresel sıcaklık etkilerine göre toplanma şekil ve hareketlerini baz almaktadır. Bu amaçla algoritmanın matematiksel modeli toplanma hareketine göre yapılmaktadır. Toplanma davranışı dört temel esasa dayanır: toplanma sınırlarının belirlenmesi, grup etrafındaki sıcaklık profilinin belirlenmesi, grup üyeleri arasında mesafenin belirlenmesi ve etkin taşıyıcının yerinin değiştirilmesidir [162]. Temel olarak imparator penguenlerin topluluk halinde spiral hareketine dayanan algoritmanın davranışsal hali Şekil 3.19’de verilmiştir.

EPO'nun mühendislik problemlerin etkin çözümünde etkin sonuçlarının elde edildiği ve bu parametrelerinin test edildiği çalışmalarda özellikle üyeler arasında çarpışmadan gerekli aralığı belirleyen M , ortam sıcaklığı ile grup hareketinin etkin olarak keşfedilmesi için f ve l parametreleri test edilmiştir. Bu parametreler belirlenen baz değer aralıkları M için 2, f için

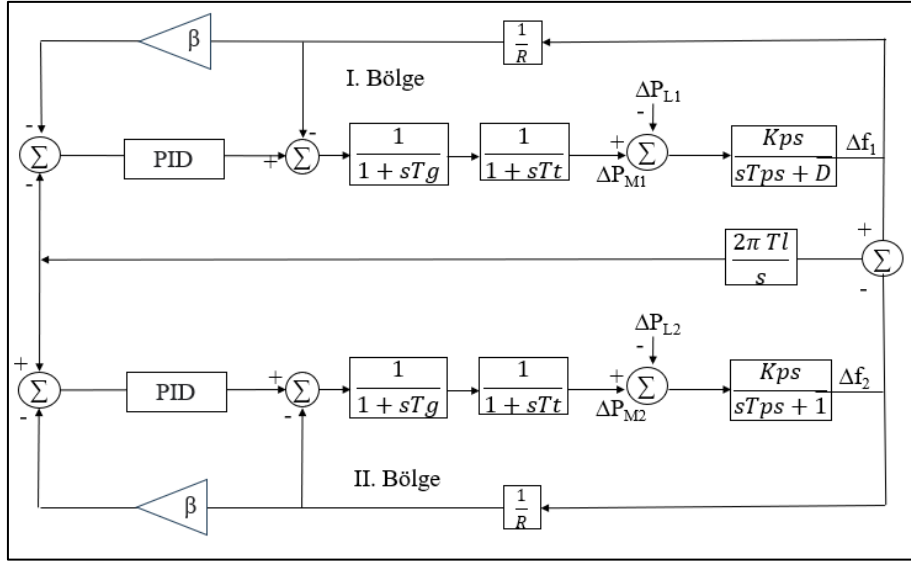
[2, 3] ve 1 için [1.5, 2] uygun görülmüştür. Ayrıca doğru üye ve iterasyon sayılarıyla algoritma test edilerek 1000 üye ile 80 iterasyon ile optimum sonuçların elde edilebilmektedir [163,164].



Şekil 3.19. EPO algoritması davranışsal şekli

Günümüzde farklı akademik alanlarında yapılan çalışmalar [165–170], ancak mühendislik alanında; [171]'de envanter kontrol problemleri EPO algoritması incelenmiş olup, farklı optimizasyon yöntemleriyle sonuçları karşılaştırılmıştır. Farklı amaç fonksiyonları ve popülasyon koşullarında EPO ile daha iyi sonuç verdiği elde edilmiştir. Solar sistemlerde PI kontrolcü ve çevrim katsayılarını optimizasyonlarında PSO ve CFA yöntemlerine göre daha başarılı olduğu ortaya koyulmuştur. Güneş enerji santrallerinde kısmi gölgelenme koşullarında maksimum güç noktasının sağlanması amacıyla, panellerden çekilen güç miktarını optimizasyonu EPO ile sağlanmıştır [172]. Elektrik şebekelerinde üretim maliyetlerinin optimum koşullarını sağlayarak, optimum yük akış problemi EPO ile başarılı olarak gerçekleştirilmiştir [173]. Yenilenebilir kaynağın yer aldığı mikro şebekelerde gerçek zamanlı işletme koşullarında ekonomik işletme koşullarının optimizasyonu EPO ile yapılmıştır [174, 175].

EPO'nun yük frekans kontrol çalışmalarında test edilmesi amacıyla öncelikle parametre değerlerinin optimum değerleri belirlenmiştir. Analizler için referans alınan güç sistem modeli Şekil 3.20'de gösterilmektedir [176]. Referans güç sisteminde; iki bölge, ara bağlantılı, her bölgede ara ısıtmasız türbin modeli bulunmaktadır. Güç sistem ve ünite parametreleri; nominal frekans=60Hz, $\beta=0,425$ p.u MW/Hz, $R=2,4$ Hz/p.u, $T_g=0,03$ s, $T_t=0,3$ s, $K_{ps} = 120$ Hz/p.u, $T_{ps} = 20$ s, $T_l=0,545$ p.u MW/rad şeklindedir.



Şekil 3.20 Referans güç sistem modeli

Temel olarak optimizasyon probleminin çözümünü sağlayabilmek için hedef fonksiyonun belirlenmesi gerekmektedir. Benzer şekilde YFK’de kontrolcü parametrelerinin ayarlanabilmesi için literatürde dört temel hedef fonksiyonu kullanılmaktadır: Hata karelerinin integrali (Integral Squared Error -ISE), zaman ağırlıklı hata karelerinin integrali (Integral Timeweighted Squared Error -ITSE), mutlak hatanın integrali (Integral Absolute Error -IAE) ve Zaman ağırlıklı mutlak hatanın integrali (Integral Time-weighted Absolute Error -ITAE). Eş. (3.6)’de ISE, Eş. (3.7)’de ITSE, Eş. (3.8)’de IAE ve Eş. (3.9)’da ITAE eşitlikleri verilmiştir. YFK çalışmalarında en yaygın olarak kullanılan ve başarılı sonuçlar veren hedef fonksiyonu ITAE olarak kabul edilmektedir [177].

$$ISE = \int e(t)^2 dt \quad (3.6)$$

$$ITSE = \int t \cdot e(t)^2 dt \quad (3.7)$$

$$IAE = \int |e(t)| dt \quad (3.8)$$

$$ITAE = \int t \cdot |e(t)| dt \quad (3.9)$$

Referans alınan güç sistem modelinde her bölgenin frekansı ile bağlantı hattındaki güç değişimini kontrol edebilmek ve sistemin kararlılığının sağlanabilmesi için her bölge ve bağlantı hattında meydana gelen hataları minimize etmek amacıyla oluşturulan hedef fonksiyonu Eş. (3.10)’da gösterilmektedir.

$$ITAE = \int (|\Delta f_1|) + (|\Delta f_2|) + (|\Delta \phi_{at}|).t. dt \quad (3.10)$$

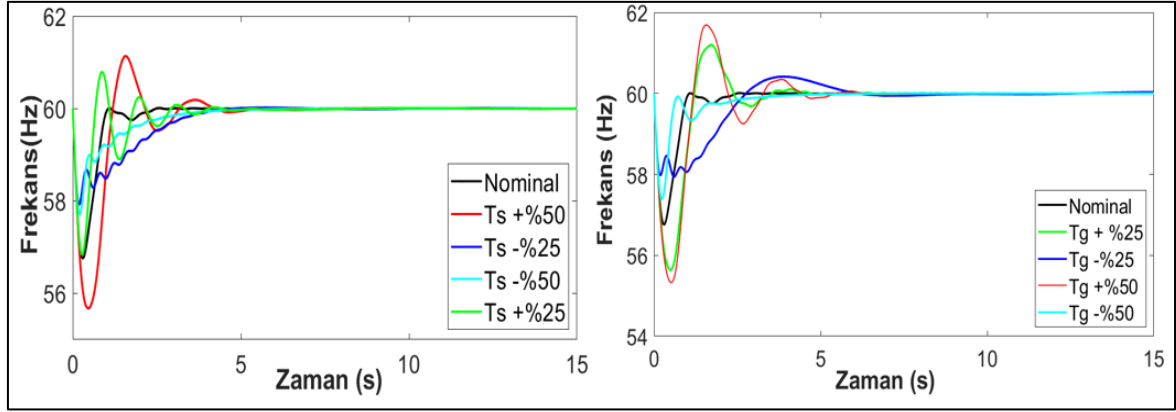
EPO'nun YFK çalışmaları için üye sayısı [10-1000], iterasyon sayısı [10-100], f kontrol parametresi [2-3] ve l kontrol parametresi [1,5-2] değerleri arasında test edilmiştir. Yapılan analiz sonuçlarına göre ideal sonuçlar için Çizelge 3.7'deki sabit değerler elde edilmiştir.

Çizelge 3.7 EPO algoritması için belirlenen ideal sabit parametreler

Üye sayısı(search agent)	200
İterasyon	50
M	2
f	2,6
l	1,75

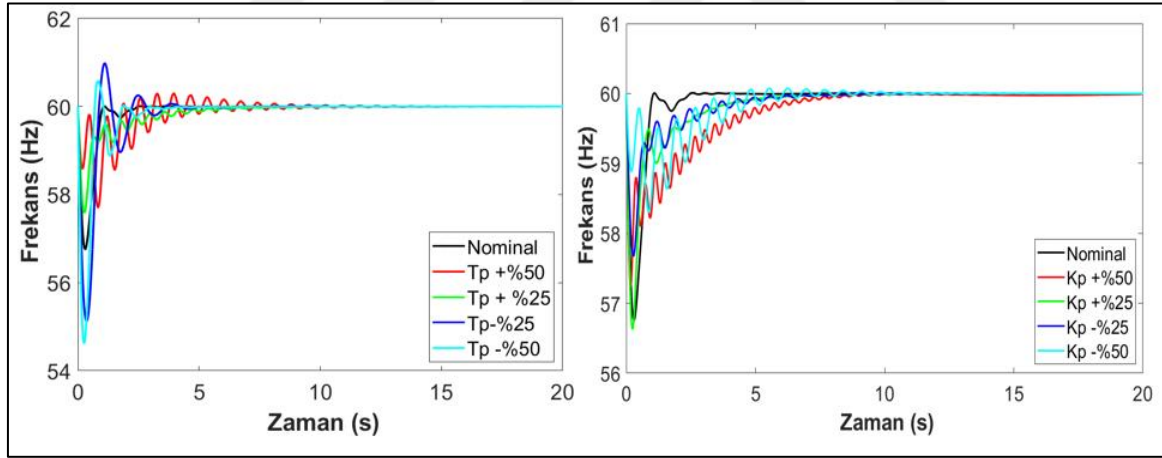
Belirlenen değerler neticesinde, referans güç sisteminin PID kat sayılarının duyarlılık analizleri EPO ile incelenmiştir. Sırasıyla referans güç sistemin Tg,Ts, Kp,Ts, B ve R değerleri oransal olarak değiştirilerek PID değerleri EPO ile belirlenmiştir. Referans güç sistem modeli Matlab 2018 versiyonu ile modellenmiş, analizler Intel Core i7-1165G7, 2.8 GHz, 16 GB of RAM özelliklerinde bilgisayar ile gerçekleştirilmiştir. Analizlerde birinci bölgede %10 oranın yük dengesizliği olayı olarak simülasyona dahil edilmiş olup, PID için katsayı sınırlar [2,2] olarak kabul edilmiştir.

Her parametre değişim durumunda EPO ile birlik PID katsayıları ayarlanarak frekans değişimi kontrol edilmektedir. Elde edilen PID katsayıları, ITAE performans katsayıları Çizelge 3.8'de verilmiştir. Tg, Ts, Kp, Ts, B ve R sırasıyla yüzde oranlarında değiştirilmiştir. Değişen parametre koşullarında EPO ile kontrolcü katsayıları uygun hale ayarlanarak, frekans değişimi nominale getirilmiştir. Tg ve Ts'nin değişimlerinde meydana gelen frekans değişimi Şekil 3.21'de, Tp ve Kp'nin değişimlerinde meydana gelen frekans değişimi Şekil 3.22'de gösterilmektedir.



Şekil 3.21. T_g ve T_s 'nin oransal değişimiyle meydana gelen frekans değişimi

EPO algoritması belirlenen kat sayıları limitleri içerisinde, parametlerinin değişim oranlarına bağlı olarak uygun ayar değerlerinin belirleyerek frekans kararlılığını sağlamaktadır. En büyük frekans değişimi T_p değerinin %50 azaldığı koşullarda meydana gelmiştir.



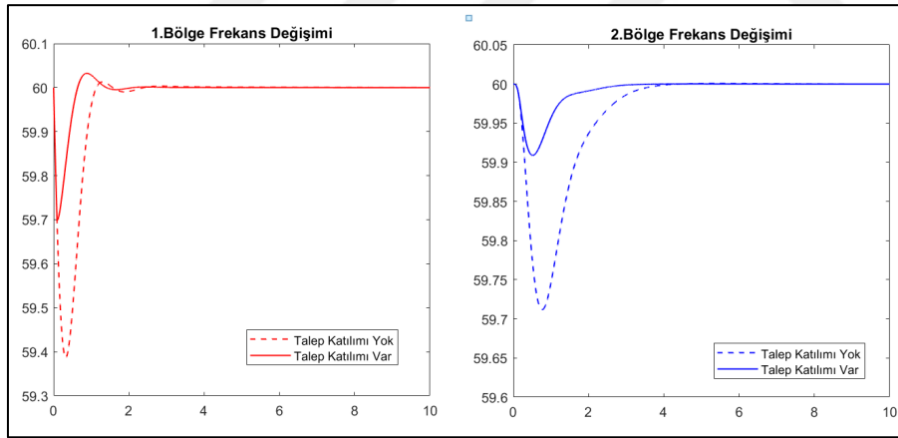
Şekil 3.22. T_p ve K_p 'nin oransal değişimiyle meydana gelen frekans değişimi

Yapılan parametre değişimlerine bağlı olarak oluşan hata değeri artmaktadır. Çizelge 3.8'de verilen sonuçlara göre nominal koşullarda meydana gelen dengesizliklerde ITAE değeri 0,01156 olurken, EPO algoritmasıyla ayarlanan PID katsayılarıyla bu değer 1,46945'e kadar yükselmiştir.

Çizelge 3.8. Duyarlılık analiz sonuçları

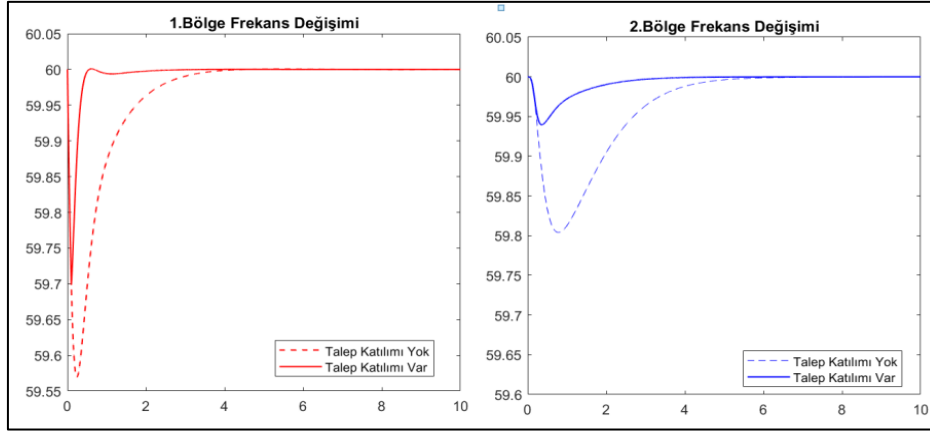
PID kat sayıları		KP ₁	Kİ ₁	KD ₁	KP ₂	Kİ ₂	KD ₂	ITAE
Parametre	Nominal	0,769	1,776	0,088	0,595	1,899	1,411	0,01156
T _g =0,08	artı %50	0,030	1,338	-0,043	-0,270	1,529	1,929	0,33401
	artı %25	0,023	1,381	0,007	2,000	2,000	2,000	0,23169
	eksi %25	0,089	1,287	0,705	-0,830	1,079	1,916	0,45263
	eksi %50	2,000	2,000	0,134	2,000	2,000	2,000	0,08338
T _s =0,3	artı %50	0,350	1,234	-0,045	0,296	1,661	1,797	0,20711
	artı %25	-0,066	0,959	0,866	0,719	0,255	0,127	0,73919
	eksi %25	0,775	1,078	0,554	-0,180	1,771	1,778	0,21153
	eksi %50	1,294	1,591	0,235	1,314	0,056	0,985	0,11189
K _p =120	artı %50	0,977	0,683	0,549	-0,825	0,229	1,658	0,57651
	artı %25	1,181	1,100	0,131	-0,080	0,677	1,378	0,21101
	eksi %25	1,928	1,366	0,192	1,012	0,433	1,298	0,19200
	eksi %50	1,746	1,296	1,441	1,222	1,175	0,319	0,24430
T _p =20	artı %50	1,446	1,639	1,140	1,342	1,953	0,132	0,23508
	artı %25	1,928	1,366	0,192	1,012	0,433	1,298	0,19152
	eksi %25	0,350	1,234	-0,045	0,296	1,661	1,797	0,14600
	eksi %50	-0,066	0,959	0,866	0,719	0,255	0,127	0,58422
B=0,425	artı %50	0,733	1,532	0,801	1,404	1,930	0,551	0,17881
	artı %25	1,568	1,717	0,498	0,099	0,394	-0,108	0,39567
	eksi %25	1,833	1,966	1,897	0,095	0,055	-0,159	0,25518
	eksi %50	-0,343	0,555	-0,296	-0,438	1,657	1,326	1,46945
R=2,4	artı %50	1,181	1,100	0,131	-0,080	0,677	1,378	0,28326
	artı %25	1,746	1,296	1,441	1,222	1,175	0,319	0,36087
	eksi %25	0,775	1,078	0,554	-0,180	1,771	1,778	0,24461
	eksi %50	0,138	2,000	0,258	2,000	0,597	2,000	0,11864

Yapılan duyarlılık analizlerinde YFK'da bulunan sistem parametrelerinde meydana gelebilecek oransal değişimlerde EPO algoritmasıyla frekans kararlılığı sağlanabilmektedir. Ancak tez kapsamında frekans kontrolünde talep katılımında elde edilebilecek sonuçların test edilmesi amacıyla iki bölge YFK modelinde EPO, GWO ve PSO algoritmalarıyla karşılaştırma analizleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan model üzerinde algoritmaların çalışmasına uygun olarak aynı sayıda unsur ve iterasyon kullanılarak analizler yapılmıştır. PID katsayıları için sınır değerler sırasıyla -2 ve 2 olarak belirlenmiştir. Referans alınan güç sistemi modeli üzerinde alan hatası PID kontrolcülerinin katsayıları ile talep katılımı oranı üç farklı optimizasyon yöntemi ile belirlenmiştir. Her durum için talep katılımının olduğu/olmadığı koşullar incelenmiştir. Referans güç sistem modeli nominal frekansı 60 Hz'dir ve bu tip şebeke koşullarında düşük frekans limitleri 300 mHz olarak belirlenmektedir. Bu çalışmada referans olarak benzer düşük frekans limiti kullanılmıştır. Referans model üzerinde birinci bölgede meydana gelen %1'lik güç değişim koşullarında GWO algoritmasıyla Şekil 3.23 'deki, PSO algoritmasıyla Şekil 3.24 'deki ve EPO algoritmasıyla Şekil 3.25'de sonuçlar elde edilmiştir.



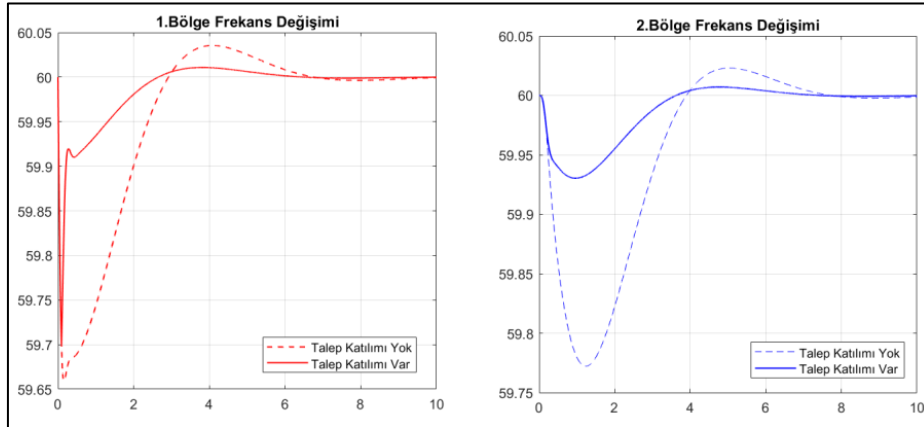
Şekil 3.23. GWO analiz sonucu

Birinci bölgede oluşan dengesizlik sonucunda GWO algoritması ile yapılan analizlerde, birinci bölgede 631 mHz'lik, ikinci bölgede 310 mHz'lik frekans değişimi meydana gelmiştir. Aynı koşullarda EPO algoritmasıyla birinci bölgede 360 mHz'lik, ikinci bölgede 270 mHz'lik frekans değişimi; PSO algoritmasıyla birinci bölgede 430 mHz'lik, ikinci bölgede 200 mHz'lik frekans değişimi oluşmaktadır. Bu sonuçlara göre EPO ile frekans değişimi daha hızlı kontrol edildiği görülmektedir.



Şekil 3.24. PSO analiz sonucu

Oluşan dengesizlik sonucunda, üç farklı algortmada frekansın oturma süresi farklı sürelerde meydana gelmiştir. Talep katılımının olmadığı durumda, birinci bölgenin frekans oturma süresi GWO algoritması ile 6,44 sn, EPO ile 9,81 sn ve PSO ile 7,97 sn'dir. EPO algoritmasıyla frekansın nominal koşullara gelmesi daha uzun sürmektedir. Bu süreler talep katılımıyla birlikte önemli derece azalmaktadır; talep katılım durumunda oluşan oturma süreleri GWO ile 3,94 sn, EPO ile 6,23 sn ve PSO ile 3,34 sn'dir. Normal duruma benzer şekilde EPO ile oturma süresi diğer algoritmalarla göre daha uzundur.



Şekil 3.25. EPO analiz sonucu

Üç algoritma ile talep katılım oranı hesaplanmış; birinci bölgede meydana gelen dengesizlik koşullarında uygulanmam talep katılımı oranı en düşük GWO ile %0,077 iken, EPO ile 0,085, PSO ile %0,826'dır. Çizelge 3.9 'da üç algoritma ile YFK sistemindeki bölgelerin frekans değişimi, maksimum frekans değeri, belirlenen talep katılım oranı ve performans skoru gösterilmiştir.

Çizelge 3.9. Analiz sonuçları

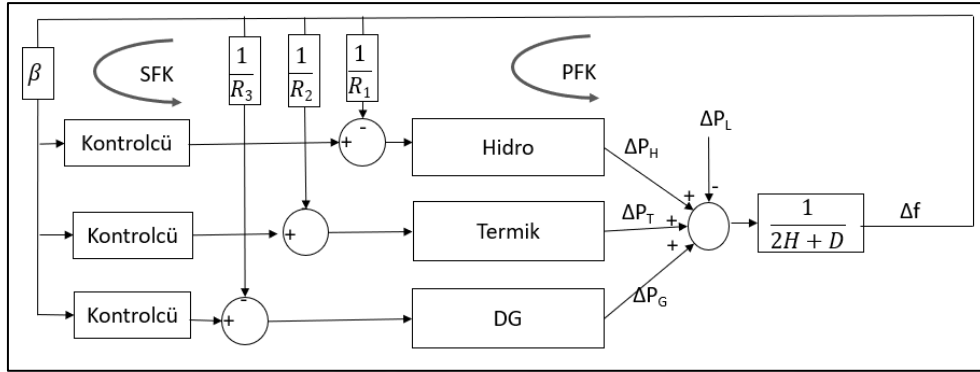
Algoritma	Bölge	Talep katılımı	Frekans değişimi (Hz)	Maksimum frekans (Hz)	Oturma zamanı (sn)	Talep katılımı oranı %	Performans skoru
GWO analizleri	1. Bölge	Yok	-0,61	60,02	6,44	-	0.00258
		Var	-0,31	60,01	3,94	0.0077	
	2. bölge	Yok	-0,29	-	8,724	-	
		Var	-0,10	-	4,20	0.0077	
EPO analizleri	1. Bölge	Yok	-0,36	60,04	9,81	-	0.00407
		Var	-0,30	60,01	6,23	0.0085	
	2. bölge	Yok	-0,27	-	10,0	-	
		Var	-0,07	-	7,42	0.0085	
PSO analizleri	1. Bölge	Yok	-0,43	60,001	7,97	-	0,00174
		Var	-0,30	60,002	3,34	0.00826	
	2. bölge	Yok	-0,20	-	6,44	-	
		Var	-0,06	-	2,93	0.00826	

Yapılan analiz sonuçlarında göre, ilk kez YFK çalışmalarında kullanılan EPO algoritmasının başarılı sonuçlar verebildiği, ancak daha önceki çalışılan yöntemlerle karşılaştırıldığında zayıf yönlerin olduğu ortaya koyulmuştur. Yük frekans kontrol çalışmalarında ilk kez test edilen EPO algoritmasının diğer yöntemler ile karşılaştırıldığında başarılı olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle talep katılımının olmadığı durumlarda, yük değişiminin olduğu bölgede frekans düşümü daha az olmaktadır. Ancak frekans salınımı daha yüksek ve uzun sürmektedir. GWO ve PSO ile yapılan analizlerde frekans salınımı yüksek olsa da sistem kararlılığa daha hızlı ulaşmaktadır. Her üç yöntemin talep katılım sonucu incelendiğinde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Beklenildiği üzere aşırı düşük frekans koşullarında talep katılımı sistem kararlılığını artırmaktadır. İki bölgeli güç sistemlerinde talep katılımının sağlanması diğer bölgedeki frekans kararlılığını da artırmaktadır.

3.2.2. Türkiye şebekesinde artan YEK koşullarının farklı şebeke durumlarında incelenmesi ve frekans kontrolüne optimum talep katılımının belirlenmesi

Bu bölümde tezin esas hedefi doğrultusunda, Türkiye şebekesi için önümüzde yıllarda planlanan YEK'lerin artışının neden olması beklenen düşük rezerv koşullarında talep katılımının etkisi gösterilmiştir. Bu maksatla öncelikle Türkiye şebekesinin eşdeğer şebeke YFK modeli oluşturulmuştur. Şekil 3.26'de verilen eşdeğer şebeke modeli kullanılarak; Türkiye şebekesinde mevcut durumda primer ve sekonder frekans kontrolü konvansiyonel

hidro, termik ve doğalgaz santrallerinden sağlanacak şekilde ele alınmıştır. Şebekenin kaynak bazlı zaman sabitleri, hız değişim katsayıları ile şebekenin toplam eşdeğer atalet katsayısı Eşitlik (3.5)'e göre belirlenmektedir. Şebekede rüzgar ve güneş enerji kaynaklarının üretim profilinde artışıyla şebekenin döner rezervi ve eşdeğer ataleti azalacaktır.



Şekil 3.26. Türkiye şebekesi eş değeri YFK modeli

Eşdeğer YFK blok diyagramına göre şebekenin frekans değişimi Eş. (3.11)'de verilmiştir. Şebekede meydana gelebilecek yük dengesizliğinde (ΔP_L), şebekede yer alan döner rezervin (ΔP_m) tepkisi sonrasında oluşacak frekans değişimi (Δf) matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$\Delta P_m(s) - \Delta P_L(s) = \frac{\Delta f(s)}{2H(s) + D} \quad (3.11)$$

Türkiye şebekesinde artan YEK koşullarını en iyi şekilde test edilmesi ve talep katılım etkisinin doğru şekilde analiz edilebilmesi amacıyla geçmiş şebeke üretim ve yük koşulları incelenmiştir. Bu kapsamda üç temel şebeke dönemi referans alınmıştır:

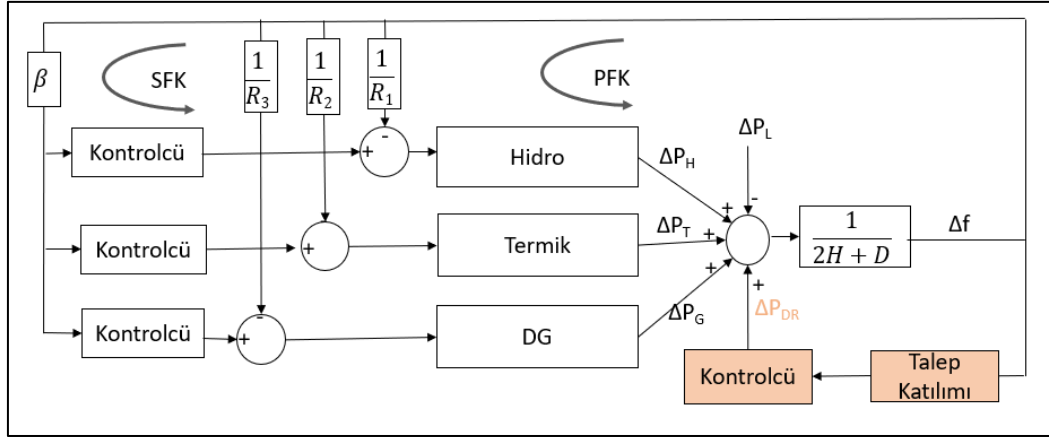
1. Senaryo 1 (Minimum tüketim durumu): Şebekede elektrik talebinin en düşük olduğu koşullar referans alınmıştır. Talebin düşük olduğu dönemlerde enerji arz profilinin YEK üretimlerinden karşılanması beklenmektedir. Bunun temel nedeni konvansiyonel kaynaklı üretimlerin piyasa fiyatlarına bağlı olarak enerji arzında yer alamayacak; konvansiyonel kaynaklardan elde edilebilecek döner rezerv azalabilecektir. Şebekenin temel baz yük ihtiyacının özellikle RES ve GES'lerden sağlandığı koşullarda şebekenin esneklik potansiyeli azalacaktır. Gelecek yıllarda artan YEK koşullarında

minimum tüketim şebeke koşullarında talep katılımı etkisinin incelenmesi için uygun olduğu değerlendirilmiştir.

2. Senaryo 2 (Maksimum RES ve GES üretim durumu): Günümüzde ve gelecek yıllarda öncelikli olarak rüzgar ve güneş kaynaklı üretimlerin artacağı öngörülmektedir. Bu nedenle rüzgar ve güneş üretimlerinin artması diğer konvansiyonel baz üretim kaynaklarının enerji arz potansiyeli azalacaktır. Referans alınan mevcut şebeke durumunda enerji arzının %25'i RES ve GES üretimlerinden karşılanmakta olup, RES ve GES katılım oranının en yüksek olduğu şebeke durumudur.
3. Senaryo 3 (Maksimum YEK üretim durumu): RES ve GES üretimleri ile akarsu ve barajlı hidroelektrik, jeotermal,biyokütle vb. tüm yenilenebilir enerji üretimlerinin en yüksek olduğu şebeke durumudur. Sıfır karbon hedefi doğrultusunda hedeflenen elektrik talebinin YEK'lerden karşılanabileceği şebeke koşullarında talep katılımının etkisinin incelenmesi amacıyla bu şebeke durumu seçilmiştir.

Bu üç temel şebeke durumu için öncelikle yük frekans kontrol parametreleri hesaplanmıştır. Her senaryo durumunda ilk olarak mevcut durumdaki frekans değişim etkisi incelenmiştir. Daha sonra sırasıyla RES ve GES kapasite artış koşullarına göre her senaryonun düşük rezerv koşulları belirlenmiştir. Diğer bir ifadeyle her şebeke senaryosunda ilave üç farklı RES/GES kapasite durumu incelenmiş; toplamda 12 farklı şebeke senaryosu test edilmiştir. Her şebeke senaryosunda artan YEK koşullarında frekans kontrolünün sağlanmasında talep katılımının sağlanması ve optimum talep katılımının belirlenmesi amacıyla Türkiye şebekesi yük frekans modeli üzerinde PSO, GWO ve EPO metasezgisel yöntemlerle optimum talep katılımı tespit edilmiştir. Mevcut durumda Türkiye şebekesinde sekonder frekans kontrolü bölgesel kontrol hatasının oransal PI kontrolcüler aracılığı ile sağlanmaktadır. Bu çalışmada sekonder frekans kontrolü PI katsayıları sabit olarak ele alınmıştır. Talep katılımının yük frekans kontrolüne katılımıyla frekans değişimi matematiksel olarak Eş. (3.12)'de verilmiş olup, talep katılım kontrolüyle birlikte oluşan yük frekans kontrol şeması Şekil 3.27'te verilmiştir.

$$\Delta P_m(s) - \Delta P_L(s) + \Delta P_{TK}(s) = \frac{\Delta f(s)}{2H(s) + D} \quad (3.12)$$

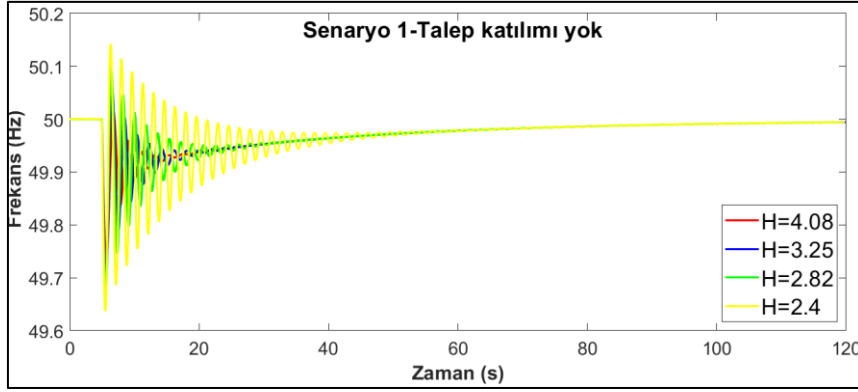


Şekil 3.27. Talep katılımı yük frekans kontrol modeli

Yapılan analizler neticesinde YEK artışına göre şebekede meydana gelebilecek %10'luk bir yük dengesizliğinde ($\Delta P_L = 0.1$) şebekede oluşacak en düşük frekans değeri (Fnadir), birim zamandaki frekans değişim oranı (RoCoF), frekans aşımı (overshoot), frekans değişimi (Δf) ile talep katılım oranı (TK) sonuçları incelenmiştir. Talep katılımının frekans değişiminin belirlenen frekans set değerine göre aktif hale gelmektedir. Buna göre -200mHz'lik frekans set değerine göre optimum talep katılımı oranı ve kontrolcü katsayıları ayrı ayrı analiz edilmiştir.

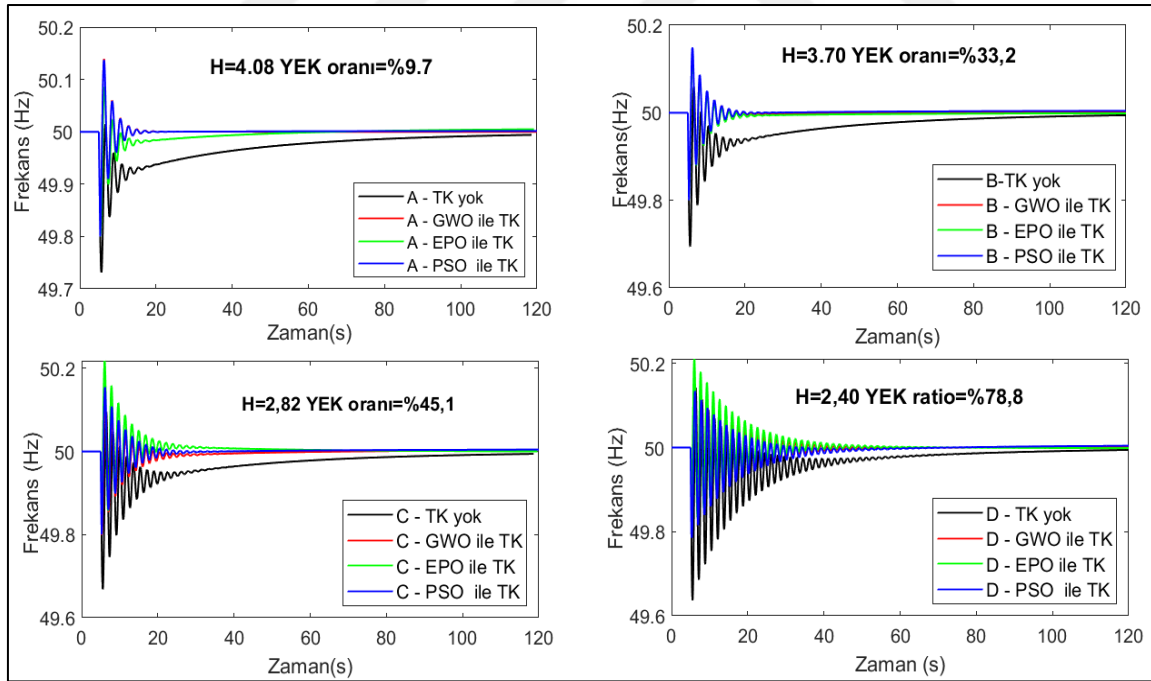
Senaryo 1 analiz sonuçları

Senaryo 1'de, mevcut şebeke üretimindeki YEK oranı %9,7'dir. Mevcut şebeke üretimi kaynaklarının, öncelikle termal konvansiyonel kaynaklar, sırasıyla rüzgar ve/veya güneş üretimi olacağı kabul edilerek YEK katılım oranı artırılmış, bu koşullara göre şebeke atalet katsayıları hesaplanmıştır. Talep katılımının uygulanmadan önce azalan şebeke ataletiyle meydana gelen yük dengesizliğinde şebekenin frekans değişimi Şekil 3.28'de verilmiştir. Aynı yük dengesizlik koşullarında şebekenin frekans değişim hızı ile frekans değişimi büyük oranda değişmektedir.



Şekil 3.28. Senaryo 1-Değişen şebeke ataleti ile frekans değişimi

Senaryo 1 için ele alınan şebeke koşullarında talep katılımıyla şebekenin frekans değişimleri Şekil 3.29’da verilmiştir. Temel olarak her şebeke koşulunda frekans kontrolüne ya da hızlı düşük frekans değişimi koşullarında talep katılımının pozitif katkısı büyük oranda görülmektedir. 300 mHz’den büyük frekans değişimlerinin meydana geldiği koşullarda talep katılımıyla frekans nominal seviyelere daha hızlı gelebilmektedir.



Şekil 3.29. Senaryo 1- Minimum yük durumunda talep katılımının şebeke frekans değişimine etkisi

Şebeke ataletinin katsayısının 2,8’in üzerinde olduğu koşullarda talep katılımıyla yaklaşık 15-20 sn içerisinde şebeke frekans kararlılığının sağlanabilmektedir. Şebeke ataletinin katsayısının daha düşük olduğu durumlarda ise talep katılımıyla frekans değişimi

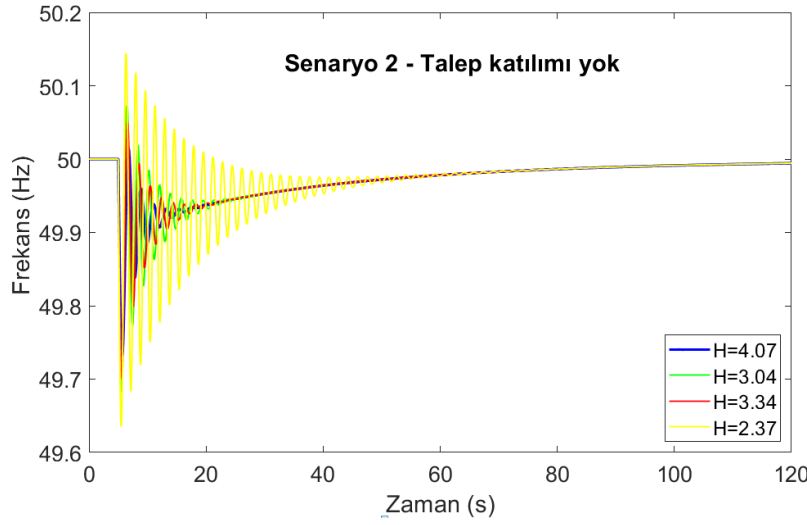
azaltılmakta ancak yüksek frekans salınımları ile frekansın denge noktasına gelme süresi artmaktadır. Çizelge 3.10'de Senaryo 1 analiz sonuçları verilmiştir. Uygulanan metasezgisel yöntemler ile her senaryo için elde edilen optimum talep katılımı oranı tespit edilmiştir. Senaryo 1'de referans koşullarda toplam talebe göre frekans kontrolüne katılabilecek optimum talep katılım oranının %3-%6 seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir.

Çizelge 3.10. Senaryo 1 analiz sonuçları

Sıra no	H _{şebeke}	YEK Oranı	Metot	F _{nadir} (Hz)	Δf (Hz)	Frekans aşımı (Hz)	TK oranı (%)
A	4,08	%9,7	TK Yok	49,731	-0,269	50,014	-
			PSO	49,80	-0,200	50,137	4,90
			GWO	49,80	-0,200	50,140	3,04
			EPO	49,80	-0,200	50,085	3,50
B	3,25	%33,2	TK Yok	49,695	-0,305	50,059	-
			PSO	49,80	-0,200	50,148	6,50
			GWO	49,80	-0,200	50,145	4,70
			EPO	49,80	-0,200	50,136	4,40
C	2,82	%45,1	TK Yok	49,668	-0,332	50,095	-
			PSO	49,80	-0,200	50,154	4,73
			GWO	49,798	-0,202	50,132	3,90
			EPO	49,80	-0,200	50,218	6,10
D	2,40	%78,8	TK Yok	49,636	-0,364	50,142	-
			PSO	49,789	-0,211	50,134	3,34
			GWO	49,80	-0,200	50,170	4,74
			EPO	49,80	-0,200	50,210	5,62

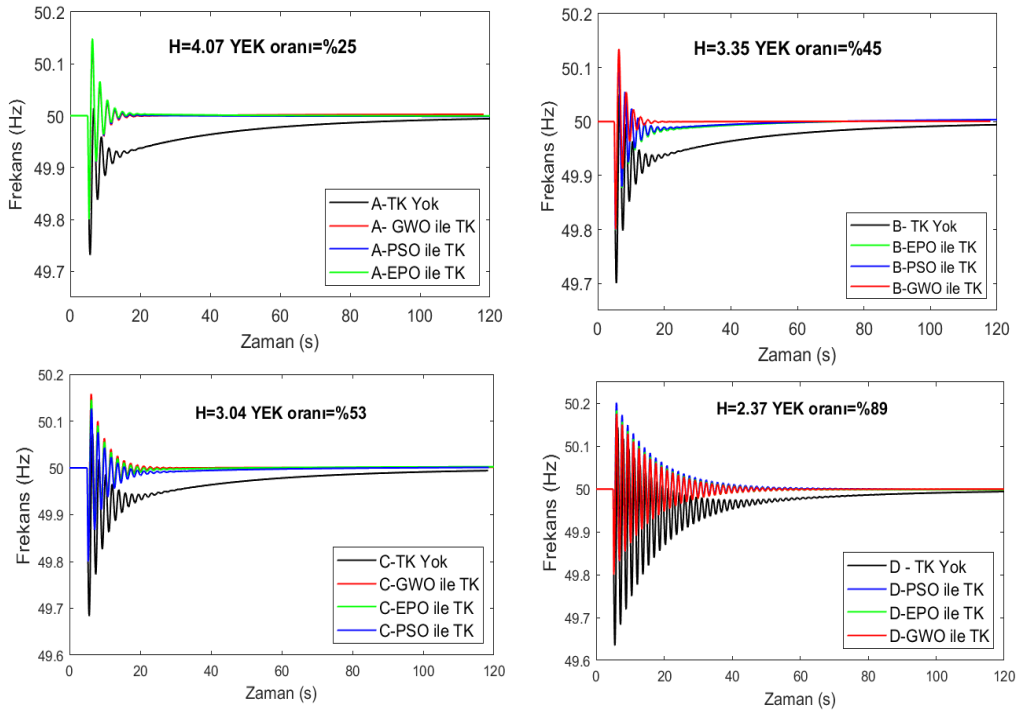
Senaryo 2 analiz sonuçları

Senaryo 2'de, mevcut şebeke üretimindeki YEK oranı %25'dir. Ancak mevcut şebeke üretimi profili koşullarında hidroelektrik üretimlerin yüksek olduğu bir dönem olması nedeniyle şebeke atalet katsayısı 4'ün üzerindedir. Benzer şekilde YEK oranını artırdığımızda atalet katsayısı Senaryo 1'e göre kısmen azalmaktadır. Benzer şekilde talep katılımının uygulanmadan önce azalan şebeke ataletiyle meydana gelen yük dengesizliğinde şebekenin frekans değişimi Şekil 3.30'da verilmiştir. Aynı yük dengesizlik koşullarında şebekenin frekans değişim hızı ile frekans değişimi büyük oranda değişmektedir.



Şekil 3.30. Senaryo 2- Değişen şebeke ataleti ile frekans değişimi

Senaryo 2 için ele alınan şebeke koşullarında talep katılımıyla şebekenin frekans değişimleri Şekil 3.31’ de, analiz sonuçları Çizelge 3.11’de verilmiştir. Şebekedeki YEK katılım oranı Senaryo 1’e göre fazla olsa da genel olarak frekans kararlılık seviyeleri birbirine yakın sonuçlanmıştır. Bunun temel nedeni Senaryo 2 şebeke koşullarındaki hidroelektrik kaynak potansiyelidir.



Şekil 3.31. Senaryo 2- Maksimum RES ve GES koşullarında talep katılımının şebeke frekans değişimine etkisi

Şebekedeki YEK potansiyeli artarken şebeke ataleti yenilenebilir konvansiyonel kaynaklardan sağlanabilmektedir. Senaryo 2 için yapılan optimum talep katılım seviyeleri toplam talebe göre frekans kontrolüne katılabilecek optimum talep katılım oranının %3-%7 seviyelerinde olduğu görülmektedir. Senaryo 1’de olduğu gibi, şebeke ataletinin katsayısının 2,5’in altında olduğunda frekans salınımı ile frekansın dengelenme süresi artmaktadır. Şekil 3.31’e göre talep katılımının olmadığı koşullarda şebeke ataletinin azalmasıyla frekans değişim genliği artmaktadır. YEK oranının %25 ve şebeke ataletinin 4,07 olduğu durumda F_{nadir} 49,731 Hz olup, bu değer YEK oranının %89 ve şebeke ataletinin 2,37 olduğunda F_{nadir} 49,683 Hz olmaktadır.

Çizelge 3.11. Senaryo 2 analiz sonuçları

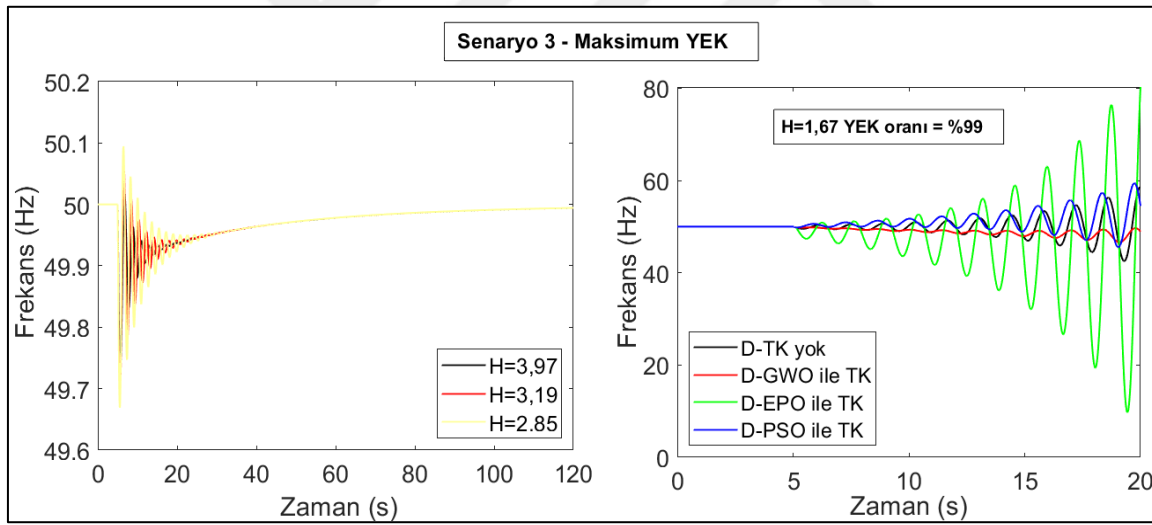
Sıra no	$H_{şebeke}$	YEK oranı	Metot	F_{nadir} (Hz)	Δf (Hz)	Frekans aşımı (Hz)	TK oranı (%)
A	4.07	%25	TK yok	49,731	-0,269	0,014	-
			PSO	49,80	-0,200	0,142	4,04
			GWO	49,80	-0,200	0,134	3,68
			EPO	49,80	-0,200	0,148	3,20
B	3.35	%45	TK yok	49,70	-0,300	0,052	-
			PSO	49,80	-0,200	0,112	3,82
			GWO	49,80	-0,200	0,134	5,02
			EPO	49,80	-0,200	0,104	3,59
C	3.04	%53	TK yok	49,683	-0,317	0,121	-
			PSO	49,80	-0,200	0,126	4,14
			GWO	49,80	-0,200	0,157	4,87
			EPO	49,80	-0,200	0,145	4,56
D	2.37	%89	TK yok	49,637	-0,363	0,144	-
			PSO	49,80	-0,200	0,202	5,42
			GWO	49,80	-0,200	0,176	5,26
			EPO	49,80	-0,200	0,84	5,00

Senaryo 2’ün sonuçlarının verildiği Çizelge 3.11 incelendiğinde; şebeke ataletinin en düşük, 2,37 olduğu durumda EPO ile belirlenen talep katılım oranı %5,00 iken, GWO ile %5,26, PSO ile %5,42 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde şebeke ataletinin 3,04 olduğu durumda EPO ile belirlenen talep katılım oranı %4,56 iken, GWO ile %4,87, PSO ile %4,14; şebeke ataletinin 3,35 olduğu durumda EPO ile belirlenen talep katılım oranı %3,59 iken, GWO ile %5,02, PSO ile %3,82 ve şebeke ataletinin 4,07 olduğu durumda EPO ile belirlenen talep

katılım oranı %3,20 iken, GWO ile %3,68, PSO ile %4,04'tür. Şebeke ataleti azaldıkça belirlenen talep katılım oranı artmaktadır.

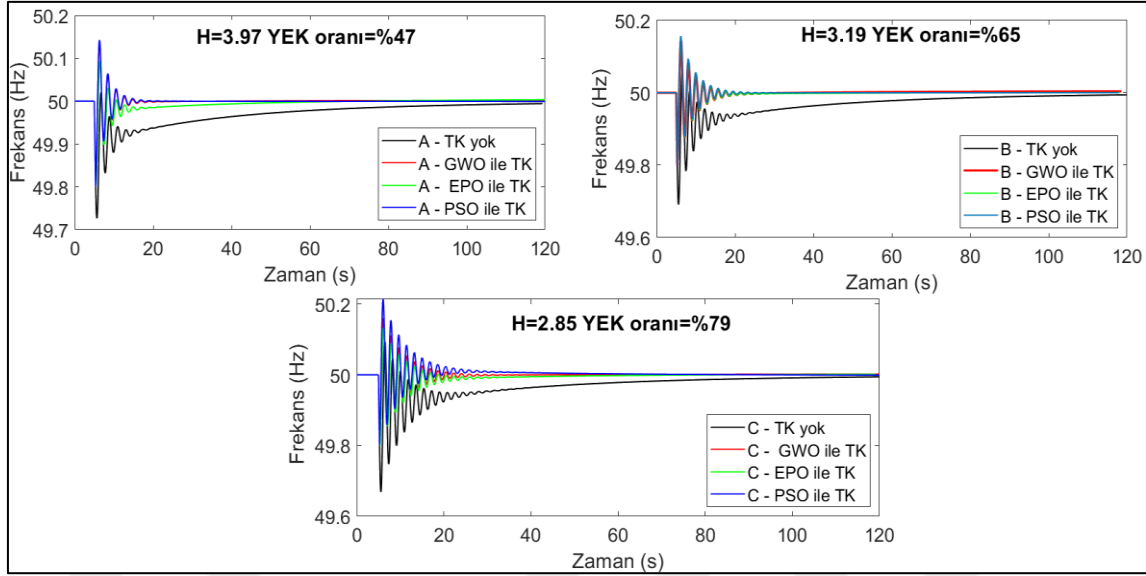
Senaryo 3 analiz sonuçları

Senaryo 3'de, mevcut şebeke üretimindeki YEK oranı %47'dir ve aynı zamanda YEK üretimlerinin en yüksek olduğu şebeke durumudur. Senaryo 2'ye göre temel fark; hidroelektrik kaynak üretimlerin daha az ve diğer termal kaynak üretimlerinin yüksek olmasıdır. Senaryo 1 ve 2'ye benzer şekilde YEK oranını artırdığımızda atalet katsayısı termal kaynakların kapasitesi oranında RES ve GES dahil edildiği durumda şebekenin atalet katsayısı büyük ölçüde azalmaktadır. Buna göre talep katılımının uygulanmadan önce azalan şebeke ataletiyle meydana gelen yük dengesizliğinde şebekenin frekans değişimi Şekil 3.32'de verilmiştir.



Şekil 3.32. Senaryo 3-Değişen şebeke ataleti ile frekans değişimi

Önceki senaryolarda olduğu gibi şebeke atalet katsayısı azalmasıyla şebekenin frekans değişimi artmaktadır. Ancak Şekil 3.33'te görüldüğü üzere talep katılımıyla birlikte 2,5 ve üzeri olduğu koşullarda şebekenin frekans kararlılığı artırılmaktadır. Ancak Senaryo 3'te, şebeke arzının tamamen YEK üretimlerden sağlandığı durumda herhangi bir dengesizlik durumunda mevcut rezervler frekans kararlılığını sağlayamamaktadır.



Şekil 3.33. Senaryo 3 – Maksimum YEK koşullarında talep katılımının şebeke frekans değişimine etkisi

Çizelge 3.12’de Senaryo 3 analiz sonuçları verilmiş, şebekenin değişen atalet katsayısına göre talep katılım oranı belirlenmiştir. Önceki sonuçlarda olduğu gibi atalet katsayısının 2,5 ve üzeri koşullarında toplam talebin %3-%7 oranında optimum talep katılım oranı belirlenmiştir. Ancak Senaryo 3’te, tamamen YEK üretimi koşullarında, konvansiyonel YEK oranı düşük olması nedeniyle meydana gelebilecek dengesizlik durumunda mevcut frekans kontrol rezervleri ile talep katılımı yetersiz kalmaktadır.

Çizelge 3.12. Senaryo 3 analiz sonuçları

Sıra No	H _{şebeke}	YEK oranı	Metot	F _{nadir} (Hz)	Δf (Hz)	Frekans aşımı (Hz)	TK oranı (%)
A	3.97	%47	TK Yok	49,726	-0,274	50,02	-
			PSO	49,80	-0,200	50,142	4,99
			GWO	49,80	-0,200	50,134	4,79
			EPO	49,80	-0,200	50,093	3,65
B	3.19	%65	TK Yok	49,691	-0,309	50,064	-
			PSO	49,80	-0,200	50,146	5,97
			GWO	49,80	-0,200	50,144	4,69

Çizelge 3.12. (devam) Senaryo 3 analiz sonuçları

			EPO	49,80	-50,000	50,156	4,67
C	2.85	%79	TK Yok	49,668	-0,332	50,07	-
			PSO	49,80	-0,200	50,213	6,10
			GWO	49,80	-0,200	50,159	6,67
			EPO	49,80	-0,200	50,133	4,00

Senaryo 3'te YEK oranının %99 ve şebeke ataletinin 1,67 olarak hesaplandığı, yani şebekede kömür, doğal gaz santrallerinin bulunmadığı ve konvansiyonel üretim olarak yalnızca hidro elektrik santrallerin bulunduğu koşullarda şebekede meydana gelebilecek geçici hal koşullarında şebeke kararsızlığı oluşmaktadır. Bu koşullarda şebekenin işletme koşullarının sağlanabilmesi riskli olup, şebeke operatörleri bu durumlar için ilave farklı hizmetleri emre amade olmasını sağlayacaktır. Türkiye şebekesi esas alınarak farklı YEK kapasitesi ve işletme koşullarına benzer senaryolar oluşturularak frekans kontrolünde optimum talep katılımı ve etkileri geliştirilen metasezgisel yöntemlerle ortaya koyulmuştur. Referans alınan şebeke senaryolarında RES ve GES üretimlerinin artmasıyla şebekenin düşük rezerv potansiyeli azalmaktadır. Bu nedenle meydana gelebilecek yük dengesizliğinde şebekenin frekans tepkisi yetersiz kalmaktadır. Yapılan analiz sonuçlarına göre işletme koşullarında şebeke atalet katsayısının 2,4'ün altında olduğunda frekans kararlılığının oldukça risk altında olduğu söylenebilir.

Yapılan analizlerde, üç farklı yöntem ile talep katılım oranı hesaplanmıştır. Tez kapsamında geliştirilen EPO algoritması diğer yöntemlere göre daha düşük oranda talep katılımıyla frekans kontrolünü sağlayabilmekte ve frekans aşımı diğer yöntemlere göre daha düşük görülmektedir. Senaryo 3'ün sonuçlarının verildiği Çizelge 3.12 dikkate alındığında; şebeke ataletinin 3,97 olduğu durumda EPO ile belirlenen talep katılım oranı %3,65 iken, GWO ile %4,79, PSO ile %4,99 olarak hesaplanmıştır. Benzer şekilde şebeke ataletinin 3,19 olduğu durumda EPO ile belirlenen talep katılım oranı %4,67 iken, GWO ile %4,69, PSO ile %5,97; şebeke ataletinin 2,85 olduğu durumda EPO ile belirlenen talep katılım oranı %4,0 iken, GWO ile %6,67, PSO ile %6,10'dur.

Artan YEK'lerle beraber şebekenin ihtiyaç duyacağı esneklik ihtiyacında talep katılımının önemli bir fayda sağlayacağı ortaya koyulmuştur. Farklı metasezgisel yöntemlerle elde edilen sonuçlara göre şebekenin talep gücüne bağlı olarak, frekans kontrol hizmetlerinde belirli frekans eşik değerlerinde yaklaşık %3 ile %7 oranında talep katılımının önemli ölçüde fayda sağlayacağı görülmüştür. Ancak enerji arzının tamamen YEK'lerden sağlandığı ve RES ve GES üretimlerinin fazla olduğu şebeke koşullarında rezerv ihtiyacını mevcut rezerv kontrolleri ile talep katılımıyla mümkün değildir. Bu nedenle işletme koşullarında yapılan analizlerde öngörülen şebeke atalet katsayısının asgari 2,4 olacak şekilde konvansiyonel/döner rezerv kaynakların bulundurulması ya da benzer hızlı frekans tepkisi verebilecek depolama sistemleri gibi teknolojilere yer verilmelidir.

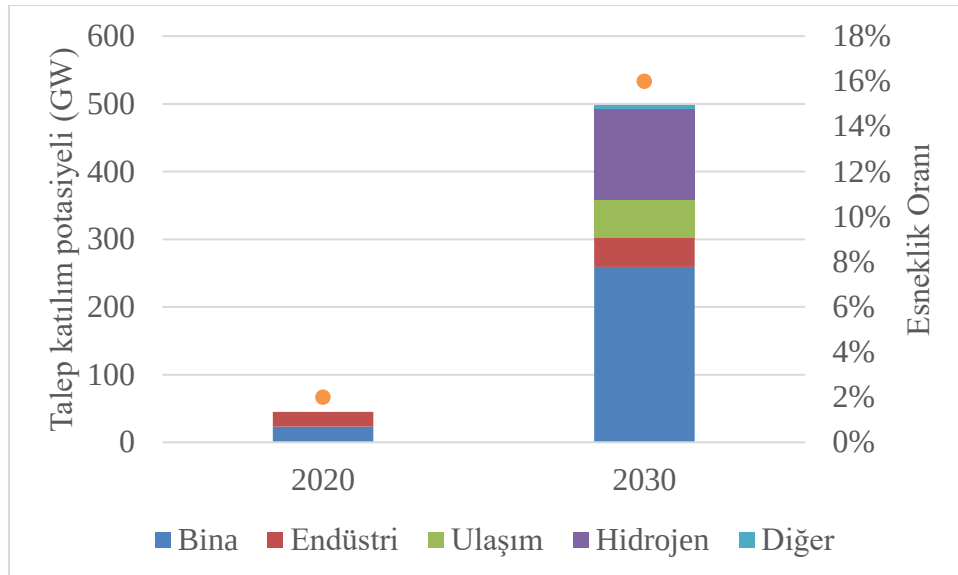




4. POLİTİKA ÖNERİLERİ

Bu bölümde, Türkiye’deki talep katılım uygulamalarına yönelik mevcut uygulamadaki mevzuat düzenlemeleri ele alınarak, tez kapsamında yapılan çalışmalarına göre politika ve uygulama yöntemlerine yönelik öneriler verilecektir.

Küresel enerji politikaları odağında, gelecek yıllarda elektrik talebinin endüstri ve ulaşımdaki değişimlerle birlikte daha çok artacağı yönündedir. Bu artışa ayrıca ısınma sistemlerinin de fosil yakıtlar yerine elektrik kullanımına geçildiğinde elektrik talebi daha da çok artacaktır. Buna göre öncelikle dağıtım şebeke alt yapısında hat ve trafo yatırımlarıyla kapasitelerinin büyütülmesi, iletim şebekesinde ise elektrifikasyon mimarisinin genişletilmesi gerekmektedir. Bu koşulların sağlanabilmesi için tüketici odaklı üretim ve talep katılım hizmetleri gibi teknolojilerin kullanımı sürecin hızlandırılması maliyetli yeni iletim ve dağıtım altyapısına olan ihtiyacın azaltılmasına yardımcı olabilir. EIA, 2030 yılı net sıfır karbon hedeflerinde 500 GW’lık kapasite öngöründüğü ancak bu rakamın oldukça gerisinde kaldığını ifade etmektedir. Şekil 4.1.’de net sıfır karbon emisyonu 2020 ve 2030 yıllar hedefleri kapsamında esneklik ihtiyacına göre sağlanması gereken talep katılımı ve esneklik ihtiyacındaki pay oranını göstermektedir [178].



Şekil 4.1. 2020 ve 2030 yılları için talep katılımı hedefleri

Avustralya’da, ulusal elektrik piyasasında esneklik hizmeti sağlayabilmek için toptan talep katılım mekanizması 2020 yılında kurulmuş ve 2021 yılında özel şirketler tarafından bu hizmet faaliyetleri başlatmıştır. Bu hizmet temel olarak gün öncesinden tüketicilerin bireysel ya da toplayıcılar vasıtasıyla katılabilmektedir. Avusturalya şebeke esnekliğinin talep katılımı, depolama gibi hizmetlerden sağlayabilme için piyasa uzlaştırma süresinin 30 dakikadan 5 dakikaya indirmiştir. Bu sayede hızlı cevap veren sistemlerin kısa süreli olarak kullanılmasının hem işletme hem de piyasa açısından imkan sağlamıştır [179].

Brezilya’da talep katılımı uygulamalarını yaygınlaştırmaktadır. 2015 yılında itibaren tarife odaklı programlarıyla teşvik ve fiyat tabanlı talep kontrol programları uygulanmaktadır. Bu sayede yeni alt yapı yatırımları yapmak yerine tüketimin yönetilmesini sağlamaktadır. Bunun uygulanması için elektrik üretim koşullarına göre oluşan piyasa fiyatlarının değişimini tüketicilere gösteren tarife bayrakları tanımları yapılmıştır. Yüksek, orta ve düşük üretim seviyelerine göre yeşil, sarı ve kırmızı bayrak alanları tanımlanmış; bu değerler aylık olarak güncellenmektedir. Bu uygulama ile talep tepkisinin sistemin işleyişi üzerinde toplam sistem maliyetleri azalması, su rezervlerinin kontrol edilmesi, sistem kayıplarının azalması gibi gerçekten olumlu etkileri olduğu görülmektedir [180, 181].

Avrupa’da her ülkenin talep katılımına ilişkin farklı uygulama kuralları vardır. Ancak Avrupa Birliği üye ülkelere talep katılımı ve enerji verimliliği direktiflerinde “Üye devletlerin, iletim ve dağıtım tarifelerinde talep katılımı ve talep toplayıcılık faaliyetlerini, dengeleme piyasalarına ve yan hizmet alımlarına katılımını engelleyebilecek teşviklerin kaldırılmasını” istemektedir. Avrupa şebekesi birbirine bağlı kıtasal şebeke olarak işletilmesi nedeniyle talep toplayıcı piyasaları kurulabilir [182]. Avrupa ülkelerinde talep katılımı faaliyetlerini üretim kaynaklarına benzer şekilde yoğun olarak yan hizmetler kapsamında şekillendirmiştir. Talep katılımı Fransa’da tersiyer rezerv, İngiltere’de tüketim kontrolü, kısa süreli işletme rezervi, Belçika kesilebilir yük, strateji talep yük rezervi, Finlandiya ve İsveç’de otomatik olarak primer frekans kontrolünde kullanılmaktadır. Sekonder rezerv kontrolünde Fransa, Almanya, İngiltere, Hollanda, İsveç, İsviçre talep katılımında farklı aktivasyon süreleri ve asgari rezerv güçlere göre uygulamaktadır[183]. Fransa talep katılım faaliyetlerini en yaygın olarak uygulayan ülkelerin arasında olup, talep tarafı uygulama geçmişi 1950 yıllarına dayanmaktadır. Düşük fiyatlı elektrik kullanımı, planlı tüketim ya da planlı kesinti programları gibi yöntemler ile teşvikler oluşturulmaktadır. Uyguladık kanun tasarımlarında bireysel ve toplayıcılar aracılığıyla tüketim azaltımı hizmeti

sağlanabilir. Norveç'te açık olarak uygulamada olan bir düzenle bulunmamaktadır ancak mevcut enerji piyasaları bakımında dengelemeden sorumlu olan birimlerin tersiyer rezerv hizmeti olarak sağlayabilir [184]. Amerika'nın talep katılım pazarı oldukça büyük ve büyümeye de devam etmesi beklenmektedir. Bunun nedeni ABD elektrik arzının %60'ını kapsayan, her büyüklükteki oyuncunun toptan elektrik piyasalarına katılmasına olanak tanıyan yeni politikaların uygulanmasıdır. Başta konut tüketicileri en büyük katılımı oluştururken, büyük tüketiciler esneklik ve teşvik bazlı uygulamalar katılmaktadır. İletim ve dağıtım şebekeleri kapsayacak şekilde enerji, rezerv, kapasite ve düzenleme faaliyetleri kapsamında dört farklı kategoride talep katılım faaliyetleri uygulanmaktadır [185].

Türkiye'de talep katılımı uygulamasına ilişkin mevcut yasal düzenlemeler incelendiğinde, iletim şebekesine bağlı tüketim tesisleri tarafından isteğe bağlı olarak teklif edilen ve şebeke işletmeciliği açısından tanımlı acil durum önlemleri kapsamında sistem frekansının kritik seviyeye düşmesini önlemek amacıyla anlık talep kontrol röleleri vasıtasıyla otomatik olarak yüklerin azaltılması 2021 yılında anlık talep kontrol yedeği hizmeti bulunmaktadır. Temel olarak bu hizmet şebeke işletmecisi tarafından belirli dönemlerde, yani talebin yüksek olduğu ancak arz probleminin olduğu durumlarda yapılacak ihale kapsamında tüketicilerin kabul ettiği yük miktarları kesilebilecektir. Teorik olarak, bu hizmet manuel tersiyer rezerv kaynağı olarak düşünülebilir. Bu uygulama için 2021 yılından itibaren şebeke operatörü tarafından dönemsel ihalesi yapılmış olup, piyasa tasarımı ve gelir modeli bakımından tüketiciler tarafından yetersiz görülmesi nedeniyle uygulaması gerçekleşmemiştir. Diğer incelenen ülkelere bakıldığında talep katılımı uygulamaları açısından oldukça geri kalınmış olduğu söylenebilir. Ancak 2022 yılında 5510 sayılı Elektrik piyasası Kanunu'na talep katılımı faaliyetlerinin toplayıcılık kapsamında yapılması amacıyla lisans verilmesi ve uygulanmasına yönelik hükümler eklenmiştir. Bu yeni düzenlemeyle birlikte tanımlanacak yeni talep katılımı modellerinin gelişimi sağlanabilir.

Bu yasal düzenlemeler çerçevesinde, tez kapsamında yapılan veri analitiği ve şebeke analizlerine göre Türkiye'de uygulanabilecek talep katılım tasarım önerileri aşağıdaki gibi sıralayabiliriz.

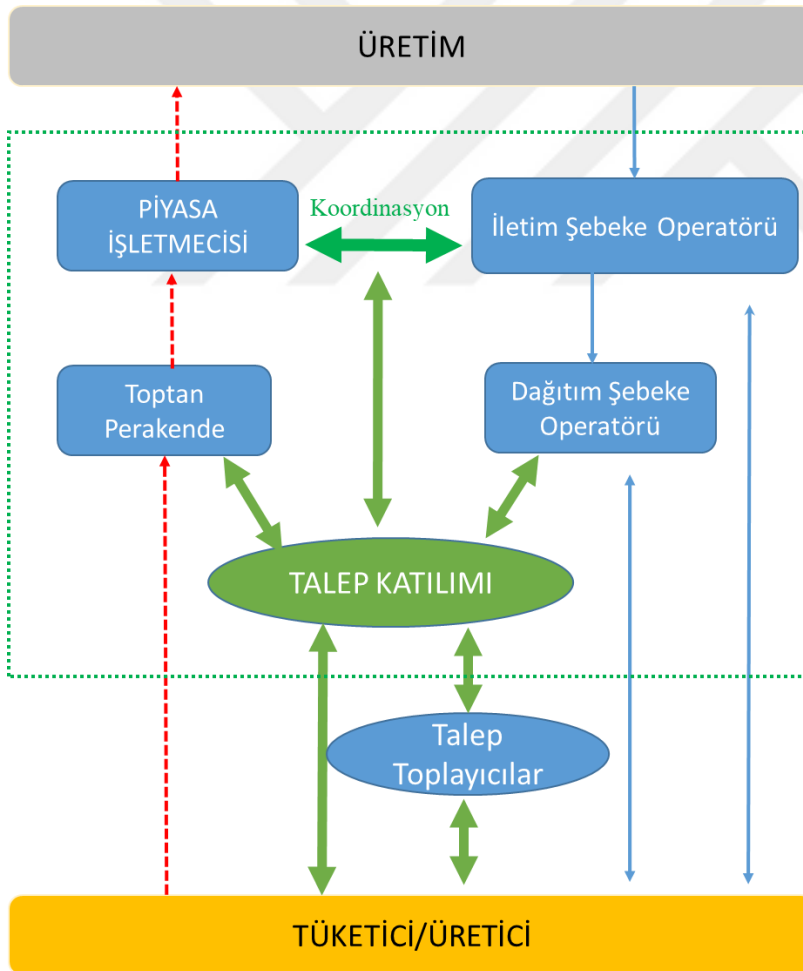
- Mevcut yasal düzenlemeler açısından bakıldığında talep katılımının yalnızca iletim bağlı tüketicilerin acil durumlarda frekans kararlılığının korunması amacına yönelik uygulanacaktır. Buna göre bireysel ya da toplayıcılık aracılığıyla yapılan faaliyetler yine

sadece büyük tüketicilerin kontrolü sağlanabilecektir. Bölüm 2.4.3'te yapılan incelemelerde; sektörel olarak farklılıklar olsa da toplamda iletme bağlı endüstriyel tüketim portföyünün 4,5 GW olduğu belirtilmiş, özellikle demir çelik ve çimento tüketicilerinin 2,5 GW olduğu gözlemlenmiştir. Yine demir çelik ve çimento sektörlerinden dokuz farklı tüketicinin saatlik tüketim profilleri dikkate alındığında 500 MW civarında tüketim esnekliği oluşturulabileceği görülmüştür. Bu verilere göre Türkiye'de iletim seviyesinden bir talep katılımının oluşturulmasının önemli bir potansiyel olduğu, sadece anlık talep kontrol yedek hizmetine ilave olarak gelecek yıllarda artan YEK koşullarında enerji ve güç esneklik hizmetlerinin sağlanabileceği talep katılım mekanizmalarının oluşturulabilir.

- İletim bağlı tüketiciler temel olarak büyük güçlü motor yüklerine ve tüketime entegre üretim potansiyeline sahiptir. Buna göre gelecek yıllarda büyük tüketicilerin hem karbon emisyon kurallarına uyması hem de YEK üretimlerine katkı sunacağı düşünüldüğünde; şebeke esnekliği açısından üretim ve talep kontrolü açısından önemli araçlar haline gelebilecektir. Ayrıca sahip oldukları büyük motor yüklerinden azalan şebeke atalet koşullarında olası düşük rezerv koşullarında tüketim tarafında pozitif atalet etkisi oluşturabilirler. Bu bilgiler doğrultusunda Türkiye'de büyük tüketicilerin öncelikle rezerv hizmetlerine odaklı talep katılımı uygulamalarına dahil edilmelidir.
- Türkiye'de iletim şebekesine bağlı durumda işletilen pompa istasyonu ve maden yüklerinin belirli zaman aralıklarında aktif tüketimlerinin olduğu görülmüştür. Bu tip tüketiciler için fiyat tabanlı talep katılımı sağlanması önemli bir fırsat oluşturabilir. Türkiye'de temel fiyat oluşumu arz/talep değişimine göre oluşmakta olup, talebin yüksek arzın kısıtlı olduğu dönemlerde fiyat yükselmektedir. Bu fiyat değişkenliklerine göre oluşturulacak fiyat tabanlı talep katılım mekanizmaları hem toplam enerji maliyetlerinin azalmasına hem de şebeke işletmeciliği açısından yatırım ve rezerv maliyetlerini azaltabilecektir.
- Talep katılımının dağıtım şebekelerine bağlı küçük ve orta ölçekli tüketiciler için Türkiye'de talep katılım uygulamaları açısından önemli fırsat olduğu söylenebilir. Bölüm 2.4.2'de yapılan dağıtım şebekelerinin tüketimlerine göre kümelenmesi ve tüketici gruplarına göre yapılan değerlendirmeler dağıtım şebekesi yükleri için gerekli yasal düzenleme, izleme ve kontrol altyapılarının sağlanması halinde önemli talep katılım

faaliyetleri oluşturabilecektir. Bu kapsamda öncelikle Şekil 4.2’de verilen genel talep katılım mimarisinin oluşturulması önerilmektedir.

- Toplayıcılık faaliyeti bakımında basit düşünüldüğünde Türkiye’deki her dağıtım şebeke operatörünün doğası gereği kendi işletme bölgesinin talep toplayıcısı olduğunu söyleyebiliriz. Buna göre mimari de gösterildiği üzere talep katılımı uygulamaları merkezde olacak şekilde, dağıtık üretim ve tüketicilerin alt seviyeden kapsayarak, dağıtım ve iletim şebekelerinde belirli güç seviyesine göre sınıflandırma yapılarak tüketicilere direk talep katılımı sağlanmalıdır. Küçük ve orta ölçekli tüketicilerin ise öncelikle toplayıcılar üzerinden kontrol ve izlemelerini sağlayarak talep katılımları tedarik edilmelidir.



Şekil 4.2. Talep katılım mimarisi

- Bölüm 3'te yapılan test şebeke modeli ve YFK analizlerinde görüldüğü üzere Türkiye'de YEK kapasitelerinin artışıyla birlikte şebekenin ataleti önemli seviyede düşecektir. Mevcut hidroelektrik potansiyeli dikkate alındığında gelecek yıllarda önemli derecede rezerv desteği sağlanabilecek hidroelektrik üretim tesisi mümkün gözükmemektedir. Bu doğrultuda esneklik araçları bakımından en önemli araçlar depolama ve talep katılımı olacaktır. Artan YEK koşullarında frekans kontrolünün sağlanabilmesi için ihtiyaç duyulan talep katılım oranlarının %4-6 seviyelerinde olduğu öngörülmüştür. Mevcut iletim tüketimi ve dağıtım şebeke yükleri dikkate alındığında bütünsel bir yaklaşım ile bu oranlarda talep katılım rezervlerinin acil durum ya da normal durumlar için oluşturulmalıdır.
- Türkiye'de öncelikle piyasa katılım aralığının 1 saatten daha kısa sürelerle getirilmesi sağlanmalıdır. Talep katılımı hizmetlerinin uygulanmasında önemli hususlar biri ölçüm ve izleme alt yapılarının ileri seviye sağlanabilmesidir. Talep katılımı için baz yükün belirlenme yöntemleri, tepki zamanı ve yeterliliğinin izlenmesi, iletişim gereksinimleri ve standart iletişim protokolleri kullanılmalıdır. Aynı zaman bu hizmetlerin şeffaflığı önemlidir.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Pek çok ülkede olduğu gibi Türkiye’de iklim değişikliği eylem politikaları çerçevesinde önümüzdeki yıllarda fosil kaynaklı enerji üretimleri yerini YEK üretimlerine, akaryakıt tüketimli araçlar yerini elektrikli araçlara bırakacaktır. Bu enerji dönüşümü şebekeye alt yapısal önemli ilave yatırım ihtiyaçları getirmesinin yanında şebeke işletmesini de zorlaştıracaktır. Şebekede artan öncelikle invertör tabanlı RES ve GES olmak üzere YEK’lerin artışı şebekenin ihtiyaç duyacağı döner rezerv, başka bir ifadeyle şebeke ataletinin azalmasına neden olacaktır. Modern güç sistemlerinde değişken üretim koşullarında ve olası arıza koşullarında şebekenin ihtiyaç duyacağı şebeke esnekliğinin sağlanması için yeni esneklik araçları gerekmektedir. Bu ihtiyacın karşılanması için var olan iklim değişikliği politikaları paralelinde enerji depolama sistemleri, enterkonneksiyon bağlantı planlamaları, hidrojen üretimi için elektroliz ve talep katılımı gibi şebeke esneklik uygulamalarının artırılması hedeflenmektedir. Bu tez çalışmasında, artan YEK koşullarında esneklik araçlarından talep katılımıyla şebeke frekans kontrolü incelenmiştir.

Yapılan araştırmalarda, güç sistemlerinde talep katılımı uygulamalarının belirlenmesinde öncelikle mevcut tüketicilerin; tüketici grupları ve tüketim verilerinin analitik yöntemler ile incelenmesi gerektiği, bu sayede var olan tüketime göre talep katılım potansiyeli öngörülebilmektedir. Bu amaçla Türkiye’de iletim ve dağıtım şebekesine bağlı tüketimlerin sektörel ve tüketici türleri dikkate alınarak saatlik geçmiş dönem tüketim verileri analitik olarak ele alınmıştır. İncelenen literatür araştırmalarında tüketicilerin birbiriyle aynı grup altında talep katılımına dahil edilmesinin, bütünsel olarak tüketim kontrolünün etkili olduğu, bu sayede talep katılım uygulamalarının toplayıcılık organizasyonlarıyla işletilebilirliği vurgulanmaktadır. Tüketim zaman serilerinin, veri analitiği yöntemlerine göre incelenerek, tüketici grupları oluşturulması ve şebeke açısından tüketici odaklı baz yük seviyeleri incelenmektedir. Bu doğrultuda, ilk olarak Türkiye’deki dağıtım şebekelerinin işletmecilerinin tüketimlerine göre birbirleri arasında saatlik tüketim benzerliği dikkate alınarak, bölgesel olarak kümelenmesi analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde toplam dağıtım yüklerine göre dağıtım şebekeleri yıllık ve aylık zaman aralıklarında hiyerarşik kümeleme yöntemiyle gruplandırılmıştır. Yapılan analizlere göre Türkiye’de 21 adet dağıtım şebeke işletmecisinin, birbirleri arasında kümeleme limiti 0,1 olarak seçildiğinde, 3 kümede gruplandığı tespit edilmiştir. Daha sonra dağıtım şebekelerinin tüketimleri; ticarethane, sanayi ve mesken tüketici türlerine göre istatistiksel olarak incelenmiştir. Günlük, aylık ve

haftanın günlerine göre yapılan trend analizleri, belirlenen 3 kümede yer alan dağıtım şebekelerindeki tüketici türlerine göre detaylı incelenmiş, saatlik tüketim profilleri gösterilmiştir. Türkiye şebeke yüküne yansıyan toplam dağıtım yükü oranında tüketici türüne göre tüketim seviyeleri elde edilmiştir. Elde edilen istatistiksel sonuçlar ışığında günlük saatlik periyot aralıklarında tahmini kontrol edilebilir ortalama tüketim kapasiteleri tüketici türüne göre öngörülmüştür. Elde edilen sonuçlara göre mesken, ticarethane ve sanayi kapasiteleri farklı olup, toplamda dağıtım şebeke yüklerinden saatlik 550 MW-1750 MW aralığında talep katılım potansiyeli olabileceği ortaya koyulmuştur.

Yapılan araştırmalarda, esas olarak tüketim benzerliği analizinin daha somut belirli bir grup tüketicinin verileriyle ele alınmaktadır. Ancak Türkiye’de talep katılımı kavramının yeni uygulanması, bu uygulama aşamasında öncelikle büyük tüketiciler odaklanması nedeniyle analize uygun veri temini yeterli oranda yapılamamıştır. Bu nedenle bölgesel analiz ile ülke ölçeğinde bir şebekede, dağıtım şebeke yüklerinin talep katılım potansiyeli farklı işletme operatörlerinin birlikte talep kontrolü yapabilirliği ya da farklı şebeke bölgesinde bulunan tüketicilerin birlikte kontrol edilebilirliği gösterilerek öngörülmeye çalışılmıştır. Bu yönüyle analitik çalışma sonuçları önemlidir ancak dağıtım şebekeleri ya da dağıtım şebekeleri tüketicilerine yönelik temel tüketim verilerine dayalı çalışmaların yapılması gerekmektedir. Özellikle aynı dağıtım bölgesinde yer alan tüketici gruplarının tüketime benzerliğinin şebeke kararlılık ihtiyaçları dikkate alınarak, reel şebeke verileri kullanılarak yapılması önerilmektedir.

Talep katılımı açısından büyük tüketicilerin, diğer bir ifadeyle iletim şebekesine bağlı tüketiciler sektörel olarak incelenmiştir. Demir çelik, çimento, maden, otomotiv ve pompa istasyon yüklerini değerlendirilmesi, açık kaynak verileri bulunan belirli sayıda tüketiciler için saatlik bazlı tüketim verileri incelenmiştir. Esas olarak güvenilir veri temini sağlanamadığı için yıllık tüketim profiline göre değerlendirilmeler yapılabilmektedir. Bu nedenle büyük tüketiciler için veri analitik çalışmalarının gerçek tüketim verisiyle detaylı olarak incelenmesi, şebeke yükü açısından baz yük koşullarının tespit edilmesi ve doğrulanması gelecek çalışmalar için önerilmektedir. Var olan veriler ile yapılan analizler sonucunda talep katılımında demir çelik ve çimento tüketicilerinin önemli rol üstlenebilecekleri görülmüştür. Tüketim seviyeleri ve sahip oldukları motor yükleri düşüldüğünde, Türkiye’nin gelecek dönemlerde azalan şebeke ataleti koşullarında iletime bağlı tüketiciler ile doğrudan tüketici bazlı frekans kontrol rezervleri oluşturulabilir.

Özellikle düşük frekans koşullarının meydana gelebileceği şebeke koşullarında, yani azalan konvansiyonel üretim koşullarında, talep katılımının merkezi kontroller aracılığıyla büyük tüketiciler aracılığıyla hızlı şekilde sağlanabilir.

Artan YEK koşullarında şebekeye olan etkisi pek çok akademik çalışmada ele alınmaktadır. Özellikle RES ve GES üretimlerinin artışıyla meydana gelen düşük rezerv ve düşük atalet koşullar şebeke modelleri ya da güç sistem kontrol modelleri üzerinde analiz edilmektedir. Bu kapsamda yapılan araştırmalara benzer olacak şekilde Türkiye şebekesinde artan YEK koşullarında şebeke ataletinin değişimi, bu değişimle birlikte şebekede meydana gelebilecek dengesizlik koşullarında frekans değişimi ve frekans kararlılık koşulları incelenmiştir. Bu inceleme iki farklı şekilde ele alınmıştır. İlk olarak literatürde yapılan çalışmalara benzer şekilde powerfactory programı ile Türkiye şebekesinin basitleştirilmiş test modeli, CIGRE tek bara frekans modeline benzer yapıda oluşturulmuştur. Test modelinde mevcut durumda var olan hidro, kömür ve doğal gaz kaynak türlerine göre AVR, GOV dinamik karakteristikleri modellenmiştir. Yapılan model üzerinde öncelikle artan YEK koşullarında oluşan frekans değişimleri ele alınmış, şebeke ataletinin azalmasıyla birlikte büyük genliklerde ve daha hızlı frekans değişimleri meydana geldiği tespit edilmiştir.

Türkiye şebekesinde artan YEK koşullarında talep katılımının şebeke esnekliği açısından test edilmesi amacıyla, geçmiş YEK üretimlerinin yüksek olduğu şebeke zamanı test modeli üzerinde incelenmiştir. Ele alınan işletme koşullarında daha yüksek RES ve GES katılımlarını gösterebilmek amacıyla konvansiyonel kömür ve doğal gazların olmadığı şebeke senaryoları incelenmiş, bu koşullarda meydana gelecek dengesizlik koşullarında frekans değişimi ve değişim hızı ölçülmüştür. Beklenildiği şekilde artan YEK ile azalan düşük rezerv koşullarında ciddi frekans değişim gözlemlenmiştir. Şebekede YEK oranının %63 olduğu durumda yaklaşık 1 Hz'e yakın frekans değişimi, RoCoF'un 0,266 Hz/s görülmüştür. Bu durumda talep katılımı oransal olarak düşük frekans röleleriyle uygulanmıştır. Türkiye şebekesinde sırasıyla %1 – 3 oranında talep katılımıyla frekans değişiminin önemli derecede kontrol edildiği görülmüştür. İhtiyaç duyulan oransal talep katılımı ve dağıtım şebeke kümeleri için öngörülen talep katılımı potansiyeli dikkate alındığında, Küme 1'in toplam yükünün yaklaşık %3,3'ü ya da Küme 3'ün toplam yükünün yaklaşık %1,6'sı ile ihtiyaç duyulan talep katılım esnekliği sağlanabilmektedir.

Bu düşük atalet koşullarında belirlenecek frekans limitlerine göre talep kontrolünün uygulanmasıyla şebekede görülebilecek hızlı ve yüksek frekans değişimlerinin azaltılabileceği görülmektedir. Yapılan analizlerde esasen Türkiye şebekesinde artan YEK'lerin şebeke ataletine etkisi, bu etkiyle şebeke frekans kontrolündeki zorluklar gösterilmiş, tasarımı yapılan talep katılım kontrolüyle frekans değişimlerin kontrol edilebileceği gösterilmiştir. Ancak nihai bir şebeke kapsamı değerlendirmesi gerçek şebeke model verilerine göre yapılması önemli derecede önerilmektedir.

İkinci yöntem olarak, yapılan literatür araştırmalarında güç sistemleri frekans kontrol çalışmalarında yaygın olarak çalışılan YFK yöntemiyle talep katılımı analizi gerçekleştirilmiştir. Literatürde yaygın olarak temel referans güç sistem modellerini temsil eden farklı YFK modelleri kullanılmak olup, bu modellemelere benzer yapıda gerçek güç sistemlerinin eşlenik YFK modelleriyle çalışmalar mevcuttur. Buna göre Türkiye'nin eş değer YFK modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model üzerinde Türkiye şebekesinde artan YEK koşullarını en iyi şekilde test edilmesi ve talep katılım etkisinin doğru şekilde analiz edilebilmesi amacıyla geçmiş şebeke üretim ve yük koşulları farklı senaryolar altında incelenmiştir.

Güç sistemlerinde YFK'nın sağlanabilmesi için frekans kontrolünde alt sistem ve kontrolcü ayar değerlerinin optimizasyonu için yaygın olarak metasezgisel yöntemler kullanılmaktadır. Bu tez çalışmasında optimum talep katılımının YFK ile sağlanabilmesi için metasezgisel yöntemler ele alınmıştır. Bu amaçla öncelikle YFK'da kullanılan ve doğruluğu tespit edilen PSO ve GWO yöntemleri dikkate alınmıştır. Ancak literatüre katkı sağlamak amacıyla YFK çalışmalarında EPO algoritması test edilmiştir. Bu amaçla mevcut iki bölgeleri YFK modelinde ilk olarak EPO algoritmasıyla duyarlılık analizleri başarıyla gerçekleştirilmiş, daha sonra PSO ve GWO ile karşılaştırılmıştır. Üç algoritma ile yapılan analizlerin sonucunda, YFK çalışmalarında ilk kez kullanılan EPO algoritmasının yaygın kullanılan diğer yöntemlere göre frekans kontrolünü daha hızlı sağladığı, ancak frekans oturma sürenin daha uzun olduğu ortaya koyulmuştur. Aynı zamanda frekans kontrolü için optimum talep katılım miktarının belirlenmesinde üç yönteminde benzer sonuçlar verdiği gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bu tez çalışması ile güç sistemlerinde YFK probleminin çözümünde yeni bir algoritmanın kullanılması sağlanmıştır.

Son olarak üç farklı metasezgisel yöntem kullanılarak Türkiye şebekesi eş değer YFK modeli üzerinde belirlenen senaryolar için optimum talep katılımı analiz edilmiştir. Türkiye şebekesi esas alınarak farklı YEK kapasitesi ve işletme koşullarına benzer senaryolar oluşturularak frekans kontrolünde optimum talep katılımı ve etkileri geliştirilen metasezgisel yöntemlerle ortaya koyulmuştur. Referans alınan şebeke senaryolarında RES ve GES üretimlerinin artmasıyla şebekenin düşük rezerv potansiyeli azalmaktadır. Bu nedenle meydana gelebilecek yük dengesizliğinde şebekenin frekans tepkisi yetersiz kalmaktadır. Yapılan analiz sonuçlarına göre işletme koşullarında şebeke atalet katsayısının 2,5'in altında olduğunda frekans kararlılığının oldukça risk altında olduğu görülmüştür. Artan YEK'lerle beraber şebekenin ihtiyaç duyacağı esneklik ihtiyacında talep katılımının önemli bir fayda sağlayacağı ortaya koyulmuştur. Farklı metasezgisel yöntemlerle elde edilen sonuçlara göre şebekenin talep gücüne bağlı olarak, frekans kontrol hizmetlerinde belirli frekans eşik değerlerinde yaklaşık %5 ile %7 oranında talep katılımının önemli ölçüde fayda sağlayacağı görülmüştür. Ancak enerji arzının tamamen YEK'lerden sağlandığı ve RES ve GES üretimlerinin fazla olduğu şebeke koşullarında rezerv ihtiyacını mevcut rezerv kontrolleri ile talep katılımıyla mümkün değildir. Bu nedenle işletme koşullarında yapılan analizlerde öngörülen şebeke atalet katsayısının asgari 2,4 olacak şekilde konvansiyonel/döner rezerv kaynakların bulundurulması ya da benzer hızlı frekans tepkisi verebilecek depolama sistemleri gibi teknolojilere yer verilmesi önerilmektedir.

Son olarak Türkiye şebekesi açısında yapılan analitik ve şebeke analizlerinde elde edilen talep katılımı öngörülerinin beraberinde diğer ülkelerde uygulanan talep katılımı uygulamaları araştırılarak talep katılımına yönelik politika ve tasarım mimarisi önerilmiştir. İncelenen ülkelerde iklim değişikliği politikaları doğrultusunda tüketicilerin aktif şekilde piyasa katılmasına yönelik faaliyetler gözlemlenmiştir. Sadece tarife odaklı değil, primer ve sekonder frekans kontrolü gibi önemli şebeke esneklik ihtiyaçlarına katılımına olanak sağlanmaktadır. Türkiye'de ise talep katılımıyla ilgili önemli mevzuat değişimleri yeni gerçekleşmiştir. Bu değişim doğrultusunda planlanan YEK kapasite artışlarına paralel olarak yeni talep katılım piyasaları meydana gelebilecektir.

Nihai olarak yapılan tez çalışmaları bir bütün olarak ele alındığında, bir ülke ölçeğinde talep katılımının bir esneklik aracı olarak teorik ve uygulama açısından gösterilmiştir. Ancak yapılan veri analitiği ve analiz çalışmaları gelecekte daha nitelikli veri kaynaklarına göre yapılacak çalışmalar yön vereceği düşünülmektedir.



KAYNAKLAR

1. İnternet: Global energy transformation: The REmap transition pathway. (2019). IRENA. Web: <https://www.irena.org/publications/2019/Apr/Global-energy-transformation-The-REmap-transition-pathway> Son Erişim Tarihi: 18.04.2023.
2. İnternet: Renewable energy policies in a time of transition: heating and cooling. (2020). IRENA. Web: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Renewable-energy-policies-in-a-time-of-transition-Heating-and-cooling> Son Erişim Tarihi: 18.04.2023.
3. Dean, B., Dulac J., Petrichenko K. and Peter G. (2016). *Towards zero-emission efficient and resilient buildings*. Global Status Report.
4. İnternet: Türkiye ulusal enerji planı. (2022). ETKB. Web: https://enerji.gov.tr//Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_Ulusal_Enerji_Plan%C4%B1.pdf Son Erişim Tarihi: 07.05.2023.
5. Shura Enerji Dönüşüm Merkezi. (2023). *Executive summary: Net zero 2053: A roadmap for the Turkish electricity sector*.
6. Mehigan L., Al Kez D., Collins S., Foley A., Ó'Gallachóir B. and Deane P. (2020). Renewables in the European power system and the impact on system rotational inertia. *Energy*, 203, 117776.
7. Homan S., Mac Dowell N. and Brown S. (2021). Grid frequency volatility in future low inertia scenarios: Challenges and mitigation options. *Appl Energy*, 290, 116723.
8. Trovato V., Mazza A. and Chicco G. (2021). Flexible operation of low-inertia power systems connected via high voltage direct current interconnectors. *Electric Power Systems Research*, 192, 106911.
9. İnternet: Demand response – Analysis. (2023). IEA Web: <https://www.iea.org/reports/demand-response>. Son Erişim Tarihi: 28.05.2023
10. International Renewable Energy Agency. (2019). *Demand side flexibility for power sector transformation*.
11. Plaum F., Ahmadihangar R., Rosin A. and Kilter J. (2022). Aggregated demand-side energy flexibility: A comprehensive review on characterization, forecasting and market prospects. *Energy Reports*, 8, 9344–9362.
12. Li P. and Pye S. (2018). Assessing the benefits of demand-side flexibility in residential and transport sectors from an integrated energy systems perspective. *Applied Energy*, 228, 965–979.
13. Williams B., Bishop D., Gallardo P. and Chase J. G. (2023). Demand side management in industrial, commercial, and residential sectors: A review of constraints and considerations. *Energies*, 16, 5155.

14. Silva C., Faria P., Vale Z. and Corchado J. M. (2022). Demand response performance and uncertainty: A systematic literature review. *Energy Strategy Reviews*, 41, 100857.
15. Ma Z., Billanes J. D. and Jørgensen B. N. (2017). Aggregation potentials for buildings—business models of demand response and virtual power plants. *Energies*, 10, 1646.
16. Antonopoulos I., Robu V., Couraud B. and Flynn D. (2021). Data-driven modelling of energy demand response behaviour based on a large-scale residential trial,” *Energy and AI*, 4, 100071.
17. Sadovica, G. Junghans, Sauhats A., Broka Z., Baltputnis K. and Lavrinovics V. (2018). *Case study-Assessing economic potential for demand response in baltic balancing market*. IEEE International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University.
18. Yadav R. K., Hrisheeksha P. N. and Bhadoria V. S. (2023). Grey wolf optimization based demand side management in solar PV integrated smart grid environment. *IEEE Access*, 11, 11827–11839.
19. Kumar M. V., Nuvvula R. S. S, Kumar P. P., Haroon N. H., Suryasa I. W. and Priya U. (2023). *A review on demand side management system and its computer control methods*. International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 480–486.
20. Kezunovic M., Pinson P., Obradovic Z., Grijalva S., Hong T. and Bessa R. (2020). Big data analytics for future electricity grids. *Electric Power Systems Research*, 189, 106788.
21. Ahmed F. Z., Trevor J. B. (2018). *Big Data Analytics in Future Power Systems*. Boca Raton. (First Edition). CRC Press.
22. Dominguez X., Prado A., Arboleya P. and Terzija V. (2023). Evolution of knowledge mining from data in power systems: The Big Data analytics breakthrough. *Electric Power Systems Research*, 218, 109193.
23. Ayan O. (2017). *Akıllı şebekeler kapsamında meskenlerde talep tarafı yönetimi ve enerji verimliliği*. Yüksek lisans tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
24. Vytelingum P. (2008). Primer on Demand side management. *Global Environmental Fund*, 36.
25. Alemayehu A. D. (2017). *Energy supply and demand side management in industrial microgrid context*. Doktora Tezi. Université Paris-Est, Paris.
26. Smart Energy Demand Coalition. (2017). *Explicit demand response in Europe mapping the markets*.

27. Shafie-Khah M., Fitiwi D. Z., Catalao S., Heydarian-Forushani E. and Golshan M. E. H. (2016). *Simultaneous participation of demand response aggregators in ancillary services and demand response exchange markets*. IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference.
28. Curtis M. (2017). *Demand side response aggregators: How they decide customer suitability*. International Conference on the European Energy Market.
29. Yalçınöz Z. ve Kaygusuz A. (2022). Akıllı şebekelerde dinamik enerji fiyatlandırılması üzerine bir çalışma. *Bilgisayar Bilimleri*, 21–31.
30. Hurley D., Peterson P. and Whited M. (2013). *Demand Response As A Power System Resource: Program Designs, Performance, And Lessons Learned in the United States*. Regulatory Assistance Project.
31. Çelik M. (2009). *Veri madenciliğinde kullanılan sınıflandırma yöntemleri ve bir uygulama*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi.
32. Aggarwal, C. C. (2015). An introduction to data mining. *Data Mining Springer International Publishing*, 1–26.
33. Dinov I. D. (2018). K-means clustering. *Data Science and Predictive Analytics, Springer International Publishing*. 443–473.
34. Altınok Y. (2019). *Veri madenciliğinde hiyerarşik kümeleme algoritmalarının uygulamalı karşılaştırılması*. Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
35. Ergüt Ö. (2011). *Uzaklık ve benzerlik ölçülerinin kümeleme sonuçlarına etkisi*. Yüksek lisans tezi, Marmara Üniversitesi, İstanbul.
36. Yeşilbudak M. (2013). *Rüzgâr gücü tahmin sistemi tasarımı ve uygulaması*. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
37. Toussaint W. and Moodley D. (2019). Comparison of clustering techniques for residential load profiles in South Africa. *Forum for Artificial Intelligence Research*, 1–16.
38. Wang Y., Chen Q., Kang C. and Xia Q. (2016). Clustering of electricity consumption behavior dynamics toward big data applications. *IEEE Trans Smart Grid*. 7, 2437–2447.
39. Çelik Ş. (2013). Kümeleme analizi ile sağlık göstergelerine göre Türkiye’deki illerin sınıflandırılması. *Doğuş Üniversitesi Dergisi*, 2, 175–194.
40. Tekin B. (2018). Ward, K-Ortalamlar ve iki adımlı kümeleme analizi yöntemleri ile finansal göstergeler temelinde hisse senedi tercihi. *Balıkesir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 1.

41. Kırıl G. ve Çelik C. (2018). Panel veri analizi ve kümeleme yöntemi ile Türkiye’de konut talebinin incelenmesi. *Atatürk Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 32, 4, 1009–1026.
42. Jensen C. S. and Snodgrass R. T. (2009). Visualizing clustering results. *Encyclopedia of Database Systems*, 3417–3425.
43. İnternet: Hiyerarşik kümeleme. (2021). *Veri bilimi okulu*. Web: <https://www.veribilimiokulu.com/hiyerarsik-kumeleme/> Son Erişim Tarihi: 09.04.2023.
44. Babur Ö., Cleophas L. and Van den Brand M. (2016). Hierarchical clustering of metamodels for comparative analysis and visualization. *European Conference on Modelling Foundations and Applications*, 9764, 3–18.
45. İnternet: Hierarchical Clustering Python. (2023). *Analyticsvidhya*. Web: <https://www.analyticsvidhya.com/blog/2019/05/beginners-guide-hierarchical-clustering/> Son Erişim Tarihi: 09.04.2023.
46. Kazaz N. (2019). *Veri madenciliğinde kümeleme analizi yöntemlerinin incelenmesi ve sağlık bilimleri alanındaki uygulamaları*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Üniversitesi, İstanbul.
47. Dincer N. G., Güneri Ö. İ., ve Pekmezci A. (2019). Ekonometrik zaman serileri tahmininde bulanık zaman serileri yöntemlerinin karşılaştırılması. *Journal of Life Economics*, 6, 3, 307–320.
48. Yürük F. ve Erdoğan P. (2015). Düzce ilinin hayvansal atıklardan üretilebilecek biyogaz potansiyeli ve k-means kümeleme ile optimum tesis konumunun belirlenmesi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 4, 1, 47–56.
49. Martins A., Lagarto J. and Cardoso M. S. (2019). *Electricity market price analysis using time series clustering*. International Conference on the European Energy Market, 1–6.
50. Benítez I., Quijano A., Díez L. and Delgado I. (2014). Dynamic clustering segmentation applied to load profiles of energy consumption from Spanish customers. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 55, 437–448.
51. Maurya A., Akyurek A. S., Aksanli B. and Rosing T. S. (2016). *Time-series clustering for data analysis in smart grid*. IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 606–611.
52. Lin S., Li F., Tian E., Fu Y. and Li D. (2019). *Clustering load profiles for demand response applications*. IEEE Transactions on Smart Grid, 10, 2, 1599–1607.
53. Ramos S., Morais H., Vale Z., Faria P. and J. Soares. (2011). *Demand response programs definition supported by clustering and classification techniques*. IEEE International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems, 1–6.

54. Silva C., Faria P. and Vale Z. (2018). *Discussing different clustering methods for the aggregation of demand response and distributed generation*. IEEE Symposium Series on Computational Intelligence, 1645–1650.
55. Pereira R. (2016). A fuzzy clustering approach to a demand response model. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 81, 184–192.
56. Teeraratkul T., O'Neill D. and Lall S. (2018). Shape-based approach to household electric load curve clustering and prediction. *IEEE Trans Smart Grid*, 9, 5, 5196–5206.
57. Maigha and Crow M. L. (2014). *Clustering-based methodology for optimal residential time of use design structure*. North American Power Symposium, 1–6.
58. Amri Y., Fadhilah A. L., Fatmawati, Setiani N. and Rani S. (2016). *Analysis clustering of electricity usage profile using k-means algorithm*. International Conference on Engineering and Technology for Sustainable Development, 105, 012020.
59. Li R., Wang Z., Le Blond S. and Li F. (2014). *Development of time-of-use price by clustering techniques*. IEEE PES General Meeting Conference Exposition, 1–5.
60. Zhang Z. and Zime. T. (2019) “K-means Based Clustering Analysis of Household Energy Consumption. *Environmental Science, Engineering*.1-5.
61. Nepal B., Yamaha M., Sahashi H. and Yokoe A. (2019). Analysis of building electricity use pattern using k-means clustering algorithm by determination of better initial centroids and number of clusters. *Energies*, 12, 2451.
62. Damström J. and Gerlitz C. (2016). *Classification of power consumption patterns for Swedish households using k-means*. Yüksek lisans tezi, KTH School of Electrical Engineering, Dissertation.
63. Park S., Ryu S., Choi Y. and Kim H. (2014). *A framework for baseline load estimation in demand response: Data mining approach*. International Conference on Smart Grid Communications, 638–643.
64. Priolkar J., Sreeraj E. S. and Kunkolienkar G. (2020). *Clustering based consumer baseline estimation for demand response implementation*. National Power Systems Conference, 1-6.
65. Torriti J. (2017). Understanding the timing of energy demand through time use data: Time of the day dependence of social practices. *Energy Research & Social Science*, 25, 37–47.
66. Pang Y., He Y., Jiao J. and Cai H. (2020). Power load demand response potential of secondary sectors in China: The case of western Inner Mongolia. *Energy*, 192, 116669.

67. Müller T. and Möst D. (2018). Demand response potential: available when needed? *Energy Policy*, 115, 181–198.
68. Atbaş G. (2008). *Kümeleme analizinde küme sayısının belirlenmesi üzerine bir çalışma*. Yüksek lisans tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara
69. Tür M. R. (2018). *Elektrik güç sistemlerindeki döner rezerv gereksiniminin ekonomik yönden incelenmesi*. Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul
70. İnternet: Ancillary services (2023). *Wikipedia*. Web: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ancillary_services_\(electric_power\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Ancillary_services_(electric_power)) Son Erişim Tarihi: 06. 10.2023.
71. İnternet: Ancillary services unbundling electricity products – An emerging market. (2004) *Thermal Working Group*. Web: <https://pierrepinson.com/31761/Literature/Eurelectric2004-ancillaryservices.pdf> Son Erişim Tarihi: 06. 10.2023.
72. Kaushal A. and Van Hertem D. (2019). An overview of ancillary services and HVDC systems in European context. *Energies*, 12, 18, 348.
73. Rebours Y. and Kirschen D. (2005). What is spinning reserve? *The University of Manchester*, 174(175).
74. Nelson-Hoffman J. (2007). Demand Response Spinning Reserve Demonstration, *Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory*.
75. Denholm P., Mai T., Kenyon R. W., Kroposki B. and O'malley M. (2020). Inertia and the Power Grid: A Guide Without the Spin. *National Renewable Energy Laboratory*.
76. Seneviratne C. and Ozansoy C. (2016). Frequency response due to a large generator loss with the increasing penetration of wind/PV generation – A literature review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 659–668.
77. Teng F., Aunedi M., Pudjianto D. and Strbac G. (2015). Benefits of demand-side response in providing frequency response service in the future GB power system. *Frontiers in Energy Research*, 3.
78. Shura Enerji Dönüşüm Merkezi. (2022). *Türkiye elektrik sisteminde esneklik uygulamalarına yönelik politika seçenekleri*.
79. İnternet: Flexibility in 21st century power systems. (2014). *Power Partnership*. Web: <https://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61721.pdf> Son Erişim Tarihi: 18.09.2022.
80. İnternet: Power system flexibility for the energy transition, Part 1: Overview for policy makers. (2018). *IRENA*. Web: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Nov/IRENA_Power_system_flexibility_1_2018.pdf Son Erişim Tarihi: 10.10.2023.

81. Sağlam M. A. (2022). *Türkiye elektrik enerjisi talep tarafı esneklik analizi*. Yüksek lisans tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
82. Hatziargyriou N. (2021). Definition and classification of power system stability – revisited. *IEEE Transactions on Power Systems*, 36, 4, 3271–3281.
83. Akrami A., Doostizadeh M. and Aminifar F. (2019). Power system flexibility: an overview of emergence to evolution. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7, 5, 987–1007.
84. Degefa M. Z., Sperstad I. B. and Sæle H. (2021). Comprehensive classifications and characterizations of power system flexibility resources. *Electric Power Systems Research*, 194, 107022.
85. Dehghanpour K. and Afsharnia S. (2015). Electrical demand side contribution to frequency control in power systems: a review on technical aspects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 1267–1276.
86. Shi Q., Li F., Hu Q. and Wang Z. (2018). Dynamic demand control for system frequency regulation: Concept review, algorithm comparison, and future vision. *Electric Power Systems Research*, 154, 75–87.
87. Nour M., Magdy G., Chaves-Avila J. P., Sanchez-Miralles A. and Petlenkov E. (2022). Automatic generation control of a future multisource power system considering high renewables penetration and electric vehicles: Egyptian power system in 2035. *IEEE Access*, 10, 51662–51681.
88. Alexopoulos D., Vokas G. A. and Psomopoulos C. (2020). Pumped hydro energy storage schemes to support high RES penetration in the electric power system of Greece. *Technologies and materials for renewable energy, environment and sustainability*, 020051.
89. Gwon H., Choi W. and Kook K. (2019). Evaluation method for penetration limit of renewable energy sources in Korean power system. *Energies*, 12, 21, 4207.
90. Abu Dyak A. T., Al Mattar S. S., Shehadeh M. and Harb A. (2022). *On the effect of high renewable energy penetration with Jordanian electrical power grid*. International Renewable Energy Congress, 1–6.
91. Drhorhi I. and El Fadili A. (2022). Impact of renewable energy sources technologies on power system stability: a Moroccan case study. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems* 13, 4, 2120.
92. Acosta M. N. (2020). Optimal under-frequency load shedding setting at Altai-Uliastai regional power system, Mongolia. *Energies* 13, 20, 5390.
93. Dreidy M., Mokhlis H. and Mekhilef S. (2017). Inertia response and frequency control techniques for renewable energy sources: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 69, 144–155.

94. Adrees A., Milanović J. V. and Mancarella P. (2019). Effect of inertia heterogeneity on frequency dynamics of low-inertia power systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 13, 14, 2951–2958.
95. Mendes F., Gomes A. and Martins A. G. (2018). *The role of demand response in power systems with low inertia*. International Conference on Smart Energy Systems and Technologies, 1–6.
96. Crăciun B., Kerekes T., Séra D., Teodorescu R. and Timbus A. (2013). *Benchmark networks for grid integration impact studies of large PV plants*. IEEE Grenoble Conference, 1–6.
97. Gonzalez-Longatt F. (2012). *Impact of synthetic inertia from wind power on the protection/control schemes of future power systems: simulation study*. IET International Conference on Developments in Power Systems Protection, 74–74.
98. Chown G., Wright J., Heerden R. and Coker M. (2018). *System inertia and rate of change of frequency (RoCoF) with increasing non-synchronous renewable energy penetration*. CIGRE Science and Engineering, 11.
99. Obaid Z. A., Cipcigan L. and Muhsin M. T. (2015). *Analysis of the Great Britain's power system with electric vehicles and storage systems*. International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, 1–6.
100. Mu Y., Wu J., Ekanayake J., Jenkins N. and Jia H. (2013). Primary frequency response from electric vehicles in the Great Britain power system. *IEEE Transactions Smart Grid*, 4, 2, 1142–1150.
101. Obaid Z. A., Cipcigan L. M., Abraham L. and M. T. Muhssin. (2019). Frequency control of future power systems: reviewing and evaluating challenges and new control methods. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 7, 1, 9–25.
102. Brogan P. V., Best R. J., Morrow D. J., McKinley K. and Kubik M. L. (2019). Effect of BESS Response on Frequency and RoCoF During Underfrequency Transients. *IEEE Transactions on Power Systems*, 34, 1, 575–583.
103. Amraee T., Darebaghi M. G., Soroudi A. and Keane A. (2018). Probabilistic under frequency load shedding considering RoCoF relays of distributed generators. *IEEE Transactions on Power Systems*, 33, 4, 3587–3598.
104. Zhang M. (2016). *Modeling and verification of advanced under-frequency load shedding schemes*. Yüksek lisans tezi, Delft University of Technology, Delft.
105. Merk P., Rena Kuwahata R., Rabe S. and Ichimura S. (2019). Integrating renewables into the Japanese power grid by 2030. *Renewable Energy Institute and Agora Energiewende*.
106. Ospina L. D. P., Correa A. F. and Lammert G. (2017). Implementation and validation of the Nordic test system in DIgSILENT PowerFactory,” *IEEE Manchester PowerTech*. 1–6.

107. Alhejaj S. M. and Gonzalez-Longatt, F. M. (2016). Impact of inertia emulation control of grid-scale BESS on power system frequency response. *International Conference for Students on Applied Engineering*, 254–258.
108. Yu J., Guo Y. and Sun H. (2020). Testbeds for integrated transmission and distribution networks: Generation methodology and benchmarks. *CSEE Journal of Power and Energy Systems* 518-527.
109. Tielens P., Henneaux P. and Cole S. (2020). Penetration of renewables and reduction of synchronous inertia in the European power system – Analysis and solutions. *European Commission*.
110. Ashton P. M., Saunders C. S., Taylor G. A., Carter A. M. and Bradley M. E. (2015). Inertia estimation of the GB power system using synchrophasor measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, 30, 2, 701–709.
111. ENTSOE. (2018). *Future system inertia*.
112. Kerdphol T., Rahman F. and Mitani Y. Virtual inertia control application to enhance frequency stability of interconnected power systems with high renewable energy penetration. *Energies*, 11, 4, 981.
113. Fernández-Guillamón A., Gómez-Lázaro E., Muljadi E. and Molina-García Á. (2019). Power systems with high renewable energy sources: A review of inertia and frequency control strategies over time. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109369.
114. Hartmann B., Vokony I. and Táci I. (2019). Effects of decreasing synchronous inertia on power system dynamics—Overview of recent experiences and marketisation of services. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29, 12.
115. Huda M., Aziz M. and Tokimatsu K. (2018). Potential ancillary services of electric vehicles (vehicle-to-grid) in Indonesia. *Energy Procedia*, 152, 1218–1223.
116. İnternet: Yük tevzi bilgi sistemi. (2023). *TEİAŞ*. Web: https://ytbs.teias.gov.tr/ytbs/frm_login.jsf Son Erişim Tarihi: 18.04.2023.
117. İnternet: Şeffaflık platformu. *EPIAŞ*. Web: <https://seffaflik.epias.com.tr/transparency/> Son Erişim Tarihi: 18.04.2023.
118. Kundur P. (1993). *Power system stability and control*. New York. McGraw-Hill.
119. Naveed A., Sönmez Ş., and Ayasun S. (2022). Stability regions in time delayed two-area LFC system enhanced by EVs. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30, 1, 249–262.
120. Hansen A. D. Sørensen P. E., Zeni L. and Altin M. (2016). Frequency control modelling basics. *DTU Wind Energy*, 0103.

121. Pappachen A. and Peer Fathima A. (2017). Critical research areas on load frequency control issues in a deregulated power system: A state of the art of review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 72, 163–177.
122. Latif A., Hussain S. M. S., Das D. C. and Ustun T. S. (2020). State-of-the-art of controllers and soft computing techniques for regulated load frequency management of single/multi-area traditional and renewable energy based power systems. *Applied Energy*, 266, 114858.
123. Ranjan M. and Shankar R. (2022). A literature survey on load frequency control considering renewable energy integration in power system: Recent trends and future prospects. *Energy Storage*, 45, 103717.
124. Kumar A. and Bawa S. (2020). A comparative review of meta-heuristic approaches to optimize the SLA violation costs for dynamic execution of cloud services. *Soft computer*, 24, 6, 3909–3922.
125. Kumar V. and Yadav S. M. (2022). A state-of-the-Art review of heuristic and metaheuristic optimization techniques for the management of water resources. *Water Supply*, 22, 4, 3702–3728.
126. Çelik Y., Yıldız İ. ve Karadeniz A. T. (2019). Son üç yılda geliştirilen metasezgisel algoritmalar hakkında kısa bir inceleme. *European Journal of Science and Technology*, 463–477.
127. Pop C. B. (2022). Review of bio-inspired optimization applications in renewable-powered smart grids: Emerging population-based metaheuristics. *Energy Reports*, 8, 11769–11798.
128. Nassef A. M., Abdelkareem M. A., Maghrabie H. M. and Baroutaji A. (2023). Review of metaheuristic optimization algorithms for power systems problems. *Sustainability*, 15, 12, 9434.
129. Donaisky E., Oliveira G. H. C., Santos E. A. P., Leandro G. V., Pena A. M. and Souza J. A. (2015). Hybrid model predictive control as a LFC solution in hydropower plants. *MATEC*, 35, 03002.
130. Latif A., Paul M., Das D. C., Hussain S. M. and Ustun T. S. (2020). Price based demand response for optimal frequency stabilization in orc solar thermal based isolated hybrid microgrid under salp swarm technique. *Electronics*, 9, 12, 1–16.
131. Bao Y. Q., Li Y., Wang B., Hu M. and P. Chen. (2017). Demand response for frequency control of multi-area power system. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 5, 1, 20–29.
132. Bao Y. Q., Li Y., Hong Y. Y. and Wang B. (2015). Design of a hybrid hierarchical demand response control scheme for the frequency control. *IET Generation, Transmission and Distribution*, 9, 15, 2337–2350.

133. Tavakoli M., Pouresmaeil E., Adabi J., Godina R. and Catalão J. P. S. (2018). Load-frequency control in a multi-source power system connected to wind farms through multi terminal HVDC systems. *Computers & Operations Research*, 96, 305–315.
134. Zhu Q., Jiang L., Yao W., Zhang C. K. and Luo C. (2017). Robust load frequency control with dynamic demand response for deregulated power systems considering communication delays. *Electric Power Components and Systems*, 45, 1, 75–87.
135. Hernández-Ocaña B., Hernández-Torruco J., Chávez-Bosquez O., Calva-Yáñez M. and Portilla-Flores E. (2019). Bacterial foraging-based algorithm for optimizing the power generation of an isolated microgrid. *Applied Sciences*, 9, 6, 1261.
136. Ali E. S. and Abd-Elazim S. M. (2011). Bacteria foraging optimization algorithm based load frequency controller for interconnected power system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 33, 3, 633–638.
137. Guha D., Roy P. K. and Banerjee S. (2016). Load frequency control of large scale power system using quasi-oppositional grey wolf optimization algorithm. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19, 4, 1693–1713.
138. Saini N. and Ohri J. (2022). Load Frequency control of multi-area thermal power system using grey wolf optimization, *Control and Measurement Applications for Smart Grid*, 347–357.
139. Shankar G. and Mukherjee V. (2016). Load frequency control of an autonomous hybrid power system by quasi-oppositional harmony search algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, 715–734.
140. Omar M., Ebrahim M. A., Ghany A. M. and Bendary F. (2016). Tuning of PID controller for load frequency control problem via harmony search algorithm. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 1, 2, 255.
141. Guha D., Roy P. K. and Banerjee S. (2017). Study of differential search algorithm based automatic generation control of an interconnected thermal-thermal system with governor dead-band. *Applied Soft Computing*, 52, 160–175.
142. Zamee M. A., Islam K. K., Ahmed A. and Zafreen K. R. (2016). *Differential evolution algorithm based load frequency control in a two-area conventional and renewable energy based nonlinear power system*. International Conference on the Development in the in Renewable Energy Technology, 1–6.
143. Sekhar G. T., Sahu R. K., Baliarsingh A. K. and Panda S. (2016). Load frequency control of power system under deregulated environment using optimal firefly algorithm. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 195–211.
144. Ranjitha K., Sivakumar P., Elavarasu R., Monica M. and Rajapandiyan A. (2021). Firefly algorithm optimized load frequency controller for multi-source power system. *Emerging Trends in Industry 4.0*. 1–6.

145. Ekinçi S. ve Hekimoğlu B. (2017). Multi-machine power system stabilizer design via HPA algorithm. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 32, 4, 1271–1285.
146. Abazari A., Monsef H. and Wu B. (2019). Coordination strategies of distributed energy resources including FESS, DEG, FC and WTG in load frequency control (LFC) scheme of hybrid isolated micro-grid. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 109, 535–547.
147. Çakıcı F. N., Eke İ. ve Saka M. (2020). Performance analysis for load frequency control of interconnected power systems with different techniques. *Uluslararası Muhendislik Arastirma ve Gelistirme Dergisi*, 12, 3, 89–106.
148. Hasanien H. M. and El-Fergany A. A. (2019). Salp swarm algorithm-based optimal load frequency control of hybrid renewable power systems with communication delay and excitation cross-coupling effect. *Electric Power Systems Research*, 176, 105938.
149. Safi S. J., Tezcan S. S., Eke İ. and Farhad Z. (2018). Gravitational search algorithm based PID controller design for two area multi-source power system load frequency control, *Journal of Science*, 139-153.
150. Singh V. P., Samuel P. and Kishor N. (2017). Impact of demand response for frequency regulation in two-area thermal power system. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 27, 2, 2246.
151. Latif A., Dulal C. D., Ranjan S. and Hussain I. (2018). Integrated demand side management and generation control for frequency control of a microgrid using PSO and FA based controller. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8, 1.
152. Bao Y., Li Y., Wang B., Hu M. and Chen P. (2017). Demand response for frequency control of multi-area power system. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 5, 1, 20–29.
153. Zaman M. S, Bukhari S. B. A., Hazazi K. M., Haider Z. M., Haider R. and Kim C. H. (2018). Frequency response analysis of a single-area power system with a modified LFC model considering demand response and virtual inertia. *Energies*, 11, 4, 787.
154. Farmani F. (2018). *Frequency control via demand response in smart grid*. Yüksek Lisans Tezi, University of Waterloo, Ontario.
155. Al-Obaidi Z. A. (2018). *Control of frequency in future power systems*. Doktora Tezi, School of Engineering Cardiff University, Cardiff.
156. Shakibjoo A. D., Moradzadeh M., Moussavi S. Z. and Vandevelde L. (2020). A novel technique for load frequency control of multi-area power systems. *Energies*, 13, 9, 2125.

157. Ranjitha K., Ponnuram S. and Rajapandiyan A. (2021). Impact of demand management with load frequency control in distribution network with high penetration of renewable energy sources. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 31, 11.
158. Wang Y., Silva V. and Zulueta M. (2016). Impact of high penetration of variable renewable generation on frequency dynamics in the continental Europe interconnected system. *IET Renewable Power Generation*, 10, 1, 10–16.
159. Muhssin M. T., Cipcigan L. M., Sami S. S. and Obaid Z. A. (2018). Potential of demand side response aggregation for the stabilization of the grids frequency. *Applied Energy*, 220, 643–656.
160. Sahu R. K., Rout U. K. and Panda S. (2014). Sensitivity analysis of load-frequency control of power system using gravitational search algorithm. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 249–258.
161. Pradhan C., Bhende C. N. and Srivastava A. K. (2019). Frequency sensitivity analysis of dynamic demand response in wind farm integrated power system. *IET Renewable Power Generation*, 13, 6, 905–919.
162. Khalid O. W., Isa N. A. M. and Mat Sakim H. A. (2023). Emperor penguin optimizer: A comprehensive review based on state-of-the-art meta-heuristic algorithms. *Alexandria Engineering Journal*, 63, 487–526.
163. Dhiman G. and Kumar V. (2018). Emperor penguin optimizer: A bio-inspired algorithm for engineering problems. *Knowledge Based Systems*, 159, 20–50.
164. Vidhya M. and Kumar S. R. (2021). An Emperor penguin optimization and particle swarm optimization control algorithm for PV with ZSI in grid connected system. *Research Square*.
165. Harifi S., Mohammadzadeh J., Khalilian M. and Ebrahimnejad S. (2021). Hybrid-EPC: an emperor penguins colony algorithm with crossover and mutation operators and its application in community detection. *Progress in Artificial Intelligence*, 10, 2, 181–193.
166. Harifi S., Khalilian M., Mohammadzadeh J. and Ebrahimnejad S. (2020). Optimizing a neuro-fuzzy system based on nature-inspired emperor penguins colony optimization algorithm. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 28, 6, 1110–1124.
167. Wahdan H. G., Abdelslam H. E., Abou-El-Enien T. H. M. and Kassem S. S. (2020). Two-modified emperor penguins colony optimization algorithms. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 34, 2, 151–160.
168. Kaur H., Rai A., Bhatia S. S. and Dhiman G. (2020). MOEPO: A novel Multi-objective emperor penguin optimizer for global optimization: special application in ranking of cloud service providers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 96, 104008.

169. Dhiman G. (2021). BEPO: A novel binary emperor penguin optimizer for automatic feature selection. *Knowledge Based Systems*, 1, 211, 106560.
170. Lu X., Yang Y., Wang P., Fan Y., Yu F. and Zafetti N. (2021). A new converged emperor penguin optimizer for bidding strategy in a day-ahead deregulated market clearing price: A case study in China. *Energy*, 227, 120386.
171. Harifi S., Khalilian M., Mohammadzadeh J. and Ebrahimnejad S. (2021). Optimization in solving inventory control problem using nature inspired emperor penguins colony algorithm. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 32, 5, 1361–1375.
172. Sameh M. A., Marei M. I., Badr M. A. and Attia M. A. (2021). An Optimized PV control system based on the emperor penguin optimizer. *Energies*, 14, 751.
173. Balasubbareddy M., Divyanshi D. (2019). Hybrid Emperor penguin optimization algorithm for solving optimal power flow problems. *Pramana Research Journal*, 9, 279-289.
174. Paramguru J., Barik S. K., Sahoo A. K. and T. Parida. (2021). Solution to economic dispatch problem incorporating micro grid with integration of wind energy using emperor penguin optimization algorithm. *International Conference in Advances in Power, Signal, and Information Technology*, 1–6.
175. Sahoo A. K., Panigrahi T. K., Dhiman G., Singh K. K. and Singh A. (2021). Enhanced emperor penguin optimization algorithm for dynamic economic dispatch with renewable energy sources and microgrid. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 40, 5, 9041–9058.
176. Yılmaz Z. Y., Bal G., Çelik E., Öztürk N., Güvenç U. ve Arya Y. (2021). Yük frekans kontrolünde kullanılan ikincil denetleyicilerin optimizasyonuna yönelik yeni bir hedef fonksiyonu tasarımı. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 36, 4, 2053–2068.
177. Shouran M., Anayi F., Packianather M. and Habil M. (2021). Load Frequency Control Based on the Bees Algorithm for the Great Britain power system. *Designs*, 5, 50.
178. İnternet: Demand Response. (2023). IEA. Web: <https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/demand-response> Son Erişim Tarihi: 18.11.2023.
179. İnternet: Five minute settlement. AEMC. Web: <https://www.aemc.gov.au/rule-changes/five-minute-settlement> Son Erişim Tarihi: 28.11.2023.
180. Lima D. A., Perez R. C. and Clemente G. (2017). A comprehensive analysis of the demand response program proposed in Brazil based on the tariff flags mechanism. *Electric Power Systems Research*, 144, 1–12.
181. Fuga F. L. and Ramos D. S. (2023). Proposals to improve the demand response in Brazil. *The Electricity Journal*, 36, 1, 107237.

182. Barbero M., Igualada L. and Corchero C. (2018). Overview of the regulation on aggregator agents in Europe,” *International Conference on the European Energy Market*, 1–5.
183. Ribó-Pérez D., Larrosa-López L., Pecondón-Tricas D. and Alcázar-Ortega M. (2021). A Critical review of demand response products as resource for ancillary services: international experience and policy recommendations. *Energies*, 14, 4, 846.
184. Hagen M. E., Ramamonjisoa N.; Roosson S. M. and Somrani N. (2022). Demand response and energy prosumers: a legislative comparison between Estonia, France and Norway. *University of Bergen*.
185. Ippolito G., Silva C., Faria P. and Z. Vale. (2023). Demand response implementation: Overview of Europe and United States Status. *Energies*, 16, 4043, 10.







Gazili olmak ayrıcalıktır