T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BÜYÜK GÜÇLÜ SU ARITMA TESİSİ İÇİN HARMONİK ANALİZİ VE OPTİMAL ÇÖZÜM ÖNERİLERİNİN SUNULMASI

Kubilay Can ÇELEBİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Şubat, 2026

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BÜYÜK GÜÇLÜ SU ARITMA TESİSİ İÇİN HARMONİK ANALİZİ VE OPTİMAL ÇÖZÜM ÖNERİLERİNİN SUNULMASI

Kubilay Can ÇELEBİ tarafından hazırlanan tez çalışması 10.02.2026 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Oktay ARIKAN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Oktay ARIKAN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Ramazan AYAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üyesi Barış KÜÇÜKAYDIN, Üye
Kırklareli Üniversitesi _____

Danışmanım Doç. Dr. Oktay ARIKAN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "BÜYÜK GÜÇLÜ SU ARITMA TESİSİ İÇİN HARMONİK ANALİZİ VE OPTİMAL ÇÖZÜM ÖNERİLERİNİN SUNULMASI" başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Kubilay Can ÇELEBİ

İmza

Aileme

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının araştırma, uygulama ve değerlendirme aşamalarının her birinde bilgi, yönlendirme ve değerli katkılarıyla beni destekleyen tez danışmanım Doç. Dr. Oktay ARIKAN'a, tez kapsamında gerçekleştirilen saha ölçümlerinde gerekli ekipmanların kullanımına izin vererek çalışmanın yürütülmesine katkı sağlayan İSKİ Enerji Yönetim Şube Müdürü Sayın Osman Tamer SÖNMEZ'e, saha ölçümleri süresince her aşamada desteklerini esirgemeyen Büyükçekmece Su Arıtma Şube Müdürlüğü Elektrik Atölyesi çalışanlarına, akademik çalışmaları ve bilimsel araştırmaları destekleyen vizyonu ile tez çalışmamın saha uygulamalarının gerçekleştirilmesine imkân sağlayan ve sürecin sağlıklı ilerlemesinde destekleyici bir yaklaşım sergileyen İSKİ Genel Müdürlüğü ve ilgili birim yöneticilerine, son olarak eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini her zaman yanımda hissettiren aileme en içten teşekkürlerimi sunarım.

Kubilay Can ÇELEBİ

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

TABLO LİSTESİ xi

ÖZET xii

ABSTRACT xiv

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti....1

1.1.1 Harmoniklerin Temelleri ve Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri 1

1.1.2 Endüstriyel Tesislerde Harmonik Kaynakları 3

1.1.3 Su Arıtma Tesislerinin Yük Yapısı ve Harmonikler 3

1.1.4 Harmonik Analizi için Modelleme ve Saha Uygulamaları 6

1.1.5 Harmonik Filtre Tasarımları ve Optimal Çözüm Önerileri 7

1.2 Tezin Amacı 8

1.3 Hipotez 10

2 HARMONİK TANIMI VE TEMEL KAVRAMLAR 13

2.1 Harmonik Tanımı....13

2.1.1 Harmoniklerin Fourier Serisi ile İfade Edilmesi 14

2.2 Harmonik Kavramları 15

2.2.1 Toplam Harmonik Bozulma (THB) 15

2.2.2 Toplam Talep Bozulması (TTB) 16

2.3 Harmonikli Sistemler için Güç İfadesi.....17
2.4 Harmonik Standartları ve Mevzuat.....18
2.4.1. IEEE ve IEC Yaklaşımları 18
2.4.2 IEEE Standardının Detaylı İncelenmesi 19
2.4.3 IEC Standardına Genel Bakış 21
2.4.4 Ulusal Uygulamalar ve Diğer Standartlar 22
3 HARMONİK KAYNAKLARI VE ETKİLERİ 32
3.1 Harmonik Kaynakları.....32
3.1.1 Güç Elektroniği Konvertörleri ve Frekans Sürücüleri 33
3.2 Harmoniklerin Sistem Bileşenleri Üzerindeki Etkileri.....37
3.2.1 Rezonans Etkisi 38
3.2.2 İletkenler ve Kablolar Üzerindeki Etki 38
3.2.3 Koruma Elemanları Üzerindeki Etki 39
3.2.4 Kondansatörler Üzerindeki Etki 40
3.2.5 Hassas Elektronik Cihazlar Üzerindeki Etki 40
3.2.6 Motorlar ve Genaratörler Üzerindeki Etki 41
4 HARMONİK FİLTRELERİ 42
4.1 Pasif Harmonik Filtreler.....42
4.1.1 Seri Pasif Filtreler 44
4.1.2 Paralel Pasif Filtreler 45
4.3 Aktif Harmonik Filtreler.....51
4.4 Hibrit Harmonik Filtreler.....54
5 SİSTEM TANITIMI 56
5.1 Büyükçekmece Su Arıtma Tesisi.....57
5.1.1 Büyükçekmece Su Arıtma Tesisi Tek Hat Diyagramı 58
5.1.2 Ölçüm Sonuçları 60

5.2 İhsaniye Arıtma Tesisi 63
5.2.1 İhsaniye Su Arıtma Tesisi Tek Hat Diyagramı 64
5.2.2 Ölçüm Sonuçları 65
5.3 Ölçüm Alt Yapısı 68
6 MODELLEME VE ANALİZ ÇALIŞMALARI 71
6.1 Büyükçekmece Su Arıtma Tesisi için Modelleme ve Analiz Çalışması ...72
6.1.1 Senaryo Çalışmaları 72
6.1.2 Simülasyon Sonuçları 73
6.2 İhsaniye Su Arıtma Tesisi için Modelleme ve Analiz Çalışması 78
6.2.1 Senaryo Çalışmaları 79
6.2.2 Simülasyon Sonuçları 80
7 SONUÇ 90
KAYNAKÇA 93
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 98

SİMGE LİSTESİ

C_h	h. harmonik bileşenin karmaşık Fourier katsayısı
D	Harmonik bozulma nedeniyle oluşan distorsiyon gücü (VA)
f_1	Temel bileşenin frekanssı (Hz)
GF	Güç faktörü
h	Harmonik derecesi
I	Toplam akımın RMS değeri (A)
I_0	Temel bileşen akımının RMS değeri (A)
I_h	h. dereceden harmonik akımının RMS değeri (A)
I_L	Ölçüm periyodu boyunca çekilen maksimum talep akımı (A)
I_{SC}	Ortak bağlantı noktasındaki (PCC) kısa devre akımı (A)
k	Doğrultucu harmonik mertebesini belirleyen tam sayı
P	Aktif güç (W)
Q	Reaktif güç (var)
S	Görünür giç (VA)
T	Dalga formunun periyodu (s)
V	Toplam gerilimin RMS değeri (V)
V_0	Gerilimin DC bileşeni (V)
V_n	h. dereceden harmonik gerilimin RMS değeri (V)
x(t)	Zamana bağlı gerilim veya akım dalga formu
ω_1	Temel bileşenin açısal frekansı (rad/s)
φ_n	n. harmonik gerilimin faz açısı (rad)
δ_n	n. harmonik akımının faz açısı

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım (Alternating Current)
CIGRE	Uluslararası Büyük Elektrik Sistemleri Konseyi (International Council on Large Electric Systems)
DC	Doğru Akım (Direct Current)
ETAP	Elektrik Geçici Analiz Programı (Electrical Transient Analyzer Program)
HVAC	Isıtma Havalandırma ve İklimlendirme (Heating, Ventilating and Air Conditioning)
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
IEEE	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü (The Institute of Electrical and Electronics Engineering)
IGBT	İzole Kapılı Bipolar Transistör (Insulated-Gate Bipolar Transistor
MATLAB	Matris Laboratuvarı (Matrix Laboratory)
PCC	Ortak Bağlantı Noktası (Point of Common Coupling)
PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse Width Modulation)
RMS	Karekök Ortalama (Root Mean Square)
SCADA	Gözetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi (Supervisory Control and Data Acquisition)
SMPS	Anahtarlamalı Güç Elemanı (Switch Mode Power Supply)
SIMULINK	Dinamik Sistem Simülasyon ve Modelleme Ortamı
THB	Toplam Harmonik Bozulma
TTB	Toplam Talep Bozulumu
VFD	Değişken Frekanslı Sürücü (Variable Frequency Drive)
UPS	Kesintisiz Güç Kaynağı (Uninterruptible Power Supply)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Harmonik dalga şekli.....14
Şekil 4.1 (a) Düşük Q tipi filtre (b) yüksek Q tipi filter.....43
Şekil 4.2 Seri pasif filtre devresi.....45
Şekil 4.3 Paralel pasif filtre devresi.....46
Şekil 4.4 Tek ayarlı filtre devresi ve empedans değişimi.....47
Şekil 4.5 Çift ayarlı filtre devresi ve empedans değişimi.....49
Şekil 4.6 Birinci, ikinci, üçüncü derece ve C tipi sönümlü filtreler.....50
Şekil 4.7 Sönümlü filtrede frekans empedans ilişkisi.....51
Şekil 4.8 Aktif harmonik filtre çalışma prensibi.....52
Şekil 4.9 Aktif harmonik filtre blok diyagramı.....53
Şekil 4.10 Paralel aktif filtre ve seri aktif filtre bağlantı şekli.....53
Şekil 4.11 Pasif ve aktif filtreden oluşan hibrit harmonik filtre yapısı.....55
Şekil 5.1 Büyükçekmece arıtma tesisi indirgenmiş tek hat diyagramı.....59
Şekil 5.2 Ölçüm noktası 1 için gerilim harmonik spektrumu.....62
Şekil 5.3 Ölçüm noktası 1 için akım harmonik spektrumu.....62
Şekil 5.4 İhsaniye arıtma tesisi indirgenmiş tek hat diyagramı.....64
Şekil 5.5 Ölçüm noktası 1 için gerilim harmonik spektrumu.....67
Şekil 5.6 Ölçüm noktası 1 için akım harmonik spektrumu.....67
Şekil 5.7 Büyükçekmece su arıtma tesisi saha ölçüm fotoğrafı.....70
Şekil 5.8 İhsaniye su arıtma tesisi Saha ölçüm fotoğrafı.....70
Şekil 6.1 Büyükçekmece su arıtma tesisi ETAP çizimi ekran görüntüsü.....74
Şekil 6.2 İhsaniye su arıtma tesisi simulink çizimi ekran görüntüsü.....81
Şekil 6.3 Hibrit harmonik filtreli sistem simulink ekran görüntüsü.....88

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 IEEE standardına göre izin verilen maksimum THB_v 19
Tablo 2.2 Tüketiciler için akım bozulma sınırları.....20
Tablo 2.3 Dağıtım şebekelerinde gerilim harmonik limitleri 24
Tablo 2.4 400 kV iletim sisteminde harmonik gerilim planlama sınır değerleri .26
Tablo 2.5 154 kV iletim sisteminde harmonik gerilim planlama sınır değerleri .27
Tablo 2.6 154 kV altındaki iletim sistemlerinde harmonik gerilim planlama sınır değerleri 28
Tablo 2.7 İletim hatlarında 1 kV<V≤34,5 kV kabul edilebilir akım harmonik limitleri 29
Tablo 2.8 İletim hatlarında 34,5 kV<V<154 kV kabul edilebilir akım harmonik limitleri 29
Tablo 2.9 İletim hatlarında V>154 kV kabul edilebilir akım harmonik limitleri 30
Tablo 5.1 Büyükçekmece su arıtma tesisi ölçüm sonuçları.....60
Tablo 5.2 İhsaniye su arıtma tesisi ölçüm sonuçları.....65
Tablo 6.1 Senaryo 1 ile gerçek ölçüm sonuçları karşılaştırması.....74
Tablo 6.2 Senaryo 2 ölçüm sonuçları 75
Tablo 6.3 Senaryo 3 ölçüm sonuçları 77
Tablo 6.4 Senaryoların karşılaştırılması 78
Tablo 6.5 Senaryo 1 ile gerçek ölçüm sonuçları karşılaştırması.....82
Tablo 6.6 Senaryo 2, 1. durum ölçüm sonuçları 83
Tablo 6.7 Senaryo 2, 2. durum ölçüm sonuçları 83
Tablo 6.8 Senaryo 3, 1. durum ölçüm sonuçları 84
Tablo 6.9 Senaryo 3, 2. durum ölçüm sonuçları 85
Tablo 6.10 Senaryo 4, 1. durum ölçüm sonuçları 86
Tablo 6.11 Senaryo 4, 2. durum ölçüm sonuçları 87
Tablo 6.12 Senaryo 5 ölçüm sonuçları 88
Tablo 6.13 Senaryoların karşılaştırma tablosu.....89

ÖZET

BÜYÜK GÜÇLÜ SU ARITMA TESİSİ İÇİN HARMONİK ANALİZİ VE OPTİMAL ÇÖZÜM ÖNERİLERİNİN SUNULMASI

Kubilay Can ÇELEBİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Oktay ARIKAN

Nüfusun artması ve sanayinin hızlı gelişimi ile birlikte elektrik enerjisine olan talep her geçen gün artmakta, bu durum yalnızca enerji üretim ve tüketim miktarlarının değil, aynı zamanda enerji kalitesinin de kritik bir parametre hâline gelmesine neden olmaktadır. Özellikle yarı iletken teknolojilerinin yaygınlaşmasıyla birlikte frekans konvertörleri, doğrultucular, anahtarlamalı güç kaynakları ve benzeri doğrusal olmayan yüklerin kullanımının artması, güç sistemlerinde harmonik bozulmaların önemli ölçüde yükselmesine yol açmaktadır. Bu harmonik bozulmalar; akım ve gerilim dalga şekillerinin bozulması, RMS akım değerlerinin artması, ek aktif güç kayıpları, düşük güç faktörü, ekipmanlarda aşırı ısınma ve koruma elemanlarının hatalı çalışması gibi çeşitli olumsuz etkilere neden olmaktadır. Bu tez çalışmasında, İstanbul'da yer alan iki adet farklı yapıdaki su arıtma tesisinde meydana gelen harmonik problemler detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında, tesislerin farklı ölçüm noktalarında enerji kalite analizörleri kullanılarak saha ölçümleri gerçekleştirilmiş; özellikle yarı iletken tabanlı yüklerin yoğun olarak bulunduğu bu tesislerde yüksek seviyelerde harmonik bozulma, artmış RMS akım değerleri ve buna bağlı kayıplar tespit edilmiştir. Elde

edilen ölçüm sonuçları doğrultusunda tesislerden biri, bir güç sistemi analiz yazılımı olan ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) ortamında, diğer tesis ise aktif harmonik filtre uygulamasının gerektirdiği gelişmiş anahtarlama yapıları ve control algoritmalarının modellenebilmesi amacıyla doğrudan MATLAB/Simulink ortamında ölçümlerin alındığı anlık işletme koşullarını yansıtacak şekilde modellenmiş ve modelin doğruluğu saha verileri ile karşılaştırılarak valide edilmiştir. Çalışmanın son aşamasında, farklı işletme senaryoları altında pasif ve aktif harmonik filtre çözümleri uygulanarak kapsamlı simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve akım ile gerilim toplam harmonik bozulma değerlerinin kabul edilebilir sınırlar altına düşürülebildiği gösterilmiştir. Uygulanan filtreleme çözümleri sayesinde RMS akım değerlerinin azalmasına bağlı olarak genel enerji tüketiminin düştüğü, aktif güç kayıplarının azaldığı, güç faktörünün iyileştirildiği ve harmonik kaynaklı ekipman arızalarının büyük ölçüde önlendiği tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, büyük güçlü su arıtma tesislerinde harmonik analizi temelli doğru filtreleme stratejilerinin enerji verimliliği, ekipman ömrü ve işletme sürekliliği açısından kritik öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Harmonik, Su Arıtma Tesisleri, Filtre, ETAP, MATLAB/Simulink

ABSTRACT

HARMONIC ANALYSIS AND PROPOSAL OF OPTIMAL SOLUTIONS FOR A LARGE POWER WATER TREATMENT PLANT

Kubilay Can ÇELEBİ

Department of Electrical Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Ass. Prof. Dr. OKTAY ARIKAN

With the increase in population and the rapid development of industry, the demand for electrical energy has been rising steadily, making not only the amount of energy production and consumption but also power quality a critical parameter. In particular, the widespread use of semiconductor technologies has led to a significant increase in nonlinear loads such as variable frequency drives, rectifiers, switched-mode power supplies, and similar equipment, resulting in considerable harmonic distortions in power systems. These harmonic distortions cause various adverse effects, including the deformation of current and voltage waveforms, increased RMS current values, additional active power losses, low power factor, excessive heating of equipment, and malfunction of protection devices.

In this thesis, harmonic-related problems occurring in two large-scale water treatment plants located in Istanbul are examined in detail. In the first stage of the study, field measurements were carried out at different measurement points within the facilities using power quality analyzers. The results revealed high levels of harmonic distortion, increased RMS current values, and associated losses, particularly in systems with a high concentration of semiconductor-based loads. Based on the obtained measurement data, one of the facilities was modeled in the

ETAP (Electrical Transient Analyzer Program) power system analysis software, while the other facility was directly modeled in the MATLAB/Simulink environment in order to enable the implementation of advanced switching structures and control algorithms required for active harmonic filter applications. In both cases, the models were configured to accurately represent the actual operating conditions at the time of measurement, and their validity was verified through comparison with field data.

In the final stage of the study, comprehensive simulations were performed under various operating scenarios by applying passive and active harmonic filter solutions. The results demonstrated that both current and voltage total harmonic distortion levels could be reduced to acceptable limits. As a result of the implemented filtering solutions, reductions in RMS current values led to a decrease in overall energy consumption, lower active power losses, improved power factor, and a significant mitigation of harmonic-related equipment failures. The findings indicate that harmonic analysis–based and properly designed filtering strategies are of critical importance for energy efficiency, equipment lifetime, and operational continuity in large-scale water treatment plants.

Keywords: Harmonics, Water Treatment Plants, Filter, ETAP, MATLAB/Simulink

1
GİRİŞ

Literatür Özeti

Tez çalışması için hazırlanan literatür özeti; harmoniklerin temelleri ve güç sistemleri üzerindeki etkileri, endüstriyel tesislerde harmonik kaynakları, su arıtma tesislerindeki yük yapısı ve harmonikler, harmonik analizi için modelleme ve saha uygulamaları, harmonik filtre tasarımları ve çözüm önerileri olmak üzere beş altbaşlıkta sunulmuştur.

1.1.1 Harmoniklerin Temelleri ve Güç Sistemleri Üzerindeki Etkileri

Harmonikler, güç sistemlerinde akım ve gerilim dalga şekillerinin temel frekanstan saparak sinüzoidal formunu kaybetmesine neden olan, temel bileşenin tam katı frekanslarında oluşan bileşenler sonucu ortaya çıkan ve modern elektrik şebekelerinde yaygın olarak görülen güç kalitesi problemlerinden biridir. IEEE 519 standardı, harmonikleri "temel frekansın tam katı olan akım veya gerilim bileşenleri" olarak tanımlamakta ve bu bileşenlerin sistem üzerindeki etkilerinin sınırlandırılması gerektiğini belirtmektedir [1]. Yarı iletken madde içeren güç elektroniği tabanlı yüklerin artması sebebiyle harmoniklerin endüstriyel tesislerde yaygınlığı önemli ölçüde artmış, bu durum güç kalitesinin düşmesine, ekipman ömrünün azalmasına ve enerji verimsizliğine yol açmıştır [2].

Harmoniklerin olumsuz etkilerinin temel nedenlerinden biri, akımın RMS (root mean square) değerini arttırmasıdır. Bu durum, iletkenler, kablolar, transformatörler ve motorlar gibi elektriksel ekipmanlar üzerinde ek ısınmalara yol açmaktadır. Arrillaga ve Watson, harmonik akımların iletkenlerdeki bakır kayıplarını RMS akım artışına bağlı olarak artırdığını, demir kayıplarını ise frekans bağımlılığı nedeniyle harmonik derecesinin karesiyle doğru orantılı biçimde yükselttiğini ifade etmektedir [3]. Transformatörler üzerinde yapılan çalışmalarda

ise özellikle 3., 5. ve 7. harmonik bileşenlerin manyetik nüve üzerinde ek kayıplar yarattığı, bundan dolayı transformatörün yüklenme kapasitesinin %10–20 oranında düşebildiği IEC 60076-1 kapsamında ortaya konmuştur [4].

Harmonikler ısınmanın yanı sıra sistemin empedans karakteristiğini değiştirerek rezonans riskini de artırmaktadır. Bollen, zayıf kısa devre gücüne sahip noktalarda paralel rezonans oluşmasının gerilim distorsiyonunu doğrusal olmayan şekilde büyütebileceğini, özellikle kompanzasyon sistemleri ve kapasitif yüklerin bulunduğu tesislerde 3., 5. veya 7. harmonik seviyelerinde kritik rezonans tehlikesi oluştuğunu belirtmektedir [5]. Bu durum, reaktif güç kompanzasyonunun kontrolsüz yapılması durumunda harmoniklerin etkilerinin daha da artabileceğini göstermektedir.

Harmoniklerin etkilediği önemli ekipmanlardan biri de asenkron motorlardır. IEC 60034-17 motor sargılarının harmonik gerilimlerden dolayı ek akı yoğunluğu, titreşim ve kayıplara maruz kaldığını, bu nedenle motorların termal stres altında kalarak ömürlerinin kısalabileceğini ifade etmektedir [4]. Akagi'nin güç elektroniği tabanlı yükler üzerine yaptığı çalışmalar, özellikle 5. harmonik akımın negatif faz sıralı bir bileşen oluşturduğunu ve motor milinde ters yönde tork üreterek motor verimini düşürdüğünü ortaya koymuştur [6]. Bu etki, büyük güçlü büyük güçlü pompaların kullanıldığı arıtma tesisleri için kritik bir öneme sahiptir.

Harmonikler, ölçüm ve koruma sistemlerinde de ciddi sorunlara sebep olmaktadır. Chapman, harmonik akımların akım trafolarında manyetik doyma eğrisini etkileyerek ölçüm hatalarına yol açtığını, termik-manyetik koruma elemanlarının ise harmonik distorsiyonu sebebiyle yanlış tetiklenebildiğini rapor etmiştir [7]. Özellikle 3. harmonik bileşenlerin nötr iletkeninde ek akım oluşturması, dört telli sistemlerde nötr kesitinin yetersiz kalmasına ve aşırı ısınmaya sebep olabilmektedir.

Harmonikler tüm bu olumsuzluk etkilerle birlikte sistemdeki güç faktörünü de düşürmektedir. Emanuel, harmoniklerin sisteme getirdiği ilave reaktif güç akışının hem gerilim kararlılığına hem de güç faktörüne olumsuz etki ettiğini, bu nedenle sistemdeki harmonik seviyelerinin yalnızca distorsiyon olarak değil aynı zamanda enerji taşıma kapasitesi açısından da değerlendirilmesi gerektiğini vurgulamaktadır [8].

1.1.2 Endüstriyel Tesislerde Harmonik Kaynakları

Endüstriyel tesislerde harmonik oluşturan ekipmanlar genellikle doğrusal olmayan yük sınıfına giren motor sürücüleri, pompalar, HVAC sistemleri, doğrultucular, UPS cihazları ve yarı iletken madde içeren tüm güç elektroniği devreleridir. IEEE 519, endüstriyel tesislerde harmonik seviyelerinin değişken frekanslı motor sürücüleri (VFD) sebebiyle %40 seviyelerine kadar çıkabildiği belirtilmiştir [1].

Akagi'nin çalışmalarında, üç fazlı köprü doğrultucuların 5., 7., 11. ve 13. harmonikleri baskın olarak ürettiği; harmonik akım büyüklüğünün yük seviyesine ve DC devresinin filtreleme yapısına bağlı olarak değiştiği gösterilmiştir [6].

Su arıtma tesislerinde de kullanılan yüksek güçlü pompa uygulamalarında kullanılan PWM tabanlı motor sürücülerin, anahtarlama frekansının yüksek olması nedeniyle geniş bir frekans bandında harmonik üretimi yaptığı, bu nedenle sadece düşük dereceli değil aynı zamanda yüksek dereceli harmoniklerin de sistem empedansını etkilediği çeşitli deneysel çalışmalarda bildirilmiştir [2].

Çimento, çelik, maden ve su arıtma tesislerinin incelendiği CIGRE raporunda, büyük güçlü motor sürücülerinin toplam harmonik bozulmasına (%THB) tek başına %20–50 arası katkı yapabildiği belirtilmiştir [9].

Ayrıca, Zhang ve arkadaşları tarafından yapılan bir saha çalışmasında, değişken frekanslı motor sürücülerinin aynı bara üzerinden beslendiği durumlarda, harmonik akımların sadece bireysel sürücülerden değil, sürücüler arası etkileşimden de kaynaklanabildiği; bu durumun özellikle 11., 13. ve 17. harmoniklerin büyümesini tetiklediği gösterilmiştir [10]. Bu çalışma, harmonik analizlerinde yalnızca tekil cihazların değil, sürücü kümelerinin oluşturduğu etkileşimlerin de dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

1.1.3 Su Arıtma Tesislerinin Yük Yapısı ve Harmonikler

Su arıtma tesisleri, alçak gerilimden orta ve yüksek gerilim seviyelerine kadar uzanan geniş bir elektriksel altyapıya sahiptir ve bu tesislerde farklı güç seviyelerinde çok sayıda elektriksel ekipman kullanılmaktadır. Tesisin kapasitesine ve işletme senaryosuna bağlı olarak motor-pompa grupları, havalandırma blower sistemleri, dozajlama üniteleri, filtrasyon ve geri yıkama sistemleri ile otomasyon ve kontrol donanımları farklı kombinasyonlarda devreye alınmakta ve çalıştırılmaktadır. Bu ekipmanların önemli bir kısmı, özellikle güç elektroniği

tabanlı motor sürücüleri ve anahtarlamalı güç kaynakları, doğrusal olmayan yük karakteristiği sergileyerek şebekede harmonik bozulmalara neden olmaktadır.

Su arıtma tesislerinde harmoniklerin başlıca kaynakları arasında değişken frekanslı motor sürücüleri, yumuşak yol vericiler, UPS sistemleri ve otomasyon panolarında kullanılan anahtarlamalı güç kaynakları yer almaktadır. Ayrıca, SCADA ve bilgisayar tabanlı otomasyon sistemleri, ölçme-kontrol ekipmanları ve haberleşme altyapılarında kullanılan güç elektroniği devreleri de harmonik içeriğin artmasına katkı sağlamaktadır. Bu tür yüklerin yaygın olarak kullanılması, tesisin enerji verimliliğini arttırırken, aynı zamanda harmonik akımların artmasına ve gerilim dalga şeklinin bozulmasına yol açabilmektedir. Özellikle pompaj ve blower sistemlerinin değişken hızda çalıştırıldığı tesislerde, harmonik spektrumun işletme koşullarına bağlı olarak sürekli değiştiği rapor edilmiştir [1], [11].

Su arıtma tesislerinin yük yapısında yer alan yüksek güçlü motor grupları ile bu motorları besleyen transformatörler, harmonik akımlar nedeniyle manyetik doyma noktasına yaklaşabilmekte; bu durum transformatörlerde ek kayıplara, gürültü artışına ve sıcaklık yükselmelerine neden olabilmektedir. Literatürde, harmonik akımların transformatör çekirdek ve bakır kayıplarını artırarak ekipman ömrünü kısalttığı ve aşırı ısınma riskini yükselttiği belirtilmektedir [3], [11].

Buna ek olarak, su arıtma tesislerinde yaygın olarak kullanılan kompanzasyon sistemleri ve kondansatör grupları, harmoniklerin varlığında rezonans riski ile karşı karşıya kalabilmektedir. Uygun şekilde tasarlanmamış kompanzasyon sistemlerinde, harmonik akımların kondansatör arızalarına, sigorta atmalarına ve ekipman hasarlarına yol açtığı; bu durumun tesisin sürekliliğini ve işletme güvenliğini olumsuz etkilediği çeşitli saha çalışmalarında rapor edilmiştir [1], [8]. Harmoniklerin etkisiyle motor sürücüleri, UPS sistemleri ve hassas otomasyon ekipmanlarında da sık arızalar meydana gelebildiği ve bu arızaların bakım maliyetlerini artırdığı bilinmektedir.

Bu nedenle, su arıtma tesisleri gibi karmaşık ve çok sayıda doğrusal olmayan yük içeren sistemlerde, yük yapısının detaylı şekilde analiz edilmesi ve harmoniklerin ekipmanlar üzerindeki etkilerinin değerlendirilmesi büyük önem taşımaktadır. Harmoniklerin yalnızca enerji kalitesi açısından değil, tesis ekipmanlarının

güvenilirliği, ömrü ve işletme sürekliliği açısından da kritik bir faktör olduğu görülmektedir.

Zengin ve arkadaşlarının Türkiye'de bir içme suyu arıtma tesisi üzerinde gerçekleştirdiği çalışmada, tesis bünyesinde yaygın olarak kullanılan 6-darbeli motor sürücülerinin 5. ve 7. harmonikleri baskın şekilde ürettiği belirlenmiştir. Yapılan saha ölçümlerinde, bazı işletme senaryolarında gerilim toplam harmonik bozulma (THB_V) seviyesinin %8'in üzerine çıktığı ve bu durumun özellikle düşük kısa devre gücüne sahip besleme noktalarında daha belirgin hâle geldiği rapor edilmiştir [12].

Atık su arıtma tesislerinde gerçekleştirilen saha çalışmalarında ise, yüksek güçlü havalandırma blowerlarının ve çamur susuzlaştırma ünitelerinin neden olduğu harmonik akımların transformatör ve besleme kablolarında ek ısınmalara yol açtığı gözlemlenmiştir. Bu çalışmalarda, harmonik akımların neden olduğu sıcaklık artışlarının bazı ekipmanlarda %15 seviyelerine ulaştığı ve belirli işletme koşullarında IEEE 519 standardında belirtilen sınır değerlerin aşıldığı belirtilmiştir [13]. Bu durum, harmoniklerin yalnızca enerji kalitesi açısından değil, aynı zamanda tesis ekipmanlarının termal ömrü ve işletme güvenliği açısından da kritik bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Su arıtma tesislerinde karşılaşılması muhtemel bir diğer durum ise, yüksek güçlü pompaların aynı anda devreye alınması sırasında ortaya çıkan geçici harmonik akımlarıdır. Yapılan çalışmalarda, bu tür ani yüklenmeler sırasında sistem empedansının değiştiği ve kısa süreli olarak THB seviyelerinin %12'ye kadar yükseldiği rapor edilmiştir [14]. Özellikle dinamik çalışma koşullarına sahip tesislerde bu geçici harmoniklerin, kompanzasyon sistemleri ile etkileşime girerek rezonans riskini artırabileceği vurgulanmaktadır.

Bu bulgular, su arıtma ve atık su tesislerinde harmoniklerin yalnızca sürekli işletme koşullarında değil, geçici rejimler ve farklı yük senaryolarında da değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymaktadır. Dolayısıyla, bu tür tesislerde yapılacak harmonik analiz çalışmalarının saha ölçümleri ile desteklenmiş, farklı işletme senaryolarını kapsayan sayısal modellemeler ile gerçekleştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

1.1.4 Harmonik Analizi için Modelleme ve Saha Uygulamaları

Endüstride harmonik analizleri, saha ölçümleri ile sayısal modelleme ve simülasyon yöntemlerinin bir arada kullanılmasıyla gerçekleştirilmektedir. Bu yaklaşım, sistemin gerçek çalışma koşullarını yansıtmak ve filtreleme veya kompanzasyon çözümlerinin güvenilirliğini test etmek açısından büyük önem taşımaktadır. Simülasyon tabanlı harmonik analiz, mevcut durumu değerlendirmekle kalmayıp, farklı işletme senaryolarında (yük devreye alma, yük değişimi, kompanzasyon uygulamaları), pasif veya aktif filtre yerleşimi ve boyutlandırması, rezonans analizi, reaktif güç kontrolü ve transient (ani yük değişimi) analizleri için de kritik bilgiler sunar.

Farbis Anthony ve arkadaşları [15], petrol sahasında dalgıç elektrik pompalarının değişken frekanslı motor sürücüleri aracılığıyla oluşturduğu harmonik bozulmaları incelemiş; başlangıçta $\%THB_I$ %38–42, $\%THB_V$ %6–8 ve güç faktörü 0,86 olarak ölçülen sistemde, tek ayarlı pasif filtre uygulaması ile $\%THB_I$ %6–7'ye, $\%THB_V$ %2,5–3'e düşürülmüş ve güç faktörü 0,97–0,99 aralığına yükseltilmiştir. Benzer şekilde, büyük motor sürücüleri, ark fırınları ve kaynak makineleri içeren bir demir-çelik tesisinde, doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmonik bozulmalar MATLAB/Simulink ortamında modellenmiş ve pasif filtreler simülasyon ile değerlendirilmiştir; 5. ve 7. harmoniklerin filtrelenmesi sonucunda $\%THB_I$ %32,8'den %5,2'ye, $\%THB_V$ %6,1'den %1,7'ye düşürülmüş, sistem kayıpları ve dalga şekli bozulmaları önemli ölçüde azaltılmıştır [16]. Kimya endüstrisinde yapılan bir başka çalışmada [17], başlangıçta güç faktörü 0,7, $\%THB_I$ %30 ve $\%THB_V$ %11 olan sistemde aktif harmonik filtre entegrasyonu uygulanmış; sonuç olarak güç faktörü 0,91'e, $\%THB_I$ %6–7'ye ve $\%THB_V$ %4–5'e düşürülerek sistem verimliliği ve kararlılığı artırılmıştır. Su pompalama ve arıtma istasyonlarında, motor sürücülerinden kaynaklanan harmoniklerin enerji verimliliğine etkisi araştırılmış; pasif filtrelerin yetersiz kaldığı durumlarda şönt tip aktif güç filtresi uygulanmış ve $\%THB_I$ %30'dan %3 seviyelerine indirilmiştir. Böylece, sistem kayıpları azaltılmış, güç faktörü iyileştirilmiş ve dalga şekli bozulmaları minimuma indirilmiştir [18]. Deniz suyu arıtma tesislerinde El-Arwash, Gafar ve El-Sehiemy [19], çok sayıda motor-pompa grubu, yumuşak yol verici, UPS ve frekans konvertörü içeren sistemde aktif filtre ile 5. harmonikteki bozulmayı $\%HB_I$ 12,92'den %0,10'a düşürmüş; tesis genelindeki harmonik içeriği önemli ölçüde

azalmış ve güç kalitesi problemleri ortadan kaldırılmıştır. Khaledian, Johnson ve Hemati [20] ise 12000 beygir gücündeki bir senkron motorun yumuşak yol verici ile yol alma sırasında karşılaştığı tork harmonikleri ve titreşim sorununu incelemiş, geleneksel filtreleme yerine yol verici tetikleme stratejilerini optimize ederek motorun sorunsuz kalkışını sağlamışlardır. Sakar ve Bollen [21], su pompalama sistemlerinde kullanılan değişken hızlı motor sürücülerinin neden olduğu harmonik bozulmaları saha ölçümleri ve sayısal modelleme yöntemleri ile incelemiştir. Çalışmada, farklı debi ve hız koşullarında çalışan pompa-motor gruplarının harmonik spektrumlarının önemli ölçüde değiştiği gösterilmiş; özellikle düşük hızlarda 5. ve 7. harmoniklerin baskın hâle geldiği rapor edilmiştir. Ölçüm sonuçları, simülasyon ortamında oluşturulan sistem modeli ile karşılaştırılmış ve elde edilen THB_I ve THB_V değerlerinin yüksek oranda örtüştüğü belirtilmiştir. Bu doğrultuda, değişken işletme koşullarına sahip su pompalama tesislerinde harmonik analizlerin yalnızca nominal çalışma noktaları için değil, farklı yük senaryolarını kapsayacak şekilde gerçekleştirilmesinin gerekliliği vurgulanmıştır.

Genel olarak, farklı sektörlerde (petrol, demir-çelik, kimya, su arıtma vb.) doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmonik bozulmalar benzer etkiler yaratmakta; uygun şekilde tasarlanmış aktif veya pasif filtreler ve optimize edilmiş başlangıç stratejileri ile THB seviyeleri önemli ölçüde düşürülmekte ve güç faktörü iyileştirilebilmektedir. Bu çalışmalar, saha ölçümleri ve simülasyon tabanlı modellemenin birlikte kullanılmasının, harmonik azaltma stratejilerinin güvenilirliğini artırmada kritik bir araç olduğunu ortaya koymaktadır.

1.1.5 Harmonik Filtre Tasarımları ve Optimal Çözüm Önerileri

Harmoniklerin azaltılmasında kullanılan başlıca yöntemler; pasif filtreler, aktif filtreler, hibrit filtreler ve çok darbeli doğrultucu sistemlerdir. Her bir yöntem, farklı sistem koşullarına, yük profiline ve ekonomik kriterlere göre avantaj ve sınırlamalara sahiptir.

Pasif filtrelerin tasarımında sistem rezonansının dikkate alınması kritik bir unsur olarak vurgulanmaktadır. Literatürde, L-C tabanlı tek ayarlı (single-tuned) filtrelerin 5. ve 7. harmonikleri etkin bir şekilde bastırdığı, ancak yük değişimlerine, sistem empedansındaki değişikliklere veya faz kaymalarına bağlı olarak performans kaybı yaşayabileceği belirtilmiştir [22]. Bu bağlamda, pasif filtrelerin

doğru boyutlandırılması ve yerleşimi, hem harmonik azaltımı hem de sistem güvenliği açısından önemli bir tasarım parametresidir.

Aktif güç filtreleri, özellikle değişken ve dinamik yüklerin yoğun olduğu endüstriyel tesislerde etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Çalışmalarda, aktif güç filtrelerinin hızlı tepki mekanizması sayesinde toplam harmonik bozulma oranını (THB) %70'e kadar azaltabildiği gözlemlenmiş, ancak ilk yatırım maliyetinin pasif filtrelere göre önemli ölçüde yüksek olduğu raporlanmıştır [23]. Aktif filtreler, özellikle yüksek dereceli harmonik bileşenlerini bastırmada, yük değişimlerinden kaynaklanan geçici bozulmaları minimize etmede ve güç faktörünü iyileştirmede avantaj sağlamaktadır.

Hibrit filtreler ise pasif ve aktif filtrelerin avantajlarını birleştirerek daha geniş bir harmonik spektrumunu hedeflemektedir. Büyük güçlü pompalar veya motor sürücülerinin yoğun kullanıldığı tesislerde hibrit filtre uygulamaları, düşük dereceli harmonikleri pasif filtrelerle bastırırken, yüksek dereceli ve değişken harmonik bileşenlerini aktif filtrelerle kontrol ederek optimum performans sağlamaktadır. Çeşitli saha projelerinde, hibrit filtre uygulamaları sayesinde $\%THB_I$'nin önemli ölçüde düşürüldüğü ve sistemin güç kalitesi ile verimliliğinin iyileştirildiği gözlemlenmiştir [24].

Bunun yanı sıra, çok darbeli doğrultucu sistemler harmonik üretimini doğal olarak azaltan bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Bu sistemlerde, faz kaydırmalı ve seri bağlanmış doğrultucular sayesinde belirli harmonik bileşenler bastırılır ve harmonik akım bileşenleri %30–80 oranında azaltılabilir. Ancak, bu sistemlerin yüksek güç seviyelerinde ekonomik olmaması ve karmaşık transformatör bağlantıları gerektirmesi nedeniyle tüm tesislerde uygulanabilir olmadığı belirtilmiştir [25].

Tezin Amacı

Büyük güçlü su arıtma tesisleri; yüksek kapasiteli motor-pompa grupları, doğrultucu ve güç elektroniği tabanlı sürücüler, kompanzasyon sistemleri ve geniş ölçekli elektriksel altyapıları ile enerji kalitesi açısından kritik tesisler arasında yer almaktadır. Bu tür tesislerde kullanılan yüksek güçlü elektrik motorları ve yardımcı ekipmanlar, besleme sisteminde harmonik akım ve gerilim bileşenlerinin oluşmasına neden olmakta; söz konusu harmonikler transformatörler, kablolar,

kompanzasyon üniteleri ve diğer elektriksel ekipmanlar üzerinde ek termal ve dielektrik zorlanmalar oluşturarak sistem performansını ve işletme güvenliğini olumsuz etkileyebilmektedir. Bu nedenle, büyük güçlü su arıtma tesislerinde harmonik kaynaklarının doğru şekilde belirlenmesi, etkilerinin nicel olarak ortaya konulması ve giderilmesine yönelik uygun mühendislik çözümlerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Su arıtma tesisleri, her ne kadar benzer arıtma proseslerine sahip olsa da, işletme karakteristikleri bakımından önemli farklılıklar gösterebilmektedir. Bu tesisler genel olarak, sabit debi ve basınçta çalışan tesisler ile değişken debi ve basınç talebine göre işletilen tesisler olmak üzere iki grupta değerlendirilmektedir. Sabit debi ve basınçta çalışan tesislerde, özellikle ham su ve terfi pompaları gibi yüksek güçlü motor-pompa grupları nominal hızda ve sabit yük altında çalışmakta; bu motorlara çoğunlukla yumuşak yol vericiler ile yol verilmektedir. Bu yapıda harmonik etkiler daha çok motorların devreye alma süreçlerinde ve geçici işletme rejimlerinde ortaya çıkmaktadır. Buna karşılık, değişken debi ve basınç gereksinimi bulunan tesislerde motorların büyük bölümü değişken frekanslı sürücüler ile çalıştırılmakta; bu durum enerji verimliliğini artırmakla birlikte, sürekli ve yüksek seviyeli harmonik akım bileşenlerinin oluşmasına neden olmaktadır.

Bu tez çalışmasının temel amacı, büyük güçlü su arıtma tesislerinde işletme karakteristiğine bağlı olarak ortaya çıkan harmonik oluşum mekanizmalarının incelenmesi, harmoniklerin sistem üzerindeki etkilerinin saha ölçümleri ve sayısal modelleme yöntemleri ile analiz edilmesi ve her bir işletme yapısı için uygun çözüm önerilerinin geliştirilmesidir. Bu kapsamda, sabit debi ve basınçta çalışan büyük güçlü bir tesis olarak Büyükçekmece Su Arıtma Tesisi, değişken debi ve basınç karakteristiğine sahip bir tesis olarak ise İhsaniye Su Arıtma Tesisi ele alınmıştır.

Çalışma sürecinde her iki tesis için saha ölçümleri gerçekleştirilmiş, tesislerin işletme koşulları altında oluşan harmonik bileşenler ve bunların sistem üzerindeki etkileri belirlenmiştir. Elde edilen ölçüm sonuçları, IEEE ve IEC standartlarında tanımlanan sınır değerler ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Her iki tesis için tek hat diyagramları oluşturulmuş, güç akışı ve harmonik karakteristikleri paket yazılım ortamında modellenmiş ve saha ölçüm verileri ile

simülasyon sonuçları karşılaştırılarak sistem modellerinin doğrulaması (validasyon) gerçekleştirilmiştir. Doğrulanan modeller üzerinde, tesislerin işletme yapısına uygun olacak şekilde pasif ve/veya aktif harmonik filtre çözümleri değerlendirilmiş; harmonik seviyelerindeki iyileşmeler belirlenmiş ve çözüm önerileri karşılaştırılmıştır.

Bu çalışma sonucunda, sabit debi–basınçlı ve değişken debi–basınçlı su arıtma tesislerinde harmonik davranışların farklılaştığı, her bir işletme yapısı için uygun çözüm yaklaşımlarının da farklılık göstermesi gerektiği sistematik olarak ortaya konulmuştur. Elde edilen bulguların, enerji kalitesinin iyileştirilmesine, ekipman ömrünün uzatılmasına, sistem kayıplarının azaltılmasına ve tesislerin işletme sürekliliğinin artırılmasına yönelik karar süreçlerine bilimsel bir temel sunması hedeflenmiştir.

Bu tezden elde edilen sonuçların, benzer işletme karakteristiklerine sahip su arıtma tesisleri başta olmak üzere, doğrusal olmayan yüklerin yoğun olarak kullanıldığı diğer endüstriyel tesislerde de uygulanabilir bir mühendislik yaklaşımı sunarak enerji kalitesi yönetimi alanına katkı sağlaması beklenmektedir.

Hipotez

Büyük güçlü su arıtma tesislerinde harmoniklerin sınırlandırılması; güç elektroniği temelli sürücüler, büyük güçlü motor yükleri, değişken hızlı pompalar ve kompanzasyon sistemlerinin yoğun kullanımı nedeniyle kritik önem taşımaktadır. Su arıtma tesisi güç sisteminin nitelikli bir şekilde işletilebilmesi, IEC 61000-3-6 ve IEEE 519 gibi uluslararası harmonik standartlarının sağlanması, sistemdeki harmonik bileşenlerinin doğru belirlenmesi ve azaltılmasına bağlıdır. Bu bağlamda, iki farklı su arıtma tesisinde gerçekleştirilecek olan harmonik ölçümlerinin; çalışma moduna, yük profiline, şebeke topolojisine ve sürücü kontrol karakteristiklerine bağlı olarak değişkenlik göstereceği düşünülmektedir.

Bu tez çalışmasında, enerji kalite kaydedici ile sahadan elde edilen harmonik ölçümleri, paket program tabanlı güç sistemi modellemesinden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılacaktır. Elde edilen sonuçların birbiriyle uyumlu olması hâlinde, kurulan modelin gerçek sistemi temsil edebilirliği doğrulanmış olacaktır.

Bu validasyon sonrasında, paket program üzerinde uygun filtreleme stratejileri ve harmonik azaltım teknikleri uygulanarak sistemdeki toplam harmonik bozulma oranlarının düşürülmesine yönelik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilecektir. Böylelikle, model doğrulandıktan sonra 5., 7., 11. ve diğer harmonik bileşenler üzerinde selektif filtreleme ve güç faktörü iyileştirmesi gibi çözümler paket program üzerinde test edilebilecek, sistem kayıpları ve harmoniklerden kaynaklı tüm problemleri minimize edilebilecektir.

Hipotezin ikinci boyutu, tesislerin hidrolik ve işletme karakteristiğine bağlı olarak yüksek güçlü motorların yol verme metot seçiminin harmonik davranış üzerinde belirleyici olduğudur. Değişken debi ihtiyacının bulunduğu tesislerde verimliliği artırmak amacıyla değişken frekanslı motor sürücüleri tercih edilmekte olup, yük azalmasıyla güç tüketiminin düşmesi enerji verimliliği açısından avantaj yaratmaktadır. Ancak, bu tür sürücüler yüksek seviyede 5., 7., 11. ve üst harmonikleri şebekeye enjekte ederek sistemin THB seviyesini kritik düzeye taşımaktadır. Buna karşın sabit debi ve basınçlı çalışan tesislerde büyük güçlü motorların soft-starter ile devreye alınması harmonik üretimi açısından daha dengeli bir yapı sunmakta, ancak başlatma akımlarının mekanik zorlanma ve gerilim düşümü gibi farklı problemler yaratabileceği bilinmektedir. Bu nedenle çalışma, özellikle frekans konvertörü ağırlıklı çalışan tesislerde harmonik filtreli kompanzasyonun zorunlu ve kritik bir gereklilik olduğunu, aksi durumda sistemin IEEE 519 ve EN 50160 limitlerini aşma eğiliminde bulunacağını öne sürmektedir.

Bu hipotez doğrultusunda, harmoniklerin sınırlandırılmaması durumunda su arıtma tesislerinde kompanzasyon kondansatörlerinin sık arızalandığı, sigorta ve kontaktör açmaları yaşandığı, motor sürücüleri ve transformatörlerde aşırı ısınmaların meydana geldiği ve ekipman ömrünün belirgin şekilde kısaldığı kabul edilmektedir. Buna karşılık, uygun şekilde doğrulanan model üzerinden geliştirilecek harmonik azaltım çözümleri ile bu arızaların önemli ölçüde azaltılabileceği, sistem kayıplarının düşürülebileceği ve işletme sürekliliğinin artırılabileceği öngörülmektedir. Harmonik kaynaklı kayıpların ve arızaların azalmasının, enerji verimliliğinde artış sağlayarak elektrik tüketim maliyetlerine olumlu yansıması ve bakım–onarım giderlerini azaltması beklenmektedir. Bu yönüyle çalışma, büyük güçlü su arıtma tesislerinde harmonik problemlerin çözümüne yönelik teknik

olduğu kadar ekonomik açıdan da yol gösterici bir yaklaşım sunmayı amaçlamaktadır.

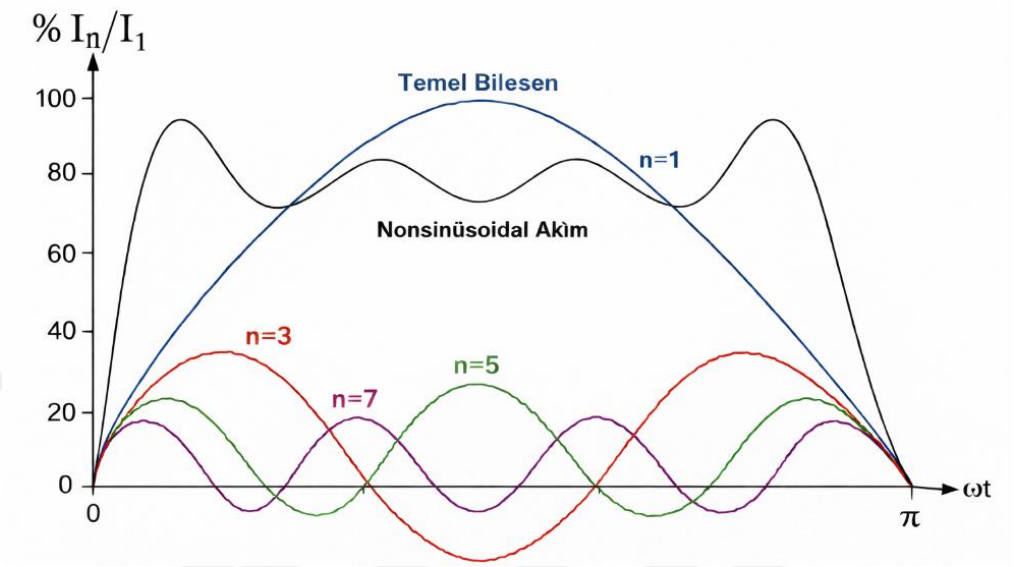
1
HARMONİK TANIMI VE TEMEL KAVRAMLAR

Elektrik enerjisi, günümüzdeki en önemli altyapı unsurlarından biridir. Nüfusun hızla artması ve sanayileşmenin etkisiyle elektrik enerjisine olan talep her geçen gün artmaktadır. Elektrik enerjisi üretimindeki kaynak kısıtlılığı ve maliyetlerdeki artış sadece enerjinin miktarını değil, enerji kalitesini de önemli bir problem haline getirmiştir [26],[3]. Elektrik enerji sistemlerinde harmonik bozulma, enerji kalitesinin önündeki en kritik problemlerden biridir. İdeal bir güç sisteminde, şebeke gerilimi sabit genlik ve frekansta saf bir sinüzoidal dalga formundadır. Ancak, güç elektroniği tabanlı lineer olmayan yüklerin endüstriyel ve ticari uygulamalardaki yaygınlığı, bu ideal durumu ciddi şekilde bozmaktadır. Bu yükler, şebekeden sinüzoidal olmayan akımlar çekerek sistem empedansı üzerinde harmonik gerilim düşümlerine neden olur ve şebeke gerilimi bozulur [8]. Harmonikler; güç kalitesinin bozulmasına, kayıpların artmasına, ekipman ömrünün azalmasına ve şebeke kararlılığının olumsuz etkilenmesine neden olduğu için IEEE, IEC gibi uluslararası kuruluşlar tarafından sınırlandırılmaktadır [1],[27].

Harmonik Tanımı

Elektrik güç sistemlerinde gerilim ve akım dalga şekilleri ideal olarak temel freakansta çalışan saf sinüzoidal bileşenlerden olacak şeklinde tanımlanmıştır. Bu temel bileşen, Avrupa ve Türkiye'de 50 Hz, Kuzey Amerika kıtasındaki bazı ülkelerde 60 Hz olarak tanımlanan şebeke frekansına sahiptir [28]. Ancak, pratikte güç sistemine bağlı yüklerin büyük bir kısmı doğrusal olmayan karakter gösterdiğinden, şebekeden çekilen akım ve gerilim yalnızca bu temel sinüsoidal bileşenden ibaret değildir. Dalga şekli; temel bileşenin yanı sıra farklı genliklerde ve temel frekansın tam sayılı katlarında bulunan ek sinüzoidal bileşenlerin toplamı şeklinde oluşur. Bu ek sinüzoidal bileşenlerin her biri literatürde harmonic

bileşenler olarak tanımlanmaktadır. IEEE Std 519-2014'e göre harmonikler, "temel frekansın tam sayı katında bulunan periyodik bileşenler" olarak ifade edilir [1]. Dolayısıyla bir güç sisteminde gözlemlenen gerilim veya akım dalga şekli, temel bileşen ile bu harmonik bileşenlerin toplamından meydana gelir.



Şekil 2.1 Harmonik dalga şekli

2.1.1 Harmoniklerin Fourier Serisi ile İfade Edilmesi

Periyodik bir fonksiyon, temel frekanslı ve bu frekansın tam katları olan sinüzoidal fonksiyonların toplamı şeklinde ifade edilebilir. Bu yaklaşım, Jean-Baptiste Joseph Fourier tarafından ortaya konulmuş olup harmonik analizinin matematiksel temelini oluşturur [3]. Elektrik sistemlerinde sinüzoidal olmayan herhangi bir gerilim veya akım dalga formu x(t), Fourier serisi yardımıyla bileşenlerine ayrıştırılabilir. Bu durum, (2.1) eşitliğinde ifade edilmiştir.

$$x_{(t)} = x_0 + \sum_{h=1}^{\infty} 2x_h \sin(hw_1 t + \varphi_h) \qquad (2.1)$$

Bu ifade, dalga formunun temel frekans ve harmonik bileşenlerin toplamı olduğunu açıkça gösterir.

Fourier serisi aynı zamanda karmaşık üstel form kullanılarak daha kompakt bir şekilde eşitlik (2.2)'de ifade edilmiştir.

$$x_{(t)} = \sum_{h=-\infty}^{\infty} C_h e^{jh\omega_1 t} \quad (2.2)$$

Eşitlikteki karmaşık Fourier katsayıları

$$C_h = \frac{1}{T}\int_0^T x(t)e^{-jh\omega_1 t}\,dt \quad (2.3)$$

olarak gösterilir. Burada:

- X_0 veya C_0: DC bileşen. AC güç sistemlerinde genellikle ihmal edilebilir düzeydedir.
- h: Harmonik derecesi (1, 2, 3, ...). h=1 temel bileşeni (50/60 Hz), h≥2 ise harmonik bileşenleri temsil eder.
- X_h: h. harmonik bileşenin etkin (RMS) değeri.
- ω_1: Temel bileşenin açısal frekansı ($\omega_1 = 2\pi f_1$).
- φ_h: h. harmonik bileşenin faz açısı.
- C_h: h. harmonik bileşenin karmaşık Fourier katsayısı olup genlik ($|C_h|$) ve faz açısı ($\angle C_h$) bilgisini içerir.

Harmonik Kavramları

Harmonik bozulmanın seviyesini niceliksel olarak ifade etmek, standartlarla uyumu değerlendirmek ve filtreleme performansını ölçmek için bir dizi teknik kavram ve indeks geliştirilmiştir. Bu indeksler, harmonik spektrumunun tek bir değerle özetlenmesini veya belirli bileşenlerinin sınırlandırılmasını sağlar [1]. Bu bölümde en yaygın kullanılan harmonik indeksleri olan Toplam Harmonik Bozulma (THB) ve Toplam Talep Bozulması (TTB) ele alınacaktır.

2.2.1 Toplam Harmonik Bozulma (THB)

THB, harmonik bozulma seviyesini ölçmek için kullanılan en yaygın kabul görmüş parametredir. Temel bileşen dışındaki tüm harmonik bileşenlerin RMS değerinin, temel bileşenin etkin değerine yüzdesel oranı olarak tanımlanır [1]. Gerilim ve akım için ayrı ayrı hesaplanır. Eşitlik (2.4) ve (2.5)'te bu indeksler ifade edilmiştir.

$$THBv = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{n} Vi^2}}{V_1} \quad (2.4)$$

Burada:

- V1: Temel bileşen (50-60 Hz) gerilimin RMS değeri.
- Vh: h.dereceden harmonik gerilimin RMS değeri.

$$THB_I = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{n} Ii^2}}{I_1} \quad (2.5)$$

Burada:

- I_1: Temel bileşen (50-60 Hz) gerilimin RMS değeri.
- I_h: h.dereceden harmonik gerilimin RMS değeri.

2.2.2 Toplam Talep Bozulması (TTB)

THB_I 'nin en önemli dezavantajı, harmonik akım seviyesini yalnızca temel akımın anlık değerine bağlı olarak değerlendirmesidir. Yükün düşük talep çektiği zamanlarda temel akım küçük olduğundan, harmonik akımların seviyesi değişmese bile THB_I değeri yapay olarak yüksek görünebilir. Bu durum, gerçek harmonik kirliliğinin yanlış yorumlanmasına neden olur. Bu dezavantajı gidermek ve harmonik akım seviyesini sistem kapasitesiyle ilişkilendirebilmek amacıyla IEEE Std 519-2014, Toplam Talep Bozulması (TTB) kavramını tanımlamıştır [1]. TTB, tüm harmonik akımların toplam RMS değerinin, bağlantı noktasındaki ölçüm periyodu boyunca ölçülen maksimum talep yük akımının temel bileşeni (I_L) oranlanmasıyla elde edilir. Böylece harmonik bozulma, sistemin nominal yüklenmesi dikkate alınarak daha gerçekçi bir şekilde değerlendirilmiş olur. Bu, eşitlik (2.6)'da ifade edilmiştir.

$$TTB = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} Ih^2}}{I_L} \quad (2.6)$$

Burada:

- I_h: h. harmonik akım bileşeni.
- I_L: Tesisin ölçüm periyodu boyunca çekilen maksimum temel bileşen akımı.

Harmonikli Sistemler için Güç İfadesi

Elektrik güç sistemlerinde gerilim ve akım dalga şekillerinin sinüzoidal olmaktan sapması, aktif güç (P), reaktif güç (Q) ve görünen güç (S) arasındaki klasik ilişkiyi doğrudan etkilemektedir. Harmonik içeren sistemlerde, gerilim ve akım yalnızca temel bileşenden oluşmadığı için, sinüzoidal rejim için geçerli olan güç tanımları yetersiz kalmakta ve güç bileşenlerinin harmonik etkiler dikkate alınarak yeniden ifade edilmesi gerekmektedir [29].

Harmonikli tek fazlı bir sistemde, aktif güç, reaktif güç ve görünür güç sırasıyla (2.7),(2.8) ve (2.9) eşitlikleri ile ifade edilmiştir.

$$P = v_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} v_n I_n \cos(\delta_n - \phi_n) \tag{2.7}$$

$$Q = v_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} v_n I_n \sin(\delta_n - \phi_n) \tag{2.8}$$

$$S = V \cdot I = \left(\sum_{n=0}^{\infty} v_n^2\right)^{1/2} \cdot \left(\sum_{\Pi=0}^{\infty} I_n^2\right)^{1/2} \tag{2.9}$$

Burada:

- v_0: gerilimin DC bileşeni
- I_0: akımın DC bileşenleri.
- v_n: harmonik geriliminin efektif değeri
- ϕ_n: harmonik geriliminin faz açısı
- I_n: harmonik akımın efektif değeri
- δ_n**:** harmonik akımın faz açısı

Bu güç ifadelerinde olmadığı görülmektedir. Bu nedenle, bir bozulma gücü tanımlanmaktadır. İfadesi eşitlik (2.10)'da verilmiştir

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \tag{2.10}$$

Bu eşitlikte D, harmonik bozulma nedeniyle ortaya çıkan distorsiyon gücünü temsil etmekte olup, gerilim ve akımın sinüzoidal olduğu ideal sistemlerde sıfır değerini

almaktadır. Harmonikli güç sistemlerinde distorsiyon gücü, güç kalitesi problemlerinin nicel olarak değerlendirilmesinde önemli bir gösterge olarak kullanılmaktadır. Bu güç aktif olmayan güç olup sinüsoidal işaretli devrelerde sıfırdır [29].

Güç faktörü, bir elektrik sisteminde yük tarafından çekilen aktif gücün (P), sistemden talep edilen görünür güce (S) oranı olarak tanımlanır ve sistemin enerjiyi ne kadar etkin kullandığını gösteren temel bir performans göstergesidir. Harmonik içeren sistemlerde güç faktörü yalnızca gerilim ve akım arasındaki faz kaymasından değil, aynı zamanda dalga şekli bozulmalarından da etkilenmektedir. Bu nedenle, harmonikler güç faktörünün düşmesine ve sistem kayıplarının artmasına neden olmaktadır [26]. Eşitlik (2.11)'de ifade edilmiştir.

$$GF = \frac{P}{S} \tag{2.11}$$

Harmonik Standartları ve Mevzuat

Harmoniklerin elektrik enerji sistemlerindeki olumsuz etkilerinden dolayı ulusal ve uluslararası düzeyde düzenlemeler yapılmıştır. Bu düzenlemelerin amacı harmonik bozuklukları kontrol altına alarak sistem güvenilirliğini ve enerji kalitesini korumaktır. Temel olarak iki önemli standart, bu alanda küresel çapta referans kabul edilmektedir: IEEE Std 519 ve IEC 61000 serisi [30],[27].

2.4.1. IEEE ve IEC Yaklaşımları

Harmonik sınırlandırmada iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Bunlardan ilki, Noktasal Sınırlama yaklaşımı olup IEEE Std 519 standardı tarafından benimsenmiştir. IEEE Std 519, şebeke etkileşimi prensibine dayanarak, birden fazla yükün bağlı olduğu dağıtım veya iletim sistemi ile tüketici arasındaki ortak arayüz noktası olan Ortak Bağlantı Noktası (Point of Common Coupling – PCC) için harmonik sınır değerler tanımlar [30].

Bu yaklaşımın temel amacı, herhangi bir tüketicinin şebekeye enjekte ettiği harmonik akımların, şebeke işletmecisinin sorumluluğundaki gerilim distorsiyon seviyelerini kabul edilemez düzeylere çıkarmasını önlemektir. Bu nedenle, IEEE Std 519 standardı, hem tüketiciler tarafından PCC'den şebekeye enjekte edilen harmonik akımlar hem de PCC'de oluşan harmonik gerilim seviyeleri için sınır

değerler belirlemektedir. IEEE Std 519, bağlayıcı bir mevzuat niteliğinde olmayıp işletmeciler ve büyük tüketiciler için önerilen uygulama standardıdır [30].

İkinci yaklaşım ise Ekipman Bazlı Sınırlama yaklaşımı olup IEC 61000 serisi standartlar kapsamında ele alınmaktadır. Bu yaklaşımda harmonik kontrolü, sistem seviyesinden ziyade bireysel elektrikli ekipmanlar üzerinden gerçekleştirilmektedir. IEC 61000 serisi standartlar, ekipmanların şebekeye enjekte edebileceği harmonik akımları doğrudan sınırlandırarak, sistem genelinde oluşabilecek harmonik bozulmaların önüne geçmeyi amaçlamaktadır [27].

IEEE ve IEC yaklaşımları birbirini tamamlayıcı niteliktedir. IEEE Std 519, harmonik kontrolünü sistem seviyesi ve PCC bazlı olarak ele alırken, IEC 61000 serisi standartlar harmonik sınırlamayı ekipman seviyesi üzerinden gerçekleştirmektedir. Bu nedenle, büyük güçlü endüstriyel tesislerde harmonik kontrolü için her iki yaklaşımın birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

2.4.2 IEEE Standardının Detaylı İncelenmesi

IEEE Std 519 standardının en güncel sürümü 2022 yılında yayımlanmıştır ve harmonik kontrolüne ilişkin temel referans olarak kullanılmaktadır. Standart, PCC'de kabul edilebilir gerilim distorsiyon seviyelerini ve tüketicilerin şebekeye enjekte edebileceği harmonik akım sınırlarını tanımlar. Gerilim distorsiyon sınırları, PCC'deki nominal gerilim seviyesine bağlı olarak belirlenmiş olup, sistem işletmecisinin sağlamakla yükümlü olduğu maksimum harmonik gerilim seviyelerini ifade etmektedir. Bu sınırlar, IEEE Std 519-2022 kapsamında tanımlanan Tablo 2.1'de verilmiştir [31].

Tablo 2.1 IEEE standardına göre izin verilen maksimum THB_v [30],[38]

Ortak Bağlantı Noktasındaki Gerilim Seviyesi (Volt)	Maksimum Bireysel Harmonik Gerilim Distorsiyonu (%)	Maksimum Toplam Gerilim Harmonik Bozulması (%)
V≤1.0 kV	5.0	8.0
1 kV<V<69 kV	3.0	5.0

Tablo 2.1 IEEE standardına göre izin verilen maksimum THB_v (devamı)

Ortak Bağlantı Noktasındaki Gerilim Seviyesi (Volt)	Maksimum Bireysel Harmonik Gerilim Distorsiyonu (%)	Maksimum Toplam Gerilim Harmonik Bozulması (%)
69 kV<V≤161 kV	1.5	2.5
161 kV<	1.0	1.5*(HVDC terminal etkilerinde %2'ye kadar izin verilir)

Akım bozulma sınırları ise, tüketicilerin PCC'den şebekeye enjekte ettiği harmonik akımlar için tanımlanmış olup, PCC'deki kısa devre oranına (I_{SC} / I_L) bağlıdır [32]. Bu yaklaşım, şebekenin harmoniklere karşı dayanımının kısa devre gücü ile doğru orantılı olduğu varsayımına dayanmaktadır. Akım sınırları, hem bireysel harmonik bileşenler (I_h/I_L) hem de Toplam Talep Bozulması için tanımlanmış olup Tablo 2.2'de sunulmuştur [33].

Tablo 2.2 Tüketiciler için akım bozulma sınırları [30]

I_{SC}/I_L	2≤h<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h≤50	TDD
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
h≤6 için çift harmonikler, tabloda verilen limitin %50'si ile sınırlandırılır.						

2.4.3 IEC Standardına Genel Bakış

IEC 61000-3-2 standardı, faz başına 16 A'e kadar akım çeken elektrikli ekipmanların şebekeye enjekte ettiği harmonik akımları sınırlandırmayı amaçlayan, ekipman bazlı bir harmonik emisyon standardıdır. Bu standart, harmonik kontrolünü sistem seviyesinden ziyade bireysel cihazlar üzerinden ele alarak, çok sayıda ekipmanın bağlı olduğu dağıtım şebekelerinde toplam harmonik bozulmanın kabul edilebilir seviyelerde tutulmasını hedeflemektedir [34].

IEC 61000-3-2 kapsamında ekipmanlar, kullanım amacı ve akım dalga şekli karakteristiğine bağlı olarak dört ana sınıfa ayrılmıştır. Her bir sınıf için, baskın harmonik bileşenlere özel maksimum akım emisyon limitleri tanımlanmıştır. Bu sınıflandırma aşağıda özetlenmiştir:

- Sınıf A: Dengeli üç fazlı ekipmanlar ile faz başına 16 A kadar akım çeken genel amaçlı elektrikli cihazlar. Endüstriyel ekipmanların büyük bir kısmı bu sınıfa girmektedir.
- Sınıf B: Taşınabilir elektrikli el aletleri. Bu sınıf, kısa süreli ve değişken çalışma koşullarına sahip cihazları kapsamaktadır.
- Sınıf C: Aydınlatma ekipmanları. Bu sınıf için harmonik sınırlar, özellikle üçüncü harmonik bileşenin baskın etkisi dikkate alınarak tanımlanmıştır.
- Sınıf D: 75 W ile 600 W arası güç çeken ve darbe akımı karakteristiği sergileyen ekipmanlar (bilgisayarlar, televizyonlar, ofis ekipmanları, … vb.). Bu sınıf, yüksek harmonik içeriğe sahip doğrultucu tabanlı yükleri kapsamakta olup, en sıkı harmonik sınırların uygulandığı gruptur.

IEC 61000-3-2 standardı, özellikle düşük ve orta güçlü cihazlar için zorunlu bir ürün standardı niteliğinde olup, Avrupa Birliği ülkelerinde piyasaya sürülen elektrikli ekipmanlar için uygunluk değerlendirmelerinde temel referans olarak kullanılmaktadır. Bununla birlikte, bu standart tek başına büyük güçlü endüstriyel tesislerde PCC seviyesindeki harmonik bozulmayı garanti altına almak için yeterli olmayıp, sistem seviyesinde IEEE Std 519 gibi tamamlayıcı standartlarla birlikte değerlendirilmesi gerekmektedir.

2.4.4 Ulusal Uygulamalar ve Diğer Standartlar

Türkiye'de elektrik enerji sistemlerinde harmoniklerin değerlendirilmesi ve sınırlandırılmasına yönelik uygulamalar, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından yayımlanan Elektrik Piyasasında Dağıtım ve Perakende Satış Faaliyetlerine İlişkin Kalite Yönetmeliği kapsamında yürütülmektedir. Söz konusu yönetmelik, Elektrik Şebeke Yönetmeliği ile birlikte elektrik dağıtım sisteminin teknik kalite yükümlülüklerini tanımlamakta olup, uygulamaya ilişkin detaylar EPDK tarafından yayımlanan Elektrik Dağıtım Sisteminin Teknik Kalitesine İlişkin Usul ve Esaslar çerçevesinde belirlenmektedir.

Bu mevzuat yapısı kapsamında, harmoniklere ilişkin sınır değerler ve değerlendirme kriterleri doğrudan sayısal tablolar halinde tanımlanmamakta; bunun yerine ulusal ve uluslararası standartlara atıf yapılarak teknik kalite değerlendirme esasları ortaya konulmaktadır. Bu doğrultuda, gerilim kalitesinin değerlendirilmesinde TS EN 50160 standardı esas alınmakta; harmoniklerin ölçümü ve analizinde TS EN 61000-4-30 ve TS EN 61000-4-7 standartlarında tanımlanan yöntemler kullanılmaktadır. Ayrıca, teknik kalitenin korunmasına yönelik olarak akım ve gerilim harmonik bozulma sınırlarının belirlenmesinde IEEE Std 519-2014 standardında yer alan kriterler referans alınmaktadır [35], [36],[37].

2.4.4.1 Dağıtım Şebekelerinde Harnoniklerin Değerlendirilmesi

Dağıtım şebekelerinde harmoniklerin değerlendirilmesine ilişkin uygulamalar, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) tarafından yayımlanan Elektrik Piyasasında Dağıtım ve Perakende Satış Faaliyetlerine İlişkin Kalite Yönetmeliği ile bu yönetmeliğe dayanılarak hazırlanan Elektrik Dağıtım Sisteminin Teknik Kalitesine İlişkin Usul ve Esaslar kapsamında yürütülmektedir. Söz konusu mevzuat, Elektrik Şebeke Yönetmeliği ile birlikte değerlendirilmekte olup, dağıtım şebekesinde kullanıcıya sunulan elektrik enerjisinin teknik kalite kriterlerini ve bu kriterlere ilişkin yükümlülükleri tanımlamaktadır.

Gerilim kalitesinin değerlendirilmesinde TS EN 50160 standardı esas alınmakta; dağıtım sistemlerinde gerilim harmonik bileşenleri ve toplam gerilim harmonik bozulma seviyeleri, bu standartta tanımlanan sınır değerler kapsamında izlenmekte ve değerlendirilmektedir [35], [38]. Harmonik ölçüm ve analiz yöntemleri

açısından ise, ölçüm metodolojisi TS EN 61000-4-30, harmonik ve enterharmonik bileşenlerin hesaplanmasına ilişkin esaslar ise TS EN 61000-4-7 standartları ile tanımlanmış olup, dağıtım şebekelerinde gerçekleştirilen güç kalitesi ölçümleri bu standartlara uygun olarak yapılmaktadır [36], [37].

Akım harmoniklerinin sınırlandırılmasına ilişkin olarak Elektrik Dağıtım Sisteminin Teknik Kalitesine İlişkin Usul ve Esaslar kapsamında, özellikle reaktif enerji bedeline tabi kullanıcılar için IEEE Std 519-2014 standardında tanımlanan akım ve gerilim harmonik bozulma sınırlarına uyulması zorunlu tutulmaktadır. Bu çerçevede, akım harmoniklerinin değerlendirilmesinde Ortak Bağlantı Noktası esaslı yaklaşım benimsenmekte ve IEEE 519 standardında tanımlanan sınır değerler referans alınmaktadır [1], [35].

- Gerilim Harmonik Limitleri

Gerilim harmoniklerine ilişkin sınır değerler ve değerlendirme esasları, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından yayımlanan Elektrik Piyasasında Dağıtım ve Perakende Satış Faaliyetlerine İlişkin Kalite Yönetmeliği ile Elektrik Şebeke Yönetmeliği kapsamında tanımlanan teknik kalite yükümlülükleri çerçevesinde belirlenmektedir. Bu mevzuata dayanılarak hazırlanan Elektrik Dağıtım Sisteminin Teknik Kalitesine İlişkin Usul ve Esaslar'da, dağıtım sistemlerinde gerilim kalitesinin değerlendirilmesinde esas alınacak standartlar açıkça belirtilmiştir. Bu kapsamda, dağıtım sisteminde kullanıcıya sunulan elektrik enerjisinin gerilim harmonik içeriği, TS EN 50160 standardı esas alınarak değerlendirilmektedir [35], [37]. TS EN 50160 standardına göre gerilim harmoniklerine ilişkin değerlendirme, 10 dakikalık ölçüm periyotları üzerinden yapılmakta ve elde edilen ölçüm sonuçlarının en az %95'inin tanımlanan sınır değerler içerisinde kalması gerekmektedir. Standartta, alçak ve orta gerilim seviyeleri için bireysel gerilim harmonik bileşenleri ile toplam gerilim harmonik bozulma oranı (THDv) açısından izin verilen sınır değerler tanımlanmıştır.

Türkiye'de dağıtım şebekelerinde uygulanan bireysel gerilim harmonik limitleri ve toplam gerilim harmonik bozulma sınırları, TS EN 50160 standardında belirtilen değerler esas alınarak belirlenmiş olup, bu çalışmada kullanılan sınır değerler Tablo 2.3'de sunulmuştur [37]. Söz konusu sınır değerler, dağıtım şebekesinde gerilim

kalitesinin korunmasını ve kullanıcı kaynaklı harmoniklerin şebeke geneline yayılmasının sınırlandırılmasını amaçlamaktadır [35].

Tablo 2.3 Dağıtım şebekelerinde gerilim harmonik limitleri [35], [38]

Harmonik Türü	Harmonik Mertebesi	Limit %
Tek Harmonikler (3'ün katı olmayanlar)	5	6.0
	7	5.0
	11	3.5
	13	3.0
	17	2.0
	19	1.5
	23	1.5
	25	1.5
Tek Harmonikler (3'ün katı olanlar)	3	5
	9	1.5
	15	0.5
	21	0.5
Çift Harmonikler	2	2.0
	4	1.0

Tablo 2.3 Dağıtım şebekelerinde gerilim harmonic limitleri (devamı)

Harmonik Türü	Harmonik Mertebesi	Limit %
Çift Harmonikler	6-24	0.533
Toplam Harmonik Bozulma (THB)	h≤40	8

- Akım Harmonik Limitleri

Türkiye'de dağıtım şebekelerinde akım harmoniklerinin sınırlandırılmasına ilişkin esaslar, Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından yayımlanan Elektrik Şebeke Yönetmeliği ile bu yönetmeliğe dayanılarak hazırlanan Elektrik Dağıtım Sisteminin Teknik Kalitesine İlişkin Usul ve Esaslar kapsamında tanımlanmıştır. Söz konusu mevzuatta, akım harmoniklerine ilişkin sınır değerler ulusal bir TS EN standardı ile doğrudan verilmemekte; bunun yerine, özellikle büyük güçlü tüketiciler ve reaktif enerji bedeline tabi kullanıcılar için IEEE Std 519-2014 standardında tanımlanan akım harmonik sınırlarına uyulması zorunlu tutulmaktadır [35], [1].

IEEE Std 519-2014 standardında akım harmonikleri, Ortak Bağlantı Noktası'nda kısa devre akımı ile yük akımı oranına (I_{SC}/I_L) bağlı olarak sınırlandırılmakta olup, ilgili sınır değerler daha önce Tablo 2.2 Tüketiciler için akım bozulma sınırları'nda sunulmuştur.

2.4.4.2 İletim Seviyesinde Harmonik Sınırlar

İletim sistemi seviyesinde harmonik bozuklukların değerlendirilmesi, Enerji Piyasa Denetleme Kurulu tarafından yayınlanan Elektrik Şebeke Yönetmeliği hükümleri kapsamında yapılmakta olup, gerilim ve akım harmoniklerine ilişkin sınır değerler yönetmeliğin ilgili eklerinde tanımlanmıştır. İletim sisteminde güç kalitesi gereklilikleri; daha geniş alanları ve yüksek güçlü tesisleri etkilemesi nedeniyle dağıtım sistemlerine kıyasla sistem güvenliği ve kararlılığı açısından daha sıkı sınır değerler ile ele değerlendirilmektedir.

- Gerilim Harmonik Limitleri

Elektrik Şebeke Yönetmeliği'nin EK-7'sinde, iletim seviyesinde izin verilen toplam gerilim harmonik bozulma (THBv) sınırları gerilim seviyesine bağlı olarak tanımlanmıştır. İlgili sınır değerleri tablolarda sunulmuştur.

Tablo 2.4 400 kV iletim sisteminde harmonik gerilim planlama sınır değerleri [56]

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)
5	2,0	3	1,5	2	1,0
7	1,5	9	0,5	4	0,8
11	1,0	15	0,3	6	0,5
13	1,0	21	0,2	8	0,4
17	0,5	>21	0,2	10	0,4
19	0,5			12	0,2
23	0,5			>12	0,2
25	0,5				
>25	0,2+0,3 (25/h)				
THB_V: %3					

Tablo 2.5 154 kV İletim sisteminde harmonik gerilim planlama sınır değerleri [56]

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)
5	2,0	3	2,0	2	1,0
7	2,0	9	1,0	4	0,8
11	1,5	15	0,3	6	0,5
13	1,5	21	0,2	8	0,4
17	1,0	>21	0,2	10	0,4
19	1,0			12	0,2
23	0,7			>12	0,2
25	0,7				
>25	0,2+0,5 (25/h)				
THB_V: %3					

Tablo 2.6 154 kV altındaki iletim sistemlerinde harmonik gerilim planlama sınır değerleri [56]

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)
5	3,0	3	3,0	2	1,5
7	3,0	9	1,2	4	1,0
11	2,0	15	0,3	6	0,5
13	2,0	21	0,2	8	0,4
17	1,6	>21	0,2	10	0,4
19	1,2			12	0,2
23	1,2			>12	0,2
25	0,7				
>25	0,2+0,5 (25/h)				
THBv: %4					

- Akım Harmonik Limitleri

İletim seviyesinde akım harmoniklerine ilişkin sınırlandırmalar ise Elektrik Şebeke Yönetmeliği'nin EK-8'inde tanımlanmıştır. Bu ekte, iletim sistemine bağlanan tesislerin PCC noktasında oluşturabileceği akım harmonik lerinin sınırlandırılmasına yönelik esaslar verilmiş olup değerlendirmeler IEEE Std 519-2014 standardında tanımlanan kısa devre oranı esaslı yaklaşıma dayandırılmıştır.

Tablo 2.7 İletim hatlarında 1 kV<V≤34,5 kV kabul edilebilir akım harmonik limitleri [56]

Harmonik Sırası		1 kV<V≤34.5 kV				
Grup	No	I_k/I_L				
		<20	20- 50	50-100	100-1000	>1000
TEK HARMONİKLER	h<11	4	7	10	12	15
	11≤h<17	2	3,5	4,5	5,5	7
	17≤h<23	1,5	2,5	4	5	6
	23≤h<35	0,6	1	1,5	2	2,5
	h≥35	0,3	0,5	0,7	1	1,4
Çift harmonikler kendinden önceki tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.						
TTB		5	8	12	15	20

Tablo 2.8 İletim hatlarında 34,5 kV<V<154 kV kabul edilebilir akım harmonik limitleri [56]

Harmonik Sırası		1 kV<V≤34.5 kV				
Grup	No	I_k/I_L				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
TEK HARMONİKLER	h<11	2	3,5	5	6	7,5
	11≤h<17	1	1,8	2,3	2,8	3,5

Tablo 2.8 İletim hatlarında 34,5 Kv<V<154 kV Kabul edşlebilir harmonik limitleri (devamı)

Harmonik Sırası		1 kV<V≤34.5 kV				
Grup	No	I_k/I_L				
		<20	20-50	50-100	100-1000	>1000
TEK HARMONİKLER	17≤h<23	0,8	1,25	2	2,5	3
	23≤h<35	0,3	0,5	0,75	1	1,25
	h≥35	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7
Çift harmonikler kendinden önceki tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.						
TTB		2,5	4	6	7,5	10

Tablo 2.9 İletim hatlarında V>154 kV kabul edilebilir akım harmonik limitleri [56]

Harmonik Sırası		1 kV<V≤34.5 kV				
Grup	No	I_k/I_L				
		<20	20- 50	50- 100	100- 1000	> 1000
TEK HARMONİKLER	h<11	1	1,8	2,5	3	3,8
	11≤h<17	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8

Tablo 2.9 İletim hatlarında V>154 kV Kabul edilebilir akım harmonik limitleri (devamı)

Harmonik Sırası		1 kV<V≤34.5 kV				
Grup		I_k/I_L				
	No	<20	20-50	50- 100	100- 1000	> 1000
TEK HARMONİKLER	17≤h<23	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	23≤h<35	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	h≥35	0,75	0,12	0,17	0,25	0,35
Çift harmonikler kendinden önceki tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.						
TTB		1,3	2	3	3,75	5

2
HARMONİK KAYNAKLARI VE ETKİLERİ

Elektrik enerji sistemlerinde harmonikler, temel olarak yüklerin akım–gerilim karakteristiğinin doğrusal olmamasından kaynaklanmaktadır. İdeal koşullar altında yalnızca saf dirençler doğrusal eleman olarak kabul edilmekte olup, bu tür yüklerde akım ve gerilim dalga şekilleri sinüzoidal ve aynı frekanstadır. Endüktans ve kapasitans gibi reaktif elemanlar ise frekansa bağlı davranış sergilemekte olup, pratik uygulamalarda ideal doğrusal eleman varsayımı her zaman geçerli değildir [3], [42].

Doğrusal olmayan yüklerde empedans, uygulanan gerilimin genliğine veya dalga şekline bağlı olarak değişmekte; bu durum şebekeden sinüzoidal olmayan akımların çekilmesine neden olmaktadır. Ortaya çıkan bozulmuş akım dalga şekilleri, sistem empedansı üzerinde harmonik gerilim düşümleri oluşturarak şebeke geriliminin de bozulmasına yol açmaktadır [3], [43]. Harmonik üreten bu yükler, endüstriyel, ticari ve konutsal sektörlerde giderek yaygınlaşan, yarı iletken elemanlar içeren güç elektroniği tabanlı cihazlar olarak öne çıkmaktadır [44].

Harmonik Kaynakları

Elektrik enerji sistemlerinde harmonik bozulmalar, temel olarak doğrusal olmayan yüklerin ve güç elektroniği tabanlı ekipmanların yaygınlaşması ile ortaya çıkmakta olup, günümüz güç sistemlerinde güç kalitesini sınırlayan en önemli etkenlerden biri hâline gelmiştir. İdeal sinüzoidal gerilim altında çalışan doğrusal yüklerde akım dalga şekli de sinüzoidal karakterini korurken, doğrusal olmayan yüklerde akım–gerilim ilişkisi doğrusal olmaktan uzaklaşmakta ve şebekeden sinüzoidal olmayan akımlar çekilmektedir [3], [11]. Bu akımlar, sistem empedansı üzerinde harmonik gerilim düşümleri oluşturarak hem yerel hem de sistem genelinde gerilim dalga şeklinde bozulmalara neden olmaktadır.

Harmonik kaynakları, genel olarak güç elektroniği dönüştürücüleri, endüstriyel proses yükleri, aydınlatma sistemleri ve invertör tabanlı enerji üretim tesisleri gibi farklı gruplar altında sınıflandırılmaktadır. Bu yüklerin ortak özelliği, yarı iletken

anahtarlama elemanları veya fiziksel olarak doğrusal olmayan çalışma mekanizmaları nedeniyle zamana bağlı ve doğrusal olmayan akım çekişine sahip olmalarıdır [39], [44]. Özellikle anahtarlamalı çalışan sistemlerde harmonik içeriğin büyüklüğü ve spektral dağılımı; kullanılan topolojiye, anahtarlama frekansına, yük seviyesine ve şebeke koşullarına bağlı olarak değişim göstermektedir [11].

Harmonik kaynakların sistem üzerindeki etkileri yalnızca dalga şekli bozulmaları ile sınırlı kalmamakta; iletim ve dağıtım ekipmanlarında ek kayıplar, transformatör ve kablolarda aşırı ısınma, kompanzasyon sistemlerinde rezonans riskleri, koruma rölelerinin hatalı çalışması ve hassas yüklerde fonksiyonel bozulmalar gibi çok sayıda teknik probleme yol açabilmektedir [3], [42]. Bu nedenle, harmonik kaynakların doğru şekilde tanımlanması, sınıflandırılması ve sistem üzerindeki etkilerinin anlaşılması, hem güç sistemi tasarımı hem de harmonik sınırlandırma ve filtreleme çözümlerinin etkin biçimde uygulanabilmesi açısından kritik öneme sahiptir.

Bu bölümde, modern elektrik güç sistemlerinde yaygın olarak karşılaşılan başlıca harmonik kaynakları, çalışma prensipleri ve ürettikleri bozucu bileşenlerin karakteristik özellikleri alt başlıklar hâlinde ele alınmıştır.

3.1.1 Güç Elektroniği Konvertörleri ve Frekans Sürücüleri

Güç elektroniği dönüştürücüleri, modern elektrik güç sistemlerinde harmonik kirliliğin en baskın kaynakları arasında yer almaktadır. Bu ekipmanlar; AC/DC doğrultucular, DC/AC invertörler ve AC/AC dönüştürücüler gibi çeşitli enerji dönüşümlerini, diyot, tristör, IGBT ve MOSFET gibi yarı iletken anahtarlama elemanları üzerinden gerçekleştirir. Anahtarlama işlemleri gereği bu konvertörler, şebeke tarafında karakteristik harmonik içeriğe sahip, sinüzoidal olmaktan uzak akım dalga şekilleri oluşturur [39].

3.1.1.1 Doğrultucular

Doğrultucular, üç fazlı alternatif gerilimi doğru gerilime dönüştüren ve endüstriyel güç elektroniği uygulamalarında yaygın olarak kullanılan AC/DC dönüştürücülerdir. Bu yapılar genellikle diyot veya tristör tabanlı yarı iletken anahtarlama elemanlarından oluşmakta olup, motor sürücüleri, güç kaynakları ve endüstriyel proses ekipmanlarında temel enerji dönüşüm elemanları olarak görev

yapmaktadır [39]. Ancak, anahtarlamalı çalışma prensipleri nedeniyle doğrultucular, şebekeden sinüzoidal olmayan akımlar çekerek karakteristik harmonik bileşenlerin oluşmasına neden olmaktadır [3].

Endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılan doğrultucu topolojisi, üç fazlı köprü yapısına sahip altı-darbeli doğrultuculardır. Bu doğrultucuların şebekeden çektiği hat akımları, periyodik ancak sinüzoidal olmayan bir dalga şekline sahiptir ve teorik olarak $h= 6k \pm 1$ ($k = 1, 2, \ldots$) mertebesindeki karakteristik harmonikleri üretmektedir [3]. Bu durum, özellikle 5. ve 7. harmoniklerin baskın hâle gelmesine neden olmakta ve güç sistemlerinde toplam harmonik bozulma seviyelerinin yükselmesine yol açmaktadır [11]. İdeal dengeli koşullar altında çift harmonikler ve üçün katı harmoniklerin (3., 9., 15. vb.) oluşmadığı literatürde belirtilmiştir [3].

Daha yüksek güçlü uygulamalarda ve harmonik performansın iyileştirilmesinin hedeflendiği sistemlerde ise on iki-darbeli doğrultucu yapıları tercih edilmektedir. Bu topoloji, fazları arasında yaklaşık 30° faz kaydırması bulunan iki adet altı-darbeli doğrultucunun aynı doğru gerilim barasını besleyecek şekilde çalıştırılması prensibine dayanır. Bu faz kaydırma işlemi genellikle özel transformatör bağlantıları ile sağlanmaktadır [39]. Bu yapı sayesinde, altı-darbeli doğrultucularda baskın olan düşük dereceli harmonikler büyük ölçüde sönümlenmekte ve doğrultucunun teorik harmonik spektrumu $h = 12k \pm 1$ mertebesine kaymaktadır [11].

Bu nedenle, on iki-darbeli doğrultucular 5. ve 7. harmoniklerin etkisini önemli ölçüde azaltırken, 11. ve 13. harmonikler sistemde baskın bileşenler hâline gelmektedir [23]. Her ne kadar bu yapı altı-darbeli doğrultuculara kıyasla daha iyi bir harmonik performans sunsa da, pratik uygulamalarda faz kaydırıcı transformatör empedans dengesizlikleri, anahtarlama açıları ve yük koşullarındaki değişimler nedeniyle teorik sönümleme seviyelerine her zaman ulaşılamadığı deneysel çalışmalarla gösterilmiştir [23]. Bu nedenle, özellikle harmonik sınırlarının sıkı olduğu büyük güçlü endüstriyel tesislerde, on iki-darbeli doğrultucular için dahi ek harmonik filtreleme çözümlerine ihtiyaç duyulabilmektedir [23].

Sonuç olarak, doğrultucu topolojisinin seçimi; sistemin güç seviyesi, bağlantı noktasındaki kısa devre gücü ve uygulanacak harmonik sınır değerleri dikkate alınarak değerlendirilmelidir [11].

3.1.1.2 Frekans Sürücüleri

Frekans sürücüleri (VFD'ler), asenkron motorların hız ve tork kontrolünü sağlamak amacıyla endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan güç elektroniği tabanlı cihazlardır. Temel çalışma prensibi, şebekeden alınan sabit frekanslı alternatif gerilimin önce doğrultularak doğru gerilime çevrilmesi, ardından bu doğru gerilimin istenen frekans ve genlikte değişken bir alternatif gerilime dönüştürülmesine dayanmaktadır. Bu enerji dönüşüm süreci, sürücünün hem giriş doğrultucu katında hem de çıkış invertör katında harmonik akım ve gerilim bileşenlerinin oluşmasına neden olmaktadır [39].

Sürücünün motor tarafından bulunan invertör katı, Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) tekniği ile çalışarak motora beslenen gerilimin frekansını ve efektif değerini kontrol eder. PWM işlemi, yüksek anahtarlama frekanslarında çalışan IGBT'ler kullanılarak gerçekleştirilir [39]. Bu durum, motor terminallerinde yüksek dv/dt'li gerilim darbeleri ve yüksek frekanslı ortak mod gerilimleri üretir [40]. Bu bileşenler motor sargı yalıtımında aşırı elektriksel zorlanmalara, yatak akımlarına ve elektromanyetik girişim problemlerine neden olabilmektedir [40].

3.1.1.3 Ark Ocakları ve Kaynak Makinaları

Ark ocakları, metalurji endüstrisinde cevherlerin ergitilmesinde kullanılan ve elektrik enerji sistemleri üzerinde en ciddi güç kalitesi problemlerine yol açan yükler arasında yer almaktadır. Elektrik arkının fiziksel doğası gereği bu tür yükler son derece kararsız, zamana bağlı ve güçlü biçimde doğrusal olmayan bir akım–gerilim karakteristiği sergilemektedir [41]. Ark uzunluğundaki ani değişimler, elektrot hareketleri ve ergitilen malzemenin fiziksel durumu, ark akımının sürekli olarak dalgalanmasına neden olmaktadır.

Ark ocaklarının harmonik üretimini diğer doğrusal olmayan yüklerden ayıran temel özellik, üretilen bozucu bileşenlerin genlik ile faz açılarının deterministik ve sabit olmaması, aksine rastlantısal olarak hızlı biçimde değişmesidir. Bu durum, ark direncinin ergitme süreci boyunca katı, sıvı ve buhar fazları arasında geçiş yapması

nedeniyle birkaç milisaniye mertebesinde dahi büyük değişimler göstermesinden kaynaklanmaktadır [5].

Bu nedenle ark ocakları, doğrultucu ve frekans sürücülerinde görülen karakteristik harmonik spektrumdan farklı bir bozucu içerik üretmektedir. Literatürde ark ocaklarının yalnızca temel frekansın tam katları olan harmonikleri değil, aynı zamanda temel frekansın tam katı olmayan ara harmonikleri ve temel frekanstan daha düşük frekanslı alt harmonikleri de önemli seviyelerde ürettiği rapor edilmektedir [42]. Bu bileşenler, gerilim dalga şeklinde belirgin dalgalanmalara, fliker oluşumuna ve güç kalitesi parametrelerinde ciddi bozulmalara yol açmaktadır.

Özellikle ara ve alt harmonik bileşenlerin varlığı, ark ocaklarının güç sistemlerinde rezonans riskini artırmakta ve klasik harmonik filtreleme yaklaşımlarının etkinliğini sınırlamaktadır. Bu nedenle, ark ocakları ve yüksek güçlü kaynak makineleri, güç kalitesi açısından en zorlayıcı yük gruplarından biri olarak değerlendirilmekte ve genellikle özel tasarlanmış filtreleme ve kompanzasyon çözümleri gerektirmektedir [41], [42].

3.1.1.4 Enerji Tasarruflu Aydınlatma

Manyetik balastların yerini alan elektronik balastlar ve LED aydınlatma sürücüleri, yüksek frekansta (20-60 kHz) anahtarlama yaparak, verimliliği ve ışık kalitesini artırır. Ancak, bu cihazlarda yer alan doğrultucu ve DC filtre devresi, şebeke geriliminin tepe noktalarında darbe şeklinde akım çeker. Bu darbe akımları, özellikle 3. harmonik olmak üzere yüksek seviyeli tek dereceli harmonikler içerir [26]. Ofis binaları, alışveriş merkezleri ve konutlardaki yoğun kullanım, üç fazlı sistemlerin nötr hattında 3. harmonik akımların toplanmasına ve nötr hattının aşırı yüklenmesine neden olur. [43], bir ofis binasında yaptığı ölçümlerde, nötr hattındaki akımın, faz akımlarının toplamından daha yüksek olabildiğini ve bunun başlıca nedeninin aydınlatma yüklerinden kaynaklanan 3. harmonikler olduğunu rapor etmiştir.

3.1.1.5 Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS) ve Bilgisayar Sistemleri

UPS'ler ve kişisel bilgisayarlar, sunucular gibi bilgi teknolojisi ekipmanları, giriş katlarında Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) ile çalışan doğrultucular veya daha basit doğrultucu-filtre devreleri kullanır. Özellikle ofis ortamlarında yaygın olan

düşük ve orta güçlü bu cihazlar, şebeke geriliminin tepe noktalarında çok kısa süreli yüksek genlikli akım darbeleri çekerler. Bu darbe akımları, zengin bir harmonik spektrumu içerir ve 3., 5., 7. harmoniklerde yüksek distorsiyona yol açar [11]. Bu tür yüklerin toplam etkisi, ofis binaları ve veri merkezlerini önemli harmonik kaynakları haline getirmiştir.

3.1.1.6 Doyma Etkisi Gösteren Manyetik Nüveler (Transformatörler)

Transformatörler, nominal gerilimlerinin üzerinde çalıştırıldıklarında veya ilk enerjilendirme anlarında manyetik nüveleri doyuma gider. Manyetik doyum, mıknatıslanma akımının sinüzoidal olmaktan çıkıp, simetrik bir darbe akımına dönüşmesine neden olur. Bu darbe akımı, Fourier analizi ile ayrıştırıldığında, öncelikle 3. harmonik olmak üzere, 5., 7. gibi tek dereceli harmoniklerden oluşan baskın bir spektrum sergiler [3]. Bu etki, transformatör boşta çalışırken daha belirgindir. Transformatörün nötr noktası topraklanmamışsa, 3. harmonik akımlar için bir dönüş yolu olmadığından, gerilim dalga formunda distorsiyon olarak kendini gösterir.

3.1.1.7 Enerji Üretim Sistemleri (İnvertör Tabanlı Kaynaklar)

Güneş enerjisi santralleri ve rüzgar türbinleri gibi enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonu, yeni bir harmonik kaynak kategorisi oluşturmuştur. Bu sistemler, üretilen DC veya değişken frekanslı AC gücü, şebeke frekansı ve gerilimine uygun hale getirmek için güç elektroniği invertörleri kullanır. Bu invertörler, yüksek hızlı anahtarlama yaparak harmonik ve yüksek frekanslı gürültü üretirler [44].

Harmoniklerin Sistem Bileşenleri Üzerindeki Etkileri

Harmonik bozulmalar, elektrik enerji sistemlerinde yalnızca bir güç kalitesi göstergesi olarak değerlendirilmemekte; aynı zamanda sistemin işletme güvenilirliğini, ekipmanların termal ve elektriksel dayanımını, kullanım ömrünü ve enerji verimliliğini doğrudan etkileyen önemli bir problemdir. Harmonikler; temel frekanstaki güç akışına ek olarak, sistem bileşenlerinde ek ısınmalara, mekanik streslere, rezonans olaylarına ve dielektrik zorlanmalara neden olarak bileşenlerin anma değerlerinin altında çalışmasına zarar verebilmektedir [11]. Bu etkilerin sistematik olarak anlaşılması, hem harmonik azaltım stratejilerinin geliştirilmesi

hem de mevcut sistemlerin kalite ve güvenilirliğinin artırılması açısından hayati öneme sahiptir [3].

3.2.1 Rezonans Etkisi

Sistemde bulunan endüktif ve kapasitif elemanların belirli bir harmonik frekansta empedans değerlerinin eşitlenmesi sonucunda rezonans olgusu meydana gelir. Rezonans, güç sistemlerinde harmonik distorsiyonunun şiddetlenmesine neden olan en kritik etkilerden biri olarak kabul edilmektedir [3].

Paralel rezonans, kondansatör bankları ile sistemin kaynak endüktansı (örneğin transformatör kısa devre empedansı) arasında oluşur. Bu rezonans frekansında sistem empedansı teorik olarak çok yüksek değerlere ulaşır. Paralel rezonans durumunda, ilgili frekansta sisteme enjekte edilen küçük genlikli bir harmonik akım dahi, sistemde yüksek seviyelerde harmonik gerilimlerin oluşmasına neden olabilir. Bu durum, gerilim toplam harmonik bozulma oranının (THBv) aşırı yükselmesine ve şebekeye bağlı diğer yüklerin zarar görmesine yol açabilir [26]. Seri rezonans, harmonik kaynak ile seri bağlı olan sistem endüktansı ve kondansatör bankı arasında meydana gelir. Bu frekansta sistem empedansı çok düşük bir değere iner. Seri rezonans halinde, rezonans frekansındaki harmonik akımlar kondansatörler ve sistem empedansı üzerinden aşırı büyüklükte akarak, bileşenlerde aşırı ısınmaya ve kondansatörler ya da koruma elemanlarının (sigorta vb.) tahrip olmasına neden olabilir [1].

Rezonans riski, özellikle güç faktörü düzeltme amacıyla sisteme kondansatör banklarının eklendiği durumlarda daha belirgin hale gelmektedir. [39] numaralı kaynakta, endüstriyel tesislerde gerçekleştirilen harmonik analiz çalışmalarının en temel amaçlarından birinin, mevcut veya planlanan kondansatör banklarının sistemle olan etkileşimini inceleyerek olası rezonans koşullarını önceden tespit etmek olduğu vurgulanmaktadır.

3.2.2 İletkenler ve Kablolar Üzerindeki Etki

Harmonik akımların varlığı, iletkenler ve kablolar üzerinde ek elektriksel kayıplara ve buna bağlı olarak aşırı ısınmaya neden olmaktadır. Alternatif akımın frekansı arttıkça belirginleşen deri etkisi, akımın iletken kesiti içerisinde homojen dağılmasını engelleyerek yüksek frekanslı harmonik bileşenlerin iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşmasına yol açmaktadır. Bu durum, akımın geçtiği etkin

kesitin azalmasına ve iletkenin efektif alternatif akım direncinin artmasına neden olarak bakır kayıplarını önemli ölçüde yükseltmektedir. Temel frekans olan 50 Hz seviyesinde etkisi sınırlı olan deri etkisi, harmonik derecesi arttıkça daha baskın hâle gelmektedir [3]. Bunun yanı sıra, yan yana döşenmiş iletkenlerin birbirlerinin manyetik alanlarından etkilenmesi sonucu ortaya çıkan yakınlık etkisi, akım dağılımını daha da bozarak iletken direncinin artmasına katkıda bulunmaktadır. Harmonik frekansların artmasıyla birlikte yakınlık etkisinin şiddeti de yükselmekte ve toplam kablo kayıpları belirgin şekilde artmaktadır [26]. Özellikle üç fazlı dört telli sistemlerde, üçün katları olan harmonik akımların her fazda aynı faz açısına sahip olması nedeniyle nötr iletkende cebirsel olarak toplanması ciddi bir problem oluşturmaktadır. Faz akımlarındaki üçüncü harmonik bileşenler görece düşük seviyelerde bulunsa dahi, nötr hattında faz akımını aşan büyüklükte akımlar oluşabilmekte; bu durum nötr iletkenin aşırı ısınmasına, enerji kayıplarının artmasına ve yangın riskinin ortaya çıkmasına neden olabilmektedir [34].

3.2.3 Koruma Elemanları Üzerindeki Etki

Harmonik bileşenlerin varlığı, farklı çalışma prensiplerine sahip koruma elemanlarının ölçüm ve algılama mekanizmalarını olumsuz yönde etkileyebilmektedir. Termik etkili aşırı akım röleleri, akımın RMS değerine bağlı olarak çalıştığından, harmoniklerin toplam RMS akımı artırması sonucu nominal sınırların altında kalan yük koşullarında dahi gereksiz açmalara neden olabilmektedir. Manyetik etkili aşırı akım röleleri ve sigortalar ise akımın ani tepe değerlerine duyarlı olup, harmonik içeren dalga şekillerinin yüksek tepe faktörüne sahip olması durumunda manyetik elemanın beklenenden daha erken devreye girmesi söz konusu olabilmektedir. Sayısal ve gelişmiş koruma rölelerinde ise harmoniklerin, örnekleme süreçlerini ve Fourier tabanlı hesaplama algoritmalarını etkilemesi sonucu ölçüm hataları oluşabilmekte ve bu durum rölelerin yanlış kararlar vermesine yol açabilmektedir [26].

Bu bağlamda, termik, manyetik ve dijital koruma elemanları harmoniklerden farklı mekanizmalarla etkilenmekle birlikte, ortak sonuç olarak koruma sisteminin güvenilirliği azalabilmektedir. Özellikle diferansiyel koruma rölelerinde, harmonik bileşenlerin neden olduğu sızıntı veya geçici akımlar, gerçek bir arıza durumu olmaksızın hatalı açmalara sebep olabilmektedir. Bu tür yanlış açmalar, sistem sürekliliğini olumsuz etkilemekte ve işletme güvenliğini düşürmektedir. Bu

nedenle, harmonik içeriği yüksek olan sistemlerde koruma rölelerinin seçimi, ayarlarının yapılması ve filtreleme çözümleriyle desteklenmesi kritik önem taşımaktadır [46].

3.2.4 Kondansatörler Üzerindeki Etki

Kondansatörler, empedanslarının frekansla ters orantılı olması nedeniyle harmonik frekanslarda düşük empedanslı bir yol oluşturarak harmonik akımları üzerine çekme eğilimindedir. Bu durum, kondansatör bankları üzerinde çeşitli olumsuz etkilere yol açmaktadır. Harmonik bileşenler nedeniyle kondansatör üzerinden geçen toplam etkin (RMS) akımın artması, dielektrik kayıpların yükselmesine ve buna bağlı olarak aşırı ısınmaya neden olmakta, bu durum ise kondansatörün ömrünü önemli ölçüde kısaltmaktadır [3]. Bununla birlikte, kondansatör banklarının sistem endüktansı ile paralel rezonansa girmesi en kritik risklerden biri olarak değerlendirilmektedir. Paralel rezonans koşullarında, belirli harmonik frekanslarda kondansatör uçlarındaki akım ve gerilim değerleri aşırı seviyelere ulaşarak kondansatörlerin hızla tahrip olmasına ve koruma elemanlarının devre dışı kalmasına neden olabilmektedir [1]. Ayrıca, harmonik gerilim bileşenlerinin toplam etkin değeri, kondansatör terminallerinde nominal değerlerin üzerinde bir gerilim oluşmasına yol açabilmektedir. IEEE Std 18-2012 standardında kondansatörlerin %110 RMS gerilim seviyesinde sürekli çalışabileceği belirtilmiş olsa da, bu sınırın aşılması dielektrik yapının bozulmasını hızlandırarak arıza riskini artırmaktadır [47].

3.2.5 Hassas Elektronik Cihazlar Üzerindeki Etki

Harmonik gerilim ve akımlar, hassas elektronik cihazların performansı ve güvenilirliği üzerinde önemli olumsuz etkilere yol açabilmektedir. Özellikle mikroişlemci tabanlı sistemler, kontrol kartları ve haberleşme ekipmanları, besleme gerilimindeki harmonik bozulmalara karşı duyarlıdır. Harmonik bozukluklar, bu cihazlarda kullanılan güç kaynağı devreleri ve referans gerilimleri üzerinde dalgalanmalara neden olarak, analog-sayısal dönüşüm süreçlerinde hatalara, lojik seviye eşiklerinin kaymasına ve zamanlama doğruluğunun bozulmasına yol açabilmektedir [26]. Bununla birlikte, anahtarlamalı güç kaynaklarında SMPS bulunan yarı iletken anahtarlama elemanları, doğrultucu devreler ve filtre kondansatörleri, yüksek frekanslı harmonik bileşenler nedeniyle artan anahtarlama

kayıpları, ek termal yüklenmeler ve dielektrik streslere maruz kalmaktadır. Bu durum, bileşenlerin yaşlanma sürecini hızlandırarak güç kaynaklarının ve hassas elektronik cihazların servis ömrünü önemli ölçüde kısaltmaktadır [39]. Ayrıca, harmonik içeren dalga şekilleri, geleneksel ölçüm prensibine sahip ve gerçek RMS ölçüm yeteneği bulunmayan cihazlar tarafından hatalı algılanabilmekte; ortalama değerden RMS'e dönüştürme yapan bu tür ölçü aletleri, harmonikli sinyallerde ciddi ölçüm hatalarına yol açabilmektedir. Bu nedenle, harmonik içeriği yüksek sistemlerde doğru ve güvenilir ölçüm yapılabilmesi için gerçek RMS ölçüm kapasitesine sahip cihazların kullanılması zorunlu hâle gelmektedir [36].

3.2.6 Motorlar ve Genaratörler Üzerindeki Etki

aaa Elektrik motorları ve generatörler, şebekede bulunan harmonik bozulmalardan en fazla etkilenen sistem bileşenleri arasında yer almakta olup, harmonik bileşenler bu cihazların performansını, verimliliğini ve işletme ömrünü doğrudan tehdit eden çok boyutlu etkilere neden olmaktadır. Harmonik akımların varlığı, stator ve rotor sargılarında ilave I^2R bakır kayıplarının oluşmasına yol açarken, harmonik manyetik alanlar stator ve rotor nüvelerinde ek histerezis ve fuko akımı (eddy current) kayıplarını artırmaktadır. Bu demir kayıpları, frekansın karesiyle artma eğiliminde olduğundan, özellikle yüksek dereceli harmoniklerin motor ve jeneratörlerde önemli düzeyde ek ısınmaya sebep olduğu bilinmektedir [3]. Bunun yanı sıra, harmonik bileşenlerin faz sıralarına bağlı olarak elektromanyetik tork üzerinde salınımlar meydana gelmektedir. Negatif sıra harmonikler (örneğin 5. ve 11. harmonikler), temel bileşenin ters yönünde dönen bir manyetik alan oluşturarak motor üzerinde frenleyici etki yaratan bir tork bileşeni üretmekte; bu durum, mekanik torkta temel frekansın katlarında (örneğin $6f_1$) yüksek frekanslı salınımlara neden olarak gürültü, titreşim ve mekanik yorulma problemlerini artırmaktadır [49]. Pozitif sıra harmonikler ise temel bileşenle aynı yönde dönen ilave bir tork üretmekle birlikte, esas etkilerini artan kayıplar ve ısınma yoluyla göstermektedir. Ayrıca, yüksek frekanslı harmonik gerilimler stator sargılarında özellikle ilk sarımlarda yüksek dv/dt değerlerine ve yerel aşırı gerilimlere neden olarak yalıtım sisteminde ciddi elektriksel stres oluşturmakta, bu durum uzun vadede yalıtımın yaşlanmasını hızlandırarak delinme ve erken arıza riskini artırmaktadır [1].

3
HARMONİK FİLTRELERİ

Harmonik filtreler, elektrik güç sistemlerinde harmonik kaynaklar tarafından üretilen istenmeyen harmonik akım ve gerilim bileşenlerini bastırmak veya sistemden uzaklaştırmak amacıyla kullanılan güç elektroniği veya pasif devre tabanlı çözümler olarak tanımlanmaktadır. Modern endüstriyel tesislerde yaygın olarak kullanılan frekans konvertörleri, doğrultucular, anahtarlamalı güç kaynakları ve ark fırınları gibi doğrusal olmayan yükler, şebekeye yüksek seviyede harmonik enjekte etmekte; bu durum toplam harmonik bozulma (THB) değerlerinin artmasına, ekipman ömrünün kısalmasına ve güç kalitesinin bozulmasına neden olmaktadır. Harmonik filtreler, bu olumsuz etkileri azaltarak güç sisteminin güvenilirliğini, verimliliğini ve işletme sürekliliğini artırmayı amaçlar [1], [26]. Uygulamada harmonik filtreler; pasif, aktif ve hibrit filtreler olarak sınıflandırılmakta olup, filtre tipi seçimi sistem gücü, harmonik spektrumu, ekonomik kısıtlar ve performans gereksinimlerine bağlı olarak yapılmaktadır [3].

Pasif Harmonik Filtreler

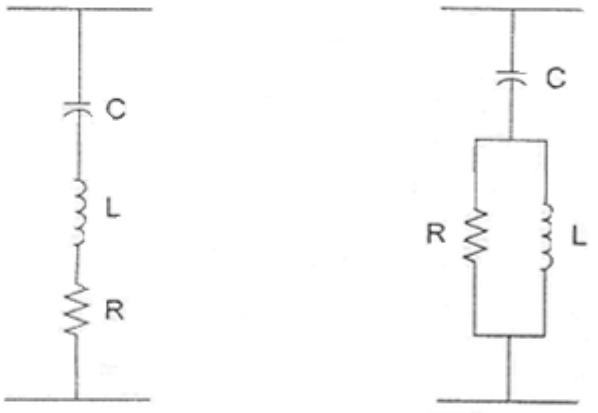
Direnç (R), endüktans (L) ve kapasitans (C) elemanlarından oluşan ve temel frekans bileşeni dışındaki harmonik bileşenlerin bastırılması amacıyla tasarlanan filtreler pasif harmonik filtreler olarak tanımlanmaktadır. Bu filtreler, yok edilmesi hedeflenen harmonik bileşenin frekansında veya ona yakın frekanslarda rezonansa girecek şekilde endüktans ve kapasitans değerlerinin belirlenmesi esasına dayanmaktadır. Rezonans koşulunun sağlanmasıyla birlikte, ilgili harmonik frekansta filtre empedansı minimum seviyeye inerek harmonik akımlarınnın filtre üzerinden akması sağlanmakta ve bu sayede şebeke üzerindeki harmonik etkiler azaltılmaktadır [50].

Pratik uygulamalarda, her bir harmonik mertebesi için ayrı bir pasif filtrenin tasarlanması gerekliliği ortaya çıkmakta; bu durum hem ekonomik açıdan hem de tesis içerisinde kaplanan alan bakımından önemli dezavantajlar doğurmaktadır. Bu nedenle, pasif filtre tasarımında, filtrenin frekans seçiciliğini belirleyen kalite faktörü (Q) kavramı büyük önem taşımaktadır. Kalite faktörü, filtrenin hedeflenen

rezonans frekansı etrafında ne kadar dar veya geniş bir bantta etkin olacağını belirleyen temel bir parametre olup, filtrelerin çalışma karakteristiğini doğrudan etkilemektedir [51].

Q faktörüne bağlı olarak pasif filtreler genel olarak yüksek Q tipli ve düşük Q tipli filtreler olmak üzere iki ana grupta sınıflandırılmaktadır. Yüksek Q tipli filtrelerde kalite faktörü genellikle 30 ile 60 arasında değişmekte olup, bu filtreler belirli bir düşük dereceli harmonik frekansa (örneğin 5. veya 7. harmonik) hassas bir şekilde ayarlanmaktadır. Bu tür filtreler, hedeflenen harmonik bileşen üzerinde yüksek bastırma performansı sağlarken, dar bantlı yapıları nedeniyle sistem empedansındaki değişimlere karşı daha hassas bir davranış sergileyebilmektedir. Buna karşılık, düşük Q tipli filtrelerde kalite faktörü genellikle 0,5 ile 5 arasında değer almakta olup, bu filtreler daha geniş bir frekans aralığında düşük empedans sunmaktadır. Düşük Q tipli filtreler, özellikle yüksek mertebeli harmoniklerin bastırılmasında tercih edilmekte ve geniş bantlı yapıları nedeniyle literatürde yüksek geçiren (high-pass) filtreler olarak da değerlendirilmektedir [29].

Pasif filtreler, devre bağlantı yapılarına göre seri pasif filtreler ve paralel pasif filtreler olarak iki ana gruba ayrılmakta olup, endüstriyel uygulamalarda paralel pasif filtreler daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Paralel pasif filtreler kendi içerisinde tek ayarlı, çift ayarlı ve sönümlü filtre yapıları gibi farklı konfigürasyonlar göstermekte; bu çeşitlilik, sistemin harmonik spektrumu ve işletme koşullarına uygun esnek çözümler geliştirilmesine olanak sağlamaktadır. Düşük Q ve yüksek Q tipli pasif filtrelerin temel devre yapıları Şekil 2.1'de şematik olarak gösterilmektedir [51].



Şekil 4.1 (a) Düşük Q tipi filtre (b) yüksek Q tipi filter [51]

4.1.1 Seri Pasif Filtreler

Seri pasif filtreler, harmonik kaynağa veya korunmak istenen yüke seri olarak bağlanan ve belirli bir harmonik frekansta yüksek empedans oluşturarak harmonik akımların sisteme yayılmasını engellemeyi amaçlayan pasif filtre yapılarıdır. Bu filtreler, özellikle gerilim harmoniklerinin baskın olduğu sistemlerde, hassas yüklerin harmonik bozulmalardan korunması amacıyla kullanılmaktadır. Seri pasif filtrelerin temel çalışma prensibi, yok edilmesi hedeflenen harmonik frekansta endüktans ve kapasitans elemanlarının rezonansa girecek şekilde tasarlanması ve bu frekansta filtre empedansının maksimum seviyeye çıkarılması esasına dayanmaktadır [3].

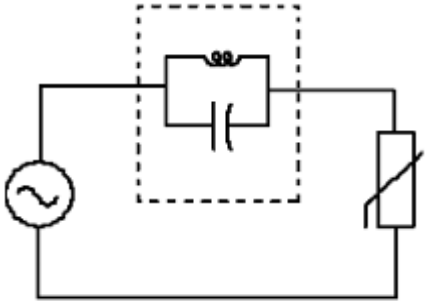
Seri pasif filtre devresinin rezonans frekansı aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{4.1}$$

Burada, L seri bağlı endüktansı, C ise kapasitans değerini temsil etmektedir. Rezonans frekansında filtre empedansının yükselmesiyle birlikte, ilgili harmonik bileşenin yük üzerine ulaşması büyük ölçüde engellenmekte ve böylece gerilim dalga şeklinin bozulması sınırlandırılmaktadır. Seri pasif filtreler, paralel filtrelerin aksine harmonik akımı sistemden toprağa yönlendirmek yerine, harmonik akımın akış yolunu kesen bir bariyer görevi görmektedir [26].

Ancak, seri pasif filtrelerin uygulama alanı, yüksek akım seviyelerinde tasarım ve işletme zorlukları nedeniyle sınırlıdır. Filtrenin üzerinden geçen temel frekans akımının tamamı seri filtre elemanlarından geçtiğinden, endüktans ve kondansatörlerin termal ve yalıtım dayanımı kritik hâle gelmektedir. Ayrıca seri filtrelerin, sistem empedansı ile etkileşimi sonucu istenmeyen rezonans koşulları oluşturma riski de bulunduğundan, tasarım aşamasında detaylı empedans ve harmonik analizlerinin yapılması gerekmektedir [52].

Şekil 2.2'de, seri pasif filtrenin temel devre yapısı şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.2 Seri pasif filtre devresi [52]

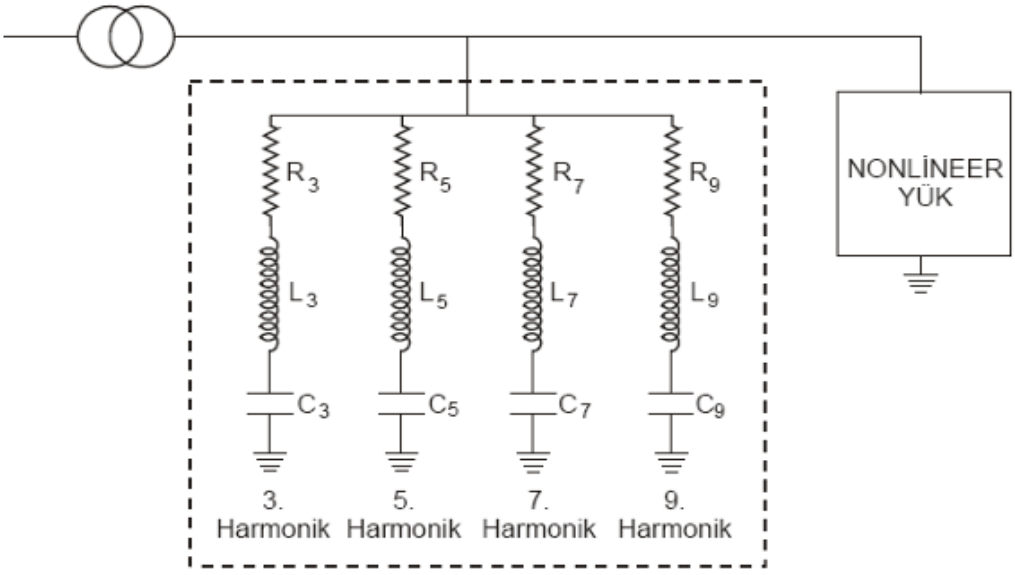
4.1.2 Paralel Pasif Filtreler

Paralel pasif filtreler, elektrik güç sistemlerinde ana devreye paralel olarak bağlanan ve hedeflenen harmonik frekanslarda çok düşük empedans oluşturarak harmonik akımların filtre üzerinden akmasını sağlayan filtre yapılarıdır. Bu filtrelerin temel çalışma prensibi, harmonik üreten doğrusal olmayan yük ile şebeke arasına paralel bir yol oluşturarak, harmonik bileşenlerin ana devreye ulaşmadan filtre üzerinden toprağa aktarılması esasına dayanmaktadır. Paralel pasif filtreler, harmonik bileşenlerin frekanslarında düşük empedans gösterecek şekilde tasarlandıklarından, harmonikli akımlar doğal olarak bu filtreler üzerinden akmakta ve böylece şebekedeki harmonik seviyeleri etkin bir şekilde azaltılabilmektedir [53].

Paralel pasif filtrelerin önemli bir avantajı, harmonik bastırma işlevine ek olarak sistemin reaktif güç ihtiyacını karşılayabilmeleridir. Filtre yapısında yer alan kondansatör elemanları sayesinde güç faktörü iyileştirilebilmekte, bu da paralel pasif filtreleri seri pasif filtrelere kıyasla hem ekonomik hem de işletme açısından daha cazip hâle getirmektedir. Düşük maliyetli olmaları, yüksek güç seviyelerinde etkin çalışabilmeleri ve kompanzasyon sistemleriyle birlikte kullanılabilmeleri, paralel pasif filtrelerin endüstriyel tesislerde en yaygın tercih edilen pasif filtre türü olmasını sağlamıştır [29]. Bununla birlikte, paralel pasif filtrelerin tasarımında dikkat edilmesi gereken en önemli husus rezonans riskidir. Şebekeye paralel olarak bağlanan bu filtreler, sistemin kaynak endüktansı ile birlikte paralel rezonans koşullarına girebilmekte; bu durum belirli harmonik frekanslarda aşırı gerilim ve akım büyümelerine yol açarak hem filtre elemanlarının hem de sistem ekipmanlarının zarar görmesine neden olabilmektedir. Bu nedenle paralel pasif

filtre tasarımında, filtrenin bağlanacağı sistemin empedans karakteristiği ve harmonik spektrumu detaylı olarak analiz edilmeli, olası rezonans frekansları önceden tespit edilmelidir [50].

Uygulamada paralel pasif filtreler; tek ayarlı (bant geçiren) filtreler, çift ayarlı filtreler, sönümlü (yüksek geçiren) filtreler ve otomatik ayarlı filtreler olmak üzere farklı yapılandırmalarda tasarlanabilmektedir. Bu çeşitlilik, sistemin harmonik içeriğine ve işletme koşullarına uygun esnek çözümler geliştirilmesine olanak sağlamaktadır [51]. Birden fazla harmonik mertebesinin bastırılması amacıyla paralel pasif filtrelerin birlikte kullanıldığı tipik bir uygulama yapısı Şekil 2.3'te gösterilmiştir.



Şekil 4.3 Paralel pasif filtre devresi [51]

4.1.2.1 Tek Ayarlı Filtre

Tek ayarlı paralel pasif filtreler, belirli bir harmonik frekansta çok düşük empedans oluşturarak, ilgili harmonik akımın şebeke yerine filtre üzerinden akmasını sağlayan ve bu sayede söz konusu harmonik bileşenin bastırılmasını amaçlayan pasif filtre yapılarıdır. Bu filtreler, yapısal olarak seri bağlı bir direnç (R), endüktans (L) ve kapasitans (C) elemanından oluşan RLC rezonans devresi şeklinde modellenmekte olup, şebekeye paralel olarak bağlanmaktadır. Tek ayarlı filtreler

genellikle 5. ve 7. harmonik gibi düşük dereceli ve genliği yüksek harmoniklerin bastırılmasında tercih edilmektedir [51].

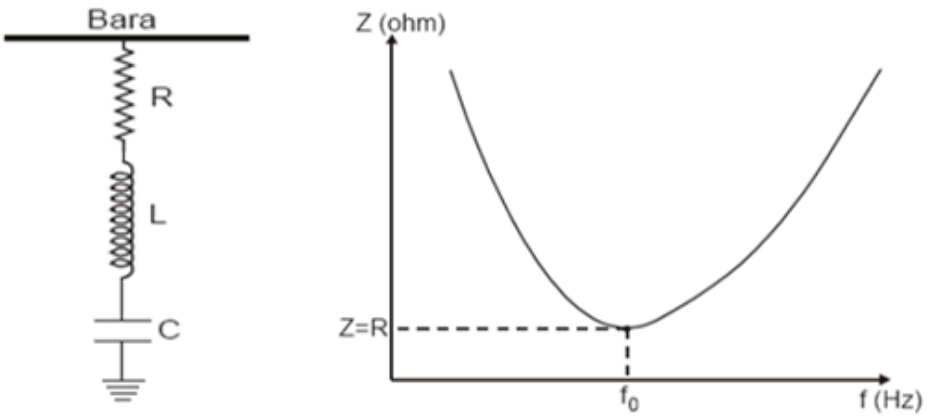
Tek ayarlı pararlel pasif filtrenin empedansı, açısal frekans cinsinden eşitlik (4.2) ile ifade edilir:

$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \tag{4.2}$$

Burada açısal frekansı, R filtre direncini, L endüktansı ve C kapasitansı temsil etmektedir. Filtre rezonans frekansında endüktif ve kapasitif reaktanslar birbirini dengelemekte ve filtrenin empedansı teorik olarak minimum değere inmektedir. Bu durumda filtre empedansı yaklaşık olarak yalnızca direnç değerine eşit olmakta ve ilgili harmonik frekansta sistem için düşük empedanslı bir yol oluşturmaktadır [3].

Rezonans frekansı, hedeflenen harmonik mertebesine göre eşitlik (4.3) ile ifade edilir.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \tag{2.7}$$



Şekil 4.4 Tek ayarlı filtre devresi ve empedans değişimi [51]

Şekil 2.4'te görüldüğü üzere, tek ayarlı filtrenin empedansı rezonans frekansı civarında minimum değer almakta, rezonans noktasından uzaklaşıldıkça ise hızla artmaktadır. Bu durum, tek ayarlı filtrelerin dar bantlı çalıştığını ve yalnızca ayarlandıkları harmonik mertebesinde yüksek bastırma performansı sunduğunu göstermektedir [51].

Tek ayarlı paralel pasif filtrelerin en önemli avantajı, hedeflenen harmonik bileşen üzerinde yüksek etkinlik sağlamaları ve aynı zamanda kondansatör elemanı sayesinde sisteme reaktif güç desteği sunmalarıdır. Buna karşın, dar bantlı yapıları nedeniyle sistem empedansındaki değişimlere ve frekans kaymalarına karşı hassas olmaları, bu filtrelerin en önemli dezavantajları arasında yer almaktadır. Bu nedenle, tek ayarlı filtre tasarımında kalite faktörü (Q), filtre direnci ve sistem empedansı arasındaki etkileşim dikkatle değerlendirilmelidir [26].

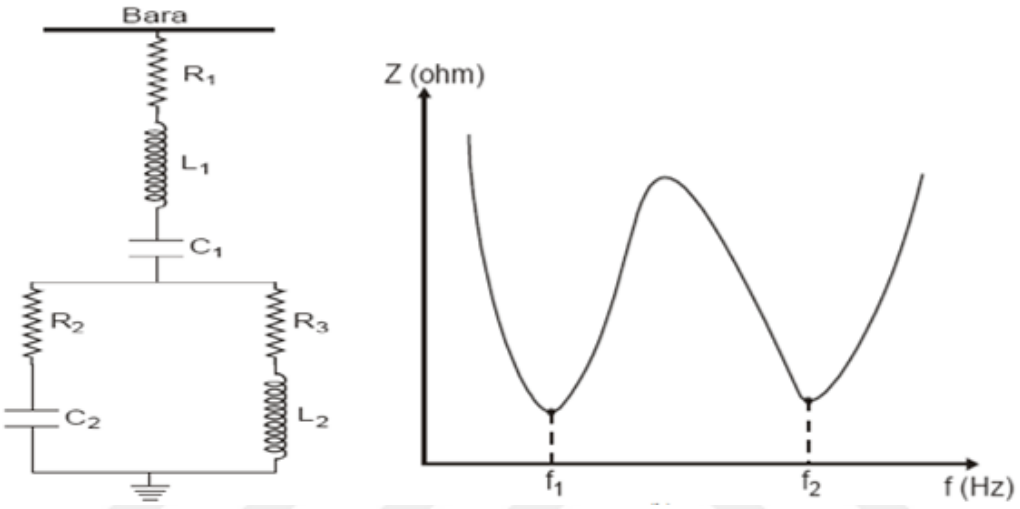
4.1.2.2 Çift Ayarlı Filtre

Çift ayarlı paralel pasif filtreler, her biri farklı bir harmonik frekansa ayarlanmış iki adet tek ayarlı filtrenin tek bir yapı içerisinde birleştirilmiş hâli olarak değerlendirilebilir. Bu filtreler, iki farklı harmonik mertebesinde çok düşük empedans oluşturarak, söz konusu harmonik bileşenlerin eş zamanlı olarak bastırılmasını sağlamaktadır. Genellikle 5. ve 7. harmonik gibi düşük dereceli ve genliği yüksek harmoniklerin birlikte azaltılmasının hedeflendiği uygulamalarda tercih edilmektedir [51].

Çift ayarlı filtrelerin temel çalışma prensibi, iki ayrı rezonans frekansına sahip olacak şekilde tasarlanmış LC kolları sayesinde, hedeflenen her iki harmonik frekansta da filtrenin empedansını minimum seviyeye indirmektir. Bu sayede, ilgili harmonik akımlar şebeke yerine filtre üzerinden akmakta ve ana devreye ulaşmadan sönümlenmektedir. Şekil 4.5'te görüldüğü üzere, empedans–frekans karakteristiği iki ayrı minimum noktaya sahip olup, bu noktalar sırasıyla f_1 ve f_2 rezonans frekanslarını temsil etmektedir. Bu yapı, çift ayarlı filtrelerin tek ayarlı filtrelere kıyasla daha geniş bir harmonik bastırma kapasitesine sahip olduğunu göstermektedir [54].

Çift ayarlı paralel pasif filtrelerin önemli avantajlarından biri, temel frekansta tek ayarlı filtrelere kıyasla daha düşük güç kaybına neden olmalarıdır. Bu durum, filtrenin temel frekansta daha yüksek empedans göstermesi ve dolayısıyla sistemden çekilen reaktif gücün daha kontrollü bir şekilde sağlanması ile ilişkilidir. Ayrıca, iki ayrı harmonik için tek tek filtre tasarlamak yerine tek bir çift ayarlı filtre kullanılması, tesis içinde kaplanan alanın azalmasına ve toplam yatırım maliyetinin düşmesine katkı sağlamaktadır [51].

Bununla birlikte, çift ayarlı filtrelerin tasarımı tek ayarlı filtrelere göre daha karmaşıktır ve sistem empedansındaki değişimlere karşı hassasiyet gösterebilmektedir. Bu nedenle, çift ayarlı filtre tasarımında hedeflenen harmonik spektrumu, kalite faktörü (Q) değerleri ve sistem kısa devre gücü dikkatle değerlendirilmelidir. Uygun şekilde tasarlanmadıkları takdirde, bu filtreler istenmeyen rezonans koşullarına yol açarak sistem güvenilirliğini olumsuz etkileyebilmektedir [3].



Şekil 4.5 Çift ayarlı filtre devresi ve empedans değişimi [54]

4.1.2.3 Sönümlü Filtre

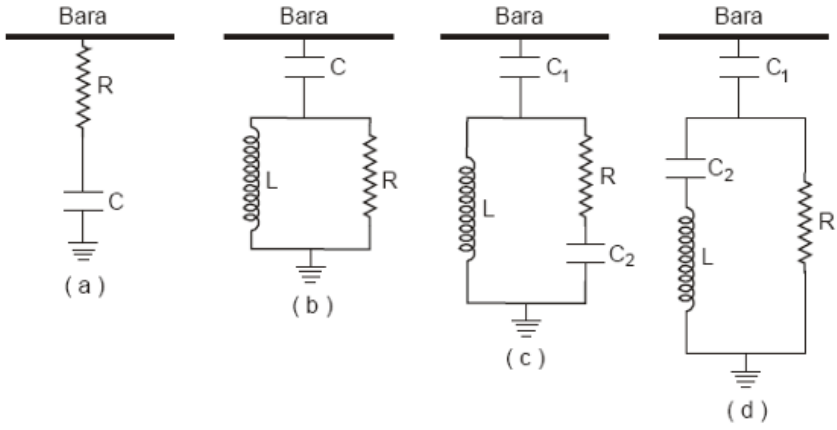
Sönümlü paralel pasif filtreler, özellikle yüksek frekanslı ve yüksek mertebeli harmoniklerin bastırılması amacıyla tasarlanmış, geniş bantlı çalışma karakteristiğine sahip pasif filtre yapılarıdır. Bu filtreler genellikle 17. harmonik ve üzerindeki harmonik bileşenlerin azaltılmasında kullanılmakta olup, tek veya çift ayarlı filtrelerin yetersiz kaldığı durumlarda tamamlayıcı bir çözüm olarak tercih edilmektedir. Sönümlü filtrelerin temel özelliği, yüksek frekans bölgesinde düşük empedans sunarken, temel frekansta ve düşük frekanslarda yüksek empedans göstermeleridir. Bu sayede, filtre üzerinden temel frekansta akan akım sınırlanmakta ve gereksiz güç kayıpları azaltılmaktadır [51].

Sönümlü filtre yapılarında direnç elemanının devreye dâhil edilmesi, filtrenin rezonans keskinliğini azaltarak empedans–frekans karakteristiğinin daha yumuşak bir eğriye sahip olmasını sağlamaktadır. Şekil 2.6'da gösterildiği üzere, sönümlü filtreler devre topolojilerine bağlı olarak birinci dereceden, ikinci dereceden,

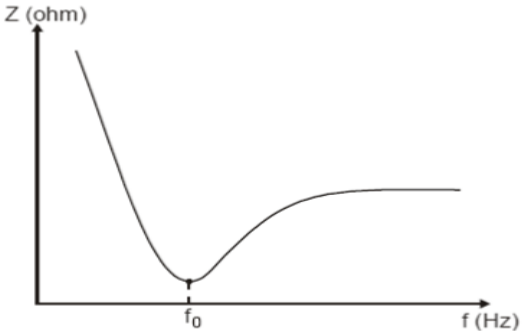
üçüncü dereceden ve C-tipi sönümlü filtreler şeklinde sınıflandırılmaktadır. Birinci dereceden sönümlü filtreler yapısal olarak basit olmakla birlikte, temel frekansta önemli kayıplara neden olabilmektedir. İkinci dereceden sönümlü filtreler ise yüksek frekanslı harmoniklerin bastırılmasında daha iyi bir performans sunarken, birinci derece filtrelere kıyasla daha kontrollü güç kaybı sağlamaktadır. Üçüncü dereceden sönümlü filtreler, filtreleme performansı açısından avantajlı olmakla birlikte, ikinci derece filtrelere göre daha yüksek kayıplara yol açabilmektedir [29].

C-tipi sönümlü filtreler ise, temel frekansta oluşan kayıpları minimize etmek amacıyla geliştirilmiş özel bir sönümlü filtre türüdür. Bu filtrelerde kondansatörler ve endüktanslar uygun şekilde konumlandırılarak, temel frekansta direnç elemanının etkisi büyük ölçüde ortadan kaldırılmakta ve böylece güç kayıpları azaltılmaktadır. Aynı zamanda C-tipi filtreler, sistem empedansındaki değişimlerden diğer sönümlü filtre türlerine kıyasla daha az etkilenmekte ve ek paralel devrelere ihtiyaç duymaksızın geniş bir frekans bandında etkin filtreleme sağlayabilmektedir [3].

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere, sönümlü filtrelerin empedans–frekans karakteristiği rezonans frekansı civarında minimum bir değere ulaşmakta, daha yüksek frekanslarda ise nispeten sabit ve düşük bir empedans seviyesi sunmaktadır. Bu özellik, sönümlü filtreleri yüksek mertebeli harmoniklerin bastırılmasında etkili bir çözüm hâline getirmektedir. Ancak, direnç elemanının varlığı nedeniyle oluşan ek güç kayıpları, sönümlü filtre tasarımında dikkatle değerlendirilmesi gereken önemli bir tasarım kriteridir [51].



Şekil 4.6 Birinci, ikinci, üçüncü derece ve C tipi sönümlü filtreler [51]

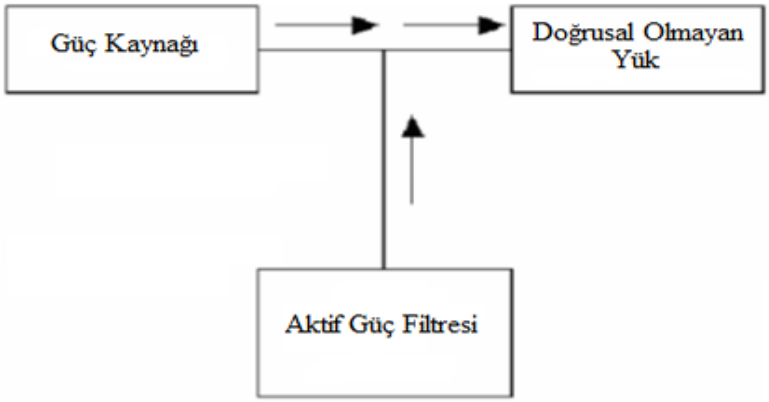


Şekil 4.7 Sönümlü filtrede frekans empedans ilişkisi [51]

Aktif Harmonik Filtreler

Pasif harmonik filtreler, yalnızca önceden belirlenmiş harmonik mertebelerinde etkin olmaları nedeniyle, harmonik içeriğin zamanla değiştiği veya sisteme yeni doğrusal olmayan yüklerin eklendiği durumlarda yetersiz kalabilmektedir. Ayrıca pasif filtrelerin rezonans riski taşıması, büyük fiziksel alan gerektirmeleri ve sistem empedansına bağımlı olarak çalışmaları, bu filtrelerin uygulama esnekliğini sınırlayan önemli faktörlerdir. Bu nedenlerle, harmoniklerin daha geniş bir bantta ve dinamik olarak bastırılabilmesine olanak sağlayan aktif harmonik filtreler geliştirilmiştir.

Aktif harmonik filtrelerin temel çalışma prensibi ilk olarak Bird (1969) tarafından ortaya konmuş, Amatani (1972) tarafından genelleştirilmiş ve günümüzde gelişen güç elektroniği ve sayısal kontrol teknolojileri ile birlikte endüstriyel uygulamalarda yaygın kullanım alanı bulmuştur [29]. Aktif harmonik filtreler, doğrusal olmayan yüklerin şebekeden çektiği harmonik akımları gerçek zamanlı olarak algılayarak, bu harmonik bileşenlerin eş genlikte ve ters fazlı karşılığını üretmekte ve böylece harmoniklerin şebeke üzerinde iptal edilmesini sağlamaktadır.



Şekil 4.8 Aktif harmonik filtre çalışma prensibi [55]

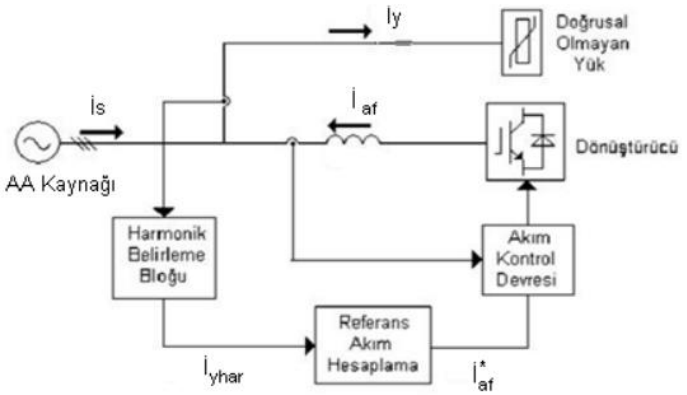
Bu çalışma prensibi Şekil 4.8'de şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere aktif harmonik filtre, güç kaynağı ile doğrusal olmayan yük arasına bağlanmakta ve yük tarafından üretilen harmonik akımların şebekeye akmasını engelleyecek şekilde karşı akım enjekte etmektedir. Bu sayede şebekeden çekilen toplam akım dalga şekli ideal sinüzoidal forma yaklaşmaktadır.

Şekil 4.9'da, aktif harmonik filtrenin ölçüm, kontrol ve güç devresi bileşenlerini içeren detaylı çalışma blok diyagramı gösterilmektedir. Şekilde görüldüğü üzere, doğrusal olmayan yük tarafından çekilen yük akımı i_y, şebeke akımı i_S üzerinden ölçülmekte ve bu akım içerisindeki harmonik bileşenler harmonik belirleme bloğu aracılığıyla tespit edilmektedir. Bu blokta, ölçülen akım sinyali uygun bir yöntem kullanılarak temel bileşen ve harmonik bileşenlere ayrıştırılmaktadır.

Ayrıştırma işlemi sonucunda elde edilen harmonik akım bileşenleri i_{yhar}, referans akım hesaplama bloğuna aktarılmakta ve aktif filtrenin üretmesi gereken ters fazlı referans akımı i_f^* oluşturulmaktadır. Bu referans sinyal, aktif filtrenin akım kontrol devresine iletilmekte ve PWM kontrollü dönüştürücü aracılığıyla aktif filtre akımı i_{af} üretilmektedir. Üretilen bu akım, doğrusal olmayan yükle paralel olarak sisteme enjekte edilerek, yük tarafından üretilen harmonik akımların şebekeye akması engellenmektedir.

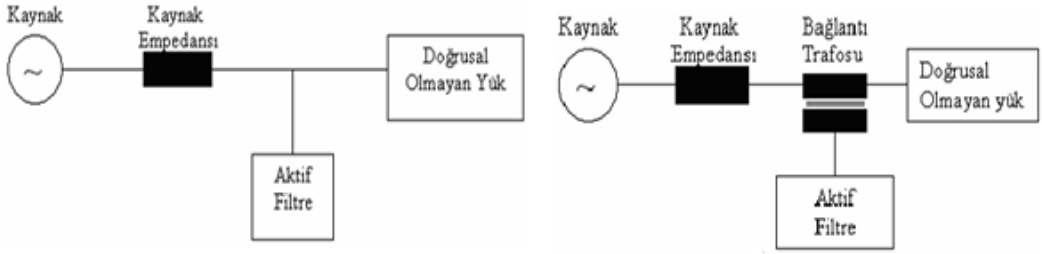
Bu yapı sayesinde, şebekeden çekilen toplam akım yalnızca temel bileşene yakın bir karakter sergilemekte; harmonik bileşenler aktif filtre tarafından karşılanmaktadır. Dolayısıyla aktif harmonik filtre, yükün ihtiyaç duyduğu harmonik akımları üstlenirken, şebeke ideal sinüzoidal bir akım kaynağı gibi çalışmaya devam etmektedir. Şekil 4.10'da verilen bu yapı, aktif harmonik

filtrelerin hem güç elektroniği tabanlı donanım yapısını hem de ölçüm–kontrol–uygulama zincirini açık biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 4.9 Aktif harmonik filtre blok diyagramı [52]

Aktif harmonik filtreler, sisteme bağlantı şekillerine göre temel olarak paralel ve seri aktif filtreler olmak üzere iki ana grupta incelenmektedir. Uygulamada en yaygın kullanılan yapı paralel aktif harmonik filtrelerdir. Paralel aktif filtreler, doğrusal olmayan yüke paralel bağlanarak akım harmoniklerini bastırmakta ve özellikle akım harmoniklerinin baskın olduğu sistemlerde etkin bir çözüm sunmaktadır. Seri aktif filtreler ise daha çok gerilim harmoniklerinin ve gerilim bozulmalarının ön planda olduğu uygulamalarda tercih edilmekte olup, yük ile şebeke arasına seri bağlanarak çalışmaktadır. Paralel ve seri aktif filtre yapılarına ilişkin temel prensipler Şekil 4.10'da gösterilmiştir.



Şekil 4.10 Paralel aktif filtre ve seri aktif filtre bağlantı şekli [55]

Yapısal olarak aktif harmonik filtreler, genellikle PWM (darbe genişlik modülasyonu) kontrollü bir gerilim veya akım kaynaklı invertörden oluşmakta olup, yalnızca harmonik bastırma değil aynı zamanda reaktif güç kompanzasyonu ve yük dengesizliğinin giderilmesi gibi ek işlevleri de yerine getirebilmektedir. Bununla birlikte, aktif filtrelerin yüksek ilk yatırım maliyeti, güç elektroniği

devrelerinin karmaşıklığı ve yüksek güçlü uygulamalarda yüksek akım taşıyabilen yarı iletken elemanlara duyulan ihtiyaç, bu filtrelerin kullanımını sınırlayan temel faktörler arasında yer almaktadır [55]. Buna rağmen, güç elektroniği teknolojilerindeki gelişmelere paralel olarak aktif harmonik filtrelerin performansı artmakta ve endüstriyel tesislerde kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır.

Hibrit Harmonik Filtreler

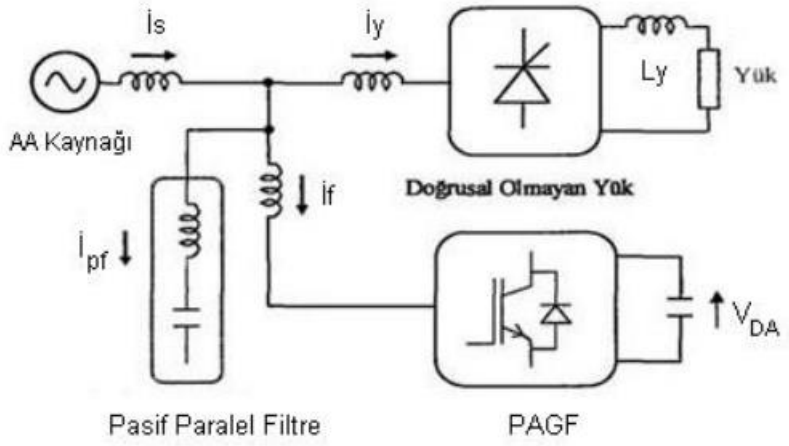
Hibrit harmonik filtreler, pasif ve aktif harmonik filtrelerin avantajlarını bir araya getirerek her iki yapının sınırlamalarını azaltmayı amaçlayan güç kalitesi iyileştirme çözümleridir. Bu filtre yapılarında, belirli ve baskın harmonik mertebelerinin bastırılmasında pasif filtrelerin yüksek etkinliğinden yararlanılırken, değişken genlikli ve yüksek mertebeli harmoniklerin bastırılması aktif filtreler aracılığıyla gerçekleştirilmektedir. Böylece hem harmonik bastırma performansı artırılmakta hem de aktif filtrelerin ihtiyaç duyduğu güç kapasitesi düşürülmektedir [3], [23].

Şekil 4.10'da, literatürde yaygın olarak kullanılan paralel bağlantılı bir hibrit harmonik filtre yapısının temel devre şeması gösterilmektedir. Bu yapıda, doğrusal olmayan yük tarafından üretilen harmonik akımların bir kısmı, belirli harmonik mertebelerine ayarlanmış pasif paralel filtre üzerinden sönümlenirken; pasif filtrenin bastıramadığı veya sistem koşullarına bağlı olarak değişkenlik gösteren harmonik bileşenler, paralel aktif güç filtresi (PAGF) tarafından karşılanmaktadır. Aktif filtre, şebekeye ters fazlı harmonik akımlar enjekte ederek şebekeden çekilen toplam akımın sinüzoidal karaktere yaklaşmasını sağlamaktadır.

Hibrit filtre yapılarında pasif filtre, aynı zamanda aktif filtrenin yüksek frekanslı anahtarlama bileşenleri için bir süzgeç görevi görmekte ve aktif filtrenin anahtarlama kayıplarını ve gerilim streslerini azaltmaktadır. Bu durum, aktif filtrenin daha düşük DC bara gerilimi ve daha küçük yarı iletken elemanlar ile tasarlanabilmesine olanak tanımaktadır [29]. Ayrıca hibrit yapılar, pasif filtre–şebeke etkileşiminden kaynaklanabilecek rezonans risklerinin, aktif filtre kontrolü ile bastırılabilmesi açısından da önemli bir avantaj sunmaktadır.

Bu nedenlerle hibrit harmonik filtreler, özellikle yüksek güçlü doğrusal olmayan yüklerin bulunduğu endüstriyel tesislerde, pasif filtrelere kıyasla daha esnek; yalnızca aktif filtre kullanılan sistemlere kıyasla ise daha ekonomik ve güvenilir bir

çözüm olarak öne çıkmaktadır. Literatürde yapılan çalışmalar, hibrit filtre yapılarının toplam harmonik bozulma seviyelerini önemli ölçüde düşürdüğünü ve güç kalitesi standartlarının sağlanmasında etkin bir rol oynadığını göstermektedir [23], [55].



Şekil 4.11 Pasif ve aktif filtreden oluşan hibrit harmonik filtre yapısı [55]

4
SİSTEM TANITIMI

Su arıtma tesisleri, şehirlerin içme suyu gereksiniminin karşılanması ve endüstriyel proseslerde kullanılan suyun uygun kalite seviyelerine getirilmesi açısından kritik öneme sahip altyapı birimleridir. Bu tesislerde su, genellikle yeraltı kuyularından, göllerden, nehirlerden veya barajlardan temin edilmekte ve ham su çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik işlemlerden geçirilerek arıtılmaktadır. Filtrasyon, koagülasyon–flokülasyon, çöktürme, dezenfeksiyon ve kimyasal dozajlama gibi çok aşamalı proseslerin ardından standartları karşılayan su, yüksek güçlü motor-pompa grupları aracılığıyla şehir şebekesine iletilmektedir. Bu süreç boyunca alçak gerilimden yüksek gerilim seviyelerine kadar geniş bir yelpazede elektriksel ekipman kullanılmakta olup, yüklerin büyük bölümünü motor-pompa grupları oluşturmaktadır. Bu motor ve sürücülerin yapısı, tesisin yük profiline ve işletme gereksinimlerine göre değişmekte; kullanılan teknolojiler güç kalitesi bozulmaları ve özellikle harmonik üretimi üzerinde belirgin etkiler yaratmaktadır [1]–[4].

Su arıtma tesisleri, sahip oldukları motor-pompa gruplarının güç seviyeleri, sürücü yöntemleri ve işletme stratejileri doğrultusunda birbirlerinden önemli ölçüde farklılık göstermektedir. Bazı tesislerde yüksek güçlü motorlara yumuşak yol verici ile yol verilirken, değişken debi ve su basıncı gereksinimi bulunan tesislerde frekans konvertörü tabanlı hız kontrol sistemleri tercih edilmektedir. Bu çeşitlilik, tesislerin harmonik üretim seviyelerini ve şebeke üzerindeki güç kalitesi etkilerini doğrudan etkilemektedir [1], [2]. Bu nedenle, farklı güç seviyelerine ve farklı sürücü teknolojilerine sahip arıtma tesislerinin her birinin ayrı ayrı analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Karmaşık elektriksel yapılara sahip bu tesislerde tek bir ölçüm noktası veya tek tip analiz yöntemi yeterli olmamakta; her tesisin kendine özgü işletme koşullarının, yük karakteristiklerinin ve harmonik davranışının detaylı bir şekilde değerlendirilmesi gerekmektedir. Böylece, güç kalitesi problemlerinin doğru tespiti, harmonik kaynaklarının belirlenmesi ve etkin çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesi mümkün olmaktadır.

Bu tez çalışmasında, farklı sürücü teknolojilerine ve işletme karakteristiklerine sahip iki ayrı su arıtma tesisi, İstanbul'daki su arıtma altyapısı içinden seçilerek kapsamlı bir değerlendirme yapılmıştır. İlk tesiste sabit debi ve yüksek basınç gerektiren motor-pompa gruplarına soft starter ile yol verilirken, ikinci tesiste değişken debi ve su basıncı ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla elektrik motor pompa grupları frekans konvertörleri ile sürülmektedir. Her iki tesiste enerji kalite kaydedicileri ile detaylı harmonik ölçümleri yapılmış; akım ve gerilim bozulmaları, toplam harmonik bozulma seviyeleri ve sürücülerden kaynaklanan harmonik akımları kapsamlı biçimde analiz edilmiştir. Bunun yanı sıra tesislerin elektriksel altyapıları güç sistemi analiz yazılımlarında modellenmiş; harmonik etkiler, enerji kayıpları ve güç kalitesi problemleri simülasyon ortamında incelenmiştir. Ölçüm ve modelleme bulgularına dayanarak her iki tesis için mevcut durum değerlendirilmiş, optimize edilebilir çözüm önerileri geliştirilmiş ve uygulanabilir iyileştirme senaryoları ortaya konmuştur.

Büyükçekmece Su Arıtma Tesisi

Bu tez çalışması kapsamında incelenen ilk tesis, İstanbul ili Büyükçekmece bölgesinde konumlanan ve kentin içme suyu ihtiyacının önemli bir bölümünü karşılayan Büyükçekmece Su Arıtma Tesisi'dir. Tesis, ham suyu Büyükçekmece Gölü'nden temin etmektedir. Günlük kapasitesi 400.000 m^3 olan Büyükçekmece Arıtma Tesisi, yaklaşık 3 milyon insanın su ihtiyacını karşılamaktadır.

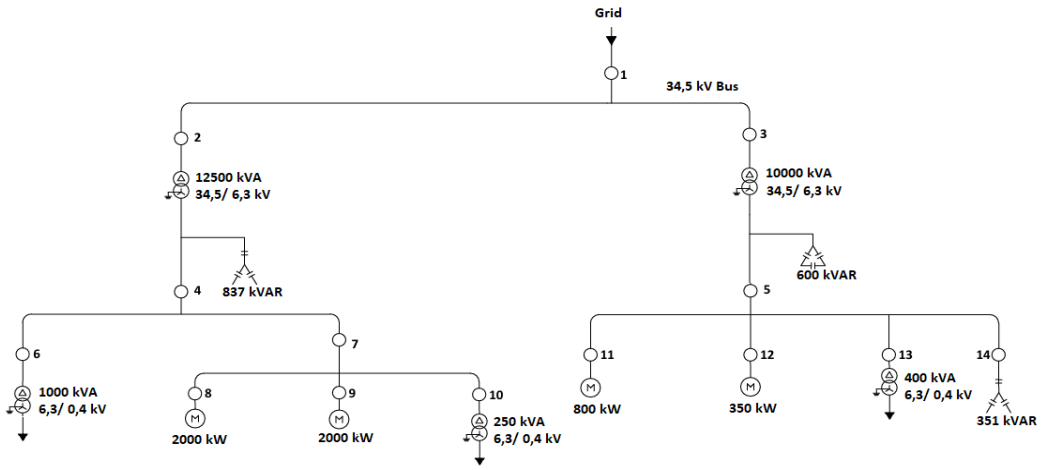
10 MVA kurulu güce sahip olan bu tesis, sabit debi ve sabit basınç esasına göre çalışan orta gerilim seviyesindeki motor-pompa grupları aracılığıyla gölden ham su alımını gerçekleştirilmektedir. Ham suyun temin edildiği motor-pompa gruplarının yol alma süreçlerinde, şebeke üzerindeki ani akım çekişlerinin ve mekanik zorlanmaların sınırlandırılması amacıyla yumuşak yol verici (soft starter) teknolojisi kullanılmaktadır. Ham suyun tesise alınmasının ardından su; çok aşamalı arıtma proseslerinden geçirilmektedir. Bu prosesler kapsamında kimyasal madde dozaj üniteleri, filtrasyon sistemleri, çamur susuzlaştırma ve dekantör üniteleri gibi çok sayıda yardımcı sistem devrede olup, tesis bünyesinde yoğun bir elektriksel ekipman çeşitliliği bulunmaktadır. Arıtma proseslerinin tamamlanmasının ardından, arıtılmış su şehir depolarına ve dağıtım şebekesine yine orta gerilim seviyesinde çalışan yüksek güçlü motor-pompa grupları aracılığıyla

iletilmektedir. Bu terfi pompaları da işletme karakteristiği gereği soft starter ile yol almakta olup, tesis genelinde benzer sürücü teknolojilerinin kullanılması elektriksel davranış açısından belirgin bir bütünlük oluşturmaktadır. Tesisin genel yük profili incelendiğinde, sabit basınç ve debi prensibine göre çalışan bu elektrik motor-pompa gruplarının payı oldukça yüksektir. Bu yüksek güçlü motorların, kompanzasyon sistemleri ve diğer elektriksel ekipmanlarla birlikte çalışması, tesisin harmonik bozulmalara karşı hassas bir yapı sergilemesine neden olabilmektedir.

Büyükçekmece Su Arıtma Tesisi, suyun temel bir yaşam kaynağı olması nedeniyle kesintisiz ve güvenilir işletilmesi gereken kritik bir altyapı tesisi konumundadır. Tesis bünyesinde bulunan çok sayıdaki elektrik motoru, güç elektroniği içeren yüksek güç seviyelerinde çalışan sürücü sistemleri, sabit kondansatör grupları ve yardımcı elektriksel yükler; harmonik bozulmalar, rezonans riskleri ve güç kalitesi problemlerine karşı sistemin duyarlılığını artırmaktadır. Bu nedenle, harmoniklerin tesis üzerindeki etkilerinin detaylı olarak analiz edilmesi, mevcut durumun doğru şekilde değerlendirilmesi ve uygun iyileştirme senaryolarının geliştirilmesi hem ekipman ömrünün korunması hem de su temininin sürekliliği açısından büyük önem taşımaktadır.

5.1.1 Büyükçekmece Su Arıtma Tesisi Tek Hat Diyagramı

Bu bölümde, tezde analizi yapılan Büyükçekmece Arıtma Tesislerine ait indirgenmiş tek hat diyagramı sunulmaktadır. Tek hat diyagramı çizilirken, tesislerin kalite kaydedici ile ölçümleri yapıldığı andaki çalışma düzeni dikkate alınmıştır. Diyagram, tesiste ölçümlerin yapıldığı andaki elektriksel mimariyi ortaya koymakta; dağıtım yapılarını, hatların konumunu ve ölçüm noktalarının tesisler üzerindeki yerleşimini görsel olarak ifade etmektedir. Bu tek hat diyagramı, harmonik akım-gerilim akışlarının yorumlanması, modelleme doğrulaması ve simülasyon çalışmalarının temel referansını oluşturmaktadır.



Şekil 5.1 Büyükçekmece arıtma tesisi indirgenmiş tek hat diyagramı

Şekil 5.1'de de görüldüğü gibi biri 10 MVA, diğeri 12,5 MVA nominal gücü olan iki adet transformatör ile şebekeden gelen 34,5 kV, 6,3 kV'a dönüştürülmektedir. Bu transformatörlerin çıkışında sabit kondansatör grupları bulunmaktadır. Ölçüm noktası 2'ye bağlı olan kondansatör grubunun nominal gücü 3x279 kVAR ve ölçüm noktası 3'e bağlı olanın ise nominal gücü 3x200 kVAR'dır. Reaktif güç kompanzasyonunda ihtiyaca göre bu kondansatör grupları devreye alınıp çıkarılmaktadır. Ölçüm noktası 5, ham suyun gölden alınmasını sağlayan ham su terfi merkezini ve ölçüm noktası 7 de arıtılmış suyu şehir depolarına basan temiz su terfi merkezini belirtmektedir. Bu terfi merkezlerinde 6,3 kV besleme gerilimli büyük güçlü elektrik motorları beslemektedir. 7 numaralı ölçüm noktasına bağlı 2 adet özdeş nominal gücü 2000 kW soft starter ile yol verilen elektrik motor-pompa grubu ve 1 adet 6,3 kV/0,4 kV'luk nominal gücü 250 kVA iç ihtiyaç transformatörü bulunmaktadır. Ölçüm noktası 5'te ise 1 adet nominal gücü 800 kW, 1 adet nominal gücü 350 kW soft starter ile yol verilen elektrik motor-pompa grubu ve bunların yanında bir adet 6,3 kV/0,4 kV'luk nominal gücü 400 kVA iç ihtiyaç transformatörü ve nominal gücü 3x117 kVAR olan sabit bir kondansatör bulunmaktadır. Ölçüm noktası 6'da, 1 adet 6,3 kV/0,4 kV'luk nominal gücü 1 MVA transformatör ile tesisin alçak gerilim enerji merkezi beslenmekte ve tüm arıtma prosesleri bu bölümde gerçekleştirilmektedir.

5.1.2 Ölçüm Sonuçları

Bu çalışmada ele alınan Büyükçekmece arıtma tesisindeki kritik ölçüm noktaları belirlenmiş olup, Şekil 5 Büyükçekmece arıtma tesisi indirgenmiş tek hat diyagramı üzerinde gösterilmiştir. Analizlerin yapılacağı ölçüm noktalarındaki elektriksel büyüklükler, Fluke 435-II kalite kaydedici ile detaylı bir şekilde ölçülüp sonuçlar Tablo 5.1'de sunulmuştur.

Tablo 5.1 Büyükçekmece su arıtma tesisi ölçüm sonuçları

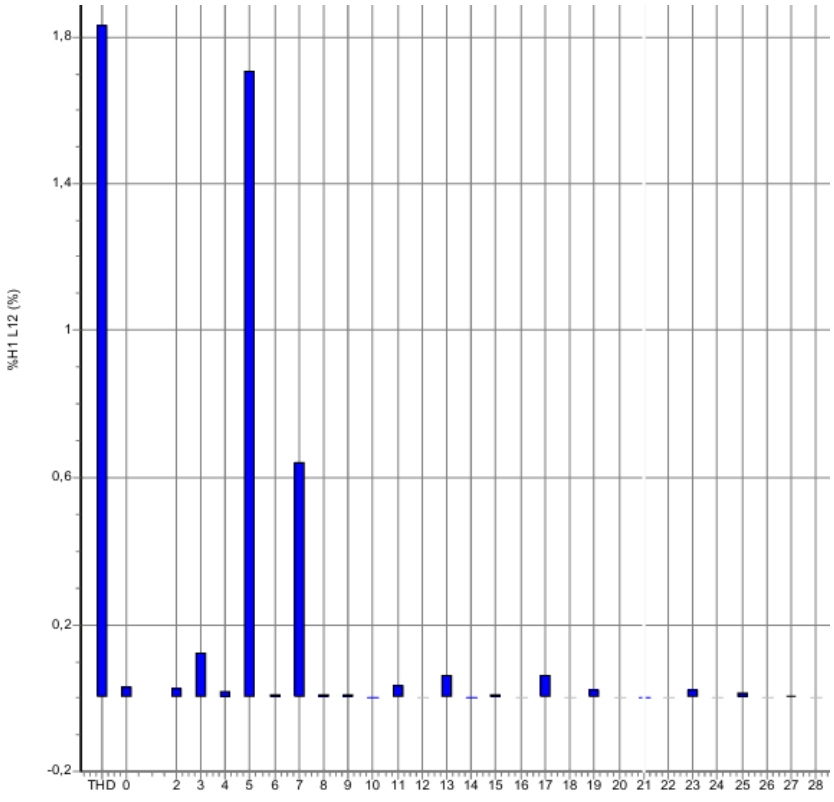
Ölçüm Noktası	I (A)	V (V)	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	Cos φ	Güç Faktörü	THB_I (%)	THB_V (%)
1	78,02	33827	4559	69	4575	1	0,9966	5,868	1,786
2	59,98	33562	3482	92	3488	1	0,9982	4,44	1,799
3	20,26	33507	1157	129	1181	0,9902	0,9796	9,792	1,783
4	315,56	6345	3405	636	3469	0,9833	0,9816	2,265	2,389
5	104,28	6356	1141,8	75	1148	0,9966	0,9942	7,209	2,294
6	11,03	6355	103,8	69	125	0,8332	0,8317	5,533	2,38
7	304,48	6346	3294	569	3347	0,9832	0,984	2,351	2,393
8	152,11	6268	1630	253	1652	0,9867	0,9866	2,983	2,736
9	152,11	6268	1630	253	1652	0,9867	0,9866	2,983	2,736
10	2,3248	6190	25	2,7	25	0,992	0,9877	7,864	2,72
11	81,98	6108	793	349	867	0,9133	0,9143	3,547	2,593

Tablo 5.1 Büyükçekmece su arıtma tesisi ölçüm sonuçları (devamı)

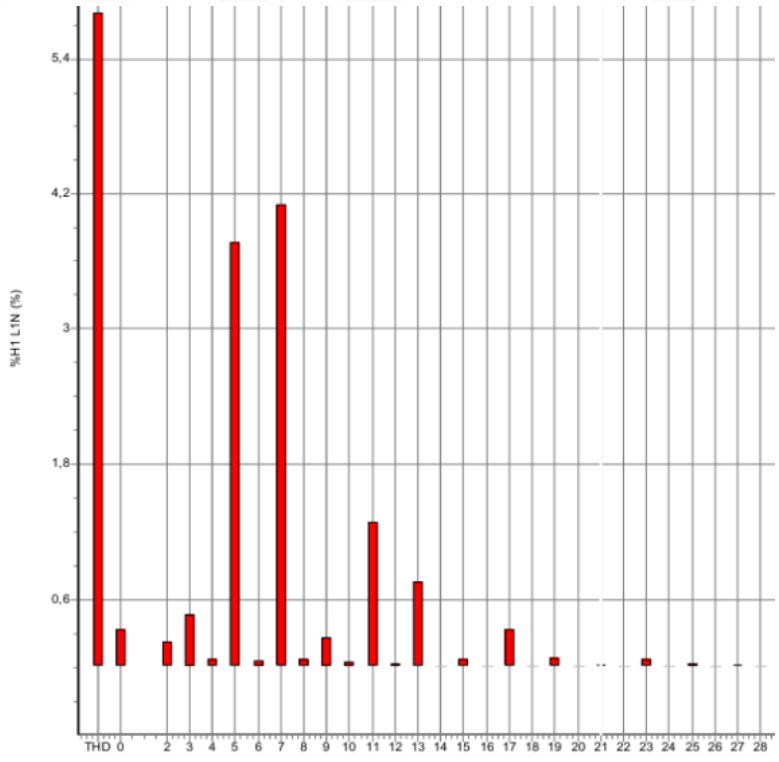
Ölçüm Noktası	I (A)	V (V)	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	Cos φ	Güç Faktörü	THB_I (%)	THB_V (%)
12	33,96	6115	359	1,9	360	1	0,9979	4,255	2,43
13	1,217	6138	13	1,3	13	0,9955	0,9863	11,50	2,824

Tablodaki sonuçlara göre tesisin mevcut durumunu değerlendirdiğimizde, belirli ölçüm noktalarında THB_I'nin nispeten yüksek olduğu ve bu harmonik bozulumlardan kaynaklı sistemin aktif güç kaybının arttığı, koruma rölelerinin hatalı çalışmalar yaptığı, mevcut kondansatör gruplarında arızalar meydana geldiği bilinmektedir. Tesisin girişinde bulunan 1 numaralı ölçüm noktasında THB_I %5,8683 olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte 2 ve 3 numaralı transformatörün sekonder kısmına bağlı olup sistemi kompanze eden kondansatörlerin harmonik bozulmayı artırdığı tabloda görülmektedir. Bu durum klasik kompanzasyon yerine etkili harmonik bileşenlerin elemine edildiği filtreli kompanzasyonun sistem için daha faydalı olacağını ve harmonik kaynaklı sorunların giderilebileceğini göstermektedir.

1 numaralı ölçüm noktasına ait gerilim ve akım harmonik spektrumları Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'te sırasıyla sunulmuştur.



Şekil 5.2 Ölçüm noktası 1 için gerilim harmonik spektrumu



Şekil 5.3 Ölçüm noktası 1 için akım harmonik spektrumu

Toplam harmonik bozulmaya sebep olan harmoniklerin ağırlıklı olarak 5. ve 7. mertebedeki harmonikler olduğu spektrumlarda görülmektedir. Bundan dolayı, bu baskın harmonikleri sistemden elemek için uygun maliyetli tek ayarlı pasif harmonik filtrelerin çeşitli senaryolarla sisteme bağlanıp sorunların çözülebileceğine karar verilmiştir.

İhsaniye Arıtma Tesisi

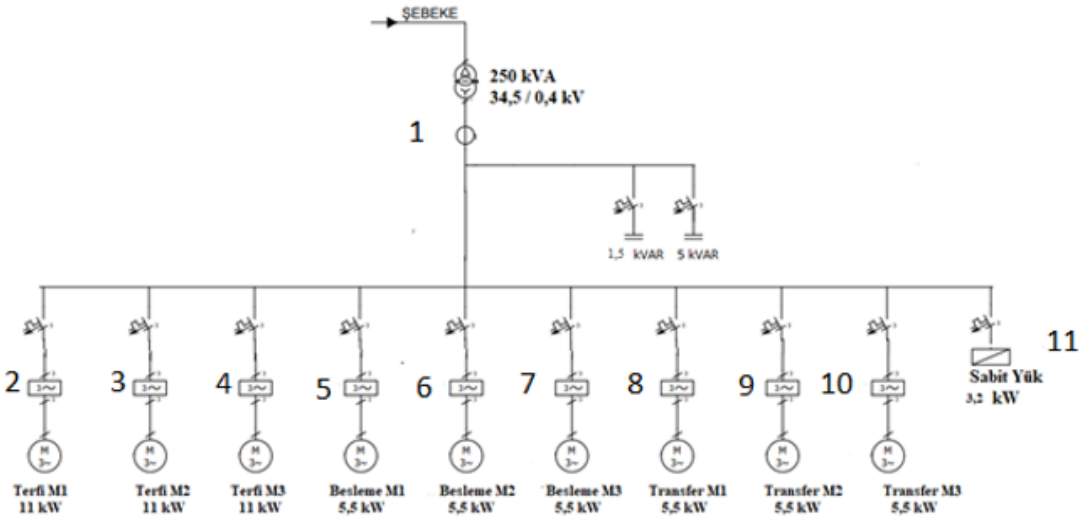
Bu tez çalışması kapsamında incelenen ikinci tesis, İstanbul ili Çatalca ilçesine bağlı İhsaniye Köyü sınırları içerisinde yer alan İhsaniye Su Arıtma Tesisi'dir. Tesis, sınırlı nüfuslu yerleşim alanlarının içme ve kullanım suyu ihtiyacını karşılamak amacıyla işletilmekte olup, kompakt yapısına rağmen temel arıtma fonksiyonlarını eksiksiz şekilde yerine getiren bir altyapı tesisidir. Ham su temini yeraltı kuyuları aracılığıyla sağlanmakta ve tesis bünyesinde gerçekleştirilen arıtma işlemleri sonucunda su, bölgedeki yerleşimlere dağıtılmaktadır.

İhsaniye Su Arıtma Tesisi'nin elektriksel altyapısı alçak gerilim seviyesinde çalışmakta olup tesisin toplam kurulu gücü yaklaşık 250 kVA'dır. Ham sudan arıtılmış su elde edilene kadar geçen süreçte; fiziksel ve kimyasal arıtma prosesleri, filtrasyon hatları, kimyasal dozajlama üniteleri ve dezenfeksiyon kademeleri aktif olarak kullanılmaktadır. Bu birimler, tesis ölçeği görece küçük olmasına rağmen, farklı güç seviyelerinde çalışan çok sayıda elektriksel ekipman içermektedir. Arıtma işlemleri tamamlanan su, köy depolarına iletilmekte ve bölge kullanımına sunulmaktadır. Tesisin günlük su temin kapasitesi yaklaşık 11.000 m^3/gün seviyesindedir.

Tesisin işletme karakteristiği gereği, su temini ve dağıtımı değişken debi ve basınç koşulları altında gerçekleştirilmektedir. Bu nedenle, motor-pompa grupları, frekans konvertörleri (VFD) üzerinden sürülmektedir. Frekans konvertörü kullanımı, tesisin işletme esnekliğini artırmakta ve değişken su talebine uyum sağlamasına imkân vermektedir. Ancak, bu sürücü yapısı, yük karakteristiğinin zamana bağlı olarak değişmesine neden olmakta ve tesisin elektriksel davranışının dinamik bir yapı sergilemesine yol açmaktadır. Bu durum, tesisin güç kalitesi açısından detaylı olarak incelenmesini gerekli kılmaktadır.

5.2.1 İhsaniye Su Arıtma Tesisi Tek Hat Diyagramı

Bu bölümde, İhsaniye Arıtma Tesislerine ait indirgenmiş tek hat diyagramı sunulmaktadır. Tek hat diyagramı çizilirken, tesislerin kalite kaydedici ile ölçümleri yapıldığı andaki çalışma düzeni dikkate alınmıştır. Diyagram, tesiste ölçümlerin yapıldığı andaki elektriksel mimariyi ortaya koymakta; dağıtım yapılarını, hatların konumunu ve ölçüm noktalarının tesisler üzerindeki yerleşimini görsel olarak ifade etmektedir. Bu tek hat diyagramı, harmonik akım-gerilim akışlarının yorumlanması, modelleme doğrulaması ve simülasyon çalışmalarının temel referansını oluşturmaktadır.



Şekil 5.4 İhsaniye arıtma tesisi indirgenmiş tek hat diyagramı

Şekil 2'de görüldüğü üzere bu su arıtma tesisi, şebekeden 34,5 kV ile beslenmektedir. 250 kVA'lık bir transformatör ile gerilim 400 V seviyesine düşürülmektedir. Tesis girişinde reaktif güç kompanzasyonu için sabit 1,5 kVAR ve 5 kVAR olmak üzere 2 adet kondansatör bulunmaktadır. Bu tesisteki tüm yükler 400 volt ile çalışmakta olup, üç adet 11 kW terfi pompası, üç adet 5,5 kW besleme pompası ve üç adet 5,5 kW transfer pompası içermektedir. Ayrıca, tesis iç ihtiyacı için 3,2 kW sabit yük bulunmaktadır. Değişken debi ve değişken su basıncı gereksinimlerini karşılamak üzere frekans konvertörü ile sürülen bu elektrik motor pompa grupları, tesisin operasyonel esnekliğini artırmakla birlikte harmonik bozulmalarına da sebep olmaktadır.

5.2.2 Ölçüm Sonuçları

Bu tez çalışmasında küçük güçlü su arıtma tesisleri için harmonik analizi yapılmak üzere İhsaniye Su Arıtma tesisi seçilmiştir. İhsaniye arıtma tesisindeki kritik ölçüm noktaları belirlenmiş olup, Şekil 5.4: İhsaniye Arıtma Tesisi İndirgenmiş Tek Hat Diyagramı üzerinde gösterilmiştir. Analizlerin yapılacağı ölçüm noktalarındaki elektriksel büyüklükler, Fluke 435-II kalite kaydedici ile detaylı bir şekilde ölçülüp sonuçlar Tablo 5.2'de gösterilmiştir.

Tablo 5.2 İhsaniye su arıtma tesisi ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktaları	I (A)	V (V)	P (kW)	Q (kVAR)	S (kVA)	Cos φ	Güç Faktörü	THB_I (%)	THB_V (%)
1	76,41	409	49,85	1,28	54,180	1	0,92	43,29	3,441
2	16,97	406	10,883	1,005	11,925	1	0,91	41,538	1,253
3	16,97	406	10,883	1,005	11,925	1	0,91	41,538	1,253
4	16,97	406	10,883	1,005	11,925	1	0,91	41,538	1,253
5	3,77	406	2,16	0,323	2,655	0,99	0,815	62,49	0,86
6	3,77	406	2,16	0,323	2,655	0,99	0,815	62,49	0,86
7	3,77	406	2,16	0,323	2,655	0,99	0,815	62,49	0,86
8	3,90	410	2,28	0,36	2,768	0,99	0,828	59,11	1,758
9	3,90	410	2,28	0,36	2,768	0,99	0,828	59,11	1,758
10	3,90	410	2,28	0,36	2,768	0,99	0,828	59,11	1,758
11	5,23	410	3,12	1,08	4,05	0,95	0,77	8,36	2,597

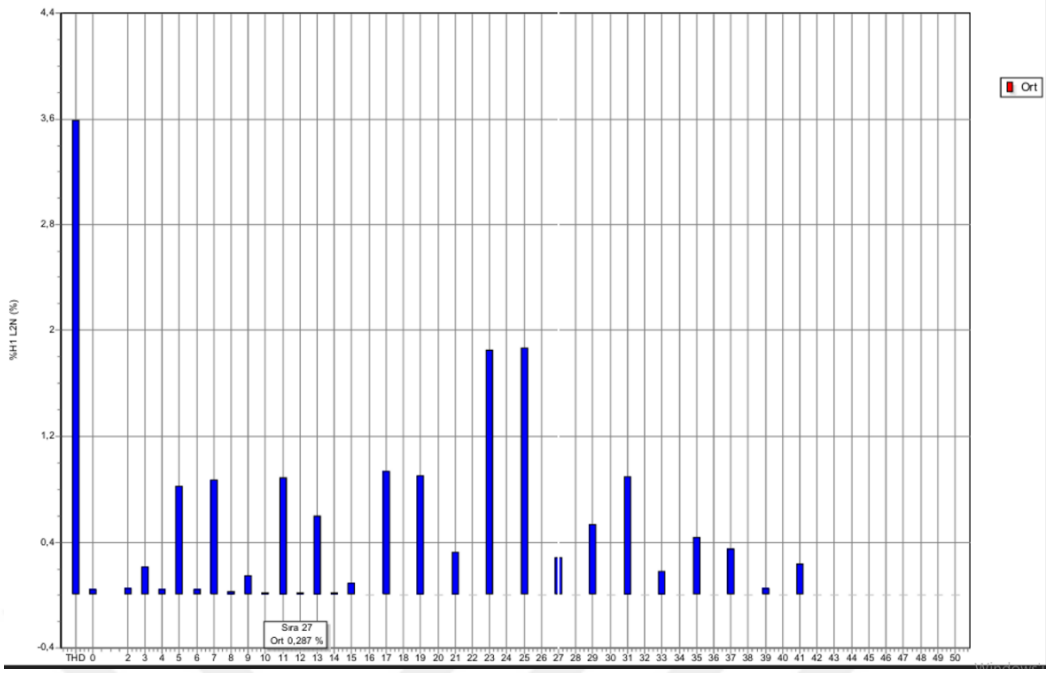
Tablodaki ölçüm sonuçları incelendiğinde, tesisin tüm ölçüm noktalarında THB_I değerlerinin oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Harmonik seviyelerinin gerilim bileşenine kıyasla akım tarafında yoğunlaşması, harmonik kaynağının yarı iletken anahtarlama elemanları içeren frekans konvertörleri olduğunu göstermektedir.

Tesis, işletme karakteristiği gereği değişken debi ile çalışmak zorundadır ve bundan dolayı elektrik motorları frekans konvertörleri üzerinden kontrol edilmektedir. Ancak, bu kontrol yapısı beraberinde yüksek harmonik üretimini getirmekte, düşük empedanslı tesis altyapısı nedeniyle harmonikler sistem içinde sönümlenemeyerek tüm ölçüm noktalarında benzer seviyede görülmektedir.

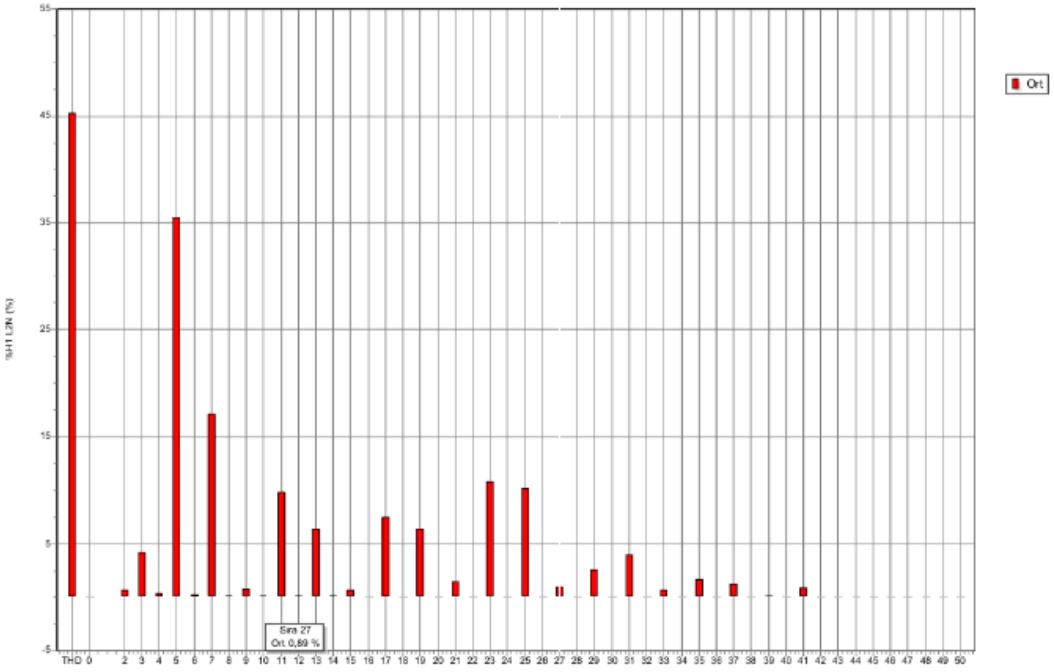
Bu harmonik bozulmaların etkileri sistem üzerinde çok yönlü olarak izlenmektedir. İlk olarak akım ve gerilim dalga şekli bozulmakta, bu bozulma kablo ve transformatörlerde ek ısıl kayıplara neden olmaktadır. Harmonik akımların şebeke empedansı ile etkileşimi rezonans riskini artırarak özellikle kompanzasyon kondansatörlerinde aşırı akım ve gerilim stresine yol açmakta, erken arıza ihtimalini yükseltmektedir. THB_I değerlerinin %40–59 aralığına çıkması koruma rölelerinin akımı hatalı algılamasına sebep olabileceğinden yanlış tetikleme ve sistem kararsızlığı riski oluşturmaktadır. Ayrıca, motor-pompa gruplarında verim kaybı, tork dalgalanması, rulman akımları ve sargı ömründe kısalma gibi uzun vadeli ekipman hasarlarına neden olabilmektedir. Harmonik yüklerin kompanzasyon devrelerini olumsuz etkilemesi, reaktif güç dengesini bozarak güç faktörünü dalgalı hale getirmekte, toplam enerji verimliliğini düşürmektedir.

Tüm bu bulgular değerlendirildiğinde mevcut kompanzasyon yapısının harmonikleri bastırmakta yeterli olmadığı görülmekte; tesis için aktif/pasif veya hibrit filtre destekli kompanzasyon çözümlerinin uygulanması harmonik kaynaklı kayıpların azaltılması, güç kalitesinin yükseltilmesi ve ekipman ömrünün korunması açısından kritik görünmektedir.

1 numaralı ölçüm noktasına ait gerilim ve akım harmonik spektrumları Şekil 5.5 ve Şekil 5.6'da sunulmuştur.



Şekil 5.5 Ölçüm noktası 1 için gerilim harmonik spektrumu



Şekil 5.6 Ölçüm noktası 1 için akım harmonik spektrumu

Akım harmonik spektrumu incelendiğinde toplam bozulmanın büyük kısmının %35 seviyesinde olan 5. harmonik ve onu izleyen %15 civarındaki 7. harmonik kaynaklı olduğu, 11.–23. mertebe harmoniklerin ise daha düşük genlikte ancak sürekli şekilde sisteme etki ettiği görülmektedir. Bu dağılım frekans konvertörlerinin tipik harmonik karakterini doğrulamakta olup akım dalga formunun sinüzoidellikten

sapmasına, iletken ve transformatörlerde ek ısınmaya, kayıpların artmasına ve uzun vadede ekipman yalıtkanlarının termal olarak zorlanmasına neden olabilecek düzeydedir. Bu nedenle, güç kalitesini yükseltmek ve THB_I değerini düşürmek adına öncelikli iyileştirme hedefi 5. ve 7. harmoniklerin bastırılmasına yönelik olmalı; gerekirse tuned pasif filtre veya aktif/hibrit filtre uygulamaları değerlendirilmelidir.

Ölçüm Alt Yapısı

Bu çalışmada, her iki tesisin de güç kalitesi ve harmonik davranışlarının ortaya konulabilmesi amacıyla kapsamlı bir ölçüm altyapısı kurulmuştur. Ölçümler, IEC 61000-4-30 Sınıf A ve IEC 61000-4-7 standartlarıyla uyumlu Fluke 435 Seri II güç kalitesi analizörü kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz, üç fazlı sistemlerde gerilim, akım, güç bileşenleri ve harmonik distorsiyon gibi parametreleri yüksek örnekleme frekansıyla kaydedebilmekte; 50. harmoniğe kadar spektral çözünürlük sağlayarak hem temel frekans bileşenlerini hem de harmonik etkilerini güvenilir biçimde analiz edebilmektedir.

Ölçümler tüm noktalarda üç faz esas alınarak gerçekleştirilmiştir. Büyükçekmece Su Arıtma Tesisinde yapılan ölçümler orta gerilim seviyesinde olduğundan, akım ve gerilim transformatörlerinin dönüştürme oranları güç kalite analizörüne girilerek ölçümler bu transformatörler üzerinden dolaylı yöntemle alınmıştır. Bu yaklaşım sayesinde, orta gerilim seviyesindeki akım ve gerilim değerleri doğru per-unit karşılıkları ile kaydedilmiştir. Ayrıca, Fluke 435-II enerji kalite analizörünün otomatik CT/VT kompanzasyonu ve faz sırası doğrulama özellikleri, ölçümlerin doğruluğunu ve güvenilirliğini artırmıştır.

İhsaniye Arıtma Tesisi ise alçak gerilim seviyesinden beslendiği için akım ve gerilim ölçümleri doğrudan üç faz bağlantı yapılarak gerçekleştirilmiştir. Bu tesiste ölçüm bağlantılarının doğrudan yapılması, herhangi bir dönüştürme oranı tanımlamaya ihtiyaç duyulmadan akım ve gerilim dalga şekillerinin ve güç kalitesi parametrelerinin doğrudan kaydedilmesine olanak sağlamıştır. Elde edilen ölçüm verileri, analizörün faz sırası doğrulama ve otomatik ölçüm kontrol özellikleri kullanılarak standartlara uygun biçimde değerlendirilmiştir.

Günümüzde gelişen sinyal işleme teknikleri sayesinde harmonik büyüklüklerin izlenmesi kolaylaşmış; modern enerji analizörleri temel dalga dışında harmonik

bileşenleri de aynı anda hesaplayabilmektedir. Bu kapsamda kullanılan Fluke 435-II, dağıtım panosundaki bağlantılar yapıldıktan sonra dalga şekillerini sürekli olarak kaydetmekte ve ölçüm süresi boyunca tüm olayları zaman damgalı olarak arşivlemektedir.

Çalışmada kullanılan ölçüm cihazı, ölçüm süresi boyunca bağlı bulunduğu bara için aşağıdaki parametreleri eşzamanlı olarak kaydetmiştir:

- Aktif, reaktif ve görünür güç değerleri,
- Üç faz akım ve gerilim büyüklükleri,
- Güç faktörü (PF) ve temel güç katsayısı (cosφ),
- Frekans,
- Toplam harmonik bozulma (THB_v, THB_i),
- 50. harmoniğe kadar üç faz için akım ve gerilim harmonikleri,
- Her bir harmonik bileşenin faz bazında akım ve gerilim genlikleri.

Her iki tesiste ölçüm noktaları, harmonik üretme potansiyeli yüksek yüklerin girişleri, frekans konvertörü beslemeleri, kompanzasyon sistemleri ve ana dağıtım baraları dikkate alınarak belirlenmiş; bu noktalar ilgili tek hat şemalarında ayrıntılı biçimde gösterilmiştir. Ölçümler, tesislerin ölçüm sırasındaki gerçek işletme senaryolarını temsil edecek şekilde gerçekleştirilmiştir. Böylece güç kalitesi değerlendirmesinde kullanılacak verilerin hem işletme koşullarını doğru yansıtması hem de daha sonraki analizlere temel oluşturması sağlanmıştır. Şekil 5.7'de Büyükçekmece Arıtma Tesisinde ve Şekil 5.8'de İhsaniye Arıtma Tesisinde ölçüm esnasında çekilen fotoğraflar sunulmuştur.



Şekil 5.7 Büyükçekmece su arıtma tesisi saha ölçüm fotoğrafı



Şekil 5.8 İhsaniye su arıtma tesisi saha ölçüm fotoğrafı

5
MODELLEME VE ANALİZ ÇALIŞMALARI

Bu tez kapsamında gerçekleştirilen modelleme ve analiz çalışmaları, elektrik güç sistemlerinde harmonik etkilerin değerlendirilmesi ve uygun iyileştirme yöntemlerinin incelenmesi amacıyla yürütülmüştür. Bu kapsamda, incelenen su arıtma tesislerinden biri ETAP yazılımı kullanılarak modellenmiş, diğer tesis ise aktif harmonik filtre uygulamalarının gerektirdiği gelişmiş anahtarlama yapıları ve kontrol algoritmalarının gerçekleştirilebilmesi amacıyla MATLAB/Simulink ortamında modellenmiştir. ETAP, güç sistemlerinin yük akışı, kısa devre, güç kalitesi ve harmonik analizleri gibi çok sayıda analizin entegre bir ortamda gerçekleştirilmesine olanak sağlayan, endüstride yaygın olarak kullanılan bir analiz programıdır. MATLAB/Simulink ise özellikle güç elektroniği tabanlı sistemlerin ve aktif filtre yapılarının dinamik davranışlarının detaylı olarak incelenmesine imkan sunmaktadır.

Modelleme aşamasında, incelenen arıtma tesislerine ait tüm elektriksel ekipmanlar — elektrik motorları, frekans konvertörleri, kondansatör grupları, transformatörler, kablolar, koruma elemanları ve kesiciler — saha ölçümleri ve ekipman etiket değerleri esas alınarak ilgili yazılım ortamlarına tanımlanmıştır. Bu yaklaşımla oluşturulan güç sistemi modellerinin, tesislerin gerçek işletme koşullarını mümkün olan en yüksek doğrulukta temsil etmesi hedeflenmiştir. Böylece, benzetim sonuçlarının sahadan elde edilen ölçüm verileriyle karşılaştırılabilir ve doğrulanabilir olması amaçlanmıştır.

ETAP ve MATLAB/Simulink ortamlarında oluşturulan modeller üzerinden, tesislerin mevcut işletme durumundaki yük profilleri ve harmonik karakteristikleri analiz edilmiş; farklı işletme senaryoları tanımlanarak harmonik bozulmaların sistem üzerindeki etkileri detaylı biçimde incelenmiştir. Bu senaryolar kapsamında, özellikle frekans konvertörleri ve doğrusal olmayan yüklerin neden olduğu harmonik akım ve gerilim bileşenlerinin dağılımı değerlendirilmiş; pasif ve aktif filtreleme yaklaşımlarının sistem performansı üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak ele alınmıştır.

Sonuç olarak, geliştirilen modelleme yaklaşımı sayesinde, hem Büyükçekmece Su Arıtma Tesisi hem de İhsaniye Su Arıtma Tesisi'nde karşılaşılan harmonik problemler analitik olarak incelenmiş ve mevcut durumun iyileştirilmesine yönelik teknik çözümlerin sayısal olarak değerlendirilmesi mümkün hâle gelmiştir. Bu bağlamda, ETAP ve MATLAB/Simulink tabanlı modelleme ve analiz çalışmaları, tez kapsamında sunulan harmonik azaltım stratejilerinin teknik geçerliliğini ve uygulanabilirliğini destekleyen temel araçlar olarak kullanılmıştır.

Büyükçekmece Su Arıtma Tesisi için Modelleme ve Analiz Çalışması

Bu bölümde, Büyükçekmece Su Arıtma Tesisindeki harmonik kaynaklı güç kalitesi problemlerinin detaylı olarak incelenebilmesi amacıyla, tesisin mevcut işletme koşulları gerçek saha verileri esas alınarak modellenmiştir. Büyükçekmece Su Arıtma Tesisi; yüksek güçlü motorlar ve büyük kapasiteli transformatörler içermesi nedeniyle, harmonik üretimi açısından kritik sistemler olarak değerlendirilmektedir. Bu nedenle, yapılan modelleme çalışmaları öncelikle mevcut durumun doğruluğunun sağlanmasına odaklanmış; saha ölçümleri ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak modelin güvenilirliği doğrulanmıştır.

Oluşturulan doğrulanmış model üzerinden, farklı kompanzasyon ve harmonik filtreleme senaryoları tanımlanarak sistemin harmonik davranışı analiz edilmiştir. Bu kapsamda, baskın harmonik bileşenlerin azaltılmasına yönelik olarak tek ayarlı pasif harmonik filtre uygulamaları değerlendirilmiş; farklı noktalara yerleştirilen filtreli kompanzasyon senaryolarının, toplam harmonik bozulma oranları, güç faktörü ve aktif güç kayıpları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Böylece, Büyükçekmece Su Arıtma Tesisinde harmonik azaltımına yönelik en uygun teknik yaklaşımın belirlenmesi amaçlanmıştır.

6.1.1 Senaryo Çalışmaları

Modelleme ve analizler çalışmalarında ele alınan senaryolar aşağıdaki gibidir:

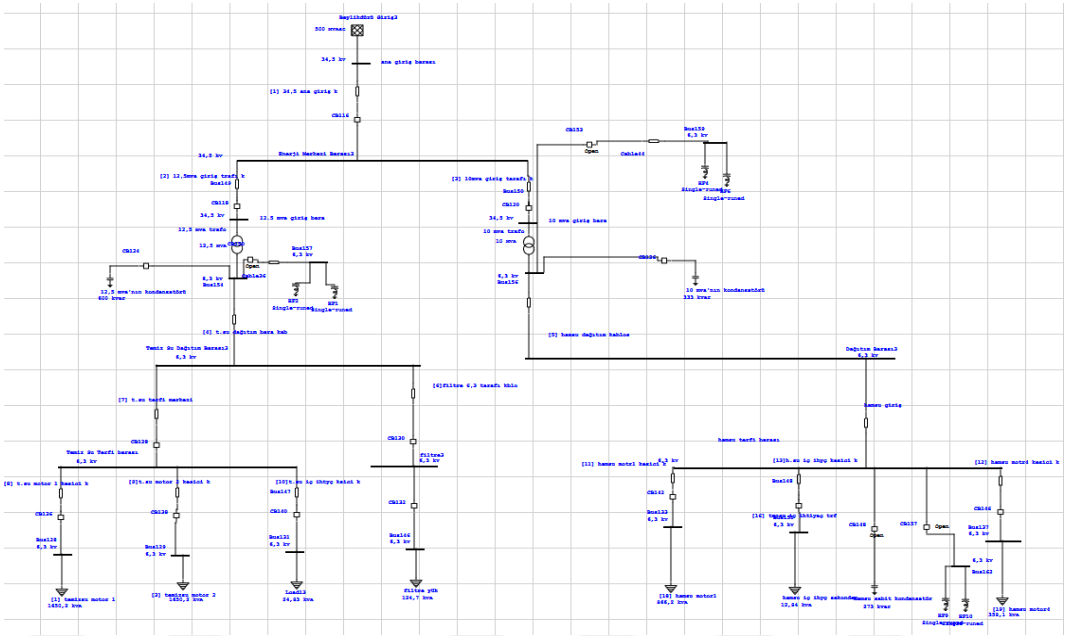
- Senaryo 1: Mevcut durum modellenmesi, analizi ve model doğruluğunun validasyonu.

- Senaryo 2: Ölçüm noktaları 2 ve 3'te bulunan transformatörlerin sekonder tarafındaki 6,3 kV'luk baraya bağlı kondansatörler yerine harmonik filtreli kompanzasyon modellenmesi ve analizleri
- Senaryo 3: Ölçüm noktası 2'de bulunan transformatörün sekonder tarafındaki filtreli kondansatörün sabit bırakılıp, ölçüm noktası 3'teki transformatörün sekonder kısmına bağlanan filtreli kompanzasyonun devre dışı bırakılması ve ölçüm noktası 14 numaradaki sabit kondansatör yerine harmonik filtreli kompanzasyon eklenmesinin modellenmesi ve analizleri

Mevcut durum Senaryo 1 modellendiğinde ve analiz edildiğinde çıkan sonuçların gerçek ölçümlere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Senaryo 1'den elde edilen sonuçlara göre Senaryo 2 ve Senaryo 3'te kullanılacak olan filtrelerin elektriksel değerleri de tespit edilmiştir. Filtreleme işlemleri yapılırken tek ayarlı pasif harmonic filtreler kullanılıp 5. ve 7. harmoniklerin azaltılıp sistemin harmonik bozulumunun düşürülmesi ve daha verimli çalışması amaçlanmıştır. Senaryo 1 analiz edilirken sistemin mevcut reaktif güç talebi hesaplanmış ve diğer senaryolarda filtrede kompanzasyonu sağlayacak kapasite değeri buna göre belirlenmiştir.

6.1.2 Simülasyon Sonuçları

Bu çalışmada, 3 farklı senaryo için modelleme yapılan paket programında oluşturulan modele ait ekran görüntüsü Şekil 6.1'de gösterilmiştir. Modellenen kompanzasyon üniteleri ve harmonik filtreler incelenen senaryolara göre model üzerinden anahtarlaması yapılarak simülasyonlara dahil edilmiş ve çıkarılmıştır. Değerlendirmeler yapılırken, 12,5 MVA transformatöre bağlı olan ölçüm noktası 2, 10 MVA transformatöre bağlı olan ölçüm noktası 3 ve tesisin şebekeye bağlantı noktası olan ölçüm noktası 1 tesis için kritik bölgeler seçilmiştir. Her bir case için, belirlenen bu ölçüm noktalarındaki kritik veriler analiz edilip tablolarda gösterilmiştir.



Şekil 6.1 Büyükçekmece su arıtma tesisi ETAP çizimi ekran görüntüsü

6.1.2.1 Senaryo 1

Bu senaryoda sistemin çalışma şekli gerçek çalışma ile bire bir aynı şekilde modellenmiştir. Burada amaçlanan simülasyon sonuçlarının gerçek ölçümlere yakınlığını doğrulamaktır. Bu bağlamda, ölçümlerin yapıldığı anda olduğu gibi, sistemdeki tüm sabit kondansatörler devreye alınarak simülasyon çalıştırılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları aşağıdaki tablo 6.1'de gösterilmiştir.

Tablo 6.1 Senaryo 1 ile gerçek ölçüm sonuçları karşılaştırması

Ölçüm Noktası	S (kVA)		Cos φ		Güç Faktörü		THD_I (%)		THD_V (%)	
	ETAP	Gerçek Ölçüm	ETAP	Gerçek Ölçüm	ETAP	Gerçek Ölçüm	ETAP	Gerçek Ölçüm	ETAP	Gerçek Ölçüm
1	4543	4575	0,999	1	0,998	0,997	5,7	5,87	2,01	1,79
2	3377	3488	0,999	1	0,998	0,998	4,67	4,44	2,01	1,80
3	1219	1181	0,962	0,990	0,958	0,980	9,53	9,79	2,01	1,78

Tablo 6.1'de görüldüğü üzere modellenen ve simülasyonu yapılan bu senaryodaki sonuçlar ile gerçek ölçüm sonuçları arasındaki hata payı düşüktür. Tesiste harmoniklerden kaynaklı problemlerin olduğu bilinmekte ve ölçüm sonuçları simülasyonla örtüşmektedir. Bununla birlikte, modelleme sonucunda sistemdeki aktif güç kaybı 16,293.58 Watt olarak tespit edilmiştir.

6.1.2.2 Senaryo 2

Bu senaryoda, klasik kompanzasyondan vazgeçilip tek ayarlı pasif filtreli kompanzasyon ile sistem modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Önceki ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre, sistemde 5. ve 7. harmoniklerin baskın olduğu tespit edilmişti. Bununla birlikte Senaryo 1'den elde edilen sonuçlardan sistemin ihtiyacı olan reaktif güç değeri bulunmuştur. Bu veriler ile pasif filtre tasarımları yapılıp modelleme ve analizler gerçekleştirilmiştir. Ölçüm noktası 2'de bulunan transformatörün sekonder tarafındaki 6,3 kvarlık baraya bağlanmak için 2 adet 300 KVAR pasif filtre tasarlanmıştır. 5. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 24,06 μF, endüktans değeri 16,84 mH, iç direnci 0,378 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 7. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 24,06 μF, endüktans değeri 8,59 mH, iç direnci 0,27 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. Ölçüm noktası 3'te bulunan transformatörün sekonder tarafındaki 6,3 kvarlık baraya bağlanmak için de 2 adet 40 kVAR gücünde pasif filtre sisteme eklenmiştir. 5. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 3,208 μF, endüktans değeri 126,36 mH, iç direnci 2,835 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 7. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 3,208 μF, endüktans değeri 64,46 mH, iç direnci 2,025 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir.

Tablo 6.2 Senaryo 2 ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	S (kVA)	Cos φ	Güç Faktörü	THB_I (%)	THB_V (%)
1	4543	0,9999	0,9995	2,8	1,86

Tablo 6.2 Senaryo 2 ölçüm sonuçları (devamı)

Ölçüm Noktası	S (kVA)	Cos φ	Güç Faktörü	THB_I (%)	THB_V (%)
2	3383	0,9999	0,9995	2,68	1,86
3	1160	1	0,9985	5,47	1,86

Tablo 6.2'ye göre, yapılan işlemler sonucunda sistemin ana giriş noktası olan ölçüm noktası 1'de THD_I %2,8 seviyesine düşmüş ve yaklaşık %50,88 azalmıştır. Akımın yanı sıra gerilimdeki harmonik bozulma THD_V %1,86 seviyesine düşmüş ve %7,46 azalmıştır. Güç faktöründe de iyileşme olduğu tabloda görülmektedir. Bununla birlikte filtrelerin pozitif bir etkisi olarak sistemde toplam aktif güç kaybı 16,280.92 Watt seviyesine gerilemiştir.

6.1.2.3 Senaryo 3

Bu senaryoda, ölçüm noktası 2'de bulunan transformatörün sekonder tarafındaki filtreli kondansatör sabit bırakılıp, ölçüm noktası 3'teki transformatörün sekonder kısmına bağlı olan filtreli kompanzasyon ünitesi devre dışı bırakılmış, onun yerine ölçüm noktası 14'teki sabit kondansatör yerine tek ayarlı pasif harmonik filtre tasarlanmıştır. Yine sistemde baskın olduğu tespit edilen 5. ve 7. harmonik bileşenleri elemine edecek tek ayarlı filtre dizayn edilmiştir. Mevcut baradaki ölçüm sonuçlarına göre sitemin ihtiyacı olan reaktif güç değeri bulunmuştur. Bu veriler ile pasif filtre tasarımı yapılıp paket programa işlenmiştir. Ölçüm noktası 14'e bağlanmak için 2 adet 120 KVAR pasif filtre tasarlanmıştır. 5. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtenin kapasitesi 9,624 µF, endüktans değeri 42,11 mH, iç direnci 0,945 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 7. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtenin kapasitesi 9,624 µF, endüktans değeri 21,48 mH, iç direnci 0,675 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir.

Tasarımlar modellenip, simülasyon gerçekleştirilerek, elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.3 Senaryo 3 ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	S (kVA)	Cos φ	Güç Faktörü	THB_I (%)	THB_V (%)
1	4543	1	0,9997	2.27	1,82
2	3382	0,9999	0,9995	2,67	1,82
3	1159	0,9981	0,9977	2.72	1,82

Tablo 6.3'e göre, yapılan işlemler sonucunda sistemin ana giriş noktası olan ölçüm noktası 1'de THB_I %2,27 seviyesine gerilemiş ve Senaryo 1'e göre yaklaşık %60,18, Senaryo 2'ye göre %18,93 azalmıştır. Gerilimdeki harmonik bozulma THB_V %1,82 seviyesine düşmüş ve Senaryo 1'e göre %9,45, Senaryo 2'ye göre %2,15 azalmıştır. Sistemden harmonik bozulma probleminin yanı sıra güç faktörü de 1'e daha fazla yaklaşmıştır. Bununla birlikte filtrelerin sistemdeki toplam aktif güç kaybı 16,271.57 Watt'tır.

6.1.2.4 Değerlendirme

Yüksek güçlü pompa grupları ile çok sayıda elektriksel ekipman içeren su arıtma tesislerinde harmoniklerden kaynaklı ciddi problemler ortaya çıkmaktadır. Bu problemler tesisteki kayıpları artırıp enerji verimini düşürdüğü gibi sistemdeki elektriksel ekipmanlara da zarar vermektedir. Ayrıca harmonikler, koruma röleleri ve kesiciler gibi koruma ekipmanlarının hatalı çalışmasına veya ayar dışına çıkmasına neden olabilmekte, bu durum arızaların zamanında tespit edilememesine yol açmaktadır. Koruma sistemlerinin güvenilirliğinin azalması ise tesis işletme güvenliğini olumsuz etkilemekte ve dolaylı olarak personel güvenliği ile insan sağlığını tehlikeye atabilecek riskler oluşturmaktadır. Bu çalışmada, sisteme zarar veren harmonikleri elemine etmek için mevcut sistem bir paket programda modellenmiş ve çeşitli senaryolarla çözümler aranmıştır.

Hazırlanan senaryolara göre ölçüm yapılan kritik noktalardaki THB_I, THB_V ve toplam aktif güç kayıpları tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.4 Senaryoların karşılaştırılması

	Senaryo 1		Senaryo 2		Senaryo 3	
Ölçüm Noktası	THB_I (%)	THB_V (%)	THB_I (%)	THB_V (%)	THB_I (%)	THB_V (%)
1	5,7	2,01	2,8	1,86	2,27	1,82
2	4,67	2,01	2,68	1,86	2,67	1,82
3	9,53	2,01	5,47	1,86	2,72	1,82
$P_{kayıp}$	16293,58		16280,92		16271,57	

Tablo 6.4'e göre harmoniklerin elemine edilmesinin pozitif etkilerinden biri de kayıpları azaltmasıdır. Senaryo 1 modellenen sistemin gerçek ölçüm değerlerine yakınlığını doğrulamaktadır. Kurulan bu yapı üzerine senaryolar uygulamaya alınmıştır. Senaryo 2 ve Senaryo 3'te harmoniklerin ciddi oranda azaltıldığı ve bununla birlikte toplam aktif güç kaybının da azaldığı görülmektedir. Senaryo 3, en verimli senaryodur ve Senaryo 1'e göre THB_I azalma yüzdeleri ölçüm noktası 1'de % 60,18, ölçüm noktası 2'de %42,81, ölçüm noktası 3'te %71,46; THB_V azalma yüzleri ise tüm noktalarda %9,45'tir. Harmonik filtre kullanılan 2. ve 3. senaryoda, akımların etkin değerleri düştüğü için kablo bakır kayıpları, trafo kayıpları, motor kayıpları gibi kayıplar azalmış ve sonuçlar tabloya yansımıştır.

İhsaniye Su Arıtma Tesisi için Modelleme ve Analiz Çalışması

Bu bölümde, İhsaniye Su Arıtma Tesisinde gerçekleştirilen harmonik analiz ve modelleme çalışmaları ele alınmıştır. Tesisin elektriksel altyapısı, motor sürücü yapısı ve işletme koşulları dikkate alınarak, harmonik kaynaklı güç kalitesi problemlerinin sistem üzerindeki etkilerinin ortaya konulması amaçlanmıştır. Bu kapsamda, tesisin mevcut işletme durumu gerçek saha ölçümleri esas alınarak modellenmiş ve farklı çalışma senaryoları altında harmonik davranışı detaylı şekilde incelenmiştir.

İhsaniye Su Arıtma Tesisinde, proses gereksinimlerine bağlı olarak motorların büyük bir bölümü frekans konvertörleri ile sürülmekte olup, debi ve basınç taleplerine göre motor hızları sürekli olarak değişmektedir. Bu durum, frekans konvertörlerinin giriş akım karakteristiğini doğrudan etkilemekte ve şebekeye enjekte edilen harmonik akım bileşenlerinin seviyelerinin işletme koşullarına bağlı olarak değişmesine neden olmaktadır. Frekans konvertörlerinin yoğun kullanımı, tesis genelinde toplam harmonik akım bozulma oranlarının (THB_i) yüksek değerlere ulaşmasına yol açabilmektedir.

Enerji verimliliği açısından frekans konvertörü kullanımı önemli avantajlar sağlamakla birlikte, harmonik bozulmaların şebeke ve tesis içi ekipmanlar üzerindeki olumsuz etkileri bu tür tesislerde daha belirgin hâle gelmektedir. Bu doğrultuda, İhsaniye Su Arıtma Tesisinin mevcut işletme koşulları detaylı saha ölçümleri ile belirlenmiş; farklı yüklenme durumları ve çalışma senaryoları altında harmonik karakteristikleri analiz edilmiştir. Elde edilen veriler kullanılarak, sistemde baskın olan harmonik bileşenler tespit edilmiştir.

Modelleme ve analiz çalışmaları kapsamında, pasif filtreler, aktif harmonik filtreler ve hibrit çözümler içeren birden fazla senaryo oluşturulmuş; her bir senaryonun toplam harmonik akım bozulması (THB_i), toplam harmonik gerilim bozulması (THB_v), güç faktörü ve sistem aktif güç kayıpları üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Özellikle aktif harmonik filtre uygulamalarının, değişken yük ve sürücü frekansına sahip işletme koşullarında harmonik azaltım performansına olan katkıları değerlendirilmiş; pasif filtre çözümleri ile sağladığı avantajlar ve sınırlamalar analiz edilmiştir.

Bu bölümde elde edilen sonuçlar, frekans konvertörü yoğun olarak kullanılan ve değişken işletme karakteristiğine sahip su arıtma tesislerinde harmonik problemlerinin kritik bir mühendislik konusu olduğunu ortaya koymaktadır. İhsaniye Su Arıtma Tesisi örneği üzerinden gerçekleştirilen bu çalışmalar, harmonik kontrolüne yönelik uygun çözüm yaklaşımlarının belirlenmesinde saha ölçümleri ile doğrulanmış sayısal modellemenin gerekliliğini açıkça göstermektedir.

5.1.1 Senaryo Çalışmaları

Modelleme ve analizler çalışmalarında ele alınan senaryolar aşağıdaki gibidir

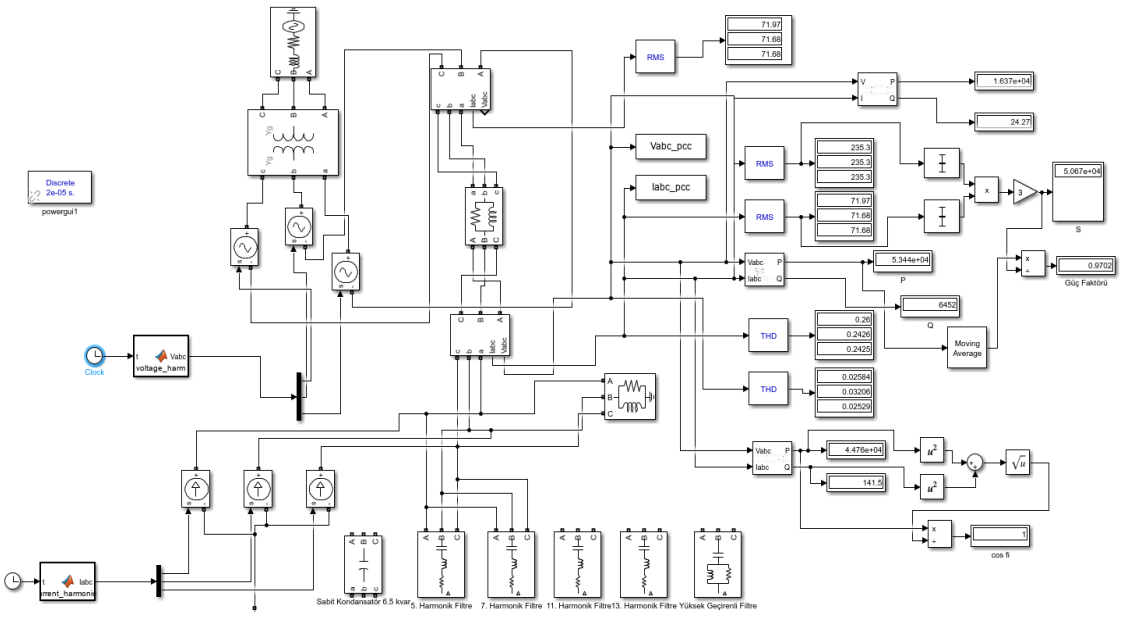
- Senaryo 1: Mevcut durum modellenmesi, analizi ve model doğrulaması
- Senaryo 2: Ölçüm noktası 1'e bağlı sabit kondansatörler yerine, 5. ve 7. harmonikleri elemine eden tek ayarlı pasif harmonik filtreli kompanzasyon modellenmesi ve analizleri
- Senaryo 3: Ölçüm noktası 1'e bağlı sabit kondansatörler yerine; 5., 7., 11. ve 13. harmonikleri elemine eden tek ayarlı pasif harmonik filtreli kompanzasyon modellenmesi ve analizleri
- Senaryo 4: Ölçüm noktası 1'e bağlı sabit kondansatörler yerine; 5. ve 7. harmonikler için tek ayarlı pasif harmonik filtre, 11. ve üstü harmonikler için yüksek geçiren pasif harmonik filtreli kompanzasyon modellenmesi ve analizi.
- Senaryo 5: Ölçüm noktası 1'e bağlı sabit kondansatörler yerine, 5. ve 7. harmonikleri elemine eden tek ayarlı pasif harmonik filtreler ve buna ek olarak paralel aktif filtrenin bulunduğu hibrit sistem modellemesi ve analizleri

Mevcut durum Senaryo 1 modellendiğinde ve analiz edildiğinde çıkan sonuçların gerçek ölçümlere oldukça yakın olduğu görülmektedir. Senaryo 1'den elde edilen sonuçlara göre Senaryo 2, Senaryo 3 ve Senaryo 4'te kullanılacak olan filtrelerin elektriksel değerleri tespit edilmiştir. Filtreleme işlemleri yapılırken pasif harmonik filtreler kullanılıp başta 5. ve 7. harmonikler olmak üzere sistemin harmonik bozulumunun düşürülmesi ve daha verimli çalışması amaçlanmıştır. Senaryo 1 analiz edilirken sistemin mevcut reaktif güç talebi hesaplanmış ve diğer senaryolarda filtrede kompanzasyonu sağlayacak kapasite değeri buna göre belirlenmiştir.

5.1.2 Simülasyon Sonuçları

Bu çalışmada, beş farklı senaryo için MATLAB/Simulink ortamında oluşturulan modele ait ekran görüntüsü Şekil 6.2'de verilmiştir. Modelde kullanılan kompanzasyon üniteleri ve harmonik filtreler, incelenen senaryolara bağlı olarak model üzerinde anahtarlama yöntemiyle simülasyona dahil edilmiş veya devreden çıkarılmıştır. Simülasyon modelinin doğrulanması (validasyon) aşamasında, tesisin

ortak bağlantı noktası (PCC) olarak tanımlanan Ölçüm Noktası 1 esas alınmıştır. Tesis içerisindeki tüm yükler, PCC noktasından beslenen tek bir eşdeğer yük olarak modellenmiş olup bu yükün aktif güç, reaktif güç ve nominal gerilim değerleri, sahada güç kalite analizörü ile 50 Hz temel frekansta yapılan gerçek ölçümlerden elde edilerek modele tanımlanmıştır. Yükten kaynaklanan akım harmonikleri, saha ölçümlerinden elde edilen ve 50. harmoniğe kadar olan harmonik bileşenler kullanılarak bir MATLAB fonksiyon bloğu içerisinde tanımlanmış ve eşdeğer yüke paralel olarak sisteme enjekte edilmiştir. Buna ek olarak, şebekeden kaynaklanan gerilim harmonikleri de yine saha ölçümlerine dayalı olarak 50. harmoniğe kadar MATLAB fonksiyon blokları aracılığıyla modellenmiş ve şebekeye seri bağlı şekilde sisteme entegre edilmiştir. Tesisin validasyonu sağlandıktan sonra, her bir senaryo için PCC noktası olan Ölçüm Noktası 1'de elde edilen kritik elektriksel parametreler analiz edilmiş ve sonuçlar tablolar halinde sunulmuştur. Böylece, pasif ve aktif harmonik filtrelerin güç kalitesi üzerindeki etkileri karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.



Şekil 6.2 İhsaniye su arıtma tesisi simulink çizimi ekran görüntüsü

6.2.2.1 Senaryo 1

Bu senaryoda sistemin çalışma şekli gerçek çalışma ile bire bir aynı şekilde modellenmiştir. Burada amaçlanan simülasyon sonuçlarının gerçek ölçümlere yakınlığını doğrulamaktır. Bu bağlamda, ölçümlerin yapıldığı anda olduğu gibi,

sistemdeki tüm sabit kondansatörler devreye alınarak simülasyon çalıştırılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.5 Senaryo 1 ile gerçek ölçüm sonuçları karşılaştırması

Ölçüm Noktası	I (A)		S (kVA)		Cos φ		Güç Faktörü		THD_I (%)		THD_V (%)	
	M	G.Ö	M	G.Ö	M	G.Ö	M	G.Ö	M	G.Ö	M	G.Ö
1	75,96	76,41	53,55	54,18	0,99	1	0,92	0,92	41,65	43,29	3,68	3,44

(M: Matlab, G.Ö: Gerçek Ölçüm)

Tablo 6.5'de görüldüğü üzere modellenen ve simülasyonu yapılan bu senaryodaki ölçüm sonuçları ile gerçek ölçüm sonuçları birbirlerine oldukça yakındır. Bu, tesisin simülasyon programına hata payı çok düşük bir şekilde aktarıldığının göstergesidir. Tesiste harmoniklerden kaynaklı problemlerin tesisin tamamına yayıldığı ve frekans konvertörleri ile sürülen elektrik motor- pompa gruplarının harmoniklere sebep olduğu görülmektedir.

6.2.2.2 Senaryo 2

Bu senaryoda, klasik kompanzasyondan vazgeçilip tek ayarlı pasif filtreli kompanzasyon ile sistem modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Önceki ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre, sistemde 5. ve 7. harmoniklerin baskın olduğu tespit edilmişti. Bununla birlikte Senaryo 1'den elde edilen sonuçlardan sistemin ihtiyacı olan reaktif güç değeri 6,5 kVAR bulunmuştur ve bu yük her bir harmonik seviyesi için farklı oranlarda bölünerek simülasyonlar yapılmıştır. Bu veriler ile pasif filtre tasarımları yapılıp modelleme ve analizler gerçekleştirilmiştir.

1. Durumda, 6,5 kVAR gücündeki yük Ölçüm noktası 1'e bağlanmak için 3,25 kVAR değerinde 2 adet pasif harmonik filtre tasarlanmıştır. 5. Harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 64,66 µF, endüktans değeri 6,27 mH, iç direnci 0,14 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 7. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 64,66 µF, endüktans değeri 3,18 mH, iç direnci 0,10 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar tablolada sunulmuştur.

Tablo 6.6 Senaryo 2, 1. durum ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	Cos φ	Güç Faktörü	THB_I (%)	THB_V (%)
1	1	0,9671	26,183	2,7753

Tablo 6.6'ya göre, yapılan işlemler sonucunda sistemin ana giriş noktası olan ölçüm noktası 1'de THB_I %26,183 seviyesine gerilemiştir ve %37,13 azalmıştır. Akımın yanı sıra gerilimdeki harmonik bozulma THB_V %2,7753 seviyesine düşmüş ve %24,67 azalmıştır. Güç faktöründe de iyileşme olduğu tabloda görülmektedir.

2. Durumda, 6,5 kvar gücündeki reaktif güç talebi, 5. ve 7. harmoniklerin sisteme etki ettikleri harmonik akımların genlikleri ile orantılı şekilde paylaştırılarak tasarlanmıştır. Bunun sonucunda 5. Harmonik bileşeni elemine etmek için tasarlanan filtre 4 kVAR, 7. harmonik bileşeni elemek için tasarlanan filtrenin gücü 2,5 kvar seçilmiştir. 5. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 79,58 µF, endüktans değeri 5,093 mH, iç direnci 0,1143 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 7. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 64,66 µF, endüktans değeri 4,157 mH, iç direnci 0,1306 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir.

Tablo 6.7 Senaryo 2, 2. durum ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	Cos φ	Power Factor	THB_I (%)	THB_V (%)
1	1	0,9702	24,83	2,773

Tablo 6.7'ye göre, yapılan işlemler sonucunda sistemin ana giriş noktası olan ölçüm noktası 1'de THB_I %24,83 seviyesine gerilemiştir ve %40,38 azalmıştır. Akımın yanı sıra gerilimdeki harmonik bozulma THB_V %2,773 seviyesine düşmüş ve %24,73 azalmıştır. Güç faktöründe de iyileşme olduğu tabloda görülmektedir.

6.2.2.3 Senaryo 3

Bu senaryoda, tek ayarlı pasif filtreli kompanzasyon ile sistem modellenmesi gerçekleştirilmiştir. Harmonik spektrum incelendiğinde 11. ve 13. harmonik seviyelerinin de 5. ve 7. harmonikler gibi yüksek olduğu görülmüştür. Bundan dolayı Senaryo 2'deki duruma ek olarak 11. Ve 13. Harmonikleri de elemek için 2 adet daha tek ayarlı pasif harmonik filtre simülasyona eklenmiştir. Sistemin ihtiyacı olan reaktif güç değeri 6,5 kVAR olduğu bilinmeketedir ve bu yük her bir harmonik seviyesi için farklı ornalarda bölünerek simülasyonlar yapılmıştır. Bu veriler ile pasif filtre tasarımları yapılıp modelleme ve analizler gerçekleştirilmiştir.

1. Durumda, 6,5 kVAR gücündeki yük Ölçüm noktası 1'e bağlanmak için 1,63 kVAR değerinde 4 adet pasif harmonik filtre tasarlanmıştır. 5. Harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 34,43 µF, endüktans değeri 12,5 mH, iç direnci 0,28 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 7. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 34,43 µF, endüktans değeri 6,38 mH, iç direnci 0,2 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 11. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 34,43 µF, endüktans değeri 2,58 mH, iç direnci 0,127 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 13. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 34,43 µF, endüktans değeri 1,85 mH, iç direnci 0,108 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar tablolada sunulmuştur.

Tablo 6.8 Senaryo 3, 1. durum ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	Cos φ	Güç Faktörü	THB_I (%)	THB_V (%)
1	1	0,9506	32,493	2,682

Tablo 6.8'de görülmek üzere, yapılan işlemler sonucunda sistemin ana giriş noktası olan ölçüm noktası 1'de THB_I %32,493 seviyesine gerilemiştir ve %21,98 azalmıştır. Akımın yanı sıra gerilimdeki harmonik bozulma THB_V %2,682 seviyesine düşmüş ve %27,2 azalmıştır. Güç faktöründe de iyileşme olduğu tabloda görülmektedir.

2. Durumda, 6,5 kvar gücündeki reaktif güç talebi, 5., 7., 11., ve 13. harmoniklerin sisteme etki ettikleri harmonik akımların genlikleri ile orantılı şekilde paylaştırılarak tasarlanmıştır. Bunun sonucunda 5. Harmonik bileşeni elemine etmek için tasarlanan filtre 3,2 kVAR, 7. harmonik bileşeni elemek için tasarlanan filtrenin gücü 1,98 kvar, 11. Harmonik bileşeni elemek için tasarlanan filtrenin gücü 0,73 kVAR, 13. Harmonik bileşeni elemek için tasarlanan filtrenin gücü 0,59 kVAR seçilmiştir. 5. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 63,66 µF, endüktans değeri 6,37 mH, iç direnci 0,1429 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 7. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 39,39 µF, endüktans değeri 5,25 mH, iç direnci 0,1649 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 11. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 14,52 µF, endüktans değeri 5,77 mH, iç direnci 0,2846 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 13. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 11,74 µF, endüktans değeri 5,11 mH, iç direnci 0,298 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar tablolada sunulmuştur.

Tablo 6.9 Senaryo 3, 2. durum ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	Cos φ	Power Factor	THB_I (%)	THB_V (%)
1	1	0,9665	26,4166	2,583

Tablo 6.9'a göre, yapılan işlemler sonucunda sistemin ana giriş noktası olan ölçüm noktası 1'de THB_I %26,4166 seviyesine gerilemiştir ve %36,57 azalmıştır. Akımın yanı sıra gerilimdeki harmonik bozulma THB_V %2,583 seviyesine düşmüş ve %29,89 azalmıştır. Güç faktöründe de iyileşme olduğu tabloda görülmektedir.

6.2.2.4 Senaryo 4

Bu senaryoda, tek ayarlı pasif filtreli kompanzasyon ile sistem modellenmesine ek olarak yüksek geçirenli pasif filtre modeli de sisteme dahil edilmiştir. Harmonik spektrumda baskın olan 5. ve 7. harmoniklere ek olarak 11. harmonik ve üstü olan harmoniklerin elemine edilmesi amaçlanmıştır.

1. Durumda; 6,5 kVAR gücündeki reaktif güç talebi için Ölçüm noktası 1'e bağlanmak üzere 2,17 kVAR gücünde 3 adet pasif harmonik filtre tasarlanmıştır. 5. Harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 43,17 µF, endüktans değeri 9,389 mH, iç direnci 0,2107 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 7. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 43,17 µF, endüktans değeri 4,79 mH, iç direnci 0,1505 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 11. Harmonik ve üzerindeki harmonik bileşenleri elemine etmek için kullanılan yüksek geçirgenli pasif harmonik filtrenin kapasitesi 43,17 µF, endüktans değeri 1,94 mH, iç direnci 13,4055 ohm ve Q kalite faktörü 2 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar tablolada sunulmuştur.

Tablo 6.10 Senaryo 4, 1. durum ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	Cos φ	Güç Faktörü	THB_I (%)	THB_V (%)
1	1	0,956	30,573	2,85866

Tablo 6.10'a göre, yapılan işlemler sonucunda sistemin ana giriş noktası olan ölçüm noktası 1'de THB_I %30,573 seviyesine gerilemiştir ve %26,59 azalmıştır. Akımın yanı sıra gerilimdeki harmonik bozulma THB_V %2,85866 seviyesine düşmüş ve %22,41 azalmıştır. Güç faktöründe de iyileşme olduğu tabloda görülmektedir.

2. Durumda; 6,5 kVAR gücündeki reaktif güç harmoniklerin sisteme etki ettikleri harmonik akımların genlikleri ile orantılı şekilde paylaştırılmış ve ölçüm noktası 1'e bağlanmak üzere 3 adet pasif harmonik filtre tasarlanmıştır. 5. Harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 70,03 µF, endüktans değeri 5,79 mH, iç direnci 0,1299 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 7. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 43,37 µF, endüktans değeri 4,768 mH, iç direnci 0,1498 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 11. Harmonik ve üzerindeki harmonik bileşenleri elemine etmek için kullanılan yüksek geçirgenli pasif harmonik filtrenin kapasitesi 15,92µF, endüktans değeri 5,26 mH, iç direnci 36,3636 ohm ve Q kalite faktörü 2 olarak belirlenmiştir. Sonuçlar tablolada sunulmuştur.

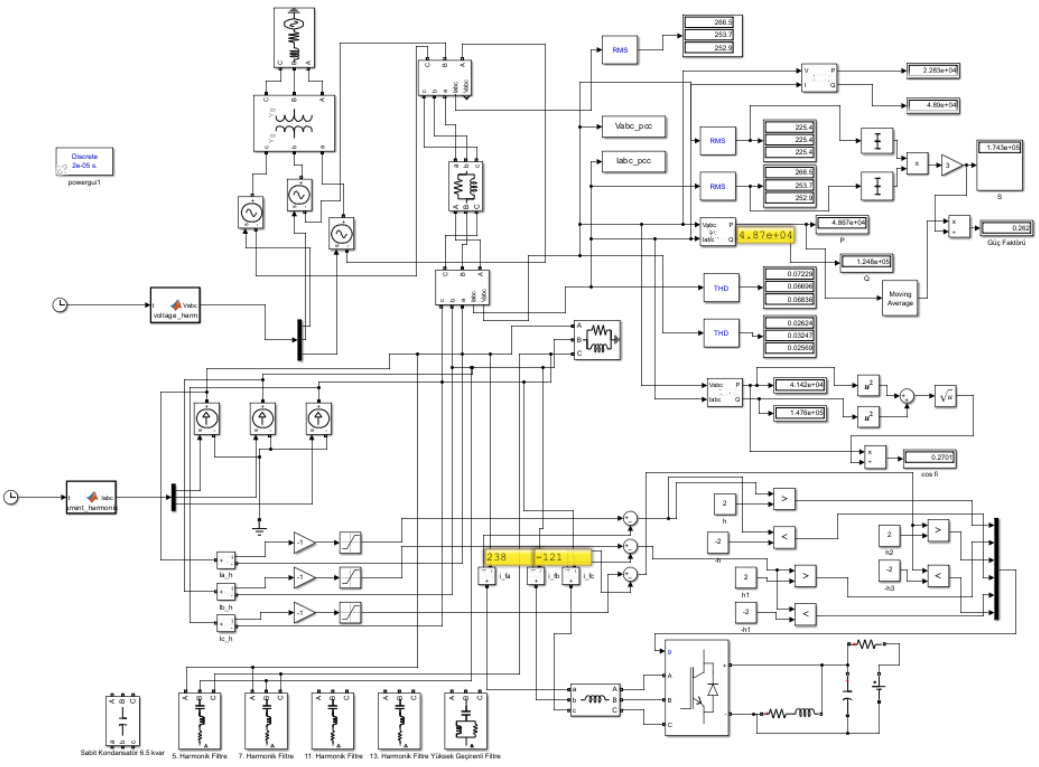
Tablo 6.11 Senaryo 4, 2. durum ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	Cos φ	Güç Faktörü	THB_I (%)	THB_V (%)
1	1	0,9668	26,3	2,794

Tablo 6.11'e göre, yapılan işlemler sonucunda sistemin ana giriş noktası olan ölçüm noktası 1'de THB_I %26,3 seviyesine gerilemiştir ve %36,85 azalmıştır. Akımın yanı sıra gerilimdeki harmonik bozulma THB_V %2,794 seviyesine düşmüş ve %24,16 azalmıştır. Güç faktöründe de iyileşme olduğu tabloda görülmektedir.

6.2.2.5 Senaryo 5

Bu senaryoda, tek ayarlı pasif filtreli kompanzasyon ile sistem modellenmesine ek olarak aktif harmonik filtre modeli de sisteme dahil edilmiştir. Harmonik spektrumda baskın olan 5. ve 7. harmoniklere ek olarak sistemdeki tüm harmoniklerin elemine edilmesi amaçlanarak hibrit bir filtre senaryosu oluşturulmuştur. 6,5 kvar gücündeki reaktif güç talebi, 5. ve 7. harmoniklerin sisteme etki ettikleri harmonik akımların genlikleri ile orantılı şekilde paylaştırılarak tasarlanmıştır. Bunun sonucunda 5. Harmonik bileşeni elemine etmek için tasarlanan filtre 4 kVAR, 7. harmonik bileşeni elemek için tasarlanan filtrenin gücü 2,5 kvar seçilmiştir. 5. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 79,58 µF, endüktans değeri 5,093 mH, iç direnci 0,1143 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. 7. harmonik bileşeni elemine etmek için kullanılan filtrenin kapasitesi 64,66 µF, endüktans değeri 4,157 mH, iç direnci 0,1306 ohm ve Q kalite faktörü 70 olarak belirlenmiştir. Bunlara ek olarak Şekil 6.3'te detaylıca gösterilen aktif harmonik filtre sisteme entegre edilmiştir.



Şekil 6.3 Hibrit harmonik filtreli sistem simulink ekran görüntüsü

Tablo 6.12 Senaryo 5 ölçüm sonuçları

Ölçüm Noktası	Cos φ	Güç Faktörü	THB_I (%)	THB_V (%)
1	1	0,9972	6,9213	2,813

Tablo 6.12'ye göre, yapılan işlemler sonucunda sistemin ana giriş noktası olan ölçüm noktası 1'de THB_I %6,9213 seviyesine gerilemiştir ve %83,38 azalmıştır. Akımın yanı sıra gerilimdeki harmonik bozulma THB_V %2,813 seviyesine düşmüş ve %23,65 azalmıştır. Güç faktöründe de iyileşme olduğu tabloda görülmektedir.

6.2.2.6 Değerlendirme

İhsaniye Su Arıtma Tesisinde harmoniklerden kaynaklı ciddi problemler ortaya çıkmaktadır. Bu problemler tesisteki kayıpları artırıp enerji verimini düşürdüğü gibi sistemdeki elektriksel ekipmanlara da zarar vermektedir. Bu çalışmada, sisteme

zarar veren harmonikleri elemine etmek için mevcut sistem bir paket programda modellenmiş ve çeşitli senaryolarla çözümler aranmıştır. Her bir Senaryo için reaktif güç talebi çeşitli oranlarda bölünerek (Durum 1 ve Durum 2 olarak) filtreler tasarlanmış daha verimli olan durumlar tabloya işlenmiştir. Senaryo 2,3 ve 4'te harmonik akım genlikleri ile orantılı tasarlanan filtre modelleri (Durum 2ler) daha verimli olduğu için Tablo'6.12'de onlar ayer verilmiştir. Senaryo 1 ve senaryo 5' tek durum bulunmaktadır. Hazırlanan senaryolara göre ölçüm yapılan kritik noktalardaki THB_I, THB_V ve toplam aktif güç kayıpları aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.12 Senaryoların karşılaştırma tablosu

	Senaryo 1		Senaryo 2		Senaryo 3		Senaryo 4		Senaryo 5	
Ölçüm Noktası	THB_I (%)	THB_V (%)	THB_I (%)	THB_V (%)	THB_I (%)	THB_V (%)	THB_I (%)	THB_V (%)	THB_I (%)	THB_V (%)
1	44,78	3,44	24,83	2,773	26,4166	2,583	26,3	2,794	6,9213	2,813

Tablo 6.12'de tüm senaryolardaki harmonic bozulmalar kıyaslanmıştır. Senaryo 1 modellenen sistemin gerçek ölçüm değerlerine yakınlığını doğrulamaktadır. Kurulan bu yapı üzerine diğer senaryolar uygulamaya alınmıştır. Senaryo 2, Senaryo 3 ve Senaryo 4'te pasif harmonik filtrelerin çeşitli kombinasyonlarla kullandıldığı ve harmoniklerin azaltıldığı azaldığı görülmektedir. Bunlara ek olarak tasarlanan aktif harmonik filtrenin ise tesisteki hamronik problemlerini büyük bir ölçüde çözdüğü görülmektedir. Senaryo 2, Senaryo 3, Senaryo 4 ve Senaryo 5'te Senaryo 1'e göre THB_I azalma yüzdeleri ölçüm noktası 1'de sırasıyla %40,38, %36,57, %36,85 ve %83,38'dir. Senaryo 1'e göre THB_V azalma yüzleri ise sırasıyla, %24,73, %29,89, %24,16 ve 23,65'tir.

6
SONUÇ

Harmonikler, güç kalitesini doğrudan etkileyen en önemli parametrelerden biri olup gerekli önlemler alınmadığı takdirde elektrik tesislerinde ciddi işletme problemlerine yol açabilmektedir. Su arıtma tesisleri; içerisinde yer alan pompa istasyonları, transformatörler, kondansatör grupları, doğrultucular, otomasyon sistemleri ve diğer doğrusal olmayan yük karakteristiklerinden dolayı harmonik üreten tesislerdir. Tesisteki yük yapısından dolayı oluşan bu harmonikler, tesis ekipmanlarına ve tesis işletmesine ciddi zararlar vermektedir. Transformatör ve motor sargılarında aşırı ısınma, gerilim ve akım dalga şekillerinde bozulma, koruma ekipmanlarının hatalı çalışması, elektriksel kayıpların artması ve rezonans etkileri sonucu kompanzasyon sistemlerinin zarar görmesi gibi durumlar sistemde harmoniklerin etkisinden dolayı ortaya çıkmaktadır ve bu sorunlar hem sistem verimliliği hem de güvenli çalışma ortamını tehdit etmektedir.

Bu tez çalışmasında, Büyükçekmece ve İhsaniye Su Arıtma Tesisleri ele alınmış; harmoniklerin güç kalitesi, enerji kayıpları ve sistem performansı üzerindeki etkileri hem ölçümler hem de simülasyonlar yardımıyla kapsamlı olarak incelenmiştir. Çalışmanın temel amacı, gerçek işletme koşullarını yansıtan doğrulanmış bir simülasyon modeli üzerinden farklı harmonik azaltım senaryolarını değerlendirerek, bu tür tesisler için uygulanabilir ve etkin çözüm yaklaşımlarını ortaya koymaktır.

Bu kapsamda öncelikle her iki tesiste saha ölçümleri gerçekleştirilmiş ve elde edilen veriler kullanılarak sistemler simülasyon ortamında modellenmiştir. Senaryo 1 olarak tanımlanan durumlar, tesislerin gerçek ölçüm değerlerini temsil etmekte olup ölçüm sonuçları ile simülasyon çıktıları arasındaki yüksek uyum sayesinde modellerin doğruluğu ve güvenilirliği doğrulanmıştır. Bu doğrulanmış modeller üzerine farklı harmonik azaltım senaryoları uygulanarak sistem davranışı detaylı şekilde analiz edilmiştir.

Büyükçekmece Su Arıtma Tesisi için yapılan analizlerde harmonik azaltım senaryolarının sistem performansı üzerinde önemli etkileri olduğu belirlenmiştir.

Uygulanan senaryolar arasında Senaryo 3 en verimli çözüm olarak öne çıkmış; Senaryo 1'e göre akım harmoniklerinde ölçüm noktası 1'de %60,18, ölçüm noktası 2'de %42,81 ve ölçüm noktası 3'te %71,46 oranlarında azalma elde edilmiştir. Gerilim harmonikleri açısından ise tüm ölçüm noktalarında %9,45 oranında iyileşme sağlanmıştır. Bu iyileşmelere paralel olarak, toplam aktif güç kaybının da azaldığı ve harmoniklerin sistem üzerindeki olumsuz etkilerinin önemli ölçüde sınırlandığı tespit edilmiştir.

İhsaniye Su Arıtma Tesisi için gerçekleştirilen senaryo analizlerinde, harmonik filtreleme uygulamalarının tesisin ana giriş barası üzerindeki etkileri detaylı olarak incelenmiştir. Senaryo 2'de pasif harmonik filtrelerin kullanılmasıyla, Senaryo 1'e kıyasla birinci durumda akım toplam harmonik bozulma oranında (THB_I) %37,13, gerilim toplam harmonik bozulma oranında (THB_V) %24,67; ikinci durumda ise THB_I'de %40,38 ve THB_V'de %24,73 oranlarında azalma sağlandığı görülmüştür. Benzer şekilde Senaryo 3'te, birinci durumda THB_I %21,98 ve THB_V %27,20 oranlarında azalırken, ikinci durumda THB_I %36,57 ve THB_V %29,89 seviyelerinde düşüşler elde edilmiştir. Senaryo 4'te ise birinci durumda THD_I %26,59 ve THB_V %22,41, ikinci durumda ise THB_I %36,85 ve THB_V %24,16 oranlarında azalma sağlanmıştır. Bu sonuçlar, pasif harmonik filtrelerin harmonik bozulmaları azaltmada etkili olduğunu ancak harmonik seviyelerinin belirli bir sınırın altına indirilmesinde sınırlı kaldığını göstermektedir. Senaryo 5'te pasif ve aktif harmonik filtrelerin birlikte kullanıldığı hibrit filtrasyon yapısının sisteme dahil edilmesiyle, Senaryo 1'e kıyasla THB_I değerinde %83,38 ve THB_V değerinde %23,65 oranlarında azalma elde edilmiştir. Elde edilen bu sonuçlar, hibrit harmonik filtreleme yaklaşımının tesisteki harmonik problemlerini büyük ölçüde çözdüğünü, akım ve gerilim dalga şekillerini önemli ölçüde iyileştirdiğini ve buna bağlı olarak sistemin güç faktörünü belirgin şekilde düzelttiğini ortaya koymaktadır.

Elde edilen sonuçlar her iki tesis için de değerlendirildiğinde, THB değerlerinin azaltıldığı, dalga şekillerinin iyileştirildiği, güç faktörünün yükseltildiği, meydana gelen tesis içi kayıpların düşürüldüğü ve faturalandırmaya esas bağlantı noktasından çekilen akımların azaldığı gözlemlenmiştir. Değişimlerin oransal olarak farklılık göstermesinin sebebi tesislerin çalışma yapılarının birbirinden farklı olmasıdır.

Her iki tesiste de harmoniklerin neden olduğu olumsuz etkilerin etkilerin önemli ölçüde sınırlandığı görülmektedir. Özellikle ekipman ömrü, sistem güvenilirliği ve uzun vadeli işletme performansı açısından harmonik azaltımının her iki tesis için de kritik öneme sahip olduğu elde edilen sonuçlar ile açıkça ortaya konulmuştur.

Bu çalışma kapsamında, su arıtma tesislerinde güç kalitesini olumsuz etkileyen harmonik problemler detaylı olarak analiz edilmiş ve farklı senaryolar altında uygulanabilir çözüm yöntemleri değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, uygun filtreleme yaklaşımları ve sistem parametrelerinin doğru seçimi ile harmonik problemlerinin çözülebileceği gösterilmiştir. Benzer nitelikteki tesislerde de yük karakteristikleri ve şebeke yapısı dikkate alınarak gerçekleştirilecek kapsamlı güç kalitesi analizleri sayesinde harmonik kaynaklı problemlerin etkin bir şekilde çözülebileceği değerlendirilmektedir. Bu çalışmanın, benzer endüstriyel tesislerde yapılacak güç kalitesi iyileştirme çalışmalarına yöntemsel bir referans niteliği taşıyarak uygulayıcılara yol gösterici olması temenni edilmektedir.

KAYNAKÇA

[1] IEEE Std 519-2014, IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. New York, NY, USA: IEEE, 2014.

[2] H. Akagi, Modern Power Electronics and AC Drives. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2002.

[3] J. Arrillaga and N. R. Watson, Power System Harmonics, 2nd ed. Chichester, U.K.: Wiley, 2003.

[4] IEC 60076-1, Power Transformers – Part 1: General. Geneva, Switzerland: IEC, 2011.

[5] M. H. J. Bollen, Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. New York, NY, USA: IEEE Press, 2000.

[6] H. Akagi, "New trends in active filters for power conditioning," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 6, pp. 1312–1322, 1996.

[7] D. Chapman, Power Factor Correction: A Guide for the Plant Engineer. Erlangen, Germany: Siemens AG, 2011.

[8] A. E. Emanuel, Power Definitions and the Physical Mechanism of Power Flow. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2010.

[9] CIGRE Working Group C4, Power Quality and Harmonic Emission from Large Variable Speed Drives in Industrial Applications. Paris, France: CIGRE, 2013.

[10] Y. Zhang, X. Wang, and L. Chen, "Harmonic interaction of multiple VFD systems connected to a common bus," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 78, pp. 345–352, 2016.

[11] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, 2nd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003.

[12] H. Zengin, Ç. Kılıç, and E. Öztürk, "Harmonic analysis of motor drive systems in drinking water treatment plants," Proc. ELECO Conf., Bursa, Turkey, 2019.

[13] A. Karaaslan and H. Demir, “Harmonic distortion and thermal effects caused by blowers in wastewater treatment plants,” International Journal of Power and Energy Systems, vol. 45, no. 4, pp. 221–230, 2021.

[14] M. Yalçın and S. Şeker, “Impact of pump start-up scenarios on harmonic behavior in water treatment plants,” Gazi University Journal of Science, vol. 37, no. 2, pp. 658–670, 2022.

[15] F. Anthony, T. Wilson, and J. Martinez, “Harmonic distortion on submersible pumping units driven by ASDs,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, no. 3, pp. 2115–2126, 2016.

[16] A. Rahman, M. Kaya, and A. Özdemir, “Harmonic mitigation using passive filters in steel plants,” Journal of Power Engineering and Automation, vol. 9, no. 2, pp. 72–84, 2020.

[17] B. Li, Z. Cheng, and F. Huang, “Active harmonic filtering performance in chemical facilities,” International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 118, 2021.

[18] M. Youssef, A. Hassan, and M. El-Masry, “Shunt active power filter application in water treatment,” Energy Systems Research, vol. 33, no. 4, pp. 451–462, 2022.

[19] O. El-Arwash, T. Gafar, and R. El-Sehiemy, “Harmonic reduction in desalination plants,” Desalination and Water Treatment, vol. 247, pp. 78–90, 2023.

[20] H. Khaledian, L. Johnson, and A. Hemati, “Torque harmonics in 12 MW synchronous motors,” IEEE Access, vol. 11, pp. 55532–55544, 2023.

[21] S. Sakar and M. H. J. Bollen, “Harmonic distortion caused by variable speed drives in water pumping systems,” Electric Power Systems Research, vol. 149, pp. 189–198, 2017.

[22] J. C. Das, Power System Harmonics and Passive Filter Designs. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2015.

[23] H. Akagi, “Active harmonic filters for power conditioning,” Proceedings of the IEEE, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141, 2005.

[24] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, “A review of hybrid filters,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 5, pp. 2103–2115, 2009.

[25] J. Arrillaga, D. Bradley, and P. Bodger, Power System Harmonics – Multi-Pulse Converter Applications. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2018.

[26] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, S. Santoso, and H. W. Beaty, Electrical Power Systems Quality, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.

[27] IEC 61000-2-4:2002+A1:2009, EMC – Compatibility Levels in Industrial Plants. Geneva, Switzerland: IEC.

[28] IEC 60038:2009, IEC Standard Voltages. Geneva, Switzerland: IEC.

[29] C. Kocatepe, M. Uzunoğlu, M. Yumurtacı, and E. Karakaş, Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Güç Kalitesi. İstanbul, Türkiye: Birsen, 2003.

[30] IEEE Std 519-2022, Harmonic Control in Electric Power Systems. New York, NY, USA: IEEE, 2022.

[31] IEEE Std 519-2022, Clause 7, Voltage distortion limits.

[32] IEEE Std 519-2022, Clause 8, Current distortion limits.

[33] IEEE Std 519-2022, Tables 5.1–5.3.

[34] IEC 61000-3-2:2018+A1:2020+A2:2022, Harmonic Current Emissions ≤16 A. Geneva, Switzerland: IEC.

[35] TS EN 50160:2011+A1:2015, Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Distribution Networks. Ankara, Türkiye.

[36] TS EN 61000-4-30:2015+A1:2021, Power Quality Measurement Methods. Ankara, Türkiye.

[37] TS EN 61000-4-7:2009+A1:2015, Harmonics and Interharmonics Measurement Guide. Ankara, Türkiye.

[38] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK),

Elektrik Piyasasında Dağıtım ve Perakende Satış Kalitesine İlişkin Yönetmelik,

Resmî Gazete, Ankara, Türkiye, 2021.

[39] IEC 61000-3-6:2008, Emission Limits for Distorting Installations Connected to MV, HV and EHV Systems. Geneva, Switzerland: IEC.

[40] N. Mohan, T. M. Undeland, and W. P. Robbins, Power Electronics: Converters, Applications, and Design, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2003.

[41] J. M. Erdman et al., "PWM inverter effects on motor bearings," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 32, no. 2, pp. 250–259, 1996.

[42] J. Arrillaga, N. R. Watson, and S. Chen, Power System Quality Assessment. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2000.

[43] A. E. Emanuel, "Harmonics in electric power systems," Proceedings of the IEEE, vol. 76, no. 4, pp. 483–499, 1988.

[44] A. E. Emanuel, "Harmonics in low voltage distribution systems," IEEE Power Engineering Review, vol. 14, no. 2, pp. 8–14, 1994.

[45] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics in distributed generation," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, 2004.

[46] IEEE Std C37.110-2019, Guide for Application of Current Transformers for Protective Relaying. IEEE, 2019.

[47] IEEE Std 18-2012, Standard for Shunt Power Capacitors. IEEE, 2012.

[48] P. C. Krause, O. Wasynczuk, and S. D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.

[49] J. C. Das, "Passive filters—potentialities and limitations," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, no. 1, pp. 232–241, 2004.

[50] J. Arrillaga, D. A. Bradley, and P. S. Bodger, Power System Harmonics. Chichester, U.K.: Wiley, 2003.

[51] J. C. Das, Power System Harmonics and Passive Filter Designs. Hoboken, NJ, USA: Wiley-IEEE Press, 2015.

[52] H. Akagi, "Active harmonic filters," Proceedings of the IEEE, vol. 93, no. 12, pp. 2128–2141, 2005.

[53] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, “A review of active filters,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 46, no. 5, pp. 960–971, 1999.

[54] B. Singh, K. Al-Haddad, and A. Chandra, “A review of hybrid filters,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 56, no. 5, pp. 2103–2115, 2009.

[55] M. Kesler, Paralel Aktif Güç Filtresinin Tasarımı ve DSP ile Denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, 2005.

[56] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK). (2014). *Elektrik Şebeke Yönetmeliği*. 28 Mayıs 2014 tarihli ve 29013 sayılı Mükerrer Resmî Gazete. (Son revizyon: 29 Aralık 2025).

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

1. K. C. Çelebi and O. Arıkan, “Harmonic mitigation study for large scale pump station,” *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 15, no. 12, pp. 93–100, Dec. 2025, doi: 10.9790/9622-151293100.