

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE TRANSFORMATÖRLERİN
YAŞLANMASI KOŞULLARI ALTINDA VERİMLİLİK ARTIŞI AMAÇLI
İŞLETİM KOŞULLARININ İYİLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

Banu ÖZTÜRK UÇAR

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

EYLÜL 2020

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE TRANSFORMATÖRLERİN
YAŞLANMASI KOŞULLARI ALTINDA VERİMLİLİK ARTIŞI AMAÇLI
İŞLETİM KOŞULLARININ İYİLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI**

DOKTORA TEZİ

**Banu ÖZTÜRK UÇAR
(504992404)**

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK

EYLÜL 2020

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504992404 numaralı Doktora Öğrencisi Banu ÖZTÜRK UÇAR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE TRANSFORMATÖRLERİN YAŞLANMASI KOŞULLARI ALTINDA VERİMLİLİK ARTIŞI AMAÇLI İŞLETİM KOŞULLARININ İYİLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Recep YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Önder GÜLER
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğretim Üyesi Gürkan SOYKAN
Bahçeşehir Üniversitesi

Teslim Tarihi : 11 Temmuz 2020

Savunma Tarihi : 17 Eylül 2020





Anneme, babama ve aileme;



ÖNSÖZ

Doktora tez çalışmamın oluşturulması sürecinde desteklerini esirgemeyen, engin bilgi birikimi ve tecrübesiyle her zaman yanımda olan, saygı değer hocam Prof. Dr. Mustafa BAĞRIYANIK'a teşekkürü bir borç bilirim.

Jüri üyesi olarak mesleki bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşan hep yüreklendiren bölümümüz öğretim üyesi Prof. Dr. Güven KÖMÜRGÖZ'e teşekkürlerimi sunarım. Doktora tez çalışmamda değerli katkıları olan jüri üyesi hocam Doç. Dr. Recep YUMURTACI'ya da teşekkür ederim.

Çalışmamda kullandığım ölçüm değerlerine ulaşmamda yardımlarını ve tecrübelerini esirgemeyen Dr. Mühendis M. Alp BATMAN'a teşekkürlerimi sunarım.

Temmuz 2020

Banu ÖZTÜRK UÇAR
(Elektrik Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	3
1.2 Literatür Araştırması	4
1.3 Tezin İçeriği	10
2. ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKESİ YENİDEN YAPILANDIRILMASI	11
2.1 Dağıtım Şebekesinin Yapılandırmasının Amaçları.....	12
2.1.1 Kayıpların azaltılması	12
2.1.2 Yük dengelemesi.....	12
2.1.3 Gerilim profilinin iyileştirilmesi	12
2.1.4 Sistemin toparlanmasının gerçekleştirilmesi.....	13
2.1.5 Çoklu amaçlar	13
2.2 DŞYY Matematiksel Modeli.....	13
2.2.1 Tek amaçlı DŞYY problemi.....	13
2.2.2 Çok amaçlı DŞYY problemi	14
2.2.2.1 Çoklu amaçların ağırlıklı toplamı	14
2.2.2.2 Bulanık çoklu amaçların toplamı	14
2.3 DŞYY Çözüm Yöntemleri	15
3. TRANSFORMATÖR ÖMÜR HESAPLARI	17
3.1 Elektriksel Donanımda Ömür ve Yaşlanma.....	17
3.1.1 Banyo küveti eğrisi (bathtub curve).....	18
3.2 Transformatör Ömür Kaybının Belirlenmesi	19
3.2.1 Transformatör ömür kaybı için en sıcak nokta hesabı	21
3.2.1.1 IEEE C57.91-2011 standartına göre hesaplar	21
3.2.1.2 Ortam sıcaklığına göre üst yağ sıcaklığı değişimi	22
3.2.1.3 Yağ sıcaklığına göre en sıcak nokta sıcaklığı	23
4. TRANSFORMATÖR ÖMÜRLERİNİ İYİLEŞTİRİCİ SİSTEM İŞLETİM KOŞULLARININ BELİRLENMESİ	25
4.1 Eşitlik Kısıtları	25
4.2 Eşitsizlik Kısıtları.....	26
4.3 Topoloji Kısıtı	27
4.4 Transformatör Ömürlerini İyileştirici Sistem İşletim Koşullarının Sezgisel Algoritma ile Elde Edilmesi	27
4.4.1 Problemin kontrol değişkenlerinin belirlenmesi	27

4.4.2 Yöntemin akış şeması.....	28
4.4.3 Amaç ve uygunluk fonksiyonunun belirlenmesi.....	28
4.5 Problemin Genetik Algoritma ile Çözümü.....	30
5. FARKLI SENARYOLARIN İNCELENMESİ	33
5.1 Yük Değişiminin Transformator Ömrüne Etkileri	34
5.1.1 Fotovoltaik üretimin transformator ömrüne etkileri.....	35
5.1.2 Örnek sistem incelemesi.....	35
5.2 DŞYY İçin Örnek Sistem İncelemeleri	39
5.2.1 16 baralı örnek sistem uygulaması	39
5.2.1.1 Problemin GA ile çözümü.....	41
5.2.1.2 Problemin PSO ile çözümü	53
5.2.1.2.1 Şebeke kayıplarının dikkate alındığı durum ($\alpha_1=1, \alpha_2=0$).....	53
5.2.1.2.2 Şebeke kayıpları ve yaşlanmanın dikkate alındığı durum ($\alpha_1=1, \alpha_2=1$).....	54
5.2.1.3 Problemin TB ile çözümü.....	54
5.2.1.3.1 Şebeke kayıplarının dikkate alındığı durum ($\alpha_1=1, \alpha_2=0$).....	54
5.2.1.3.2 Şebeke kayıpları ve yaşlanmanın dikkate alındığı durum ($\alpha_1=1, \alpha_2=1$).....	56
5.2.2 TLoL algoritmasının 85 baralı örnek sistem uygulaması.....	59
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	67
EKLER.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	83

KISALTMALAR

DŞYY	: Dağıtım Şebekesi Yeniden Yapılandırması
YYP	: Yeniden Yapılandırma Problemi
GA	: Genetik Algoritma/Genetic Algorithm
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu / Partical Swarm Optimization
HBMO	: Bal Arısı Çiftleşme Optimizasyonu/Honey Bee Mating Optimization
ACO	: Karınca Koloni Optimizasyonu/ Ant Colony Optimization
HSA	: Uyum Arama Algoritması/Harmony Search Algorithm
HBB-BC	: Hybrid Big Bang-Big Crunch Algorithm
CSA	: Guguk Kuşu Arama Algoritması/Cuckoo Search Search Algorithm
SFLA	: Kurbağa Sıçrama Algoritması/Shuffled Frog Leaping Algorithm



SEMBOLLER

V_j	: j. bara gerilimi (düğüm gerilimi)
I_i	: i. hat akımı
S_k	: k. transformatörün görünür gücü
FAA	: Transformatör yaşlanma hızı
$FEQA$	: Transformatör eşdeğer yaşlanma hızı
$TLoL$	: Transformatör ömrünün azalması
ΘH	: Transformatör en sıcak nokta sıcaklığı
ΘTo	: Transformatör üst yağ sıcaklığı
$\Delta \Theta_{TO}$	: Ortam sıcaklığına göre üst yağ sıcaklık değişimi
$\Delta \Theta_{TO,i}$	: Ortam sıcaklığına göre üst yağ sıcaklık değişiminin ilk değeri
$\Delta \Theta_{TO,u}$	: Ortam sıcaklığına göre üst yağ sıcaklık değişiminin son değeri
$\Delta \Theta_H$	: Üst yağ sıcaklığına göre en sıcak nokta sıcaklık değişimi
$\Delta \Theta_{H,i}$	: Üst yağ sıcaklığına göre en sıcak nokta sıcaklık değişiminin ilk değeri
P_i	: i. baraya giren aktif güç
Q_i	: i. baraya giren reaktif güç
Y	: Admitans matrisi
$P_{tüketim,i}$	: i. tüketicinin aktif güç tüketimi
$P_{FV,i}$	: i. FV üretim
$P_{kayıp,i}$	: i. hat elemanındaki toplam aktif güç kaybı
$P_{tr,net}$	: Transformatörden çekinet net aktif güç değeri
$\Delta P_{kayıp}(\%)$	: Aktif güç kayıplarındaki değişim yüzdesi
$P_{kayıp-BC(kWh)}$	: Temel anahtar konumundaki aktif kayıplar

$P_{\text{kayıp-ETLoL(kWh)}}$	: Eniyileme sonrasındaki aktif kayıplar
$TLoL_{BC}$	:.Temel durumdaki transformatör ömür kaybı yüzdesi
$TLoL_{ETLoL}$	: Eniyileme sonrasındaki transformatör ömür kaybı yüzdesi



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Ceza katsayılarının kısıtlara göre aldığı değerler.....	30
Çizelge 5.1 : Endüstriyel tip yük için TLoL algoritmasının GA çözüm sonuçları.....	50
Çizelge 5.2 : Evsel tip yük için TLoL algoritmasının GA çözüm sonuçları.....	52
Çizelge 5.3 : 85 baralı örnek sistem fider yük tipleri.....	60
Çizelge 5.4 : 85 baralı örnek sistemin karma yük durumu için TLoL algoritmasının GA çözüm sonuçları.....	60
Çizelge 5.5 : 85 baralı örnek sistem için eniyileme sonuçları ve iyileşme yüzdeleri.....	61
Çizelge C.1: 16 baralı örnek test sistemi verileri	78



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : 2003-2019 Yılları Türkiye Elektrik Sistemi Puant Güç ve Enerji Talebi ..1	
Şekil 2.1 : Örnek radyal şebeke /Şebeke anahtar yapısı..... 12	12
Şekil 3.1 : Banyo küveti eğrisi..... 18	18
Şekil 3.2 : Transformatör ömrünün en sıcak nokta sıcaklığı ile değişimi. 20	20
Şekil 3.3 : Yaşlanma hızının en sıcak nokta sıcaklığı ile değişimi..... 21	21
Şekil 4.1 : Yöntemin temel akış diyagramı 28	28
Şekil 4.2 : Dağıtım şebekesi yapılandırması için geliştirilen yöntemin akış şeması.....31	31
Şekil 5.1 : 16 Ocak ve 27 Temmuz tarihlerine ait evsel tip tüketicinin günlük yük eğrileri.....34	34
Şekil 5.2 : 15 Ocak-10 Ağustos günleri arasındaki endüstriyel tip tüketicinin yük eğrisi.....35	35
Şekil 5.3 : N adet ev tipi şebeke bağlantılı FV üretim.....36	36
Şekil 5.4 : 1 Temmuz gününe ait talep, FV üretim ve transformatörden çekilen gücün değişimi.....36	36
Şekil 5.5 : 20 Ocak gününe ait talep, FV üretim ve transformatörden çekilen gücün değişimi.....37	37
Şekil 5.6 : Temmuz gününe ait talep, FV üretim ve transformatörden çekilen gücün değişimi.....37	37
Şekil 5.7 : Transformatörün Temmuz ayına ait yaşlanma hızının değişimi.....38	38
Şekil 5.8 : Transformatörün Temmuz ayı toplam yaşlanma süresinin değişimi.....38	38
Şekil 5.9 : Transformatörün Ocak ayı toplam yaşlanma süresinin değişimi.....38	38
Şekil 5.10 : Transformatörün 1 Temmuz günü için yaşlanma hızı değişimi.....39	39
Şekil 5.11 : 16 baralı örnek sistem..... 40	40
Şekil 5.12 : Günlük yüklenme için GA sonucu 41	41
Şekil 5.13 : TR1 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA'nın değişimi 42	42
Şekil 5.14 : TR2 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA'nın değişimi 42	42
Şekil 5.15 : TR3 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA'nın değişimi 42	42
Şekil 5.16 : 2 günlük yüklenme için GA sonucu 43	43
Şekil 5.17 : TR1 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA'nın değişimi(2 günlük)..... 44	44
Şekil 5.18 : TR2 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA'nın değişimi(2 günlük)..... 44	44
Şekil 5.19 : TR3 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA'nın değişimi(2 günlük)..... 45	45
Şekil 5.20 : 1 Haftalık yüklenme için GA sonucu 45	45
Şekil 5.21 : TR1 için 1 haftalık yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA'nın değişimi 46	46
Şekil 5.22 : TR2 için 1 haftalık yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA'nın değişimi 46	46
Şekil 5.23 : TR3 için 1 haftalık yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA'nın değişimi 47	47
Şekil 5.24 : TR1 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA ve ortam sıcaklığı değişimi (endüstriyel tip mevsimlik yaz verisi, $\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$).....47	47
Şekil 5.25 : TR2 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA ve ortam sıcaklığı değişimi (endüstriyel tip mevsimlik yaz verisi $\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$).....48	48

Şekil 5.26 : TR3 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA ve ortam sıcaklığı değişimi (endüstriyel tip mevsimlik yaz verisi $\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$).....	48
Şekil 5.27 : Endüstriyel tip mevsimlik yaz verisi için GA sonucu ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$).....	49
Şekil 5.28 : Evsel tüketiciler için (yaz mevsimi) PSO eniyilemesi sonucu ($\alpha_1=1, \alpha_2=0$ durumu).....	53
Şekil 5.29 : Evsel tüketiciler için (yaz mevsimi) PSO eniyilemesi sonucu ($\alpha_1=1, \alpha_2=1$ durumu).....	54
Şekil 5.30 : Evsel tüketiciler için (yaz mevsimi) TLoL algoritmasının TB çözüm sonuçları ($\alpha_1=1, \alpha_2=0$ durumu).....	55
Şekil 5.31 : TR1 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA, ortam sıcaklığı değişimi ($\alpha_1=1, \alpha_2=0$ durumu).....	55
Şekil 5.32 : TR2 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA, ortam sıcaklığı değişimi ($\alpha_1=1, \alpha_2=0$ durumu).....	56
Şekil 5.33 : TR3 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA, ortam sıcaklığı değişimi ($\alpha_1=1, \alpha_2=0$ durumu).....	56
Şekil 5.34 : Evsel tüketiciler için (yaz mevsimi) TLoL algoritmasının TB çözüm sonuçları ($\alpha_1=1, \alpha_2=1$ durumu).....	57
Şekil 5.35 : TR1 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA, ortam sıcaklığı değişimi ($\alpha_1=1, \alpha_2=1$ durumu).....	57
Şekil 5.36 : TR2 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA, ortam sıcaklığı değişimi ($\alpha_1=1, \alpha_2=1$ durumu).....	58
Şekil 5.37 : TR3 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} ve FAA, ortam sıcaklığı değişimi ($\alpha_1=1, \alpha_2=1$ durumu).....	58
Şekil 5.38 : 85 baralı örnek test sistemi.....	59
Şekil A.1 : Genetik algoritmanın akış şeması.....	73
Şekil A.2 : Parçacık Sürü Algoritması Akış Şeması.....	75
Şekil A.3 : Tavlama Benzetimi Akış Şeması.....	77
Şekil C.1 : 16 baralı örnek test sistemi.....	80
Şekil D.1 : 85 baralı örnek test sistemi.....	81

ELEKTRİK GÜÇ SİSTEMLERİNDE TRANSFORMATÖRLERİN YAŞLANMASI KOŞULLARI ALTINDA VERİMLİLİK ARTIŞI AMAÇLI İŞLETİM KOŞULLARININ İYİLEŞTİRİLMESİNİN ARAŞTIRILMASI

ÖZET

Elektrik dağıtım firmaları için işletme giderleri (OPEX) ve yatırım giderlerinin (CAPEX) azaltılması önemli bir konudur. Şirketler, kesici, transformatör gibi elektriksel donanımları faydalı ömürlerinin üzerinde kullanarak yatırımları mümkün olduğunca ertelemek ve giderlerini azaltma eğilimindedirler. Donanım ömürlerinin arttırılması, yönetilmesi konuları ile ilgili çalışmaların sayısı her geçen gün artmaktadır. Özellikle Dağıtım şebekelerinin, akıllı şebeke oluşturmak için yaptığı yatırımlar ile DŞYY konusu ile ilgili çalışmalar tekrar gündeme gelmiştir.

Elektrik dağıtım şebekeleri, arıza veya herhangi bir yükün devreden çıkması gibi sebeplerle anahtarların açılıp/kapandığı dinamik bir yapı oluşturmaktadır. Dağıtım şebekelerinde anahtarların açılıp/kapanma ile konumlarının değiştirilmesi dağıtım şebekesinin yapısını değiştirmektedir. Anahtar konumlarının değiştirilmesi ile şebeke yapısının değiştirilmesi literatürde dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılması olarak yer almaktadır. DŞYY, arıza sonrası tüketicilerin farklı fiderlere aktarılacak enerjisiz kalmaması için yapılabildiği gibi şebekenin verimli çalışmasını sağlayacak farklı amaçlar için de yapılabilmektedir. Dağıtım şebekesi kayıplarını azaltmak, şebeke güvenilirliği arttırmak, gerilim dağılımını iyileştirmek yapılandırmanın yapılma sebeplerinin içerisinde yer almaktadır.

DŞYY problemi karmaşık tamsayı, çok amaçlı, lineer olmayan eniyileme problemidir. DŞYY probleminin çözümü ile çok sayıda araştırmacı kayıp minimizasyonu, yük dengelemesi, gerilim profilinin iyileştirilmesi, en az sayıda anahtarlama yapılması gibi farklı amaç fonksiyonları dikkate alarak çok sayıda farklı eniyileme yöntemi uygulamışlardır.

Dağıtım şebekelerinde anahtarlama problemi aslında belirli amaç fonksiyonunu gerçekleştirmek için eniyi anahtar çiftlerinin belirlenmesidir. Çok amaçlı lineer olmayan eniyileme problemidir.

Günlük, mevsimlik, yıllık olarak yük tahmini çalışmalarında kullanılan yük eğrileri şebeke planlaması ve işletilmesinde de kullanılmaktadır. Ölçüm cihazlarından elde edilen yük eğrilerinin incelenmesi ile yükün karakteristiği ile ilgili (yükün en yüksek talebi, puant olmayan zamanlardaki enerji tüketimi gibi) bilgiler alınabilir. Yük eğrileri günlük, haftalık, mevsimlik olarak farklılıklar göstermektedirler. Şebeke planlanması ve işletilmesinde yük eğrilerindeki değişimlerin dikkate alınması gerekmektedir.

Güç sisteminin önemli bir elemanı olan transformatörlerin yalıtım ömrü yani yaşlanması sıcaklığa bağlıdır. Sargılardan geçen akımın oluşturduğu kayıplar ısı olarak ortaya çıkmakta ve karesel olarak artmaktadır. Bundan dolayı geçmiş yük

eğrileri ve yük tahminleri transformatör yaşlanması ile ilgili çalışmalarda oldukça önemlidir.

Bu tezde, dağıtım şebekesi eniyi çalışma koşullarının belirlenmesi için bir yaklaşım sunulmaktadır. Bu yaklaşımda, dağıtım şebekesi eniyi çalışma koşullarının belirlenmesi için transformatör yaşlanması ve mevsimsel etkiler dikkate alınarak bir yük dengelemesi yapılmaktadır. Eniyileme yöntemi olarak türev tabanlı yöntemler yerine, genetik algoritma ve sezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Çalışmada Genetik Algoritma (GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Tavlama Benzetimi (SA) gibi sezgisel algoritmaların uygulaması yapılmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalardan farklı olarak eniyileme algoritmasının amaç fonksiyonuna transformatör ömür kaybı etkisi de katılmaktadır. Böylelikle, yük dengelenmesinden farklı olarak lineer olmayan transformatör yaşlanma etkisi dağıtım şebekesi eniyi çalışma koşullarının belirlenmesine katılmaktadır. Önerilen yaklaşım örnek sistem üzerinde ölçümsel veriler ve örnek test sistemleri kullanılarak uygulanmış ve elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Yapılan çalışmada kullanılan yük eğrileri, ölçümlerden elde edilen gerçek yük eğrilerine dayalı olarak oluşturulmuştur. Hava sıcaklığı verileri ise Meteoroloji Genel Müdürlüğünden alınan gerçek hava sıcaklığı verileridir. Ayrıca transformatör yaşlanmasına Fotovoltaik üretimin etkisinin incelendiği çalışma bölümünde kullanılan Fotovoltaik üretim değerleri üniversitemizde yapılan ölçümlerden türetilmiştir.

Tezde kullanılan OpenDSS programı, açık kaynak kodlu akıllı dağıtım şebekeleri ve şebeke modernleşmesi için EPRI tarafından geliştirilmiş bir benzetim programıdır. Günümüzde OpenDSS yaygın olarak kullanılan büyük hesaplama kolaylığı sağlayan bir analiz programıdır. OpenDSS en önemli özelliklerinden birisi COM arayüzü ile Matlab ortamıyla bağlantı olanağı sayesinde eş zamanlı analize izin vermesidir. Önerilen transformatör faydalı ömrünü uzatan algoritma Matlab ortamında evrimsel algoritmalarla ve OpenDSS yazılımı ile uygulanmıştır. Ortam sıcaklığı ve transformatör yük dataları giriş değişkenleri olarak transformatör yaşlanmasını hesaplamak için Matlab programında kullanılmıştır. Matlab komutları ile OpenDSS programının özelliklerine ulaşılabilir. Bu komutlar, anahtar konumlarının değiştirilmesi, yük akışının uygulanması, sonuçların alınması gibi komutlardır.

Yapılan bu çalışma ile, DŞYY probleminin çözümü için şebeke kayıplarına transformatör ömür kaybının da eklendiği yeni bir amaç fonksiyonu tanımlanarak kayıpların ve transformatör yaşlanmasının minimum olduğu anahtar çiftlerinin belirlendiği yeni şebeke yapısının belirlenmesi hedeflenmektedir. Bunu gerçekleştirirken zaman serisi analizleri kullanılmış, farklı periyotlar için en uygun anahtar konumları belirlenmiştir. Dağıtım şebekesi topolojisinin değişimi, şebeke kayıpları ve transformatör yaşlanmasına etki etmektedir. Uygun şebeke topolojisi seçilerek transformatör yaşlanma hızı azaltılabilmekte ve transformatör faydalı ömrünün daha verimli olarak kullanılabilmesi sağlanmaktadır. Böylelikle hem donanımdan en yüksek fayda sağlanmış olmakta hem de şebeke verimliliği artırılmış olmaktadır.

RESEARCH ON IMPROVING THE OPERATIONAL CONDITIONS OF THE TRANSFORMERS IN THE ELECTRIC POWER SYSTEM UNDER AGEING STUDIES

SUMMARY

Minimization of investment and operating costs for distribution utilities are crucial under market conditions. Distribution utilities choose to postpone investments by extending the lifespan of the existing electrical equipments such as switching devices and distribution transformers. Distribution Companies tend to operate transformers over its useful life to maximize the return on their investment. The studies on the distribution feeder reconfiguration (DFR) have been brought up because distribution utilities have made increased investments in smart distribution systems.

Distribution feeder reconfiguration (DFR) problem can be formulated as a mixed integer, nonlinear multiobjective optimization problem. Many researchers applied various optimization methods to solve DFR problem, and they considered different objectives such as loss minimization, feeders load balancing, voltage profile improvement, minimizing switching of circuit breakers, etc. Over the last two decades, much research has been focused on minimization of the construction cost in distribution feeders, in planning stage of the system. Recent studies have dealt with system operation problem to find optimum topologies using existing switching devices.

The distribution feeder reconfiguration (DFR) problem can be formulated as a multi-criteria optimization problem to select optimal network configuration achieved objectives in among of possible configurations with constraints. In the problem besides the main objective that is to minimize the aging of transformer, the minimization of power losses, improvement of the voltage profiles etc. can also be considered among objectives.

Load forecasting studies are generally based on daily, seasonal and yearly load curves, and these curves are used both planning and operating of the power systems. A load curve can be obtained by using meter readings. The information contained in a load curve can be analyzed to determine some load characteristics such as the time of occurrence of peak demand, the percentage of total electrical energy use occurring during off-peak hours, etc.

In the literature, the well-known objective such as minimization of losses, improvements of voltage profiles have been included in the optimization formulation. The main contribution in this study is to include the loss of transformer life to the network reconfiguration problem. In the proposed approach, the reconfiguration problem is formulated as a multiobjective optimization problem to

reduce total power loss and to balance loads taking into consideration the life extension of distribution transformers over a time period such as a month or a seasonal. The resulting optimization problem is solved using genetic algorithm (GA) that has already been successfully applied to solve several both operational and planning optimisation problems in power systems. GA has been used to solve difficult constrained optimisation problems with multi- objective functions which are discontinuous and non-differentiable, and it can also find global optimum.

Open Source Distribution Simulator (OpenDSS) developed by Electric Power Research Institute as a open-code is a distribution system simulator to promote smart grid application and network modernization. Today, OpenDSS is a comprehensive distribution system simulation program, which is used to calculate power flow solutions and which provides great ease of calculation. One of the most interesting features of OpenDSS is that power flow outputs such as system losses, branch current and bus voltages can be returned to Matlab with COM interface. The proposed transformer loss of life extension algorithm is performed using Matlab-GA toolbox and OpenDSS softwares. Ambient temperature and transformer load data are input variables for calculating transformer aging rates using Matlab program. Access to OpenDSS features has been possible with use of Matlab commands. These commands are changing switch positions, implementation of power flow and extracting results.

In this study, the life extension of existing transformers is considered as an objective together with other economical ones such as loss minimization in the reconfiguration process. In the proposed approach, the problem is handled as a load balancing problem considering life extension of transformers over a time period using quasi-static time series (QSTS) simulations and problem is solved under operating constraints such as current carrying capacities of feeders to find optimum system topology.

The load curves used in the study were provided from the real measurements obtained from different type of consumers in an Anatolian city. Used air temperature data is the actual data taken from the Turkish State Meteorological Service. In addition, the photovoltaic production values used in the study section, where the effect of photovoltaic production on transformer aging is examined, are derived from the measurements performed in Istanbul Technical University's PV system.

The life of the insulation used in a transformer strongly depends on the temperature, and the temperatures above the limiting values reduce the normal life of the insulation. The load loss in the form of heat occurs in the transformer windings due to both the resistance of the winding conductor and the current flowing through the conductor. The amount of the heat increases by the square of the load current. Therefore, the historical load curves and future load forecasting in a transformer substation are very important for the studies on transformer aging. Ambient temperature also has an effect on aging of transformer. Therefore, ambient temperature data is used in aging calculation.

Thesis study consists of six chapters. In the first chapter, the purpose and importance of the thesis are emphasized and the literature study is presented. Next chapter of the thesis describes the issue of reconfiguration of distribution system and the

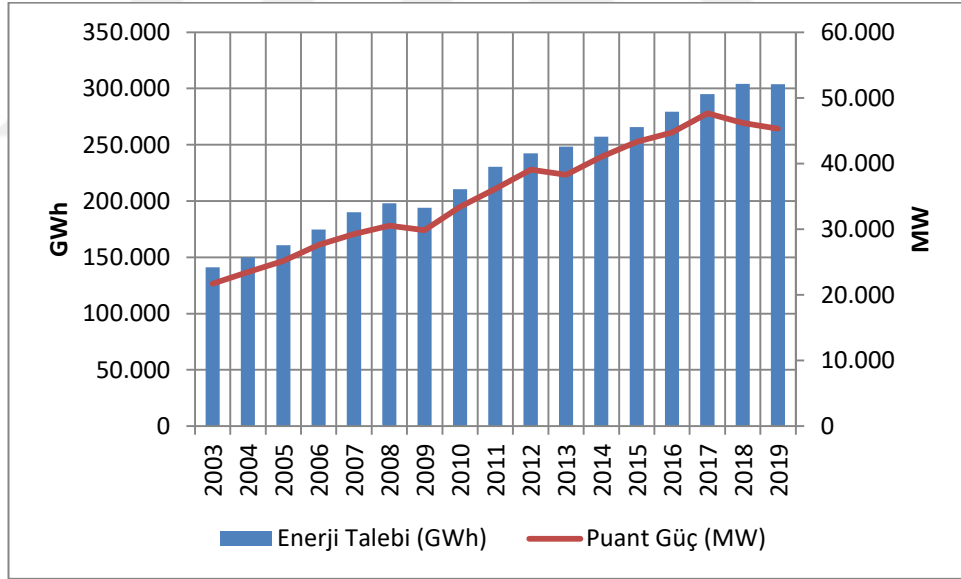
reconfiguration problem. In the third chapter, the subject of transformer aging is examined and transformer aging calculation is explained based on standards. In the next section, distribution system reconfiguration method, which reduces aging of transformer and increases the efficiency of the network, is explained. In another part of thesis study, the effects on PV system on transformer aging and aging acceleration are seasonally explored. In the last part of the thesis study, the effectiveness of the method was tested in sample test systems and the results were presented. Genetic, PSO ve SA algorithms are used as the optimization method.





1. GİRİŞ

Günümüzde elektrik güç sistemleri özelleştirmeler sonucu devlet tekelinin olmadığı rekabet ortamında piyasa koşulları altında işletilmektedir. Dünyada nüfus artışı yanısıra endüstrinin enerji talebindeki büyüme, elektrik enerjisi ihtiyacını arttırmaktadır. Elektrik enerjisine olan talep 2003 yılından bu yana, ülkemizde % 109 artmıştır. Geleceğe ilişkin yapılan tahminler, talepte yaşanan yükselmenin devam edeceğini göstermektedir. TEİAŞ'ın on yıllık tahmin raporlarına göre, 2026 yılında Türkiye'nin elektrik enerjisi talebinin yüksek senaryo için ortalama %3,8'lik artış ile 400 milyar kWh'i aşması beklenmektedir. [1,2]. Bu durum 2017 yılından 2026 yılına kadar yaklaşık %40'luk elektrik enerjisi talep artışına karşılık gelmektedir.



Şekil 1.1 : 2003 – 2019 Yılları Türkiye Elektrik Sistemi Puant Güç ve Enerji Talebi.

Talepteki artışı karşılamak için yeni üretim merkezleri devreye alınmakta, varolan üretim merkezlerinin kapasitelerinin arttırılmaktadır. Üretim ve tüketimdeki artışa paralel olarak iletim ve dağıtım hatlarının da kapasitelerinin arttırılması gerekmektedir. Ülkemizde üretilen elektrik enerjisi 50,000 km uzunluğundaki iletim hatları ile dağıtım ve tüketim bölgelerine taşınmaktadır. Muhtelif gerilim seviyelerini bünyesinde barındıran iletim hatlarımız üretim ve tüketim noktalarını birbirine

bağlayarak enterkonnekte enerji iletim hattı şebekemizi oluşturmaktadır. Tüketim merkezlerine taşınan elektrik enerjisinin gerilimi indirici merkezlerde transformatörler ile birincil dağıtım (orta gerilim) gerilim seviyesine indirilmekte sonrasında ise, birincil dağıtım sistemi havai hatları ve kabloları ile taşınan elektrik enerjisi gerilim seviyesi tekrar dağıtım transformatörleri ile ikincil dağıtım (alçak gerilim) seviyesine indirilmektedir. Ülkemizde elektrik dağıtımını artık özelleştirmeler sonrasında özel şirketler eliyle rekabetçi piyasa koşulları altında yapılmaktadır. Dağıtım şirketlerinin işletim sürecinde, verimliliği arttırması en az maliyetle sistemi işletmesi ve sürekli işler vaziyette tutması gerekmektedir. Tüketim ve üretim artışına paralel olarak dağıtım sistemi donanımının (transformatör, kablo, havai hat vb) yeterince güncellenmemesi (kapasitelerinin arttırılmaması) bu donanımın işletim sınırlarına yakın değerlerde kullanılmasına yol açmaktadır. Bunun yanı sıra tüketim bölgelerindeki gelişmenin farklı karakterde olması bu donanımın bir kısmının daha yüklü (ömür tüketici) koşullarda çalışmasına, bir kısmının ise çok hafif yükler altında işletilmesine neden olabilmektedir. Sistem işleticilerinin en uygun işletim koşullarını bularak uygulaması, günümüz güç sistemi için önemlidir.

Elektrik güç sistemi içinde transformatörler, en önemli ve gerekli elemanlar arasındadır. Elektrik iletim ve dağıtımının çeşitli gerilim seviyelerinde verimli bir şekilde yapılması güç transformatörlerinin kullanımıyla sağlanmaktadır. Herhangi bir transformatörün devre dışı kalması tüm sistem güvenilirliğini etkilemekte ve ağır ekonomik sonuçlara yol açmaktadır. Sistem işleticilerinin diğer donanımlar gibi transformatörlerinin ömürlerini de gözetir bir işletme felsefesine sahip olması gereklidir.

Transformatörlerin yük dağılımları ve ortam sıcaklıkları zamanla değişim göstermektedir. Transformatörlerin yüke bağlı çalışma koşulları ve ortam sıcaklıkları tasarım karakteristikleri dışında olduğunda, yaşlanma hızlanmakta ve büyük arızaların oluşma olasılığı artmaktadır.

Transformatörler, farklı yük durumlarını karşılamak üzere tasarlanmışlardır. Sistem yükünde olan herhangi bir artma, transformatör iç sıcaklığını arttıracığından transformatörün faydalı ömrü azalır. Ortalama ömür, hesaplanan transformatör yalıtım ömrü olarak tanımlanır zamanın ve sıcaklığın fonksiyonudur [3].

Dağıtım sistemi işletiminde verimlilik artışı ve maliyetlerin azaltılması için kayıpların azaltılması, uzun yıllar sistem işleticilerinin en önemli amaçlarından birisi olmuştur. Ancak günümüzde market koşullarının geçerli olması müşteri memnuniyetinin de dikkate alınmasını, var olan kaynaklardan mümkün olduğunda uzun süre yararlanılmasını gerektirmektedir. Bunun sonucunda geleneksel sistem kısıtları (hat akışlarının akım taşıma sınırlarının altında kalması, gerilim değerlerinin sınırlar içinde olması gibi) dikkate alınarak sistemin eniyilenmiş işletim koşullarının bulunmasında yeni amaçlar tanımlanmaktadır. Dağıtım şebekeleri, alternatif besleme imkanları yaratılması açısından gözlü şebeke olarak yapılmış olsalar da genel olarak radyal olarak işletilirler. Sistemde herhangi bir arıza meydana geldiğinde, sistem işleticisinin arızayı en kısa zamanda tespit ederek arızasız sistem kısımlarını en kısa zamanda ve en fazla sayıda tüketiciyi besleyecek şekilde davranması gereklidir. Bunun için sistemde manevralar ile besleme hatları üzerinde yer alan anahtarları kullanarak uygun anahtarlama ile komşu besleme hatlarına yük aktarımları ile sistemi toparlayabilirler. Bu manevralar sırasında yüklerin zamanla değiştiği de dikkate alınmalı anahtarlama sonucu yeni işletim durumunda sistem kayıplarının da en az değerde tutulmasına çalışılmalıdır. Bu manevralar sırasında komşu besleme hatlarına yapılacak yük transferleri uygun şekilde yapılmaz ise bu kısımda yer alan transformatörlerin yüklerinin ömürlerini aşırı azaltıcı şekilde artmasına neden olabilecektir. Bu nedenle sistem operatörünün deneyimleriyle oluşturduğu tercihlerinden ziyade sistem kısıtlarını ve amaçlarını ele alan bir eniyileme probleminin çözümü sonucunda oluşturulacak kontrol eylemleri sisteme uygulanmalıdır.

1.1 Tezin Amacı

Elektrik Dağıtım Sistemlerinin işletim koşullarının iyileştirilmesinin, gerekliliği ve bu konuda yapılan çalışmalardan yukarıda bahsedilmişti. Literatür taraması sonucunda dağıtım sistemlerinin en iyilenmesine yönelik çalışmalarda genel olarak kayıp ve maliyet optimizasyonu üzerinde durulduğu, son yıllardaki çalışmalarda yöntem olarak evrimsel algoritmaların uygulamalarının baskın biçimde öne çıktığı görülmüştür. Ancak günümüzde, sistem genişlemesinin yüklerde yarattığı artış ve işletme koşullarının donanım açısından ağırlaşması nedeniyle donanım ömürlerinin

dikkate alınması önem kazanmaktadır. Bu nedenle önerilen tez çalışmasında, dağıtım sistemi işletim koşullarının eniyilenmesinde ömür kaybının da probleme dahil edilerek güncel eniyileme tekniklerinin uygulanması ile akıllı bir yöntem geliştirilmesi hedeflenmiştir.

Ömür kaybının aşırı olması donanımın hızla yaşlanarak sistemde kısa devreler gibi bozucu etkilerin oluşmasına neden olacak, tüketiciler etkilenecektir. Örneğin bir transformatörün ömrünün hızla azalması beklenmeyen anda arızalar yaşanmasına bu transformatörden beslenen tüketicilerin enerjisiz kalmasına yol açacaktır. Ayrıca dağıtım şirketi işleticisi, transformatör ömründeki kısalma nedeniyle mali açıdan zarara uğrayacaktır (transformatör tesis maliyeti, elektrik enerjisinin arıza süresince satılamaması, kesinti süresince müşteri memnuniyetinin azalması ve tazminat talepleri gibi). Transformatör faydalı ömründeki azalmanın da incelemeye dahil edildiği, çoklu amaç fonksiyonun tanımlandığı ve evrimsel algoritma ile eniyilemenin yapılacağı akıllı bir yöntem geliştirmek öncelikle amaçlanmaktadır. Çalışma, transformatör faydalı ömründeki azalmanın da göz önüne bulundurulduğu bir yük dengelemesinin yapıldığı, şebeke kayıplarının minimize edildiği, bara gerilimlerinin belirli sınırlar içinde kaldığı en iyi dağıtım şebekesi topolojisinin belirlenmesine yönelik olacaktır.

1.2 Literatür Araştırması

Dağıtım şebekesi yeniden yapılandırılması problemi bir çok amacın bir arada ele alındığı ve kısıtlar altında çözülmesi gereken karmaşık bir en iyileme problemidir. Problemin kısıtları arasında dağıtım şebekesi yapısının radyal olma kısıtının yanı sıra üretim-tüketim dengesini yansıtan sistem eşitlik kısıtları ve donanım işletim sınırlarını yansıtan akım ve gerilim eşitsizlik kısıtları sayılabilir [4].

Genel olarak dağıtım sisteminin yeniden yapılanması alanında kayıpların azaltılması için birçok algoritma geliştirilmiştir. Dağıtım sistemlerinin yapısının kayıpların azaltılması için değiştirilmesine ilişkin bir çalışma, Merlin ve Back tarafından 1975’de yapılmıştır. DŞYY problemini çözmek için lineer bir model kurmuşlar ve ayrık dal-sınır (branch and bound) eniyileme yöntemini kullanmışlardır. Bu yöntemde, şebekedeki tüm anahtarlar gözlü şebeke oluşturacak şekilde kapatılır,

sonra anahtarlar radyal şebeke yapısı oluşturacak şekilde ardı ardına açılmaktadır [4,5].

1988 yılında Civanlar ve arkadaşları, belirli anahtar operasyonu ile sistem kayıpların değişimini tahmin eden basit bir formül içeren, dal değişim yöntemi olarak da adlandırılan bir yöntem önermişlerdir [4].

Baran ve Wu 1989'da Civanlar'ın yöntemini geliştirici katkılar yapmıştır. Sistem yüklerine akan gücü yaklaşık hesaplayan iki formül sunmuştur. Her bir bara aktif, reaktif gücü ve gerilimi ile tanımlanmış yinelemeli güç akışı eşitliklerini kullanmışlardır [5].

1989 yılında Shirmohammadi ve Hong, problemin kombinasyonel (ayrık) doğasından dolayı gerçek sistemlerde çok sayıda konfigürasyon içerdiğinden Merlin'in yönteminde değişiklikler yaparak etkili bir güç akışı uygulayarak hesaplama süresini azaltmışlardır. Yöntemlerinde üzerinden en az akım akan anahtarlar açılır. Bu işlemi yeni radyal yapı belirlenene kadar tüm çevrelere uygulamışlardır [6].

1990'da Taylor ve Lubleman dağıtım sistemi yeniden yapılandırmasını sezgisel yaklaşımla minimum kayıp, transformatör aşırı yüklenmesinin giderilmesi amaçları ve fider kısıtları altında incelemiştir. Sezgisel ağaç arama tekniği ile çözüm uzayını daralttıkları kural tabanlı sezgisel yeni bir algoritma geliştirmişlerdir [7].

Chiang and Jean Jumeau 1990 yılında kısıtlı, çok amaçlı ve türevlenemeyen DŞYY problemi için iki aşamalı bir çözüm yöntemi geliştirmişlerdir. Bu çözüm yöntemi, makul bir hesaplama süresi ile genel minimumu vermektedir [8,9].

Goswami ve Basu 1992 yılında radyal dağıtım sistemlerinde minimum kayıp konfigürasyonunu hesaplamak için sezgisel temelli yük akışı algoritması önermişlerdir [10].

Nara ve arkadaşları 1992'de sistem kayıplarını minimum yapacak konfigürasyonu bulmak için genetik algoritma kullandığı çalışmasını sunmuşlardır [11].

Kim ve arkadaşları da 1993 yılında, geliştirdikleri farklı yük seviyeleri için yapay sinir ağları temelli DŞYY algoritmasını sunmuşlardır [12].

1993'de Chen ve Cho, dağıtım sistemi kayıplarını azaltarak sistem verimliliğini arttıracak şebeke yapılandırması için dal ve sınır tekniği ile bir binary tam sayı programlama kullanarak, eniyianahtarlama kriterini sunmuşlardır [13].

Taleski 1997 yılında minumum enerji kaybı için alternatif bir yöntem geliştirmiştir. Sezgisel kurallar ve iteratif kuralların birleştirilmesi ile daha etkili, güçlü ve hızlı bir yöntem önermektedir [14].

1997'de Zhou yük dengeleme ve servis restorasyonu amacıyla iki feederli yeniden yapılandırma algoritmaları önermiştir. Verimli ve hızlı performans için sezgisel kurallarla optimizasyon teknikleri ile bulanık mantığı birleştirmiştir. Ayrıca Zhou, gerçek zaman uygulamalarında işletme maliyetini düşürmek için sezgisel tabanlı fider yeniden yapılandırması önermiştir [15].

Song, Wang, Johns ve Wang 1997'de fider yeniden yapılanma probleminin çözümünde bulanık mantık teorisi ve evrimsel algoritma uygulamışlardır. Evrimsel programlama performansını arttırmak için sezgisel bilgiye dayalı bulanık kontrollü evrimsel programlama önerilmiştir. Eniyileme sürecini hızlandırmak için zincir tablo yöntemi ile birleştirilmiş önce derinlik ve önce genişlik arama stratejileri kullanılmıştır. Eşitlik ve eşitsizlik kısıtları ceza faktörleri ile uygunluk fonksiyonu içerisine yerleştirilerek en uygun çözümler garanti edilir [16].

Kim ve arkadaşları 2000 yılında büyük ölçekli dağıtım sistemlerinde otomatik anahtarlama operasyonları ile dağıtım sistemi kayıplarını azaltmak için etkili bir algoritma sunmuşlardır. Tavlama benzetimi, lokal minimumdan kaçmayı önlemiş ancak hesaplama süresi gereksinimini arttırmıştır. Tabu araması ile en büyük iniş algoritması biçiminde daha iyi bir çözüm belirlemeye çalışmıştır ancak yöntem yakınsamayı garanti etmemektedir. Tavlama benzetimi, Tabu arama ile oluşturulan hibrit algoritma uygulanmış ve karşılaştırmalar yapılmıştır. Önerilen metodolojinin, sayısal örneklerle örnek bir dağıtım sisteminde etkinliği gösterilmiştir [17].

Venkates ve arkadaşları 2003'de, DŞYY problemi için bulanık temelli evrimsel algoritma kullanan bir çözüm tekniği geliştirdiler. Bu çözüm tekniği, çözüm uzayının kesintili olduğu, global eniyilemenin istendiği problemlere uygun olduğunu göstermişlerdir. Amaç fonksiyonu olarak sistem kayıpları ve gerilim profili seçilmiştir [18].

Lopez ve arkadaşları 2004 yılında, farklı yük tipleri için yük değişimlerinin dikkate alındığı online yeniden yapılandırmanın saatlik uygulandığı bir yaklaşım sunmuşlardır. Ortalama ve en fazla talep durumları dikkate alınarak en iyi şebeke yapısını belirlemişlerdir [19].

Prasad ve arkadaşları 2005 yılında, radyal dağıtım şebekeleri için en iyi şebeke yapısını belirleyen bir bulanık mutasyonlu genetik algoritma sunmuşlardır. Önerilen

algoritma ile DŞYY'nın ayrık çok amaçlı en iyileme problemi olmasının oluşturduğu zorlukları ortadan kaldırmaktadır. Sunulan yöntemin en önemli özelliği şebekenin yeni kromozom yapısı ve bulanık mutasyonlu kontrol ile arama uzayında etkili arama yapabilmesidir [20].

Hong ve arkadaşı 2005 yılında, DŞYY için GA tabanlı bulanık çok amaçlı programlama yöntemi üzerinde çalışmışlardır. Önerilen yöntemle, hem normal durum hem de arıza olasılıkları dikkate alınarak problem çok amaçlı bir problem olarak formülize edilmiştir. Yapılan çalışmada, kayıpların en aza indirilmesi hedeflenmiş ve maksimum memnuniyette bir çözüm elde etmek için karar verici tarafından gerilim farkları dikkate alınmıştır. Radyallık kontrolü için “Prufer sayı kodlaması” GA içinde uygulanmıştır. 16 ve 33 baralı iki dağıtım sistemi üzerinde yapılan simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin sistemin yapılandırmasını verimli bir şekilde belirleyeceğini ve sistemin uygulanabilirliğini göstermiştir [21].

Vanderson, Pereira, Vinagre, Garcia, ve Araujo tarafından 2005 yılında büyük dağıtım şebekeleri için sezgisel yöntemleri kullanan bir yöntem geliştirilmiştir. Bu yöntemde, gözlü şebeke yapısıyla başlayarak anahtarlar teker teker açılarak sistem kayıplarını minimum yapacak şebeke yapısına ulaşılmıştır [22].

Das 2006 yılında, çok amaçlı DŞYY probleminin çözümü için sezgisel yöntemler ile bulanık mantığı birarada kullandığı karma bir teknik geliştirmiştir. Şebeke aktif kayıplarının minimum olması, düğüm gerilimlerindeki sapma, hatların maksimum yüklenebilme indeksi gibi çoklu amaçlar, radyal şebeke kısıtı altında dikkate alınmıştır. Bu dört amaç bulanık fonksiyonlar ile tanımlanmıştır. Anahtarlama sayısını en aza indirmek için sezgisel yöntemler de dahil edilmiştir. Yöntemin etkinliği örnek üzerinde gösterilmiştir [23].

Olamaei, Niknam, ve Gharehpetian 2008 yılında dağıtım sistemi yeniden yapılandırması problemine dağıtık üretim birimlerinin etkisini de katarak yeni bir yaklaşım getirmişlerdir. Amaç fonksiyonuna dağıtık üretim birimleri tarafından üretilen aktif gücün üretim maliyetini de dahil ederek DŞYY problemini PSO algoritması ile çözümlenmişlerdir [24].

Niknam 2008 yılında, çok amaçlı dağıtım fider yapılandırma probleminin çözümü için HBMO ve bulanık çok amaçlı yaklaşımını birleştirdiği etkili bir algoritma sunmuştur. Amaç fonksiyonları olarak, aktif güç kayıpları, düğüm gerilimleri değişimi, anahtarlama sayısı ve fider yük dengelemesi alınmıştır [25].

Niknam 2009 yılında, çok amaçlı dağıtım fider yapılandırma probleminin çözümü için Bal Arısı Çiftleşme Algoritması (HBMO - Honey Bee Mating Optimization) ve DPSO dan oluşan hibrit evrimsel algoritma sunmuştur. Amaç fonksiyonu vektörü ile en kötü çözüm arasındaki mesafenin maksimumuna dayanan bir yaklaşım ile problemi çözmüştür [26].

Niknam 2009 yılında, çok amaçlı dağıtım fider yapılandırma problemi için Karınca Kolonisi Algoritması (ACO – Ant Colony Optimization), Ayırık Parçacık Sürü (Discrete Particle Swarm Optimization) ve bulanık çoklu amaçlar içeren hibrit bir algoritma sunmuştur [27].

Wu ve Lee 2010 yılında dağıtık üretim birimleri içeren dağıtım şebekesinde, yeniden yapılandırma problemini için karınca kolonisi algoritması (ACO) sunmuşlardır [28].

Saffar ve arkadaşları, 2011 yılında dağıtım sistemi yapılandırması problemi için amaç fonksiyonunu bulanık değişkenlerle tanımlayarak karınca kolonisi arama tabanlı algoritması sunmuştur [29].

Son yıllarda DŞYY probleminin çözümü için çok farklı sezgisel algoritmalar ve çoklu amaçlar yaygın olarak kullanılmıştır.

Srinivasa Rao ve arkadaşları 2011 yılında, DŞYY probleminin çözümü için uyum arama algoritmasını (HSA Harmony Search Algorithm) sunmuşlardır. Algoritma, YYP’de şebeke kayıplarını minimum yapan anahtar çiftlerini bulmak için müzikal notalar arası uyum süreci kullanılarak en iyi melodiye ulaşılması prensibine dayanmaktadır. Türev bilgi ihtiyacını ortadan kaldıran bir gradyen araması yerine rastgele arama kullanan bir algoritmadır. Önerilen algoritma 33 ve 119 baralı test sistemlerinde gerçekleştirilmiştir [30].

Sedighzadeh ve arkadaşları 2014 yılında çoklu amaçlı DŞYY için bir yöntem önermişlerdir. Önerilen yöntem, güç kayıpları, gerilim kararlılığı, dağıtık üretim maliyeti ve sera gazı emisyonlarını da kapsayan amaç fonksiyonu teknik ve işletme kısıtları altında eniyi çözümü oluşturmayı kapsamaktadır. Problemin çözümü için sezgisel araçlardan biri olan HBB-BC (Hybrid Big Bang-Big Crunch) Algoritması, keşif yeteneğini geliştirmek için bir mutasyon operatörü eklenerek kullanılmıştır. Farklı ölçeklendirilmiş amaç fonksiyonlarını aynı ölçeğe getirmek için bulanık üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Önerilen yöntem ile gelişmiş bir arama kabiliyeti ve önceki yöntemlere göre daha iyi yakınsama sağlanmaktadır. Yöntem dengeli ve dengesiz test sistemleri üzerinde denenmiştir [31].

Arandian ve arkadaşları 2014 yılında, şebeke kayıplarını azaltan ve dağılmış üretim birimlerinin kontrolü ile dağıtım şirketlerinin maliyetini azalan bir yöntem sunmuşlardır. Çeşitli kısıtlamalarla geniş bir çözüm alanına sahip karmaşık eniyileme problemini Kurbağa Sıçrama (SFLA -Shuffled Frog Leaping Algorithm) Algoritması ile çözmüşlerdir [32].

Nguyen ve arkadaşı 2015 yılında, aktif güç kayıplarını azaltan, gerilim profilini düzelteren Guguk Kuşu Arama (CSA-Cuckoo Search Algorithm) Algoritmasına dayanan bir yeniden yapılandırma metodolojisi önermişlerdir. Önerilen algoritma eniyileme problemini çözmek için yumurtalarını diğer konakçı kuşların yuvalarına yerleştiren bazı guguklu türlerinin parazitlik durumundan esinlenen sezgisel bir algoritmadır. Daha az kontrol parametresine sahip olduğu için eniyileme problemlerinde daha etkilidir. Önerilen yöntemin etkinliği üç farklı dağıtım şebekesinde test edilmiştir [33].

Dağıtım ve güç transformatörleri için dinamik yüklenmeyi sağlayabilmek için sargı en sıcak nokta sıcaklığının tahmini için doğru modelin geliştirilmesi literatürde araştırma konusu olmuştur [34,35]. Üst yağ sıcaklığı ve en sıcak nokta sıcaklığı modelleri IEEE standartları en yaygın kullanılan modellerdir. Bu termal denklemler Clause 7 model olarak adlandırılmaktadır [36, 37].

Çatı tipi fotovoltaik panellerin dağıtım transformatörlerinin faydalı ömrünü uzatması üzerine yapılan çalışmada, Fotovoltaik panellerin farklı katılım oranlarında, dağıtım transformatörü ve yerleşim şebekesi performansı üzerine etkileri incelenmiştir. Dağıtım transformatör ömrünün uzamasına olan faydanın ölçülmesi için bir yöntem sunulmuştur. Bu amaçla en sıcak nokta sıcaklığını hesaplamak için IEC-60076 standardındaki termal model kullanılmıştır. Bir yıl boyunca 15 dakikada bir alınan veriler ve hava sıcaklığı bilgileri de kullanılarak transformatör faydalı ömründeki azalma ve transformatör sıcaklık değişimi farklı yük ve farklı fotovoltaik katılımıyla incelenmiştir [38].

Mousavi ve arkadaşları, dağıtık üretim birimlerinin dağıtım transformatörlerinin faydalı ömrünün uzamasında getirdiği ekonomik faydaları ele aldıkları incelemeler gerçekleştirmişlerdir. Önerilen yaklaşım, sağlanan ekonomik faydayı gerçekçi tahminlerle desteklemek için 5 farklı şehirde bulunan dağıtım transformatörlerine uygulanmıştır. Dağıtık üretim birimlerinin farklı katılım seviyelerindeki etkileri incelenmiştir. Ekonomik faydaların, dağıtık üretim seviyesinin bir fonksiyonu olarak üstel şekilli bir yol izlediği görülmektedir [39].

1.3 Tezin İçeriği

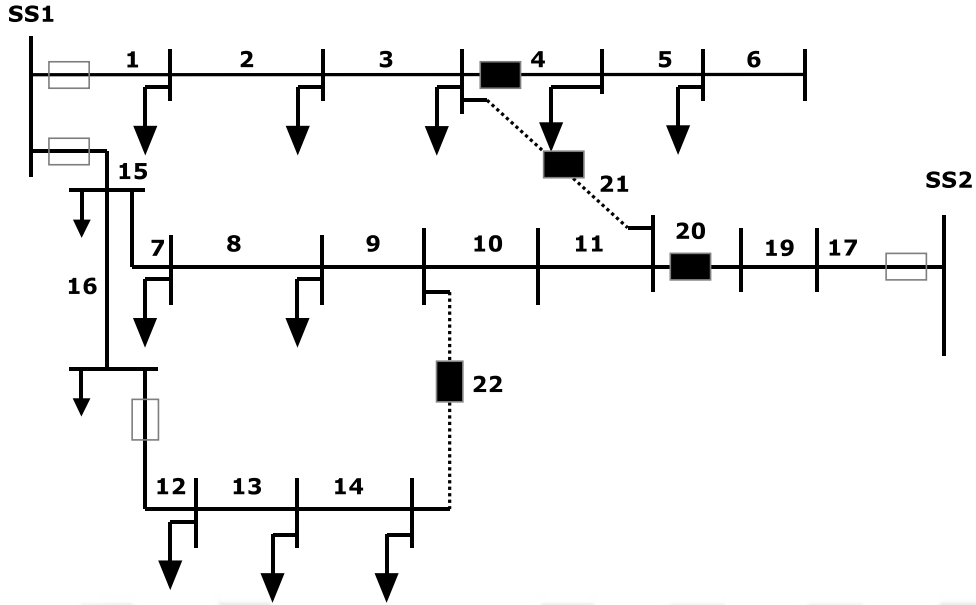
Bu çalışmada, dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırma (DŞYY) problemi için elektrik güç sisteminin önemli elemanı olan transformatörlerin ömrünü uzatacak şekilde sezgisel yöntemlere dayanan bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntem ile transformatör ömür kaybı en az olacak şekilde DŞYY problem çoklu amaçlı olarak incelenmiştir. DŞYY probleminde güç kayıpları yanında transformatör ömür kaybının da dikkate alınması donanım ömürlerinin verimli kullanılması açısından önem oluşturmaktadır.

Bu kapsamda tez 6 bölümden oluşturulmuştur. Tez çalışmasının ilk bölümünde güç sistemine ve dağıtım şebekesine genel bir bakış yapılmış, tezin amacı ve önemi anlatılarak literatürde yapılmış çalışmalar anlatılmıştır. İkinci bölümde, dağıtım şebekesi yeniden yapılandırma konusu anlatılmıştır. Transformatör yaşlanması ve ömür konusu daha sonraki üçüncü bölümde incelenmiştir. Dördüncü bölümde ise transformatör yaşlanmasını azaltan yeniden yapılandırma algoritması detaylı olarak sunulmuştur. Problemin çözümü farklı sezgisel yöntemlerle gerçekleştirilmiştir. Beşinci bölümde ise test sistemi ve alınan ölçümlerden oluşturulan örnek 16 ve 85 baralı şebekelerde Transformatör Ömrünün Azalması (TLoL) algoritması denenmiştir. Ayrıca bir dağıtım şebekesinde fotovoltaiik (FV) üretimin transformatör ömrüne etkisi yine gerçek ölçüm değerlerinden oluşan FV üretim ve yüklenme değerleri ile oluşturulan örnek şebekede transformatör yaşlanması incelenmiştir. Altıncı ve son bölümde de sonuçlar ve yorumlar paylaşılmıştır.

2. ELEKTRİK DAĞITIM ŞEBEKESİNİN YENİDEN YAPILANDIRMASI

Elektrik güç sisteminin en geniş kısmını elektrik dağıtım şebekesi oluşturmaktadır. Son yıllarda, dağıtım otomasyonu giderek önem kazanmaktadır. Elektrik şirketleri dağıtım seviyesindeki müşteri hizmet kalitesini ve sistem güvenilirliğini düşük işletme maliyetleri ile sağlayabilmek için daha fazla dikkat etmektedirler. Dağıtım otomasyonu fonksiyonları arasında bulunan DŞYY, hem planlama sürecinde hem de gerçek zamanlı kontrol sürecinde bulunmaktadır. DŞYY, sistem işletme kısıtları altında sistem seviyesindeki amaçları gerçekleştirmek için anahtar konumlarının değiştirilerek, şebeke yapısının değiştirildiği ve şebekedeki güç akışının yönlendirildiği işlemleri kapsamaktadır. Ayrıca şebeke yapısının radyal olduğunu garanti etmelidir.

Dağıtım şebekelerinde iki farklı anahtar bulunmaktadır. Bunlar, bağlantı anahtarı ve ayırıcı anahtarlarıdır. Bağlantı anahtarları, diğer fiderler ile ayrımı sağlamak için normalde açık konumda bulunurlar. Aşırı yüklenme, planlı bakım çalışmaları veya enerji kesintisi sebebiyle bağlantı anahtarlarının kapanması ile tüketiciler komşu fiderlere aktarılabilirler. Ayırıcı anahtarları, normalde kapalı konumda bulunmaktadır. Arıza durumunda bazı ayırıcı anahtarları dağıtım şebekesinde radyal yapıyı sağlayabilmek için açılır. Manual sistemde DŞYY mevsimsel bazda yapılmaktadır. Otomatik sistemde uzaktan kumanda ile DŞYY gerçekleştirilebilmektedir. Normal koşullarda birkaç saat içinde bir kere FYY operasyonu yeterlidir. Örnek bir dağıtım şebekesine ait anahtarlar Şekil 2.1’de görülmektedir [3, 40].



Şekil 2.1 : Örnek radyal şebeke/Şebeke anahtar yapısı.

2.1 Dağıtım Şebekesinin Yapılandırmasının Amaçları

Dağıtım şebekeleri ekonomik ve güvenilir çalışacak şekilde tasarlanırlar. Şebeke yapılandırmasının amaçları da bunu sağlamaktır.

2.1.1 Kayıpların azaltılması

Kar odaklı dağıtım şirketlerine istenmeyen işletme kayıpları getirdiği için kayıpların azaltılması dağıtım şebekesi FYY'nın esas amacıdır. Şebeke kayıpları, yük dengesizliği, düşük gerilim ve uzun dağıtım hatlarının olması durumundan etkilenir. Yük dengeleme ve güvenilirliğin artırılması da FYY amaçları arasındadır.

2.1.2 Yük dengelemesi

Yük dengelemesi amacı için yapılan dağıtım şebekesi yapılandırması (FYY), dağıtım fiderleri veya transformatörleri arasında yükleri dengelemek için radyal bir şebeke yapısı belirler. En iyi yük dengeleme, anahtar operasyonları ile bir kısım yüklerin, ağır yüklü fiderlerlerden veya transformatörlerden hafif yükü fiderlere veya transformatörlere uygun transferi ile gerçekleştirilir.

2.1.3 Gerilim profilinin iyileştirilmesi

Bir fider yükleri beslemek için indirici merkezden radyal olarak çıkar. Dolayısıyla, indirici merkezden itibaren dağıtım hatları boyunca gerilim düşümü oluşur. Düğüm

gerilimlerinin işletme sınırları içinde kalmasını sağlamak için gerilim regülatörleri ve reaktif güç desteği içeren çeşitli kontrol stratejileri uygulanmaktadır. Daha iyi gerilim dağılımı elde edebilmek amacıyla, aşırı yüklenmeleri ve uzun dağıtım hatlarında oluşan önemli gerilim düşümlerini önlemek için, FYY şebeke yapısını, sonuç olarak güç akışı büyüklüklerini ve yönlerini değiştirir.

2.1.4 Sistemin toparlanmasının gerçekleştirilmesi

Yukarıda birinci, ikinci ve üçüncü maddelerde tanımlanan amaçlar, normal çalışma şartlarında hedeflenen amaçlardır. Sistem toparlanmasının gerçekleştirilmesi, ancak bir arıza gibi sistemin bir bölümünün anahtarların açmasıyla izole edildiği acil durumlardaki amaçların bir grubudur. Oluşan arızanın temizlenmesi yük kaybına ve dağıtık üretim birimlerinin kaybına yol açabilir. Sistemin toparlanması amaçlı şebeke yapılandırması, normal koşullardaki amaçları göz önüne alarak yüklerin tekrar enerjilendirilmesini ve şebekede bulunan dağıtık üretim birimlerinin şebekeye bağlantısını tekrar gerçekleştirmek için güç akışını anahtarlamalarla yönlendirir. Minimum toparlanma süresi için maksimum yükün tekrar enerjilendirilmesi ve minimum anahtarlama gibi özel istekler dikkate alınabilir.

2.1.5 Çoklu amaçlar

DŞYY etkilerini daha kapsamlı olarak incelemek için çoklu amaçlar da düşünülebilir. Literatürde bulunan bazı kaynaklar, tek en iyi çözümü belirlemek için çoklu amaçların ağırlıklı toplamının eniyilemesini gerçekleştirmişlerdir. Bazı kaynaklar eniyi sonuçlardan oluşan pareto sınırı bulmaktadır. Göz önünde bulundurulan amaçlar birbirine göre üstünlük oluşturmadığında bir karar verici pareto sınırı boyunca bir aday seçer.

2.2 Dağıtım Şebekesi Yeniden Yapılandırması Matematiksel Modeli

Çok amaçlı olmayan DŞYY probleminde amaç, kısıtlar altında sistem kayıplarının minimum olduğu şebeke işletme koşullarının belirlenmesidir.

2.2.1 Tek amaçlı DŞYY problemi

DŞYY problemi, akım ve gerilim kısıtları altında şebeke kayıplarının minimizasyonu olarak tanımlanır. Problem matematiksel olarak şu şekilde tanımlanır:

$$\text{Min } f = \sum_{h=1}^{N_h} |I_h|^2 \cdot k_h \cdot R_h \quad h \in N_h \quad (2.1)$$

$$k_h I_h \leq I_{h\max} \quad i \in N_h \quad (2.2)$$

$$V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \quad i \in N \quad (2.3)$$

$$g_i(I, k) = 0 \quad (2.4)$$

$$g_v(V, k) = 0 \quad (2.5)$$

$$\varphi(k) = 0 \quad (2.6)$$

Burada I_h hat akımlarını, R_h hat direncini, V_i düğüm gerilimlerini, k_h hatların konumunu gösteren topolojik değişkeni, N_h hat sayısını tanımlamaktadır. $k_h = 1$ olması hattın devrede olduğunu göstermekte, $k_h = 0$ olması ise hattın devrede olmadığını göstermektedir. Denklem 2.2 ve denklem 2.3 hat akım termal kararlılık kısıtı ve düğüm gerilim kısıtlarına dayanmaktadır. 2.4 ve 2.5 denklemleri de Kirchhoff akım ve gerilim eşitlikleri gösteren eşitlik kısıtlarını ifade etmektedir. 2.6 eşitliği ise radyal yapı için topoloji kısıtını göstermektedir. Topoloji kısıtı iki yapısal kısıt içerir. Bu kısıtlar, tüm düğümlerin şebekeye bağlı olması yani enerjisiz düğüm olmaması ve radyallık şartının sağlanmasıdır [40].

Düğüm gerilimi ve hatların kapasite kısıtları, ceza fonksiyonları yöntemi ile eşitsizlik kısıtlarının çözümü için amaç fonksiyonuna katılabilir. Düğüm gerilim değişimi için f_v ve hat kapasite kısıtları için f_A ceza fonksiyonlarının amaç fonksiyonuna katılmasıyla amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilir:

$$\text{Min } f = \sum_{h=1}^{N_h} |I_h|^2 \cdot k_h \cdot R_h + c_1 \cdot f_v + c_2 \cdot f_A \quad (2.7)$$

2.2.2 Çok amaçlı DŞYY problemi

DŞYY probleminin çoklu amaçlar için çözümünde farklı yaklaşımlar uygulanmıştır. Bunları alt başlıklar olarak inceleyebiliriz.

2.2.2.1 Çoklu amaçların ağırlıklı toplamı

Amaç fonksiyonu, farklı amaçların belirli ağırlık katsayıları ile çarpımının toplamı şeklinde ifade edilir.

$$AF = w_1 \cdot P_{\text{kayıp}} + w_2 \cdot \text{TYD} + w_3 \cdot \text{GD} + w_4 \cdot \text{KS} + w_5 \cdot \text{ÖM} \quad (2.8)$$

Literatürde araştırmacılar DŞYY probleminde amaç fonksiyonunu farklı amaçların toplamı olarak ifade etmişlerdir. Örneğin, Santos ve arkadaşları çoklu amaç fonksiyonunu, şebeke kayıpları ($P_{kayıp}$), Transformatör yük dengelenmesi (TYD), gerilim düşümü (GD), kesinti frekansı (KS) ve önemli müşteri (ÖM) amaçlarının toplamı olarak denklem 2.8 deki gibi tanımlamıştır [41].

Sistem güvenilirliğinin dikkate alındığı başka bir çalışmada Zhang ve arkadaşları amaç fonksiyonunu; denklem 2.9 da olduğu gibi şebeke kayıpları, sağlanamayan enerji beklentisi (EENS), sistemin yıllık ortalama kesinti indisi (SAIFI), sistemin yıllık ortalama kesinti süresi indisi (SAIDI) ve ortalama servis mümkünlüğü (ASAI) amaçlarının toplamı olarak ifade etmişlerdir [43].

$$AF = w_1 \cdot P_{kayıp} + w_2 \cdot EENS + w_3 \cdot SAIFI + w_4 \cdot SAIDI + w_5 \cdot ASAI \quad (2.9)$$

Güç kalitesinin dikkate alındığı bir çalışmada Jazebi ve arkadaşları amaç fonksiyonunu denklem 2.10 da olduğu gibi şebeke kayıpları, toplam harmonik bozulma (THD) ve kritik baralardaki gerilim düşmesi (VS) olarak tanımlamışlardır [44].

$$AF = w_1 \cdot P_{kayıp} + w_2 \cdot THD + w_3 \cdot VS \quad (2.10)$$

2.2.2.2 Bulanık çoklu amaçlar

Eniyileme probleminde çoklu amaçlar dikkate alındığında, sınır değerler çok katı değilse bulanık üyelik fonksiyonları kullanılabilir [41].

$$Max \ AF = w_1 \cdot \mu_p + w_2 \cdot \sum_{i=1}^{nb} \mu_{vi} + w_3 \cdot \sum_{i=1}^{nbr} \mu_{ii} + w_4 \cdot \mu_s \quad (2.11)$$

Maksimumu aranan amaç fonksiyonunu, $P_{kayıp}$ 'ı, bara gerilim değişimleri toplamını, akım değişimleri toplamını ve anahtarlama sayısını minimum yapacak şekilde tanımlanan $\mu_p, \mu_{vi}, \mu_{ii}, \mu_s$ bulanık üyelik fonksiyonlarının ağırlıklı toplamı şeklinde tanımlanabilir [41,45]. Burada w_1, w_2, w_3 ve w_4 ağırlık katsayılarıdır. Hsiao, 2004 yılında yaptığı çalışmada bulanık çok amaçlı fonksiyonu güç kaybı, bara gerilim değişimi, anahtarlama sayısı ve fider ve transformatör kapasite indeksleri ile hizmet güvenilirliği amaçları olarak önermiştir [46].

2.3 Dağıtım Şebekesi Yeniden Yapılandırması Probleminin Çözüm Yöntemleri

Son yirmi yıl içinde literatürde DŞYY probleminin çözümü için birçok yöntem önerilmiştir. DŞYYP'nin normal şartlarda ve arıza durumu gibi acil durumlarda farklı yöntemlerle çözümlenir. Normal koşullarda, DŞYY probleminin en iyi çözümü ileriye dönük senaryo tahminleri göz önünde bulundurularak belirlenir. DŞYY problem anahtarlar konumlarının açık veya kapalı olmasından dolayı hem sürekli hem de ayırık değişkenler içeren karmaşık bir eniyileme sürecidir. Buna ek olarak, ayrıntılı model gerektiğinde güç akışı ve şebeke kayıpları gibi denklemler doğrusal olmayan ifadeler içermektedir. Sınırlı sayısal araçlar, geleneksel karmaşık tamsayı programlama yöntemleri ile verimli şekilde çözebilir.

Çözüm için bir yöntem, doğrusal olmayan ifadeleri lineer veya quadratik forma basitleştirmektir. Başka bir çözüm yöntemi ise son yıllarda yaygın olarak kullanılan sezgisel yöntemleri doğrudan arama için kullanmaktır.

DŞYY çözüm yöntemi için üç sınıflandırma yapılmaktadır. Bunlar sezgisel yöntemler, ileri sezgisel yöntemler, matematiksel optimizasyon temelli yöntemler olarak sınıflandırılabilir. Sezgisel yöntemler en çok kullanılan yöntemlerdendir. Hızlı sonuç vermeleri, basit formüleştirmeleri sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadırlar. İleri sezgisel yöntemler dışındaki sezgisel yöntemler yerel eniyi değerleri vermektedir. Matematiksel eniyileme yöntemleri, deterministik yöntemlerdir. Lineer programlama, quadratik programlama, lineer olmayan programlama sayılabilir.

DŞYY problemi matematiksel olarak karmaşık ayırık diferansiye edilmeyen eniyileme problemi olarak tanımlanır. Şebekenin radyal yapısı, lineer olmayan güç akışı kısıtları, uygun olabilecek bütün şebeke topolojileri içinde arama yapılması problemi zorlaştırmaktadır.

3. TRANSFORMATÖR ÖMRÜ VE TRANSFORMATÖR YAŞLANMASI

Transformatörler elektrik güç sisteminin güvenilirlik ve maliyet bakımından önemli elemanlardır. Enerji verimlilikleri oldukça yüksek olmasına rağmen ısı dağılımı transformatörün maksimum yüklenebilmesi için sınırlayıcı faktördür. Dağıtım sistemlerinin güvenilir çalışması, kritik olarak transformatör yalıtım sistemi üzerindeki yüklenme etkilerinin ayrıntılı olarak anlaşılmasına bağlıdır. Ayrıca transformatörlerin aşırı yüklü olarak çalıştırılması da yaşlanmayı hızlandırır ve büyük arızaların oluşma olasılığını artırır.

3.1 Elektriksel Donanımda Ömür ve Yaşlanma

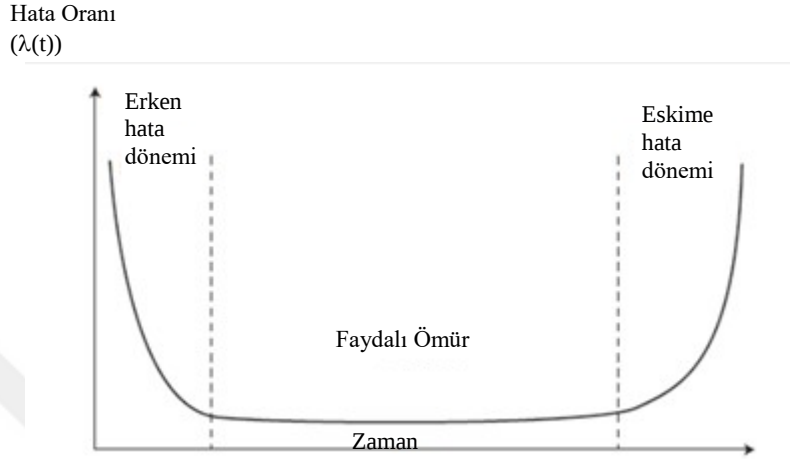
Elektrik Güç sistemleri, transformatörler, kablolar, iletim hatları, ayırıcılar, kesiciler gibi bir çok elemandan oluşmaktadır. Bu elemanların herbirininin doğal bir arıza oluşturma riski bulunmaktadır. Çok sayıda dış olaylar elemanın arızalanmasına sebep olabilmektedir. Bunun yanında sıcaklık, nem, kirlilik, yağmur, rüzgar, kar gibi atmosferik olaylar da elemanların arızalanmasında önemli rol oynamaktadır.

Genellikle elektriksel donanımın ömrünün 35-40 yıl arasında olduğu varsayılır. Donanım ömrünü tahmin ederken, aşırı çalışma koşulları, çevresel faktörler, bakım geçmişi gibi birçok parametreyi dikkate almak gerekir. Örneğin, modern bir ofis binasında temiz ve uygun sıcaklıkta çalışan bir ekipmanın ömür beklentisi ile kağıt fabrikası veya tozlu ve nemli ortamda çalışan ile aynı olamaz. Bu nedenle, donanım için ömür beklentisi çalışma şartları ve çevreye göre önemli ölçüde değişiklik gösterir.

Güç sistemi bileşenlerinin faydalı ömürleri genel olarak çalışma sıklıkları ve verilen bakım seviyesine bağlıdır. Mesela anahtarlama görevi olan kesicilerin ömürleri 40-50 yıl sürebilir. Sistemde bulunan bir transformatör yıldırım düşmesi gibi bir felaket yaşamazsa 40 yıl devrede kalabilir. Öte yandan güç transformatörlerindeki kademe değiştiriciler de arızaya eğilimlidirler.

3.1.1 Banyo küveti eğrisi (bathtub curve)

İstatiksel olarak, donanımın arızalanma oranlarının serviste kalma yılı ile arttığı iyi bilinen banyo küvet eğrisi ile açıklanmaktadır. Şekil 3.1 de verilen eğri ile ürünlerin zaman içindeki arızalanma oranları tanımlanmaktadır.



Şekil 3.1 : Banyo küveti eğrisi.

Bu eğri üç bölümden oluşmaktadır.

- 1) Erken arıza dönemi
- 2) Normal ömür yani faydalı ömür
- 3) Eskime ile artan arıza dönemi

olarak sıralanabilir. Erken arıza döneminde olan arızalar malzeme kusurları, tasarım ve montaj hataları gibi istenmeyen sebeplerden kaynaklanan arızalardır. Normal ömür dönemi ise dayanma geriliminin aşıldığı rastgele hata dönemidir. Sistemin verimli çalıştığı ve arızaların düşük ve rastgele meydana geldiği bir süreçtir. Malzemelerin yorulması veya tükenmesi ile ömürlerinin bittiği eskime arıza döneminde arızalanma oranı giderek artar. Bir ürünün faydalı ömrü en kısa ömürlü bileşeni ile sınırlıdır [47].

3.2 Transformatör Ömür Kaybının Belirlenmesi

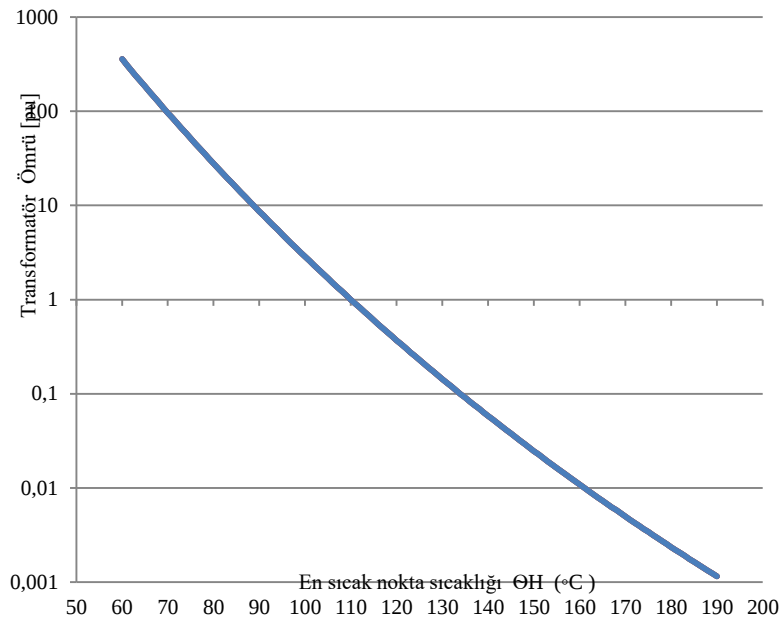
Transformatör ömrünün azalması yani yaşlanması yalıtımın yaşlanması anlamına gelmektedir. Bu konuda yapılan uzun süreli çalışmalar sonucunda, transformatör yaşlanması ve ömür kaybı hesapları IEEE ve IEC standartlarında da yer almaktadır. Yaşlanma veya yalıtımdaki bozulma, sıcaklığın, nem ve oksijen oranının zamana göre fonksiyonudur. Yalıtım sıcaklığı öncelikli kontrol parametresidir. Transformatör

içinde sıcaklık dağılımı düzenli değildir. En yüksek sıcaklıkta çalışan kısım en fazla yalıtım bozulmasına sebep olduğundan yaşlanma ile ilgili çalışmalarda en yüksek nokta sıcaklığı etkileri dikkate alınmaktadır [36, 37].

Transformatör faydalı ömrünü etkileyen en önemli parametre en sıcak nokta sıcaklığıdır (Θ_H). En sıcak nokta sıcaklığının belirlenmesi için deneysel çalışmalar sonucunda transformatör faydalı ömrü ile en yüksek sıcaklık arasındaki ilişki Arrhenius reaksiyon teorisinin uyarlanmasıyla IEEE standartlarında denklem 3.1 ile tanımlanmaktadır.

$$\text{Transformatör faydalı ömrü [p.u.]} = A \cdot \text{EXP} \left[\frac{B}{\Theta_H + 273} \right] \quad (3.1)$$

Burada Θ_H en sıcak nokta sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$), A ve B ise sabitlerdir. Transformatörün yalıtım ömrü en yüksek sargı sıcaklığı ile ilgilidir. Dağıtım ve güç transformatörlerinde aynı tip yalıtım malzemesi kullanıldığından eğri aynıdır. En sıcak nokta sıcaklığı 110°C altında kalındığında faydalı ömür 1 pu olarak hesaplanmaktadır [36, 37]. Uzun yıllar yapılan deneysel çalışmalar sonucu $A=9.8 \times 10^{-18}$ ve $B=15000$ olarak standartlarda yer almıştır. Faydalı ömrün, Θ_H en sıcak nokta sıcaklığı ($^{\circ}\text{C}$) ile değişimi Şekil 3.2’ de verilmiştir.



Şekil 3.2 : Transformatör ömrünün en sıcak nokta sıcaklığı ile değişimi.

Yaşlanma hızı, transformatörün 110 °C derecedeki yaşlanma hızıyla kıyaslama yapılabilmesini sağlayan bir orandır. Verilen yük ve sıcaklık değerlerinde FAA, transformatör yalıtım ömrünün yaşlanma hızı FEQA, ise değişen yük ve sıcaklık değerleri için eşdeğer yaşlanma hızıdır. Bu büyüklüklerin tanımları IEEE standartında yer almaktadır [36, 37].

$$F_{AA} = e^{\left[\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273} \right]} \quad (3.2)$$

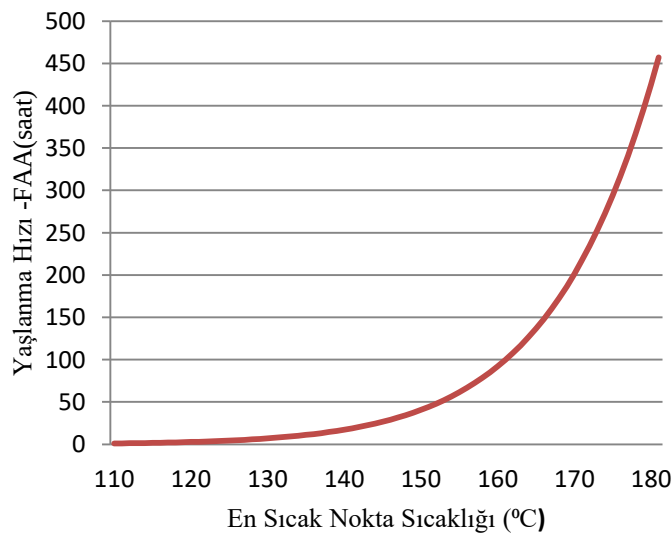
Yaşlanma hızı, 110 °C en sıcak nokta sıcaklığında “1” değerini almaktadır. Daha yüksek sıcaklıklarda “1” değerinden büyük, düşük sıcaklıklar da ise “1” değerinden küçük değer almaktadır. Şekil 3.3’de en sıcak nokta sıcaklığı ile yaşlanma hızının değişimi görülmektedir.

Verilen zaman periyodundaki eşdeğer yaşlanma hızı, N toplam zaman aralığında, denklem 3.3 ile ifade edilmektedir.

$$F_{EQA} = \frac{\sum_{n=1}^N F_{AA_n} \Delta t_n}{\sum_{n=1}^N \Delta t_n} \quad (3.3)$$

Transformatör faydalı ömrünün azalması ise eşdeğer yaşlanma hızına göre denklem 3.4 ‘de olduğu gibi ifade edilmektedir [36, 37].

$$\text{transformatör ömründeki azalma (\%)} = \frac{F_{EQA} * t * 100}{\text{Transformatör yalıtım ömrü}} \quad (3.4)$$



Şekil 3.3 : Yaşlanma hızının en sıcak nokta sıcaklığı (θ_H) ile değişimi.

3.2.1 Transformatör ömür kaybı için en sıcak nokta hesabı

3.2.1.1 IEEE C57.91-2011 standartına göre hesaplar

Transformatör ömür kaybının hesaplanması için en sıcak nokta sıcaklığının hesaplanması gerekir. Transformatörün en sıcak nokta sıcaklığının belirlenmesi için deneysel çalışmalarla hesaplanabilmektedir. Üst yağ sıcaklığında, yük durumundan ve ortam sıcaklığından en sıcak nokta sıcaklığının standartlarda yer alan termal modellerle tahmin edilebilmektedir. Üst yağ sıcaklığı ölçümü elimizde yoksa en sıcak nokta sıcaklığı yük durumu ve ortam sıcaklığında tahmin edilmektedir.

IEEE C57.91-2011 standartı sıcaklık değişimlerini yük değişimine göre hesaplamaktadır. Yük değişimleri ile oluşan üst yağ sıcaklığı ve en sıcak nokta sıcaklığı hesapları basitleştirilmiştir. Sıcaklık değişimleri yağ viskozitesinde değişikliklere sebep olur. Yük kaybı ve yağ viskozitesindeki değişimi hesaplara katmak için denklemlerde m ve n katsayıları kullanılmıştır. Soğutma tipine bağlı olarak 0-1 arasında bir değer almaktadır. En sıcak nokta sıcaklığı (Θ_H), ortam sıcaklığı (Θ_A), ortam sıcaklığına göre üst yağ sıcaklığı değişimi ($\Delta\Theta_{TO}$) ve yağ sıcaklığına göre sargı sıcaklık değişimi ($\Delta\Theta_H$) değerinin toplamından oluşmaktadır.

$$\Theta_H = \Theta_A + \Delta\Theta_{TO} + \Delta\Theta_H \quad (3.5)$$

Ortam sıcaklığına göre üst yağ sıcaklığı denklem 3.6'daki gibi ifade edilir.

$$\Theta_{TO} = \Theta_A + \Delta\Theta_{TO} \quad (3.6)$$

IEEE C57.91-2011 standartına göre hesaplamada kullanılan bileşenler de aşağıdaki açıklanmaktadır.

3.2.1.2 Ortam sıcaklığına göre üst yağ sıcaklık değişimi ($\Delta\Theta_{TO}$)

Yük değişimlerine ve bir yağ sabitine (τ_{TO}) bağlı olarak denklem 3.7'deki gibi ifade edilmektedir.

$$\Delta\Theta_{TO} = (\Delta\Theta_{TO,u} - \Delta\Theta_{TO,i}) \left(1 - \exp^{-\frac{t}{\tau_{TO}}}\right) + \Delta\Theta_{TO,i} \quad (3.7)$$

Üst yağ sıcaklığı değişiminin ilk değeri, denklem 3.8'de görüldüğü üzere anma üst yağ sıcaklık artışının anma değeri, yüklenme oranına (K) ve soğutma tipine bağlı bir katsayıya (n) ile hesaplanabilmektedir.

$$\Delta\Theta_{TO,i} = \Delta\Theta_{TO,R} \left[\frac{(K_1 R + 1)}{(R + 1)} \right]^n \quad (3.8)$$

Üst yağ sıcaklığı son değeri de benzer şekilde denklem 3.9 ile hesaplanabilmektedir.

$$\Delta\theta_{TO,u} = \Delta\theta_{TO,R} \left[\frac{(K_u R + 1)}{(R + 1)} \right]^n \quad (3.9)$$

Bir önceki yük durumu için hesaplanan üst yağ sıcaklığı değişimi ($\Delta\theta_{TO}$) değeri, bir sonraki adımda üst yağ sıcaklığı değişimi ilk değerine ($\Delta\theta_{TO,i}$) eşit alınır. Burada, τ_{TO} yağ zaman sabiti, $\Delta\theta_{TO,R}$ değeri üst yağ sıcaklığı artışının anma değeri, n transformatör soğutma tipine göre değişen bir katsayıdır. ONAN yani kendinden soğutmalı transformatörlerde n değeri 0.8, ONAF yani zorlamalı soğutma durumunda n değişkeni 0.9 değerini almaktadır. R değeri de transformatör anma güç kayıplarının boşa kayıplarına oranını gösteren bir katsayıdır.

3.2.1.3 Yağ sıcaklığına göre en sıcak nokta sıcaklığı

Transformatörün ömür kaybının hesaplanabilmesi için sargıların ulaşabileceği en yüksek sıcaklığın bilinmesi gerekir. Üst yağ sıcaklığına göre sıcak nokta sıcaklığı denklem 3.6'daki gibidir. En sıcak nokta sıcaklık artışı, yüke ve bir sargı zaman sabitine (τ_w) bağlı olarak denklem 3.10'da görüldüğü gibi ifade edilir.

$$\Delta\theta_H = (\Delta\theta_{H,u} - \Delta\theta_{H,i}) \left(1 - \exp^{-\frac{t}{\tau_w}} \right) + \Delta\theta_{H,i} \quad (3.10)$$

Üst yağ sıcaklığına göre en sıcak nokta sıcaklık değişiminin ilk değeri, denklem 3.11'deki gibi üst yağ sıcaklığına göre en sıcak nokta sıcaklık artışı anma değeri ($\Delta\theta_{H,R}$) ile yüklenme oranına (K_i) bağlı olarak hesaplanır. m katsayısı soğutma şekline göre değişen direnç değişimi ve yağ viskozitesindeki yüke bağlı değişimleri gösteren deneysel bir katsayıdır. ONAN ve ONAF soğutmada 0.8 değerini almaktadır [36, 37].

$$\Delta\theta_{H,i} = \Delta\theta_{H,R} K_i^{2m} \quad (3.11)$$

Üst yağ sıcaklığına göre en sıcak nokta sıcaklık değişiminin son değeri de benzer şekilde en sıcak nokta sıcaklık artışı anma değeri ($\Delta\theta_{H,R}$) ve yüklenme oranına (K_u) ve m katsayısına bağlı olarak denklem 3.12'deki gibi hesaplanır.

$$\Delta\theta_{H,u} = \Delta\theta_{H,R} K_u^{2m} \quad (3.12)$$

Üst yağ sıcaklığına göre en sıcak nokta sıcaklığının anma değeri denklem 3.13'de görüldüğü şekilde hesaplanır. Test raporlarında verilen ortam sıcaklığına göre en

sıcak nokta sıcaklık artışı ile ortam sıcaklığına göre üst yağ sıcaklık artışının anma değerinin farkına eşittir [36,37].

$$\Delta\theta_{H,R} = \Delta\theta_{H/A,R} - \Delta\theta_{T0,R} \quad (3.13)$$





4. TRAFO ÖMÜRLERİNİ İYİLEŞTİRİCİ SİSTEM İŞLETİM KOŞULLARININ BELİRLENMESİ

Tezde göz önüne alınan yeniden dağıtım şebekesi yeniden yapılandırma probleminde amaç, işletme kısıtları altında, toplam aktif kayıpların ve transformatör ömründeki azalmanın minimum olduğu şebeke yapısının elde edilmesidir.

Göz önüne alınan çok amaçlı en iyileme probleminde amaç,

$$\min F = [f_1, f_2] \quad (4.1)$$

olarak ifade edilir. Burada f_1 , f_2 toplam aktif kayıp, transformatör ömründeki azalma gibi amaçları göstermektedir.

$$f_1 = \sum_{i=1}^N k_i R_i \left(\frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \quad i \in N \quad (4.2)$$

$$f_2 = \frac{e^{\left[\frac{15000}{383} - \frac{15000}{\theta_H + 273} \right] * \Delta t}}{\text{Transformatörün Faydalı Ömrü}} \quad (4.3)$$

4.1 Eşitlik Kısıtları

Aktif ve reaktif güç dengesine ilişkin eşitlikler eşitlik kısıtı olarak alınır. Dağıtım sisteminin i . barasına giren aktif güç ve reaktif güç denklem 4.4 ve denklem 4.5'deki gibi ifade edilir.

$$P_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \cos(-\theta_{ij} - \delta_j + \delta_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.4)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^n V_i V_j Y_{ij} \sin(-\theta_{ij} - \delta_j + \delta_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4.5)$$

4.2 Eşitsizlik Kısıtları

Bir elektrik dağıtım sisteminde sistemin güvenli işletiminin gerçekleştirilebilmesi ve kullanılan fiziksel donanımın (kesiciler, transformatörler, iletkenler gibi) çeşitli büyüklere ilişkin kısıtlamalara uyulmalıdır. Sistem büyüklüklerinin sınırlarını yansıtan eşitsizlik kısıtlamaları aşağıda verilmiştir.

Dağıtım Hattı kapasite kısıtı, denklem 4.6 'da verilmektedir.

$$I_{ij} \leq I_{ijmax} \quad (4.6)$$

Hat parçalarından geçen akım değeri akım taşıma değerinin üzerine geçmemelidir.

Bara gerilimi kısıtı, denklem 4.7'de görülmektedir.

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max} \quad i = 1,2,3, \dots, N_{bara} \quad (4.7)$$

Bara gerilimlerinin belirli limitler içinde olması gerekliliğini göstermektedir.

Dağıtık üretim kaynakları için, reaktif ve aktif güç kısıtları denklem 4.8 ve 4.9'da verilmiştir.

$$Q_{g,i}^{min} \leq Q_{g,i} \leq Q_{g,i}^{max} \quad i = 1,2,3, \dots, n_g \quad (4.8)$$

$$P_{g,i}^{min} \leq P_{g,i} \leq P_{g,i}^{max} \quad i = 1,2,3, \dots, n_g \quad (4.9)$$

Transformatör kademesi için kısıtlar denklem 4.10'daki gibi yazılabilir.

$$t_i^{min} \leq t_i \leq t_i^{max} \quad i = 1,2,3, \dots, n_{tr} \quad (4.10)$$

Transformatör yüklenmesi için güç kısıtları denklem 4.11'de verilmiştir.

$$S_i \leq S_i^{max} \quad i \in nl \quad (4.11)$$

Kompanzasyon sistemi için reaktif güç kısıtları denklem 4.12'deki gibi

$$Q_{C,i}^{min} \leq Q_{C,i} \leq Q_{C,i}^{max} \quad i \in n_c \quad (4.12)$$

değerleri arasında olmalıdır. Bu denklemlerde, V_i bara gerilim genliklerini, $P_{g,i}$ üretim barası aktif güç üretimini, $Q_{g,i}$ baraların dağıtık üretim reaktif güç üretimini, $Q_{C,i}$ baraların şönt kapasitör reaktif güç üretimini, t_i transformatör kademe ayarı, S_i transformatör yüklenmesi durumlarını ifade etmektedir.

4.3 Topoloji Kısıtı

Şebekenin radyal çalışma şartının sağlanması gerekir. Bu kısıt için genetik algoritma ile üretilen anahtarlama konumlarında radyallik şartının sağlandığı kontrol edilmeli. Bunun için Graf Teori kullanılarak radyallik kontrolü yapılabilmektedir.

4.4 Trafo Ömürlerini İyileştirici Sistem İşletim Koşullarının Sezgisel Algoritma ile Elde Edilmesi

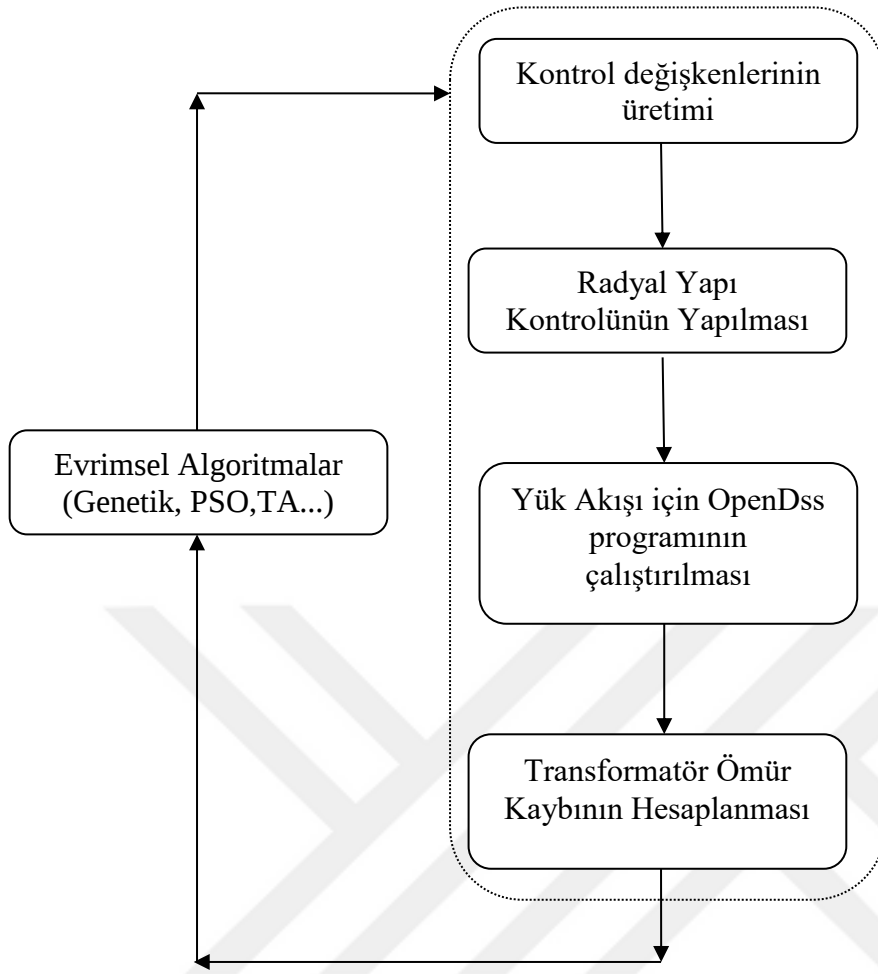
Dağıtım Şebekesi Yeniden Yapılandırma probleminin çözümünde transformatör yaşlanmasının dikkate alındığı, şebeke kayıplarının minimum olduğu ve bara gerilimlerinin belirli sınırlar içinde kaldığı eniyi şebeke yapısının farklı tip yük grupları içeren dağıtım şebekesinde gerçekleştirilmesi hedeflenmektedir. Çoklu amaç fonksiyonun çözümü genetik, parçacık sürü ve tavlama benzetimi ile gerçekleştirilecektir. Problemin çözümü için Matlab Toolbox kullanılmıştır.

4.4.1 Problemin kontrol değişkenlerinin belirlenmesi

Kontrol değişkenleri anahtar konumları ve ayarlı kapasiteler olarak belirlenmiştir. Anahtar konumları 1 (kapalı) ve 0 (açık) olarak iki değerlidir. Reaktif güç değerleri ise ilgili reaktif güç kompanzasyon sisteminin sınırları arasında değer alabilmektedir.

4.4.2 Yöntemin Akış Şeması

Dağıtım Şebekesi Yapılandırma probleminde transformatör ömürlerini iyileştirici yöntem uygulamasına ait temel akış şeması Şekil 4.1’de verilmiştir. Matlab ortamında geliştirilen kodlar kullanılmıştır. Dağıtım Şebekesi yük akışı OpenDss paket programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.1 : Yöntemin temel akış diyagramı.

4.4.3 Amaç ve uygunluk fonksiyonunun belirlenmesi

Tez çalışmasında oluşturulan çok amaçlı bir eniyileme problemini tek amaçlı bir eniyileme problemine dönüştürmek için ağırlıklı toplam yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde her bir amaç fonksiyonu, skaler ağırlıklar verilerek toplanarak problem tek bir fonksiyon ile ifade edilebilir. Lineer olmayan YYP'ne, transformatör yaşlanma etkisinin de eklenmesiyle çoklu amaç fonksiyonu şu şekilde ifade edilebilir [48]:

$$obj_f(x) = wc_1 * F_1(x) + wc_2 * F_2(x) \quad (4.11)$$

wc_1 ve wc_2 ağırlık katsayılarıdır. Ağırlık değerlerinin belirlenmesi için farklı yaklaşımlar bulunmaktadır. Normalize katsayılar, α_1 ve α_2 sabit değerlerinin temel durumdaki amaç değerlerine bölünmesi ile elde edilen katsayılar olmak üzere denklem 4.12'deki gibi ifade edilebilir.

$$wc_1 = \frac{\alpha_1}{P_b} \quad , \quad wc_2 = \frac{\alpha_2}{TLol_b} \quad (4.12)$$

Amaçlanan uygulamada normalizasyon kullanıldığından eşit ağırlık için her bir amacın normalize katsayı değeri olarak “1,00” değeri, tek bir amaç için çözüm yapıldığında ise diğer amaçlar için katsayılar “0” değerinde alınmıştır.

Toplam aktif kayıpları ifade eden $F_1(x)$ fonksiyonu denklem 4.13’deki gibi ifade edilebilir.

$$F_1(x) = \sum_{i=1}^n 3 \cdot R_i \cdot I_i^2 \quad (4.13)$$

$$F_2(x) = TLoL(\%) = \frac{\sum_{i=1}^{tn} FAA_n \cdot \Delta t}{tr.faydalı \text{ ömrü}} \cdot 100 \quad (4.14)$$

$F_2(x)$ fonksiyonu transformatör yaşlanması ifade eden fonksiyon olarak denklem 4.14’de verilmiştir. Yeniden yapılandırma problemi amaç fonksiyonu, $F_1(x)$ ve $F_2(x)$ amaçlarının toplamı olarak denklem 4.15 ile ifade edilebilir.

$$\text{Min} \left\{ obj_f = \alpha_1 * \frac{P_K}{P_b} + \alpha_2 * \frac{TLoL}{TLoL_b} \right\} \quad (4.15)$$

Burada, P_K herhangi bir anahtarlama durumundaki toplama sistem kayıplarını göstermektedir. P_b ise temel anahtar konumundaki sistem kayıplarını göstermektedir. $TLoL$ herhangi bir anahtar konumundaki toplam transformatör ömür kaybı, $TLoL_b$ ise temel anahtar durumunda toplam transformatör ömür kaybı olarak tanımlanmıştır. Ceza katsayıları yöntemi kullanılarak, kısıtlı eniyileme problemi ceza fonksiyonunun minimumunun arandığı eniyileme problemine dönüştürülmüş olur. Uygunluk fonksiyonu (UF), ceza katsayılarının amaç fonksiyonuna dahil edilmesi ile denklem 4.16’da olduğu gibi ifade edilebilir.

$$UF = obj_f + c_1 * \sum_{i=1}^{N_{hat}} \left(\frac{I_i - I_{imax}}{I_{imax}} \right)^2 + c_2 * \sum_{j=1}^{N_{bara}} \left(\frac{V_j - V_{stnir}}{V_{stnir}} \right)^2 + c_3 * \sum_{k=1}^{N_{trafo}} \left(\frac{S_k - S_{kmax}}{S_{kmax}} \right)^2 \quad (4.16)$$

c_1, c_2, c_3 ceza katsayıları olarak kısıtlı eniyileme probleminin çözümü için uygunluk fonksiyonuna katılmıştır. c_1, c_2, c_3 ceza katsayıları ile hat akımları akım taşıma sınır değeri, gerilim kısıtları, transformatör güç kısıtlarını eniyileme problemine katılmış olur. c_1, c_2 ve c_3 ’ün alacağı değerler kısıtlara göre Çizelge 4.1’de görülmektedir.

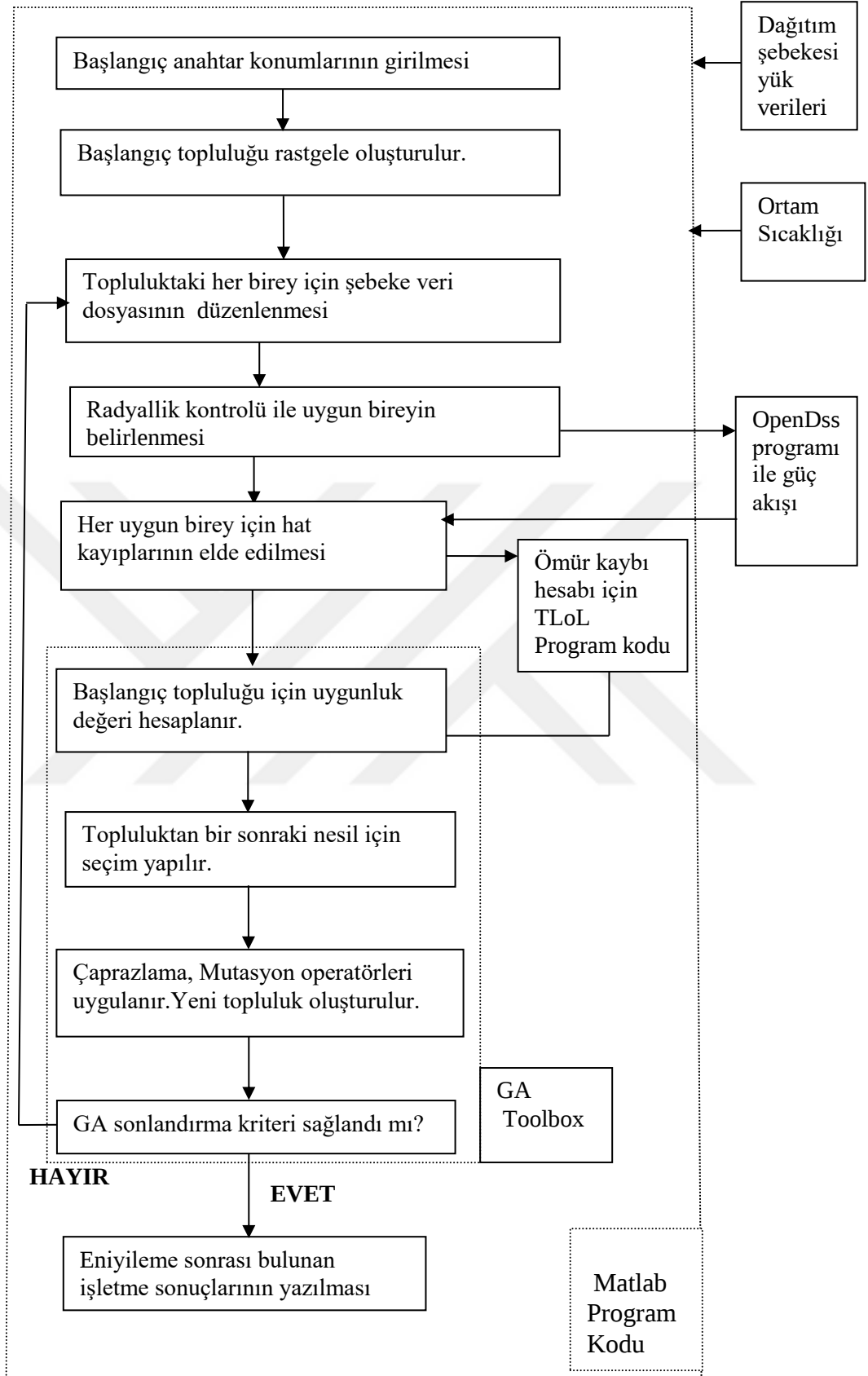
Çizelge 4.1 : Ceza katsayılarının kısıtlara göre aldığı değerler.

Kısıtlar	Değişimi
Akım kısıtı $c_1=0$	$I_i < I_{i,maksimum}$
$c_1>>1$	$I_i > I_{i,maksimum}$
Gerilim kısıtı $c_2=0$	$V_{j,minumum} < V_j < V_{j,maksimum}$
$c_2>>1$	$V_j > V_{j,maksimum}$
Güç kısıtı $c_3=0$	$S_k < S_{k,maksimum}$
$c_3>>1$	$S_k > S_{k,maksimum}$

4.5 Problemin Genetik Algoritma İle Çözümü

Dağıtım Şebekesi Yapılandırma problemin çözümü için ilk olarak evrimsel algoritmalarından genetik algoritma belirlenmiştir. Genetik Algoritma tanımı ve operatörleri hakkında bilgi EK-A1 de bulunmaktadır.

Transformatör ömürlerinde iyileştirme gerçekleştiren algoritma yapısı Şekil 4.2’de ayrıntılı olarak verilmiştir. Matlab altında gerçekleştirilen program kodunda ilk olarak kontrol değişkeni olan anahtar konumlarına göre rastgele başlangıç topluluğu oluşturulur. Topluluktaki her birey dağıtım şebekesinde farklı bir yapıyı göstermektedir. Her birey için veri dosyası yeniden düzenlenir. Radyallik kısıtının kontrolü yapılarak uygun birey belirlenir. Dağıtım şebekesi güç akışları OpenDss programı ile Matlab ortamında koşturulur. Her birey yani şebeke yapısı için şebeke kayıpları ve transformatör ömür kaybı hesaplanır. Transformatör ömür kaybı hesabı için, Matlab ortamında yazılan üst yağ ve en sıcak nokta sıcaklığının hesaplandığı alt programlar kullanılır. Şebeke kayıpları ve transformatör ömür kaybı hesabı ile her birey için bir uygunluk fonksiyonu değeri belirlenir. Her birey yani şebeke yapısı için şebeke kayıpları ve transformatör ömür kaybı hesaplanarak uygunluk fonksiyonu değeri belirlenir. Genetik operatörleri kullanılarak bir sonraki nesil için seçim yapılır.



Şekil 4.2 : DŞYY için geliştirilen yöntemin akış şeması.

GA seçim operatörlerinden Rulet Çarkı, Turnuva ve Elitizm yöntemleri kullanılmıştır. Çaprazlama ve mutasyon operatörleri de kullanılarak bir sonraki nesil oluşturulur. GA sonlandırma kriteri sağlanıncaya kadar bu işlem tekrarlanır. Sonlandırma kriteri sağlandığında transformator ömrünü iyileştirici, minimum aktif güç kaybına sahip olan en iyi şebeke yapısı belirlenmiş olur. Şekil 4.2’de DŞYY probleminin GA ile çözümü için geliştirilen yöntemin akış şeması bulunmaktadır.



5. FARKLI SENARYOLARIN İNCELENMESİ

Çalışmada gerek transformatör yaşlanması üzerinde etkili olan zaman içindeki yük değişimi ve fotovoltaik sistemler gibi yenilebilir dağıtık enerji üretimlerinin etkileri gerekse transformatör ömürlerinin de uzatılmasının dikkate alınması ile geliştirilen yeni DŞYY yaklaşımının örnek sistem üzerindeki uygulamalarını görmek amacıyla bir dizi inceleme yapılmıştır. Bu bölümde önce günlük, mevsimsel ve yıllık yük eğrileri üzerinde durulmuş sonrasında, dağıtım şebekesinde yaygınlığı artan yenilebilir kaynaklardan biri olan Fotovoltaik üretimin transformatör yaşlanması üzerindeki etkileri incelenmiştir.

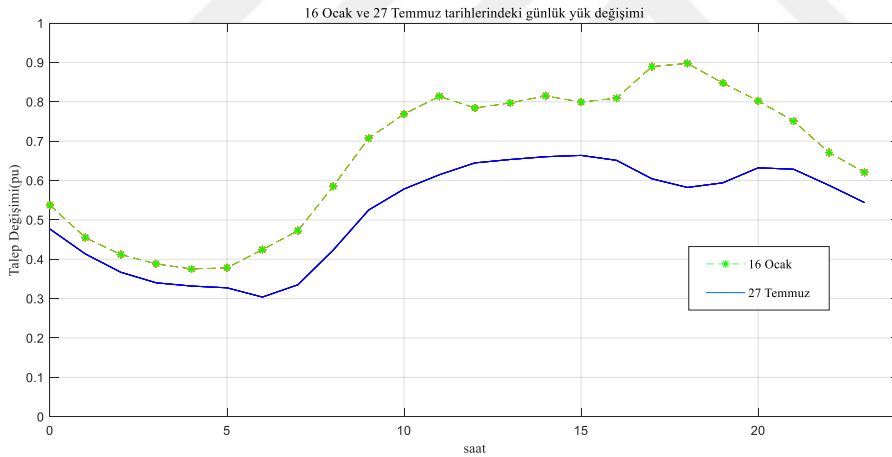
Sistemde yer alan transformatörlerin yaşlanmasını en aza indirgeyecek şekilde, anahtar durumlarını içeren fider konfigürasyonların belirlenmesi dağıtım sisteminin işletilmesi için önemlidir. Şebeke yapılandırmasını belirlemek için transformatörlerden beslenen 16 ve 85 baralı örnek sistem uygulaması farklı tip tüketicileri bulunan farklı senaryolar için geliştirilen yöntem incelenmiş, sonuçları karşılaştırılmıştır. Bu amaçla Genetik Algoritma (GA), Tavlama Benzetimi (TB) ve Parçacık Sürü Algoritmalarına (PSO) dayanan eniyileme tekniklerinin uygulaması bu bölümde gerçekleştirilmiştir. Farklı tip yük gruplarını içeren endüstriyel ve mesken tipi tüketici ile günlük, haftalık, aylık, uzun veya kısa mevsimlik veriler ile şebeke kayıpları ve yaşlanmanın da dikkate alındığı durum için analizler yapılmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Bu amaçla ilk olarak fotovoltaik sistemlerin dağıtım transformatörlerinin yaşlanmasına olan etkilerini inceleyebilmek için örnek bir tüketim bölgesi göz önüne alınmıştır. Üç farklı transformatörden beslenen 16 baralı örnek sistem uygulaması farklı tip yük grupları içeren (mesken, sanayi) tüketiciler ile oluşturulan farklı senaryolar için geliştirilen yöntem uygulanmıştır. Ayrıca geliştirilen algoritmanın etkinliğini değerlendirmek için daha büyük bir test sistemi olarak 2 farklı transformatörden beslenen 85 baralı örnek sistem incelenmiştir.

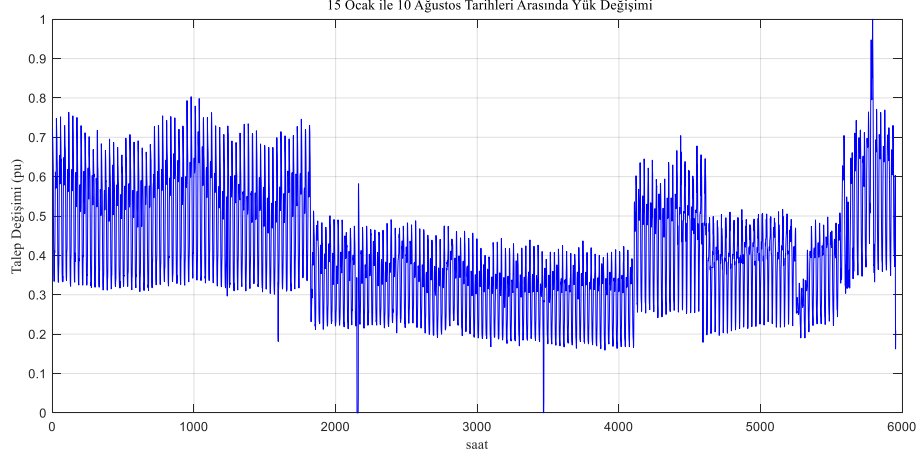
5.1 Yük Değişiminin Transformatör mrne Etkileri

Günlük, mevsimsel ve yıllık yk eğrileri, güç sisteminin planlanması ve işletilmesinde kullanıldığı gibi yük tahmini çalışmalarında da kullanılmaktadır. l cihazlarından elde edilen yük eğrilerinin incelenmesi ile yükün karakteristiğiyle ilgili bilgiler alınabilir. Örneğin, yükün en yüksek talebi, puant olmayan zamanlardaki enerji tüketimi gibi. Yük eğrileri günlük, haftalık, nevsimlik olarak farklılıklar göstermektedir. şebeke planlanması ve işletilmesinde yk eğrilerindeki değişimlerin dikkate alınması gerekmektedir.

Bu çalışmada kullanılan yük eğrileri, 2015 yılında Anadolu'da bir şehirde evsel ve endüstriyel tip tüketicilerde gerçekleştirilmiş ölçümlerden elde edilmiştir. Ölçümlerden elde edilen yük profili verileri IEEE 16 baralı ve 85 baralı test sisteminde kullanılmıştır. Yaz ve kış mevsimine ait evsel tip tüketicinin günlük yük eğrisi şekil 5.1'de paylaşılmıştır.



şekil 5.1 : 16 Ocak ve 27 Temmuz tarihlerine ait evsel tip tüketicinin günlük yük eğrileri.



Şekil 5.2 : 15 Ocak ve 10 Ağustos günleri arasındaki endüstriyel tip tüketicinin yük eğrisi.

Transformatörün yük profilinin 15 Ocak ve 10 Ağustos günleri arasındaki değişimi Şekil 5.2’de görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere enerji tüketiminin mevsimsel olarak değişim gösterdiği anlaşılmaktadır.

5.1.1 Fotovoltaik üretimin transformatör ömrüne etkileri

Güç sisteminin önemli bir elemanı olan transformatörlere dağıtım şebekesinde yaygınlığı artan yenilebilir kaynaklardan biri olan Fotovoltaik üretimin etkilerinin incelenmesi hedeflenmektedir. Dağıtım transformatörlerinin arızasız güvenilir çalışması, yalıtım üzerine yüklenme etkilerinin ayrıntılı olarak anlaşılmasına bağlıdır. FV üretim değerlerinin ve yük profilinin mevsimsel değişiminin transformatör yaşlanmasındaki etkilerinin incelenmesi bu bölümde planlanmıştır. Bu bölümde yapılan hesaplamalarda üçüncü bölümdeki denklemlerden yararlanılmıştır.

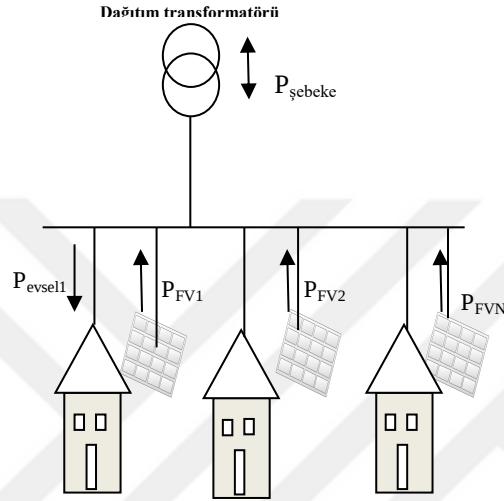
5.1.2 Örnek sistem incelemesi

Fotovoltaik sistemlerin dağıtım transformatörlerinin yaşlanmasına olan etkilerini inceleyebilmek için örnek bir tüketim bölgesi göz önüne alınmış, mevsimsel etkiler de göz önüne alınarak incelenmiştir. İncelemelerde, İstanbul Teknik Üniversitesi yerleşkesinde bulunan FV panellerden 2009 yılında toplanmış verilerden yararlanılmıştır [49]. Bu veriler temel alınarak dağıtım transformatöründen beslenen 5m²’lik 500W gücünde çatı tipi panel bulunduran 1000 tüketiciden oluşan sistem tasarlanmıştır. Şebekeye bağlı FV üretim bulunduran evsel tüketicilerden oluşan

şebeke yapısı Şekil 5.3 ‘de görülmektedir. Transformatörden çekilen net güç değeri denklem 5.1’deki gibi ifade edilebilir.

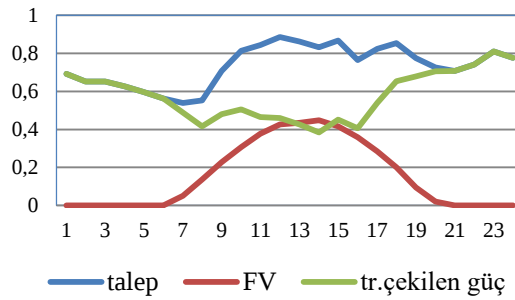
$$P_{tr.net} = (\sum_{i=1}^{n_t} P_{tuketim,i} + \sum_{i=1}^{n_e} P_{kayıp,i}) - \sum_{i=1}^{n_{FV}} P_{FV,i} \quad (5.1)$$

$P_{tuketim,i}$ i.tüketicinin (evin) tüketimi, $P_{kayıp,i}$ i. Hat elemanındaki toplam kaybını, $P_{FV,i}$ ise i.FV üretimi ifade etmek üzere $P_{tr.net}$ değeri denklem 5.1 ile hesaplanabilir. $P_{tr.net}$ transformatör yüklenmesinde etkilidir.

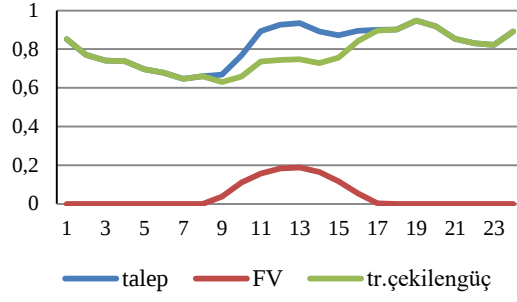


Şekil 5.3 : N adet ev tipi şebeke bağlantılı FV üretim.

Transformatörden çekilen net gücün, Temmuz ve Ocak aylarındaki değişimi, yük profilinin Temmuz ve Ocak aylarındaki değişimi ve FV üretimin 24 saatlik değerleri Şekil 5.4’de ve Şekil 5.5’de verilmiştir. Temmuz ayındaki FV üretimin transformatör gücüne göre talep güce katkısı oldukça yüksek iken, Ocak ayında bu oran oldukça düşüktür. Transformatörden çekilen güç değeri 2000kVA transformatör gücüne göre normalize edilmiş değerlerdir.

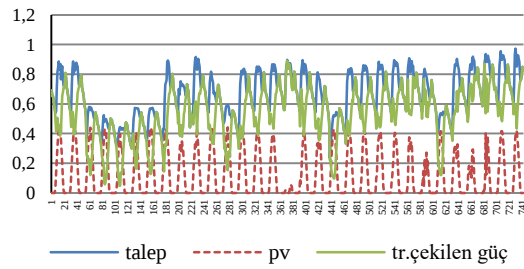


Şekil 5.4 : 1 Temmuz gününe ait talep, FV üretim ve transformatörden çekilen gücün değişimi.



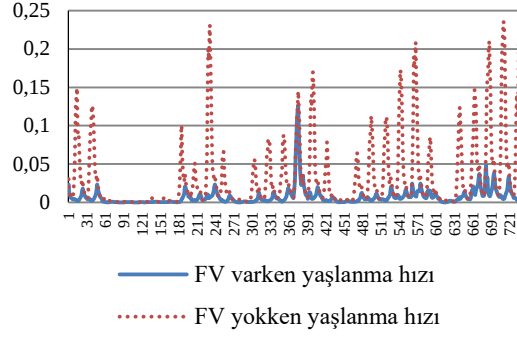
Şekil 5.5 : 20 Ocak gününe ait talep, FV üretim ve transformatörden çekilen gücün değişimi.

FV katılımının transformatör ömrüne etkisini incelemek için 2009 yılı Temmuz ayı hava sıcaklığı verileri Meteoroloji Genel Müdürlüğünden temin edilmiştir. Oluşturulan senaryoda Temmuz ayına ait talep güç, transformatörden çekilen güç değerleri ve FV üretim değerleri Şekil 5.6’da grafik olarak verilmiştir. FV üretimin yüksek olduğu Temmuz ayında bir bulutlu gün dışında transformatör yük durumuna olumlu katkıları görülmektedir.



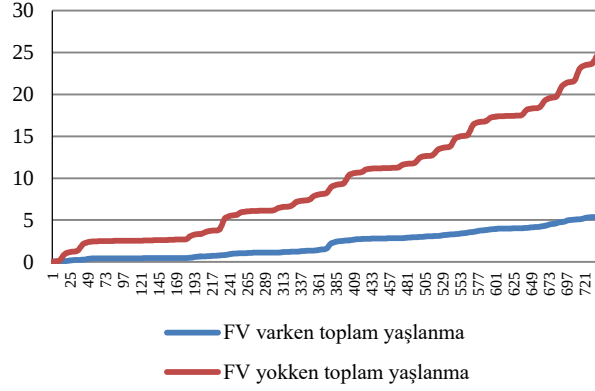
Şekil 5.6 : Temmuz ayına ait talep, FV üretim ve tr. çekilen güç değerlerinin değişimi.

Transformatör yük durumundaki değişiminin Temmuz ayı değerleri kullanılarak 2000kVA’lık dağıtım trafosunun yaşlanma hızı ve toplam yaşlanma süresine olan etkileri hesaplanmıştır. Yaşlanma hızının FV üretiminin olması ve olmaması durumundaki değişimi Şekil 5.7’de grafik olarak sunulmuştur. Yaşlanma hızının FV üretimine bağlı olarak düştüğü görülmektedir. Toplam yaşlanma süresinin FV üretim olması ve olmaması halindeki değişimi de Şekil 5.8’de verilmiştir. FV üretimin transformatör toplam yaşlanma süresine olumlu etkilerinin olduğu görülmektedir.

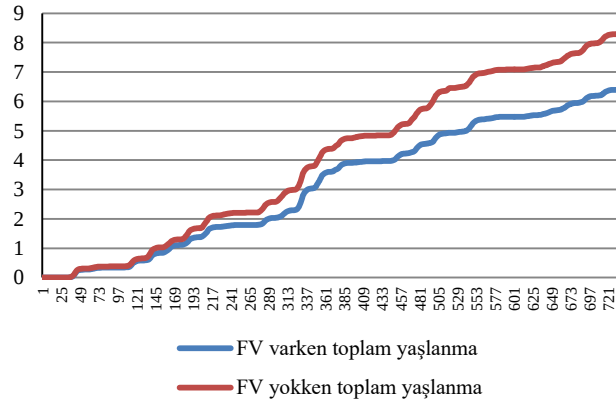


Şekil 5.7 : Transformatörün Temmuz ayına ait yaşlanma hızının değişimi.

Toplam yaşlanma süresinin Temmuz ve Ocak ayı için FV üretim olması ve olmaması durumundaki değişimi Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'da verilmiştir. Grafiklerden FV üretiminin transformatör yaşlanma süresine olumlu etkilerinin olduğu görülmektedir.

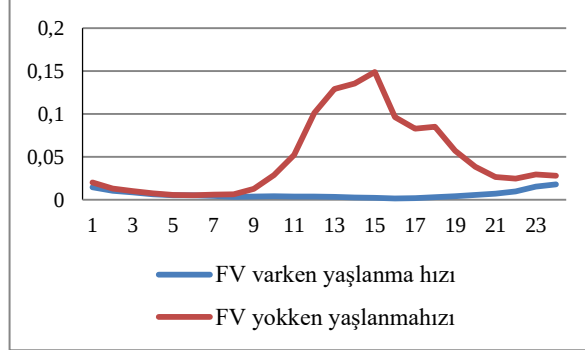


Şekil 5.8 : Transformatörün Temmuz ayı toplam yaşlanma süresinin değişimi.



Şekil 5.9 : Transformatörün Ocak ayı toplam yaşlanma süresinin değişimi.

Şekil 5.10'da FV üretimin fazla olduğu 1 Temmuz gününe ait yaşlanma hızının gün içerisindeki değişimi verilmektedir. Yoğun FV üretimin olduğu saatlerde yaşlanmanın durduğu ve transformatör ömrüne olumlu katkıları yaptığı görülmektedir.



Şekil 5.10 : Transformatörün 1 Temmuz günü için yaşlanma hızı değişimi.

Bu çalışma bölümünde, güç sisteminde FV üretimin transformatör faydalı ömrünü uzattığı mevsimsel etkiler göz önüne alınarak sunulmuştur. Güç sisteminde FV üretimin kullanımının transformatör yaşlanmasına olumlu etkileri olduğu görülmektedir.

5.2 DŞYY İçin Örnek Sistem incelemeleri

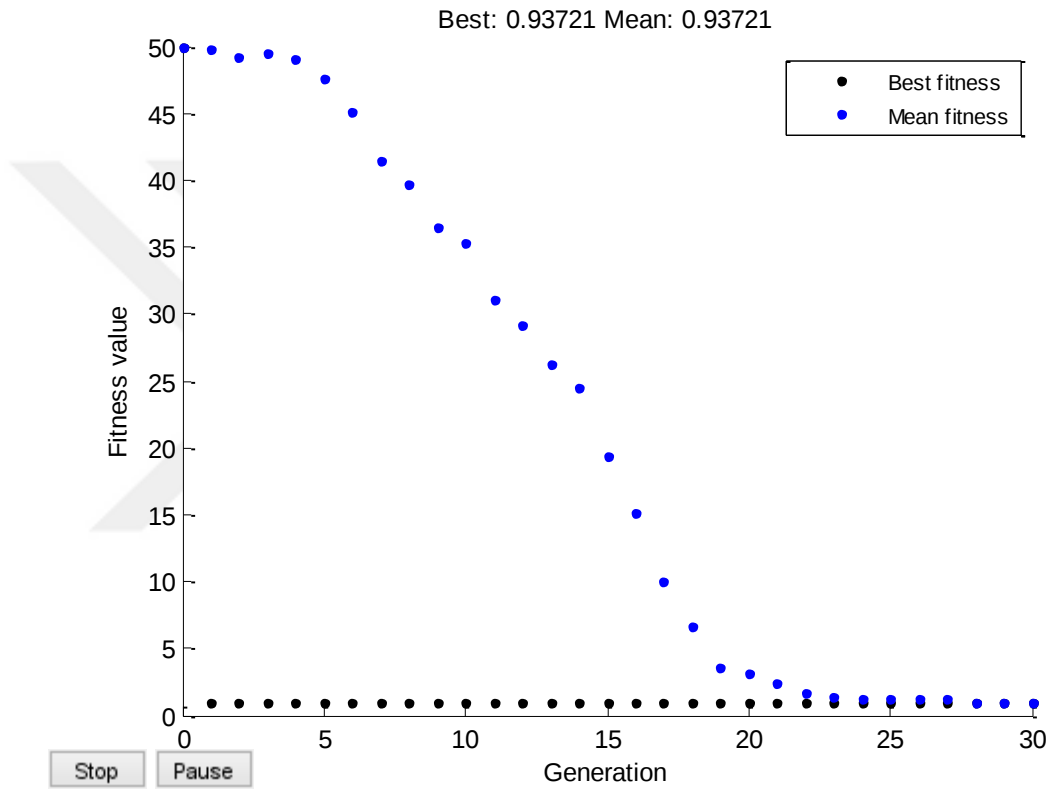
Geliştirilen yeni DŞYY yaklaşımının örnek sistem üzerindeki uygulamalarını görmek amacıyla iki farklı örnek dağıtım sistemi üzerinde bir dizi inceleme yapılmıştır.

5.2.1 16 baralı örnek sistem uygulaması

Üç farklı transformatörden beslenen 16 baralı örnek sistem uygulaması farklı tip yük grupları içeren (konut, sanayi) tüketiciler ile oluşturulan farklı senaryolar için geliştirilen yöntem incelenmiştir. Şekil 5.11'de 16 baralı örnek sistem verilmiştir.

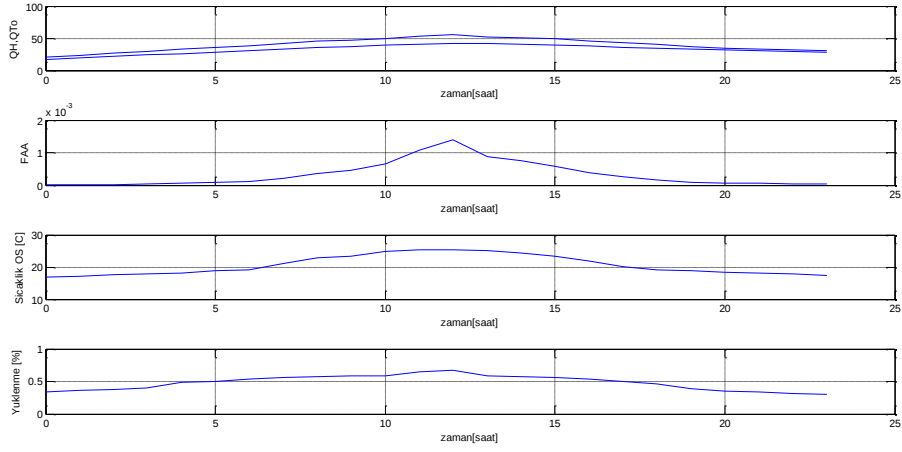
5.2.1.1 GA ile 16 baralı örnek sistem uygulaması

Çözüm sonucu elde edilen birey, herhangi bir yüklenme durumundaki en uygun şebeke topolojisini göstermektedir. İlk olarak bir günlük yüklenme değişimine göre en uygun şebeke yapısı belirlenir. Bir günlük yüklenme durumuna göre bulunan genetik algoritma çözümü Şekil 5.12’de verilmiştir. Benzetim incelemelerinde, GA parametreleri topluluk büyüklüğü 200, nesil sayısı 30, seçme yöntemi elitizm, çaprazlanma oranı, mutasyon oranı dikkate alınarak eniyileme gerçekleştirilmiştir.

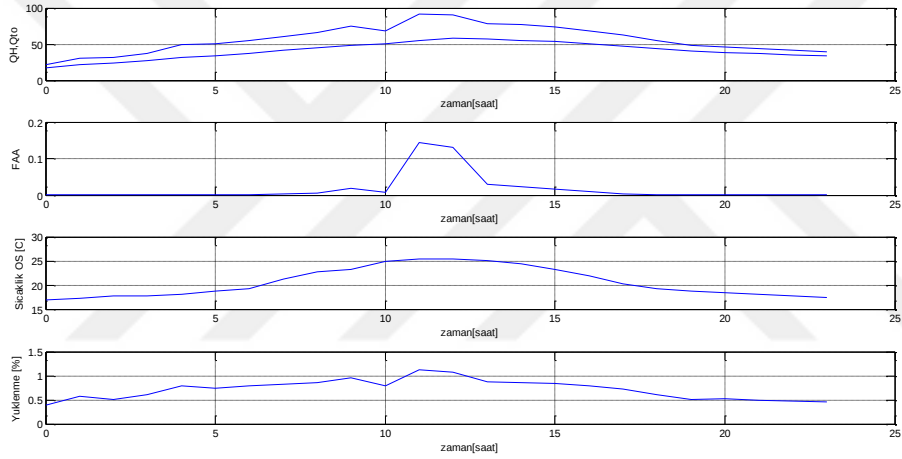


Şekil 5.12 : Günlük yüklenme için GA sonucu.

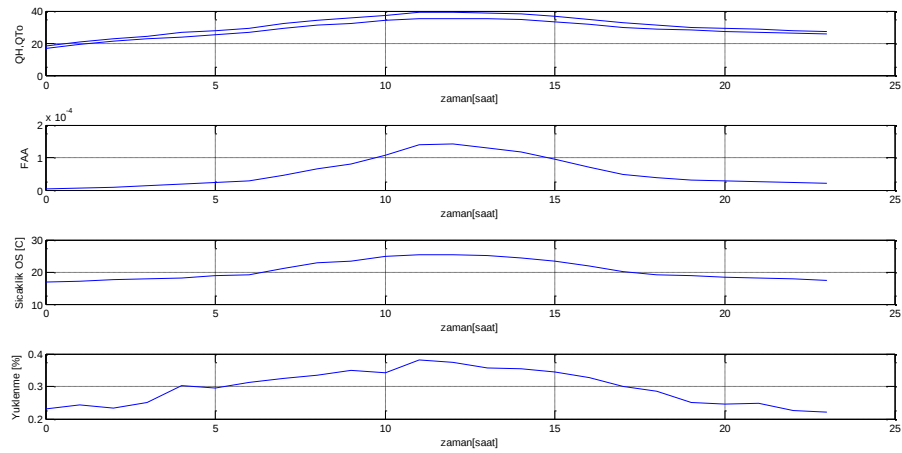
En uygun anahtar topolojisi 17-19-26 numaralı anahtarların açık olduğu durum için belirlenmiştir. Bu anahtar yapısında Şekil 5.11’de verilen 16 baralı örnek sistemde transformatörler için yüklenme, Q_H , Q_{To} ve yaşlanma hızı (FAA)’nın değişimi grafiklerle verilmiştir. Şekil 5.14’de görüldüğü gibi TR2’nin, TR1’e ve TR3’e göre yüklenme oranı arttıkça (10-15 s aralığında) yaşlanma hızı artmaktadır. TR3’ün yüklenme oranı diğer transformatörlere göre düşük olup beklenildiği gibi en sıcak nokta sıcaklığı (Q_H) en fazla 40 °C dir. Şekil 5.15’de TR3 transformatörü, diğer transformatörlere göre daha geç yaşlanmaktadır. Yaşlanma hızı ile yükleme oranı arasındaki ilişki grafiklerden anlaşılmaktadır.



Şekil 5.13 : TR1 için yüklenme, Q_H , Q_{To} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi.

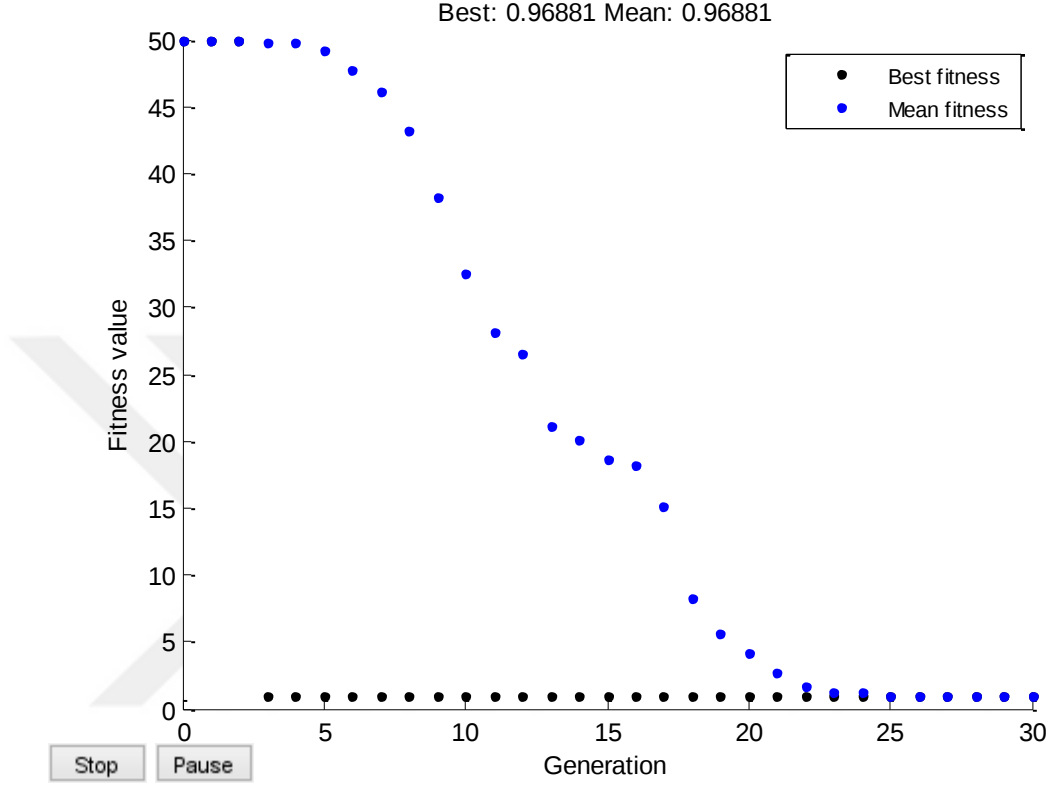


Şekil 5.14 : TR2 için yüklenme, Q_H , Q_{To} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi.



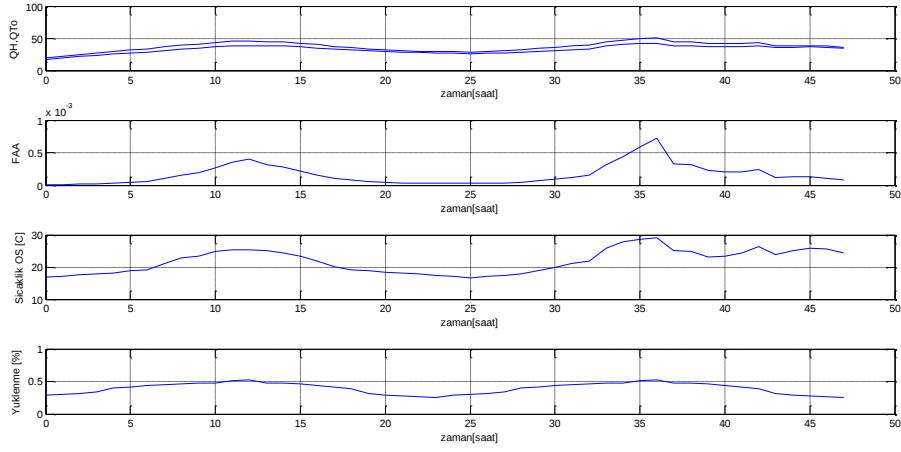
Şekil 5.15 : TR3 için yüklenme, Q_H , Q_{To} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi.

İki günlük yüklenme verileri kullanılarak 16 baralı örnek sistemde, problemin belirlenen uygunluk fonksiyonuna göre çözümünde genetik algoritma uygulanmıştır. İki günlük yüklenme durumuna göre bulunan genetik algoritma çözümü Şekil 5.16’da verilmiştir.



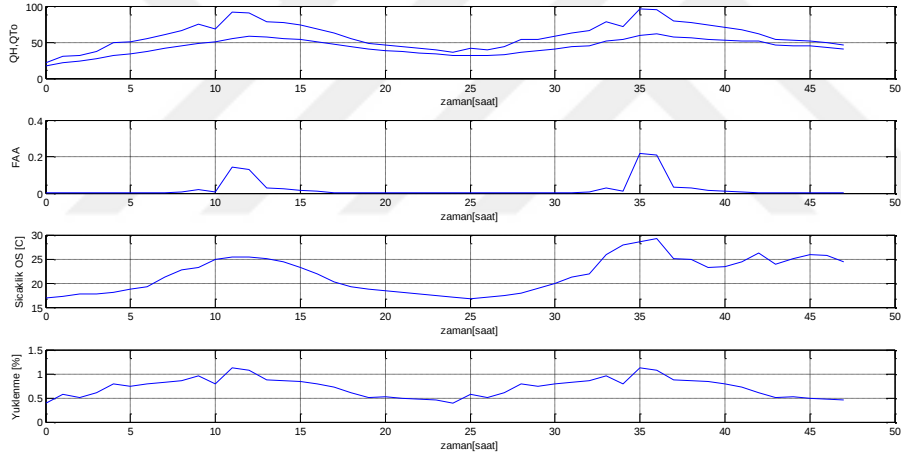
Şekil. 5.16 : İki günlük yüklenme için GA.

Topluluk sayısı 200, seçme yöntemi olarak elitizm, 30 nesil üretimi seçilerek TR1, TR2, TR3 için Q_H , Q_{To} , yaşlanma hızının (FAA) değişimi, Şekil 5.17, Şekil 5.18, Şekil 5.19’da verilmiştir. Çözüm sonucu elde edilen birey, iki günlük yüklenme durumu için en uygun şebeke topolojisini göstermektedir. 14, 17, 19 numaralı anahtarın açık olduğu durum en uygun şebeke topolojisi olarak belirlenmiştir.



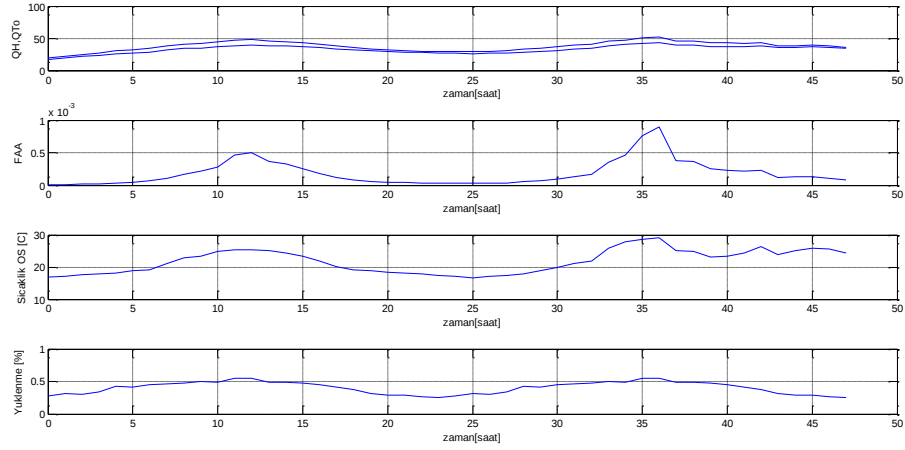
Şekil. 5.17 : TR1 için yüklenme Q_H , Q_{To} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi.

Elde edilen çözümde TR2 için Q_H , Q_{To} değişimi ve yaşlanma hızı (FAA) değişimi Şekil 5.18’de verilmiştir.



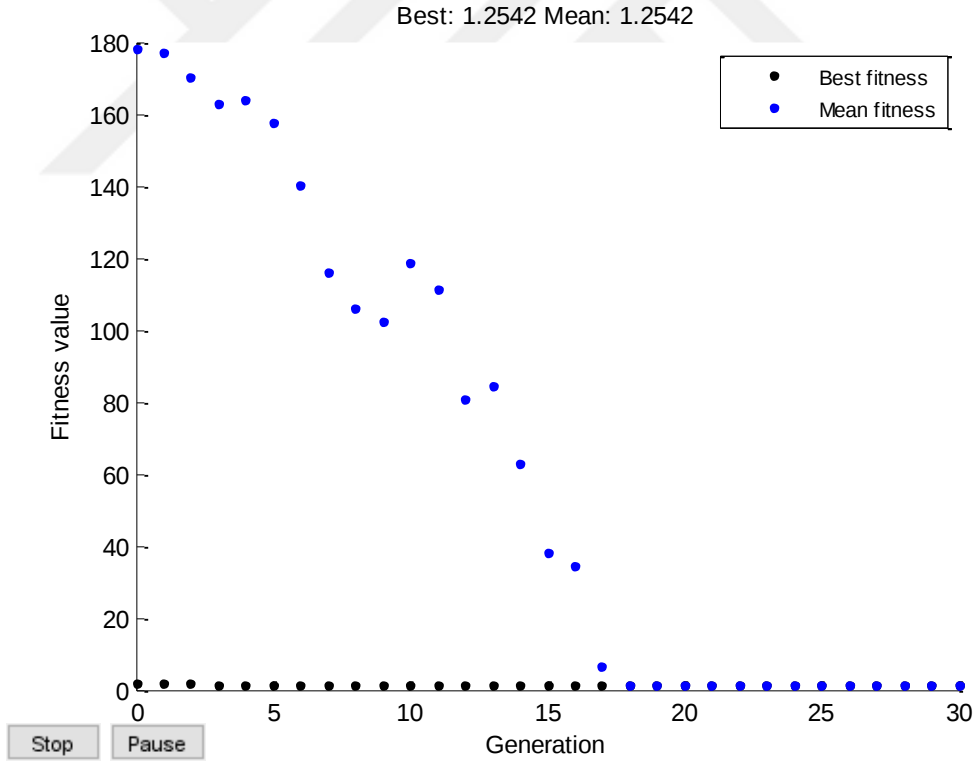
Şekil. 5.18 : TR2 için yüklenme, Q_H , Q_{To} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi.

Benzer şekilde TR3 için Q_H , Q_{To} , yaşlanma hızı (FAA) ve ortam sıcaklığı değişimi Şekil 5.19’da verilmiştir.



Şekil. 5.19 : TR3 için yüklenme, Q_H , Q_{TO} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi.

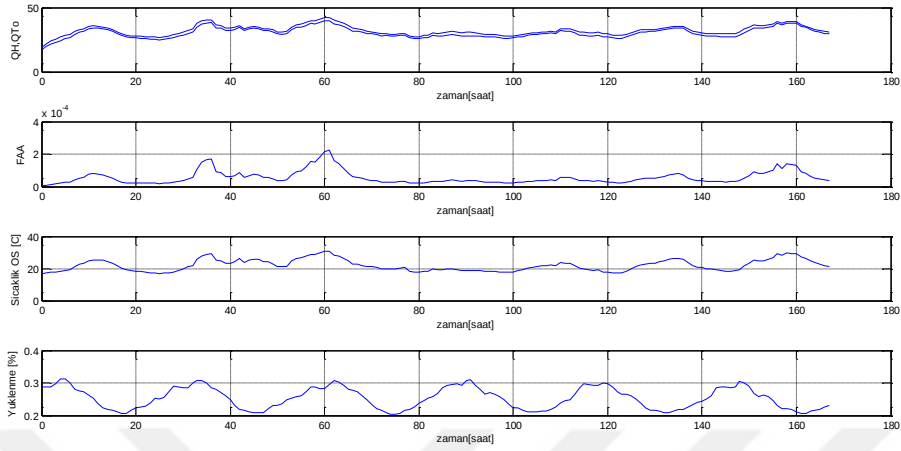
Benzer şekilde haftalık yüklenme verileri kullanılarak belirlenen uygunluk fonksiyonuna göre problemin çözümünde genetik algoritma uygulanmıştır. GA sonuçları Şekil.5.20’de verilmiştir.



Şekil 5.20 : Bir haftalık yüklenme için Genetik Algoritma sonucu.

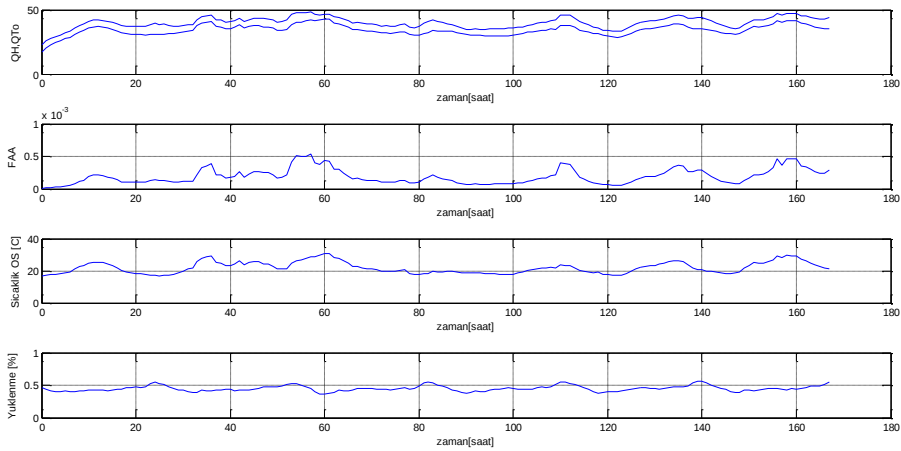
Çözüm sonucu elde edilen birey, haftalık yüklenme durumu için en uygun şebeke topolojisini göstermektedir. 14, 17, 19 numaralı anahtarın açık olduğu durum en

uygun şebeke topolojisini vermektedir. Bu şebeke yapısı için TR1 için Q_H , Q_{To} , yaşlanma hızı (FAA) ve ortam sıcaklığı değişimi Şekil 5.21’de verilmiştir.



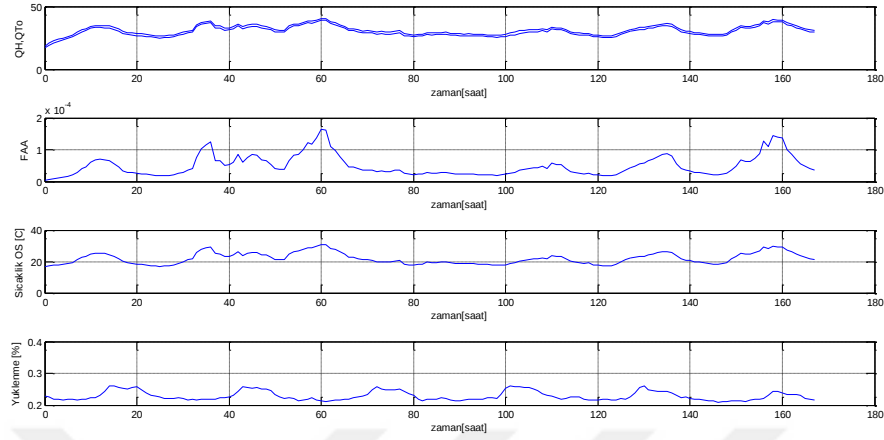
Şekil 5.21 : TR1 için bir haftalık Q_H , Q_{To} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi.

TR2 için Q_H , Q_{To} , yaşlanma hızı (FAA) ve ortam sıcaklığı değişimi ise Şekil 5.22’de verilmiştir. Şekil 5.21-23’de görüldüğü gibi transformatörlerin yüklenme oranları oldukça küçük olduğu için, doğal olarak yaşlanma hızları da az değişmektedir. Transformatörlerin aşırı yüklenme oranları düşük olmasına rağmen yaşlanma hızları ortam sıcaklığına bağlı olarak önemli derecede değişmektedir. En sıcak nokta sıcaklığı ortam sıcaklığı ile artmakta olup bu da transformatörün yaşlanma hızını artırır. Yüklenme oranı düşük olması durumunda bu etki çok daha iyi görülmektedir. (TR3 için 60 saat sonra öğle saatinde, Şekil 5.23’de görülmektedir.)



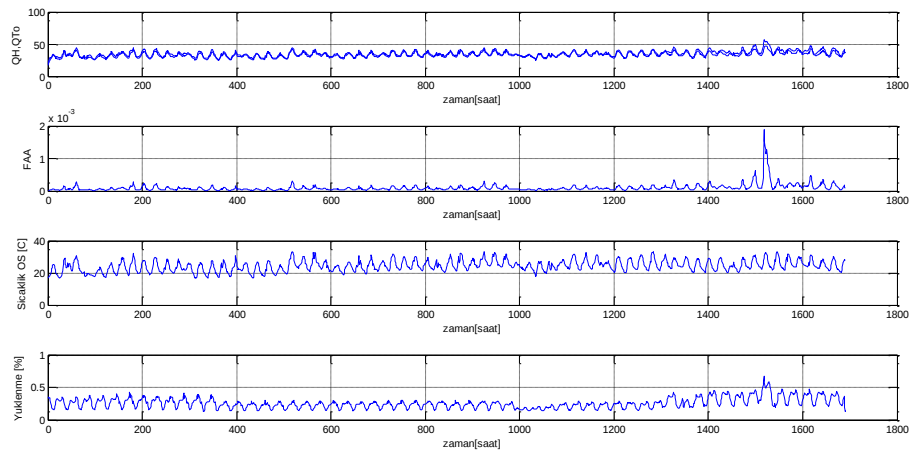
Şekil 5.22 : TR2 için bir haftalık Q_H , Q_{To} , FAA, ortam sıcaklığı ve yüklenme değişimi.

TR3 için Q_H , Q_{To} , yaşlanma hızı (FAA) ve ortam sıcaklığı değişim değerleri Şekil 5.23'deki gibi elde edilmiştir.



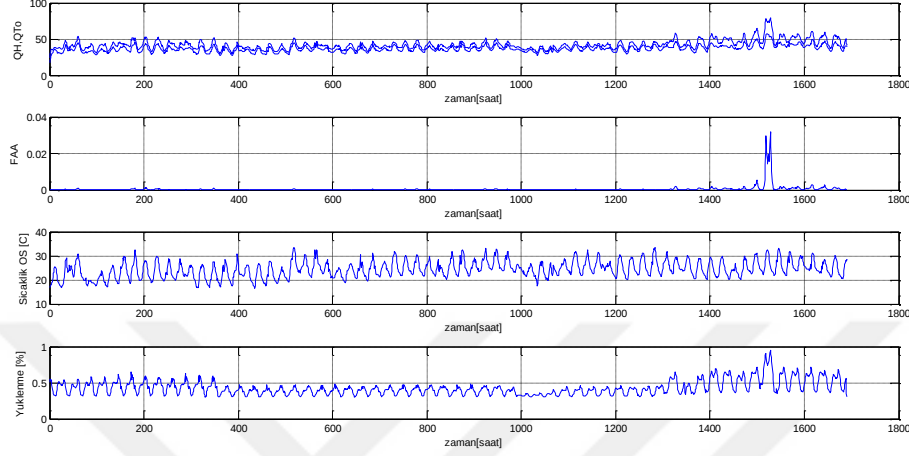
Şekil 5.23 : TR3 için 1 haftalık Q_H , Q_{To} , FAA, ortam sıcaklığı ve yüklenme değişimi.

Mevsimlik yüklenme verileri kullanılarak, belirlenen uygunluk fonksiyonuna göre DŞYY probleminin genetik algoritma ile çözümü gerçekleştirilmiştir. Topluluk sayısı 200, seçme yöntemi olarak elitizm, 20 nesil üretimi seçilerek katsayıların farklı değerleri için Matlab ortamında sonuçlar alınmıştır. TR1 için yüklenme değerleri endüstriyel tip yaz mevsimlik verisi için Q_H , Q_{To} , FAA, ortam sıcaklığı değişimleri e Şekil 5.24'de verilmiştir. Günlük, iki günlük ve haftalık çalışmalarına benzer olarak yüklenme oranı ve ortam sıcaklığı transformatörlerin en sıcak nokta sıcaklığı ve yaşlanma hızına önemli derece etkilidir.



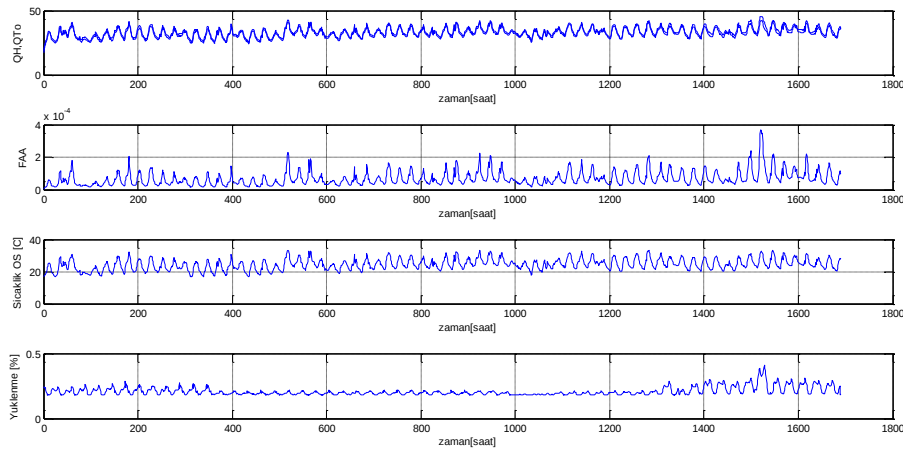
Şekil 5.24 : TR1 için yüklenme, Q_H , Q_{To} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi (endüstriyel tip mevsimlik yaz verisi, $\alpha_1=1, \alpha_2=1$).

Endüstriyel tip mevsimlik yaz verisinin kullanılması ile TLoL algoritması sonucu TR2 için elde edilen Q_H , Q_{T0} , FAA, ortam sıcaklığı değişimleri Şekil 5.25’de verilmiştir.

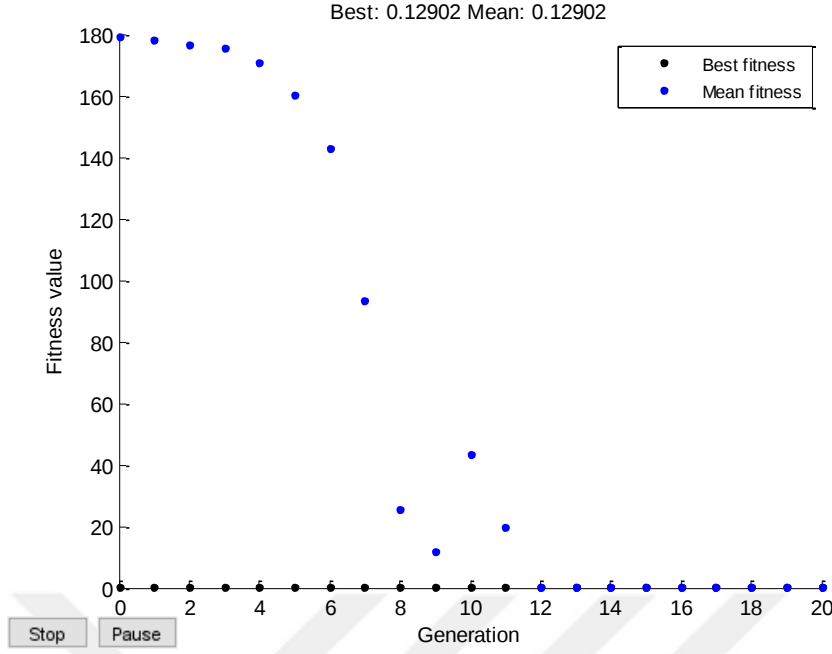


Şekil 5.25 : TR2 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi (endüstriyel tip mevsimlik yaz verisi, $\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$).

TR.3 için de algoritma sonucu endüstriyel tip mevsimlik yaz verisinin kullanılması ile elde edilen Q_H , Q_{T0} , FAA, ortam sıcaklığı değişimleri Şekil 5.26’da görülmektedir. Yüklenme oranı ve ortam sıcaklığı değişimi transformatörlerin en sıcak nokta sıcaklığı ve yaşlanma hızı üzerinde etkilidir.



Şekil 5.26 : TR3 için yüklenme, Q_H , Q_{T0} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi (endüstriyel tip mevsimlik yaz verisi, $\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$).



Şekil 5.27 : Endüstriyel tip mevsimlik yaz verisi için Genetik Algoritma sonucu ($\alpha_1=1, \alpha_2=1$).

Mevsimlik yaz verisi kullanılarak belirlenen uygunluk fonksiyonuna göre problemin çözümünde genetik algoritma uygulanmıştır. GA sonuçları Şekil.5.27’de verilmiştir.

Endüstriyel yük tipleri için günlük, haftalık, yaz ve kış dönemlerine ait anahtar konumları ve yaşlanma değerleri Çizelge 5.1’deki toplu olarak paylaşılmıştır.

Çizelge.5.1: Endüstriyel tip tüketici için TLoL algoritmasının GA çözüm sonuçları.

	Kayıplar (kW)	TLoL (MAX) TR1-TR2-TR3	Toplam TLoL	Açık Anahtar Konumları	$\Delta P_{\text{kayıp}}(\%)$	$\Delta \text{LoL}(\%)$
Günlük Yük						
Temel	$2.7220 \cdot 10^3$	$10^{-5} * (0.06910 \ 0.1886 \ 0.0569)$	$0.31460 \cdot 10^{-5}$	15-21-26		
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=0$	$2.6423 \cdot 10^3$	$10^{-5} * (0.05770 \ 0.1658 \ 0.0095)$	$0.28770 \cdot 10^{-5}$	14-15-17	3	12
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=1$	$2.4548 \cdot 10^3$	$10^{-5} * (0.07490 \ 0.1392 \ 0.0580)$	$0.27210 \cdot 10^{-5}$	17-19-26	10	26
Haftalık Yük						
Temel	$2.4731 \cdot 10^4$	$10^{-4} * (0.0578 \ 0.2835 \ 0.0392)$	$0.3805 \cdot 10^{-4}$	15-21-26		
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=0$	$2.4731 \cdot 10^4$	$10^{-4} * (0.0578 \ 0.2835 \ 0.0392)$	$0.3805 \cdot 10^{-4}$	15-21-26	0	0
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=1$	$2.2008 \cdot 10^4$	$10^{-4} * (0.0518 \ 0.1783 \ 0.0458)$	$0.2759 \cdot 10^{-4}$	14-17-19	11	37
Yaz Dönemi						
Temel	$2.2643 \cdot 10^5$	$10^{-3} * (0.0929 \ 0.8163 \ 0.0610)$	$0.9702 \cdot 10^{-3}$	15-21-26		
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=0$	$2.2643 \cdot 10^5$	$10^{-3} * (0.0929 \ 0.8163 \ 0.0610)$	$0.9702 \cdot 10^{-3}$	15-21-26	0	0
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=1$	$2.1724 \cdot 10^5$	$10^{-3} * (0.0929 \ 0.4712 \ 0.0644)$	$0.6285 \cdot 10^{-3}$	15-17-26	4	42

Çizelge 5.1(devam) : Endüstriyel tip tüketici için TLoL algoritmasının GA çözüm sonuçları.

	Kayıplar (kW)	TLoL (MAX) TR1-TR2-TR3	Toplam TLoL	Açık Anahtar Konumları	$\Delta P_{\text{kayıp}}(\%)$	$\Delta \text{LoL}(\%)$
Kış Dönemi						
Temel	$3.2651 \cdot 10^5$	$10^{-4} \cdot (0.1016 \ 0.9621 \ 0.0522)$	$1.1159 \cdot 10^{-3}$	15-21-26		
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=0$	$2.9135 \cdot 10^5$	$10^{-4} \cdot (0.1155 \ 0.4574 \ 0.0588)$	$0.6317 \cdot 10^{-3}$	17-19-26	9	52
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=1$	$2.9135 \cdot 10^5$	$10^{-4} \cdot (0.1155 \ 0.4574 \ 0.0588)$	$0.6317 \cdot 10^{-3}$	17-19-26	9	52

Çizelge 5.2: Evsel tip yük için TLoL algoritmasının GA çözüm sonuçları.

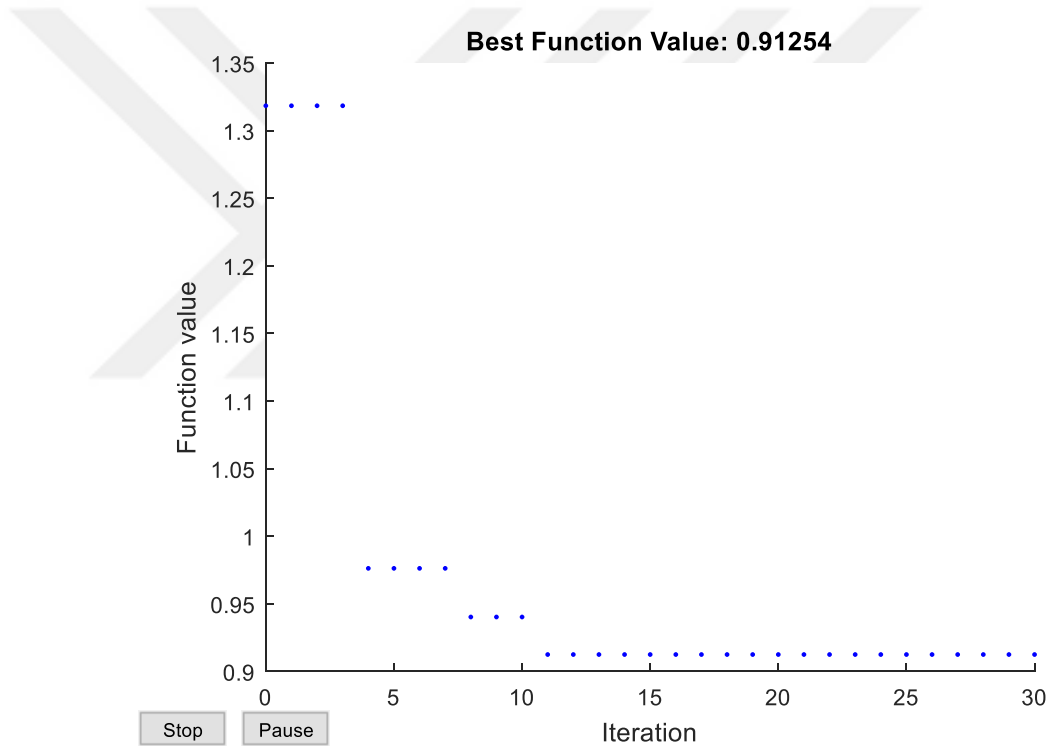
	Kayıplar (kW)	TLoL (MAX) TR1-TR2-TR3	Toplam TLoL	Açık Anahtar Konumları	$\Delta P_{\text{kayıp}}(\%)$	$\Delta \text{LoL}(\%)$
Günlük Yük						
Temel	$4.0757 \cdot 10^3$	10^{-3} (0.0052 0.3559 0.0011)	$0.3622 \cdot 10^{-3}$	15-21-26		
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=0$	$3.7694 \cdot 10^3$	10^{-5} (0.1100 0.4329 0.0652)	$0.6081 \cdot 10^{-5}$	15-17-26	7.5	100
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=1$	$3.5750 \cdot 10^3$	10^{-5} (0.1221 0.3523 0.0652)	$0.5396 \cdot 10^{-5}$	17-19-26	12	100
Yaz Dönemi						
Temel	$3.0459 \cdot 10^5$	10^{-3} (0.1153 0.8573 0.0567)	$1.0293 \cdot 10^{-3}$	15-21-26		
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=0$	$2.9066 \cdot 10^5$	10^{-3} (0.1297 0.6853 0.0567)	$0.8717 \cdot 10^{-3}$	19-21-26	4.6	20
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=1$	$2.7665 \cdot 10^5$	10^{-3} (0.1297 0.4389 0.0640)	$0.6326 \cdot 10^{-3}$	17-19-26	9	49
Kış Dönemi						
Temel	$4.9170 \cdot 10^5$	10^{-3} (0.0153 0.5993 0.0041)	$0.6187 \cdot 10^{-3}$	15-21-26		
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=0$	$4.4870 \cdot 10^5$	10^{-3} (0.0185 0.1764 0.0054)	$0.2003 \cdot 10^{-3}$	17-19-26	9	70
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=1$	$4.4870 \cdot 10^5$	10^{-3} (0.0185 0.1764 0.0054)	$0.2003 \cdot 10^{-3}$	17-19-26	9	70

5.2.1.2 Problemin PSO algoritması ile çözümü

16 baralı sistem için PSO algoritması ile alınan sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Mesken tipi tüketici ile yaz ve kış mevsimlerinde alınan sonuçlar sadece şebeke kayıpları ve yaşlanmanın da dikkate alındığı durum için yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

5.2.1.2.1 Şebeke kayıplarının dikkate alındığı durum ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=0$ durumu)

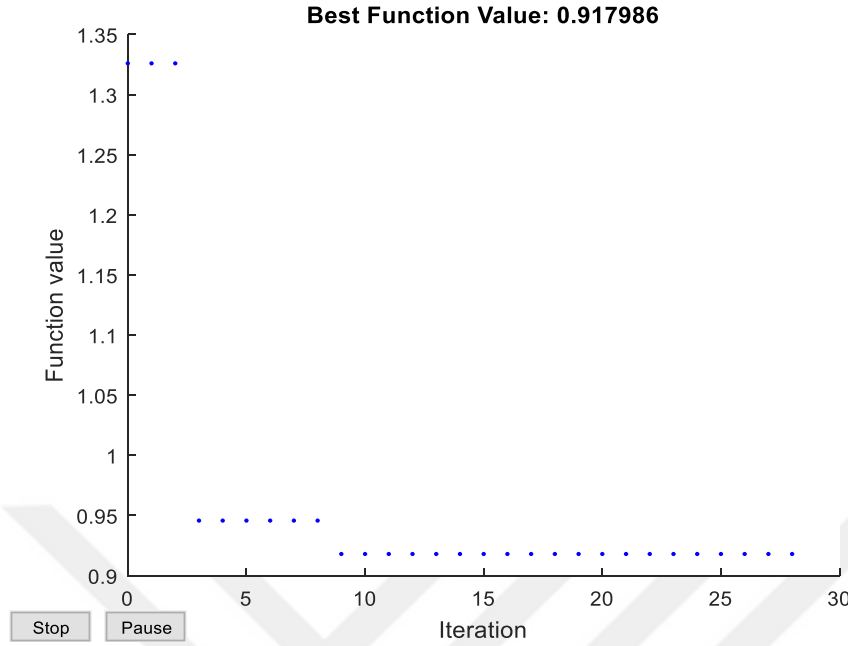
En iyi anahtar konumu 19-21-26 nolu anahtarların açık olduğu durum belirlenmiştir. Toplam kayıplar $2,9066 \cdot 10^5$ kW olarak hesaplanmıştır. Transformör yaşlanma değerleri TR1, TR2, TR3 için $10^{-3}(0,1297 \quad 0,6853 \quad 0,0567)$ olarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.28 : Evsel tüketiciler için (yaz mevsimi) PSO eniyilemesi sonucu ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=0$) durumu.

19-21-26 anahtarlarının açık olduğu durum en iyi anahtar konumu olarak GA benzetimi ile aynı olarak belirlenmiştir.

5.2.1.2.2 Şebeke kayıpları ve yaşlanmanın dikkate alındığı durum ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$ durumu)



Şekil 5.29 : Evsel tüketiciler için (yaz mevsimi) PSO eniyilemesi sonucu ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$ durumu).

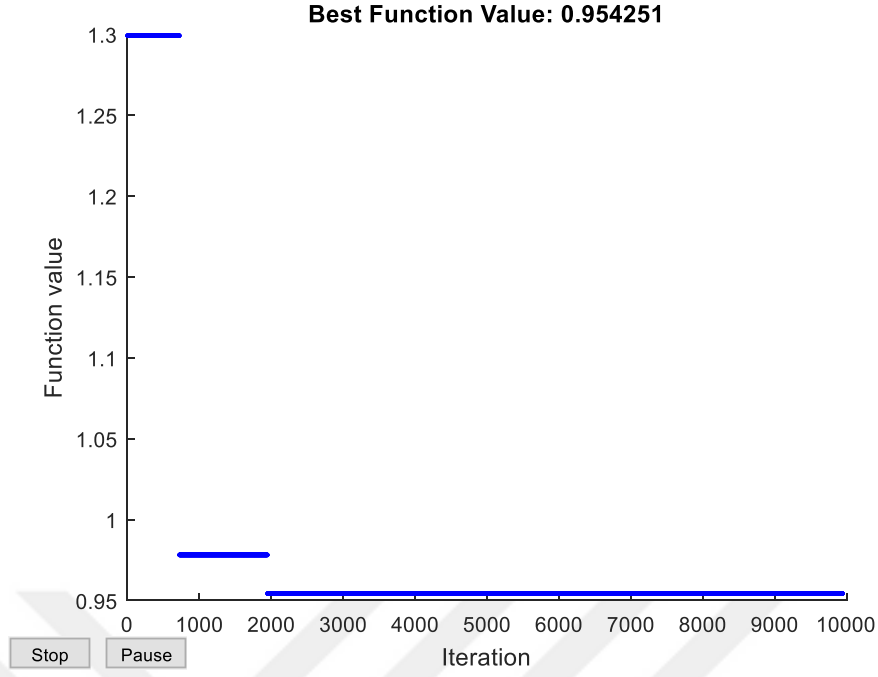
17-19-26 anahtarlarının açık olduğu durum en iyi anahtar konumu olarak belirlenmiştir. Endüstriyel ve evsel tüketici için sonuçlar GA için bulunan sonuçlarla benzer olarak Çizelge 5.3 ve Çizelge 5.4 de olduğu gibi belirlenmiştir.

5.2.1.3 Problemin TB algoritması ile çözümü

16 baralı sistem için tavlama benzetimi ile alınan sonuçlar aşağıda sunulmuştur. Mesken tipi tüketici ile yaz ve kış mevsimlerinde alınan sonuçlar sadece şebeke kayıpları ve yaşlanmanın da dikkate alındığı durum için yapılmış ve sonuçlar elde edilmiştir.

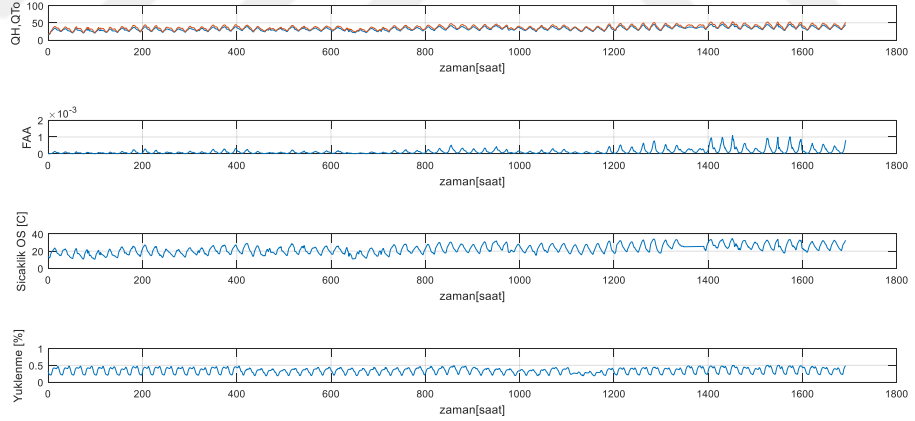
5.2.1.3.1 Şebeke kayıplarının dikkate alındığı durum ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=0$ durumu)

En iyi anahtar konumu 19-21-26 nolu anahtarların açık olduğu durum belirlenmiştir. Toplam kayıplar $2,9066 \cdot 10^5$ kW olarak hesaplanmıştır. Transformatör yaşlanma değerleri TR1, TR2, TR3 için 10^{-3} (0,1297 0,6853 0.0567) olarak hesaplanmıştır.

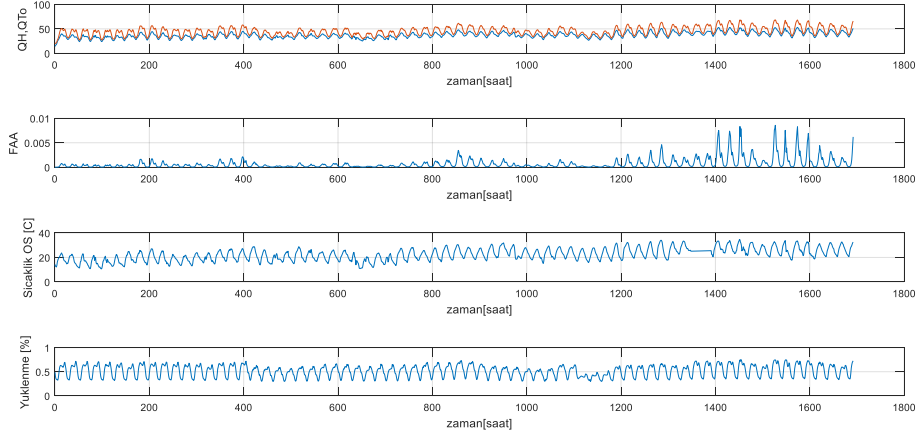


Şekil 5.30 : Evsel tip tüketiciler için (yaz mevsimi) TLoL algoritmasının TB ile çözüm sonuçları ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=0$ durumu).

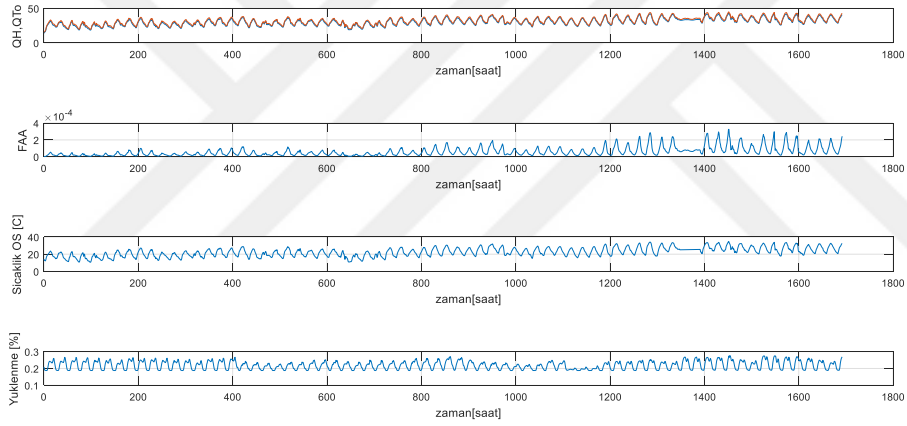
TR1, TR2, TR3 için yüklenme değerleri, Q_H , Q_{TO} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimleri grafiklerle verilmiştir.



Şekil 5.31 : Tr1 için yüklenme, Q_H , Q_{TO} , FAA, ortam sıcaklığı değişimi ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=0$ durumu).



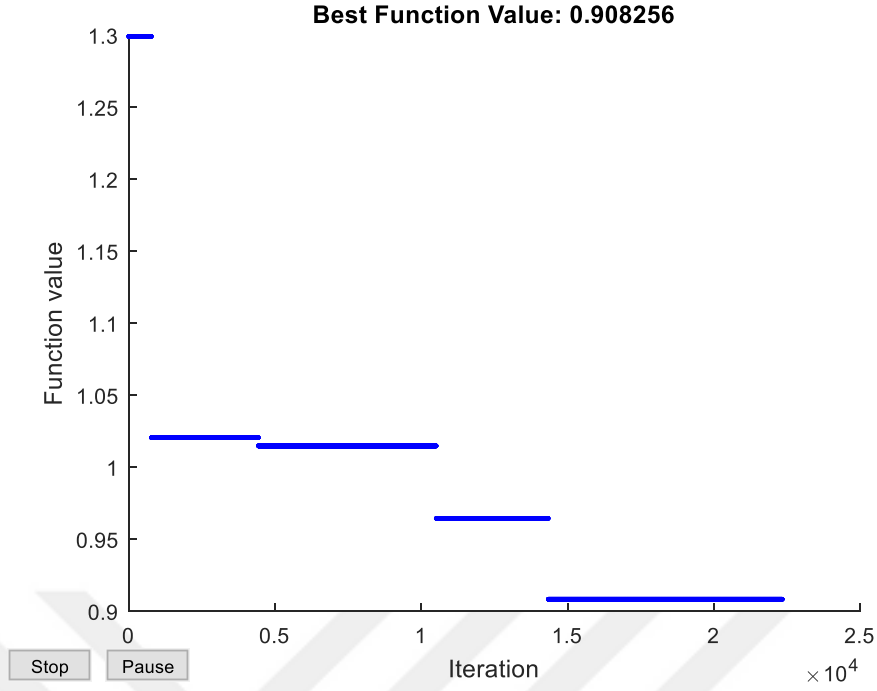
Şekil 5.32 : Tr2 için yüklenme, Q_H , Q_{To} , FAA, ortam sıcaklığı değişimi ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=0$ durumu).



Şekil 5.33 : Tr3 için yüklenme, Q_H , Q_{To} , FAA, ortam sıcaklığı değişimi ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=0$ durumu).

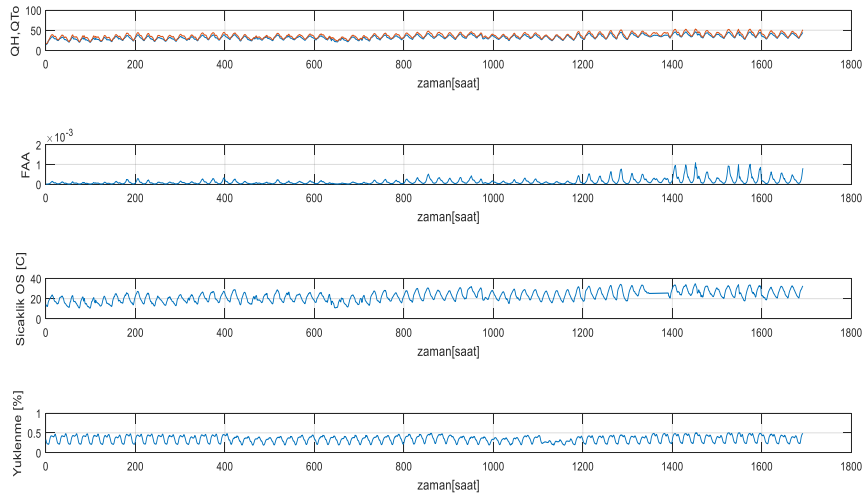
5.2.1.3.2 Şebeke kayıplarının ve yaşlanmanın birlikte dikkate alındığı durum ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$ durumu)

16 baralı sistem için tavlama benzetimi ile mesken tipi tüketici ile yaz mevsimi için şebeke kayıpları ve yaşlanmanın da dikkate alındığı durum için yapılmış ve sonuçlar aşağıda sunulmuştur.

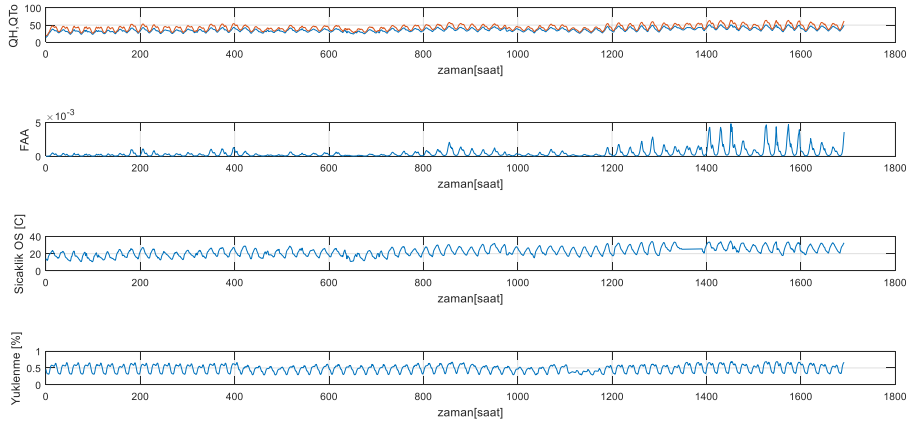


Şekil 5.34 : Evsel tip tüketiciler için yaz mevsimi TLoL algoritmasının TB çözüm sonuçları ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$ durumu).

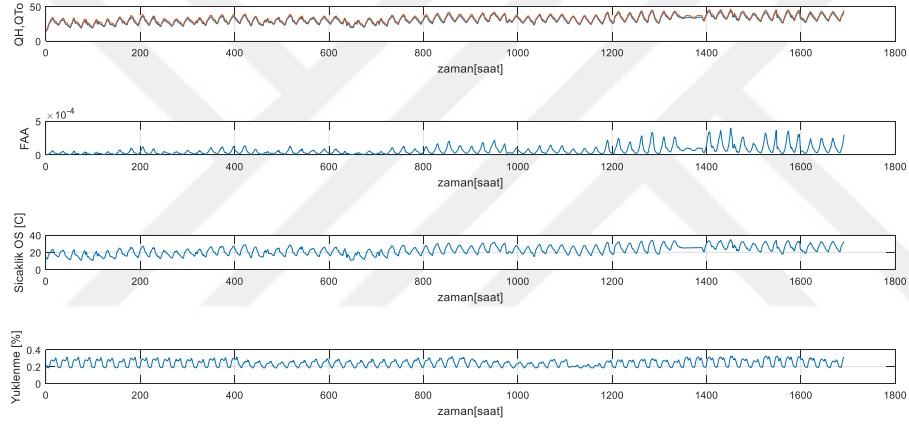
En iyi anahtar konumu 17-19-26 nolu anahtarların açık olduğu durum olarak belirlenmiştir. Toplam kayıplar $2,7665 \times 10^5$ kW olarak hesaplanmıştır. Transformatör yaşlanma değerleri TR1, TR2, TR3 için 10^{-3} (0,1297 0,4389 0,0640) olarak belirlenmiştir.



Şekil 5.35 : Tr1 için yüklenme, Q_H , Q_{To} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$) durumu.



Şekil 5.36 : Tr2 için yüklenme, Q_H , Q_{To} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$) durumu.



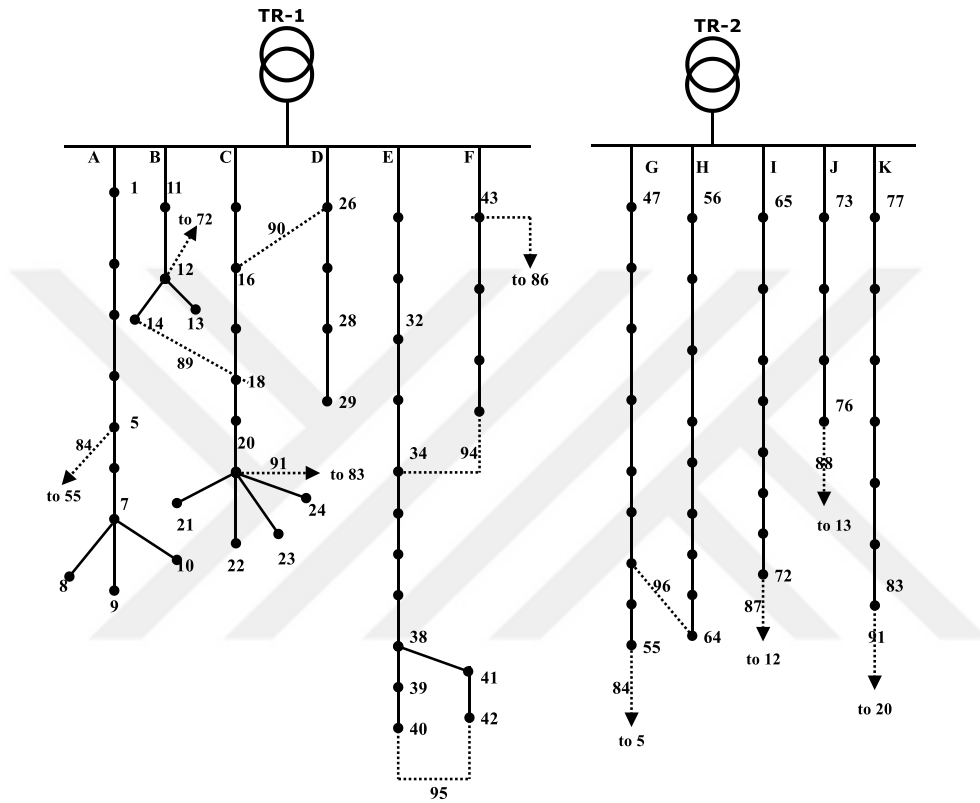
Şekil 5.37 : Tr3 için yüklenme, Q_H , Q_{To} , FAA ve ortam sıcaklığı değişimi ($\alpha_1=1$, $\alpha_2=1$) durumu.

Evsel tüketici TLoL algoritması kış dönemi için koşturulduğunda yaşlanma dikkate alındığında ve alınmadığında sonuç değişmeyip 17-19-26 nolu anahtarların açık olduğu durum eniyi durum olarak belirlenmiştir. Toplam kayıplar $4,487 \cdot 10^5$ kW ve toplam yaşlanma TR1, TR2, TR3 için 10^{-3} (0,0185 0,1764 0,0054) olarak belirlenmiştir.

Evsel tip yük için TLoL algoritmasının TB çözüm sonuçları GA çözüm sonuçları ile Çizelge 5.1'deki sonuçlara benzer sonuçlar elde edilmiştir. Aynı şekilde endüstriyel tip yük için TLoL algoritmasının TB çözüm sonuçları GA çözüm sonuçları ile Çizelge 5.2'deki açık anahtar konumları, yaşlanma ve kayıp değerleri benzer şekilde elde edilmiştir.

5.2.2 TLoL algoritmasının 85 baralı örnek sistem uygulaması

Geliştirilen algoritmanın etkinliğini değerlendirmek için daha büyük bir test sistemi olarak 2 farklı transformatörden beslenen, 11 fiderli, 96 anahtarlı ve 66 yük noktası içeren 11.4kV, 85 baralı örnek test bu bölümde kullanılmıştır. 85 baralı örnek sistemi Şekil 5.36’da görülmektedir.



Şekil 5.38 : 85 baralı örnek test sistemi.

85 baralı örnek test sistemi verileri, gerçek ölçüm değerlerinden üretilen yük profilleri ile birleştirilerek elde edilen şebekede geliştirilen algoritma test edilmiştir. Bu bölümde, farklı tip tüketicilerin karma olarak bulunduğu düşünülen test sistemi, tüketicilerin günlük ve mevsimsel zaman periyodları için yüklenme profilleri kullanılarak algoritmanın etkinliği denenmiştir. Fiderlere ait yük tipleri Çizelge 5.3’de olduğu gibi seçilmiştir.

85 baralı örnek sistem için GA ile günlük, haftalık, yaz ve kış dönemlerine ait anahtar konumları ve yaşlanma değerleri Çizelge 5.4’deki gibi toplu olarak elde edilmiştir.

Çizelge 5.3 : 85 baralı örnek sistem fider yük tipleri.

Fider	Yük Tipi
A	Mesken
B	Endüstriyel
C	Mesken
D	Endüstriyel
E	Mesken
F	Endüstriyel
G	Mesken
H	Endüstriyel
I	Mesken
J	Endüstriyel
K	Endüstriyel

Çizelge 5.4 : 85 baralı örnek sistemin karma yüklenme durumu için TLoL algoritmasının GA çözüm sonuçları.

	Kayıplar (kW)	TLoL (MAX) TR1-TR2-TR3	Toplam TLoL	Açık Anahtar Konumları
Günlük Yük				
Temel durum	$2.96470 \cdot 10^3$	$10^{-5}(0.134600 \quad 0.0388)$	$0.12850 \cdot 10^{-5}$	84-85-86-87- 88-89-90-91- 92-93-94-95-96
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=0$	$2.94650 \cdot 10^3$	$10^{-3}(0.162500 \quad 0.0004)$	$0.16290 \cdot 10^{-3}$	62-84-85-86- 87-88-89-90- 91-92-93-94-95
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=1$	$2.55180 \cdot 10^3$	$10^{-6}(0.401300 \quad 0.3087)$	$0.71003 \cdot 10^{-6}$	7-34-39-41-61- 72-84-86-88- 89-90-91-92
Yaz Dönemi				
Temel Durum	$2.96470 \cdot 10^5$	$10^{-3}(0.134600 \quad 0.0338)$	$0.20340 \cdot 10^{-3}$	84-85-86-87- 88-89-90-91- 92-93-94-95-96
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=1$	$2.21750 \cdot 10^5$	$10^{-3}(0.169800 \quad 0.0789)$	$0.24870 \cdot 10^{-3}$	7-54-62-86-87- 88-89-90-91- 92-93-94-95
Kış Dönemi				
Temel durum	$4.11290 \cdot 10^5$	$10^{-3}(0.179784 \quad 0.003286)$	$0.18307 \cdot 10^{-3}$	84-85-86-87- 88-89-90-91- 92-93-94-95-96
$\alpha_1=1$ $\alpha_2=1$	$3.35426 \cdot 10^5$	$10^{-5}(0.947166 \quad 0.69872)$	$1.64690 \cdot 10^{-4}$	7-34-39-62-72- 84-86-88-89- 90-91-92-93

Karma (endüstriyel ve mesken) tip yüklenmede algoritmanın etkinliğini denemek için GA ile elde edilen eniyileme sonuçları Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.5 : 85 baralı örnek sistem için eniyileme sonuçları ve iyileşme yüzdeleri.

	Günlük Yüklenme	Yaz Dönemi
Eniyi Anahtar Durumu	7-34-39-41-61-72-84-86-88-89-90-91-92	7-54-62-86-87-88-89-90-91-92-93-94-95
$P_{kayıp-BC(kWh)}$	2.9647	245.310
$P_{kayıp-ETLoL(kWh)}$	2.5518	230.315
$\Delta P_{kayıp}(\%)$	13.9270	14.995
$TLoL_{BC}$	$1.285 \cdot 10^{-6}$	$0.5370 \cdot 10^{-3}$
$TLoL_{ETLoL}$	$0.710 \cdot 10^{-6}$	$0.2487 \cdot 10^{-3}$
$\Delta LoL(\%)$	44.75	53.68



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, daha önceki çalışmalardan farklı olarak elektrik güç sisteminin önemli elemanı olan transformatörlerin ömrünü uzatacak DŞYY problemi için bir yöntem geliştirilmiştir. Geliştirilen bu yöntem ile DŞYY problemine transformatör ömür kaybının azaltılması amacı dahil edilmiştir. Problem çoklu amaçlı olarak incelenmiştir. Güç kayıpları yanında DŞYY çalışmasında transformatör ömür kaybının da dikkate alınması, donanım ömürlerinin verimli kullanılması açısından önem oluşturmaktadır.

İlk olarak ikinci bölümde DŞYY problemi literatüre dayalı olarak tanıtılmış ve çoklu amaçlı DŞYY probleminde amaç fonksiyonu ve kısıtlar ifade edilmiştir. Transformatörler elektrik güç sisteminin güvenilirlik ve maliyet bakımından önemli elemanlarıdır. Isı dağılımı transformatörün maksimum yüklenebilmesi için sınırlayıcı faktördür. Transformatör yalıtım sistemi üzerindeki yüklenme etkilerinin ayrıntılı olarak bilinmesi dağıtım sistemlerinin güvenilir çalışmasını sağlar. Transformatörlerin aşırı yüklü olarak çalıştırılması yaşlanmayı hızlandırır, arızaların oluşma olasılığını artırır. Bu nedenle sonraki bölümde transformatör yaşlanması ve yaşlanmaya etki eden faktörlerden bahsedilmiş ve IEEE standartlarındaki yaşlanma hesapları anlatılmıştır. Tezde göz önüne alınan dağıtım şebekesi yeniden yapılandırılmış, amaç, işletme kısıtları altında, toplam aktif kayıpların ve transformatör ömründeki azalmanın minimum olduğu şebeke yapısının nasıl elde edileceği dördüncü bölümde açıklanmıştır. Beşinci bölümde elektrik güç sisteminin önemli elemanı olan transformatörlerin ömrünü uzatacak şekilde dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılma problemi için farklı çalışma durumları için farklı örnek tip şebekeler önerilen yöntemle incelenmiştir. Tez kapsamında, TLoL dikkate alınarak oluşturulan amaç fonksiyonun çözümü için GA, PSO ve SA gibi farklı eniyileme yöntemleri kullanılmıştır. Bu yapılan eniyileme yöntemlerinden PSO diğer yöntemlere göre bu tip data sayılarının fazla olduğu problemlerde daha çabuk yakınsadığı görülmüştür. Sonuçlar 16 baralı ve 85 baralı örnek sistem üzerinde

algoritma çözümleri değerlendirilmiştir. 16 baralı örnek sistemde yaz dönemi için endüstriyel ve evsel tüketimde sırasıyla, sistem kayıplarında %4, %9 ve TLoL'de ise %42, %49 iyileşme gözlemlenmiştir. 85 baralı örnek sistemde, karma yüklenme için yaz döneminde sistem kayıplarında %15 ve TLoL'de %50 iyileşme görülmüştür. Transformatörlerin ömrünü uzatacak şekilde dağıtım şebekesinin yeniden yapılandırılma probleminde GA, PSO ve SA gibi farklı eniyileme yöntemlerinin 16 baralı sisteme uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar benzer olarak elde edilmiştir. En iyileme yöntemlerinin performansları kıyaslandığında kısa süreler içerisinde çözüme ulaşıtları, içlerinde GA'nın fazla jenerasyon sayısında ulaştığı görülmüştür. PSO yakınsama hızları açısından diğer yöntemlere göre oldukça iyidir. Çok baralı test problemlerine bağlı olarak PSO'nun yakınsama jenerasyon sayısının arttığı gözlenmiştir. Dağıtım sistemlerinde şebeke konfigürasyonunun eniyilemesinde alternatif bir yöntem olarak PSO algoritmasının kullanılması avantaj sağlayabilir. Dağıtım sistemlerinde dağıtım hızla yaygınlaşan dağılmış üretim birimlerinden FV üretimin transformatör yaşlanması üzerine etkileri beşinci bölümde incelenmiştir. Yükleme oranı ve sıcaklığının yaşlanma hızına olan etkisini incelemek için kısa süreli veriler yeterli olmayacaktır. Bu nedenle tez kapsamında etkileri inceleyebilmek için iki günlük, haftalık mevsimlik veriler ile çalışılmıştır. Gerçek mevsimsel yüklenme değerleri ve ortam sıcaklığı verileri ile değerlendirilmiş ve FV üretimin transformatör yaşlanmasına olan olumlu etkileri grafiklerle sunulmuştur. YYP dikkate alınırken zaman serileri çalışması yapılarak kısa ve uzun periyotlar için YYP incelenmiş ve yaşlanmanın ve şebeke kayıpların zaman içerisindeki değişiminin eniyilenmesi hedeflenmiştir. FYY'nın mevsimsel ve aylık olarak elle yapıldığı şebekelerde şebeke kayıplarının yanında donanım ömürlerinde göz önünde bulundurulmasının sistem güvenirliliği ve verimliliğine katkıda bulunduğu görülmektedir. Özellikle sıcak bölgelerde ortam sıcaklığına bağlı olarak yaşlanmanın artması donanım ömürlerini olumsuz etkilemektedir. Ortam sıcaklığının fazla olduğu bölgelerde geliştirilen yöntemin daha etkili olduğu görülmektedir.

Geliştirilen yöntem, harmonik bozulma, gerilim çökmeleri, ani gerilim dengesizliği gibi güç kalitesi vb amaçlar da, TLoL algoritmasına dahil edilerek dağıtım şebekelerinin daha gerçekçi olarak market koşulları altında çok amaçlı problemin modellenmesi ve eniyilenmesi yapılabilir. Ayrıca, günümüzde yaygın olarak kullanılan dağıtık üretim sistemleri içeren şebekeler için de TLoL algoritması uygulanabilir. Son yıllarda elektrikli araçlar gibi sistemlere olan talep arttıkça

harmonikli yükler sistemler üzerinde önemli kayıplara neden olmakta sistem güvenilirliğini azaltmaktadır. Bu çalışma, yük profili üzerinde etkileri olan elektrikli araçlar gibi hareketli yüklerin transformatör yaşlanmasına etkisinin dikkate alındığı, sistem verimliliğinin artırılmasına yönelik yeni çalışmalar için bir başlangıç olabilir. Farklı eniyileme yöntemleri kullanılarak problemin çözümü gerçekleştirilebilir. Farklı yük karakteristiğinin yaşlanmaya etkisi, gerçek zamanlı uygulamalar, işlem paralel hesaplama teknikleri gibi çözüm hızı arttırıcı yöntemler de kullanılarak önerilen yöntem geliştirilebilir. Çözüm doğruluğunu arttırıcı açıdan, transformatörlerde en sıcak nokta sıcaklığının belirlenmesinde ortalama değerlerin hızı arttırılarak gerçekleştirilebilir.

Transformatörde en sıcak nokta sıcaklığının belirlenmesinde ortalama değerlerin düzenlenerek elde edilen değerlerin kullanıldığı standartlar yerine simülasyon ve test sonuçlarına dayalı gerçekçi modellerden elde edilen transformatör ömür hesabı yapılarak da TLoL algoritması geliştirilebilir.



KAYNAKLAR

- [1] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü Planlama ve Daire Başkanlığı (2011). 10 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2011-2020). <<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-66/elektrikuretim-kapasite-projeksiyonlari#>>, alındığı tarih: 12.06.2014.
- [2] Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi Genel Müdürlüğü Planlama ve Yatırım Daire Başkanlığı (2019). 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2019-2023). <<https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-66/elektrikuretim-kapasite-projeksiyonlari#>>, alındığı tarih: 21.10.2019.
- [3] Gonen, T. (2008). *Electric Power Distribution Engineering*, second edition, CRC Press.
- [4] Civanlar, S., Grainger, J. J. ,Yin, H. ve Lee, S. S. H. (1988). Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3 (3), 1217-1223.
- [5] Baran, M. E. ve Wu, F. F. (1989). Network Reconfiguration for Loss Reduction and Load Balancing, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4 (2), 1401-1407.
- [6] Shirmohammadi, D. ve Hong, H. W. (1989). Reconfiguration of Electric Distribution Network for Resistive Line Losses Reduction, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4 (2), 1492-1498.
- [7] Taylor, T. Ve Lubkeman, D. (1990). Implementation of Heuristic Search Strategies for Distribution Feeder Reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5 (1), 239-246.
- [8] Chiang, H. D. ve Jumeau, R. J. (1990). Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems:part2:Solution Algorithms and Numerical Results, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5 (3), 1568-1574.
- [9] Chiang, H. D. ve Jumeau, R. J. (1990). Optimal Network Reconfiguration in Distribution Systems:part1:a New Formulation and Solution Methodology, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5 (4), 1902-1908.
- [10] Goswami, S. K. ve Basu, S. K. (1992). A New Algorithm For the Reconfiguration of Distribution Systems for Loss Minimization, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 7 (3), 1484-1491.
- [11] Nara, K., Shiose, A., Kitagawa, M. ve Ishihara, T. (1992). Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minumum

Reconfiguration, *IEEE Transactions on Power Systems*, 7 (3), 1044-1051.

- [12] **Kim, H., Ko, Y. ve Jung, K. H.** (1993). Artificial Neural-Network based Feeder Reconfiguration for Loss Reduction in Distribution, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8 (3), 1356-1366.
- [13] **Chen, C. S. ve Cho, M. Y.** (1993). Energy loss reduction by critical switches, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 8 (3), 1246-1253.
- [14] **Taleski, R. ve Rajicic, D.** (1997). Distribution Network Reconfiguration for Energy Loss Reduction, *IEEE Transactions on Power Systems*, 12 (1), 398-406.
- [15] **Zhou, Q., Shirmohammadi, D. ve Liu, W. H. E.** (1997). Distribution Feeder Reconfiguration for Service Restoration and Load Balancing, *IEEE Transactions on Power Systems*, 12 (2), 724-729.
- [16] **Song, Y. H., Wang, G. S., Johns, A. T. Ve Wang, P. Y.** (1997). Distribution network reconfiguration for loss reduction using fuzzy controlled evolutionary programming, *Proc. Gener. Transm. Distrib.*, 144, 345-350.
- [17] **Jean, Y. J. ve Kim, J. C.** (2000). Network Reconfiguration in Radial Distribution System Using Simulated Annealing and Tabu Search, *Proceeding of Power Engineering Society Winter Meeting*, January, 23-27.
- [18] **Venkatesh, B. ve Ranjan, R.** (2003). Optimal Radial Distribution System Reconfiguration Using Fuzzy Adaptation of Evolutionary Programming, *Electrical Power and Energy Systems*, 25, 775-780.
- [19] **Lopez, E. ve Opaso, H.** (2004). Online reconfiguration considering variability demand: Applications to real networks, *IEEE Transactions on Power Systems*, 19 (1), 549-553.
- [20] **Prasad, K., Ranjan, R., Sahoo, N. C. ve Chaturvedi, A.** (2005). Optimal Reconfiguration of Radial Distribution Systems Using Fuzzy Mutated Genetic Algorithm, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20 (2), 1211-1213.
- [21] **Hong, Y. Y. ve Ho, S. Y.** (2005). Determination of Network Configuration Considering Multiobjective in Distribution Systems Using Genetic Algorithms, *IEEE Transactions on Power Systems*, 20 (2), 1062-1069.
- [22] **Gomes, F. V., Carneiro, S., Pereira, J. L. R., Vinagre, M. P., Garcia, P. A.N. Ve Araujo, L. R.** (2005). A New Heuristic Reconfiguration Algorithm for Large Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power Systems*, 20 (3), 1373-1378.
- [23] **Das, D.** (2006). A Fuzzy Multi-Objective Approach for Network Reconfiguration of Distribution Systems, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 21 (1), 202-209.
- [24] **Olamaei, J., Niknam, T., Gharehpetian, Jean, G.** (2008). Application of particle swarm optimization for distribution feeder reconfiguration

considering distributed generators, *Applied Mathematics and Computation*, 201, 575-586.

- [25] **Niknam, T., Olamaei, J. ve Khorshidi, R.** (2008). A hybrid algorithm based on HBMO and fuzzy set for multi-objective distribution feeder reconfiguration, *World Applied Sciences Journal*, 4 (2), 308-315.
- [26] **Niknam, T.** (2009). An Efficient Hybrid Evolutionary Algorithm Based on PSO and HBMO Algorithms for Multi-Objective Distribution Feeder Reconfiguration, *Energy Conversion and Management*, 50, 2074-2082.
- [27] **Niknam, T.** (2009). A New Hybrid Algorithm for Multi-objective Distribution Feeder Reconfiguration, *Cybernetics and Systems: An International Journal*, 40, 508-527.
- [28] **Wu, Y. K. ve Lee, C. Y.** (2010). Study of Reconfiguration for Distribution System with Distributed Generators, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 25 (3), 1568-1574.
- [29] **Saffar, A., Hooshmand, R. ve Khodabakhshian, A.** (2011). A New Fuzzy Optimal Reconfiguration of Distribution Systems For Loss Reduction and Load Balancing Using Ant Colony Search-Based Algorithm, *Applied Soft Computing*, 11, 4021-4028.
- [30] **Rao, R. S., Narasimham, S. V. L., Raju, M. R. ve Rao, A. S.** (2011). A Optimal Network Reconfiguration of Large-Scale Distribution Systems Using Harmony Search Algorithm, *IEEE Transactions on Power Systems*, 26 (3), 1080-1088.
- [31] **Sedighizadeh, M., Esmaili, M. ve Esmaili, M.** (2014). Application of the Hybrid Big Bang-Big Crunch Algorithm to Optimal Reconfiguration and Distributed Generation Power Allocation in Distribution Systems, *Elsevier Energy*, 76 (1), 920-930.
- [32] **Arandian, B., Hooshmand, R.-A. ve Gholipour, E.** (2014). Decreasing Activity Cost of A Distribution System Company by Reconfiguration and Generation and Power Generation Control of DGs based on shuffled Frog Leaping Algorithm, *Electrical Power and Energy Systems*, 61, 48-55.
- [33] **Nguyen, T. T. Ve Truong, A. V.** (2015). Distribution network for power loss minimization and voltage profile improvement using cuckoo search algorithm, *Electrical Power and Energy Systems*, 68, 233-242.
- [34] **Swift, G., Molinski, T. S., Lehn, W.** (2001). A Fundamental Approach to Transformer Thermal Modeling-Part I: Theory and Equivalent Circuit, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 16 (2), 171-175.
- [35] **Susa, D., Lehtonen, M., Nordman, H.** (2005). Dynamics Thermal Modelling of Distribution Transformer, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20 (3), 197-204.
- [36] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, IEEE, Std. C57.91-1995(R2004).
- [37] IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators, IEEE, Std. C57.91-2011.

- [38] **Agah, S. M. M. ve Abyaneh, H. A.** (2011). Distribution Transformer Loss of Life Reduction by Increasing Penetration of Distributed Generation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26 (2), 1128-1136.
- [39] **Agah, S. M. M. ve Abyaneh, H. A.** (2011). Qualification of the Distribution Transformer Life Extension Value of Distributed Generation, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 26 (3), 1820-1828.
- [40] **Zhu, J.** (2009). *Optimization of Power System Operation*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons Inc.
- [41] **Mishra, S., Das, D. and Paul, S.** (2017). A Comprehensive Review on Power Distribution Network, *Energy System*, 8, 227-284.
- [42] **Zhang, D., Fu, Z. ve Zhang, L.** (2007). An improved TS algorithm for loss minimum reconfiguration in large scale distribution systems. *Electr. Power Syst. Res.*, 77 (1), 685-694.
- [43] **Zhang, P., Li, W. ve Wang, S.** (2012). Reliability oriented distribution network reconfiguration considering uncertainties of data by interval analysis. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, 34 (1), 138-144.
- [44] **Jazebi, S. ve Vahidi, B.** (2012). Reconfiguration of distribution networks to mitigate utilities power quality disturbances. *Electr. Power Syst. Res.* 91(1), 9-17.
- [45] **Huang, Y. C.** (2002). Enhanced Genetic Algorithm-based Fuzzy Multi-objective Approach to Distribution Network Reconfiguration, *IEE Proc. Gener. Transm. Distrib.* 149 (5), 615-620.
- [46] **Hsiao, Y. T.** (2004). Multi-objective evolution programming method for feeder reconfiguration. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19 (1), 594-599.
- [47] **Chudnovsky, B. H.** (2017). *Transmission, Distribution and Renewable Energy Generation Power Equipment Life Extension Techniques*. Boca Raton, USA: CRC Press Taylor & Francis Group.
- [48] **Deb, K.** (2001). *Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms*. Chichester, New York: John Wiley & Sons.
- [49] **Batman, A., Bagriyanik, F.G., Aygen, Gul, O., Bagriyanik, M.** (2012). A feasibility study of grid connected photovoltaic systems in İstanbul, Turkey, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 5678-5686.
- [50] **Ching-Tzong, S.; Chu-Sheng, L.** (2003). Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 18 (3), 197-204.
- [51] **Cura, T.** (2008). *Modern Sezgisel Teknikler Ve Uygulamaları*, Papatya Bilim
- [52] **R, S. S.** (2009). *Engineering Optimization Theory and Practice*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.
- [53] **Url-1** < <https://smartgrid.epri.com/SimulationTool.aspx>>, erişim tarihi 09.07.2020

EKLER

EK A: Genetik Algoritma, PSO, Tavlama Benzetimi

EK B: OpenDss program

EK C: 16 baralı örnek sistem hat ve yük değerleri

EK D: 85 baralı örnek sistem (Taiwan test sistemi) hat ve yük değerleri



EK A

1. Genetik Algoritma

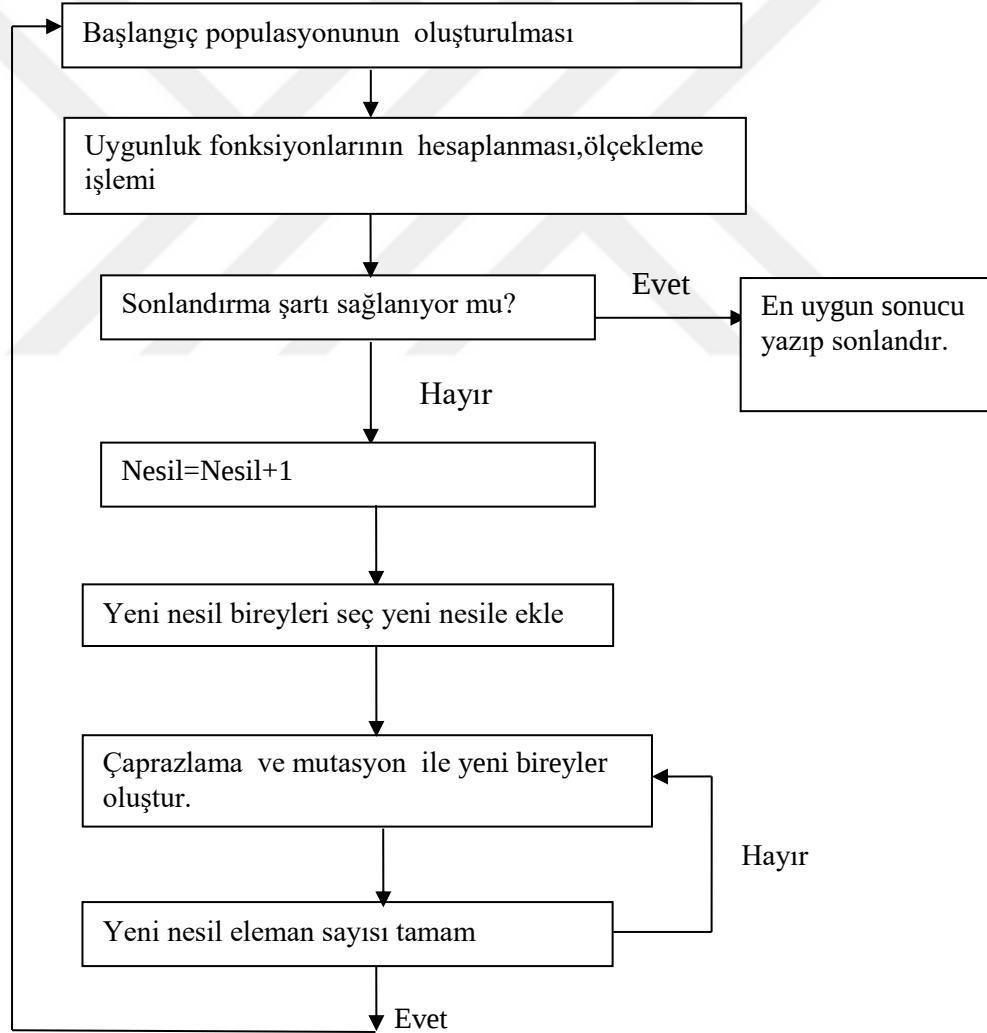
Genetik algoritmalar (GA) evrimsel algoritmalar içinde en yaygın kullanılan eniyileme algoritmalarından birisidir. İlk olarak temelleri 1960'larda John Holland tarafından atılmıştır. 1975 yılında, John Holland yazdığı kitabında doğal evrim ilkelerinin eniyileme problemlerine nasıl uygulanacağını anlatmış ve ilk genetik algoritmayı oluşturmuştur. Holland'ın teorisi günümüzde daha da geliştirilmiş ve eniyileme problemlerinin çözümünde etkili bir araç olmuştur.

Genetik algoritma, Charles Darwin'in evrim teorisindeki genetik ve doğal seleksiyonu temel alır. Evrimsel bir algoritma doğal evrimin benzetilmesidir. Doğada evrim en uygun bireylerin hayatta kalmasıyla gerçekleşmektedir. Zayıf bireyler yeni bireyleri ya çok az üretebilecek kadar yaşarlar ya da hiç yeni birey oluşturmadan ölürlər. Daha güçlü olanlar, daha uzun hayatta kalacaklarından çok daha fazla birey üretecek ve kendine benzer özelliklere sahip evlatları olacaktır. Evrimsel algoritma, evrim teorisinin temeli olan en iyinin yaşaması zayıf olanın elenmesi kuralına bağlı olarak sürekli iyileşen çözümler üretir. Kötü çözümler elenir.

Evrimsel algoritma rastgele oluşturulan ve bir çok çözüm takımının içinde bulunduğu topluluk adı verilen gen havuzu ile çalışmaya başlar. Her bir değişkene kromozom denir. Kromozom bir bireyin tam ifadesidir. Bir bireyin ebeveynlerinden gelen özelliklerini içinde bulundurur. Kromozomlar genlerin birleşiminden oluşurlar ve uygunluk fonksiyonu değişkenleri bulunduran bireyleri oluştururlar. Gen kromozom içerisindeki tek bir özelliktir. Bir çocuğun kromozomu genlerden oluşur ve genler raslantı olarak ebeveynlerden aktarılır. Fonksiyonun tüm değişkenlerinin yan yana sıralanması ile genlerden oluşan birey oluşur. Bireylerin tümünün bulunduğu havuz topluluk olarak adlandırılır. Bireyin genleri değişik şekilde kodlanabilir. En yaygın kodlama ikilik sayı sistemiyle olan kodlamadır. İkilik kodlama sisteminde kromozomlar 0 ve 1 lerden oluşan genlerin birleşimidir. Topluluk içindeki her birey için uygunluk fonksiyonu değeri hesaplanır. Uygunluk fonksiyon değeri aranan kritere yakın olan başarılı bireyler bir seçim yöntemiyle seçilirler. Aranan kriterden uzak olan bireyler elenir. Neslin devamı bir sonraki nesildeki başarılı bireyler arasında gerçekleşir. Başarılı bireylerden yeni bireyler oluşturulmasına evrimsel algoritmada çaprazlama denir. Çaprazlamayla yeni topluluk oluşturulur. Bireyler çaprazlama (üreme) sonucu bazı genlerini yeni

bireylere aktarır. Yeni bireylerin ebeveynlerin kopyası olması olasılığını önlemek için mutasyona uğratılır. Mutasyon bireyin genlerinin raslantısal olarak değişikliğe uğramasıdır. Mutasyon algoritmanın yerel minumuma sıkışmasını önler. Evrimsel algoritmada mutasyon oranı topluluk sayısına bağlı olarak belirlenir. Başarılı bireylerin genleri sonraki nesiller aktarılırken zayıf bireylerin genleri zamanla yok olur. Yeni nesiller oluşukça topluluk içerisinde başarılı birey sayısı giderek artar. Evrimsel algoritma sonlandırma şartı olarak nesil sayısı, çalışma süresi veya sürekli aynı sonuçların alınması olarak belirlenenmektedir [51, 52].

Evrimsel algoritmanın genel çalışma şekli ve akış diyagramı Şekil: A.1’ de verilmiştir.



Şekil A.1 : Genetik algoritmanın akış diyagramı.

2. Parçacık Sürü Eniyilemesi (PSO)

PSO ilk olarak 1995 yılında J.Kennedy ve R.C. Eberhart tarafından doğrusal olmayan fonksiyonların eniyilemesi için ortaya atılmıştır. PSO kuş, balık sürülerinin davranışlarından esinlenerek geliştirilmiştir. Parçacıkların herbiri eniyileme probleminin çözüm uzayında bir çözüm adayını temsil etmektedir. Sürü olarak hareket eden hayvanların yiyecek bulma ve güvenlik sağlama gibi durumlarda rastgele sergiledikleri hareketlerin amaçlarına ulaşmalarını kolaylaştırdığı görülmüştür. Genetik algoritma gibi evrimsel algoritmalar da belirli nesil sayılarında gerçekleştirilir. Kuşlar yiyecek ararken yiyeceğe en yakın kuşu takip ederler. Her çözüm veya her parçacık çözüm uzayında bir kuştur. Parçacıklar kendi kordinatlarını bir uygunluk fonksiyonuna gönderirler. Böylece parçacığın uygunluk değeri bulunduğu konumu için ölçülmüş olur. Her parçacığın kordinatları, hızı ve o ana kadar elde ettiği en iyi uygunluk değerini bilmesi gerekmektedir. Çözüm uzayının her boyutundaki hızının ve yönünün çevrimlerdeki değişimi, komşularının en iyi kordinatları ve kendi en iyi kordinatlarının birleşimidir. PSO sürüde bulunan bireylerin pozisyonlarının sürüdeki en iyi bireyin konumuna yaklaşması ilkesine dayanır. Yaklaşma hızı, rastgele gelişen bir olaydır. Sürü içindeki bireyler bir önceki konumlarından daha iyi bir konuma gelirler. PSO sosyal ortam benzetimi olarak geliştirilmeye başlanmıştır. Benzetim, en yakın komşu hızıyla karşılaştırma ve anlamsız hareket etme olarak ifade edilen iki unsura dayandırılmıştır.

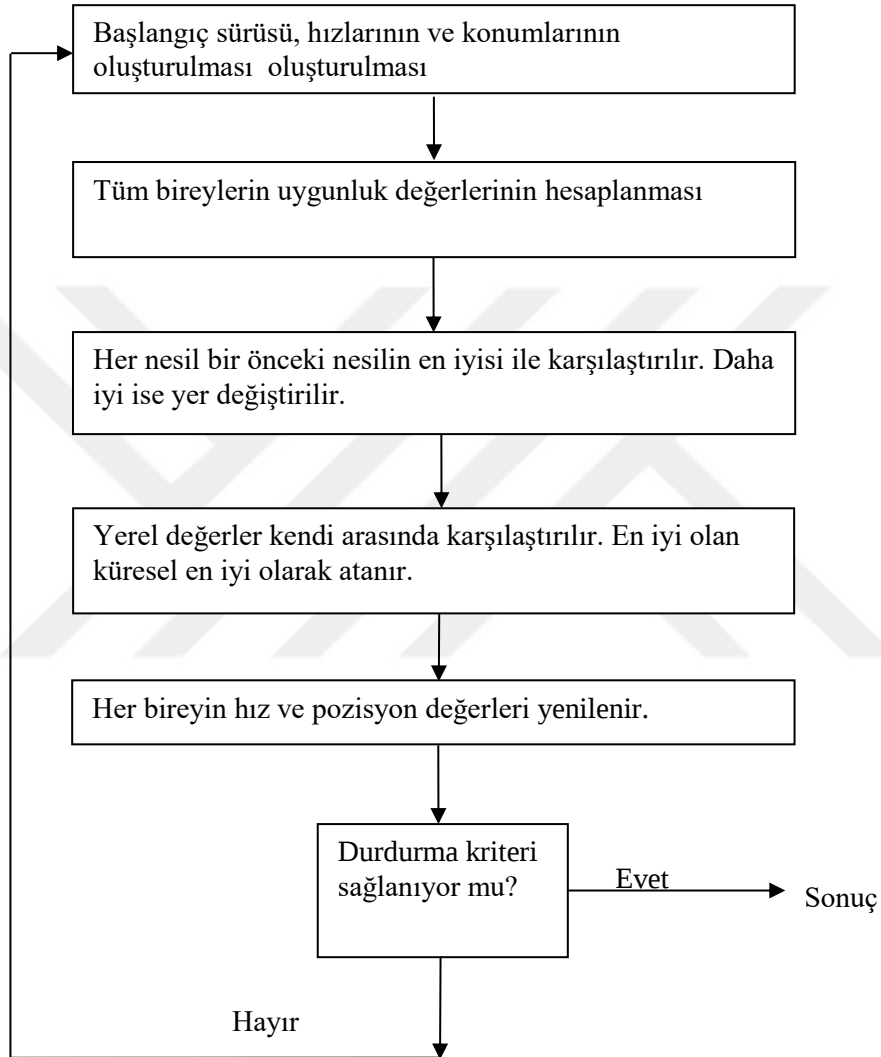
Çözüm uzayındaki her parçacığın pozisyonu ve konumları her iterasyonda iki değer ile aşağıdaki gibi yenilenir. Bu değerler P_{eniyi} ve G_{eniyi} değerleridir. P_{eniyi} değeri en iyi uygunluk değerini veren parçacığın konumudur. G_{eniyi} ise global bir değerdir. Tüm popülasyondaki tüm parçacıklar tarafından en iyi çözümü sağlayan parçacığın konumudur.

$$V_i^{k+1} = w \times V_i^k + c_1 \times \text{rand}_1^k \times (P_{eniyi_i}^k - X_i^k) + c_2 \times \text{rand}_2^k \times (G_{eniyi}^k - X_i^k)$$
$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1}$$

rand1 ve rand2 rastgele üretilen sayılardır. w, dinginlik katsayısı, c_1 ve c_2 ağırlıklandırma katsayılarıdır. Öğrenme katsayısı da denilmektedir. c_1 katsayısı parçacıkların kendi tecrübelerine göre hareket etmesini, c_2 katsayısı ise sürüdeki

diğer parçacıkların tecrübelerine göre hareket etmesini sağlar. Tecrübeler ile $c_1=2$, $c_2=2$ ile en iyi sonuçlar alınmıştır. Parçacık sayısı probleme bağlı bir değişkendir. Durdurma kriteri belirli bir iterasyon sayısına ulaşma veya amaç fonksiyonun bir değerine ulaşması için seçilebilir [51, 52].

PSO algoritmasının akış diyagramı Şekil A.2' de verilmiştir.



Şekil A.2 : Parçacık Sürü Algoritması Akış diyagramı

Durdurma kriteri belirli bir iterasyon sayısına ulaşma veya amaç fonksiyonun bir değerine ulaşması seçilebilir.

3. Tavlama Benzetimi (Simulated Annealing)

Tavlama Benzetimi (TB) bir metalin soğuyarak ve donarak minimum enerjili kristal yapısına dönüşmesi (tavlama süreci) ile genel bir sistemde minimumun araştırılması arasındaki benzerlikten yararlanır. Metropolis ve arkadaşları bilimsel hesaplamaların ilk zamanlarında 1958 yılında, atomların belirli bir sıcaklıktaki dengeli dağılımlarını bulan etkili bir benzetimi oluşturan basit bir algoritma sundu. Tavlama benzetimini bir optimizasyon tekniği olarak kullanma fikri Kirkpatrick ve arkadaşları tarafından 1983 yılında ortaya atılmıştır. TB'nin en önemli avantajı yerel minimumdan kurtulabilme yeteneğidir.

TB iyi anlamak için tavlama işlemi hakkında kısa bilgi sahibi olunması gerekir. Metaller için uygulanan tavlama işlemi termal bir işlemdir. İki aşamadan oluşur. İlk aşamada katı madde erime noktasına ulaşıncaya kadar ısı arttırılır. İkinci aşamada ısıtılmış sıvı madde yavaş yavaş soğutularak kuvvetli yapısal bütünlük oluşturan katı hale getirilir. Bu işlem ile düzensiz şekilde sıralanmış atomlar, düzenlenerek kristal bir yapı oluştururlar. Katı halde sistemin enerjisi asgari seviyededir. Tavlama işlemi sonucunda metal yapısı kararlı bir yapıya ulaşmakta ve sağlamlığı artmaktadır.

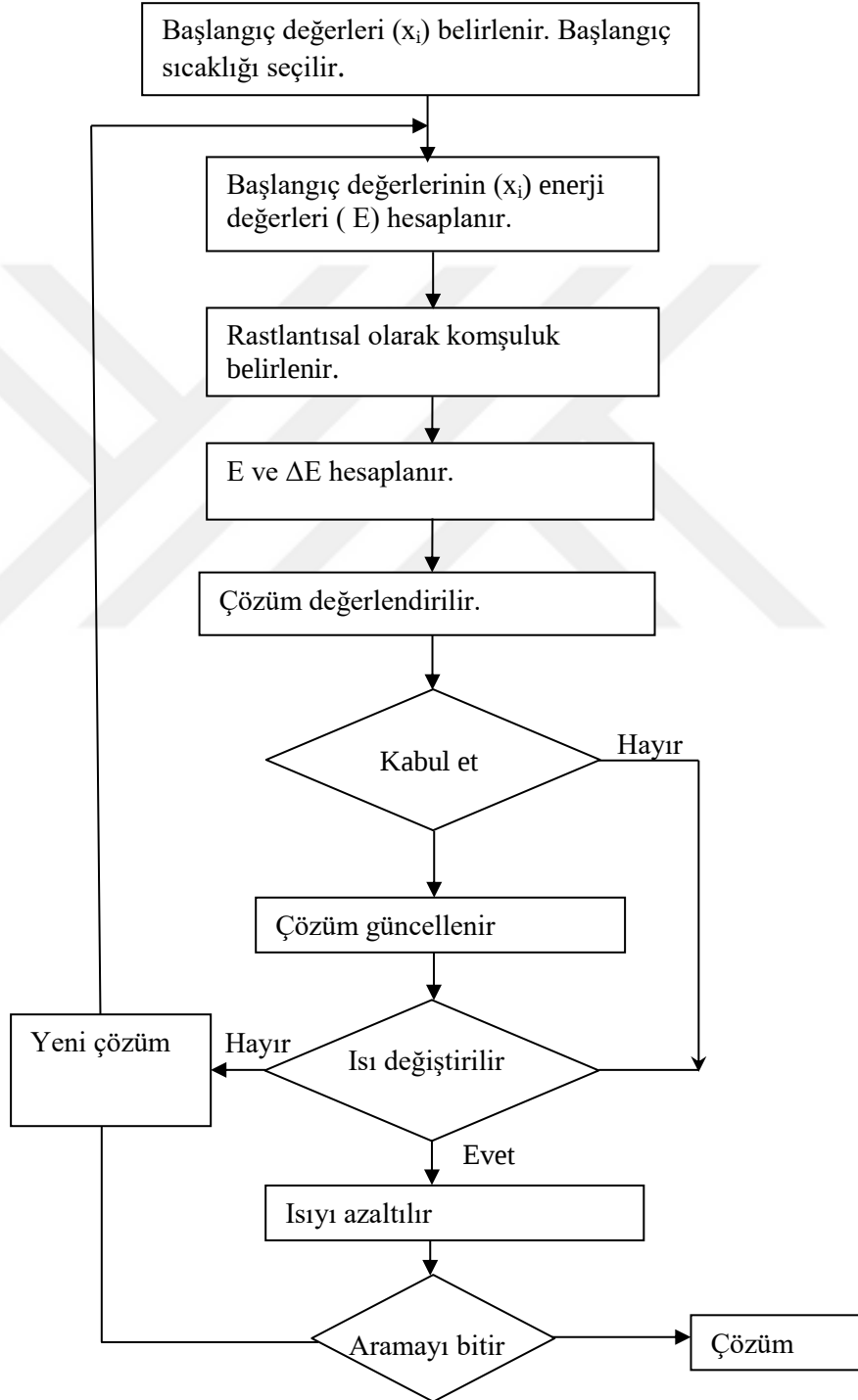
Metropolis ve arkadaşları fiziksel olan bu tavlama sürecini ifade eden bir algoritma oluşturdular. Önerilen algoritma Monte Carlo tekniklerine dayanmaktadır. Bir fiziksel halden diğerine şu şekilde geçilmektedir. i halindeki enerji E_i ve sonraki j halindeki enerji E_j ile temsil edilir. $E_j - E_i \leq 0$ ise j hali yeni mevcut hal olarak kabul edilir. T sıcaklık seviyesi, k_B Boltzman sabiti olmak üzere

$$p = e^{\frac{E_j - E_i}{k_B T}}$$

denkleminde verilen olasılığa bağlı olarak kabul edilir. Burada p kabul kriterini oluşturur. Enerji ile sıcaklık arasındaki ilişkiyi veren Boltzman sabitinin değeri ise $1.380650524 \cdot 10^{-23}$ J/K dir. Mevcut durumdaki enerji amaç fonksiyonuna karşılık gelmektedir.

Tavlama benzetimi iniş algoritmasının (Descent) iyileştirilmiş halidir. Tavlama benzetiminin en önemli özelliği lokal minimuma takılmadan genel minimuma ulaşabilmesidir.

Sıcaklık yüksek olduğunda amaç fonksiyonunda artışa sebep olacak hareketlerin kabul edilme olasılığı çok yüksek olacak, sıcaklık düştükçe bu olasılıkta azalacaktır. Bu nedenle aramaya mümkün olan en yüksek sıcaklıktan başlanmalıdır. Sıcaklık yavaş yavaş azalırken her sıcaklık değerinde belli sayıda hareket deneyerek arama işlemi sürdürülür [51, 52]. TB algoritmasının akış diyagramı Şekil A.3’ de verilmiştir.



Şekil A.3 : Tavlama Benzetimi Algoritması Akış diyagramı

1. Adım: Başlangıç değerleri(x_i) belirlenir. Başlangıç sıcaklığı seçilir.
2. Adım: Başlangıç değerleri için (x_i), E hesaplanır.
3. Adım: Rassal olarak komşuluk belirlenir.
4. Adım: Atama uygunsa E ve ΔE hesaplanır.
5. Adım: Eğer amaç fonksiyonundaki değişim azalan bir değişimse komşu çözüm mevcut çözüm olarak atanır. $\Delta E \leq 0$ değilse 0-1 aralığında rassal bir sayı(u) üretilir. $u < \exp(-\Delta E/T)$ ise çözüm güncellenir.
6. Adım: Mevcut T sıcaklığı için en küçük değeri veren nokta belirlenir.
7. Adım: Her sıcaklıktaki iterasyon sayısı tamamlanınca sıcaklık bir fonksiyona göre azaltılır.
8. Adım: Yeni T sıcaklığı için 2. Adım ile 6. Adım arası uygulanır. Yeni değer 6. adımda bulunan değerdir.
9. Adım: Iterasyon önceden belirlenen sıcaklığa kadar devam eder.

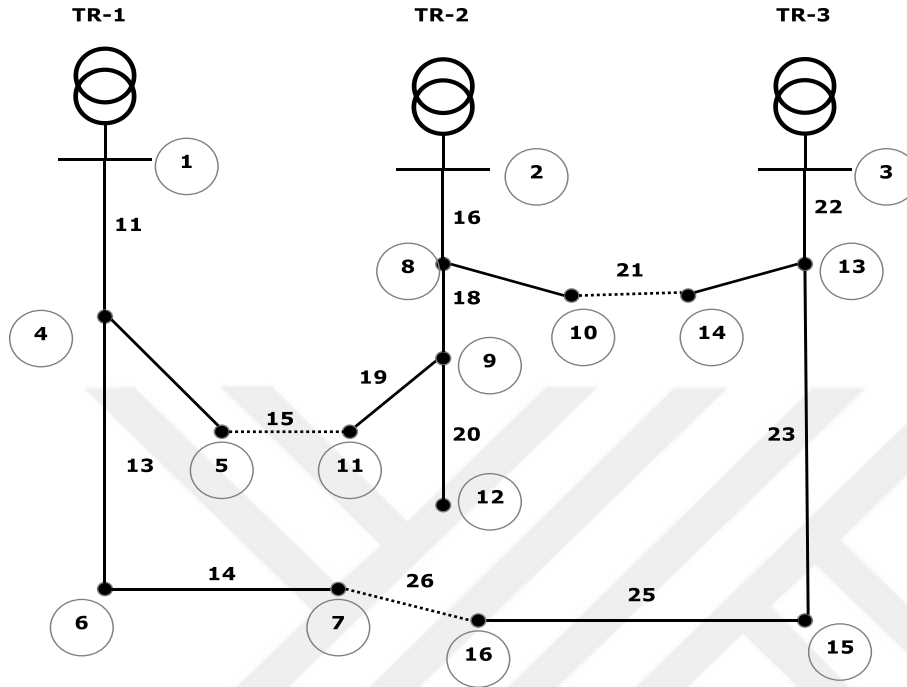
EK B

OpenDss programı

OpenDss programı EPRI (Electrical Power Institute) tarafından geliştirilen açık kaynak kodlu akıllı şebeke uygulamaları ve şebeke modernizasyonunu destekleyen elektrik dağıtım sistemi simulatörüdür. Dağıtım şebekelerindeki çalışmaları destekleyen birçok ticari yazılımda bulunan özellikler yanında frekansa dayalı analiz de yapabilen dağıtım şebekesi simulatörüdür. Dağıtım üretim birimlerinin (rüzgar,güneş) bir arada incelenmesine olanak sağlar. Dağıtım şebekesi ile ilgili birçok alanda kullanılabilen ticari olmayan bir programdır. Kullanıldığı alanlar; dağıtım şebekesi analizi ve planlaması, dağılmış üretim birimlerinin bir arada incelendiği durumlar, çok fazlı dağıtım şebekesi incelemeleri, harmonik analiz olarak sıralanabilir. OpenDss programı transient analiz yapabilen elektromagnetik analiz programı değildir.

Program kullanıcılara büyük kolaylık sağlayan metin komut dosyaları ile komut alacak şekilde tasarlanmıştır. COM arayüzü kullanılarak Matlab, Python, C gibi diğer yazılımlara bağlanabilir. Bu kullanıcının kendi modellerini oluşturmaya, verileri işlemesine, analiz etmesine olanak sağlar. Güç akışı sonuçlarına (sistem kayıpları, dal akımı ve bara gerilimleri vs.) COM arayüzü ile ulaşılabilmesi özelliği, birçok eniyileme probleminde kullanılabilmesini sağlamaktadır [53].

16 baralı örnek sistem



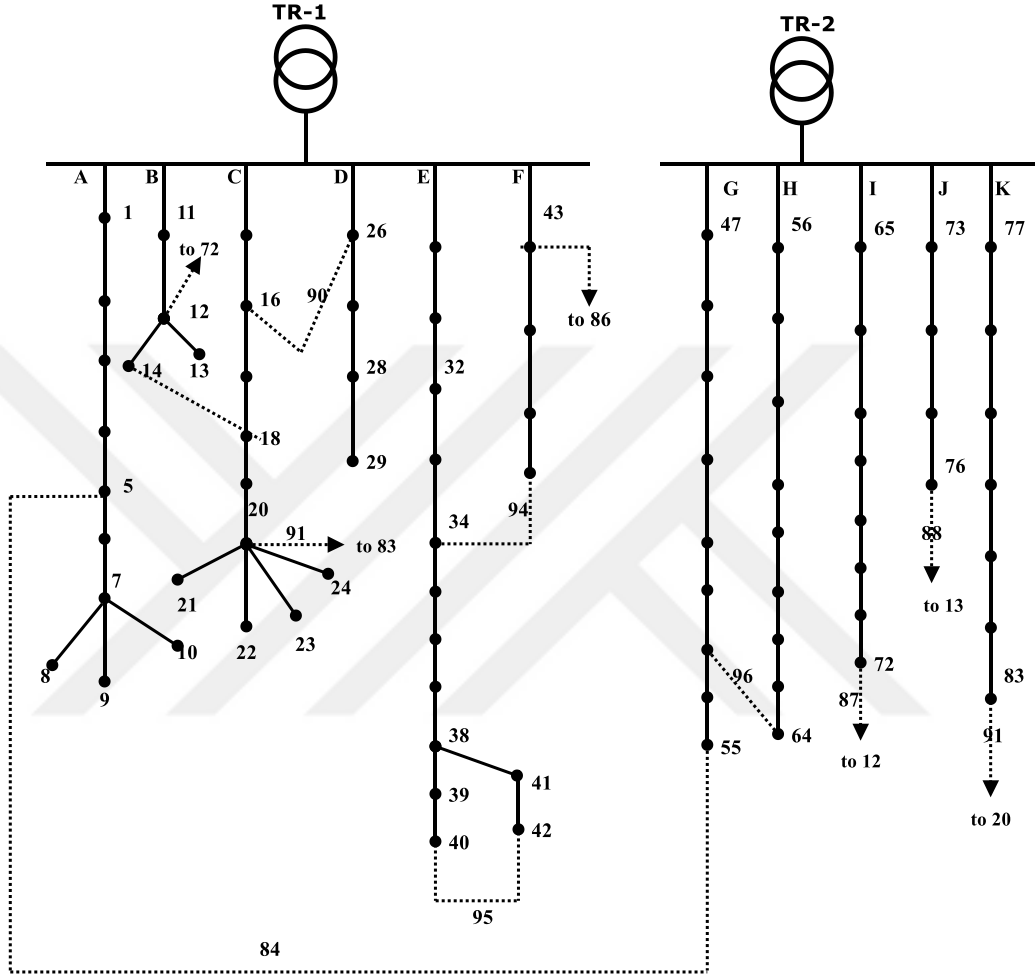
Şekil C.1 : 16 baralı örnek test sistemi.

Çizelge C.1 : 16 baralı örnek test sistemi verileri.

Hat (bara- bara)	Direnç (Ω)	Reaktans (Ω)	Aktif Yük (MW)	Reaktif Yük(MVAr)	Kapasite(MVAr)
1-4	0.3968	0.529	2.0	1.6	
4-5	0.4232	0.5819	3.0	1.5	1.1
4-6	0.4761	0.9522	2.0	0.8	1.2
6-7	0.2116	0.2116	1.5	1.2	
2-8	0.5819	0.5819	4.0	2.7	
8-9	0.4232	0.4232	5.0	3.0	1.2
8-10	0.5819	0.5819	1.0	0.9	
9-11	0.5819	0.5819	0.6	0.1	0.6
9-12	0.4232	0.5819	4.5	2.0	3.7
3-13	0.5819	0.5819	1.0	0.9	
13-14	0.4761	0.6348	1.0	0.7	1.8
13-15	0.4232	0.5819	1.0	0.9	
15-16	0.2116	0.2116	2.1	1.0	1.8
5-11	0.2116	0.2116			
10-14	0.2116	0.2116			
7-16	0.4761	0.6348			

EK D

85 baralı örnek sistem [50]



Şekil D.1 : 85 baralı örnek test sistemi.



ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Banu Öztürk Uçar

Doğum Yeri ve Tarihi : Üsküdar, 1974

E-Posta : ozturkbanu@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 1996, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik- Elektronik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 1999, İstanbul Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

1996-1997 yılında Erdem Pano Elektrik Ltd. Şti.'de çalıştı.

1997-1998 yılında EMAS Mühendislik Ltd.Şti.' de çalıştı.

1998 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaya başladı.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR:

- **Uçar, Ö. B.**, Bağrıyanık, M. (2015). Şebekeye Bağlı Fotovoltaik Üretimin Dağıtım Transformatör Ömür Kaybı Üzerindeki Etkilerinin İncelenmesi *EVK'2015 6. Enerji Verimliliği, Kalitesi Sempozyumu ve Sergisi*, (sf.144-147), Sakarya, Haziran 4-6.
- **Uçar, B.**, Bağrıyanık, M., Komurgoz, G. (2015). Influence of PV Penetration on Distribution Transformer Aging. *ICMAE 2015 Conference*, Roma, Italy, June 16-17.
- **Uçar, B.**, Bağrıyanık, M., Komurgoz, G. (2017). Influence of PV Penetration on Distribution Transformer Aging. *Journal of Clean Energy Technologies*, vol.5, no.2, pp.131-134, March. Doi: 10.18178/JOCET.2017.5.2.357 (EI)

- **Ucar, B.**, Bagriyanik, M. (2019). Reconfiguration of Distribution Network for Transformer Life Extension Using Quasi-Static Time Series. *Arabian Journal of Science and Engineering*, October. Doi: 10.1007/s13369-019-04181-2 (SCI)

