



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

**GÜÇ SİSTEMLERİNDE FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN
OPTİMAL YERLEŞİMİ**

EMRE ŞIK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK VE BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DOÇ. DR. SALİH TOSUN**

DÜZCE, 2021

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GÜÇ SİSTEMLERİNDE FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN
OPTİMAL YERLEŞİMİ

Emre ŞIK tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Doç. Dr. Salih TOSUN

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Salih TOSUN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

Düzce Üniversitesi

Doç. Dr. Nihat PAMUK

Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 21/05/2021

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

21 Mayıs 2021

Emre Şık

TEŐEKKÖR

Yüksek lisans öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Doç. Dr. Salih TOSUN'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Eğitim hayatım boyunca maddi-manevi yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve tez çalışmam boyunca desteğini esirgemeyen kadim dostum Mert SAPAZ'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

21 Mayıs 2021

Emre Şık

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
KISALTMALAR.....	ix
SİMGELER	x
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİ.....	6
2.1. GENİŞ ALAN ÖLÇÜM SİSTEMİ	6
2.2. FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİ TEKNOLOJİSİ	8
2.2.1. Fazör ve Senkrofazör Kavramı.....	8
2.2.2. Fazör Ölçüm Birimi Tarihçesi	10
2.2.3. Fazör Ölçüm Birimi Standartları	13
2.2.3.1. IEEE 1344 Standardı	13
2.2.3.2. IEEE C37.118-2005 Standardı	13
2.2.3.3. IEEE C37.118.1-2011 ve IEEE C37.118.2-2011 Standardı	13
2.2.3.4. IEEE C37.242-2013 Standardı	14
2.2.3.5. IEEE C37.244-2013 Standardı	14
2.2.4. Fazör Ölçüm Birimi Yapısı ve Çalışması.....	14
2.2.4.1. Fazör Ölçüm Birimi Sistemi Hiyerarşisi	16
2.2.5. Fazör Ölçüm Biriminin Avantajları.....	17
2.2.5.1. Gerçek Zamanlı İzleme, Kontrol ve Koruma	17
2.2.5.2. Güç Sistemlerinde Durum Kestirimi	17
2.2.5.3. Sistem Modellerinin Karşılaştırılması, Doğrulanması ve İnce Ayarı	17
2.2.5.4. Bozulma Analizleri.....	18
3. FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİNİN ŞEBEKEYE YERLEŞTİRİLMESİ	19
3.1. GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÖZLENEBİLİRLİK	19
3.1.1. Sayısal Gözlenebilirlik	19
3.1.2. Topolojik Gözlenebilirlik.....	20
3.2. ŞEBEKE GÖZLENEBİLİRLİK KURALLARI.....	21
3.3. FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN OPTİMAL YERLEŞİM PROBLEMİ FORMÜLASYONU	23
3.4. FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN OPTİMAL YERLEŞTİRME METOTLARI	24
3.4.1. Deterministik Yöntemler	24
3.4.2. Sezgisel Yöntemler	24
3.4.3. Metasezgisel Yöntemler	25
4. BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI İLE FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN OPTİMAL YERLEŞİMİ.....	26

4.1. BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI.....	26
4.1.1. Fiziksel Tavlama İşlemi	26
4.1.2. Benzetilmiş Tavlama Algoritmasının İşlem Adımları	27
4.1.3. Benzetilmiş Tavlama Algoritmasına Ait Parametreler	29
4.1.3.1. Başlangıç Sıcaklığı.....	30
4.1.3.2. Soğutma Oranı	30
4.1.3.3. İterasyon Sayısı.....	30
4.1.3.4. Durdurma Kriteri.....	30
4.2. BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASININ OPTİMAL FAZÖR	
ÖLÇÜM BİRİMİ YERLEŞİMİNE UYGULANMASI	31
4.3. MODİFİYELİ BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASININ	
OPTİMAL FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİ YERLEŞİMİNE UYGULANMASI.....	34
5. BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	37
5.1. IEEE TEST SİSTEMLERİNE OPTİMAL FÖB YERLEŞİMİ	37
5.1.1. 14 Baralı Test Sistemine Optimal FÖB Yerleşimi	37
5.1.2. 30 Baralı Test Sistemine Optimal FÖB Yerleşimi	41
5.2. TRAKYA GÜÇ SİSTEMİ'NE OPTİMAL FÖB YERLEŞİMİ	44
5.2.1. Trakya Güç Sistemi'ne Ait Bilgiler	44
5.2.2. Trakya Güç Sistemi'ne Optimal FÖB Yerleşiminin Gerçekleştirilmesi. 49	
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	53
7. KAYNAKLAR.....	55
ÖZGEÇMİŞ	61

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1. SCADA sistemi.	7
Şekil 2.2. Sinüzoidal sinyalin kutupsal gösterimi.	9
Şekil 2.3. Sinüzoidal sinyal ve fazör gösterimi a) Sinüzoidal sinyal b) Fazör gösterimi.	9
Şekil 2.4. İlk FÖB prototipi a) Arkadan görünüşü b) Önden görünüşü.	11
Şekil 2.5. Ticari olarak kullanılan bir FÖB.	12
Şekil 2.6. FÖB’lerin ve standartlarının tarihsel gelişimi.	12
Şekil 2.7. FÖB’ün ana bileşenleri.	14
Şekil 2.8. Fazör ölçüm sisteminin kavramsal şeması.	15
Şekil 2.9. Fazör ölçüm sistemlerinin hiyerarşisi ve fazör veri yoğunlaştırıcılarının seviyeleri.	16
Şekil 3.1. Kural 1’in modellenmesi.	21
Şekil 3.2. Kural 2’nin modellenmesi.	22
Şekil 3.3. Kural 3’ün modellenmesi.	23
Şekil 4.1. Isıl işlem kademeleri.	27
Şekil 4.2. BTA akış diyagramı.	29
Şekil 5.1. IEEE 14 baralı sistemin tek hat şeması.	38
Şekil 5.2. IEEE 14 baralı sistemin PSAT modellemesi.	38
Şekil 5.3. IEEE 30 baralı test sisteminin tek hat şeması.	41
Şekil 5.4. IEEE 30 baralı sistemin PSAT modellemesi.	42
Şekil 5.5. Trakya Güç Sistemi iletim haritası.	45
Şekil 5.6. Trakya Güç Sistemi tek hat şeması.	46
Şekil 5.7. Trakya Güç Sistemi’nin Avrupa bağlantısının tek hat şeması.	49
Şekil 5.8. Trakya Güç Sistemi’nin PSAT’ta modellenmesi.	50

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 4.1. Tavlama işlemi ve optimizasyon problemi arasındaki ilişki.	27
Çizelge 4.2. BTA'nın işlem adımları.	28
Çizelge 4.3. BTA'nın işlem adımları.	32
Çizelge 4.4. MBTA işlem adımları.	35
Çizelge 5.1. IEEE 14 baralı test sistemi için gerekli FÖB sayıları.	39
Çizelge 5.2. IEEE 14 baralı test sistemi için FÖB'lerin yerleştirildikleri baralar.	40
Çizelge 5.3. IEEE 30 baralı test sistemi için gerekli FÖB sayıları.	43
Çizelge 5.4. IEEE 30 baralı test sistemi için FÖB'lerin yerleştirildikleri baralar.	44
Çizelge 5.5. Trakya Güç Sistemi'ne ait bara bilgileri.	47
Çizelge 5.6. Trakya Güç Sistemi için gerekli FÖB sayıları.	51
Çizelge 5.7. Trakya Güç Sistemi için FÖB'lerin yerleştirildikleri baralar.	52



KISALTMALAR

A/D	Analog/Dijital
BPSO	İkili parçacık sürü optimizasyonu
BTA	Benzetilmiş tavlama algoritması
DEA	Diferansiyel evrim algoritması
FÖB	Fazör ölçüm birimi
FVY	Fazör veri yoğunlaştırıcı
GA	Genetik algoritma
GPS	Küresel konumlandırma sistemi
IEEE	Elektrik elektronik mühendisleri enstitüsü
IRIG	Aralıklı enstrümantasyon grubu
MATLAB	Matrix laboratory
MBTA	Modifiyeli benzetilmiş tavlama algoritması
PLC	Programlanabilir mantık denetleyicisi
PSAT	Power system analysis toolbox
PSO	Parçacık sürü optimizasyonu
RTU	Uzak terminal birimi
SMBR	Simetrik bileşen mesafe rölesi
SCADA	Denetleyici kontrol ve veri toplama
TVH	Toplam vektör hatası
UTC	Evrensel koordineli zaman

SİMGELER

E	Sistem enerjisi
I	Akım
i	Algoritmadaki sıcaklıkların yineleme sayacı
k	Boltzmann sabiti
kV	Kilovolt
R	Direnç
T_L	Minimum kontrol sıcaklığı
T	Sıcaklık
T_0	Başlangıç sıcaklığı
Φ	Faz açısı
ω	Açısal hız
$\bar{z}$	Ölçüm vektörü
$\bar{e}$	Gürültü vektörü
$\bar{x}$	Sistem durum vektörü
β	Ölçeklendirme faktörü

ÖZET

GÜÇ SİSTEMLERİNDE FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN OPTİMAL YERLEŞİMİ

Emre ŞIK

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı
Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Salih TOSUN

Haziran 2021, 60 sayfa

Gelişen teknoloji ve artan nüfus ile birlikte elektrik enerjisine olan ihtiyaç ve talep her geçen gün artmaktadır. Enerji talebindeki artış güç sistemlerini kararlılık sınırlarına yakın bölgelerde çalışmaya zorlamaktadır. Bu durum güç sistemlerinde gerilim kararsızlığı ve gerilim çökmesi gibi sonuçlar doğurmaktadır. Güç sistemlerinin kararlılık durumunun gerçek zamanlı olarak takip edilmesi kritik önem taşımaktadır. Bu sebeple güç sistemlerinin izlenebilirliği ve kontrolünü sağlayan sistemlere duyulan ihtiyaç da artmıştır. Fazör Ölçüm Birimi (FÖB) bu sistemlerden birisidir. FÖB'ler Global Positioning System (GPS) yardımıyla gerilim, akım ve faz açısının anlık olarak takip edilmesine imkan sağlamaktadır. Ancak maliyet kısıtı nedeniyle FÖB'ler iletim hatlarında tüm baralara yerleştirilememektedirler. Bu yüzden FÖB'leri şebekeye maksimum gözlenebilirliği sağlayacak optimal bir şekilde yerleştirmek önem arz etmektedir. Optimal yerleşim için literatürde pek çok yöntem kullanılmaktadır. Bu çalışmada Modifiyeli Benzetilmiş Tavlama Algoritması (MBTA) kullanılmıştır. Algoritma ilk olarak Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)'nin 14 ve 30 baralı güç sistemine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürdeki farklı algoritmalarla ve Power System Analysis Toolbox (PSAT) programındaki FÖB yerleştirme algoritmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Algoritma IEEE test sistemleri üzerinde başarılı sonuçlar verdikten sonra enterkonnekte güç sisteminin bir kısmı olan Trakya Güç Sistemi'ne optimal FÖB yerleşimi yapılmıştır. MBTA ile elde edilen sonuçlar PSAT programındaki FÖB yerleştirme algoritmalarından çıkan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bu çalışma ile sistemin tamamını anlık olarak takip edebilmek için kullanılan FÖB'lerin, Trakya Güç Sistemi'nde hangi baralara yerleştirilmesi gerektiği tespit edilmiş ve optimal yerleşim gerçekleştirilmiştir.

Anahtar sözcükler: Benzetilmiş tavlama algoritması, Fazör ölçüm birimi, Güç sistemleri, Optimal yerleşim.

ABSTRACT

OPTIMAL PLACEMENT OF PHASOR MEASUREMENT UNITS POWER SYSTEMS

Emre ŞIK

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronic
and Computer Engineering

Master's Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Salih TOSUN

June 2021, 60 pages

With the developing technology and increasing population, the need and demand for electrical energy is increasing day by day. The increase in energy demand, forces power systems to operate in regions close to stability limits. This situation gives results such as voltage instability and voltage collapse in power system. It is critical to monitor the stability of power systems in real time. For this reason, the need for systems that provide traceability and control of power systems has increased. Phasor Measurement Unit (PMU) is one of these systems. The PMUs provides to instantly monitor voltage, current and phase angle with the help of Global Positioning System (GPS). However, due to cost constraints, PMUs cannot be placed in all busbars in transmission lines. Therefore, it is important to place the PMUs in the grid in an optimal way to ensure maximum observability. Many methods are used in the literature for optimal placement. In this study used Modified Simulated Annealing Algorithm. The algorithm was first applied to the 14 and 30 bar power system of Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). The obtained results were compared with different algorithms in the literature and the results obtained from the PMU placement algorithms in the Power System Analysis Toolbox (PSAT) program. After the algorithm gave successful results on IEEE test systems, optimal PMU placement was made in the Trakya Power System, which is a part of the interconnected power system. The results obtained with the Modified Simulated Annealing Algorithm were compared with the results obtained from the PMU placement algorithms in the PSAT program. With this study, the PMUs which are used to monitor the entire system momentarily, have been optimally placed in the Trakya Power System.

Keywords: Optimal placement, Phasor measurement unit, Power systems, Simulated annealing algorithm.

1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi günümüzde sanayi, ulaşım, sağlık, turizm vb. gibi her alanda ve her anda kullanılan vazgeçilmez ihtiyaçlardan birisidir. Tüketicie kesintisiz bir şekilde elektrik enerjisi aktarmak için yeni şebekeler devreye alınmakta ve alternatif enerji kaynakları aranmaktadır. Mevcut şebekeler de ihtiyacı karşılayabilmek için kararlılık sınırlarına yakın bölgelerde çalışmaktadırlar. Bu sebeple güç sistemlerinin anlık olarak takip edilmesi gerekmektedir.

Elektrik enerjisinin kesintisiz, ekonomik ve kaliteli bir şekilde tüketiciye ulaşması için şebekelerin anlık olarak takip edilmesinin önemi artmıştır. Geniş alan ölçümleri uzun yıllardır güç sistemi operasyonlarının ayrılmaz bir parçası olmuştur. Uzak bağlantı hatları ve generatör çıkış güçleri üzerindeki güç akışlarını gerçek zamanlı sağlayarak kontrol sistemlerinde kullanılmışlardır. Elektrik kontrol merkezleri güç sistemlerini izlemek için durum kestirimini kullanılır. Durum kestirimi farklı trafo merkezlerinden alınan gerilim ve akım gibi büyüklükleri kullanarak yinemeli doğrusal olmayan bir tahmin prosedürü aracılığıyla güç sisteminin durumunu hesaplar [1], [2].

Günümüzde trafo merkezlerinden alınan ölçümler, Uzak Terminal Birimleri'nden (RTU) gerçek zamanlı ölçümleri toplayan Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama (SCADA) sistemi aracılığıyla elde edilmektedir. Ancak SCADA sisteminin ölçüm hızı ve örnekleme sayısının yetersizliği ve gerçek zamanlı olarak ölçüm yapamaması yeni sistemlerin araştırılmasına neden olmuştur. 1980'li yıllarda GPS'in aktif olarak kullanılmaya başlanmasının ardından GPS'in ölçüm hassasiyetleri kullanılarak FÖB teknolojisi geliştirilmeye başlanmıştır [3].

Bilgi teknolojisinin ve iletişim ağlarının ortaya çıkması geleneksel güç sistemlerinin akıllı şebekeye doğru bir paradigma kayması yaşamasına neden olmaktadır [4]. Akıllı şebekeler elektrik enerjisi üreticilerinin ve tüketicilerinin ihtiyaçlarına tam olarak cevap vermektedir. Akıllı şebekelerin bileşenlerinden birisi olan FÖB'ler ile şebekelerin anlık olarak takip edilmesi, verimli noktalarda çalıştırılması ve kesintisiz bir şekilde işletilmesi sağlanmaktadır. FÖB'ler kesintisiz, ekonomik, güvenilir ve kaliteli enerji için güç sistemleri için önem arz etmektedir.

Güç sistemlerinin anlık olarak takibini sağlayan FÖB'lerin şebekeyi tam olarak gözlenebilir hale getirmesi için tüm baralara yerleştirilmesi gözlenebilirlik açısından kesin çözüm sağlasa da maliyet kısıtı açısından bakıldığında bu durum mümkün olmamaktadır. Bu yüzden FÖB'lerin şebekede uygun baralara yerleştirilerek minimum sayıda FÖB kullanılarak maksimum gözlenebilirlik sağlamak amaç edinilmektedir. Bu durum bir optimizasyon problemi ortaya çıkarmaktadır [5], [6].

Literatürde FÖB'lerin optimal yerleşimi ve şebeke gözlenebilirliği hakkında çok sayıda çalışma mevcuttur. Aşağıda son yıllarda FÖB'lerin optimal yerleşimiyle ilgili çalışmalar hakkında bilgiler verilmiştir.

Jamuna ve Swarup arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada güç sistemi şebekesinin tamamını gözlenebilir hale getirmek için çok amaçlı biyocoğrafya tabanlı bir optimizasyon algoritması önermektedir. Pareto optimal çözümü, baskın olmayan sıralama ve kalabalıklaşma mesafesi kullanılarak elde edilmiştir. Simülasyon sonuçları Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-II ve Baskın Olmayan Sıralama Farklılığı Evrimi ile karşılaştırılmıştır. Geliştirilen FÖB yerleştirme metodu IEEE test sistemlerinde uygulanmıştır [7].

Rahman ve arkadaşları 2015 yılında sistemin tam gözlenebilirliğini sağlamak ve sistemdeki tüm baralarda maksimum ölçümleri elde etmek amacı ile IEEE 30 baralı test sistemine İkili Parçacık Sürü Optimizasyonu (BPSO) ile FÖB yerleşimi gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışma ile daha hızlı yakınsayan ve aynı zamanda mevcut BPSO yöntemine kıyasla ölçüm fazlalığını en üst düzeye çıkarmayı başaran BPSO yöntemini geliştirmişlerdir. Yöntemlerini MATLAB (Matrix Laboratory) yazılımı kullanarak doğrulamışlardır. [8].

Peng ve arkadaşları 2010 yılında yayınladıkları çalışmada FÖB'lerden birinin arızalanma durumunda tüm baraların gözlenebilirlik durumunu IEEE test sistemlerinde incelemişlerdir. Çalışmada pareto baskın olmayan sıralama işlemi ve farklı evrim algoritmasının organik bir entegrasyonu olan yeni bir Baskın Olmayan Sıralama Farklılığı Evrimi algoritması tasarlamışlardır. Elde ettikleri sonuçları Baskın Olmayan Sıralama Genetik Algoritması-II ile karşılaştırmışlar ve kendi sundukları algoritmanın daha doğru ve eksiksiz pareto optimal çözümler ortaya koyduğunu göstermişlerdir [9].

Mahari ve Seyedi tarafından 2015 yılında gerçekleştirilen çalışmada optimal FÖB yerleşimi için İkili Emperyalist Rekabet Algoritması kullanmışlardır. Yayımlanan

çalışmanın amacı farklı çalışma koşullarında minimum sayıda FÖB kullanarak gözlenebilirlik sağlamaktır. Çalışmada tek hat kesinti durumu ve tek FÖB arıza durumu gibi senaryolar çıkarılarak optimal FÖB yerleştirme işlemi de gerçekleştirilmiştir. Tüm inceleme durumları için sıfır enjeksiyon baraların en iyi cevabı aldığı kabulüne dayanmışlardır. Elde ettikleri verileri diğer optimizasyon yöntemlerine kıyaslamışlar ve en iyi çözümü ürettiklerini ortaya koymuşlardır [10].

Koutsoukis ve arkadaşları 2012 yılında yaptıkları çalışmada optimal FÖB yerleşimi için Özyinelemeli Tabu Arama yöntemini önermişlerdir. Topolojik gözlenebilirlik yöntemlerine dayanan mevcut metasezgisel optimal FÖB yerleştirme algoritmalarının aksine şebeke gözlenebilirliğini kontrol etmek için sayısal bir yöntem önermişlerdir. Önerdikleri Özyinelemeli Tabu Arama metodunu IEEE test sistemleri ve 2383 baralı Polonya Güç Sistemi'ne uygulamışlardır. Elde edilen sonuçları literatürdeki diğer yöntemlerle karşılaştırıp minimum sayıda FÖB kullanarak optimal yerleşim gerçekleştirdiklerini göstermişlerdir [11].

Gou 2008 yılında yaptığı çalışmada bir tam sayı doğrusal programlama formülasyonu sunmuştur. Başka bir makalede önerilmiş çalışmayı farklı ihtiyaçlar için genişletmiş ve genelleştirmiştir. Çalışmasında sıfır enjeksiyon ölçümleri olan ve olmayan durumlar dikkate alınmıştır. Farklı güç sistemlerindeki simülasyon sonuçları önerilen algoritmanın pratikte de kullanılabileceğini göstermiştir [12].

Hurtgen ve Maun 2010 yılında yayınladıkları çalışmada Yinelenen Yerel Arama metodunu kullanmışlardır. Önerdikleri algoritmayı IEEE 14, 57 ve 118 baralı test sistemlerinde deneyip geçmiş literatür çalışmalarıyla karşılaştırmışlardır [13].

Mazlumi ve Vahadi 2010 yılındaki çalışmalarında Bakteriyel Besin Arama Algoritması ile optimal FÖB yerleştirme işlemi gerçekleştirmişlerdir. Algoritmayı IEEE 14 baralı test sistemine ve 41 baralı Tahran Güç Sistemi'ne uygulamışlardır. Elde edilen sonuçlarla kullandıkları algoritmanın literatürdeki optimizasyon teknikleri ile rekabet edebileceğini göstermişlerdir [14].

Tran ve Zang 2018 yılında yaptıkları çalışmada Açgözlü Algoritma'ya dayalı yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Önerilen yaklaşımın temel amacı, gerçek bir güç sistemine uygulandığında makul bir sürede çözüme gitmesidir. Optimal FÖB yerleştirme problemi hem normal çalıştırma koşulları için hem de acil durum koşulları altında çözülür. Ayrıca FÖB kanal sınırlaması, sıfır enjeksiyon baraları ve geleneksel ölçümlerin varlığı gibi bazı

gerçekçi durumların aynı anda çözüldüğü düşünülmektedir. Önerilen yaklaşımı IEEE test sistemleri ve 2383 baralı Polonya Güç Sistemi'ne uygulamışlardır. Çalışmanın sonuçları önerilen yöntemin gerçek bir güç ağı içi kullanılabilir olduğunu göstermiştir [15].

Al-Odienat ve arkadaşları 2020 yılında FÖB yerleşimi için yeni bir algoritma tekniği önermişlerdir. Bağlantı Matrisi Algoritması isimli teknik ile MATLAB programı üzerinde IEEE test sistemlerine optimal yerleşim gerçekleştirirerek sonuçlarını literatür çalışmalarıyla karşılaştırmışlardır. Kendi çalışmalarının literatürdeki çalışmalardan daha hızlı sonuçlar sağladığını karşılaştırma tablolarıyla belirtmişlerdir [16].

İbrahim ve arkadaşları 2020 yılında FÖB yerleşimindeki olasılıkları azaltarak işlemleri hızlandırma ve hesaplama yükünü azaltmak için sınırlı kapsamlı arama tekniği geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri teknikleri IEEE test sistemlerinde test etmişlerdir. Elde ettikleri sonuçlarla önerdikleri tekniği doğrulamışlardır [17].

Subbaiyan ve arkadaşları 2021 yılında yayınladıkları makalede Parçacık Sürü Optimizasyonu'na (PSO) dayalı bir teknik kullanmışlardır. Kullandıkları teknik ile normal sistem ve sıfır enjeksiyon barasının göz önünde bulundurulduğu sistemler için optimal yerleşim gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarını IEEE'nin 9, 14 ve 24 baralı test sistemlerinde gerçekleştirmişlerdir. Elde ettikleri simülasyon sonuçları ile PSO tabanlı tekniğin gözlemlenebilirlik açısından daha etkili olduğu sonucunu paylaşmışlardır [18].

Abdulkareem ve arkadaşları 2021 yılında Genetik Algoritma (GA) tabanlı bir teknik kullanarak 52 baradan oluşan Nijerya 330 kV Güç Sistemi'ne optimal yerleşim gerçekleştirmişlerdir [19].

Farklı optimizasyon teknikleri üzerine yapılan çalışmalar haricinde FÖB'lerle alakalı bir çok literatür taraması çalışmalar bulunmaktadır. Herris ve Ivatloo 2015 yılında, Manousakis ve arkadaşları 2012 yılında, Sefid ve Rihan 2019 yılında ve Yuill ve arkadaşları 2011 yılında FÖB'lerin optimal yerleşimi üzerine kapsamlı literatür tarama çalışmaları hazırlamışlardır [20]-[23].

Bu çalışmada FÖB'lerin şebekeye optimal yerleştirilmesi konusuna odaklanılmıştır. Gerçekleştirilen tez çalışmasının amacı FÖB'leri tanıtmak ve benzetim çalışmaları ile FÖB'lerin gerçek bir güç sistemine optimal yerleşimini sağlamaktır. Güç sistemi olarak Türkiye Enterkonnekte Güç Sistemi'nin bir parçası olan Trakya Güç Sistemi seçilmiştir. Trakya Güç Sistemi'ne optimal FÖB yerleşimini gerçekleştirmek için MBTA seçilmiştir. Algoritma öncelikle IEEE 14 ve 30 baralı test sistemlerinde denenmiş elde edilen

sonuçlar literatürdeki diğ r algoritmalarla ve PSAT programında bulunan F B yerleştirme algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. Algoritma IEEE test sistemi üzerinde başarılı sonuçlar verdikten sonra Trakya Güç Sistemi'ne uygulanmış ve elde edilen sonuçlar yine PSAT F B yerleştirme algoritmalarıyla karşılaştırılmıştır.



2. FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİ

FÖB'ler GPS ile senkronize bir şekilde hem voltaj hem de akım fazörlerinin ölçümünü oldukça hassas ve hızlı bir şekilde sağlayan ölçüm cihazlarıdır. Uzak konumlardan elde ettikleri ölçümleri senkronize ederek güç sisteminin gerçek zamanlı resmini ortaya koymaktadırlar. Bu senkronizasyon kabiliyeti sayesinde güç sistemi izleme ve kontrolünde önemli teknolojilerden birisidir [24], [25].

Bölüm 2'de FÖB teknolojisinin ortaya çıkışından, gelişiminden ve mevcut sistemlere katkılarından bahsedilmiştir. FÖB sistemini daha iyi anlamak için, yerini almaya başladığı SCADA sistemi, geniş alan ölçüm sistemi ve FÖB'ün temelini oluşturan fazör ve senkrofazör kavramları anlatılmıştır.

2.1. GENİŞ ALAN ÖLÇÜM SİSTEMİ

Arz ve talep arasındaki denge, elektrik şebekesinin temel gereksinimidir. Artan talebi karşılamak için elektrik şebekeleri kararlılık sınırlarına yakın bölgelerde çalışmaktadırlar. Güç sistemlerinin kararlılık sınırlarına yakın bölgelerde çalıştırılması güç sistemleri için arıza olasılıkları doğurmaktadır. Yeni elektrik enerjisi üretim tesislerinin kurulumu uzun zamanlar gerektireceğinden mümkün olduğunca yüksek düzeyde güvenilirliğin tesis edilmesi gerekmektedir. Bunu sağlamak için yeni kontrol ve koruma sistemleri geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu da geniş alan izleme, koruma ve kontrol sistemlerini gerektirmektedir [26].

Geniş alan ölçüm sistemleri uzun yıllardır enerji yönetim sistemlerinde önemli yere sahiptir. Bu sistem, hatlardaki yük akışının ve jeneratör çıkışlarının gerçek zamanlı ölçümlerini kullanan güç sistemi kontrol merkezlerinde kullanılmaktadır. Geleneksel durum tahmin edicileri, sistemdeki bara gerilimi fazörlerini tahmin etmek için bara gerilimleri, gerçek güç ve reaktif güç akışlarından oluşan bir dizi ölçüm değeri kullanır. Bu ölçümler SCADA sistemi tarafından sağlanmaktadır. SCADA'nın temel işlevi bilgiyi görüntülemek, almak, işlemek ve verileri belgelemektir. Şekil 2.1'de SCADA sistemi gösterilmiştir.

SCADA sistemi aşağıdaki bileşenlerden oluşmaktadır;

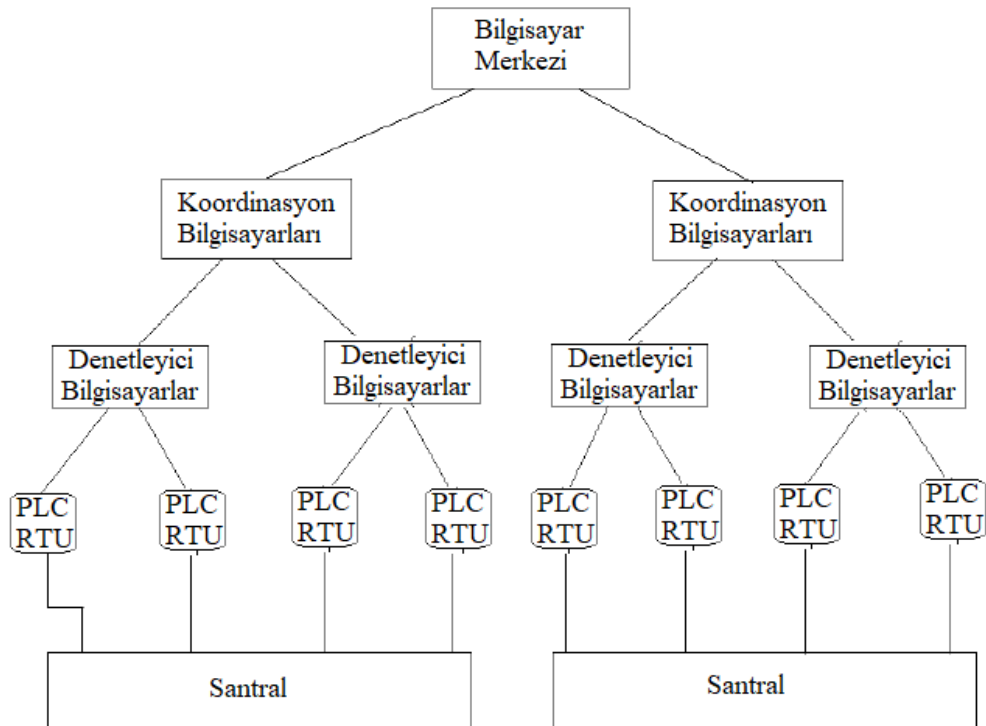
- a. Denetleyici Bilgisayarlar
- b. Uzak Terminal Birimleri (RTU)
- c. Programlanabilir Mantık Denetleyiciler (PLC)
- d. İletişim Altyapısı
- e. İnsan-Makine Arayüzü

Denetleyici bilgisayarlar, tüm gerçek zamanlı izlemenin yapıldığı ve çeşitli arıza durumlarında sürekli kontrol ve denetim yapan kontrol sisteminin ana parçasıdır.

RTU, gömülü sistem kontrol özelliklerine sahip giriş-çıkış sistemidir. Ana kontrol merkezine sinyal alıp veren küçük kontrol birimleridir.

PLC, işlemlerin çalışmasını kontrol eden çok girişli ve çok çıkışlı bir cihazdır. PLC kontrol yetenekleri RTU'dan daha karmaşıktır. PLC'ler daha ekonomik ve yapılandırılabilir oldukları için RTU'lardan daha çok kullanılırlar.

İletişim altyapısı RTU ve PLC'leri denetleyici bilgisayara bağırlar. İletişim ağıları süreci izlemek ve aynı zamanda kontrol etmek için çok önemlidir.



şekil 2.1. SCADA sistemi.

Şebekedeki bir yük veya topoloji değişikliği gibi dinamik olaylar esnasında, SCADA sistemi tarafından sağlanan ölçümlerde zaman kayması hataları meydana gelebilmektedir. Bu zaman kayması hatalarının sebebi toplanan ölçümlerin anlık görüntüsünün SCADA sisteminde birkaç saniye içerisinde toplanmasıdır. Zaman kaymalarını en aza indirmek ve güç sistemlerinin gerçek zamanlı takibi kavramını geliştirmek için gelişen teknoloji ile birlikte yeni sistem arayışı ihtiyacı doğmuştur [3], [27]-[29].

2.2. FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİ TEKNOLOJİSİ

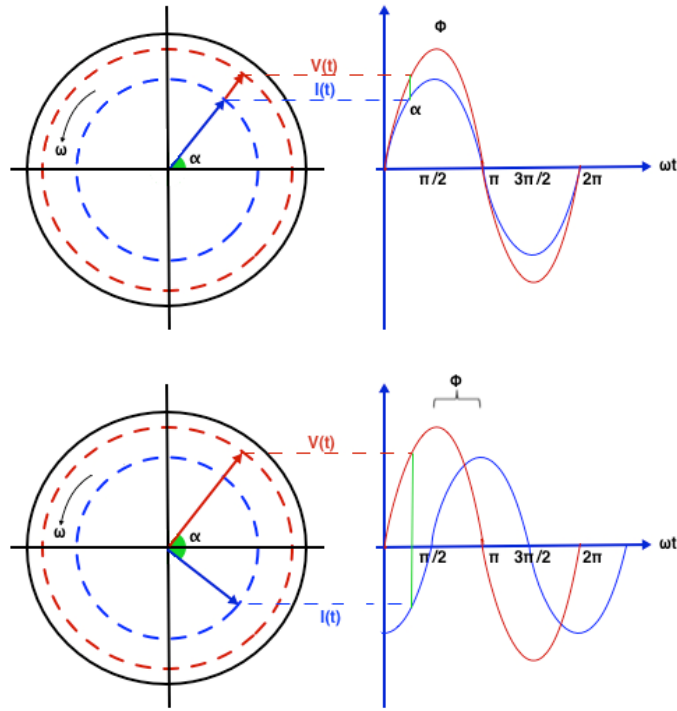
FÖB, GPS ile senkronize edilmiş bir şekilde bağlandıkları baranın voltaj ve akım fazörlerinin senkronize ölçümlerini sağlamak ve geniş alan izleme sistemlerine uygulanmaları için 1980'lerde Virjinya Teknoloji tarafından tanıtılmıştır. FÖB'lerin ortaya çıkışı ölçümleri birkaç milisaniyede almayı mümkün kılmıştır. FÖB ölçümlerine dayalı bir durum tahmini, sistemin durumlarını saniyeden kısa bir sürede güncelleyebilmektedir. FÖB ölçümleri geleneksel SCADA ölçümlerinden daha doğru sonuç sağlamaktadır. FÖB'lerin ölçüm raporlama hızı 50 Hz sistemler için saniyede 50, 60 Hz sistemler için ise saniyede 60 defadır. Bu da SCADA ölçümlerinin raporlama hızından çok daha yüksektir [1], [30], [31].

Bu teknolojinin gelişimi güç sistemlerinin izlenebilirliğini önemli ölçüde artırmaktadır. Sistemin kararlı bir şekilde çalışmaya devam etmesine katkıda bulunurlar. Şebekenin kapasitesini fiziksel olarak artıramasalar da sağladıkları anlık verilerle şebekenin tam kapasiteye yakın bir şekilde çalışmasını sağlarlar.

2.2.1. Fazör ve Senkrofazör Kavramı

IEEE standartlarında fazör, karmaşık katsayının sinüs dalgası genliği ve karmaşık açının (kutupsal formda) sinüs dalgası faz açısı olduğu, basit bir sinüs dalga miktarının karmaşık bir eşdeğeri olarak tanımlanmaktadır [32].

Fazör, sinüzoidal bir sinyali temsil etmek için kullanılan, büyüklük ve bir referansa göre faza sahip olan bir niceliktir. Burada referans zaman içerisinde sabit bir noktadır. Fazör büyüklüğü ise sinüzoidal sinyalin genliği ile ilgilidir. İki sinüzoidal sinyalin tepe noktası arasındaki mesafe faz açısı (Φ) olarak tanımlanır. Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te sinüzoidal sinyalin genliği, faz açısı ve vektörel gösterimi verilmiştir [33], [34].



Şekil 2.2. Sinüzoidal sinyalin kutupsal gösterimi.

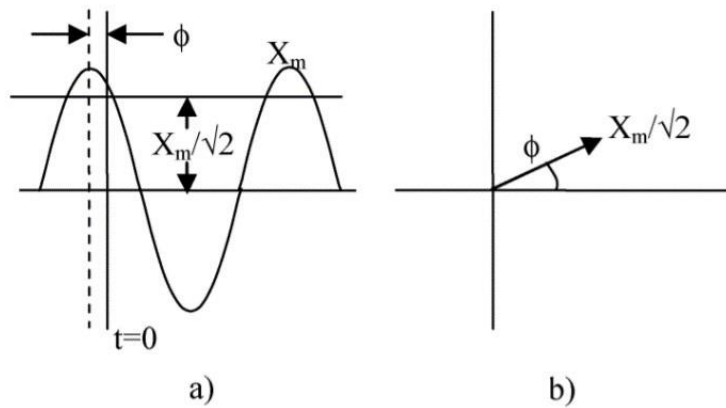
Bir sinüzoidal sinyal denklem olarak yazılırsa;

$$x(t) = X_m \cos(\omega t + \phi) \quad (2.1)$$

Bu sinüzoidal sinyalin fazör temsili;

$$X \equiv \frac{X_m}{\sqrt{2}} \varepsilon^{j\phi} = \frac{X_m}{\sqrt{2}} (\cos\phi + j\sin\phi) \quad (2.2)$$

olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Sinüzoidal sinyal ve fazör gösterimi a) Sinüzoidal sinyal b) Fazör gösterimi.

IEEE standartlarında senkronize fazör ya da senkrofazör, örnekleme işlemi için referans olarak standart bir zaman sinyali kullanılarak veri örneklerinden hesaplanan bir fazör şeklinde tanımlanmaktadır [32].

Bahsedilen referans zaman sinyali yerel ya da global olabilir. Bu referans, GPS gibi dünyanın tamamına hitap eden yüksek hassasiyetli zamanlayıcı tarafından koordine edilmiş, Evrensel Koordineli Zamanı (UTC) ile senkronize olan ortak bir zamanlama sinyali tarafından sağlanır. GPS aynı anda en az 4 uydu görölme şartıyla coğrafi konum ve saat bilgisi sağlayan Amerika Birleşik Devletleri'ne ait küresel uydu navigasyon sistemlerinden birisidir. Her uydu yüksek hassasiyet ile senkronize edebileceği navigasyon sinyali yayar. Bu yüksek hassasiyeti ve kullanım kolaylığı nedeniyle senkrofazör ölçümlerinde kullanılmaktadır.

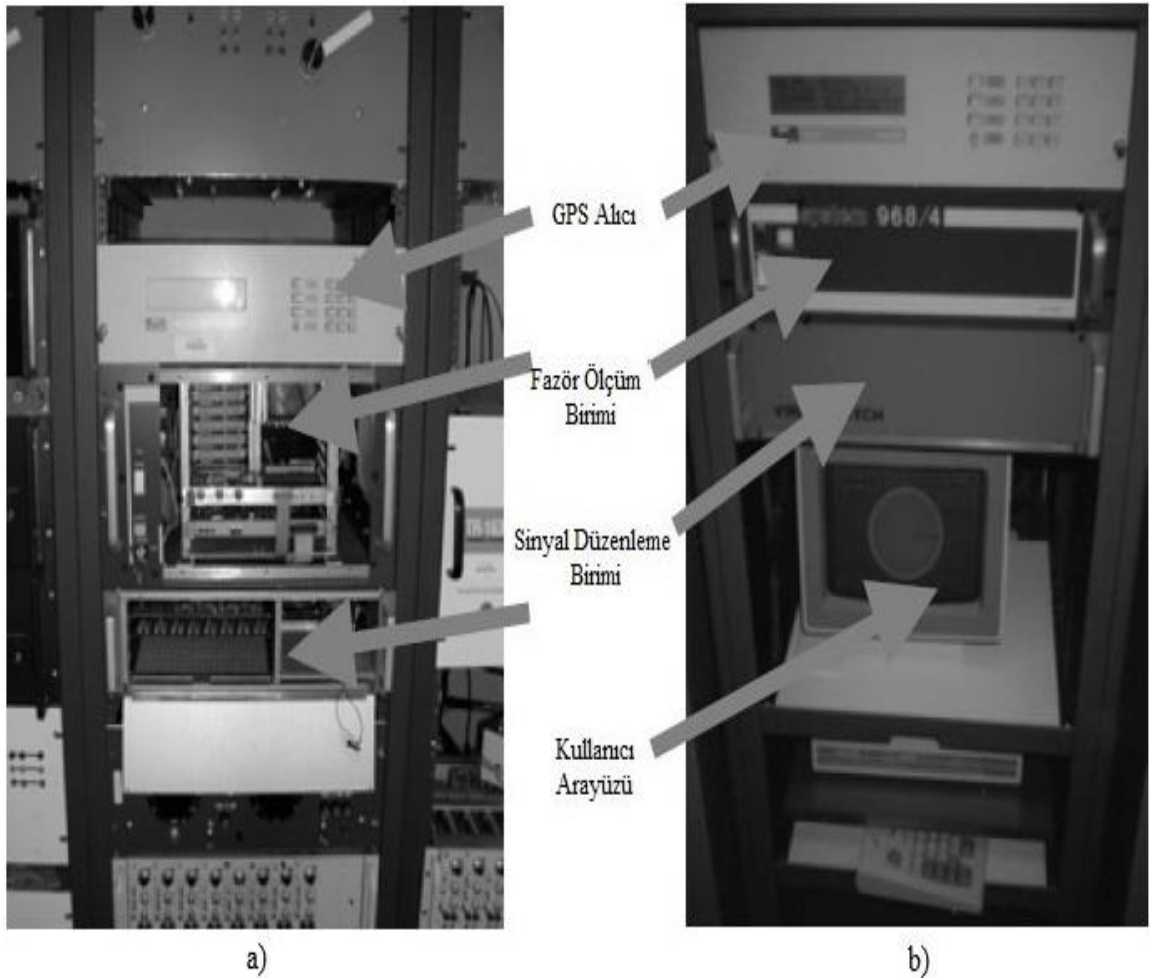
IEEE standartları senkronizasyon kaynağının UTC ile 1 μ s hassasiyet ile senkronize olması gerektiğini belirtir. Senkronizasyon sinyalinin, birbirine bağlı şebeke boyunca tüm ölçüm konumlarında kesintisiz olarak mevcut olması gerekmektedir. Güvenilirlik %99,87'yi aşmalıdır. Bu GPS ile sağlanmaktadır. 1 μ s'lik hassasiyet, 60 Hz'lik sistemler için 0.022, 50 Hz'lik sistemler için 0.018 derecelik açısal hassasiyet anlamına gelmektedir [32]-[35].

2.2.2. Fazör Ölçüm Birimi Tarihçesi

FÖB teknolojisinin geliştirilme süreci uzun yıllara dayanmaktadır. 1960'larda mevcut bilgisayarlar ne yeterince hızlı ne de maliyet açısından uygundu. 1970 ve 1980'lerde bilgisayar alanı ve algoritma geliştirmede büyük atılımlar gerçekleştirilmiştir. Güç sistemlerini alakadar eden bu atılımlardan birisi, yüksek gerilim iletim hatlarını korumak için geliştirilen Simetrik Bileşen Mesafe Rölesi (SBMR) olmuştur. Bu röle, gerilim ve akımların simetrik bileşenlerin gerçek zamanlı ölçümünü yapan mikroişlemci tabanlı bir sistemdir. Bu sistemin avantajı, sistemde meydana gelebilecek tüm arızalar için yalnızca bir algoritma çalıştırması gerektirmesiydi. O günlerdeki bilgisayar teknolojisi göz önüne alındığında bu büyük bir avantajdı. Bu geliştirmenin sonuçlarından biri, gerilim ve akım simetrik bileşenlerini hesaplamak için özyinelemeli algoritma olan Simetrik Bileşen Ayırık Fourier Dönüşümü'nün ortaya çıkmasıdır. Bu sistem FÖB'lerin geliştirilmesindeki temel kilometre taşlarından birisidir [29], [36], [37].

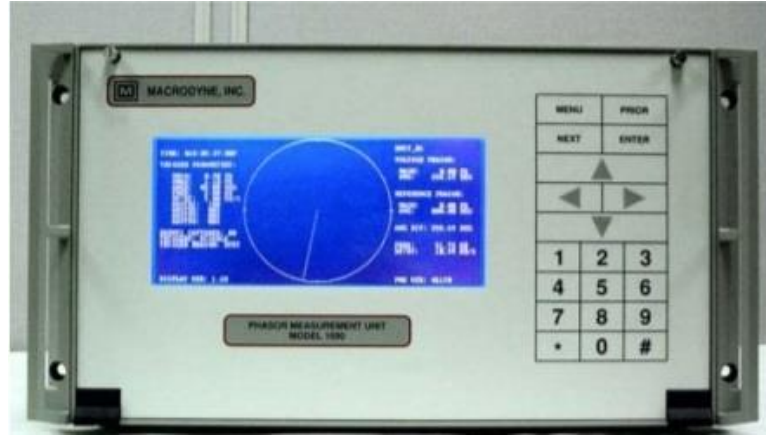
1980'lerin başlarında gelişen GPS teknolojisi ile beraber, geniş alan elektrik şebekesinden gelen voltaj ve akım ölçümlerinin sırasının zaman damgalı ve senkronize ölçümler olmasına izin vererek FÖB teknolojisinin temel gelişimindeki bir sonraki adıma yol açmıştır.

1988'de Virjinya Teknoloji SBMR algoritmasından başlayarak Şekil 2.4'te gösterilen ilk prototip FÖB'ü geliştirdi. 1992'de Macrodyne Teknoloji, dahili GPS alıcısı, analog girişler için 16 bit Analog/Dijital (A/D) dönüştürücü ve FÖB'e uzaktan erişim için çeşitli modem arabirimleri dahil olmak üzere çeşitli geliştirmeler sağlayarak ticari olarak kullanıma sunmuştur. Ayrıca, birçok FÖB'den veri toplayan, zaman damgalarını eşleştirerek verileri harmanlayan ve gerektiğinde uygulama yazılımı için fazör çıktıları sağlayan bir veri yoğunlaştırıcı da geliştirilmiştir. Ticari olarak kullanıma sunulan FÖB'ler dünya çapında birçok ülkenin kamu hizmeti kuruluşlarınca kullanılmıştır [29], [36].



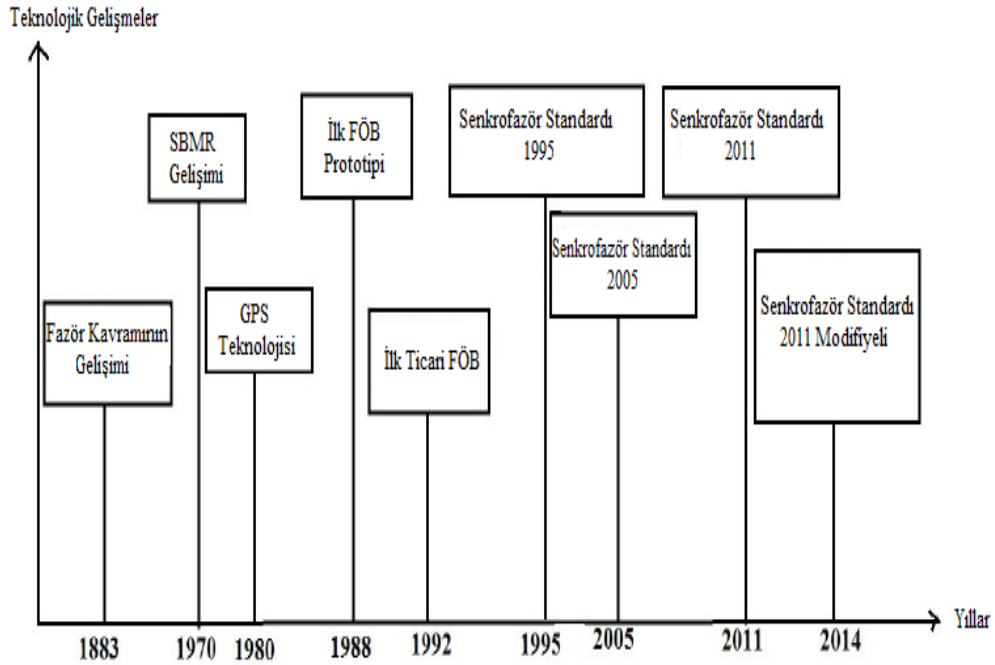
Şekil 2.4. İlk FÖB prototipi a) Arkadan görünüşü b) Önden görünüşü.

Şekil 2.5’de günümüzde kullanılan ticari bir FÖB gösterilmiştir [38].



Şekil 2.5. Ticari olarak kullanılan bir FÖB.

Farklı üreticiler tarafından yapılan FÖB’lerin ortak çalıştırılmasını ve aynı performansı göstermelerini sağlayabilmek için IEEE senkrofazörler için çeşitli standartlar ve revizyonlarını yayınlamıştır. Şekil 2.6’da FÖB ve standartlarının tarihsel gelişimi gösterilmiştir [29].



Şekil 2.6. FÖB’lerin ve standartlarının tarihsel gelişimi.

2.2.3. Fazör Ölçüm Birimi Standartları

2.2.3.1. IEEE 1344 Standardı

FÖB'lerin geliştirilmesiyle beraber IEEE senkrofazörler üzerine standartları belirlemeye başlamıştır. Güç sistemlerinde senkronize fazör kavramı 1980'lerde tanıtıldı ve ilk senkrofazör standardı olan IEEE 1344 1995 yılında tanıtıldı. Bu standart enerji endüstrisine senkrofazörleri tanıtmak, ölçüm için temel kavramları ve veri işleme yöntemlerini belirlemek için oluşturulmuştur. Standart, örneklenmiş verilerden fazörleri hesaplamayla ilgili süreçleri de tartışır. IEEE 1344, hassas zamanlama kaynaklarını kullanarak senkronize ölçümler sunmuş, endüstri tarafından benimsenmiş Inter-Range Enstrümantasyon Grubu – B (IRIG) standardını referans almış ve IRIG-B formatının FÖB ile kullanımına değinmiştir [32], [43]-[45].

2.2.3.2. IEEE C37.118-2005 Standardı

2005 yılında tamamlanan C37.118 senkrofazör standardı IEEE 1344 standardının geliştirilmiş halidir. Standart bir FÖB ölçümünü ve kararlı durum ölçümü gereksinimlerini değerlendirmek için bir yöntem ekledi. Toplam vektör hatası (TVH) FÖB fazör tahminin hem büyüklüğünü hem de fazını aynı zaman için teorik fazör eşdeğer sinyali ile karşılaştırır. TVH, FÖB ölçümünü değerlendirmek için doğru bir yöntem sağlar. Bu standart, veri alışverişini daha eksiksiz bir şekilde geliştirerek verileri FÖB'den fazör veri yoğunlaştırıcısına (FVY) ve ayrıca FVY'leri diğer cihazlara şeffaf bir şekilde aktarabilen bir mesajlaşma sistemine dönüştürdü [35].

2.2.3.3. IEEE C37.118.1-2011 ve IEEE C37.118.2-2011 Standardı

Zaman ve test deneyimi kısıtları nedeniyle, C37.11-2005 standardında dinamik ölçümler ele alınamamıştır. Ek olarak, frekans ölçümleri her zaman veri raporlamasının bir parçası olmuştur ancak mevcut standartlarda buna ilişkin bir açıklama bulunmamaktadır. Bu sorunlar ve IEC61850 ile iletişim uyumluluğunu ele almak üzere yeni standart çıkarma gereksinimi doğmuştur. Standart üzerine çalışan çalışma grubu standardı 2'ye bölerek çıkarmaya karar vermiştir. Standartlardan biri ölçüm tanımlarına ve gereksinimlerine, diğeri ise mevcut veri iletişimlerine değinmektedir.

C37.11.1-2011 standardında, fazör ve senkronize fazör tanımları için ek açıklamalar sağlanmıştır. TVH ve uyumluluk testleri kavramları korunmuş ve genişletilmiştir. Ayrıca dinamik performans testleri tanıtılmıştır. Aynı zamanda frekans ölçümü ve frekans değişim oranı ölçümünün sınırları ve özellikleri geliştirilmiştir.

C37.11.2-2011 standartında veri iletişim gereksinimleri açıklanır. Bu standart, FÖB'ler, FVY'ler ve diğer uygulamalar arasında gerçek zamanlı bir iletişi için uygun bir iletişim protokolü ile mesaj türü, içeriği, veri türü ve biçimleri açıklanmıştır. 2014 yılında bazı eksiklikleri gidermek için IEEE C37.118.1a-2014 adı altında mevcut standarda bir revizyon yapılmıştır [45]-[49].

2.2.3.4. IEEE C37.242-2013 Standardı

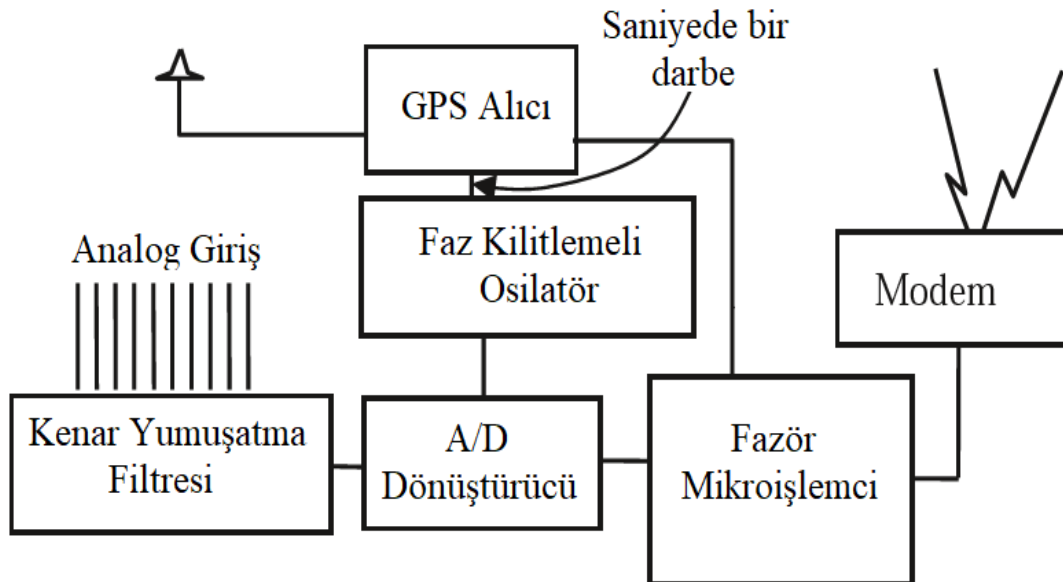
Bu standart, senkrofazör teknolojisinin kullanımının artışına hitaben, FÖB'lerin kurulumu, testi ve saha tecrübelerinin aktarılması amacı ile hazırlanmıştır. Standart, IEEE Güç ve Enerji Topluluğu tarafından oluşturulmuştur. FÖB kurulumunun yanı sıra FVY'ler ve saha cihazları ile senkronizasyonuna değinmektedir [49].

2.2.3.5. IEEE C37.244-2013 Standardı

Bu standart, güç sistemi koruma, kontrol ve izleme uygulamaları için FVY'ler için performans, işlevsellik ve iletişim ihtiyaçlarını açıklar. Senkrofazör sistem ihtiyaçları ve FVY'ler için test prosedürlerinden bahseder. Özellikle senkronizasyon, senkrofazör veri işleme ve gerçek zamanlı erişim için gereksinimleri anlatmaktadır [50].

2.2.4. Fazör Ölçüm Birimi Yapısı ve Çalışması

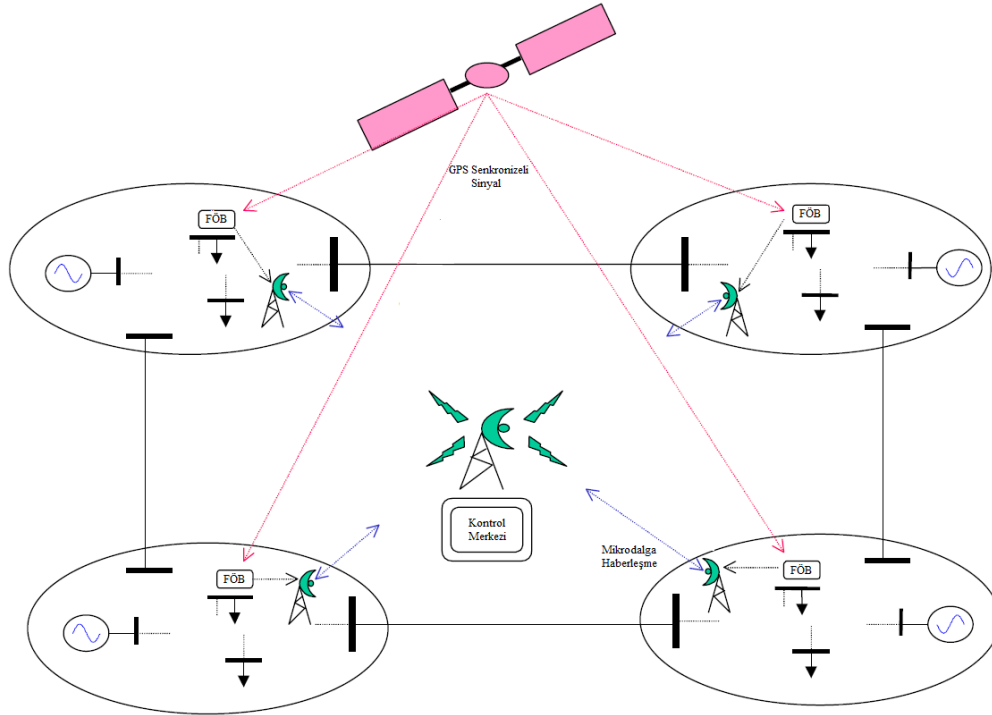
Farklı üretici firmalar tarafından üretilen FÖB'ler birçok açıdan birbirinden farklıdır. Bu sebeple ana bileşenlerin temeli ile bir FÖB ele alınabilir.



Şekil 2.7. FÖB'ün ana bileşenleri.

Şekil 2.7’de bir FÖB’ün blok şeması görülmektedir. İlk olarak giriş sinyalleri analog biçimde alınır. Analog girişler, akım ve gerilim trafolarının sekonder sargılarından elde edilen akım ve gerilimlerdir. Pozitif sıralı ölçümlerin gerçekleştirilebilmesi için tüm üç fazlı akımlar ve gerilimler kullanılır. Bir rölenin aksine bir FÖB, trafo merkezindeki çeşitli fiderlerde akımlara ve trafo merkezindeki çeşitli baralara ait gerilimlere sahip olabilir. Akım ve gerilim sinyalleri, uygun şöntler ya da ölçü transformatörleri ile gerilimlere dönüştürür. Bu işlem ile A/D dönüştürücülerin gereksinimleri ile eşleşirler. Daha sonra Nyquist örnekleme oranını aşan yüksek frekanslı bileşenleri kaldırmak için kenar yumuşatma filtreleri kullanılır. Böylece Nyquist örnekleme oranını aşan frekans bileşenleri bastırılacaktır. Faz kilitli osilatör, saniyede 1 GPS darbesi örneklemesine göre gereken saniye başına darbe sayısına bölmekle sorumludur. Daha sonra A/D dönüştürücü kullanarak, analog sinyal fazör mikroişlemciye beslenmeden önce faz kilitli osilatörden gelen örnekleme zamanı sinyalleri tarafından tanımlanan örnekleme anlarında dijitale dönüşecektir. Fazör mikroişlemci daha sonra sinyallerin yeniden örneklenmesi ve sayısallaştırılmış örnek verilerden pozitif dizinin hesaplanmasından sorumludur. Son olarak FÖB’ün ana çıktısı, uygun modemler aracılığıyla iletişim kanalına yüklenmeden önce zaman damgası alınır [39]-[43].

Şekil 2.8’de FÖB’lerin GPS ile senkronize olarak çalışması ve verileri kontrol merkezine aktarmaları şemalandırılmıştır.

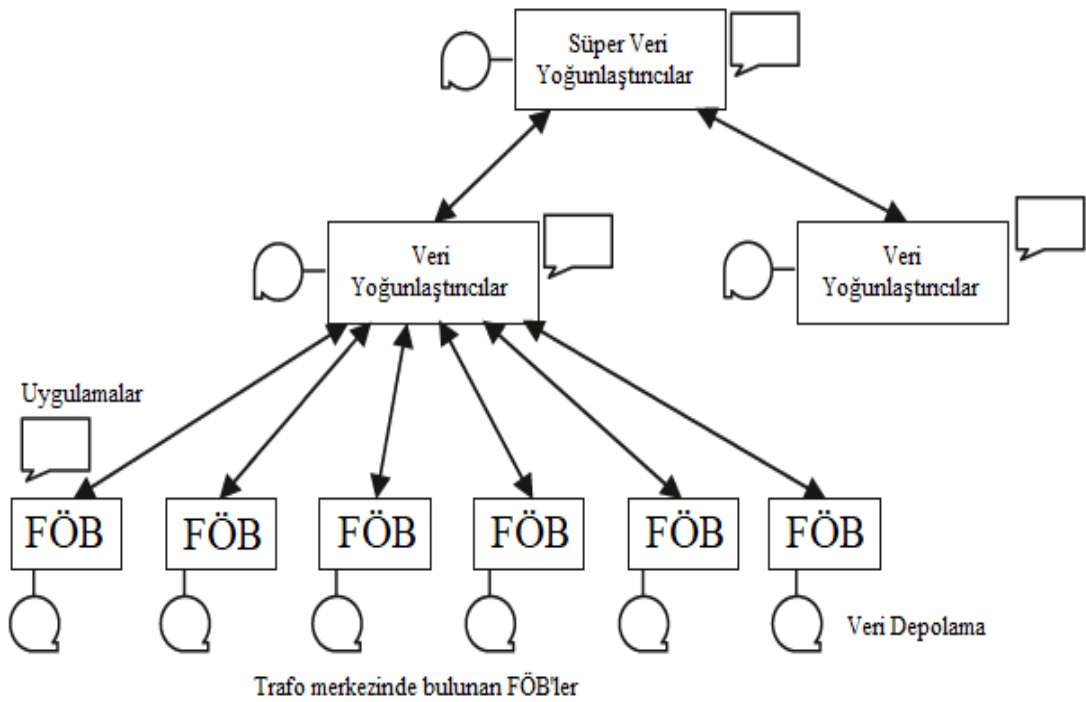


Şekil 2.8. Fazör ölçüm sisteminin kavramsal şeması.

2.2.4.1. Fazör Ölçüm Birimi Sistemi Hiyerarşisi

FÖB'ler güç sistemi trafo merkezlerine kurulur. Bu trafo merkezlerinin seçimi, sağladıkları ölçümlerden yapılacak kullanıma bağlıdır. Çoğu uygulamada fazör verileri FÖB'lerden uzak konumlarda kullanılır. Bu nedenle, FÖB ölçüm sisteminden tam olarak yararlanabilmek için, FÖB'ler, iletişim bağlantıları ve veri yoğunlaştırıcılarını içeren bir mimari mevcut olmalıdır. FVY'nin görevi aşağıdaki gibi özetlenebilir.

FVY'lerin tipik işlevi, birkaç FÖB'den veri toplamak, kötü verileri reddetmek, zaman damgalarını hizalamak ve güç sisteminin daha geniş bir bölümünden eşzamanlı olarak kaydedilen verilerin tutarlı bir kaydını oluşturmaktır. Ek olarak FVY'ler ayrıca bir GPS alıcısına sahip olabilir. Böylece çeşitli FÖB'lerden alınan verilerin gecikmesi ölçülebilir ve yayılma gecikmelerindeki limit dışı değerler alınacak düzeltme işlemi aksiyonu için işaretlenir. Açıkça, hiyerarşinin daha yüksek seviyelerinde toplanan verilerin hacmi ve zaman gecikmeleri artar. Şekil 2.9'da çift yönlü iletişim bağlantıları görülmektedir. Gerçekte veri akışının çoğu hiyerarşide yukarı doğrudur. Ancak ters yönde iletişim yeteneği gerektiren bazı uygulamalar da vardır. Böyle bir sistemin genel kabul görmüş mimarisi Şekil 2.9'da verilmiştir [39], [43].



Şekil 2.9. Fazör ölçüm sistemlerinin hiyerarşisi ve fazör veri yoğunlaştırıcılarının seviyeleri.

2.2.5. Fazör Ölçüm Biriminin Avantajları

2.2.5.1. Gerçek Zamanlı İzleme, Kontrol ve Koruma

Gerçek zamanlı izlemenin temel amacı, operatöre sistem koşulları hakkında anlık bilgi sağlamaktır. Sağlanan anlık bilgi normal çalışma koşullarında verimliliğini artırır. Anormal sistem koşulları içinde operatörün sorunlarla ilgili bir fikri olmasını sağlar ve düzeltilmesine olanak tanır. FÖB'lerin bariz bir faydası, operatörleri sadece kendi kontrol alanlarındaki problemlerden değil, komşu şebeke ya da baralardaki anormal durumlar hakkında bilgilendirmesidir.

Gerçek zamanlı izleme ve analiz, çalışma koşullarının sürekli olarak değerlendirme altında olmasını sağlar. FÖB'lerin direkt olarak açılma farklılıklarını elde etme yeteneği, operatörlerin hata paylarını azaltmalarını sağlar ve şebekeleri kararlılık sınırlarına yakın bölgelerde çalıştırmalarına olanak sağlar. Bu da mevcut iletim hatlarına ilave yatırımlar yapılmasının önüne geçilmesini sağlar. Gerçek zamanlı izleme, düşük olasılıklı ve yüksek maliyetli olan kesintilerin önlenmesine yardımcı olur [51]-[53].

2.2.5.2. Güç Sistemlerinde Durum Kestirimi

Durum tahmini, şebekenin izlenmesinde doğrudan telemetrelili gerçek zamanlı ölçümleri desteklemek için günümüzde iletim kontrol merkezlerinde ve bağımsız sistem operatörü operasyonlarında kullanılmaktadır. Direkt olarak ölçülemeyen şebeke durumlarının izlenmesine yönelik bir araç sağlamak, acil durum analizi ve tıkanıklık yöntemi gibi gerçek zamanlı uygulamalar için bir başlangıç noktası olarak kullanılabilen tutarlı bir şebeke modelinin en iyi tahminini sağlamada kullanılmaktadır [53].

2.2.5.3. Sistem Modellerinin Karşılaştırılması, Doğrulanması ve İnce Ayarı

Bu uygulamanın amacı, model doğrulama ve parametre tahmini, şüpheli güç sistemi modelleme veri parametrelerini belirlemek ve geliştirilmiş tahminleri hesaplamaktır. Genellikle gerekli modelleri oluşturmak için otomatik araçlar mevcut değildir. Bu nedenle, güç sistemi modeli oluşturma hataya müsait ve emek gerektiren bir işlemdir.

Fazör ölçüm tabanlı araçların uygulanması modelleri geliştirmek için bir yol sunmaktadır. FÖB'ler bir güç sistemindeki çeşitli düğümlerden hassas ve zamanla senkronize ölçümler sağlayarak, sistem modelleme verilerindeki hataları tanımlamak ve hem çevrimiçi hem çevrimdışı uygulamalar için güç sistemi modellerinde ince ayar yapmak için yeni fırsatlar sağlamaktadır. Ek olarak, bozulma değerlendirmesi, model kıyaslaması ve dinamik

modellerin ayarlanması için yararlı olabilecek fazör ölçümleri kullanan çeşitli geniş alan izleme, koruma ve kontrol sistem uygulamaları geliştirilmektedir [53].

2.2.5.4. *Bozulma Analizleri*

Dünya’da yaşanan gerilim kararsızlığı ya da şebeke çökmesi problemlerinden sonra GPS tabanlı FÖB’leri içeren yeni nesil veri kaydediciler önem kazanmıştır. FÖB’ler ile şebeke anlık olarak takip edilebildiği için güç sistemlerinde yaşanabilecek durumların analizi kolaylaşmıştır [53].



3. FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİNİN ŞEBEKEYE YERLEŞTİRİLMESİ

FÖB'lerin şebekede bulunan uygun trafo merkezlerine yerleştirilmesi, şebekenin tam gözlenebilirliğine ve ölçümüne olanak verir. Bu da şebekenin detaylı olarak incelenmesine, muhtemel arızaları önceden tespit edip önlem almaya ve şebekelerin daha kontrollü bir şekilde takip edilmesini sağlar. FÖB'lerin maliyeti ve bazı trafo merkezlerindeki iletişim olanaklarının bulunmaması nedeniyle FÖB'ler şebekedeki tüm trafo merkezlerine yerleştirilememektedir. Dolayısıyla şebekede tam gözlenebilirlik sağlamak ve en az sayıda FÖB yerleştirmek bir optimizasyon problemidir.

3.1. GÜÇ SİSTEMLERİNDE GÖZLENEBİLİRLİK

Güç sisteminden elde edilen ölçümler ile şebekenin tamamındaki gerilim, akım ve açı değerleri belirlenebiliyor ise o güç sistemi gözlenebilir olarak nitelendirilmektedir. Sistemdeki tüm baraların değerlerini elde etmek için FÖB'ler şebekeye optimal şekilde yerleştirilmelidir. Optimal yerleşimin ana amacı, güç sistemlerinin gözlenebilirliğini garanti etmektir. Şebekedeki gözlemlenebilirliği belirlemek için kullanılan iki yöntem bulunmaktadır. Bunlar sayısal yöntemler ve topolojik yöntemlerdir [54]-[55].

3.1.1. Sayısal Gözlenebilirlik

Sayısal gözlenebilirlik, sistem modelinin bir durum tahmini için çözülebilme yeteneği olarak tanımlanmaktadır.

Durum tahmininde ölçüm modeli şu şekilde tanımlanabilir;

$$\bar{z} = h(\bar{x}) + \bar{e} \quad (3.1)$$

$h(\bar{x})$ = Ölçüm vektörü ve durum vektörü ile ilgili doğrusal olmayan fonksiyon

FÖB'ler tarafından sağlanan verilerin doğruluğu dikkate alındığında $\bar{e}$ çok küçük bir değere karşılık gelmektedir. Bu sebeple genellikle ihmal edilir. $h(\bar{x})$ 'in ölçümleri sadece FÖB ölçümlerini kullanıyorsa doğrusaldır. Bu nedenle FÖB kullanımı doğrusal durum kestiricisini aşağıdaki hale günceller.

$$\bar{z} = \mathbf{H}\bar{x} \quad (3.2)$$

$\mathbf{H}$ = ölçüm fonksiyonu matrisi ve ayrıca sistem durum vektörü $\bar{x}$ ile ilgili katsayı matrisi n sayıda baralı ve m sayıda FÖB'e sahip bir güç sistemi için $\bar{x}$, $2n - 1$ boyutlarında bir vektör ve $\mathbf{H}$, $m \times (2n - 1)$ boyutlarında bir matristir. n baralı bir güç sisteminin

$$\text{Rank}(\mathbf{H}) = 2n - 1 \quad (3.3)$$

olması durumunda sisteminin gözlenebilir olduğu anlamına gelir. Denklem (3.3)'ü karşılayan bir güç sistemi sayısal ve cebirsel olarak gözlenebilir olarak kabul edilmektedir [56].

3.1.2. Topolojik Gözlenebilirlik

Topolojik yöntemlerde karar, mantıksal işlemleri temel alır. Bir güç sisteminin topolojik olarak gözlenebilir olabilmesi için mevcut ölçümlerle birlikte bir sıralama ağacı oluşturmaktadır. Sıralama ağacını oluşturabilmek için şebeke bağlantısı, şebeke konumları ve ölçüm türleri gibi bilgilere ihtiyaç vardır. Topoloji bir güç sistemini temsil etmek için kullanıldığında, sistem n uçları içeren bir graf olarak ve b kenarları olan bir graf olarak dikkate alınabilir. Buradaki b baraları birbirine bağlayan hatları, n ise baraları temsil etmektedir.

Bu graf,

$$G = (V, E) \quad (3.4)$$

olarak tanımlanmaktadır. Burada V , graftaki tepelerin kümesini, E ise graftaki kenarların kümesidir.

Bir alt graf,

$$G' = (V', E') \quad (3.5)$$

olarak tanımlanabilir. Burada,

$$V' \subseteq V, \text{ ve } E' \subseteq E \quad (3.6)$$

olarak tanımlanmıştır.

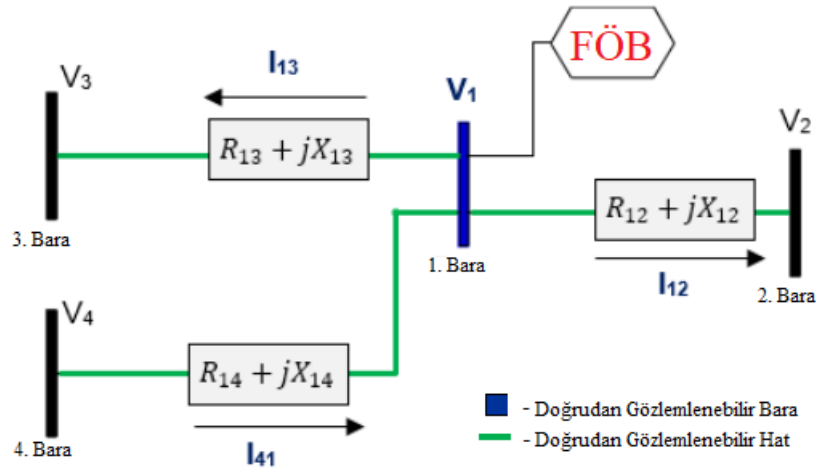
Bir alt grafa G 'nin tüm düğümlerini içeren, $V' \subseteq V$ olan bir G' var ise, mevcut güç sistemi topolojik olarak gözlemlenebilir olarak kabul edilmektedir [54], [57].

3.2. ŞEBEKE GÖZLENEBİLİRLİK KURALLARI

Bir baranın gerilimi veya hat akımı baraya doğrudan kurulan bir FÖB vasıtasıyla ölçülebilir ya da diğer bara gerilimi ve hat akımları gibi bilinen parametreler vasıtasıyla dolaylı olarak ölçülebilir. Dolaylı ölçümlerde, Ohm Kanunu kullanılarak, FÖB yerleştirilmiş baraya komşu olan baraların gerilimleri ve hat akımları hesaplama yolu ile bulunabilir. Bu nedenle FÖB’ler şebekeye stratejik olarak yerleştirilirse tüm baralar gözlemlenebilir hale getirilebilir.

Şebeke gözlenebilirliği için oluşturulmuş kurallar, düğüm gerilimi ve hat akımına bağlıdır. Belirli bir şebekenin gözlenebilir olduğunu anlabilmek için farklı kurallar kullanılmıştır. Aşağıda bir güç sisteminin şebeke gözlenebilirliğini belirlemek için kullanılan gözlemlenebilirlik kuralları açıklanmaktadır [27], [40], [58]-[61].

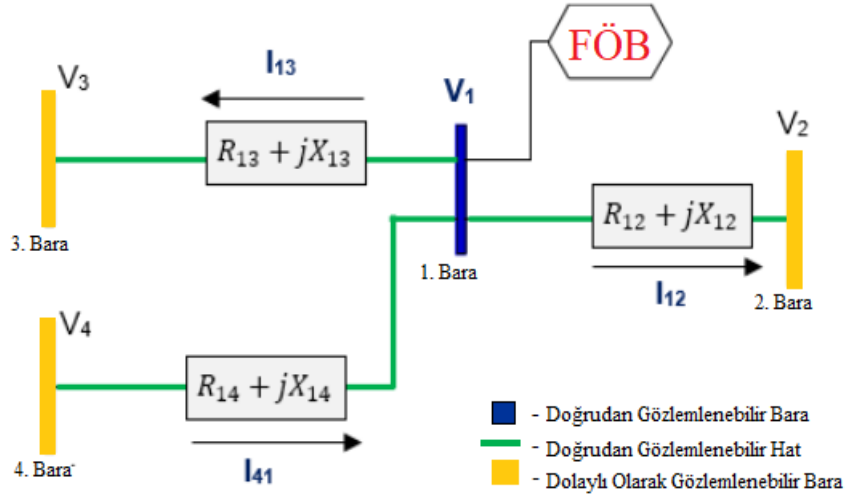
Kural 1: FÖB kurulu olduğu baranın voltaj fazörünü ve ona bitişik tüm hat akımlarını ve fazörlerini ölçebilir. Bu ölçümler “doğrudan ölçümler olarak” bilinir [40].



Şekil 3.1. Kural 1'in modellenmesi.

Şekil 3.1’de 1 numaralı baraya FÖB yerleştirilmiştir. Yerleştirilen FÖB, V₁ gerilimini, I₁₂, I₁₃ ve I₄₁ akımlarını doğrudan ölçebilir.

Kural 2: Bir baranın gerilimi ve bağlı olduğu hattın akımı biliniyorsa, hattın diğer ucundaki baranın gerilimi hesaplanabilir. Bu hesaplama işlemi için Ohm Kanunu kullanılmaktadır [40].



Şekil 3.2. Kural 2'nin modellenmesi.

Şekil 3.2'de gösterilen I_{12} , I_{13} ve I_{41} akımları bilindiği için V_2 , V_3 ve V_4 gerilimleri Ohm Kanunu kullanılarak hesaplanabilir. Bara gerilimlerinin nasıl hesaplandığı aşağıdaki denklemlerle açıklanmıştır.

$$I_{12} = \frac{V_1 - V_2}{R_{12} + jX_{12}} \quad (3.7)$$

$$V_2 = V_1 - I_{12}(R_{12} + jX_{12}) \quad (3.8)$$

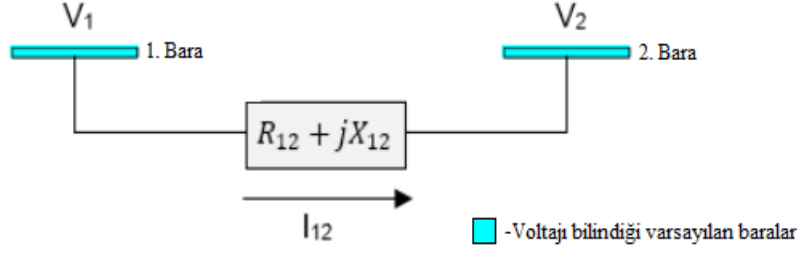
$$I_{13} = \frac{V_1 - V_3}{R_{13} + jX_{13}} \quad (3.9)$$

$$V_3 = V_1 - I_{13}(R_{13} + jX_{13}) \quad (3.10)$$

$$I_{41} = \frac{V_4 - V_1}{R_{14} + jX_{14}} \quad (3.11)$$

$$V_4 = V_1 + I_{41}(R_{14} + jX_{14}) \quad (3.12)$$

Kural 3: Gerilimleri bilinen 2 baranın arasındaki hattın akımı Ohm Kanunu'na göre hesaplanabilir [40].



Şekil 3.3. Kural 3'ün modellenmesi.

Şekil 3.3'de V_1 ve V_2 gerilimlerinin bilindiği varsayımıyla I_{12} akımı Ohm Kanunu yardımıyla Denklem (3.13) yardımıyla hesaplanabilir.

$$I_{12} = \frac{V_1 - V_2}{R_{12} + jX_{12}} \quad (3.13)$$

3.3. FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN OPTİMAL YERLEŞİM PROBLEMİ FORMÜLASYONU

Optimal FÖB yerleşiminin ana amacı genel olarak, güç sisteminin tamamının gözlenebilirliğini sağlamak için yerleştirilmesi gereken minimum sayıda FÖB sayısını bulmaktır. Bu nedenle problemin amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi formüle edilebilir.

$$\min \sum_{k=1}^N x_k \quad (3.14)$$

$$[A] \times [X] \geq [b] \quad (3.15)$$

N sistemdeki bara sayısıdır. A , söz konusu sistemin ikili bağlantı matrisidir ve b , her bir baranın gözlemlenebilirlik derecesini temsil eden değerler ile N 'ye eşit eleman sayısına sahip bir gözlemlenebilirlik sütun vektörüdür. Denklem (3.14)'teki x_k eğer k . barada FÖB yerleştirilmişse 1'e eşittir. Aksi takdirde 0'dır. İkili bağlantı matrisi A şu şekilde tanımlanır;

$$A_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } i = j \\ 1 & i \text{ ve } j \text{ baraları birbirine bağlı ise} \\ 0 & \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad (3.16)$$

Bu arada X ikili karar değişken vektörü olarak tanımlanır. X vektörünün elemanlarının toplamı tam sistem gözlemlenebilirliğine ulaşmak için gereken FÖB sayısını temsil eder. Amaç fonksiyonu FÖB'lerin kurulum maliyetlerini de dikkate alacak şekilde genişletilebilir. Böyle bir durumda x_k 'nın yerini $c_k \cdot x_k$ alacaktır. c_k k barası için kurulum maliyetini temsil etmektedir [59], [60].

3.4. FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİ OPTİMAL YERLEŞTİRME METOTLARI

FÖB'lerin tam gözlenebilirliği en az sayıda yerleştirilmiş birimle gerçekleştirilmesi optimizasyonun temel hedefidir. FÖB'lerin şebekeye optimal yerleşimi için literatürde pek çok yöntem önerilmiştir. Tüm bu algoritmaların ana amacı yerleştirilmesi gereken FÖB sayısını minimize etmektir. Bu algoritmalar genel olarak Deterministik Yöntemler, Sezgisel Yöntemler ve Metasezgisel Yöntemler olarak 3 başlık altında toplanır.

3.4.1. Deterministik Yöntemler

Deterministik yöntemler, önceki ölçümlere dayalı olarak bir sonraki davranışı tahmin edebilen bir yöntemdir. Bu algoritmalarda bir çıktı alabilmek için öncelikle belirli teorik girdiler girilerek algoritma eğitilir. Algoritmalarından en bilindik ve en çok kullanılanları aşağıdaki gibidir:

- Tamsayılı Programlama
- İkili Arama Metodu

Literatürde bu yöntemle gerçekleştirilmiş bir çok optimal FÖB yerleşimi mevcuttur [58], [61].

3.4.2. Sezgisel Yöntemler

Sezgisel yöntemler, azaltılmış hesaplama süresi ve bellek alanı kullanarak optimal FÖB yerleşimi problemlerini çözmek için hızlı ve pratik bir yöntemdir. Ancak sezgisel yöntemlerde, sezgisel yöntemden elde edilen sonuçların kesin çözüm olduğu garanti edilememektedir. Sezgisel yöntemlerin kapsamına giren en bilindik algoritmalar aşağıdaki gibidir:

- Derin Öncelikli Arama Yöntemi
- Açgözlü Algoritma

3.4.3. Metasezgisel Yöntemler

Sezgisel yöntemleri geliştirmek için önerilmiş metasezgisel yinelemeli yöntemlerdir. Temel olarak iki aşamaya dayanır. İlk aşama topolojik gözlemlenebilirlik, ikinci alana ise sayısal gözlemlenebilirlikle ilgilidir. Temel olarak metasezgisel yöntemler doğadan esinlenen ve doğadan esinlenmeyen yöntemler, dinamik ve statik amaç fonksiyonuna sahip yöntemler, bir komşuluk yapısına ve değişken komşuluk yapısına sahip yöntemler, hafıza kullanan ve hafıza kullanmayan yöntemler, tek çözüme dayalı ya da toplum tabanlı metasezgisel yöntemler olarak sınıflanlandırılmaktadır. Pek çok metasezgisel algoritma mevcuttur ve hala sayıları artmaktadır [62].

En bilinen algoritmaları aşağıdaki gibidir:

- Genetik Algoritma (GA)
- Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)
- Tabu Arama Algoritması
- Karıncı Kolonisi Optimizasyonu
- Yerçekimi Arama Algoritması
- Diferansiyel Evrim Algoritması (DEA)
- Benzetilmiş Tavlama Algoritması

Bu tez çalışmasında metasezgisel algoritmalarından birisi olan MBTA algoritması kullanılmıştır. BTA ve MBTA'nın FÖB yerleştirme problemine uygulanması Bölüm 4'te anlatılmıştır.

4. BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI İLE FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMLERİNİN OPTİMAL YERLEŞİMİ

4.1. BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASI

BTA ilk olarak 1983 yılında Kirkpatrick, Vecchi ve Gelatt tarafından önerilmiş, olasılık tabanlı sezgisel bir algoritmadır. BTA'nın temeli kombinatoryal optimizasyon problemlerinin çözümü ile katıların fiziksel tavlama işlemi arasındaki benzerliğe dayanmaktadır. BTA, pek çok değişkene sahip fonksiyonların en küçük veya en büyük değerlerinin bulunması ve pek çok yerel minimuma sahip lineer olmayan fonksiyonların en küçük değerlerinin bulunması için geliştirilmiştir. Algoritma metallerin tavlama işlemine benzediğinden bu adı almıştır. Diğer sezgisel algoritmalar gibi en iyi çözümü en kısa sürede elde etmeyi amaç edinmektedir. Bu nedenle, matematiksel modellerle gösterilemeyen kombinasyonel problemlerin optimizasyon uygulamalarında tercih edilir. BTA, yol bulma problemleri, seyahat problemleri, görüntü işleme, elektronik devre tasarımları gibi mühendislik problemlerinde başarılı sonuçlar vermiştir [63]-[65].

BTA, yerel arama algoritmalarının yerel minimuma ulaştıktan sonra algoritmayı sonlandırıp global minimumu aramamasından kaynaklanan eksikliği gidermek için önerilmiş bir algoritmadır. Benzetilmiş tavlama bir noktada diğer yerel arama algoritmalarından ayrılır. Bu fark yerel minimum veya maksimumu bulduktan sonra mevcut çözümden daha iyi bir global minimum ve maksimumu aramasıdır.

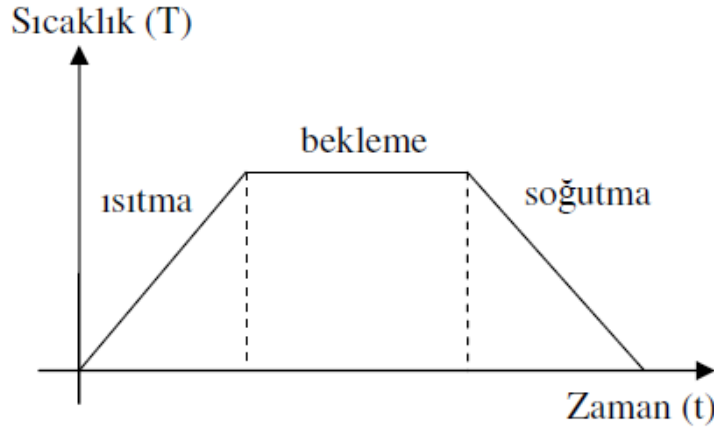
4.1.1. Fiziksel Tavlama İşlemi

BTA adından da anlaşıldığı üzere katıların fiziksel tavlama işlemi ve kombinatoryal optimizasyon problemlerinin çözümü arasındaki benzerlik üzerine dayalıdır. Tavlama, katının ergime noktasına kadar ısıtılması ve devamında mükemmel kafes yapılı durumda kristalize olana kadar yavaşça soğutulması işlemidir. Isıl işlem ile malzemenin belli bir sıcaklığa kadar ısıtılması, bu sıcaklığa ulaşıncaya kadar sıcaklık değerinde belli bir süre beklemesi ve belirli adımlarla sıcaklığın düşürülmesi ile üç kademedeki özellik değişimleri sağlanır [65].

Fiziksel tavlama işlemi ilk olarak, Metropolis ve arkadaşları tarafından Monte Carlo tekniğine dayanarak modellenmiştir. Verilen bir T sıcaklığında, sistem enerjilerinin olasılık dağılımı aşağıdaki termodinamik kanunu ile belirlenir [66].

$$P(E) = e^{-E/(kT)} \quad (4.1)$$

Tavlama işlemine ait ısıtma işlem kademeleri Şekil 4.1’de gösterilmiştir.



Şekil 4.1. Isıl işlem kademeleri.

4.1.2. Benzetilmiş Tavlama Algoritmasının İşlem Adımları

Optimizasyon problemlerinin çözümünde BTA’nın kullanılması, optimal bir çözüm bulma ile katıların tavlama prosedüründe düşük enerji seviyesinin bulunması arasındaki benzerliğe bağlı olarak geliştirilmiştir. Minimum enerji durumu, problem için optimal çözüme karşılık gelir. Hızlı soğutma işlemi ise yerel optimuma karşılık geldiği varsayılabilir [64], [67].

Optimizasyon problemleri ve tavlama işlemi arasındaki ilişki Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Tavlama işlemi ve optimizasyon problemi arasındaki ilişki.

Tavlama İşlemi	Optimizasyon Problemi
Sıcaklık	Kontrol Parametresi
Fiziksel Sistemin Durumu	Problemin Çözümü
İçinde Bulunan Durumun Enerjisi	Amaç Fonksiyonunun Değeri
Minimum Enerji	Optimal Çözüm

BTA iteratif tabanlı bir algoritmadır. Çözümü sürekli olarak geliştirmeye çalışır. Standart bir BTA'nın temel adımları Çizelge 4.2'de verilmiştir.

Çizelge 4.2. BTA'nın işlem adımları.

Adım 1. Bir başlangıç çözümü oluştur, S
Adım 2. Bir başlangıç sıcaklığı oluştur, T_0
$T_0 > 0$ (4.2)
Adım 3. En iyi çözümden hareketle rastgele bir komşu çözüm oluştur.
$S' \in N(S)$ (4.3)
Adım 4. Üretilen S' çözümüyle S çözümünün amaç fonksiyonu değerleri arasındaki farkı hesapla.
$\Delta = C(S') - C(S)$ (4.4)
Adım 5. Eğer S' , S 'den daha iyi ise ($\Delta > 0$), S çözümüne S' çözümünü ata. Yoksa S 'i mevcut çözüm olarak muhafaza et.
Adım 6. Sıcaklığı güncelle.
Adım 7. Eğer durdurma kriteri sağlanıyor ise dur, Aksi takdirde Adım 3'e git.

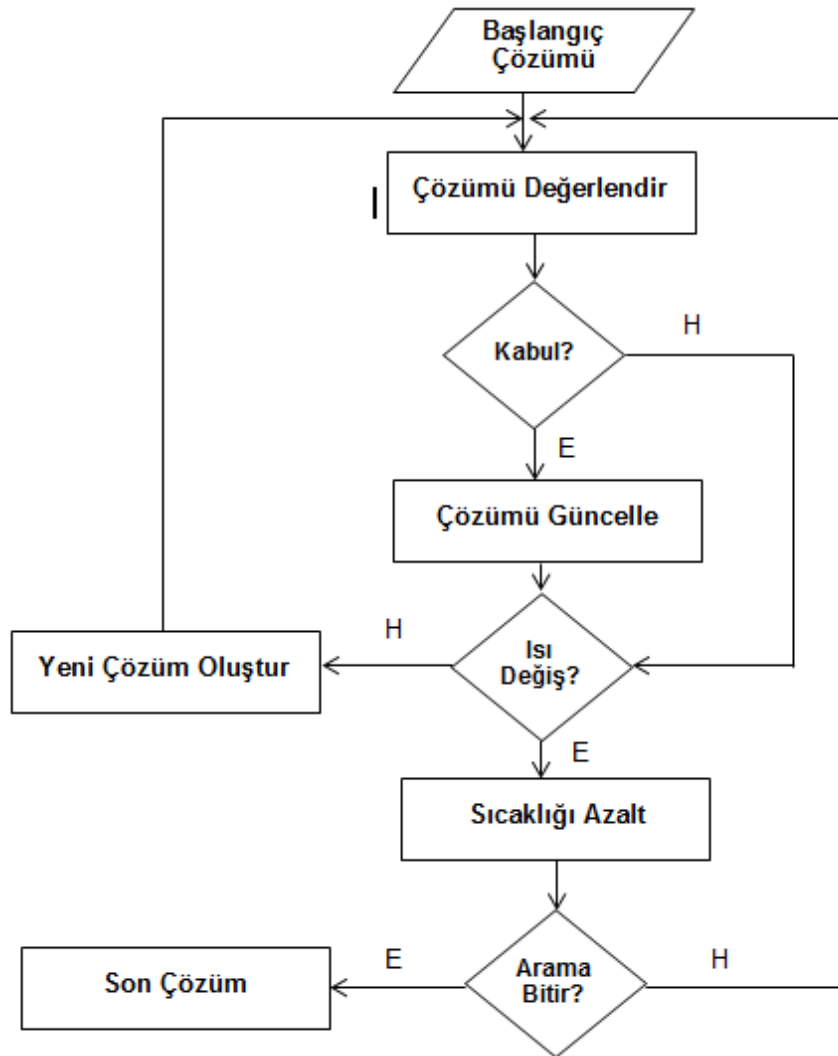
Soğutma işlemi BTA'nın performansı üzerinde büyük önem taşımaktadır. Sıcaklık parametresinin değerini azaltmak için Denklem (4.5) kullanılmaktadır.

$$T_t = R \cdot T_{t-1} \quad (4.5)$$

Burada R değeri 1'den küçük fakat 1'e yakın bir sabittir ve genellikle 0.8 ile 0.99 arasında seçilir. Bu sıcaklık fonksiyonu ile sıcaklık parametresinin değeri sıfıra yaklaştıkça daha da yavaş azaltılmaktadır. Sıcaklık parametresinin her değerinde gerçekleştirilecek yeterli tekrar sayısı, sabit bir üst sınıra göre seçilerek problemin fiziksel tavlamadaki ısı dengeye karşılık gelen bir denge durumuna ulaşması hedeflenmektedir. Bu tavlama planı ile sıcaklık parametresinin her değerinde elde edilen çözümler, belli sayıda ardışık sıcaklık değişimleri boyunca aynı kalırsa BTA durdurulmaktadır.

Kombinasyonel optimizasyon problemlerinin çözümündeki tavlama sürecini gösteren BTA akış diyagramı Şekil 4.2'de verilmiştir. BTA'nın çalışma mantığındaki en önemli işlem, sıcaklığın zamanla soğutulması gerekliliğidir. Çünkü başlangıç sıcaklığı zamanla azaltılmazsa enerji sürekli yüksek kalacak ve yüksek orandaki entropi ile tüm ağacın aranması sağlanacaktır. Bu da algoritma çözümünün süresini uzatacağından istenmeyen

bir durumdur [68], [69].



Şekil 4.2. BTA akış diyagramı.

4.1.3. Benzetilmiş Tavlama Algoritmasına Ait Parametreler

BTA’da kullanılan parametre ve değerlerin belirlenmesi tavlama ya da soğutma planı olarak tanımlanmaktadır. Bu parametreler, çözülmek istenen problemin yapısına göre değişebilmekte ve hatta yeni parametreler eklenebilmektedir. Bir problemin çözümünde kullanılan tavlama planında aşağıdaki parametreler belirlenmektedir [70].

- T sıcaklık parametresinin başlangıç değeri
- Sıcaklığın hangi yöntemle azaltılacağını belirlemek için kullanılan $T(t)$ sıcaklık fonksiyonu

- Soğutma oranı
- Her sıcaklıkta gerçekleştirilmesi gereken M iterasyon sayısı
- Algoritmayı sonlandırmak için gerekli durdurma kriteri

4.1.3.1. Başlangıç Sıcaklığı

Başlangıç sıcaklığı BTA'da elde edilmeye çalışılan sonuçların aranacağı genişliği temsil eder. BTA'da başlangıç sıcaklığının belirlenmesi oldukça önem taşımaktadır. Çünkü başlangıç sıcaklığının yüksek bir değer olarak belirlenmesi algoritmanın çözüm süresini uzatmakta ve düşük bir değer olarak belirlenmesi ise algoritmanın yerel minimumlardan çıkamamasına neden olabilmektedir. Bu yüzden başlangıç sıcaklığı belirlenirken, sıcaklık hakkında net bir sınır tanımlanamıyorsa, yerel minimumlara takılmamak için sıcaklık değeri yüksek bir değere atanmalıdır.

4.1.3.2. Soğutma Oranı

Soğutma oranı 0 ile 1 arasında değer aralığına sahip, α ile gösterilen bir katsayıdır. Belirlenen sıcaklık değerinin iterasyon adımlarında azaltılmasında kullanılır. Mevcut sıcaklık değeri α ile çarpılarak sıcaklığın azaltılması işlemi gerçekleştirilir. α değeri 1'e yaklaştıkça sistemin soğuması yavaşlamakta, 0'a yaklaştıkça sistem daha hızlı soğumaktadır. Soğutma oranı yüksek tutulursa işlem adımları artacağı için çözüme ulaşma hızı azalacak ancak daha kesin çözüm elde edilecektir. Oran düşük olursa sonuca daha hızlı ulaşılsa da çözümün doğruluk değeri de daha az olacaktır. Mevcut problemlerdeki beklentiye göre soğutma oranı belirlenerek hız ve net çözüm arasındaki denge belirlenebilir.

4.1.3.3. İterasyon Sayısı

İterasyon sayısı, sıcaklık değeri düşürülmeden önce mevcut sıcaklık değerinde gerçekleştirilebilecek döngü miktarıdır. Döngü miktarı belirli limit değere ulaştıktan sonra soğutma oranı ile sıcaklık değeri düşürülecektir.

4.1.3.4. Durdurma Kriteri

Döngü belirli bir koşulu sağladığında durdurma kriteri ile durdurulmaktadır. BTA'da bu işlem belirli bir sıcaklığa ulaştığında otomatik olarak uygulanmaktadır. Bu en çok kullanılan yöntemdir. Bunun yanında döngüler içerisinde herhangi bir iyileştirme gözlemlenmiyorsa da döngü sonlandırılabilir. Ayrıca zaman limiti konularak da algoritma durdurulabilmektedir. Bu da belirli bir süre içerisinde bulunan en iyi sonuca yönelik bir

yaklaşımıdır.

4.2. BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASININ OPTİMAL FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİ YERLEŞİMİNE UYGULANMASI

FÖB'lerin şebekeye yerleştirilmesinde pek çok sezgisel algoritma kullanılmaktadır. Bu algoritmaların birbirlerine karşı üstünlükleri ve eksiklikleri bulunmaktadır. Bu tez çalışmasında BTA kullanılarak optimal yerleşim gerçekleştirilmiştir.

BTA'nın optimal FÖB yerleşimine uygulanması ilk olarak Baldwin vd. tarafından önerilmiş ve uygulanmıştır. Çalışmada minimum FÖB için hem modifiye edilmiş ikiye bölme metodu hem de BTA tabanlı bir yöntem kullanan ikili arama algoritması kullanılmıştır.

Bu yöntemde arama alanının sınırlamak için bir üst sınır ve alt sınır ayarlanmıştır. Üst sınır sistemi tamamen gözlenebilir hale getirdiği varsayılan maksimum FÖB sayısı, alt sınır ise varsayılan olası minimum FÖB sayısı anlamına gelir.

Önerilen yöntemde 6 adım bulunmakta ve 4. adımdan itibaren BTA süreci başlamaktadır. Bu yöntemde bir “ E ” amaç fonksiyonunun tanımlanıp minimize edilmesini, FÖB yerleşimi sağlayan rastgele üretici ve soğutma oranı ile çarpılarak azaltılan bir “ T ” fonksiyonunun tanımını gerektirir. Enerjiye benzer olan amaç fonksiyonu E , gözlenmeyen bara sayısı olan $\phi(S)$ 'in bir fonksiyonu olarak seçilmiştir. Fonksiyon, $\mathcal{V}_{test}$ boyutundaki FÖB yerleştirme setlerinin arama alanı üzerinde minimize edilmiştir. Arama alanı, komşu setler arasından bir sonraki yerleştirme setini keyfi olarak seçen, rastgele üreteç fonksiyonu kullanılarak sıralı olarak araştırılır. Bu sıra, kristal malzemelerin tavlama sürecindeki atomik hareketine benzer. Her bir yerleştirme seti, gözlemlenemeyen baraların sayısında bir azalma olup olmadığını belirlemek için önceki setle karşılaştırılır. Azalma var ise yeni yerleşim grubu eskisinin yerini alır. Aksi takdirde yeni yerleştirme seti, T kontrol parametresi ve soğutma oranı ile birlikte algoritmayı kontrol ederek daha optimal bir yerleşim grubu elde etmeye çalışır.

Baldwin vd. yayınladıkları çalışmada BTA'yı optimal FÖB yerleşimine uyarlayan bir sözde kod paylaşmışlardır. Bu kod Çizelge 4.3'te verilmiştir [54], [71].

Çizelge 4.3. BTA'nın işlem adımları.

Fonksiyon Benzetilmiş Tavlama ()		
Adım 1.	Giriş = $\mathcal{V}_{test}$, M	
Adım 2.	Çıkış = Yeni yerleşim, sonuç yok	
Adım 3.	E = Yerleştirme uygulandığında gözlemlenemeyen bara sayısı	
Adım 4.	$T = 15$	
Adım 5.	$M = 0.002 \times$ Bir seferde $\mathcal{V}_{test}$ 'ten alınan FÖB yerleştirme kombinasyonlarının sayısı	
Adım 6.	for i=1 to 40	
Adım 7.	begin	
Adım 8.	for j=1 to M	
Adım 9.	begin	
Adım 10.	FÖB'ü rastgele bir baraya yerleştir.	
Adım 11.	Seçilen FÖB'ün bara konumunu kaydet.	
Adım 12.	FÖB olmayan rastgele bir bara seç.	
Adım 13.	FÖB'ü yeni baraya taşı.	
Adım 14.	Değiştirilen yerleşimi değerlendir.	
Adım 15.	E_{yeni} = Yeni yerleşim uygulandığında gözlemlenemeyen bara sayısı	
Adım 16.	if $E_{yeni} = 0$ 'sa daha az FÖB ile tüm sistemin gözlemlenebilirliğini sağlayacak daha etkili bir yerleşim bul.	
Adım 17.	$\Delta E = E_{yeni} - E$	
Adım 18.	if $\Delta E > 0$ 'sa	
Adım 19.	begin	
Adım 20.	$\exp(\Delta E/T)$ fonksiyonu ile rastgele bir kabul/ret değeri üret.	
Adım 21.	if ret seçimi yapılırsa FÖB'ü önceki barasına döndür.	
Adım 22.	end	
Adım 23.	end	
Adım 24.	$T = 0.879 \times T$	//tavlama işlemi
Adım 25.	end	

Algoritma grafik teorik prosedür tarafından bulunan belirli FÖB yerleştirme setinden başlayarak, ν_{test} FÖB yerleşimleri rastgele seçilir. Yeni yerleşim seçimi mevcut yerleştirme setinden rastgele bir FÖB seçilerek ve rastgele seçilen yeni bir baraya taşınarak bulunur. Daha sonra, hedef fonksiyon E , yeni yerleştirme seti için yeniden değerlendirilir. Yeni FÖB yerleştirme setinin kabul edilip edilmeyeceğine ilişkin karar, ΔE amaç fonksiyonunun artan değişikliğine ve T 'nin değerine dayanmaktadır. ΔE negatif olduğunda yeni yerleşim yeri otomatik olarak kabul edilir. Aksi takdirde, T 'nin kontrol sıcaklığı olduğu modifiyeli Boltzmann fonksiyonu tarafından verilen olasılıkla kabul edilir. Belirli bir sıcaklık değerlerinde birkaç adım denendikten sonra, sıcaklık düşürülür ve ardından yeni bir dizi adım denenir. BTA'nın herhangi bir uygulamasında, belirli bir sıcaklıktaki adım sayısının nasıl düzenleneceği, sıcaklığın nasıl azaltılacağı ve ne zaman durdurulacağı belirlenmelidir.

$$P(\Delta E) = e^{(-\Delta E/T)} \quad (4.6)$$

Belirli bir sıcaklıkta değerlendirilen FÖB yerleştirme setlerinin sayısı M 'dir ve arama alanının boyutuna bağlıdır. Arama alanında $\binom{N}{\nu_{test}}$ kadar yerleşim seti vardır. Sayısal deneylerden M değerinin en uygun değerinin,

$$M = 0.002 \binom{N}{\nu_{test}} \quad (4.7)$$

olduğu belirlenmiştir.

Başlangıç sıcaklık değeri T_0 , ΔE 'nin büyüklüğüne bağlıdır. Bir FÖB bara değiştirdiğinde 5 ya da daha az bara gözlemlenmesi beklenir. Bu değer şebekeye göre değişkenlik gösterir. T_0 değeri ortalama mutlak değişim değerinin yaklaşık üç katına ayarlanır. Bu da T_0 değerinin 15 °C olmasını sağlar. Başlangıç sıcaklığı, hedef fonksiyonun herhangi bir yerel minimumdan kaçmak ve FÖB yerleşimlerine geniş fırsatlar sağlamak için ΔE 'nin maksimum değerinden daha büyük olacak şekilde sezgisel olarak seçilir. BTA'da kontrol sıcaklığı denkleme göre azaltılır.

$$T_i = T_0 \cdot \beta^i \quad (4.8)$$

T parametresi 0.879'luk bir soğutma oranı kullanılarak 15'ten 0.00869 değerine düşürülür. Algoritmadaki ölçeklendirme faktörü 40 olacak şekilde seçilmiştir.

BTA üç durum ile karşılaşırsa sona erer. Bu üç durum aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

- İlk durdurma kuralı, gözlemlenemeyen bara sayısı olarak seçilen E fonksiyonunun minimum değere ulaşmasıdır. Böyle bir durum için sistem zaten gözlemlenebilir olmaktadır.
- İkinci durdurma kuralı, belirli bir kontrol sıcaklığı için kabul edilecek bir FÖB yerleştirme setinin olmamasıdır. Bu tavlama işleminde “donma noktası” anlamına gelmektedir. İşleme devam etmek için kontrol sıcaklığı yükseltilerek yeni bir yerleşim elde edilmeye çalışılmalıdır.
- Üçüncü durdurma kuralı, izin verilen minimum kontrol sıcaklığı T_L 'ye ulaşılmasıdır. T_L , ΔE 'nin amaç fonksiyonundaki değişiklik olduğu durumda, amaç fonksiyonunun değerini artıran yeni bir yerleştirme setini kabul etme olasılığı P_{acc} ile ilgilidir.

$$T_L = \frac{-1}{\ln(P_{acc})} \quad (4.9)$$

4.3. MODİFİYELİ BENZETİLMİŞ TAVLAMA ALGORİTMASININ OPTİMAL FAZÖR ÖLÇÜM BİRİMİ YERLEŞİMİNE UYGULANMASI

BTA pek çok optimizasyon problemine çözüm bulmak için kullanılan önemli bir yöntemdir. Bununla birlikte algoritmanın global maksimum noktalarını daha kolay bulmasını sağlamak ve işlem süresini azaltmak için BTA üzerinde de değişiklikler yapılmaktadır. Modifiyeli Benzetilmiş Tavlama Algoritması (MBTA) da bu işlemler sonucu ortaya çıkmıştır. FÖB yerleşimine de uyarlanan MBTA'nın geleneksel BTA'dan daha optimal sonuçlar verdiği görülmüştür. MBTA aynı şebeke sistemleri üzerinde daha az FÖB yerleşimi gerçekleştirerek tam gözlenebilirlik sağlamaktadır.

MBTA'nın işlem adımları Çizelge 4.4'te verilmiş ve açıklanmıştır [71].

Çizelge 4.4. MBTA işlem adımları.

Fonksiyon Modifiyeli Benzetilmiş Tavlama ()		
Adım 1.	Giriş = Yerleşim	
Adım 2.	Çıkış = En iyi yerleşim	//bulunan en iyi yerleşim seti
Adım 3.	$T = 15$	//başlangıç sıcaklığı
Adım 4.	Yerleşim $\rightarrow$ En iyi yerleşim	
Adım 5.	$T_{azalan} = 0$	
Adım 6.	while $T_{azalan} < N$ do	//N = toplam bara sayısı
Adım 7.	for $j=1$ to M do	//M = toplam bara sayısı
Adım 8.	begin	
Adım 9.	FÖB'ü rastgele bir baraya yerleştir. //MBTA bu adımda BTA'dan gelişmiştir.	
Adım 10.	Seçilen FÖB'ün bara konumunu kaydet.	
Adım 11.	FÖB olmayan rastgele bir bara seç.	
Adım 12.	FÖB'ü yeni baraya taşı.	
Adım 13.	Değiştirilen yerleşimi değerlendir.	
Adım 14.	E_{yeni} = Yeni yerleşim uygulandığında gözlemlenemeyen bara sayısı	
Adım 15.	if $E_{yeni} = 0$ 'sa daha az FÖB ile tüm sistemin gözlemlenebilirliğini sağlayacak daha etkili bir yerleşim bul.	
Adım 16.	$T_{azalan} = -1$	
Adım 17.	En iyi yerleşim = Yeni yerleşim	
Adım 18.	break	
Adım 19.	end	
Adım 20.	$\Delta E = E_{yeni} - E$	
Adım 21.	if $\Delta E > 0$ 'sa	
Adım 22.	break	//iyileştirme içermeyen yerleşimi reddet
Adım 23.	end	
Adım 24.	end	
Adım 25.	$T_{azalan} = T_{azalan} + 1$	
Adım 26.	$T = 0.879 \times T$	//Tavlama işlemi
Adım 27.	end	

MBTA'da rastgeleliği artırmak için farklı komutlar ve yöntemler kullanılmaktadır. Rastgele işleme tabi olacak durumlar;

- Bir FÖB'ü rastgele bir şekilde FÖB'süz bir baraya taşımak,
- Bir FÖB'ü bir baraya rastgele yerleştirmek veya kaldırmak.

BTA sadece ilk yöntemi uygular ve kullanılması beklenen FÖB miktarını sınırlamak için üst ve alt sınır kullanır.

Yöntem, algoritmanın arama yoluyla $\mathbf{v}_{test}$ 'in uygun olup olmadığını kontrol etmek için çok fazla zaman harcamadan en uygun çözüme hızla yaklaşmasına yardımcıdır. BTA yönteminin global optimal çözümü bulma olasılığını artırmak ve bu arada arama süresini sınırlandırmak için BTA yönteminde GA'nın uygulanması ve parametrelerin değiştirilmesi gibi birçok modifikasyon önerilmiş ve kullanılmıştır. Bununla birlikte BTA araştırmasının doğası stokastik ve yerel aramanın kombinasyonu olduğundan, modifiye edilmiş herhangi bir BTA yöntemi, optimum FÖB yerleşimi problemleri için global optimal çözümü bulma olasılığına kıyasla daha yüksek orana ve hıza sahiptir.



5. BENZETİM ÇALIŞMALARI

Bu tezde, FÖB'ün yapısı, çalışması, tarihçesi, şebekeye yerleştirilmesi ve şebekeye yerleştirme kuralları anlatılmıştır. Tezin devamında FÖB yerleştirilme algoritmalarından bahsedilmiş ve bu tezin konusu olan BTA ve MBTA'dan bahsedilmiştir. Bu bölümde de bu algoritmalar kullanılarak çeşitli test sistemleri ve gerçek şebekelere FÖB yerleşimi üzerine benzetim çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmaların tamamında FÖB'lerin kanal kısıtı göz ardı edilerek, gözlemleyebildiği bara sayısında sınır olmadan tüm baraları gözlemleyebileceği kabulü yapılmıştır.

Benzetim çalışmaları MATLAB ve PSAT programları üzerinden gerçekleştirilmiştir. BTA ve MBTA için MATLAB programı, Derin Öncelikli Arama Metodu, Graf Teorisi Metodu, Özyinelemeli (N-1) Kapsayan Ağaç Metodu, Minimum Kapsayan Ağaç Algoritması içinse PSAT programı kullanılmıştır [72], [73].

Benzetim çalışmaları iki ana bölümden oluşmaktadır. İlk bölümde BTA ve MBTA, IEEE 14 ve 30 baralı test sistemlerinde denenmiş, PSAT'ta bulunan FÖB yerleştirme algoritmaları ve literatürde aynı sistemlere uygulanmış farklı algoritmalarından elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır.

Algoritma test sistemlerinde başarılı sonuçlar verdikten sonra ikinci bölümde, BTA ve MBTA Türkiye Enterkonnekte Güç Sistemi'nin bir parçası olan Trakya Güç Sistemi'ne uygulanarak gerçek bir güç sistemi üzerine optimal FÖB yerleşimi gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda PSAT'ta bulunan FÖB yerleştirme algoritmaları ile de yerleşim çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen veriler tablolar halinde aktarılmış ve açıklanmıştır.

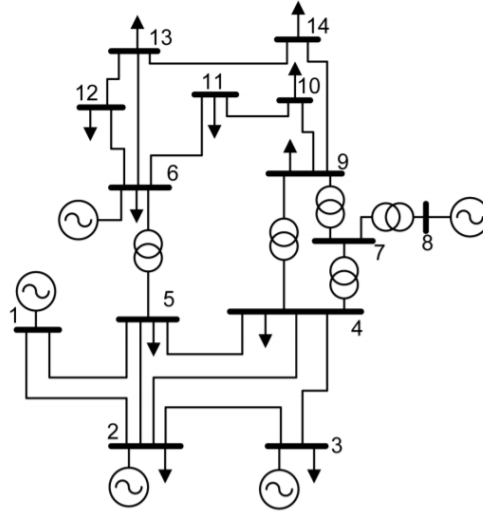
5.1. IEEE TEST SİSTEMLERİNE OPTİMAL FÖB YERLEŞİMİ

Geliştirilen ve mevcutta bulunan algoritmalar ya da sistemler bir test alanında denenmektedir. Bu sebeple bu tezde kullanılan algoritmalar da IEEE test sistemlerinde denenmiştir. Test için IEEE 14 ve 30 baralı test sistemleri seçilmiştir.

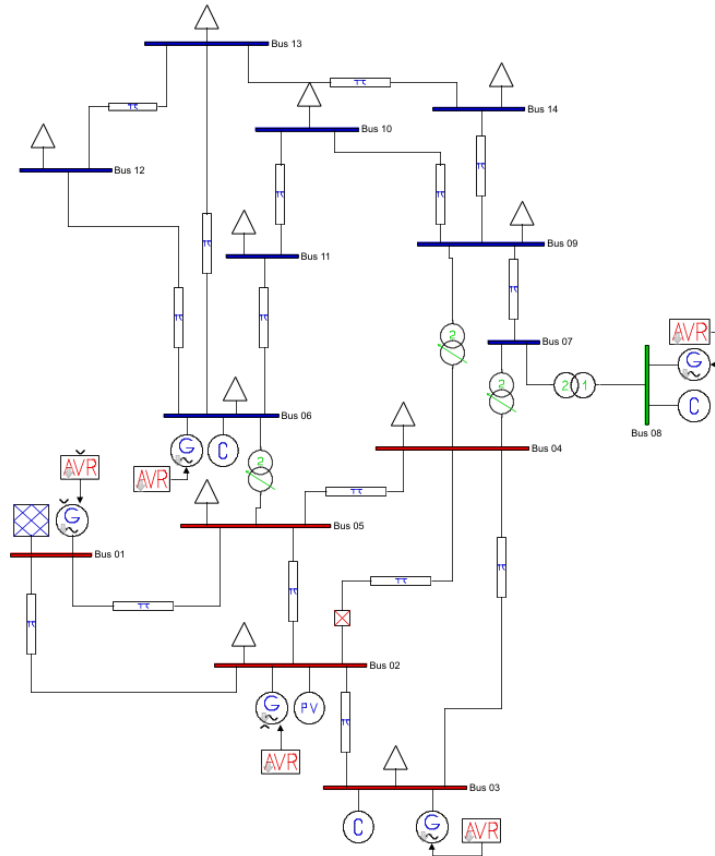
5.1.1. 14 Baralı Test Sistemine Optimal FÖB Yerleşimi

14 baralı IEEE test sistemi, 5 adet generatör, 20 hat ve 14 baradan oluşmaktadır. 14 baralı

sistem üzerine BTA ve MBTA ile optimal yerleşim gerçekleştirilmiştir. Sistem PSAT üzerinde de modellenerek FÖB yerleşimleri de gerçekleştirilmiştir. IEEE 14 baralı test sisteminin tek hat şeması Şekil 5.1’de ve PSAT modeli Şekil 5.2’de verilmiştir [73].



Şekil 5.1. IEEE 14 baralı sistemin tek hat şeması.



Şekil 5.2. IEEE 14 baralı sistemin PSAT modellemesi.

PSAT üzerinde yapılan FÖB yerleşiminde, Derin Öncelikli Arama Metodu, Graf Teorisi Metodu ve Özyinelemeli (N-1) Kapsayan Ağaç Metodu kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. IEEE 14 baralı test sistemi için gerekli FÖB sayıları.

Kullanılan Algoritma	Yerleştirilen FÖB Sayısı
Modifiyeli Benzetiilmiş Tavlama Algoritması	3
Benzetiilmiş Tavlama Algoritması	3
Diferansiyel Evrim Algoritması [74]	4
Genetik Algoritma [75]	4
Parçacık Sürü Optimizasyonu [76]	4
Derin Öncelikli Arama Metodu	6
Graf Teorisi Metodu	5
Özyinelemeli (N-1) Kapsayan Ağaç Metodu	8

IEEE 14 baralı test sistemine yapılan optimal FÖB yerleştirme sonuçları için Çizelge 5.1 incelendiğinde, MATLAB’de BTA ve MBTA ile yapılan optimal yerleşimde algoritmaların 3 tane FÖB ile tüm sistemi gözlemlenebilir kıldığı görülmektedir. IEEE 14 baralı sistem üzerine yapılmış çalışmalar incelendiğinde; DEA, GA ve PSO’nun 4 adet FÖB ile sistemi gözlemlenebilir kıldığı görülmüştür. Aynı sistem PSAT’ta modellenip FÖB yerleşimleri gerçekleştirildiğinde Derin Öncelikli Arama Metodu 6, Graf Teorisi Metodu 5 ve Özyinelemeli (N-1) Kapsayan Ağaç Metodu ise 8 tane FÖB ile tam gözlenebilirlik sağladığı görülmüştür.

IEEE 14 baralı test sisteminin tamamıyla gözlemlenebilmesi için optimal olarak yerleştirilen FÖB'lerin hangi baralara yerleştirildiği Çizelge 5.2'de verilmiştir.

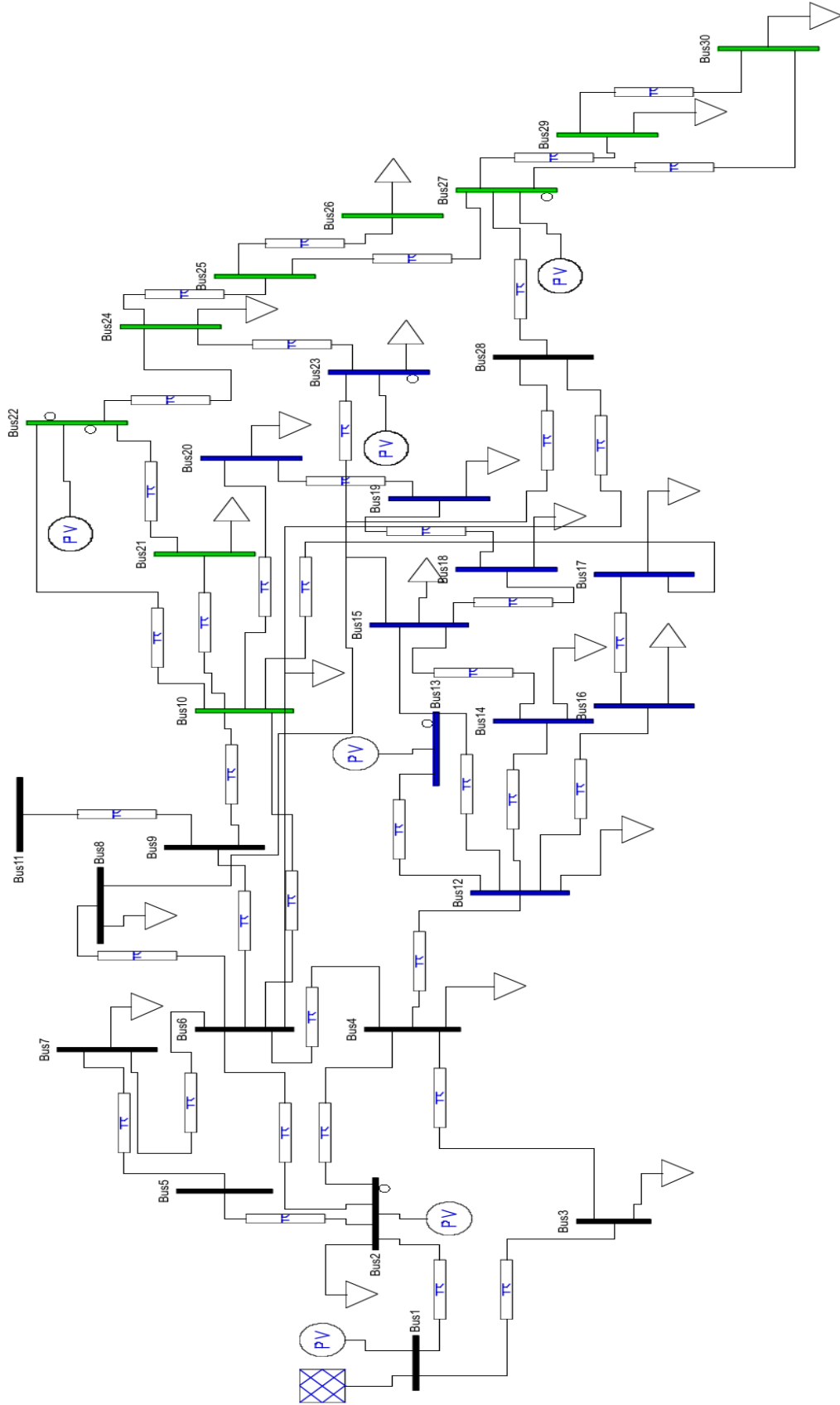
Çizelge 5.2. IEEE 14 baralı test sistemi için FÖB'lerin yerleştirildikleri baralar.

Kullanılan Algoritma	FÖB'lerin Yerleştirildikleri Baralar
Modifiyeli Benzetilmiş Tavlama Algoritması	2, 6, 9
Benzetilmiş Tavlama Algoritması	2, 6, 9
Diferansiyel Evrim Algoritması [74]	2, 6, 7, 9
Genetik Algoritma [75]	2, 6, 7, 9
Parçacık Sürü Optimizasyonu [76]	2, 6, 7, 9
Derin Öncelikli Arama Metodu	1, 4, 6, 8, 10, 14
Graf Teorisi Metodu	1, 4, 6, 10, 14
Özyinelemeli (N-1) Kapsayan Ağaç Metodu	2, 5, 6, 7, 9, 10, 13, 14

FÖB'lerin yüksek maliyeti göz önünde bulundurulduğunda en az sayıda FÖB ile tam gözlenebilirlik sağlanması gerekmektedir. IEEE 14 baralı test sistemi için yerleştirilen FÖB sayıları incelendiğinde, en iyi sonuçları BTA ve MBTA'nın verdiği görülmüştür. Bu da seçilen algoritmanın diğer algoritmalarından daha gelişmiş olduğu ve daha iyi sonuçlar sağladığının göstergesidir.

30 baralı IEEE test sistemi, 6 adet generatör, 41 hat ve 30 baradan oluşmaktadır. 30 baralı sistem üzerine BTA ve MBTA ile optimal yerleşim gerçekleştirilmiştir. Sistem PSAT üzerinde de modellenerek FÖB yerleşimleri de gerçekleştirilmiştir. IEEE 30 baralı test sisteminin tek hat şeması Şekil 5.3'te ve PSAT modeli Şekil 5.4'te verilmiştir [77].





Şekil 5.4. IEEE 30 baralı sistemin PSAT modellemesi.

PSAT üzerinde yapılan FÖB yerleşiminde, Derin Öncelikli Arama Metodu, Graf Teorisi Metodu ve Özyinelemeli (N-1) Kapsayan Ağaç Metodu kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 5.3’te verilmiştir.

Çizelge 5.3. IEEE 30 baralı test sistemi için gerekli FÖB sayıları.

Kullanılan Algoritma	Yerleştirilen FÖB Sayısı
Modifiyeli Benzetilmiş Tavlama Algoritması	-7
Benzetilmiş Tavlama Algoritması	8
Diferansiyel Evrim Algoritması [70]	10
Genetik Algoritma [71]	10
Parçacık Sürü Optimizasyonu [72]	10
Derin Öncelikli Arama Metodu	12
Graf Teorisi Metodu	11
Özyinelemeli (N-1) Kapsayan Ağaç Metodu	16

IEEE 30 baralı test sistemine yapılan optimal FÖB yerleştirme sonuçları için Çizelge 5.3 incelendiğinde, en iyi sonucu MBTA’nın sağladığı görülmüştür. MBTA 7 tane FÖB ile sistemin tamamını gözlemlenebilir kılmaktadır. BTA ise 8 tane FÖB ile tüm sistemi gözlemleyebilmektedir. IEEE 30 baralı sistem üzerine yapılmış çalışmalar incelendiğinde; DEA, GA ve PSO’nun 10 adet FÖB ile sistemi gözlemlenebilir kıldığı görülmüştür. Aynı sistem PSAT’ta modellenip FÖB yerleşimleri gerçekleştirildiğinde Derin Öncelikli Arama Metodu 12, Graf Teorisi Metodu 11 ve Özyinelemeli (N-1) Kapsayan Ağaç Metodu ise 16 tane FÖB ile tam gözlenebilirlik sağladığı görülmüştür.

IEEE 30 baralı test sisteminin tamamıyla gözlemlenebilmesi için optimal olarak yerleştirilen FÖB’lerin hangi baralara yerleştirildiği Çizelge 5.4’te verilmiştir.

Cizelge 5.4. IEEE 30 baralı test sistemi için FÖB’lerin yerleştirildikleri baralar.

Kullanılan Algoritma	FÖB’lerin Yerleştirildikleri Baralar
Modifiyeli Benzetilmiş Tavlama Algoritması	1, 5, 10, 12, 18, 24, 27
Benzetilmiş Tavlama Algoritması	1, 5, 6, 10, 12, 18, 24, 27
Diferansiyel Evrim Algoritması [70]	1, 5, 6, 9, 10, 12, 18, 24, 25, 27
Genetik Algoritma [71]	2, 4, 6, 9, 10, 12, 15, 19, 25, 27
Parçacık Sürü Optimizasyonu [72]	1, 5, 6, 9, 10, 12, 15, 19, 25, 27
Derin Öncelikli Arama Metodu	3, 5, 6, 11, 12, 17, 18, 20, 21, 24, 26, 27
Graf Teorisi Metodu	3, 5, 6, 12, 17, 18, 20, 22, 23, 25, 30
Özyinelemeli (N-1) Kapsayan Ağaç Metodu	1, 3, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 16, 19, 21, 24, 25, 27, 30

FÖB’lerin yüksek maliyeti göz önünde bulundurulduğunda en az sayıda FÖB ile tam gözlenebilirlik sağlanması gerekmektedir. IEEE 30 baralı test sistemi için yerleştirilen FÖB sayıları incelendiğinde IEEE 14 baralı sistem olduğu gibi, en iyi sonuçları MBTA’nın verdiği görülmüştür. Bu da seçilen algoritmanın diğer algoritmalarından daha gelişmiş olduğu ve daha iyi sonuçlar sağladığının göstergesidir.

5.2. TRAKYA GÜÇ SİSTEMİ’NE OPTİMAL FÖB YERLEŞİMİ

5.2.1. Trakya Güç Sistemi’ne Ait Bilgiler

FÖB’lerin optimal yerleşimini gerçek bir sisteme uyarlamak için Türkiye Enterkonekte Güç Sistemi’nin bir parçası olan Trakya Güç Sistemi’nin bir bölümü seçilmiştir. Sistem, 1177 km uzunluğunda 380 kV’luk enerji nakil hatları, 1547 km uzunluğunda 154 kV’luk enerji nakil hatları, içerisinde santrallerin de bulunduğu 12 adet 380 kV’luk trafo merkezi, 52 adet 154 kv’luk trafo merkezi ve 161 adet iletim hattından oluşmaktadır. Ayrıca sistemde 15’i 380 kV ve 74’ü de 154 kV’luk baralar olmak üzere 89 bara bulunmaktadır. Seçilen sistemin iletim haritası Şekil 5.5’te ve tek hat şeması Şekil 5.6’da verilmiştir [78]

Sistemdeki baralara ait bilgiler Çizelge 5.5’te verilmiştir.

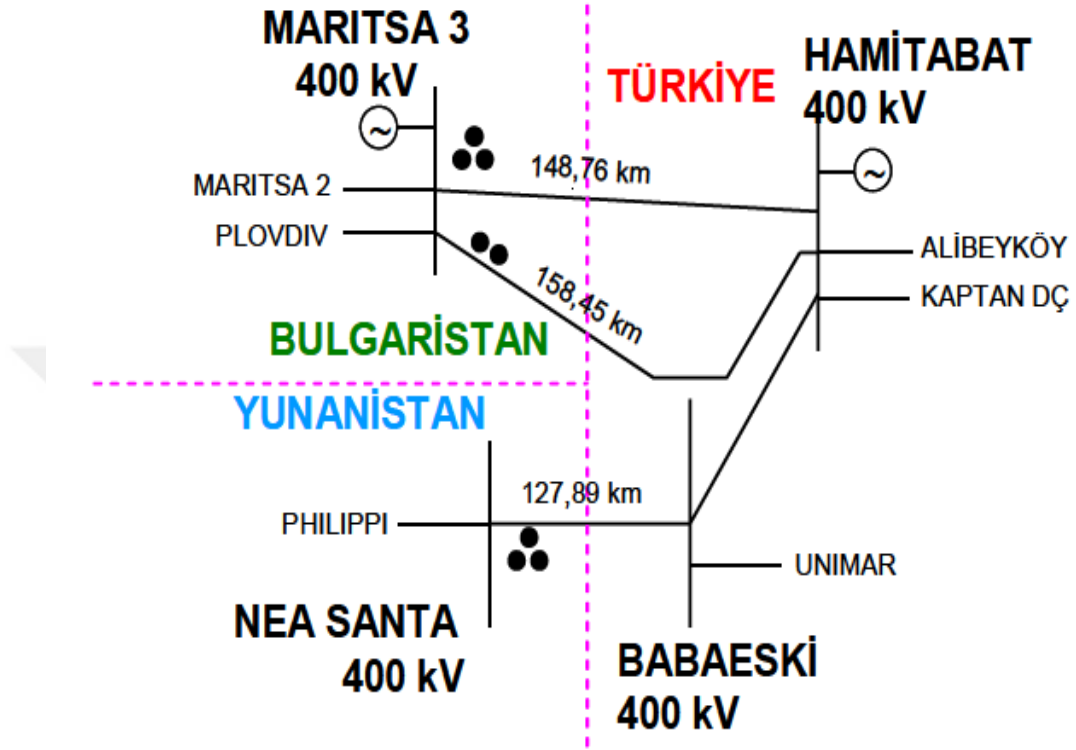
Çizelge 5.5. Trakya Güç Sistemi’ne ait bara bilgileri.

Bara Numarası	Bara Adı	Gerilim Seviyesi [kV]	Bara Numarası	Bara Adı	Gerilim Seviyesi [kV]
1	Babaeski	380	30	Kırklareli D.G	154
2	Hamitabat	380	31	Edirneçim	154
3	Babaeski	154	32	Edirne	154
4	Kaptançelik	380	33	Havsa	154
5	Unimar	380	34	Uzunköprü	154
6	Alibeyköy	380	35	Malkara	154
7	Hamitabat	154	36	Keşan	154
8	İkitelli	380	37	Gelibolu	154
9	Habipler	380	38	Kumlimanı	154
10	Ambarlı	380	39	Tekirdağ	154
11	Ambarlı-B1	154	40	Ulaş	154
12	Atışalanı	380	41	Çorlu	154
13	Davutpaşa	380	42	Tegesan	154
14	İkitelli-A	154	43	Büyükkarıştıran	154
15	İkitelli-B	154	44	Lüleburgaz	154
16	Davutpaşa-B1	154	45	Zorlu	154
17	Atışalanı-B2	154	46	Çerkezköy	154
18	Zekeriyaköy	380	47	Çerkezköy OSB	154
19	A.Doğalgaz	380	48	Hadımköy	154
20	Habipler	154	49	Trakya Elektrik	154
21	Paşaköy	380	50	Kıyıköy	154
22	Ümraniye	380	51	Botaş	154
23	Yıldıztepe	380	52	Silivri	154
24	Yıldıztepe-B1	154	53	Büyükçekmece	154
25	Alibeyköy-B1	154	54	Akçansa	154
26	Alibeyköy-B2	154	55	Davutpaşa T.M	154
27	Zekeriyaköy	154	56	Bağcılar-B1	154
28	Pınarhisar	154	57	Davutpaşa-B2	154
29	Kırklareli T.M	154	58	Bahçelievler-B1	154

Çizelge 5.5. (devam) Trakya Güç Sistemi bara bilgileri.

Bara Numarası	Bara Adı	Gerilim Seviyesi [kV]
59	Atışalanı-B1	154
60	Bağcılar-B2	154
61	Veliefendi-B2	154
62	Topkapı-B2	154
63	Aksaray-B2	154
64	Yıldıztepe-B2	154
65	Topkapı-B1	154
66	Aksaray-B1	154
67	Ambarlı Fuel Oil	154
68	Sultanmurat	154
69	Beylikdüzü-B2	154
70	Ambarlı-B2	154
71	Yenibosna	154
72	İçdaş	154
73	Bahçelievler-B2	154
74	Veliefendi-B2	154
75	Sağmalcılar	154
76	Küçükköy	154
77	Taşoluk	154
78	Bahçeşehir	154
79	Beylikdüzü-B1	154
80	Esenyurt	154
81	Maslak	154
82	Levent	154
83	Etiler	154
84	Vaniköy	154
85	Ümraniye	154
86	Kasımpaşa	154
87	Şişli	154
88	Silahtar	154
89	Ambarlı T.M	154

Trakya Güç sistemi önemli özelliklerden birisi, Bulgaristan ve Yunanistan üzerinden yapılan bağlantılar ile Türkiye elektrik şebekesinin Avrupa Kıtası senkron bölgesi şebekesine bağlanmasını sağlamasıdır. Şekil 5.7’de Trakya Güç Sistemi’nin Avrupa bağlantısının tek hat şeması verilmiştir [79].



Şekil 5.7. Trakya Güç Sistemi’nin Avrupa bağlantısının tek hat şeması.

5.2.2. Trakya Güç Sistemi’ne Optimal FÖB Yerleşiminin Gerçekleştirilmesi

IEEE 14 ve 30 baralı test sistemleri üzerinde BTA ve MBTA ile optimal yerleşimler gerçekleştirildikten sonra Trakya Güç Sistemi parametreleri kullanılarak MATLAB üzerinde BTA ve MBTA ile optimal FÖB yerleşimi gerçekleştirilmiştir. Aynı sistem PSAT üzerinde de modellenerek Derin Öncelikli Arama Metodu, Graf Teorisi Metodu ve Minimum Kapsayan Ağaç Metodu ile de FÖB yerleşimleri gerçekleştirilmiştir. Trakya Güç Sistemi’nin PSAT modellemesi Şekil 5.8’de verilmiştir.

Trakya Güç Sistemi'ne optimal FÖB yerleşimi gerçekleştirildikten sonra elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Çizelge 5.6. Trakya Güç Sistemi için gerekli FÖB sayıları.

Kullanılan Algoritma	Yerleştirilen FÖB Sayısı
Modifiyeli Benzetilmiş Tavlama Algoritması	27
Benzetilmiş Tavlama Algoritması	34
Derin Öncelikli Arama Metodu	37
Graf Teorisi Metodu	36
Özyinelemeli (N-1) Kapsayan Ağaç Metodu	42

Çizelge 5.6'da sistemin tamamını gözlemlenebilir hale getirmek için yerleştirilmesi gereken FÖB sayıları verilmiştir. MBTA ile 27 adet FÖB kullanılarak Trakya Güç Sistemi'nin tamamı gözlemlenebilir hale gelmektedir. BTA ile ise 34 adet FÖB yerleşimi ile sistem gözlemlenebilir hale gelmektedir. Karşılaştırma yapmak için PSAT'ta modellenen sisteme Derin Öncelikli Arama Metodu, Graf Teorisi Metodu ve Minimum Kapsayan Ağaç Metodu uygulanmıştır. Derin Öncelikli Arama Metodu 37 adet, Graf Teorisi Metodu 36 adet ve Minimum Kapsayan Ağaç Metodu ise 42 adet FÖB yerleştirerek sistemin tamamını gözlemlenebilir hale getirmektedir. Sonuçlar incelendiğinde en iyi sonucu MBTA'nın verdiği görülmektedir. Trakya Güç Sistemi için FÖB'lerin yerleştirilmesi gereken baralar Çizelge 5.7'de gösterilmiştir. MBTA için birden fazla optimal sonuç elde edilmiştir. Çizelgede gösterilen numaraların hangi baralara ait olduğu Çizelge 5.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 5.7. Trakya Güç Sistemi için FÖB’lerin yerleştirildikleri baralar.

Kullanılan Algoritma	FÖB’lerin Yerleştirildikleri Baralar
Modifiyeli Benzetilmiş Tavlama Algoritması	2, 6, 8, 17, 18, 19, 20, 29, 32, 34, 35, 38, 41, 44, 46, 46, 53, 56, 57, 63, 65, 67, 71, 81, 83, 86, 88
	2, 3, 6, 8, 17, 18, 19, 20, 25, 29, 32, 35, 38, 41, 44, 46, 53, 56, 57, 63, 65, 67, 71, 79, 83, 86, 88
Benzetilmiş Tavlama Algoritması	2, 3, 8, 11, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 25, 29, 32, 35, 38, 41, 44, 46, 49, 53, 56, 57, 61, 63, 65, 67, 71, 79, 81, 83, 86, 88
Derin Öncelikli Arama Metodu	2, 3, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 25, 29, 32, 35, 38, 41, 45, 47, 49, 50, 54, 60, 62, 68, 72, 73, 74, 79, 84, 85, 86, 87, 88, 89
Graf Teorisi Metodu	2, 3, 11, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 25, 29, 32, 35, 38, 41, 45, 47, 49, 50, 54, 60, 62, 68, 72, 73, 74, 79, 84, 85, 86, 87, 88, 89
Özyinelemeli (N-1) Kapsayan Ağaç Metodu	2, 3, 4, 6, 8, 9, 11, 16, 17, 18, 20, 24, 26, 29, 32, 35, 38, 40, 41, 42, 43, 44, 46, 49, 53, 55, 56, 57, 59, 61, 62, 63, 64, 67, 70, 71, 73, 76, 79, 80, 81, 83

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, güç sistemlerinin anlık olarak izlenmesine yönelik olarak geliştirilen Fazör Ölçüm Birimleri'nin şebekelere optimal yerleşimi üzerine çalışılmıştır. Çalışmada Fazör Ölçüm Birimi teknolojisi, tarihçesi ve gelişimi, yapısı, çalışması, standartları ve şebekeye yerleştirme kurallarından bahsedilmiştir. Fazör Ölçüm Birimi teknolojisi oldukça maliyetli bir sistemdir. Bu nedenle şebekeler için her noktaya yerleşimleri maliyeti önemli ölçüde arttıracığından, şebekeye optimal bir şekilde yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu da tezin ana konusunu oluşturmaktadır. Tezin ana konusu olan Fazör Ölçüm Birimleri'nin şebekeye optimal yerleşimi için Modifiyeli Benzetilmiş Tavlama Algoritması ve Benzetilmiş Tavlama Algoritması seçilmiş ve kullanılmıştır. Seçilen algoritmaları test etmek amacı ile IEEE 14 ve 30 baralı test sistemleri kullanılmıştır. Algoritmanın doğruluğunu teyit etmek amacı ile aynı sistem üzerinde daha önce yapılmış çalışmalar incelenerek karşılaştırma yapılmıştır. Modifiyeli Benzetilmiş Tavlama Algoritması test sistemleri üzerinde başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür. Algoritma test edildikten sonra Türkiye Enterkonnekte Güç Sistemi'nin bir parçası olan Trakya Güç Sistemi'nin bir bölümü üzeri uygulanmıştır. Trakya Güç Sistemi aynı zamanda PSAT'ta da modellenerek programın kendi içerisinde bulunan Fazör Ölçüm Birimi yerleştirme algoritmaları ile yerleşimler gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde Modifiyeli Benzetilmiş Tavlama Algoritması'nın optimal sonuçlar sağladığı görülmüştür.

Trakya Güç Sistemi'ne yerleşimi yapılan Fazör Ölçüm Birimleri ile şebekelerden anlık olarak akım ve gerilim fazör ölçümleri alınabilmektedir. Anlık olarak alınan bu bilgiler sayesinde bağlı oldukları şebekeler üzerinde gerilim kararsızlığı, gerilim çökmesi ve aşırı yüklenme gibi gerçekleşmesi muhtemel olumsuz olayları, gerçekleşmeden operatöre aktararak aksiyon alınmasını sağlamaktadırlar. Bu bilgiler doğrultusunda operatörlere, enerji talebinin karşılanabilmesi için şebekenin kararlılık sınırlarına yakın bölgelerde çalıştırılmasına olanak verirler. Fazör Ölçüm Birimleri bir nevi bağlı oldukları güç sisteminin güvencesidir ve yerleştirildikleri sistemler için büyük önem taşımaktadırlar. Fazör Ölçüm Birimi kullanımı günden güne artmakta ve optimal yerleşim teknikleri de

sürekli geliştirilmektedir.

Daha önce IEEE test sistemleri üzerine optimal yerleşimlerin gerçekleştirildiği tez çalışmaları yapılmıştır ancak bu tez çalışması ile gelişmekte ve yaygınlaşmakta olan Fazör Ölçüm Birimi teknolojisinin ülkemizde bir sisteme optimal yerleştirilmesinin benzetim çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu tez çalışması, gelecek çalışmalar ve uygulamalar için temel oluşturmaktadır. Gelecek çalışmalarda, daha optimal algoritmalar geliştirilerek ülkemizin farklı bölümündeki güç sistemleri için ya da sistemin tamamı için optimal yerleşimler gerçekleştirilebilir.



7. KAYNAKLAR

- [1] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements in power systems," *IEEE Computer Applications in Power*, c. 6, sayı 2, ss. 10-15, 1993.
- [2] A. G. Phadke, "System of choice," *IEEE Power and Energy Magazine*, c. 6, sayı 5, ss. 20-22, 2008.
- [3] M. A. M. İpek, "Elektrik güç sistemlerinde geniş alan ölçüm sistemi ve fazör ölçüm birimi yerleşiminin incelemesi," Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [4] D. Ghosh, T. Ghose ve D. K. Mohanta, "Communication feasibility analysis for smart grid with phasor measurement units," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, c. 9, sayı 3, ss. 1486-1496, 2013.
- [5] K. P. Lien, C. W. Liu, C. S. Yu ve J. A. Jiang, "Transmission network fault location observability with minimal PMU placement," *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 21, sayı 3, ss. 1128-1136, 2006.
- [6] S. Chakrabarti ve E. Kyriakides, "Optimal placement of phasor measurement units for power system observability," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 23, sayı 3, ss. 1433-1440, 2008.
- [7] K. Jamuna ve K. S. Swarup, "Multi-objective biogeography based optimization for optimal PMU placement," *Applied Soft Computing*, c. 12, sayı 5, ss. 1503–1510, 2012.
- [8] N. H. A. Rahman, A. F. Zobaa ve M. Theodoridis, "Improved BPSO for optimal PMU placement," *50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, Stoke on Trent, İngiltere, 2015, ss. 1-4.
- [9] C. Peng, H. Sun, ve J. Guo, "Multi-objective optimal PMU placement using a non-dominated sorting differential evolution algorithm," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 32, sayı 8, ss. 886–892, 2010.
- [10] A. Mahari ve H. Seyed, "Optimal PMU placement for power system observability using BICA, considering measurement redundancy," *Electric Power Systems Research*, c. 103, ss. 78–85, 2013.
- [11] N. C. Koutsoukis, N. M. Manousakis, P. S. Georgilakis, ve G. N. Korres, "Numerical observability method for optimal phasor measurement units placement using recursive tabu search method," *IET Generation, Transmission & Distribution*, c. 7, sayı 4, ss. 347–356, 2013.
- [12] B. Gou, "Generalized integer linear programming formulation for optimal PMU placement," *IEEE Transactions on Power Systems* c. 23, sayı 3, ss. 1099–1104, 2008.
- [13] M. Hurtgen ve J. C. Maun, "Optimal PMU placement using Iterated Local Search," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 32, sayı 8, ss. 857–860, 2010.

- [14] K. Mazlumi ve H. Vahedi, "Optimal placement of PMUs in power systems based on bacterial foraging algorithm," *18th Iranian Conference on Electrical Engineering*, İsfahan, İran, 2010, ss. 885–888.
- [15] V. K. Tran ve H. S. Zhang, "Optimal PMU placement using modified greedy algorithm", *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, c. 29, sayı 1, ss. 99–109, 2018.
- [16] A. I. Al-Odienat, K. El-Awasa, M. Al-Momani ve S. Al-Gharaibah, "connectivity matrix algorithm: a new optimal phasor measurement unit placement algorithm," *The 3rd Asia Conference on Energy and Electrical Engineering*, Kuala Lumpur, Malezya, 2020, ss. 1-9.
- [17] A. A. Ibrahim, K. Khalid, H. Shareef ve N. A. M. Kamari, "A bounded exhaustive search technique for optimal phasor measurement unit placement in power grids," *Symmetry*, c.12, sayı 12, ss. 1-13, 2020.
- [18] T. Subbaiyan ve Y. Venkatachalam, "PSO based optimal phasor measurement unit placement considering measurement redundancy," *3rd International Conference on Energy, Power and Environment: Towards Clean Energy Technologies*, Shillong, Hindistan, 2021, ss. 1-6.
- [19] A. Abdulkareem, D. Ogbe, T. Shomefun ve F. Agbetuyi, "Optimal PMU placement using genetic algorithm for 330kv 52-bus nigerian network," *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, c. 6, ss. 597-604, 2021.
- [20] M. Nazari-Heris ve B. Mohammadi-Ivatloo, "Application of heuristic algorithms to optimal PMU placement in electric power systems: An updated review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 50, ss. 214–228, 2015.
- [21] N. M. Manousakis, G. N. Korres ve P. S. Georgilakis, "Taxonomy of PMU placement methodologies," *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 27, sayı 2, ss. 1070–1077, 2012.
- [22] M. Sefid ve M. Rihan, "Optimal PMU placement in a smart grid: An updated review," *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, c. 8, sayı 1, ss. 59–69, 2019.
- [23] W. Yuill, A. Edwards, S. Chowdhury ve S. P. Chowdhury, "Optimal PMU placement: A comprehensive literature review," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, Amerika, 2011, ss. 1–8.
- [24] X. Tai, D. Marelli, E. Rohr ve M. Fu, "Optimal PMU placement for power system state estimation with random component outages", *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, c. 51, ss. 35–42, 2013.
- [25] X. Dongjie, H. Renmu, W. Peng, ve X. Tao, "Comparison of several PMU placement algorithms for state estimation", *IEE Conference Publication*, c. 1, ss. 32–35, 2004.
- [26] G. T. Heydt, C. C. Liu, A. G. Phadke, ve V. Vittal, "Solutions for the crisis in electric power supply", *IEEE Computer Applications in Power*, c. 14, sayı 3, ss. 22–30, 2001.
- [27] D. Singh, "Optimization of phasor measurement unit," Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği, Elektronik ve Elektrik Mühendisliği Bölümü, Lovely Professional University, Pencap, Hindistan, 2017.

- [28] C. Rehtanz ve J. Bertsch, "Wide area measurement and protection system for emergency voltage stability control," *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, New York, Amerika, c. 2, 2002, ss. 842–847.
- [29] R. B. Sharma ve G. M. Dhole, "Wide Area Measurement Technology in Power Systems," *Procedia Technology*, c. 25, ss. 718–725, 2016.
- [30] A. G. Phadke ve J. S. Thorp, "History and applications of phasor measurements," *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, Atlanta, Amerika, 2006, ss. 331–335.
- [31] K. E. Martin vd., "IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems," *IEEE Transactions on Power Delivery*, c. 13, sayı 1, ss. 1-65, 1998.
- [32] *IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems*, IEEE Std 1344-1995(R2001), 1994.
- [33] J. De La Ree, V. Centeno, J. S. Thorp ve A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurement applications in power systems," *IEEE Transactions on Smart Grid*, c. 1, sayı 1, ss. 20–27, 2010.
- [34] B. M. Nikumbh, "Optimal placement of PMUs considering logical topology of communication medium and power system observability," Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği, Elektrik Mühendisliği Departmanı, Tromso of University, Tromso, Norveç, 2016.
- [35] *IEEE Standart for Synchrophasors for Power Systems*, IEEE Std. C37.118-2005, 2005.
- [36] A. G. Phadke, "Synchronized phasor measurements - a historical overview," *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference*, c. 1, ss. 476–479, 2002.
- [37] A. G. Phadke, T. Hibka, M. Ibrahim ve M. G. Adamiak, "Microcomputer Based Symmetrical Component Distance Relay," ss. 47–55, 1979.
- [38] Macrodyne Technologoies. (2021, 4 Nisan). [Online]. Erişim: <http://www.proviro.com/pdf/1690.pdf>
- [39] A. G. Phadke, J. S. Thorp, *Synchronized Phasor Measurements and Their Applications*, 1. Baskı, New York, Amerika: Springer, 2008, böl. 5, ss. 92-98.
- [40] N. H. Abdurrahman, "Optimal allocation of phasor measurement units using practical constraints in power system," Doktora tezi, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Brunel University London, Londra, İngiltere, 2016.
- [41] G. Stenbakken, T. Nelson, M. Zhou ve V. Centeno, "Reference values for dynamic calibration of PMUs," *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Waikoloa, Amerika, 2008, ss. 1-6.
- [42] A. G. Phadke, J. S. Thorp, *Computer Relaying For Power Systems*, 2. Baskı, Amerika: Wiley, böl. 10, 2009, ss. 291-300.
- [43] K. E. Martin, "Synchrophasor standards development - IEEE C37.118 & IEC 61850," *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Kauai, Amerika, 2011, ss. 1-8.

- [44] K. E. Martin, "Synchrophasor standards and guides for the smart grid," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Vancouver, Kanada, 2013, ss. 1–5.
- [45] *IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems*, IEEE Std. C37.118.1-2011 (Revision of IEEE Std. C37.118-2005), 2011.
- [46] *IEEE Standard for Synchrophasor Data Transfer for Power Systems*, IEEE Std. C37.118.2-2011 (Revision of IEEE Std. C37.118-2005), 2011.
- [47] *IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems - Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements*, IEEE Std. C37.118.1a-2014 (Amendment to IEEE Std. C37.118.1-2011), 2014.
- [48] *Communication Networks and System in substations – Indroduction and overview*, IEC TR 61850-1 Std., 2003.
- [49] *IEEE Guide for Synchronization, Calibration, Testing, and Installation of Phasor Measurement Units (PMUs) for Power System Protection and Control*, IEEE Std. C37.242-2013, 2013.
- [50] *IEEE Guide for Phasor Data Concentrator Requirements for Power System Protection, Control, and Monitoring*, IEEE Std. C37.244-2013, 2013.
- [51] J. Bertsch, M. Zima, A. Surányi, C. Carnal, C. Rehtanz ve M. Larsson, "Experiences with and perspectives of the system for wide area monitoring of power systems," *CIGRE/IEEE PES International Symposium Quality and Security of Electric Power Delivery Systems*, Montreal, Kanada, 2003 ss. 5–9.
- [52] J. Zhu, D. Hwang ve A. Sadjadpour, "Real time congestion monitoring and management of power systems," *Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific*, Dalian, Çin, 2005, ss. 1–5.
- [53] D. Novosel, K. Vu, V. Centeno, S. Skok ve M. Begovic, "Benefits of synchronized-measurement technology for power-grid applications," *Proceedings of the Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, Waikoloa, Amerika, 2007, ss. 1–9.
- [54] T. L. Baldwin, L. Mili, M. B. Boisen ve R. Adapa, "Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 8, sayı 2, ss. 707–715, 1993.
- [55] G. R. Krumpholz, K. A. Clements ve P. W. Davis, "Power system observability: a practical algorithm using network topology," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, c. PAS-99, sayı 4, ss. 1534-1542, 1980.
- [56] H. Mori ve S. Tsuzuki, "A Fast Method for Topological Observability Analysis Using a Minimum Spanning Tree Technique", *IEEE Transactions on Power Systems*, c. 6, sayı 2, ss. 491–500, 1991.
- [57] B. Bozali ve A. Öztürk, "Türkiye 400 kV’luk güç sistemi için optimal fazör ölçüm birimlerinin yerleşim yerlerinin belirlenmesi," *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 9, sayı 1, ss. 278–292, 2021.
- [58] C. Su ve Z. Chen, "Optimal Placement of Phasor Measurement Units with New Considerations," *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference*, Çengdu, 2010, ss. 1-4.

- [59] M. M. El Hosainy, "Improved fault-tolerant PMU placement using algebraic connectivity of graphs," Yüksek lisans tezi, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği, Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği Departmanı, The American University in Cairo, Kahire, Mısır, 2017.
- [60] N. H. A. Rahman ve A. F. Zobaa, "Optimal PMU placement using topology transformation method in power systems", *Journal of Advanced Research*, c. 7, sayı 5, ss. 625–634, 2016.
- [61] A. Ahmadi, Y. Alinejad-Beromi ve M. Moradi, "Optimal PMU placement for power system observability using binary particle swarm optimization and considering measurement redundancy," *Expert Systems with Applications*, c. 38, sayı 6, ss. 7263–7269, 2011.
- [62] A. Onan, "Metasezgisel Yöntemler ve Uygulama Alanları", *Çukurova Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, c. 17, sayı 2, ss. 113–128, 2013.
- [63] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt ve M. P. Vecchi, "Optimization by simulated annealing", *Science*, c. 220, sayı 4598, ss. 671–680, 1983.
- [64] Y. Avcı, "Sonlu eleman modeli güncellemesi tekniğinde benzetilmiş tavlama algoritması kullanılarak mekanik sistemlerde hasar tespiti," Yüksek lisans tezi, İnşaat Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [65] B. Haznedar, "Benzetilmiş tavlama algoritması ile adaptif ağ tabanlı bulanık mantık çıkarım sisteminin (ANFIS) eğitilmesi," Doktora tezi, Bilgisayar Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, 2017.
- [66] N. Metropolis, A. W. Rosenbluth, M. N. Rosenbluth, A. H. Teller ve E. Teller, "Equation of state calculations by fast computing machines", *The Journal of Chemical Physics*, c. 21, sayı 6, ss. 1087–1092, 1953.
- [67] R. W. Eglese, "Simulated annealing: A tool for operational research", *European Journal of Operational Research*, c. 46, sayı 3, ss. 271–281, 1990.
- [68] M. Gerşil ve A. Alkaya, "Gezgin Satıcı Problemi İçin Sezgisel Metotların Performans Analizi", *İstanbul Ticaret Üniversitesi XI. Üretim Araştırmaları Sempozyumu*, ss. 405–412, 2011.
- [69] A. Van Breedam, "Comparing descent heuristics and metaheuristics for the vehicle routing problem", *Computers and Operations Research*, c. 28, sayı 4, ss. 289–315, 2001.
- [70] K. Ergün, "Kesme ve paketleme problemleri ve araştırmaya yönelik bir metot geliştirilmesi ve bu metodun etkinliğinin sınanması," Yüksek lisans tezi, Endüstri Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir Üniversitesi, Balıkesir, Türkiye, 2004.
- [71] P. Xu ve B. F. Wollenberg, "Power System Observability and Optimal Phasor Measurement Unit Placement", Department of Electrical and Computer Engineering College of Science and Engineering, University of Minnesota, Amerika, Proje Raporu, 2015.

- [72] L. Vanfretti ve F. Milano, “Experience with PSAT (Power System Analysis Toolbox) as free and open-source software for power system education and research”, *International Journal of Electrical Engineering Education*, c. 47, sayı 1, ss. 47–62, 2010.
- [73] S. Kodsı and C. Canizares, “Modeling and simulation of IEEE 14-bus system with FACTS controllers”, University of Waterloo, Canada, Rep. 2003-3, 2003.
- [74] A. H. Al-Mohammed, M. A. Abido ve M. M. Mansour, “Optimal PMU placement for power system observability using differential evolution,” *11th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications*, Cordoba, İspanya, 2011, ss. 277-282.
- [75] P. P. Bedekar, S. R. Bhide ve V. S. Kale, “Optimum PMU placement considering one line/one PMU outage and maximum redundancy using genetic algorithm”, *8th Electrical Engineering/ Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology Association of Thailand – Conference*, Khon Kaen, Tayland, 2011, ss. 688–691.
- [76] S. Chakrabarti, G. K. Venayagamoorthy ve E. Kyriakides, “PMU placement for power system observability using binary particle swarm optimization,” *Australasian Universities Power Engineering Conference*, Sidney, Avustralya, 2008, ss. 1-5.
- [77] Y. Muhammad, R. Khan, F. Ullah, A. Rehman, M. S. Aslam ve M. A. Z. Raja, “Design of fractional swarming strategy for solution of optimal reactive power dispatch”, *Neural Computing and Applications*, c. 32, sayı 14, ss. 10501–10518, 2020.
- [78] O. Uslu, “Türkiye elektrik iletim şebekesinin trakya bölümünün kontrollü çalışma bölgelerine ayrılmasının incelenmesi,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2008.
- [79] K. Kaya, “Esnek alternatif akım iletim sistemleri kontrolörlerinin incelenmesi ve şebeke üzerindeki etkileri,” Yüksek lisans tezi, Elektrik Mühendisliği, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, 2006.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Emre ŞIK

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Müh.	Düzce Üniversitesi	2021
Lisans	Elektrik-Elektronik Müh.	Düzce Üniversitesi	2018
Lise	Elektrik Elektronik Teknolojisi	Erkan Avcı Teknik Lisesi	2013

YAYINLAR

E. Şık, S. Tosun, “Güç Sisteminin L İndeksi ile Analizi”, *Uluslararası Marmara Fen ve Sosyal Bilimler Kongresi (IMASCON)*, Kocaeli, Türkiye, 2019, c.1, ss 268-274.

E. Şık, S. Tosun, “Benzetilmiş Tavlama Algoritması İle Fazör Ölçüm Birimlerinin Optimal Yerleşimi,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 9, sayı 2, ss. 746–758, 2021.