



**DAĞITIK ÜRETİM KAYNAKLARI İÇEREN BÜTÜNLEŞİK ELEKTRİK
DAĞITIM SİSTEMİ TASARIMI**

Burçin ÇAKIR ERDENER

**DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

ARALIK 2014

Burçin ÇAKIR ERDENER tarafından hazırlanan “DAĞITIK ÜRETİM KAYNAKLARI İÇEREN BÜTÜNLEŞİK ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMİ TASARIMI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Zülal GÜNGÖR

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

İkinci Danışman: Prof. Dr. Berna DENGİZ

Endüstri Mühendisliği, Başkent Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Başkan : Prof. Dr. İmdat KARA

Endüstri Mühendisliği, Başkent Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Ömer Faruk BAYKOÇ

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Prof. Dr. Ertan GÜNER

Endüstri Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Üye : Doç. Dr. Erkan AFACAN

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 24/12/2014

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

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

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

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

Burçin ÇAKIR ERDENER

30/12/2014

DAĞITIK ÜRETİM KAYNAKLARI İÇEREN BÜTÜNLEŞİK ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMİ TASARIMI

(Doktora Tezi)

Burçin ÇAKIR ERDENER

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2014

ÖZET

Dünyayı etkileyen enerji güvenliği ve verimliliği, iklim değişikliği, sanayileşme ve nüfus artışına bağlı olarak artan enerji talebi gibi konular mevcut elektrik üretim, iletim ve dağıtım süreçlerinde yeni yaklaşımların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Geleceğin elektrik sistemleri tüketicilere güvenilir, temiz ve sürdürülebilir elektriği kabul edilebilir bir fiyattan sağlamak zorundadırlar. Bu amaçlara ulaşabilmek için elektrik sistemlerinin akıllı olması ve dağıtık üretim sistemlerine dayandırılması gereklidir. Bu çalışmada dağıtık üretim kaynakları içeren bir elektrik dağıtım sistemi tasarımı yapılmıştır. Sistemin tasarımında, dağıtım şebekesinin orta ve alçak gerilim hatlarının rotalanması, dağıtım trafolarının yer seçimi ve kapasitelerinin belirlenmesi, trafo merkezinin kapasitesinin belirlenmesi ve dağıtık üretim kaynaklarının yer seçimi alt problemleri bir bütün olarak dikkate alınmıştır. Problemin çözümü için öncelikle doğrusal olmayan karmaşık tamsayılı düğüm tabanlı bir matematiksel model geliştirilmiştir. Problemin karmaşık yapısına bağlı olarak geliştirilen düğüm tabanlı modelin çözemediği test problemlerini çözmek için düğüm ayrıştırma tekniği olarak isimlendirilen ve orijinal şebekenin dönüştürülmesi esasına dayanan bir yaklaşım önerilerek, dönüştürülmüş şebeke üzerinde yeni bir akış tabanlı doğrusal olmayan karmaşık tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Önerilen modellerin etkinliği test problemleri üzerinde incelenmiş ve birçok problemde makul zaman içinde en iyi çözümlere ulaşıldığı gösterilmiştir. İki modelin de verilen süre kısıtı içinde en iyi çözümü bulamadığı büyük boyutlu test problemleri için çapraz entropi tabanlı iki melez sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Sezgisel algoritmaların etkinliği aynı test problemleri üzerinde deneysel olarak analiz edilmiş ve en iyi çözümlere ulaşma performansları karşılaştırılmıştır.

Bilim Kodu : 906.1.038
Anahtar Kelimeler : Enerji modelleme, Elektrik dağıtımı
Sayfa Adedi : 107
Danışman : Prof. Dr. Zülal GÜNGÖR
İkinci Danışman : Prof. Dr. Berna DENGİZ

INTEGRATED ELECTRICITY DISTRIBUTION SYSTEM DESIGN WITH
DISTRIBUTED GENERATION

(Ph. D. Thesis)

Burçin ÇAKIR ERDENER

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2014

ABSTRACT

Challenges including energy security and efficiency, climate change and increasing demand due to growth in population and industrialization are converging to drive fundamental change in the way electrical energy is produced, transmitted and distributed. Future electricity systems must produce and distribute reliable, affordable, clean and sustainable electricity. To accomplish these goals, the electricity system must be smart and based on distributed generation. In this work a new approach is presented for the problem of designing electricity distribution system with distributed generation. The system considered includes; a sub-transmission substation, medium voltage and low voltage distribution networks, distribution transformers that connect medium voltage network with low voltage network and, distributed generation facilities. The design problem includes the decisions of sizing the sub-transmission transformer, location and sizing of distribution transformers and distributed generation facilities, routing medium and low voltage networks while minimizing the total system design cost. To achieve this objective, a nonlinear mixed integer mathematical model is proposed first. Since the dimension of the problem increase rapidly with the number of demand nodes, the number of candidate distribution transformers and distributed generation nodes and types, a new exact solution approach which is called node splitting technique is presented for solving larger sized test problems. The effectiveness of the models tested on test problems. Results show that the proposed models are proved to be very effective to find optimal results in reasonable computational time. For the test problems that cannot be solved with the both exact methods, two cross-entropy based hybrid algorithms are proposed. The effectiveness of the heuristic algorithms is comparatively tested on the same test problems.

Science Code : 906.1.038

Key Words : Energy modeling, Electricity distribution

Page Number : 107

Supervisor : Prof. Dr. Zülal GÜNGÖR

Co-Supervisor : Prof. Dr. Berna DENGİZ

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarını esirgemeyen tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Zülal GÜNGÖR'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Akademik kariyerim ve tez çalışmalarım boyunca bana destek olan, kıymetli fikir, deneyim ve yönlendirmeleri ile tezimin her aşamasında çok büyük katkı sağlayan ikinci danışmanım Sayın Prof. Dr. Berna DENGİZ'e sonsuz teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Tez çalışmalarımın olgunlaşmasında değerli fikir ve vakitlerini esirgemeyen tez izleme komitesi üyesi hocalarım Sayın Prof. Dr. İmdat KARA ve Sayın Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK'a saygılarımı sunar ve sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Meslek hayatım ve tez çalışmalarım boyunca sabır ve metanetle her zaman yanımda olan eşim Alper ERDENER'e ve aileme sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİ.....	7
2.1. Dağıtım Sisteminin Bileşenleri	8
2.2. Dağıtım Sistemlerinde Şebeke Yapıları	9
2.3. Dağıtım Sistemlerinde Dağıtık Üretim	12
3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	15
3.1. Birincil ve İkincil Dağıtım Şebekesi Planlaması Üzerine Çalışmalar	16
3.2. Dağıtık Üretim Kaynağı Planlaması Üzerine Çalışmalar	17
4. BÜTÜNLEŞİK DAĞITIM SİSTEMİ TASARIMI	19
4.1. Problemin Tanımı.....	19
4.2. Problemin Özellikleri.....	23
5. BÜTÜNLEŞİK ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMİ TASARIMI PROBLEMİ İÇİN KESİN ÇÖZÜM MODELLERİ.....	25
5.1. Düğüm Tabanlı Doğrusal Olmayan Matematiksel Model.....	25
5.2. Doğrusallaştırılmış Düğüm Tabanlı Matematiksel Model	30
5.3. Akış Tabanlı Doğrusal Olmayan Model	33

	Sayfa
5.3.1. Dügüm ayrıştırma tekniği	34
5.3.2. Dügüm ayrıştırma tekniği ile şebeke dönüştürme.....	37
5.3.3. Matematiksel model	40
5.4. Deneysel Çalışmalar	45
5.4.1. Test problemleri	45
5.4.2. Deneysel Çalışmalar.....	45
6. BÜTÜNLEŞİK ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMİ TASARIMI PROBLEMİ İÇİN SEZGİSEL ALGORİTMALAR	53
6.1. Çapraz Entropi Yöntemi.....	54
6.1.1. Eniyileme problemleri için çapraz entropi	55
6.1.2. Eniyileme problemleri için çapraz entropi uygulamaları.....	61
6.1.3. BEDS için ÇEHA_I	65
6.1.4. ÇEHA_I için iyileştirme işlemi ve M_ÇEHA_I.....	75
6.1.5. BEDS için ÇEHA_II.....	75
6.1.6. ÇEHA_II için iyileştirme işlemi ve M_ÇEHA_II	78
6.2. Deneysel Çalışmalar	84
7. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	95
KAYNAKLAR	99
ÖZGEÇMİŞ	107

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Geleceğin elektrik güç sistemlerinin gelişimi.....	13
Çizelge 4.1. Trafo maliyet/kapasite oranı örneği.....	23
Çizelge 5.1. Düğüm tabanlı model için hesaplama karmaşıklığı.....	29
Çizelge 5.2. Küçük boyutlu test problem grubu için deneysel çalışmalar.....	47
Çizelge 5.3. Orta boyutlu test problem grubu için deneysel çalışmalar.....	48
Çizelge 5.4. Büyük boyutlu test problem grubu için deneysel çalışmalar.....	48
Çizelge 5.5. Başlangıç parametre değerlerindeki değişmelerin ATDM'nin performansına etkileri.....	51
Çizelge 6.1. Küçük boyutlu test problem grubu için deneysel çalışmalar.....	89
Çizelge 6.2. Orta boyutlu test problem grubu için deneysel çalışmalar.....	90
Çizelge 6.3. Büyük boyutlu problemler için deneysel sonuçlar.....	91
Çizelge 6.4. Küçük boyutlu test problemleri için istatistiksel analiz sonuçları.....	92
Çizelge 6.5. Orta boyutlu test problemleri için istatistiksel analiz sonuçları.....	93
Çizelge 6.6. Büyük boyutlu test problemleri için istatistiksel analiz sonuçları.....	94

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Elektrik güç sistemlerinin hiyerarşik yapısı	8
Şekil 2.2. Dallı şebeke örneği	10
Şekil 2.3. Halka şebeke örneği.....	11
Şekil 2.4. Birden fazla noktadan beslenen gözlü şebeke örneği	11
Şekil 2.5. Enterkonnekte şebeke örneği	12
Şekil 2.6. (a) Merkezi üretim sistemi (b) Dağıtık üretim sistemi	14
Şekil 4.1. BEDS elemanları	20
Şekil 4.2. (a) Başlangıç şebekesi (b) BEDS için olası bir çözüm	20
Şekil 4.3. Başlangıç dağıtım şebekesi.....	21
Şekil 4.4. Birincil dağıtım şebekesi	22
Şekil 4.5. İkincil dağıtım şebekesi	22
Şekil 4.6. Trafo sayısı ve maliyet ilişkisi	24
Şekil 5.1. Dağıtım hatlarının toplam maliyet fonksiyonu.....	30
Şekil 5.2. Örnek problem: 15 düğümlü test problemi için başlangıç şebekesi	32
Şekil 5.3. Örnek problem: 15 düğümlü test problemi için en iyi çözüm.....	33
Şekil 5.4. İki rollü düğüm örneği (a) başlangıç durumu (b) dağıtım trafosunun tek rollü düğümde açıldığı durum (c) dağıtım trafosunun iki rollü düğümde açıldığı durum.....	34
Şekil 5.5. İki rollü düğüm ayrıştırma ve ayrıt tipi belirleme örnekleri	36
Şekil 5.6. İki rollü düğüm ayrıştırma ve ayrıt maliyetleri atama örnekleri.....	36
Şekil 5.7. Olası ayrıştırma durumları	37
Şekil 5.8. DAT ile şebeke dönüştürme (a) başlangıç şebeke (b) dönüştürülmüş şebeke	37
Şekil 5.9. Süper düğüm ile çok kaynaklı şebekeyi tek kaynaklı şebekeye dönüştürme .	38
Şekil 5.10. Dönüştürülmüş şebekenin son hali	39

Şekil	Sayfa
Şekil 5.11. (a) Dönüştürülmüş başlangıç şebeke (b) olası bir çözüm.....	40
Şekil 5.12. (a) akış tabanlı model için mümkün bir çözüm (b) akış tabanlı model için bir düğümün farklı kaynaklardan beslendiği mümkün bir çözüm	41
Şekil 6.1. ÇEHA_I akış şeması.....	66
Şekil 6.2. 10 düğümlü başlangıç şebekesi	68
Şekil 6.3. Dağıtım trafosu yer seçim kararı	69
Şekil 6.4. İkincil dağıtım hatlarının rotalanması.....	72
Şekil 6.5. Dağıtım trafolarının kapasitelerinin belirlenmesi	73
Şekil 6.6. DAT ile indirgenmiş şebekenin dönüştürülmesi	74
Şekil 6.7. ÇEHA_II akış şeması	76
Şekil 6.8. TOÇE algoritmasının akış şeması	87

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Açıklamalar

km	Kilometre
kV	Kilovolt
kVA	Kilovoltamper
kWh	Kilovatsaat
MVA	Megavoltamper
MW	Megavat
TWh	Teravatsaat

Kısaltmalar

Açıklamalar

AG	Alçak gerilim
ATDM	Akış tabanlı doğrusallaştırılmış model
ÇE	Çapraz entropi
ÇEHA	Çapraz entropi tabanlı melez algoritma
ÇS	Çözüm süresi
BEDS	DÜK içeren bütünleşik elektrik dağıtım sistemi
DAT	Düğüm ayrıştırma tekniği
DGYSD	Doğrusal gevşetme yüzde sapma değeri
DTDM	Düğüm tabanlı doğrusallaştırılmış model
DÜ	Dağıtık üretim
DÜK	Dağıtık üretim kaynakları
EÇD	Eniyi çözüm değeri
EÇUPS	Eniyi çözüme ulaşılan problem sayısı
EÜAŞ	Elektrik Üretim A.Ş.
EYS	En yüksek yüzde sapma
GA	Genetik algoritma
İRDS	İki rollü düğüm sayısı

Kısaltmalar**M_ÇEHA****OG****OÇS****OPF****OYS****SAŞ****SDŞ****TL****WEO****YG****Açıklamalar**

Türetilmiş çapraz entropi tabanlı melez algoritma

Orta gerilim

Ortalama çözüm süresi

En iyi güç akışı

Ortalama yüzde sapma

Stokastik ayrıtlı şebeke

Stokastik düğümlü şebeke

Türk Lirası

Uluslararası Enerji Ajansı Raporu

Yüksek gerilim

1. GİRİŞ

Ekonomik ve sosyal anlamda gelişen ülkelerde teknoloji alanında yaşanan gelişmeler, sanayileşmeyle birlikte artan kentleşme ve hızlı nüfus artışı, enerjiye olan talebi doğrudan etkilemekte ve talep miktarını artırmaktadır. Bu doğrusal ilişkiye bağlı olarak da bir ülkede kişi başına düşen enerji tüketim miktarı, o ülkedeki ekonomik düzey, gelişmişlik ve hayat standardını yansıtmada önemli bir gösterge olarak kullanılmaktadır.

19. yüzyılın sonlarında keşfedilip aydınlatma amaçlı olarak kullanılmaya başlanan elektrik, kullanım kolaylığı, diğer enerji türlerine kolayca dönüştürülebilmesi ve elektrikli aletlerin her geçen gün günlük hayatımızın en büyük bileşeni olmasının da etkisiyle bugün enerjinin en çok talep edilen şekli olmuştur. Günümüz eğilimleri ve gelecekteki hedefler göz önüne alınarak yapılan tahminlerde, ekonominin temel girdisi haline gelen elektrik enerjisinin dünyada 2035 yılına kadar en hızlı büyüyen (%2,6) son kullanıcı enerji şekli olması, nihai enerji tüketimindeki payının 2010'daki %17,7 düzeyinden 2020'de %20,3'e, 2035'te ise %23,4'e çıkması beklenmektedir. Üretim açısından bakıldığında ise, Uluslararası Enerji Ajansı tarafından hazırlanan ve mevcut politikaların devamını öngören senaryo çalışmasına göre (WEO2012) elektrik üretiminin, 2010'da 21,408 TWh'den ortalama %2,6'lık artışlarla 2020'de 29,194 TWh'ye, 2030'da 36,492 TWh'ye ve 2035'de de 40,364 TWh'ye yükselmesi beklenmektedir. Bu rakamlar 2010-2035 döneminde %88,5'lik bir artışa işaret etmektedir (Elektrik Üretim Anonim Şirketi [EÜAŞ], 2012: 11).

Hızlı gelişen ekonomisiyle ülkemizde elektrik enerjisine olan talep ise 2011 yılı sonu itibariyle 230 milyar kWh seviyesine ulaşmış, 2023 yılında ise 450 milyar kWh civarında olması beklenmektedir. Üretim açısından bakıldığında 2012 itibari ile Türkiye toplam elektrik kurulu gücü 55.380 MW'a ulaşmıştır. Vizyonu, "istikrar içinde büyüyen, gelirini daha adil paylaşan, küresel ölçekte rekabet gücüne sahip, bilgi toplumuna dönüşen, AB'ye üyelik için uyum sürecini tamamlamış bir Türkiye" olarak belirlenen Dokuzuncu Kalkınma Planı özel ihtisas komisyonları tarafından yapılan çalışmalar, 2020 yılına kadar enerji sektörüne asgari 91, azami 128 milyar dolar yatırım yapılmasına ihtiyaç bulunduğunu tespit etmektedir. Burada dikkat çekici bir unsur, yatırımların %80'ininden fazlasının elektrik sektörüne ait olmasıdır (EÜAŞ, 2012: 18).

Elektrik enerjisi talep ve arzı arasında bir denge oluşturabilmek için, sürdürülebilir enerji politikaları çerçevesinde elektriğin yeterli, verimli, çevre ile uyumlu ve aynı zamanda da kabul edilebilir bir fiyattan tüketicilere sunulması gereklidir. Ayrıca enerji arz güvenliğini sağlayabilmek için enerji kaynaklarının çeşitlendirilmesi gereklidir. Ülkelerin ve elektrik enerji sektörünün yönetimini üstlenenler, o ülkenin içinde bulunduğu koşulları dikkate alarak, yerli ve yenilenebilir kaynaklara öncelik vererek bir enerji stratejisi, politikası ve enerji arz-talep dengesi oluşturmak durumundadır. Ayrıca elektriği tüketicilere ulaştırırken de gelişen teknolojiyi takip ederek iletim/dağıtım şebekelerinin daha güvenilir ve verimli hale getirilmesini sağlayan yatırımlara da önem verilmelidir. Bu kapsamda son dönemlerde hızla yayılan Akıllı Şebekeler (Smart Grids), daha emniyetli, daha güvenilir, daha etkin olmaları ve yenilenebilir enerji sistemleriyle bütünleşme kapasitesine sahip olmaları nedeniyle geleceğin enerji sistemleri olarak hızla yaygınlaşacaktır. Akıllı şebeke; bilgisayar ve ağ teknolojilerinin elektrik şebekelerine entegre edilmesiyle elde edilen sistemdir. Bu konuda dünya çapında yapılan çalışmalarda geleceğin akıllı şebeke mimarilerinin aşağıdaki üç özelliği mutlaka barındırması gerektiği öngörülmüştür (Alagöz, Kaygusuz ve Karabiber, 2012; Bayod, 2009; Grijalva ve Tariq, 2011; Vytelingum, Voice, Ramchurn, Rogers ve Jennings, 2010):

- Dağıtık Üretim (DÜ): DÜ, merkezi olmayan ve şebeke üzerinde dağılmış olan küçük ölçekli üretim kaynaklarından yüksek güçlü üretim santrallerine kadar geniş bir spektrumda enerji üretimi kompozisyonunu hedefler. Böylece, yerinde (lokal) üretim ve tüketim ile şebeke kayıpları düşürülerek enerji verimliliği artırılır, yenilenebilir kaynakların hane düzeyine kadar yaygınlaşmasına ve enerji üretiminde payının artmasına imkan sağlanır. Klasik şebekede statik tüketici durumunda olan birimler, dağıtık üretim imkanları ile dinamik üreticiler haline dönüşebilir (Grijalva ve Tariq, 2011).
- Dağıtık Depolama: Enerji üretim fazlasının şebekeye dağılmış depolama sistemlerinde depolanması ve gerektiğinde enerji talebini karşılamak üzere kullanılmasını hedefler. Yüksek hacimli enerji saklama sistemlerinden, hane halkı depolama sistemine kadar çok geniş ölçekte depolama sisteminin şebekeye dağıtılması yenilenebilir kaynaklar gibi enerji süreksizliği olan kaynakların etkin kullanımı için önem arz eder.

- Talep Tarafı Yık Yönetimi: Dağıtık üretim ve depolama olanaklarına sahip şebekelerde, üretim-talep dengesi ve enerji fiyatları daha akıllı yönetilebilir ve enerji verimliliği artırılabilir (Vytelingum ve diğeri, 2010).

Akıllı şebekelerin en önemli öğelerinden biri olan dağıtık üretim sisteminin temeli, üretim kaynaklarının dağıtım şebekesinin kullanıcılara yakın noktalarına entegre edilmesi esasına dayanıyor olsa da, mevcut elektrik şebeke sistemlerinin yapıları enerji üretimi entegrasyonu yapılacak şekilde tasarlanmamıştır. Merkezi üretim sistemi denilen bu yapıda elektrik, büyük güçlü elektrik üretim birimlerinden yüksek gerilimde elektriğin taşındığı iletim sistemlerine, iletim sistemlerinden orta ve düşük gerilimde elektrik taşıyan dağıtım sistemlerine geçerek müşteriye ulaştırılır. Merkezi üretim sistemlerinde güç akışı, az sayıdaki büyük güçlü elektrik üretim birimlerinden çok sayıdaki son kullanıcıya doğrudur (Willis ve Scott, 2000). Merkezi üretim sistemleri halen kullanılıyor olsa da, yıllar önce tasarlanmış bu sistemin mevcut ve gelecek ihtiyaçlara cevap veremeyecek durumda olması, elektriğin uzun mesafeler taşınmasından doğan yüksek kayıplar, az sayıda kaynağa bağlı olarak şebeke güvenilirliğinin düşük olması gibi nedenler, birçok ülkeyi dağıtık üretim sistemi yapılanması yönünde adım atmaya yöneltmiştir. Bu çerçevede, küçük ölçekli, tüketim merkezlerine yakın üretim tesislerinde alçak ya da orta gerilim seviyesinde elektrik enerjisi üretiminin gelişimi, kullanımı ve yenilenebilir kaynakların enerji üretiminde yaygınlaşması çalışmaları ile ilgili yatırımlar hız kazanmıştır. Bazı araştırma merkezlerinin beklentileri 2020 yılına kadar elektrik enerjisi üretiminin %25-30'unun Dağıtık Üretim Kaynaklarından (DÜK) olacağı yönündedir (Ackermann, Anderson ve Söder, 2001).

Merkezi üretim sistemi elemanı olarak planlanmayan DÜK'ler, tüketicilere yakın olarak dağıtım şebekelerine yerleştirilmektedir. Ancak mevcut dağıtım şebekesinin yapısı gereği, üretim eklemeleri şebeke sorunlarına neden olabileceğinden DÜK'lerin dağıtım şebekesine bağlanması, şebekenin planlama ve işletmesinin yeniden gözden geçirilmesi durumunu ortaya çıkaracak ve hatta uzun vadede merkezi olarak tasarlanmış dağıtım şebekesi yetersiz kalacağı için dağıtım şebekelerinin yeniden tasarlanması ihtiyacı gündeme gelecektir. Yeniden tasarlanacak dağıtım şebekelerinde, geleceğin enerji sistemleri için gereklilik olan akıllı şebekelere alt yapı oluşturacak şekilde, dağıtık üretim sistemini içeren şebeke tasarım problemi araştırmacıların ilgisini çeken bir konu olmaya başlamıştır (El-Khattam, Hegazy ve Salama, 2005).

Bu çalışmada, elektrik dağıtım şebekelerinde yukarıda değinilen yeni ihtiyaçlara cevap verebilmek amacıyla DÜK içeren Bütünleşik Elektrik Dağıtım Sistemi (BEDS) tasarımı problemi ele alınmıştır. BEDS'in elemanları; dağıtım şebekesini iletim şebekesine bağlayan bir trafo merkezi, birincil dağıtım (orta gerilim) hatları, dönüştürücü dağıtım trafoları, ikincil dağıtım hatları (alçak gerilim hatları) ve DÜK'lerdir. Bu çalışmada DÜK'lerin sadece Orta Gerilim (OG) seviyesinde üretim yapabildiği, yani sadece birincil dağıtım hatları ile şebekeye bağlanabildiği varsayılmıştır.

Sistemin tasarımında; birincil dağıtım hatların rotalanması, ikincil dağıtım hatların rotalanması, trafo merkezinin kapasitesinin belirlenmesi, dağıtım trafolarının yer seçimi ve kapasitelerinin belirlenmesi ve DÜK'lerin yer seçimi alt problemleri dikkate alınmıştır.

Bu alt problemler, hiç elektrik şebekesi olmayan ya da dağıtım şebekesinin tamamen yenileneceği belirli bir alan için, bölgenin özelliklerine göre kurulabilecek DÜK'lerin ve diğer dağıtım şebekesi elemanlarının bir bütün olarak dikkate alındığı bir sistem tasarımı yapmayı sağlamaktadır. Problemin çözümü ile önerilecek sistem tasarımında, tüketicilere yakın konumlandırılmış DÜK'ler ile elektriğin taşınması sırasında oluşacak kaybın azaltılması, güvenilirliğin artırılması, küçük ölçekli yatırımlarla maliyetlerin azaltılması amaçlanmaktadır. Konu ile ilgili literatür incelendiğinde DÜK içeren dağıtım şebekesi tasarlanması probleminin araştırmacılar tarafından, bu çalışmada ele alındığı kadar kapsamlı olarak ele alındığı bir çalışmaya rastlanmamıştır. Yukarıda verilen 5 alt problem farklı şekillerde araştırmacılar tarafından ele alınmış olsa da, 5 alt problemin hepsinin bir arada dikkate alındığı bir çalışma mevcut değildir. Tanımlanan problemle ilişkili olduğu belirlenen çalışmalar literatür araştırması bölümünde ayrıntılı olarak verilmiştir.

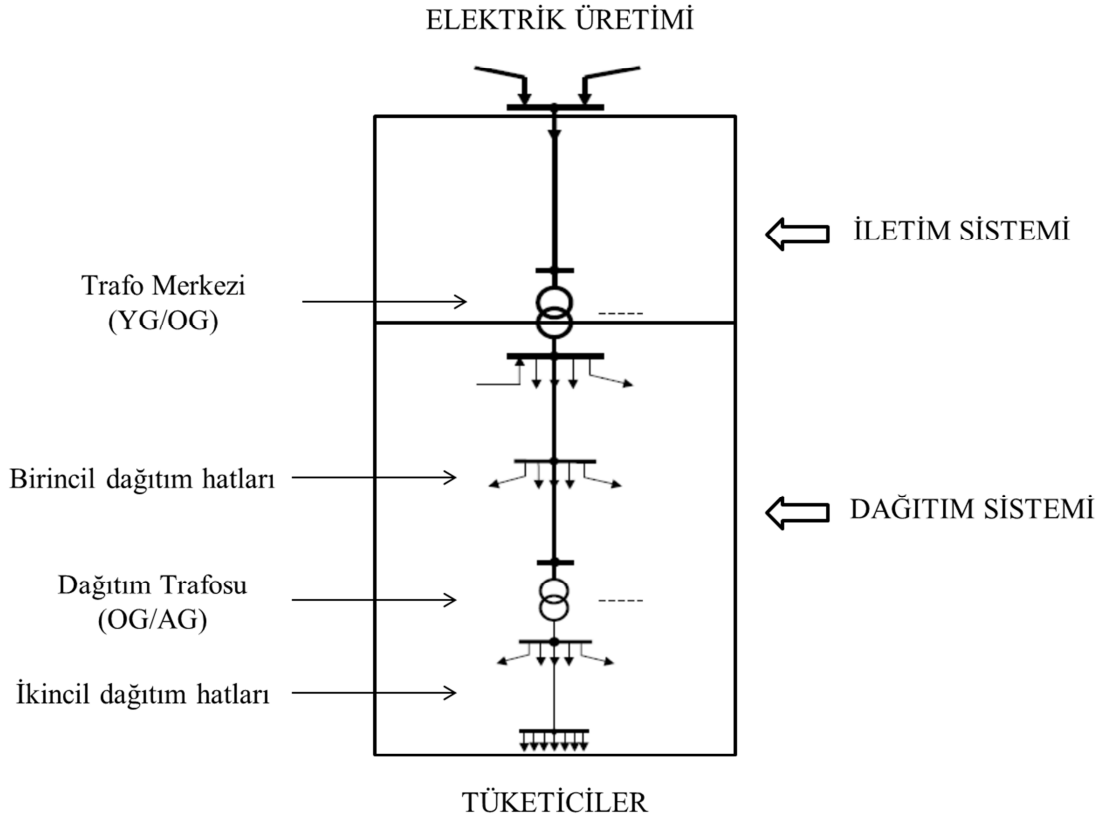
Bu tezde ele alınan problem, mevcut elektrik dağıtım sistemlerinin gelecekte ortaya çıkabilecek sorunlarına çözüm olabilmek amacı ile geliştirilmiş, sistemin tüm elemanlarının bütünleşik bir yapı ile ele alındığı, yeni bir sistem tasarımı problemi olması açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Bu tezde ilk defa tanımlanan bu problemin çözümü için iki matematiksel model önerilmiştir. Gerçek hayatta karşımıza çıkan daha büyük boyutlu problemlerin çözümü için ise çapraz entropi tabanlı iki yeni melez sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Ayrıca bu iki melez algoritmadan iyileştirme işlemleri ile iki yeni melez sezgisel algoritma daha türetilmiş ve matematiksel modellerin çözemediği bazı büyük boyutlu test problemlerinin hepsi için etkin sonuçlar elde edilmiştir.

Yukarıda verilen amaçlara ulaşmak için bu çalışma şu şekilde planlanmıştır; 2. bölümde, elektrik dağıtım sistemlerinin bileşenleri ve dağıtım sistemlerinde kullanılabilecek şebeke yapıları detaylı olarak tanımlanmış; dağıtım sistemlerinde dağıtık üretim yapısı ve özellikleri açıklanmıştır. Çalışmanın 3. bölümünde kaynak taraması, 4. bölümünde tez kapsamında ele alınan problemin detaylı tanımı ve probleme özgü varsayımlar ve özellikler verilmiştir. 5. bölümde tanımlanan probleme özgü olarak geliştirilmiş iki adet matematiksel model sunulmuş ve modellerin performansları üretilen test problemleri üzerinde incelenmiştir. 6 nolu bölümde, problem için geliştirilen 2 temel ve 2 türev olmak üzere dört yeni melez sezgisel algoritma sunulmuş ve bu algoritmaların performansları da aynı test problemleri üzerinde karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Son olarak 7. bölümde sonuç ve önerilere yer verilmiştir.

2. ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMLERİ

Günümüzde kullanılan geleneksel elektrik güç sistemleri, elektriğin ilk üretildiği noktadan en son kullanıldığı ana kadar üç temel aşamadan oluşur: üretim sistemi, iletim sistemi ve dağıtım sistemi. İkincil enerji türlerinden olan elektrik enerjisi, üretilebilmek için fosil yakıtlar ve yenilenebilir enerji kaynakları gibi birincil enerji kaynaklarına ihtiyaç duyar. Günümüzde dünya elektrik tüketiminin yaklaşık % 85'ini petrol, kömür, doğalgaz vb. fosil yakıtlar karşılarken, güneş, rüzgar, jeotermal gibi yenilenebilir kaynaklar yaklaşık %10'luk bir enerji girdisi sağlamaktadırlar (Satman, 2007). Mevcut durumda halen fosil yakıtlara bağımlı olan elektrik enerjisi üretim santralleri, ekonomik ve teknik nedenlerle geleneksel olarak üretim kaynaklarının yakınlarına kurulmuştur. Bunun sonucunda birbirinden uzak kalmış elektrik üretim santralleriyle tüketim merkezleri arasındaki bağlantı, farklı gerilim seviyelerindeki elektrik iletim ve dağıtım sistemleri ile sağlanmaktadır. Bir hatta gerilim ne kadar yüksek olursa, o hattın iletebileceği elektrik miktarı da o kadar yüksek olur. Ayrıca gerilim düzeyiyle elektriğin taşınması sırasında ortaya çıkan enerji kaybı ters orantılıdır.

Bu nedenle uzak mesafelerdeki üretim noktalarında üretilen büyük miktarlardaki elektrik, yüksek gerilim hatlarını içeren iletim sistemi ile şehir veya bölge girişlerine kadar taşınır. Burada, göreceli olarak iletim sistemine göre daha kısa mesafelere taşınacak olan yüksek gerilimdeki (YG) elektrik, dönüştürücü trafo merkezlerinde orta gerilime düşürülür (YG/OG) ve dağıtım sistemine ulaşır. Dağıtım şebekesi; Orta Gerilim (OG) seviyesi olarak bilinen birincil dağıtım ve Alçak Gerilim (AG) seviyesi olarak bilinen ikincil dağıtım şebekelerinden oluşmaktadır. Bu iki seviye birbirine dağıtım trafoları ile bağlanmaktadır. Trafo merkezinden OG seviyesinde gelen elektrik birincil dağıtım hatları ile hem sanayi bölgeleri gibi orta gerilim elektrik tüketicilerini hem de şehir içi, çevre ilçe ve köylerdeki dağıtım trafolarını besler. Dağıtım trafolarına orta gerilim düzeyinde gelen elektrik, bu trafolarında AG düzeyine (kullanım) düşürülerek (OG/AG) konutlara ve iş mekanlarına ikincil dağıtım hatları ile dağıtılır. Elektrik dağıtım sistemleri farklı gerilim seviyelerinin farklı seviyeleri gösterdiği hiyerarşik bir yapı göstermektedir. Şekil 2.1'de elektrik iletim ve dağıtım şebekesinin hiyerarşik yapısı görülmektedir. Elektrik üretim tesislerinin son tüketicilere uzak konumlandırıldığı bu yapı, aynı zamanda 'merkezi üretim sistemi' olarak adlandırılır.



Şekil 2.1. Elektrik güç sistemlerinin hiyerarşik yapısı (Arion, Cojocari ve Bejan, 2003)

2.1. Dağıtım Sisteminin Bileşenleri

Şekil 2.1’de görüldüğü gibi dağıtım sistemi genel anlamda; trafo merkezi ile tüketim noktaları arasında kalan kısım olup, aşağıda açıklanan dört temel bölümden oluşmaktadır:

- Trafo merkezleri (YG/OG): Trafo merkezleri iletim ile dağıtım sistemlerinin bağlantı noktası olarak görev yaparlar. İletim sisteminden gelen 154 kV ve 380 kV elektriği indirgeyerek fabrikaları, tramvay gibi kent içi ulaşım sistemlerini, kent içi dağıtım, aydınlatma ve sinyalizasyon şebekesini beslerler. Trafo merkezleri açık havada veya kapalı bir yerde kurulabilirler. Yaklaşık olarak 60 kV ’tan büyük gerilimli trafo merkezlerinin açık havada kurulması uygun olmaktadır (Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi [TEDAŞ], 2010: 17).
- Birincil dağıtım hatları (OG hatları): Birincil dağıtım hatları trafo merkezinden OG elektrik kullanıcılarına ve dağıtım trafolarına güç taşıyan hatlardır. Modern sistemlerde genellikle açık arazide uzun havai hatlar, yerleşim yerlerinde ise yeraltı hatlar

kullanılır. Türkiye için en sık görülen birincil dağıtım hattı voltaj seviyesi 34,5 kV olmasına rağmen bazı sistemlerde 6,3 kV, 10,5 kV ve 15 kV birincil dağıtım hatları da mevcuttur. Bir hat, hattın voltaj seviyesi ve hat boyutlarına bağlı olarak 2 MVA'den 30 MVA'ye kadar dağıtım yapabilir (Özay, Güven, Türeli ve Demiroğlu, 1993).

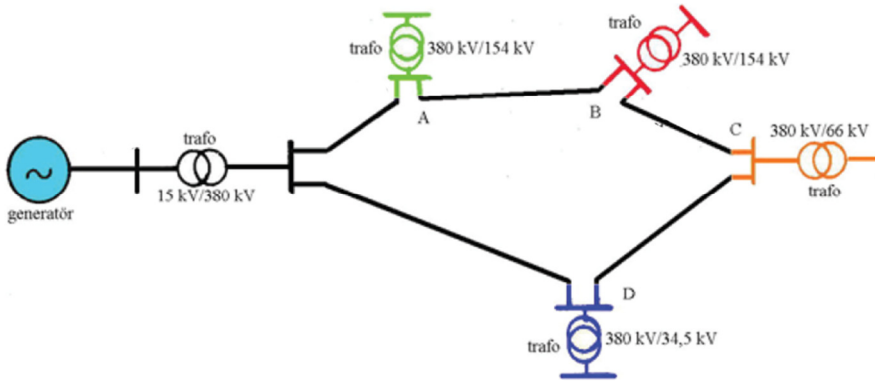
- Dağıtım trafoları (OG/AG): Dağıtım trafoları birincil voltaj seviyesini kullanım için gerekli olan voltaj seviyesine indirgerler. Türkiye güç sisteminde dağıtım trafoları 34,5 kV ile son kullanıcı voltaj seviyesi 220 V ve 380 V arasındaki bağlantı noktasıdır. Dağıtım trafolarının güçleri 25 kVA'dan 3200 kVA'ya kadar değişebilir (Bitim, 2012). Dağıtım trafolarının soğutma durumuna göre, kuru tip ve yağlı tip olmak üzere iki temel çeşidi vardır. Kuru tip trafolar, manyetik devresi ve sargıları yalıtkan bir sıvıyla doldurulmamış olan trafolardır. Bakımları kolaydır. Arızaları oldukları yerlerde giderilebilir. Yağlı tip trafoların bakımı uzun zaman alır ama bakım yapma sayısı azdır. Ancak bakım maliyeti yüksektir.
- İkincil dağıtım hatları (AG hatları): İkincil dağıtım hatları, dağıtım trafoları ile beslenen ve son kullanıcı voltaj seviyesinde elektrik taşıyan hatlardır. Genellikle her dağıtım trafosuna küçük bir dallı şebeke bağlıdır. Şebeke üzerindeki kullanıcılar bu dağıtım trafosundan beslenirler. Şehirlerde dağıtım trafolarından çıkan ikincil dağıtım hatları dağıtım kutularından binalardaki tüketicilere ait sayaç panolarına bağlanır.

Dolayısıyla dağıtım sistemleri; birincil dağıtım şebekesi (trafo merkezleri ve birincil dağıtım hatları) ve ikincil dağıtım şebekesi (Dağıtım trafoları, tüketicileri besleyen ikincil dağıtım hatları) olmak üzere iki alt şebeke ile tanımlanabilir (Tripathy, Prasad, Malik ve Hope, 1982).

2.2. Dağıtım Sistemlerinde Şebeke Yapıları

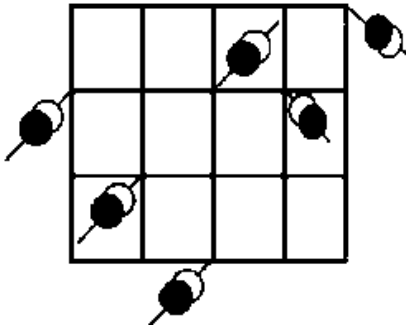
Dağıtım şebekelerinin kurulmasında şebeke tipinin seçimi güvenli, kesintisiz ve ekonomik elektrik dağıtımını açısından önemlidir. Bu özelliklerdeki dağıtımını yerine getirebilmek için değişik şebeke sistemleri geliştirilmiştir. Dağıtım şekillerine göre en uygun olan ve kullanılan şebeke sistemleri temel olarak iki ana gruba ayrılır. Bunlar;

- Açık şebekeler,
- Kapalı şebekelerdir.



Şekil 2.3. Halka şebeke örneği (Elektroforum teknik paylaşım platformu, 2014)

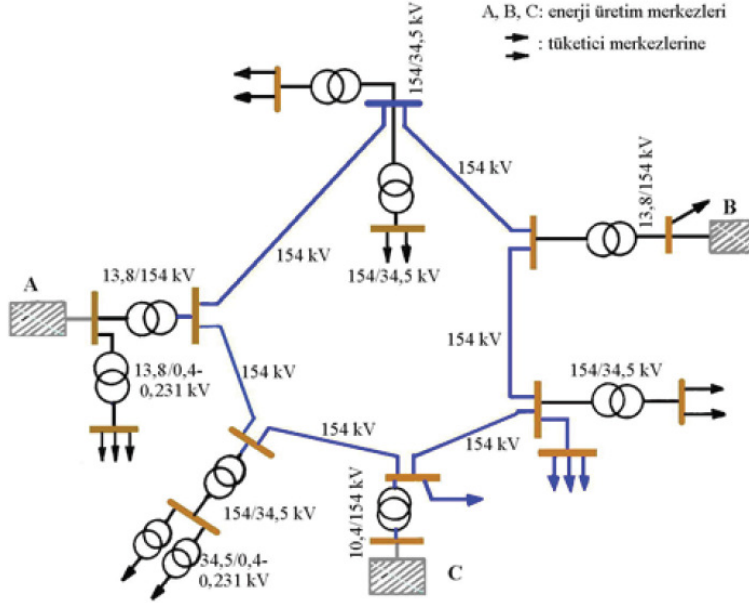
Gözlü şebeke (Ağ şebeke): Beslemenin birden fazla trafo ile yapıldığı ve alıcıları besleyen hatların bir ağ gibi örülerek, gözlerin oluşturulduğu şebeke tipine gözlü (ağ) şebeke denir (Şekil 2.4). Gözlü şebekelerde, halka şebekeler gibi beslemenin sürekli yapılabildiği, arızanın sadece arıza olan yeri etkilediği bir sistemdir (Tosun, 2007). Gözlü şebekeler arıza durumunda en az kullanıcının elektrik kesintisine maruz kaldığı şebekelerdir. Gözlü şebekelerin kesintisiz enerji alınması, gerilim düşümünün çok az oluşu avantajları arasında gösterilirken kurulum, işletim ve bakımlarının zor olması dezavantajları arasında yer alabilir (Gönen ve Ramirez-Rosado, 1986).



Şekil 2.4. Birden fazla noktadan beslenen gözlü şebeke örneği (Elektroforum teknik paylaşım platformu, 2014)

Enterkonnekte şebeke: Şekil 2.5, kesintisiz enerji sağlamak amacı ile enerji santralleri ve iletim ve dağıtım şebekelerini birbirine bağlayan bir enterkonnekte sistemi göstermektedir. Bu sistemler elektrik mühendisliği alanında enterkonnekte şebekeler olarak isimlendirildiği için tezde de aynı terminoloji kullanılmıştır. Bu tip şebekelerde, o bölgedeki bütün elektrik üretim ve tüketim araçları büyük küçük ayrımı yapılmaksızın sisteme dahil edilmektedir. Enterkonnekte şebekenin kesintisiz elektrik sağlayabilme,

yüksek verim, ekonomik olması gibi avantajları vardır. Bununla birlikte kısa devre akımlarının yüksek oluşu ve sistemin kararlılığının sağlanmasının zor oluşu gibi sakıncaları vardır (Tosun, 2007).



Şekil 2.5. Enterkonnekte şebeke örneği (Elektroforum teknik paylaşım platformu, 2014)

2.3. Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Dağıtık Üretim

Enerji kaynaklarının yakınlarında kurulmuş büyük ölçekli üretim santrallerinin, yüksek gerilim iletim şebekesi ve orta ve alçak gerilim dağıtım şebekesi üzerinden tüketicileri beslemesi durumu olarak tanımlanabilen merkezi üretim sistemleri pasif sistemlerdir ve enerji, üretim noktasından tüketiciye doğru akmaktadır. Ancak son dönemlerde bu yapı, bazı nedenlerden dolayı değişmeye başlamıştır (Hadjsaid ve diğerleri, 1999).

Bu nedenler; sürekli artan elektrik enerjisi ihtiyacı ve var olan şebekenin ihtiyaca yeterli güvenilirlik aralığında cevap verememesi, coğrafik ve çevresel sınırlar, elektrik iletim ve dağıtım hattında oluşan yüksek kayıp oranlarının azaltılma zorunluluğu, yeniden yapılanma ihtiyacı ve küçük ölçekli üretim birimlerinin oluşumu olarak sıralanabilir.

Bu sebepler elektrik güç sistemlerinin yeni bir yapılanma ihtiyacı içinde olduğunu göstermektedir. Bu ve benzeri ihtiyaçlar doğrultusunda geleceğin elektrik güç sistemlerinin nasıl yapılacağı Çizelge 2.1'de özetlenmektedir. Buradan anlaşılacağı gibi gelecekte

merkezi üretimden dağıtık üretime ve doğru orantılı olarak pasif şebekelerden aktif şebekelere doğru bir değişim söz konusudur (Driesen ve Katiraei, 2008).

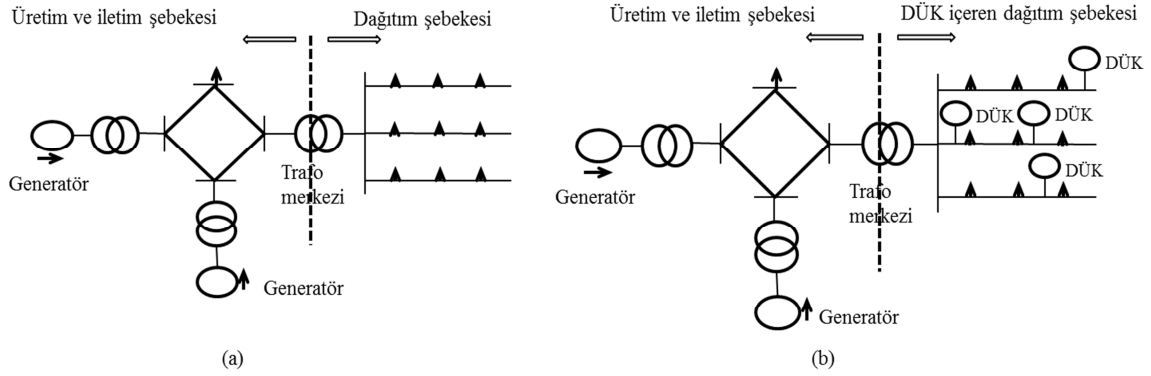
Çizelge 2.1. Geleceğin elektrik güç sistemlerinin gelişimi (Driesen ve Katiraei, 2008)

	Dün	Bugün	Yarın
Planlama	Geleneksel yaklaşım	Dağıtık enerji sistemleri	Mikro şebekeler
Üretim yapısı	Merkezi	Dağıtık	Dağıtık
DÜK entegrasyonu	Yedek üretim	Az/Orta Seviyede	Yüksek seviyede
Yükler	Farklılık gözetmez	Güç kalitesi gereksinimlerine dayalı yük sınıflandırılması	
Dağıtım şebekeleri	Pasif	Yarı aktif	Aktif

DÜK, düşük ya da orta gerilim seviyesinde, tüketici merkezlerine yakın, tek başına ya da elektrik dağıtım şebekesine bağlı çalışabilen küçük güçlü üretim birimleri olarak tanımlanabilir (Ackermann ve diğerleri, 2001). Bu kaynaklar, küçük güçlü hidro elektrik ya da doğalgaz santralleri olabileceği gibi, rüzgar, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları, yakıt pili ve enerji depolama birimleri de olabilirler. DÜK'ler literatürde farklı güç değerlerinde ele alınmıştır. Genel olarak birkaç watt ile 100 MW arasındaki küçük güçlü santraller olarak tanımlanırlar. Bu bağlamda DÜK'ler mikro (1-5 kW) , küçük (5 kW-5 MW), orta (5 MW-50 MW) ve büyük (>50 MW) olmak üzere farklı ölçekte dört grup olarak sınıflandırılabilir. Bir DÜK, küçük ya da orta ölçekli, süreksiz üretim, kendi başına olabilen ya da dağıtım şebekesine bağlanan, tüketim merkezlerine yakın ve tekrar dönüşüm imkanı olma gibi özelliklerden bir ya da birkaçına sahiptir (R. Ramakumar, 2012). Elektrik enerjisinin yerel olarak üretilip dağıtılması, ABD ve dünyanın Türkiye dahil başka bölgelerinde yaşanması olası, çok büyük bölgeleri etkileyen sistem çökmelerini azaltıcı yönde rol üstlenecektir. Bu yüzden Çizelge 2.1'de görüldüğü gibi DÜK'lerin gelecek üretim sistemleri içerisinde önemli bir yer alması kaçınılmazdır.

Şekil 2.6'da merkezi üretim sistemi ve dağıtık üretim sistemi görülmektedir. Dağıtık üretim sisteminin faydalarını teknik, ekonomik ve çevresel olarak 3 sınıfta tanımlamak mümkündür (Coster, Myrzik, Kruimer ve Kling, 2011). Teknik açıdan bakıldığında; DÜK'lerin tüketim noktalarına yakınlığı nedeni ile dağıtım şebekesinde elektriğin uzun mesafeler taşınmasından kaynaklanan kayıplar ve kayıp maliyetleri düşer, voltaj profilinde iyileşme gözlenir (Viral ve Khatod, 2012). Ayrıca dağıtık üretim sistemleri sistem güvenilirliğini artırır. Merkezi sistemlerde dağıtım şebekesinde oluşan arızalar, çok sayıda tüketicinin karanlıkta kalmasına yol açabilirler. Dağıtık üretimde ise, arızalanan bir sistem

çok daha az sayıda tüketiciyi etkiler. Merkezi dağıtım ve iletim sistemlerinin arızalanma olasılıkları, dağıtık üretim sistemlerine göre 10 ila 30 kat daha fazladır. Ekonomik açıdan bakıldığında, dağıtık üretim sistemlerinin kayıp ve kesinti maliyetleri üzerinde olumlu etkilerinin olması beklenmektedir. Merkezi üretim sistemlerinde tüketiciler tarafından ihtiyaç duyulan güvenlik ve güç kalitesini yakalamak çok yüksek maliyetli yatırımlar gerektirebilir. Buna karşılık dağıtık elektrik üretiminde istenen her güvenlik düzeyinin yakalanması için düşük marjinal maliyetli çözümler mevcuttur. Çevresel etkiler açısından değerlendirildiğinde ise dağıtık sistemlerde, birim enerji başına ortaya çıkan karbon salımı, doğalgaza dayalı kojenerasyonlu geleneksel sistemlere göre daha azdır (yeni kömür bazlı termik santrallere göre %40 daha az) ve fotovoltaik enerji gibi yenilenebilir enerjilerde ise sıfırdır. Ayrıca dağıtık üretim sistemleri sadece fosil yakıtlara bağımlı olan merkezi üretim sistemine göre çok daha çeşitli enerji kaynakları içerdiklerinden enerji verimliliği ve esneklik sağlarlar (Tan, Wang, Dichen ve Suxuan, 2012).



Şekil 2.6. (a) Merkezi üretim sistemi (b) Dağıtık üretim sistemi (Arsoy ve Perdahçı, 2010)

3. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Literatürde elektrik enerjisinin dağıtılması problemi ilk olarak Adams ve Laughton (1973) tarafından ele alınmıştır. Çalışmada, taleplerin dinamik olduğu ortamda trafo merkezlerinin yer seçimi ile ilgilenilmiş ve problem dinamik programlama yöntemi ile çözülmüştür. Dağıtım şebekelerinin planlanması ile ilgili ilk çalışma yine Adams ve Laughton (1974) tarafından yapılmış ve sadece birincil dağıtım şebekelerinin planlaması dikkate alınmıştır. İlerleyen yıllarda elektrik dağıtım problemi çeşitli araştırmacılar tarafından farklı şekillerde ele alınmıştır. Problem dağıtım sisteminin ele alınış biçimine, planlama dönemine veya dikkate alınan amaç fonksiyonları ve kısıtlara göre farklılaşmaktadır.

Araştırmacıların bazıları sadece dağıtım trafolarının yer seçimi ve kapasitelerinin belirlenmesi ile ilgilenirken (Adams ve Laughton, 1973; Masud, 1974, 1978; Crawford ve Holt, 1975; Afuso, Gerez ve Rodriguez, 1982; Adams, Afuso, Rodriguez ve Perez, 1984; Jovanovic, 2003), bir kısmı da sadece birincil veya ikincil dağıtım şebekelerinin rotalanması ile ilgilenmişlerdir (Adams ve Laughton, 1974; Dueire ve De Carvalho, 1996; Skrlec, Krajcar, Privicevic ve Blagajac, 1996; Tumazos, 1997; Gomez ve diğerleri, 2004; Cossi, Romero ve Mantovani, 2009).

Hem dağıtım trafolarını hem de dağıtım şebekelerinin rotalanmasını içeren çalışmalarda, çoğu araştırmacı dağıtım trafolarının yer seçimini yaparken sadece birincil veya ikincil dağıtım şebekesinden birinin rotalanmasını dikkate almışlardır (Wall, Thompson ve Northcote 1979; Thompson ve Wall, 1981; Gönen ve Foote, 1981; Sun, Farris, Cote, Shoults ve Chenn, 1982; Fawzi, Ali ve El-Sobki, 1983; El-Kadi, 1984; Chen ve Hsu, 1989; Hsu ve Chen, 1990; Nara, Satoh, Aoki ve Kitagawa, 1991; Nara ve diğerleri, 1992; Ramirez-Rosado ve Gönen, 1991; Miranda, 1994; Tang, 1996; Yahab, 1994; Peponis, 1997; Lin, 1998; Ramirez-Rosado ve Bernal-Agustin, 1998; Ramirez-Rosado ve Dominguez-Navarro ve Yusta-Loyo, 1999; Cannas ve Celli, 1999).

Literatürde yapılan çalışmalar incelendiğinde tez kapsamında ele alınan, DÜK içeren elektrik dağıtım sistemi planlamasını ele alan bir çalışmanın olmadığı görülmüştür. Bu nedenle izleyen sayfalarda, birincil ve ikincil dağıtım şebekesinin bir arada dikkate alındığı çalışmalar ve DÜK içeren dağıtım sistemleri ile ilgili çalışmalar ayrı ayrı verilmiştir.

3.1. Birincil ve İkincil Elektrik Dağıtım Şebekesi Planlaması Üzerine Çalışmalar

Az sayıda araştırmacı hem birincil hem de ikincil dağıtım şebekesinin bir arada planlaması üzerine çalışmıştır. Aoki, Nara, Satoh, Kitagawa ve Yamanaka (1990), dağıtım trafolarının yerleşim yerlerini kısıtlandırmışlardır. Bu basitleştirme varsayımı ile mümkün noktalarda yerel bir arama yaparak uygun çözümler elde etmişlerdir.

Carneiro, Franca ve Silveria (1996), problemi üç alt probleme ayırmıştır; (a) dağıtım trafo merkezlerinin yer seçimi (b) kaynak nokta ile dağıtım trafoları arasındaki birincil dağıtım şebekesinin tasarımı (c) dağıtım trafoları ile son kullanıcılar arasında ikincil dağıtım şebekesinin tasarımı. Alt problemler sırasıyla k-medyan problemi, en küçük yayılan ağaç problemi ve en kısa yol problemi olarak çözülmüştür.

Diaz-Dorado ve Miguez (2001), talep noktalarının sayısının az olduğu problemler için bir dinamik programlama yaklaşımı kullanmış ve daha sonra Diaz-Dorado ve Cidras (2003), ağaç yapılı popülasyonlar üzerinden çalışan bir iyileştirici sezgisel algoritma geliştirmiştir. Önerilen yöntemde her bir ağaç tek bir dağıtım trafosu içermekte ve ikincil dağıtım şebekeleri ile son kullanıcılara bağlanmaktadır. Elde edilen her bir ağaç ise birincil dağıtım hatları ile en küçük yayılan ağaç algoritması kullanılarak birbirine bağlanmaktadır.

Cossi, Romero ve Mantovani (2005), problemi iyileştirici bir sezgisel ile çözmeye çalışmış ve bazı ek elektriksel kısıtları dikkate almıştır. Paiva (2005), problemi alt problemlere ayırmadan bütünlük olarak çözmeye çalışmış ve karmaşık tamsayılı doğrusal bir matematiksel model önermiştir. Modelin çözümünde dal-sınır tekniğinden faydalanmışlardır.

Costa, Franca ve Filho (2011), problemi iki seviyeli ara merkezli dağıtım sistemi olarak tanımlamış ve karma tamsayılı doğrusal olmayan bir model önermişlerdir. Modelde birincil hatların değişken maliyetleri, ikincil hatların ise yatırım maliyetleri göz ardı edilmiştir. Problemin çözümü için 3 yöntem önerilmiştir. İlkinde dal-kesme algoritması uygulanmış ve bu yöntemle sadece küçük boyutlu problemler çözülebilmştir. İkinci yöntemde ayrıştırma yaklaşımı kullanılarak problem alt problemlere bölünmüş, dağıtım trafolarının yer seçimi ve ikincil dağıtım şebekelerinin tasarımı k-medyan problemi olarak tanımlanmış, birincil dağıtım şebekelerinin tasarımı ise Steiner ağaç problemi olarak

çözölmeye çalışılmıştır. Son yaklaşımda ise ikinci yaklaşımdan elde edilen sonuçlar ile matematiksel modelin değışken sayısı azaltılmaya çalışılmış ve melez bir çözüm yöntemi önerilmiştir.

3.2. DÜK İçeren Çalışmalar

Literatürde çeşitli çalışmalarda DÜK'lerin şebeke üzerindeki faydaları farklı yaklaşımlarla değerlendirilmiştir. Diaz-Dorado, Cidras ve Miguez (2002), orta gerilim şebekesi için farklı tipteki şebeke konfigürasyonlarına (halka, enterkonnekte) DÜK entegrasyonu için bir eniyileme algoritması önermişler, yatırım ve kayıp maliyetlerini en küçüklerken hatların kapasiteleri ve voltaj düşüklüğünü kısıt olarak almışlardır.

Mardaneh ve Gharehpetian (2004), mevcut bir dağıtım sisteminde DÜK'lerin yerleşim yerlerini ve büyüklüklerini bulmaya çalışmışlar ve aktif ve reaktif güç üretim maliyetini en küçükmeye çalışmışlardır. Celli, Ghaiani, Mocci ve Pilo (2005), mevcut dağıtım sisteminde DÜK'lerin en uygun yerinin ve büyüklüğünün belirlenmesi için Genetik Algoritma (GA) tabanlı çok amaçlı bir algoritma önermişlerdir. Çalışmada şebekedeki güç kayıp ve hat kesintilerinin maliyetlerini ana amaç fonksiyonu olarak dikkate almışlardır.

Acharya, Mahat ve Mithulananthan (2006), DÜK'lerin en uygun yerinin ve kapasitelerinin belirlendiği bir sezgisel yaklaşım önermişlerdir. Çalışmada hat kayıplarının en küçükleme amaçlanmaktadır ve DÜK'ler için farklı atama noktaları denenerek en iyi yer seçilmektedir. Algoritma yer seçimi için etkin olmasına rağmen büyük boyutlu problemler için çok fazla bilgisayar zamanı harcamaktadır.

GA tabanlı bir algoritma, en iyi güç akışı (OPF) hesaplaması ile DÜK ataması problemini çözmek için Silvestri, Berizzi ve Buonanno (1999) tarafından önerilmiştir. Haesen ve diğerleri (2005), DÜK'lerin en uygun yerini bulabilmek için GA-OPF melez bir yaklaşım önermişlerdir.

Jabr ve Pal (2009), DÜK'lerin yerleşim yerlerinin ve kapasitelerinin belirlenirken, hat kayıplarının en küçükleme ve DÜK kapasitesinin en büyükleme bir eniyileme algoritması geliştirmişlerdir.

Ouyang, Cheng, Zhang ve Yao (2010), DÜK içeren orta gerilim dağıtım şebekesi planlaması için bir metot önermişlerdir. Önerilen matematiksel model iki seviyeli programlamaya dönüştürülmüştür. Üst seviyede şebekenin eniyilenmesi problemi, alt seviyede ise aday DÜK'lerin kapasitelerinin belirlenmesi problemi yer almaktadır. Araştırmacılar problemi şebeke teorisiyle birleştirilmiş bir GA algoritması ile çözmüşlerdir.

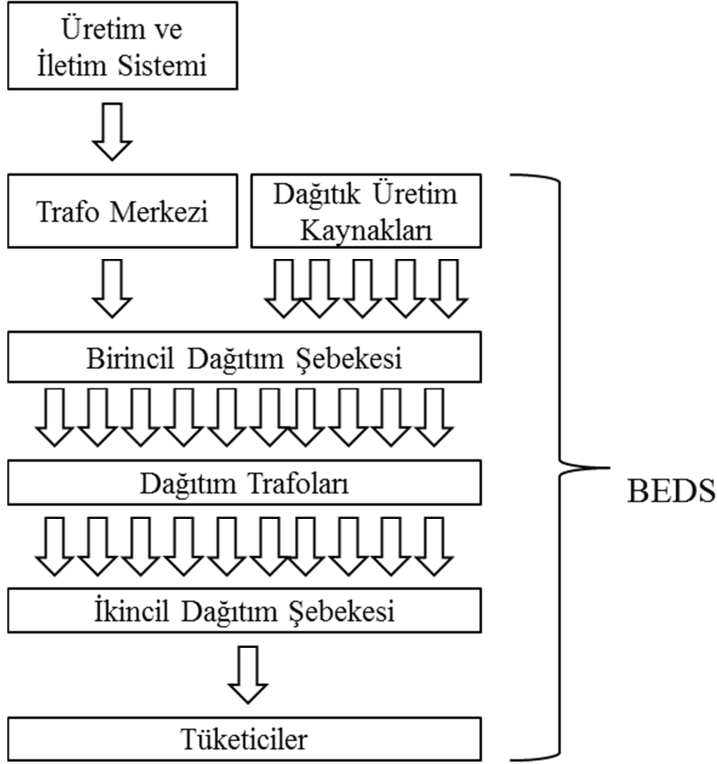
Bu tez kapsamında ele alınan problem hem birincil ve ikincil dağıtım şebekesinin planlanmasını hem de DÜK'lerin şebekeye entegrasyonunu bir arada dikkate aldığı için literatürde ilk defa tanımlanan bir problem tipidir. DÜK'lerin yakın gelecekte üretim sistemleri içinde yaygınlaşacağı görünen bir gerçek olduğuna göre, problemin bu tezde tanımlandığı şekilde ele alınması, dağıtık sistemlere geçişte ve yeni tasarımlar yapılırken karşılaşılan problemi çözecek olması açısından büyük bir ihtiyaca cevap verecektir.

4. BÜTÜNLEŞİK ELEKTRİK DAĞITIM SİSTEMİ TASARIMI

Bu bölümde BEDS tasarımı probleminin tanımını detaylı olarak yapılacaktır.

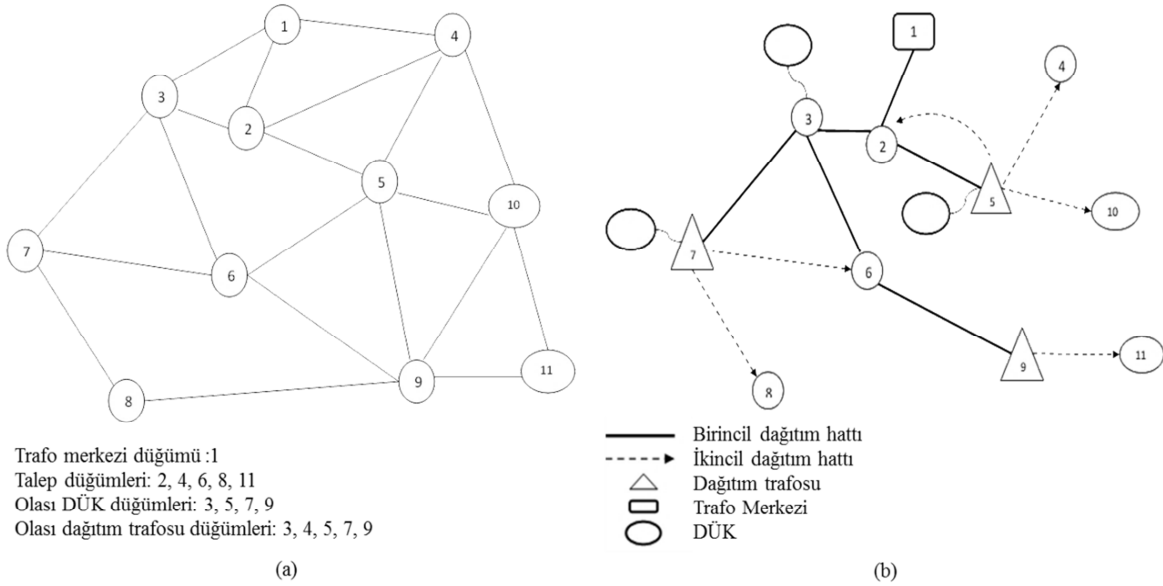
4.1. Problemin Tanımı

DÜK içeren bir elektrik dağıtım sistemini, sistemin bütün elemanlarını bir arada dikkate alarak tasarlamayı amaçlayan BEDS tasarımı problemi son dönemlerde elektrik güç sistemlerinde meydana gelen kaçınılmaz değişim ihtiyacı göz önüne alındığında önemli bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Geleceğin sistemleri olarak görülen akıllı şebekelere geçişte önemli bir adım olan dağıtık üretim ve kontrol edilebilir küçük ölçekli dağıtım şebekeleri tasarlanması konuları üzerinde son dönemlerde hızla artan çalışmalar da BEDS tasarımı probleminin önemini desteklemektedir. Ele alınan dağıtım sisteminin elemanları yüksek gerilimi (YG) orta gerilime dönüştüren indirici trafo merkezi, birincil dağıtım hatları (OG hatları), orta gerilimi alçak gerilime dönüştüren dağıtım trafoları ve ikincil dağıtım hatlarıdır (AG hatları). Ayrıca merkezi üretim sisteminde yer almayan DÜK'ler de bu çalışmada dağıtım sisteminin bir elemanı olarak dikkate alınacaktır. DÜK içeren dağıtım sisteminin tüm temel elemanlarının birlikte dikkate alınması nedeni ile bu sisteme "Bütünleşik Elektrik Dağıtım Sistemi (BEDS)" tanımlaması yapılmıştır. BEDS'in elemanları Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. BEDS elemanları

BEDS tasarımı probleminin ana amacı, tüketicilerin enerji ihtiyacını teknik ve çevresel kısıtları sağlayacak şekilde en ekonomik olarak karşılayan sistem tasarımını yapmaktır. BEDS tasarımı problemi için bir başlangıç şebekesi ve olası bir çözüm Şekil 4.2.'de verilmektedir.

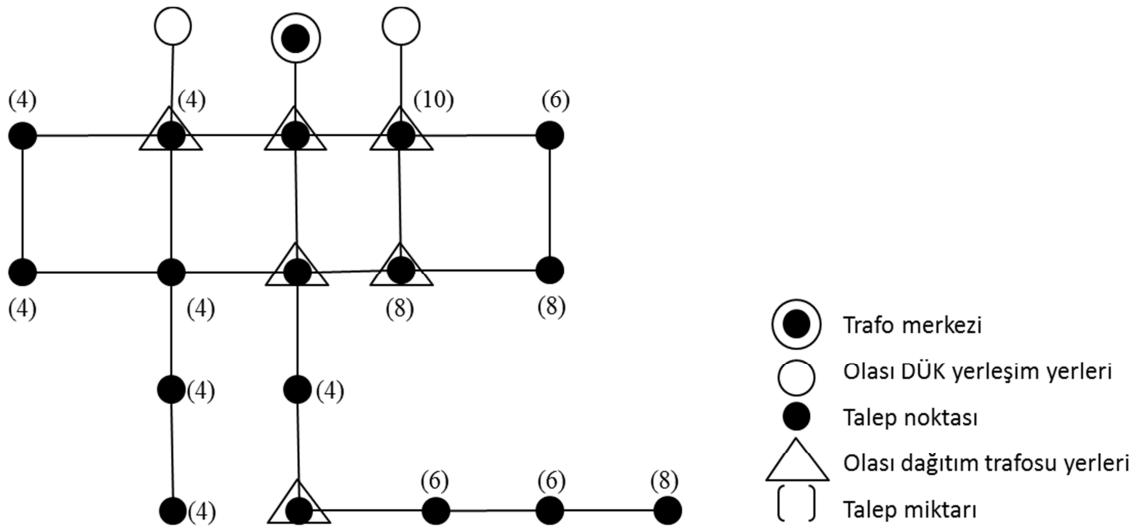


Şekil 4.2. (a) Başlangıç şebekesi (b) BEDS için olası bir çözüm

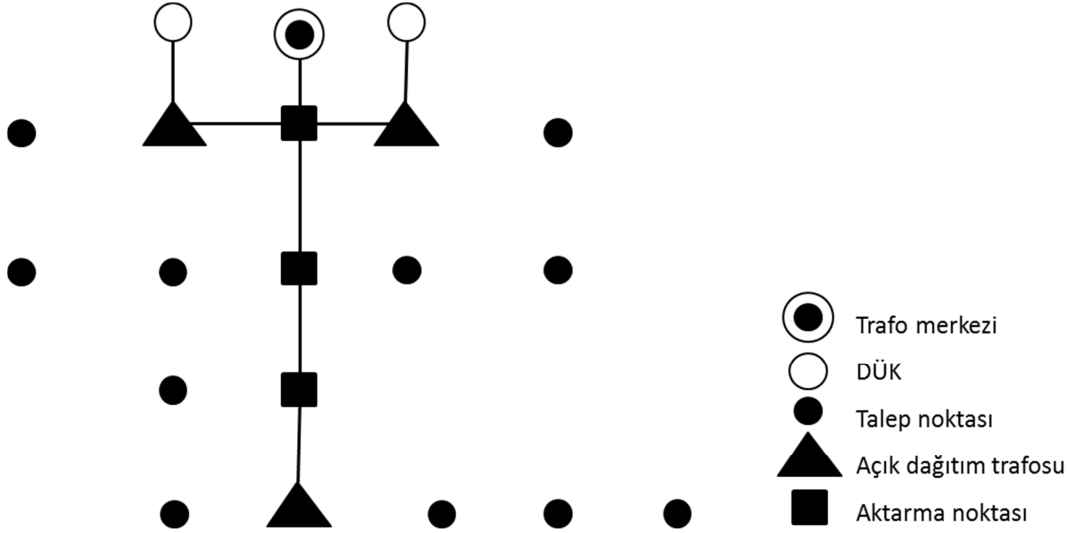
BEDS tasarımı problemi;

- Trafo merkezinin kapasitesinin belirlenmesi,
 - DÜK lerin yerleşim yerlerinin ve kapasitelerinin belirlenmesi,
 - Dağıtım trafolarının yerleşim yerleri ve kapasitelerinin belirlenmesi,
 - Birincil dağıtım şebekelerinin rotalanması,
 - İkincil dağıtım şebekelerinin rotalanması
- alt problemlerini içermektedir.

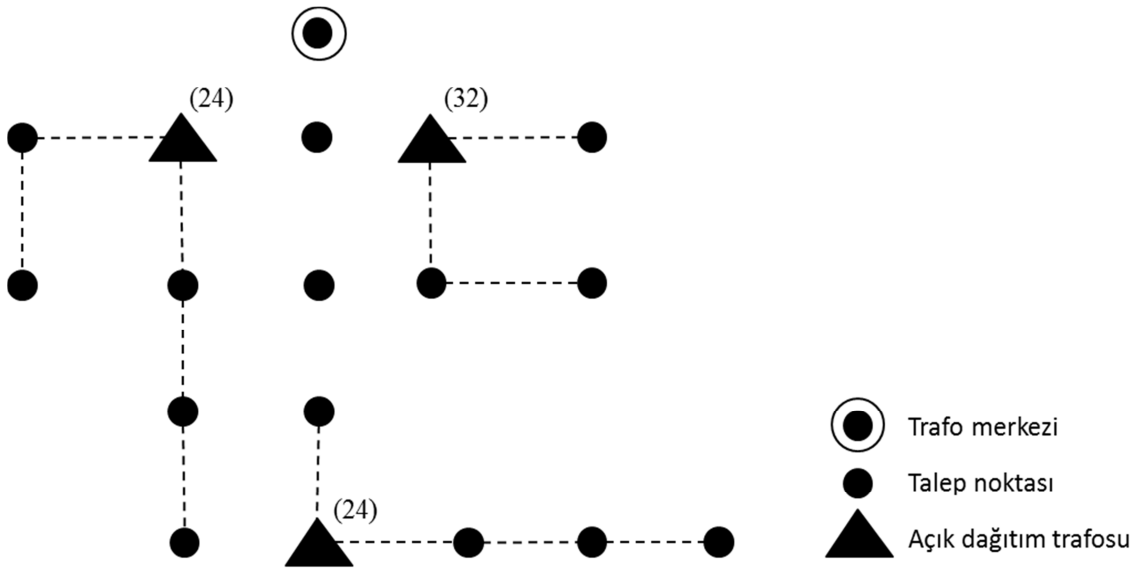
Bu alt problemlerin şematik olarak gösterimi Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te sıralı olarak verilmiştir. Sistemde kaynak nokta indirici trafo merkezidir. Trafo merkezi iletim sistemi ile dağıtım sistemi arasında bağlantı noktası olarak görev yapmakta ve ihtiyaç duyulan enerjiyi iletim sisteminden çekmektedir. Şekil 4.3'te örnek başlangıç dağıtım şebekesi verilmektedir. Şebeke üzerinde bağlantılar, mümkün dağıtım yollarını göstermektedir. Şekil 4.4'te dağıtım trafolarının yerleri ve birincil dağıtım şebekesi, Şekil 4.5'te ise ikincil dağıtım şebekesi verilmiştir. Birincil ve ikincil dağıtım şebekeleri dallı şebeke yapısındadır.



Şekil 4.3. Başlangıç dağıtım şebekesi (Costa ve diğerleri (2011)'de verilen şekilden esinlenilmiştir.)



Şekil 4.4. Birincil dağıtım şebekesi (Costa ve diğerleri (2011)'de verilen şekilden esinlenilmiştir.)



Şekil 4.5. İkincil dağıtım şebekesi (Costa ve diğerleri (2011)'de verilen şekilden esinlenilmiştir.)

Şekil 4.3-4.5'te verilen alt problemlerin çözümü ile belirli bir bölgenin elektrik talebini karşılamak için DÜK'lerin birincil dağıtım şebekesini beslediği bütünleşik bir dağıtım sistemi tasarımı yapılmaktadır. Birincil dağıtım şebekesine bağlanacak DÜK'lerin olası yerlerinin ve her bir mümkün noktaya kurulabilecek DÜK çeşidinin önceden bilindiği varsayılmıştır. Bu tasarımla oluşturulan dağıtık üretim sistemi ile elektriğin tüketiciye yakın üretimi ile kayıpların azaltılması, kaynakların etkin kullanılması, toplam yatırım maliyetlerin azaltılması ve güvenilirliğin artırılması hedeflenmektedir.

4.2. Problemin Özellikleri

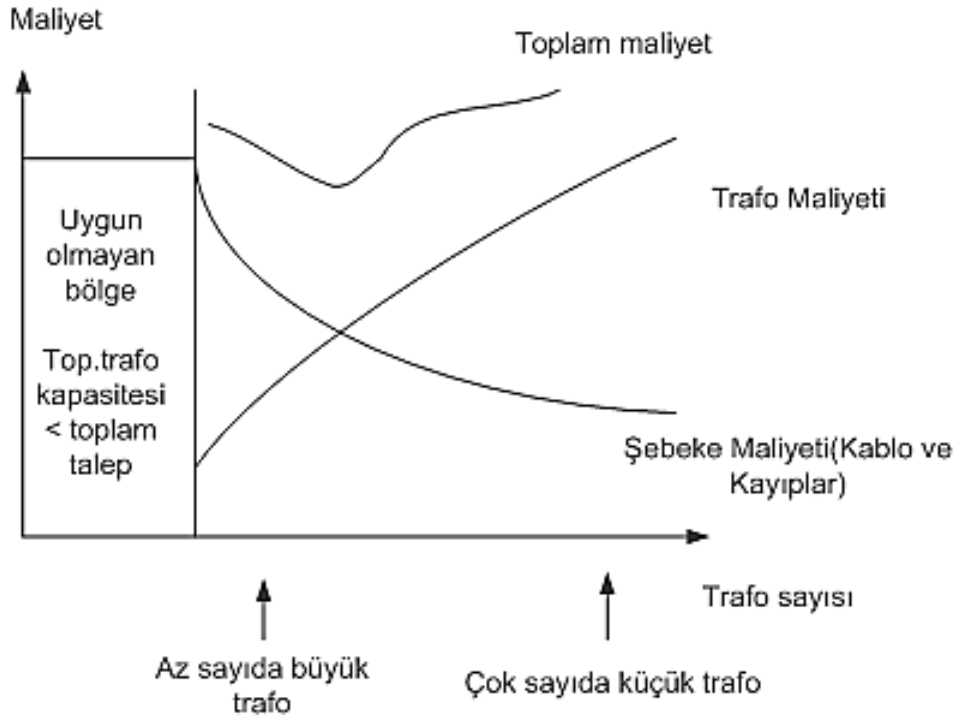
BEDS tasarımı probleminin varsayımları ve özellikleri aşağıda açıklanmıştır:

- Trafo merkezi şebekeye sadece birincil dağıtım şebekesi ile bağlanabilir.
- Talep noktaları şebekeye sadece ikincil dağıtım şebekesi ile bağlanabilir.
- Birincil dağıtım şebekesi ancak maliyetli ve kapasiteli bir noktada (dağıtım trafolarının kurulabileceği noktalar) ikincil dağıtım şebekesine dönüştürülebilir.
- DÜK'ler yalnızca birincil dağıtım şebekesine bağlanabilir.
- DÜK'lerin kurulabileceği noktalar, çeşitleri ve maliyetleri bilinmektedir.
- Dağıtım trafolarının kurulabileceği noktalar, çeşitleri ve maliyetleri bilinmektedir.
- Trafo merkezinin yeri sabit ve belirlidir, trafo merkezi çeşitleri ve maliyetleri bilinmektedir.
- Birincil ve ikincil dağıtım şebekesi dallı yapıdadır.

Bu problemde dağıtım trafolarının yer seçimi anahtar rol oynamaktadır. Dağıtım trafoları için dikkate alınan kapasite maliyet ilişkisi Çizelge 4.1'de verilmiştir. Çizelgede verilen dağıtım trafoları maliyet/kapasite oranına bakıldığında, yüksek kapasiteli trafo çeşitlerinde bu oranın daha düşük olduğu görülmektedir (Costa ve diğerleri, 2011). Buna göre yüksek kapasiteli az sayıda dağıtım trafosu kullanmak daha az maliyetli gibi görünmektedir. Ancak burada dikkat edilmesi gereken nokta dağıtım trafo sayısıdır. Dağıtım trafo sayısı az olduğunda ikincil dağıtım hatları uzun olmakta ve bu da kayıp maliyetlerini artırmaktadır. Bu nedenle bu iki durumu da göz ardı etmeden en iyi dağıtım trafo sayısı belirlenmelidir. Şekil 4.6'da dağıtım trafosu kapasite ve maliyet ilişkisi verilmiştir.

Çizelge 4.1. Trafo maliyet/kapasite oranı örneği (Costa ve diğerleri (2011)'de verilen değerlerden uyarlanmıştır.)

Kapasite (kVA)	Maliyet (TL)	Maliyet/Kapasite (TL/kVA)
10	250	25,00
20	375	18,75
40	500	12,50
50	580	11,60
80	845	10,56
120	1156	9,63



Şekil 4.6. Trafo sayısı ve maliyet ilişkisi (Costa ve diğerleri, 2011)

Bir sonraki bölümde problem için geliştirilen matematiksel modeller verilmektedir.

5. BEDS TSARIMI PROBLEMİ İÇİN KESİN ÇÖZÜM MODELLERİ

BEDS tasarımı probleminin genel tanımına bakıldığında, ana problemin yer seçimi ve şebeke tasarımı alt problemlerini bir arada içerdiği görülmektedir. Problem karmaşıklığı, talep düğümleri, dağıtım trafoları ve DÜK'ler için aday düğüm sayılarının artması ile hızla artacaktır. BEDS tasarımı probleminin özellikle büyük boyuttaki test problemlerini çözebilmek için etkin çözüm yöntemleri geliştirilmesi gereklidir.

Bu bölümde BEDS tasarımı problemi için ilki düğüm tabanlı diğeri akış tabanlı olmak üzere iki matematiksel model önerilmiştir. Bu modeller, $O(|N|^2)$ karmaşıklığında 0-1 karar değişkeni ve $O(|N|^2)$ karmaşıklığında kısıta sahiptir. Düğüm tabanlı model Costa ve diğerleri (2011) tarafından geliştirilen modelin BEDS'e uyarlanması ile elde edilmiştir. Akış tabanlı model geliştirilirken öncelikle Bardossy ve Raghavan (2010)'da tanımlanan yaklaşımdan esinlenerek düğüm ayrıştırma tekniği (DAT) olarak isimlendirilen bir şebeke dönüştürme tekniği tanımlanmıştır. Daha sonra DAT tekniğine dayalı akış tabanlı model geliştirilmiştir. Geliştirilen iki model de amaç fonksiyonunda doğrusal olmayan maliyet yapısı içerdiklerinden parçalı doğrusallaştırma yöntemi ile doğrusallaştırılarak çözülmüşlerdir.

5.1. Düğüm Tabanlı Doğrusal Olmayan Matematiksel Model

Bu bölümde tanımlanan BEDS tasarımı problemi için önerilen düğüm tabanlı matematiksel model verilmiştir.

Tanım kümeleri ve indisler:

- N düğümler kümesi, $N = \{1, \dots, n\}$; ($N = N_R \cup N_D \cup N_T$; $N_R = 1$: Trafo merkezi düğümü, N_D : Talep düğümleri, N_T : talep içermeyen düğümler, P_{DT} : dağıtım trafoları düğümleri ($P_{DT} \in (N_D \cup N_T)$), P_{DG} : DÜK düğümleri ($P_{DG} \in N_T$), N_A : aktarma düğümleri ($N_A \in N_T$)),
- A yönlü ayrıtlar kümesi, $A = \{(i, j): i, j \in N, i \neq j\}$,
- E trafo merkezi (YG/OG) çeşitleri kümesi, $E = \{1, \dots, e\}$,
- K dağıtım trafosu (OG/AG) çeşitleri kümesi, $K = \{1, \dots, k\}$,

D DÜK çeşitleri kümesi, $D = \{1, \dots, d\}$,

i, j kullanılan alt indisler.

Parametreler:

C_b	enerjiyi iletim şebekesinden satın alma maliyeti (TL/MW),
l_{ij}	i . düğümden j . düğüme uzaklık (km),
C_{pn}	km başına birincil dağıtım ağı kurulum maliyeti (TL/km),
C_{sn}	km başına ikincil dağıtım ağı kurulum maliyeti (TL/km),
CLP	birincil dağıtım ağında oluşan kayıp maliyeti (TL/(MW) ² km),
CLS	ikincil dağıtım ağında oluşan kayıp maliyeti (TL/(MW) ² km),
CT^k	k tipi dağıtım trafosunun kurulum maliyeti, $k \in K$, (TL),
CTS^e	e tipi dağıtım trafosunun kurulum maliyeti, $e \in E$, (TL),
CDG^d	d tipi DÜK'ün kurulum maliyeti, $d \in D$, (TL),
PTS^e	e tipi trafo merkezinin kapasitesi, $e \in E$, (MW),
PT^k	k tipi dağıtım trafosunun kapasitesi, $k \in K$, (MW),
PDG^d	d tipi DÜK'ün kapasitesi, $d \in D$, (MW),
d_i	i . düğümün talebi (MW),
PP_{max}	birincil dağıtım ağında oluşabilecek en büyük akış kapasitesi (MW),
PS_{max}	ikincil dağıtım ağında oluşabilecek en büyük akış kapasitesi (MW).

Karar Değişkenleri:

WP_{ij}	$\begin{cases} 1 & (i, j) \text{ ayrıtı birincil dağıtım ağı üzerindeyse} \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$
WS_{ij}	$\begin{cases} 1 & (i, j) \text{ ayrıtı ikincil dağıtım ağı üzerindeyse} \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$
Y_i^k	$\begin{cases} 1 & i. \text{ düğüme } k \text{ tipi dağıtım trafosu kuruluyorsa} \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$
YS_1^k	$\begin{cases} 1 & 1. \text{ düğüme } e \text{ tipi trafo merkezi kuruluyorsa} \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$

$$YD_i^d \quad \begin{cases} 1 & i. \text{ düğüm} \text{ } k \text{ tipi dağıtım trafosu kuruluyorsa} \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$$

PP_{ij} $i. \text{ düğüm} \text{ } j. \text{ düğüm} \text{ } \text{ birincil dağıtım ağında taşınacak yük miktarı (MW)}$

PS_{ij} $i. \text{ düğüm} \text{ } j. \text{ düğüm} \text{ } \text{ ikincil dağıtım ağında taşınacak yük miktarı (MW)}$

P_b $\text{iletim şebekesinden çekilen enerji miktarı (MW)}$

Düğüm tabanlı doğrusal olmayan model:

$$\sum_{j \in N} (PP_{ji} + PS_{ji}) - \sum_{j \in N} (PP_{ij} + PS_{ij}) = \begin{cases} -P_b & i = 1 \\ d_i - \sum_{d \in D} YD_i^d PDG^d & i \neq 1 \end{cases} \quad \forall i \in N \quad (5.1)$$

$$-\sum_{d \in D} YD_i^d PDG^d \leq \sum_{j \in N} PP_{ji} - \sum_{j \in N} PP_{ij} \leq \sum_{k \in K} PT^k Y_i^k - \sum_{d \in D} YD_i^d PDG^d \quad \forall i \in N, i \neq 1 \quad (5.2)$$

$$-d_i \leq \sum_{j \in N} PS_{ij} - \sum_{j \in N} PS_{ji} \leq \sum_{k \in K} PT^k Y_i^k - d_i \quad \forall i \in N, i \neq 1 \quad (5.3)$$

$$0 \leq \sum_{j \in N} PP_{ij} \leq \sum_{e \in E} PTS^e YS_1^e \quad i = 1 \quad (5.4)$$

$$\sum_{k \in K} Y_i^k \leq 1 \quad \forall i \in N, i \neq 1 \quad (5.5)$$

$$\sum_{e \in E} YS_1^e \leq 1 \quad (5.6)$$

$$P_b = \sum_{i \in N_D} d_i - \sum_{i \in P_{DG}} \sum_{d \in D} YD_i^d PDG^d \quad (5.7)$$

$$PP_{ij} \leq PP_{max} WP_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.8)$$

$$PS_{ij} \leq PS_{max} WS_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.9)$$

$$WP_{ij} + WP_{ji} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.10)$$

$$WS_{ij} + WS_{ji} \leq 1 \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.11)$$

$$\sum_{j \in N} WP_{ji} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (5.12)$$

$$\sum_{j \in N} WS_{ji} + \sum_{k \in K} Y_i^k \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (5.13)$$

$$PP_{ij} \geq 0, \quad PS_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A \quad (5.14)$$

$$WP_{ij} \in \{0,1\}, \quad WS_{ij} \in \{0,1\}, \quad YS_1^e \in \{0,1\}, \quad Y_i^k \in \{0,1\}, \quad YD_i^d \in \{0,1\} \quad (5.15)$$

Kısıtları altında

$$\begin{aligned}
Z = \text{Enküçük} & \sum_{(i,j) \in A} C_{pn} l_{ij} WP_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} CLP l_{ij} (PP_{ij})^2 + \sum_{(i,j) \in A} C_{sn} l_{ij} WS_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} CLS l_{ij} (PS_{ij})^2 \\
& + \sum_{e \in E} CTS^e YS_1^e + \sum_{k \in K} \sum_{i \in P_{DT}} CT^k Y_i^k + \sum_{d \in D} \sum_{i \in P_{DG}} CDG^d YD_i^d + C_b P_b
\end{aligned} \tag{5.16}$$

Eş. 5.1 akış kısıtıdır, şebeke içinde her noktaya giren yük, o noktadan çıkan yüklerin toplamına eşit olmalıdır. Eğer düğüme ait bir talep varsa, düğüme giren yükler ile çıkan yükler arasındaki farka düğümdeki DÜK kapasitesi eklendiğinde sonuç o düğümün talebini verir. Eş. 5.2 ve Eş. 5.3’de verilen eşitsizlikler dağıtım trafolarının ve DÜK’lerin kapasite kısıtlarıdır. Eş. 5.4 trafo merkezinin kapasite kısıtıdır. Eş. 5.5 ve Eş. 5.6 kısıtlar sırası ile bir düğüme yalnız bir çeşit dağıtım trafosu ve yalnız bir çeşit trafo merkezi atanabileceğini gösterir. Eş. 5.7 üst iletim şebekesinden çekilecek enerji miktarını gösterir. Bu miktar toplam talep ile kurulacak DÜK’lerin toplam kapasiteleri farkına eşittir. Eş. 5.8 ve Eş. 5.9 birincil ve ikincil dağıtım hatlarının kapasite kısıtlarını sağlarlar. Eş. 5.10 ve Eş. 5.11 numaralı kısıtlar yük akışının sadece tek yönlü olmasını sağlar, geri dönmeyi yasaklar. Eş. 5.12 ve Eş. 5.13 numaralı kısıtlar sırasıyla birincil ve ikincil dağıtım şebekesi için dallı şebeke kısıtlarıdır. Aynı dağıtım şebekesinde bir düğüme girişin sadece bir tane olması dallı şebeke oluşmasını sağlar. Eş. 5.14 numaralı kısıt yük miktarının negatif olmasını engeller ve Eş. 5.15 numaralı kısıt ise 0-1 karar değişkenlerini göstermektedir.

Amaç fonksiyonu, birincil ve ikincil hatlar, iletim şebekesine bağlantıyı sağlayan trafo merkezi, birincil hatları ikincil hatlara bağlayan dağıtım trafoları ve DÜK’ler için yıllık kurulum maliyetlerini içeren sabit maliyetler, birincil ve ikincil hatta elektriğin taşınması sırasında oluşacak kaybın yıllık maliyeti ve enerjiyi üst şebekeden almanın maliyetini kapsayan değişken maliyetlerin toplamından oluşur.

Modelde CLP, CLS değerleri sırasıyla birincil ve ikincil dağıtım hattında elektriğin taşınması sırasında km başına uğradığı kaybın yıllık maliyetidir. Bu sayı Eş. 5.17’de verilen formülle hesaplanabilir (Ponnaivaikko, Prakasa ve Venkata, 1987). Bu duruma göre;

$$\text{Kayıp Maliyeti} = \frac{8,76R}{(KV)^2} C_e LLF \tag{5.17}$$

KV	hattın elektrik voltajı (KV),
C_e	enerji taşıma maliyeti (TL/MWh),
R	hattın direnci (ohm/km),
LLF	kayıp yük faktörü

olarak verilmektedir. Formülden görüldüğü gibi hattın gerilim düzeyi düştükçe kayıp maliyeti artacaktır. Diğer bir deyişle ikincil hatlarda elektriğin taşınması sırasında oluşan kayıp maliyetleri, birincil hatlara oranla daha fazladır.

Yukarıda verilen çözüm süresi ve hesaplama karmaşıklığı, modelde kullanılan değişkenlerin ve kısıtların sayısına bağlı olarak değişmektedir. Değişken ve kısıt sayısı arttıkça modelin çözüm süresi de artmaktadır. Buna göre modelin çözüm süresini etkileyecek değişkenlerin ve kısıtların indislere bağlı olarak değerleri Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Düğüm tabanlı model için hesaplama karmaşıklığı analizi

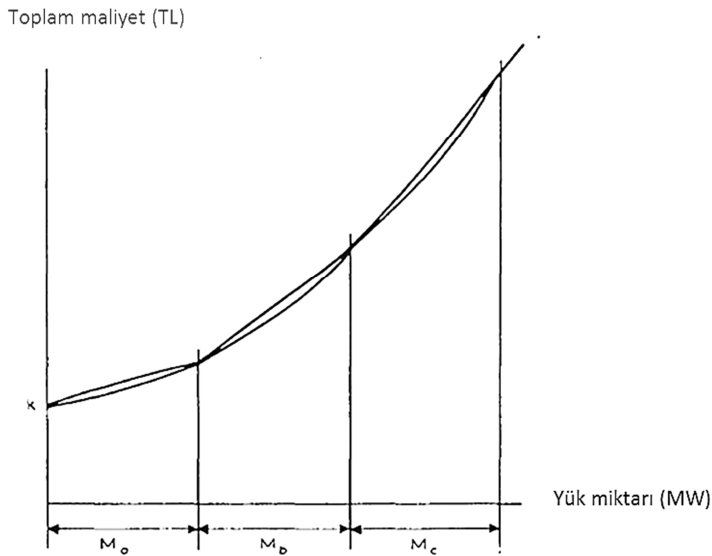
Değişkenler	i	A (ayrıt sayısı)	k	e	d	Toplam değişken sayısı
WP		A				A
WS		A				A
Y	i		k			ik
YS				e		e
YD	i				d	id
Toplam İkili Değişken						2A+ik+id+e
PP		A				A
PS		A				A
Toplam Pozitif Değişken						2A
Kısıtlar						Toplam kısıt sayısı
(5.1)	i					i
(5.2)	i-1					i-1
(5.3)	i-1					i-1
(5.4)	1					1
(5.5)	i-1					i-1
(5.6)						1
(5.7)						1
(5.8)		A				A
(5.9)		A				A
(5.10)		A				A
(5.11)		A				A
(5.12)	i					i
(5.13)	i					i
Toplam kısıt sayısı						4A+6i

Çizelge 5.1’de görüldüğü gibi problemin karmaşıklığı düğüm ve ayrıt sayısına bağlı olarak artmaktadır. Örneğin 10 düğümlü 20 ayrıtlı bir şebekede toplam kısıt sayısı 140 iken, 300 düğümlü 600 ayrıtlı bir şebekede toplam kısıt sayısı 4200 olarak hesaplanmaktadır. Bu bilgiden modelin büyük boyutlu problemleri çözmede zorlanacağı görülmektedir.

5.2. Doğrusallaştırılmış Düğüm Tabanlı Matematiksel Model

BEDS tasarımı problemi için önerilen matematiksel modele bakıldığında amaç fonksiyonun doğrusal olmadığı görülmektedir. Doğrusallığı bozan hatlarda oluşan kayıp maliyeti fonksiyonudur. Hatların toplam maliyet fonksiyonu Şekil 5.1’de verilmiştir (Adams ve Laughton, 1974). Hatlarda yük taşınırken oluşan kaybın maliyeti doğrusal olmayan konveks bir yapıdadır ve hattan geçen gerilimin karesi ile orantılıdır. Literatürde çoğu araştırmacı bu tip konveks yapıdaki fonksiyonları parçalı doğrusallaştırma (piecewise linearization) yöntemi kullanarak doğrusallaştırarak problemi çözmüşlerdir (Ramirez-Rosado ve diğerleri, 1999; Gomez ve diğerleri, 2004; Cossi ve diğerleri, 2005, 2009; Costa ve diğerleri, 2011). Bu çalışmada da amaç fonksiyonu bu yöntemle doğrusallaştırılmıştır.

Doğrusallaştırılmış model ve ek karar değişkenleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.1. Dağıtım hatlarının toplam maliyet fonksiyonu

Ek karar değişkenleri:

- a_m birincil hatların maliyet fonksiyonunda m. aralığındaki yük değeri (MW),
 b_p ikincil hatların maliyet fonksiyonunda p. aralığındaki yük değeri (MW),
 γ_{ijm} birincil (i,j) hattından geçen yükün m. aralıktaki oranı,
 α_{ijp} ikincil (i,j) hattından geçen yükün p. aralıktaki oranı.

Düğüm tabanlı doğrusallaştırılmış model (DTDM):

Eş. 5.1-15 ve

$$PP_{ij} = \sum_{m \in M} a_m \gamma_{ijm} \quad \forall (i,j) \in A \quad (5.18)$$

$$PS_{ij} = \sum_{p \in P} b_p \alpha_{ijp} \quad \forall (i,j) \in A \quad (5.19)$$

$$\sum_{m \in M} \gamma_{ijm} = 1 \quad \forall (i,j) \in A \quad (5.20)$$

$$\sum_{p \in P} \alpha_{ijp} = 1 \quad \forall (i,j) \in A \quad (5.21)$$

$$\gamma_{ijm} \geq 0, \alpha_{ijp} \geq 0 \quad (5.22)$$

Kısıtları altında

$$\begin{aligned} Z = \text{Enküçük} & \sum_{(i,j) \in A} C_{pn} l_{ij} WP_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{m \in M} CLP l_{ij} a_m^2 \gamma_{ijm} + \sum_{(i,j) \in A} C_{sn} l_{ij} WS_{ij} \\ & + \sum_{(i,j) \in A} \sum_{p \in P} CLS l_{ij} b_p^2 \alpha_{ijp} + \sum_{e \in E} CTS^e YS_1^e \\ & + \sum_{k \in K} \sum_{i \in P_{DT}} CT^k Y_i^k + \sum_{d \in D} \sum_{i \in P_{DG}} CDG^d YD_i^d + C_b P_b \end{aligned} \quad (5.23)$$

Yukarıdaki formülasyonda Eş. 5.18 ve Eş. 5.19 sırasıyla birincil ve ikincil hatlar üzerindeki yük miktarlarını parçalı doğrusallaştırılma ile göstermektedir. Eş. 5.20 birincil (i,j) hattı üzerindeki yük miktarının her bir k aralığındaki yük oranının toplamının 1 olmasını sağlar. Eş. 5.21 aynı koşulu ikincil hatlar için p aralık sayısını kullanarak garanti eder. Eş. 5.22 yeni pozitif değişkenleri gösterirken son olarak Eş. 5.23 parçalı doğrusallaştırma yöntemi ile doğrusallaştırılmış yeni amaç fonksiyonunu göstermektedir.

5.3.1. Düğüm ayrıştırma tekniği

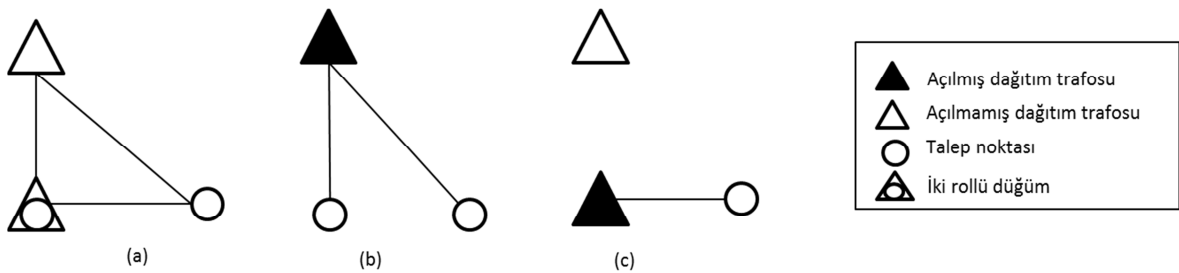
BEDS tasarımı problemi için uygun bir çözümün yapısına bakıldığında dikkat çeken bir unsur birincil ve ikincil Şebekelerin bazı durumlarda ortak rotaları paylaşmasıdır. Aynı iki düğüm arasında hem birincil hem de ikincil dağıtım hattının bulunabilmesi düğümlerin iki rollü olması nedeni ile oluşmaktadır. Şekil 5.4'te iki rollü düğüm  rneği verilmektedir. Daha genel bir tanımla iki rollü bir düğüm aynı anda birden çok düğüm kümesinde yer almaktadır. Örneğin; bir aktarma düğümü talep içerdiği için talep düğümleri kümesinde yer alabilirken, dağıtım trafosu için olası yerleşim yerleri arasında olan bir düğüm aynı zamanda talep içerdiği için talep düğümleri kümesinde olabilir. İki düğüm arasında birincil ve ikincil Şebekenin ortak rotasının bulunabilmesi için iki düğümden en az birinin iki rollü olması gerekir. İki rollü düğümler BEDS tasarımı probleminin tanımında verilen küme tanımlamalarından hareketle aşağıda açıklanmıştır.

Durum 1. $P_{DT} \in (N_D \cup N_T)$ iken, $N_D \neq \emptyset$ ve $P_{DT} \in N_D$ ise iki rollü düğüm, dağıtım trafosu ile talep düğümüdür.

Durum 2. $P_{DT} \in (N_D \cup N_T)$ ve $N_A \in N_T$ iken, $P_{DT} \cap N_A \neq \emptyset$ ise iki rollü düğüm, dağıtım trafosu ile aktarma düğümüdür.

Durum 3. $P_{DT} \in (N_D \cup N_T)$ ve $P_{DG} \in N_T$ iken, $P_{DT} \cap P_{DG} \neq \emptyset$ ise iki rollü düğüm, dağıtım trafosu ile D K'tür.

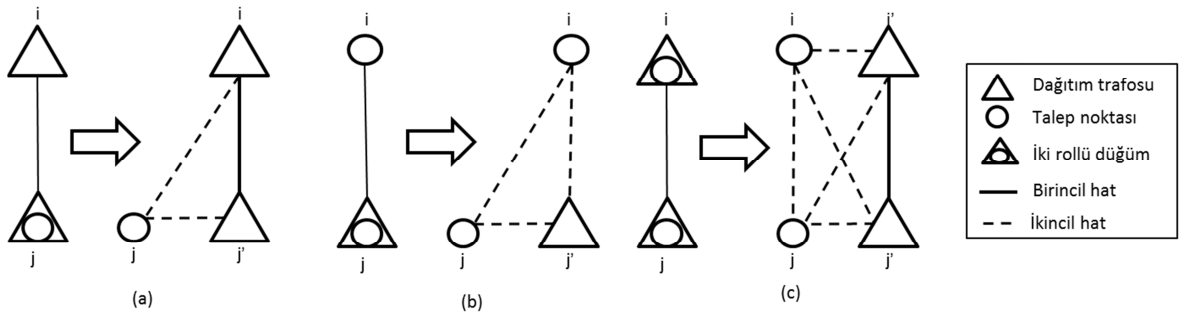
Durum 4. $P_{DG} \in N_T$ ve $N_A \in N_T$ iken, $P_{DG} \cap N_A \neq \emptyset$ ise, iki rollü düğüm, D K ile aktarma düğümüdür.



Şekil 5.4. İki rollü düğüm  rneği (a) başlangıç durumu (b) dağıtım trafosunun tek rollü düğümde açıldığı durumu (c) dağıtım trafosunun iki rollü düğümde açıldığı durumu (Bardossy ve Raghavan (2010)'dan uyarlanmıştır.)

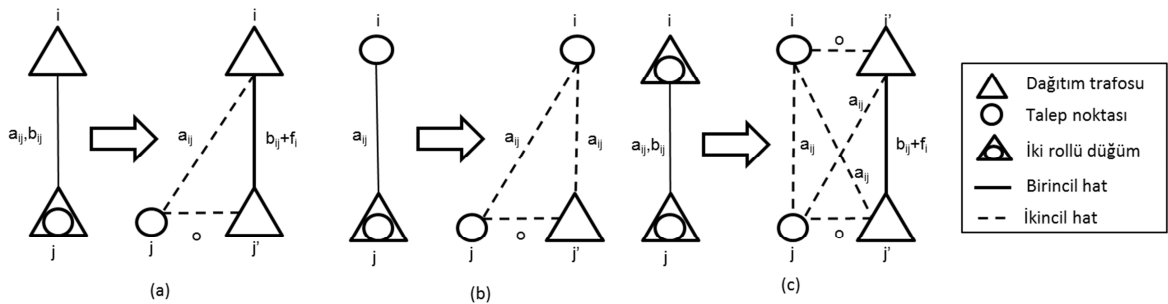
Bu çalışmada  nerilen DAT, iki rollü düğümlerin rollerinin birbirinden ayrılarak tek rollü düğümlere dönüştürülmesi esasına dayanmaktadır. Bu yöntemin temel prensibi Bardossy

ve Raghavan (2010)'da bağılı tesis yer seçimi problemi için tanımlanmıştır. Yöntemin BEDS tasarımı problemine özgü yeni tasarımı ile, yeni iki rollü düğümler ve bunlarla ilişkili yeni ayrıştırma prosedürleri tanımlanmıştır. Ayrıca farklı kapasite tiplerindeki tesislerin yer seçimi de Gisela (2010)'dakinden farklı olarak bu çalışmada dahil edilmiştir. Bu tezde BEDS tasarımı problemi için, DAT ile bir şebekedeki tüm iki rollü düğümler rollerine göre ayrıştırılmış ve ikinci roller için sanal düğümler oluşturulmuştur. Ayrıştırma işleminden sonra her bir düğümün sadece tek bir rolü olduğu için düğüm kümeleri arasında bir kesişim kalmamaktadır. İki rollü düğümlerin ayrışmasına bağılı olarak bu düğümler arasındaki iki rollü ayrıtlar da ayrışmaktadır. Hangi düğümler arasında hangi ayrıtların bulunacağı problemin tanımında verilen problem özelliklerinden yola çıkılarak bulunmaktadır. Örneğin bir talep düğümü, sadece ikincil dağıtım ağı ile şebekeye bağlanabildiği için sadece dağıtım trafoları ya da diğer talep düğümleriyle ve sadece ikincil dağıtım hatları ile ilişkilendirilebilirler. Aynı şekilde bir dağıtım trafosu, birincil dağıtım hatları ile aktarma noktası ve diğer dağıtım trafolarından gelen ayrıtlarla şebekeye bağlanabilirler. Aktarma noktaları da dağıtım trafoları gibi, sadece diğer aktarma noktalarından yada dağıtım trafolarından birincil dağıtım hatları ile şebekeye bağlanabilirler. DÜK'ler sadece birincil dağıtım şebekesine bağlanabildikleri için, düğüm ayrıştırma işleminden sonra yine sadece birincil dağıtım ağları ile şebeke bağlantısı sağlayabilirler. Şekil 5.5'te farklı iki rollü düğümler için ayrıştırma ve ayrıtların belirlenmesi örnekleri verilmektedir. Şekil 5.5 (a)'da i dağıtım trafosu düğümü, j düğümü ise hem dağıtım trafosu hem talep kümesine ait iki rollü bir düğümdür. Ayrıştırma işlemi sonucunda j , talep düğümü ve j' , dağıtım trafosu düğümü olmuştur. Bu durumda i ve j ; j ve j' arasında sadece ikincil hat kurulabilir. Aynı şekilde i ve j' arasında ise sadece birincil hat kurulabilir. Şekil 5.5 (b)'de i talep düğümü iken, j düğümü hem dağıtım trafosu hem talep kümesine ait iki rollü bir düğümdür. Ayrıştırma işlemi sonucunda i ve j ; i ve j' ; j ve j' arasında sadece ikincil hat kurulabilir. Şekil 5.5. (c)'de ise i ve j düğümlerinin her ikisi de hem dağıtım trafosu hem talep kümesine ait iki rollü düğümdür. Ayrıştırma işleminden sonra düğümlerin rollerine göre i ve j ; i ve j' ; i ve i' ; j ve i' ve j ve j' arasında sadece ikincil hat kurulabilirken i' ve j' arasında sadece birincil hat kurulabilir.



Şekil 5.5. İki rollü düğüm ayrıştırma ve ayrıt tipi belirleme örnekleri (Bardossy ve Raghavan (2010)'dan uyarlanmıştır.)

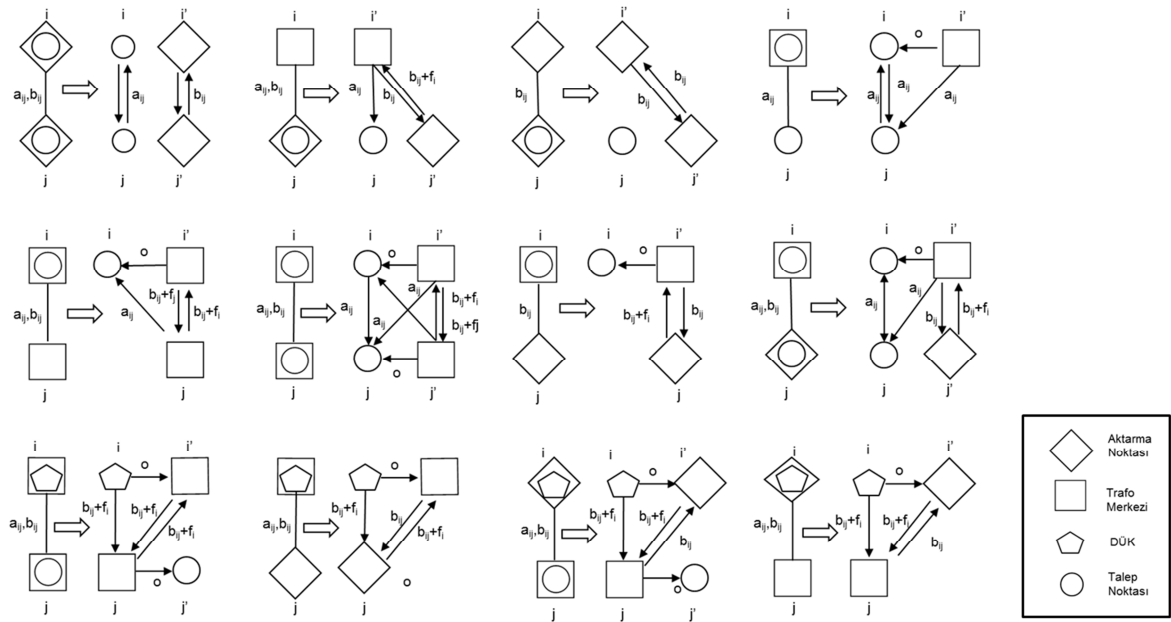
DAT ile şebeke dönüştürme yaparken bütün maliyetler düğümler üzerinden alınarak ayrıtlar üzerine atanmaktadır. Şekil 5.5'te düğüm ayrıştırma sonrasında ayrıtların nasıl belirlendiği verilmiştir. Buna göre her ayrıt tipi için kurulum ve kayıp maliyetleri ilgili ayrıt üzerinde tanımlanmaktadır. Dağıtım trafosu ya da DÜK gibi kurulum maliyeti içeren bir tesis maliyeti ise yine tesise giren ayrıtın üzerinde tanımlanmaktadır. Örneğin, bir dağıtım trafosuna giren ayrıtta o dağıtım trafosunun kurulum maliyeti, ayrıtın kurulum maliyeti ve kayıp maliyeti birlikte dikkate alınacaktır. Bir düğümün sanal kopyası ile kendisi arasında kurulan ayrıtın maliyeti de, aslında ayrıt sanal olduğu için "0" olacaktır. Şekil 5.6'da ayrıt maliyetlerinin nasıl atandığı aynı örnek üzerinde gösterilmektedir. Şekilde a_{ij} ; (i, j) ayrıtı üzerindeki ikincil dağıtım hattı kurulum ve kayıp maliyetini gösterirken b_{ij} ; (i, j) ayrıtı üzerindeki birincil dağıtım hattı kurulum ve kayıp maliyetini göstermektedir. f_i ; i . tesisin (örnekte dağıtım trafosu) kurulum maliyetidir.



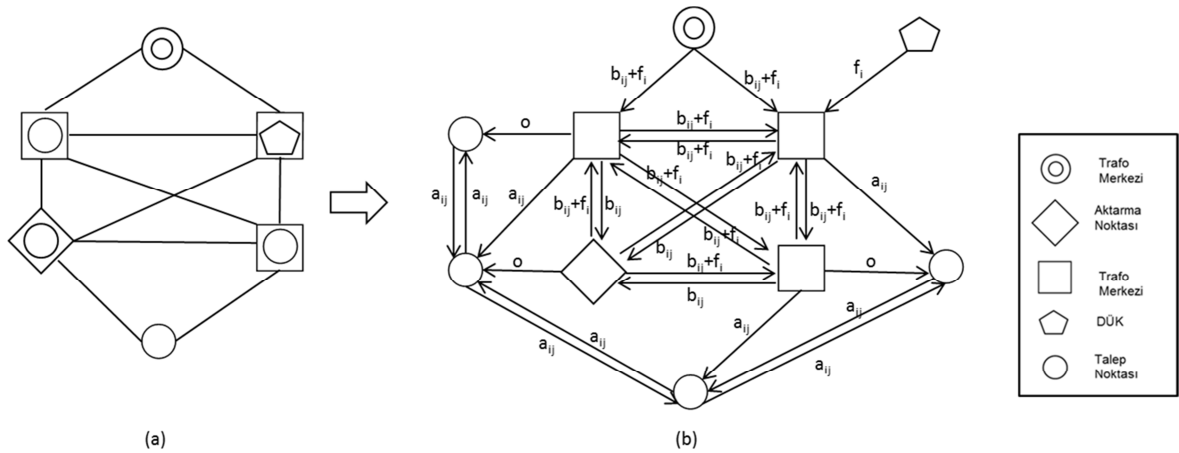
Şekil 5.6. İki rollü düğüm ayrıştırma ve ayrıt maliyeti atama örnekleri (Bardossy ve Raghavan (2010)'dan uyarlanmıştır.)

5.3.2. Düğüm ayrıştırma tekniği ile şebeke dönüştürme

Bir önceki bölümde detaylı olarak anlatılan DAT ile mevcut bir şebekenin nasıl dönüştürüleceğini göstermeden önce Şekil 5.7’de mevcut bir şebeke üzerinde oluşabilecek düğüm ayrıştırma durumlarını gösteren bir grafik verilmektedir. Bu ayrıştırma grafiği kullanılarak mevcut şebekenin dönüştürülmesi ise Şekil 5.8’de verilmektedir. Şekil 5.8 (a)’da mevcut şebeke ve Şekil 5.8 (b)’de ise dönüştürülmüş şebeke görülmektedir.



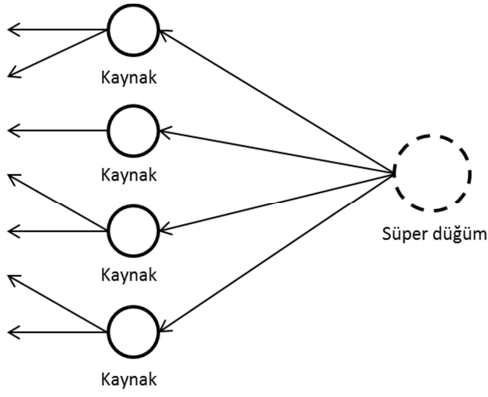
Şekil 5.7. Olası ayrıştırma durumları



Şekil 5.8. DAT ile şebeke dönüştürme (a) başlangıç şebeke (b) dönüştürülmüş şebeke

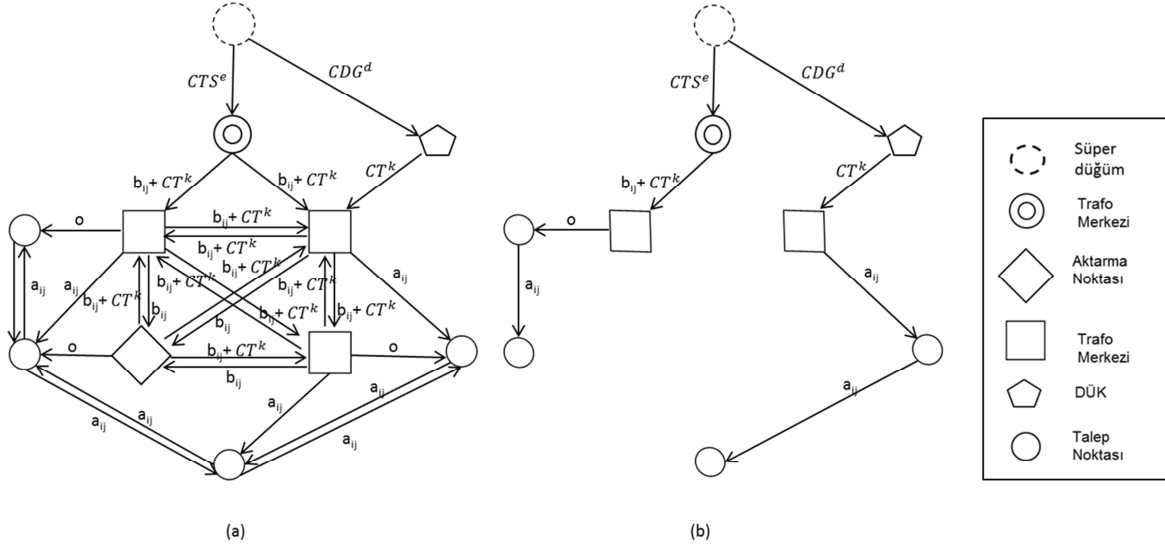
Şekil 5.8 (b) incelendiğinde, BEDS tasarımı problemi için bütün düğümlerin tek bir role

sahip olduğu ve kurulum ve kayıp gibi tüm maliyetlerin ayrıtlar üzerinde tanımlandığı yeni bir şebeke elde edildiği görülmektedir. Bu şebekede trafo merkezi ve DÜK farklı kaynak düğümleri olarak şebekeyi beslemektedir. Bu durumda çok kaynaklı şebeke tasarım problemi karşımıza çıkmaktadır. Matematiksel modele geçilmeden önce çok kaynaklı bu şebeke tasarım problemini tek kaynaklı duruma dönüştürmek için öncelikle kaynak düğümlerini birleştiren sanal bir süper düğüm yaratılmış ve süper düğümün kaynaklara giden ayrıtlara kaynakların kurulum maliyeti atanmıştır. DÜK'lere giren ayrıtlara ilgili DÜK'ün kurulum maliyeti, trafo merkezine giren ayrıta ise trafo merkezinin kurulum maliyeti atanmıştır. Şekil 5.9 süper düğüm ile çok kaynaklı şebekelerin tek kaynaklı şebekelere dönüştürülmesini göstermektedir.



Şekil 5.9. Süper düğüm ile çok kaynaklı şebekeyi tek kaynaklı şebekeye dönüştürme

Şekil 5.8 (b)'de verilen dönüştürülmüş şebekenin süper düğüm kullanarak tek kaynaklı şebeke haline dönüştürülmüş hali Şekil 5.10'da verilmiştir. Burada bir diğer önemli nokta ise ayrıtlar üzerine eklenen kurulum maliyetleridir. Bilindiği gibi trafo merkezlerinde ve dağıtım trafolarında farklı kapasitelerde tesisler tanımlanmaktadır. Farklı kapasitelere göre tesis kurulum maliyetleri de farklılık göstermektedir. Kurulum maliyetleri ayrıtlar üzerinde gösterilirken tesis tipi kadar farklı maliyet alternatifleri de gösterilmelidir. Şekil 5.10'da verilen dönüştürülmüş şebekede ayrıtlar üzerindeki kurulum maliyetleri farklı tesis tiplerine göre özelleştirilmiştir.



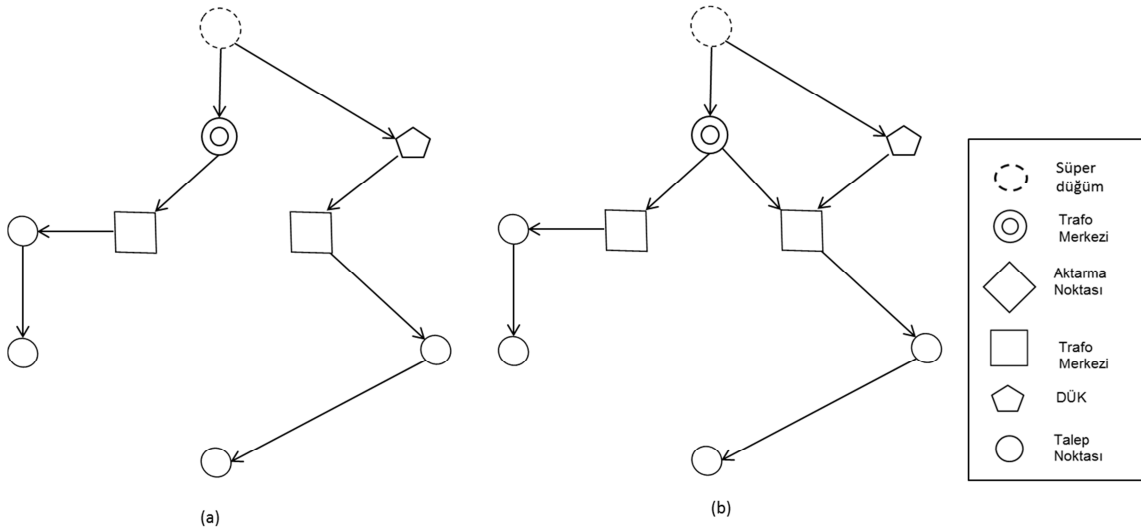
Şekil 5.11. (a) Dönüştürülmüş başlangıç şebeke (b) Olası bir çözüm

5.3.3. Matematiksel model

Dönüştürülmüş şebekede problemi yapısal olarak incelediğimizde, çok kaynaklı, kapasite kısıtlı, doğrusal olmayan akış maliyetli şebeke tasarım problemi olarak tanımlayabiliriz. Bu problem literatürde daha önce bu şekli ile ele alınmamış olsa da en küçük yayılan ağaç/Steiner ağaç ya da en küçük maliyetli şebeke akış problemi ile benzerlikler göstermektedir. En küçük yayılan ağaç ya da Steiner ağaç problemlerinden farkı taleplerin birim değerlerden farklı değerler almasıdır. Bu nedenle son çözümde elde edilecek şebeke, talep değerlerini karşılayabilir olmalıdır. Aynı zamanda ayrıt kapasiteleri ve ayrıt üzerinde taşınan yük miktarına doğrusal olmayan bir yapı ile bağlı olan kayıp maliyetleri vardır. En küçük maliyetli akış probleminden farklı olması da çözüm şebekesinin ağaç yapıda olması zorunluluğudur. Ancak problemin çok kaynaklı olması bazı özel durumlar oluşturmaktadır. Bir düğüm birden çok kaynaktan beslenebilir ancak şebekenin geri kalanı dallı yapıda olmak zorundadır. Şekil 5.12’de iki farklı çözüm ile bu durum açıklanmaktadır. Şekil 5.12 (a) ve (b) deki çözümlerin her ikisi de mümkün çözümdür. Şekil 5.12 (b) deki bir düğümün birden fazla kaynaktan beslenmesi orijinal şebekenin dallı yapısını bozmamaktadır. Bunun nedeni DÜK’ün bağlandığı ayrıtın sanal ayrıt olmasıdır. Aslında DÜK ile bağlı olduğu düğüm aynı konumdadır. Dağıtım trafosunun kurulum maliyetinin iki defa çözüme eklenmemesi için dağıtım trafosu tipleri kümesine ‘0’ maliyetli ve ‘0’ kapasiteli dağıtım trafosu eklenmiştir. Böylece amaç fonksiyonu maliyeti en küçüklemek olduğu için model aynı dağıtım trafosuna iki ayrıt girişi olduğunda bir ayrıt için maliyeti ve kapasitesi ‘0’

olan dağıtım trafosunu seçmektedir.

Dönüştürülmüş problemin karmaşıklığı ayrıtlar üzerindeki maliyet fonksiyonun türü ile yakından ilişkilidir. Maliyet fonksiyonuna göre artan karmaşıklık seviyesi 4 grupta tanımlanabilir; - doğrusal – konveks – konkav – genel doğrusal olmayan maliyet. Bu çalışmadaki maliyet yapısı artan marjinal ayrıtlar maliyetine sahip konveks yapıdadır. Konveks maliyet konveks uygun çözüm uzayında konveks yapıdaki amaç fonksiyonunu en küçükmeye çalışmaktadır. Bu nedenle yerel bir en küçük aynı zamanda global bir en küçük çözümdür ve her ne kadar doğrusal maliyet yapısına göre daha karmaşık olsa da çözümü kolaydır.



Şekil 5.12. (a) Akış tabanlı model için mümkün bir çözüm (b) Akış tabanlı model için bir düğümün farklı kaynaklardan beslendiği mümkün bir çözüm

Çok kaynaklı, kapasite kısıtlı doğrusal olmayan akış maliyetli şebeke tasarım problemi için matematiksel model ve modelin doğrusallaştırılmış hali aşağıda verilmektedir.

Yeni tanım kümeleri:

N düğümler kümesi, $N = \{1, \dots, n\}$, ($N = N_S \cup N_R \cup N_D \cup N_T$, N_S : süper düğüm),
 A yönlü ayrıtlar kümesi, $A = \{(i, j): i, j \in N, i \neq j\}$; ($A = SSF \cup DGS \cup PF \cup TF \cup SF$), SSF : trafo merkezi ayrıtları, DGS : DÜK ayrıtları, PF : dağıtım trafosu ayrıtları, TF : aktarma düğümü ayrıtları, SF : talep düğümü ayrıtları

Yeni parametreler:

e^e e tipi trafo merkezinin kullanılmayan kapasitesi

edg^d d tipi DÜK'ün kullanılmayan kapasitesi

LCP_{ij} (i, j) ayrıtı için birincil dağıtım hattı kayıp maliyeti fonksiyonu

LCS_{ij} (i, j) ayrıtı için ikincil dağıtım hattı kayıp maliyeti fonksiyonu

Karar değişkenleri:

$$y_{ij}^e \quad \begin{cases} 1 & e \text{ tipi trafo merkezi } (i, j) \text{ ayrıtı üzerine kurulmuş ise} \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$$

$$ydt_{ij}^k \quad \begin{cases} 1 & k \text{ tipi dağıtım trafosu } (i, j) \text{ ayrıtı üzerine kurulmuş ise} \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$$

$$ydg_{ij}^d \quad \begin{cases} 1 & d \text{ tipi DÜK } (i, j) \text{ ayrıtı üzerine kurulmuş ise} \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$$

$$ytf_{ij} \quad \begin{cases} 1 & (i, j) \text{ ayrıtı üzerinde aktarma düğümü ayrıtı kurulmuş ise} \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$$

$$y d_{ij} \quad \begin{cases} 1 & (i, j) \text{ ayrıtı üzerinde talep düğümü ayrıtı kurulmuş ise} \\ 0 & \text{dd} \end{cases}$$

f_{ij} i . düğümden j . düğüme giden yük miktarı (MW)

Akış tabanlı doğrusal olmayan model:

$$\sum_{(i,j) \in A} f_{ji} - \sum_{(i,j) \in A} f_{ij} = \begin{cases} -\sum_{i \in T} D_i & i \in N_S \\ d_i & i \in N_D \\ 0 & d. d \end{cases} \quad \forall i \in N \quad (5.26)$$

$$\sum_{e \in E} (PTS^e y_{ij}^e - e^e) - f_{ij} = 0 \quad \forall (i, j) \in SSF \quad (5.27)$$

$$\sum_{d \in D} (PDG^d ydg_{ij}^d - edg^d) - f_{ij} = 0 \quad \forall (i, j) \in DGS \quad (5.28)$$

$$\sum_{k \in K} PT^k ydt_{ij}^k - f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in PF \quad (5.29)$$

$$f_{ij} \leq PP_{max} ytf_{ij} \quad \forall (i, j) \in \{PF \cup TF\} \quad (5.30)$$

$$f_{ij} \leq PS_{max} y d_{ij} \quad \forall (i, j) \in SF \quad (5.31)$$

$$\sum_{e \in E} (PTS^e y_{ij}^e - e^e) = \sum_{i \in N_D} D_i - \sum_{(i,j) \in DGS} \sum_{d \in D} (PDG^d ydg_{ij}^d - edg^d) \quad \forall (i, j) \in SSF \quad (5.32)$$

$$\sum_{e \in E} y_{ij}^e = 1 \quad \forall (i,j) \in SSF \quad (5.33)$$

$$\sum_{k \in K} ydt_{ij}^k \leq 1 \quad \forall (i,j) \in PF \quad (5.34)$$

$$LCP_{ij} = CLP l_{ij} f_{ij}^2 \quad \forall (i,j) \in \{PF \cup TF\} \quad (5.35)$$

$$LCS_{ij} = CLS l_{ij} f_{ij}^2 \quad \forall (i,j) \in SF \quad (5.36)$$

$$y_{ij}^e \in \{0,1\}, ydt_{ij}^k \in \{0,1\}, ytf_{ij} \in \{0,1\}, yd_{ij} \in \{0,1\}, ydg_{ij}^d \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A \quad (5.37)$$

$$f_{ij} \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A \quad (5.38)$$

Kısıtları altında

$$\begin{aligned} Z = \text{Enküçük} & \sum_{(i,j) \in SSF} \sum_{e \in E} (CTS^e y_{ij}^e) + \sum_{(i,j) \in DGS} \sum_{d \in D} (CDG^d ydg_{ij}^d) \\ & + \sum_{(i,j) \in PF} \sum_{k \in K} (CT^k ydt_{ij}^k + C_{pn} l_{ij} ydt_{ij}^k + LCP_{ij}) \\ & + \sum_{(i,j) \in TF} (C_{pn} l_{ij} ytf_{ij} + LCP_{ij}) + \sum_{(i,j) \in SF} (C_{sn} l_{ij} yd_{ij} + LCS_{ij}) \\ & + \sum_{(i,j) \in SSF} \sum_{ss \in SS} C_b (PTS^e y_{ij}^e - e^e) \end{aligned} \quad (5.39)$$

Eş. 5.26 bütün düğümler için akış kısıtıdır. Talep düğümleri için, düğümden çıkan yüklerle giren yüklerin farkı düğümün talebini verirken diğer düğümler için bu değer 0'dır. Bu kısıt aynı zamanda süper düğümden çıkan yüklerin toplamının toplam talebe eşit olmasını sağlar. Eş. 5.27 trafo merkezi düğüme kurulan e tipi trafo merkezinin kullanılmayan kapasitesini gösteren eşitliktir. Aynı şekilde kısıt 5.28, DÜK düğümlerine kurulan d tipi DÜK'ün kullanılmayan kapasitesini tanımlamaktadır. Eş. 5.29 dağıtım trafoları düğümlerindeki k tipi dağıtım trafosu akış kısıtıdır. Eş. 5.30 ve Eş. 5.31 sırasıyla birincil ve ikincil hatlar için kapasite kısıtlarıdır. Eş. 5.32 kurulan trafo merkezi ve DÜK'lerin kullanılan kapasiteleri toplamının toplam talebe eşit olmasını sağlar. Eş. 5.33 ve Eş. 5.34 sırasıyla bir düğüme sadece bir çeşit trafo merkezi ve bir çeşit dağıtım trafosu kurulmasını garanti eder. Eş. 5.35 amaç fonksiyonundaki birincil kayıp maliyetini ve Eş. 5.36 amaç fonksiyonundaki ikincil kayıp maliyetini tanımlar. Eş. 5.37 ikili değişkenleri ve Eş. 5.38 pozitif değişkenleri göstermektedir. Amaç fonksiyonun verildiği Eş. 5.39 toplam ayrıt maliyetlerini en küçükmeyi amaçlar. Ayrıt maliyetleri trafo merkezi, DÜK'ler, dağıtım trafoları, birincil ve ikincil dağıtım hatları için kurulum ve birincil ve ikincil ayrıtlar için kayıp maliyetlerini içermektedir.

Akış tabanlı model için hesaplama karmaşıklığına bakıldığında, kısıt sayısının dönüştürülmüş şebekenin özelliklerine bağlı olarak değiştiği görülmektedir. Yani problemin kısıt sayısının, bir başlangıç şebekenin içindeki iki rollü düğüm sayısı, dağıtım trafosu kurulabilecek düğüm sayısı, aktarma düğümü sayısı ve talep düğümü sayısı ile ilişkili olduğu görülmektedir. Aynı problem içinde yukarıda değinilen değerlerin değişmesine bağlı olarak akış tabanlı modelin nin kısıt sayısı değişmekle beraber; Şekil 5.8'deki örnek 6 düğümlü problem için düğüm tabanlı modelde 76 olan kısıt sayısı akış tabanlı modelde 62 kısıta düşmektedir. Bu fark problem boyutu büyüdükçe artmaktadır. Bu nedenle akış tabanlı modelin büyük boyutlu problem tiplerinde daha iyi performans göstermesi beklenmektedir.

Yukarıda verilen akış tabanlı model için düğüm tabanlı modelde uygulandığı gibi parçalı doğrusallaştırma tekniği ile kayıp maliyetlerinden kaynaklanan doğrusal olmayan fonksiyonlar doğrusallaştırılmıştır. Bu durumda yeni elde edilen model aşağıdaki gibidir.

Akış tabanlı doğrusallaştırılmış model (ATDM):

Eş. 5.26-34, Eş. 5.37 ve Eş. 5.38 ile birlikte

$$LCP_{ij} = CLP l_{ij} \sum_{m \in M} a_m^2 \gamma_{ijm} \quad \forall (i, j) \in \{PF \cup TF\} \quad (5.40)$$

$$LCS_{ij} = CLS l_{ij} \sum_{p \in P} b_p^2 \alpha_{ijp} \quad \forall (i, j) \in SF \quad (5.41)$$

$$f_{ij} = \sum_{m \in M} a_m \gamma_{ijm} \quad \forall (i, j) \in PF \quad (5.42)$$

$$\sum_{m \in M} \gamma_{ijm} = 1 \quad \forall (i, j) \in PF \quad (5.43)$$

$$f_{ij} = \sum_{p \in P} b_p \alpha_{ijp} \quad \forall (i, j) \in SF \quad (5.44)$$

$$\sum_{p \in P} \alpha_{ijp} = 1 \quad \forall (i, j) \in SF \quad (5.45)$$

$$\gamma_{ijm} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in PF \quad (5.46)$$

$$\alpha_{ijp} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in SF \quad (5.47)$$

Kısıtları altında

Eş. 5.39

5.4. Deneysel Çalışmalar

Bu bölümde, deneysel karşılaştırma amacıyla kullanılan test problemleri hakkında detaylı bilgi verildikten sonra bu test problemleri üzerinde matematiksel modellerin performansları incelenecektir.

5.4.1. Test problemleri

BEDS tasarımı problemi literatürde daha önce tanımlanmadığı için test problemleri aşağıda detayları verilen yöntem ile üretilmiştir. Bu çalışmada Costa ve diğerleri (2011)'de kullanılan yönteme benzeyen bir yöntem ile küçük, orta ve büyük boyutlu 3 test problem grubu üretilmiştir. Küçük, orta ve büyük gruptaki test problemlerinin sayısı sırasıyla 20, 20 ve 10 olmak üzere toplam 50'dir. Test problemleri üretilirken öncelikle her test problemi için düğüm sayısı ve düğüm sayısı ile uyumlu ayrıt sayısı belirlenir. Düğüm sayıları küçük boyutlu test grubu için (5,30); orta boyutlu grup için (35-90) ve büyük boyutlu test grubu için (100-410) aralığındadır. Düğümlerin koordinatları (x,y) düzlemi üzerinde rassal olarak belirlenmektedir. Düzlem limitleri x ve y değeri için [0,120] aralığındaki tamsayılardır. Düğümlerin koordinatları belirlendikten sonra, düğümler bir ağaç yapı oluşturulana kadar ayrıtlarla birbirine bağlanır. Daha sonra probleme özgü olarak belirlenen ayrıt sayısına ulaşıncaya kadar rassal olarak ayrıtlar eklenir. Talep noktaları için talep değerleri $U \sim (5,15)$ düzgün dağılımından üretilmektedir. Trafo merkezinin her zaman en düşük indeksli düğüm numarasında yer aldığı varsayılmıştır. Dağıtım trafoları için olası yerleşim düğüm sayısı DTS olmak üzere, $DTS \geq \sum_{i \in N_D} d_i / (\text{enbüyük}_{k \in K}(PT^k))$, koşulunu sağlayacak şekilde rassal olarak seçilmektedir. DÜK'ler sadece birincil dağıtım şebekesine bağlanabildiği için aday DÜK noktaları talep düğümü olmayan noktalar arasından rassal olarak seçilmektedir. Herhangi bir rol almamış düğümler ve belirlenen talep, dağıtım trafosu ya da DÜK'lerden tek rollü olan düğümler ise aktarma düğümleri olarak belirlenmiştir.

5.4.2. Deneysel çalışmalar

Önerilen matematiksel modelin performansı üretilen 50 test problem üzerinde denenmiştir. Test problemlerin çözümü için CPLEX 12.1 matematiksel model çözücüsü kullanılmıştır. Bütün koşullarda çözücünün varsayılan parametre seviyeleri kullanılmıştır. Herbir koşul

Intel(R) Core(TM) i7-3630QM CPU 2.40 GHz hızında, 8 GB hafızalı “Windows 8” işletim sistemi ile çalışan bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Bütün koşumlar 2 saat (7200 saniye) ile sınırlandırılmıştır.

Matematiksel modelleri analiz etmek amacıyla aşağıdaki performans kriterleri kullanılmıştır:

1. En iyi çözüm değeri (EÇD): Modellerin tamsayılı koşumları sonucunda elde edilen en iyi çözüm değeri,
 2. Çözüm süresi (ÇS): Modellerin tamsayılı koşumlarının çözüm süresi,
 3. Sapma değeri: Sapma değeri hesaplanırken aşağıda tanımlanan değer kullanılmıştır:
- Doğrusal gevşetme yüzde sapma değeri (DGYSD): Modellerin 0-1 karar değişkenlerinin gevşetilmesi (ikili değişkenlerin “0” ile “1” arasında reel sayı olarak kabul edilmesi) ile elde edilen çözümün (Z^{DG}) iki modelin tamsayılı koşumu sonucunda elde edilen en iyi çözümden (Z^*) sapma değeri. Bu değer her test problemi için, $DGYSD = 100 * (Z^* - Z^{DG}/Z^*)$, formülasyonu kullanılarak hesaplanmıştır.

Sapma değeri modellerin eniyi çözümlere yaklaşma derecesinin bir göstergesidir. Bu değer ne kadar küçük olursa modellerin en iyi çözüme ulaşma süreleri o kadar kısa olmaktadır. Her 3 test grubu ile elde edilen sonuçlar Çizelge 5.2-5.4’te verilmektedir. Bu çizelgelerde ilk sütun problem ismini verirken takip eden üç sütun ise sırasıyla test problemlerindeki düğüm ve ayırıt sayılarını ve her bir test probleminde yer alan iki rollü düğüm sayısını (İRDS) vermektedir. Son üç sütun ise sırasıyla, en iyi çözüm değerini, çözüm süresini ve sapma değerini göstermektedir.

Çizelge 5.2. Küçük boyutlu test problem grubu için deneysel çalışmalar

Problem	N	A	İRDS	EÇD		ÇS		DGYSD	
				DTDM	ATDM	DTDM	ATDM	DTDM	ATDM
Kb1	5	5	0	168	168	2,17	1,45	4,63	3,02
Kb2	5	8	3	179	179	2,95	1,51	4,75	3,35
Kb3	7	9	0	256	256	3,01	1,92	5,86	3,52
Kb4	7	12	5	229	229	2,86	4,15	6,15	4,38
Kb5	10	15	0	689	689	3,68	3,55	12,57	4,83
Kb6	10	20	4	612	612	6,57	9,31	10,49	5,63
Kb7	10	22	6	660	660	8,59	8,57	14,88	6,18
Kb8	15	20	0	735	735	20,79	7,74	13,5	6,84
Kb9	15	22	9	790	790	37,48	10,12	15,56	6,35
Kb10	22	30	0	825	825	175,59	15,44	19,81	8,3
Kb11	22	32	15	1163	1163	567,28	49,74	17,38	9,61
Kb12	25	30	0	2386	2386	469,01	38,17	18,01	8,89
Kb13	25	35	15	2692	2692	1628,76	57,52	16,45	9,57
Kb14	25	45	20	3185	3185	2733,45	53,65	21,58	9,79
Kb15	27	35	0	3270	3270	2594,12	61,3	19,84	7,03
Kb16	27	50	17	2794	2794	3145,8	74,75	22,43	10,97
Kb17	27	55	20	4196	4196	2984,96	75,2	20,49	11,06
Kb18	30	45	0	4005	4005	5495,65	66,08	23,48	9,56
Kb19	30	60	20	4594	4594	6751,19	88,43	25,96	10,34
Kb20	30	65	22	7605	7605	6643,78	97,49	31,15	11,49
ORTALAMA						1663,88	36,30	16,25	7,54

Çizelge 5.3. Orta boyutlu test problem grubu için deneysel çalışmalar

Problem	N	A	İRDS	EÇD		ÇS		DGYSD		
				DTDM	ATDM	DTDM	ATDM	DTDM	ATDM	
Ob1	35	45	0	9236*	8967	*	88,69	10,34	9,34	
Ob2	35	48	25	8562	8562	4625	90,56	11,08	8,08	
Ob3	37	45	0	9019*	8691	*	112,17	13,79	5,93	
Ob4	37	58	30	7159	7159	5183	159,5	20,53	10,26	
Ob5	40	55	0	8671*	7128	*	152,84	21,07	11,67	
Ob6	40	60	32	6314	6314	4369	258,93	28,06	12,95	
Ob7	40	62	36	5501	5501	6782	364,8	33,9	17,53	
Ob8	45	55	0	6807	6807	5972	272,01	31,54	12,66	
Ob9	45	61	38	8795*	4921	*	475,84	35,38	19,36	
Ob10	57	75	0	12521*	7306	*	628,95	28,49	14,06	
Ob11	57	79	40	13669*	10748	*	837,21	25,76	12,64	
Ob12	57	90	43	11027*	7911	*	1139,53	28,27	14,84	
Ob13	65	90	0	12792*	9572	*	1035,9	19,05	15,79	
Ob14	65	110	45	16448*	11842	*	1459,33	22,69	24,47	
Ob15	70	120	0	15875*	10748	*	2649,53	31,64	19,42	
Ob16	70	135	48	21055*	13955	*	2967,27	25,79	15,73	
Ob17	75	150	0	45698*	25896	*	3165,94	17,95	16,9	
Ob18	80	138	0	35478*	22071	*	3070,31	29,53	18,43	
Ob19	80	160	56	40279*	25038	*	4000,76	21,38	12,57	
Ob20	90	170	60	39522*	23852	*	4196,56	36,54	17,93	
ORTALAMA							5386,20	1356,33	24,64	14,53

* Verilen süre kısıtı içinde bulunan en iyi çözüm değeri

Çizelge 5.4. Büyük boyutlu test problem grubu için deneysel çalışmalar

Problem	N	A	İRDS	EÇD		ÇS		DGYSD	
				DTDM	ATDM	DTDM	ATDM	DTDM	ATDM
Bb1	100	154	61	25689*	17965	*	4159,34	32,54	21,22
Bb2	100	159	70	22452*	15975	*	4800,57	31,56	18,67
Bb3	150	300	85	45063*	28647	*	5005,89	44,6	20,51
Bb4	150	279	140	51289*	34922*	*	*	32,07	25,9
Bb5	220	415	0	64208*	41298	*	6891,07	37,17	21,17
Bb6	220	500	70	86820*	68163*	*	*	29,19	25,24
Bb7	300	496	48	76962*	51489	*	7200	43,89	27,53
Bb8	320	579	170	80994*	64211*	*	*	26,78	22,05
Bb9	320	853	200	110598*	87103*	*	*	26,75	19,55
Bb10	410	9186	250	125033*	99835*	*	*	29,98	25,22
ORTALAMA							5611,37	33,45	22,71

* Verilen süre kısıtı içinde bulunan en iyi çözüm değeri

Çizelge 5.2-4'te net bir şekilde görüldüğü gibi ATDM, DTDM'ye göre belirgin olarak daha iyi performansa sahiptir. DTDM verilen süre sınırı içinde küçük boyutlu test problemlerinin hepsini orta boyutlu test problemlerinin ise 5 tanesi için en iyi değerleri bulurken, ATDM küçük ve orta boyutlu test problemlerinin hepsi için en iyi çözümü bulmaktadır. Büyük boyutlu test problem grubuna bakıldığında ise DTDM hiçbir büyük boyutlu problemi çözemezken ATDM 10 problemin 5'inde en iyi çözümü bulmuştur. DTDM değerlerine bakıldığında küçük boyutlu test problem grubunda ATDM ile elde edilmiş ortalama DGYSD değeri %7,54 iken, DTDM için bu değer %16,25'tir. Orta boyutlu test problem grubunda yine ATDM daha iyi bir performans göstermiştir. Bu grup için ortalama DGYSD değeri ATDM için %14,53 iken DTDM için %24,64'tür. DTDM ile elde edilen en yüksek DGYSD büyük boyutlu problem grubunda %33,45 iken ATDM ile elde edilmiş en yüksek DGYSD % yine büyük boyutlu problem grubunda %22,71'dir. Ayrıca ATDM'nin çözüm süresi ortalaması küçük boyutlu problemler için 1 dakikanın altında olup, orta boyutlu problemler için ise dakikalarla ölçülmektedir. Büyük boyutlu test problem grubunda çözülebilen problemler için ortalama çözüm süresi 5614,81 sn (<2 saat) dir ve bu değer bir çok parametreyi dikkate alan önemli bir problemi çözmek için kabul edilebilir bir zaman dilimidir. Bu sonuçlar dikkate alındığında önerilen ATDM'nin performansı yüksek etkin bir model olduğu söylenebilir.

Deneysel çalışma sonuçlarında görüldüğü gibi düğüm ve ayrıt sayıları arttıkça matematiksel modellerin performansı düşmektedir. Özellikle büyük boyutlu test problemlerinde en iyi çözüme ulaşılma oranı diğer gruplara göre daha düşüktür. Bu sonuç problemin karmaşıklığının beklenen bir sonucudur. Modellerin çalışması için verilen 2 saatlik zaman diliminde büyük boyutlu test problemlerinden 5 tanesi çözülememiştir.

Ek olarak, test problemlerini oluştururken kullanılan parametre değerlerindeki değişmelerin etkisinin incelenmesi amacıyla ATDM'nin performansı farklı test parametreleri ile test edilmiştir.

Parametreler için aşağıdaki seçimler dikkate alınmıştır:

- Yüksek/düşük hat kapasite seviyeleri: Test problemleri için $PP_{max} = \lambda * enbüyük_{k \in K}(PT_k)$ ve $PS_{max} = \lambda * enbüyük_{i \in N_D}(d_i)$ değerleri dikkate

alınmıştır. λ değerleri yüksek kapasite ($P \uparrow$) için 4 ve düşük kapasite ($P \downarrow$) için 1,5 olarak alınmıştır. Referans λ değeri 2'dir.

- Yüksek/düşük dağıtım trafosu kurulum maliyeti: Dağıtım trafoları kurulum maliyetleri, referans senaryodaki dağıtım trafoları maliyet/kapasite oranlarının katları alınarak hesaplanmıştır. Bu değerler yüksek maliyet değeri için ($CT^k \uparrow$) referans senaryonun 1,25 ve düşük maliyet değeri için ($CT^k \downarrow$) referans senaryonun 0,50 katıdır.
- Yüksek/düşük ikincil dağıtım hattı kurulum maliyeti: İkincil dağıtım hattı kurulum maliyeti, yüksek maliyet ($C_{sn} \uparrow$) değeri için $C_{sn} = 3$ ve düşük maliyet ($C_{sn} \downarrow$) değeri için $C_{sn} = 1,75$ olarak alınmıştır.
- Yüksek/düşük dağıtım trafosu kurulum maliyeti ile düşük/yüksek ikincil dağıtım hattı kurulum maliyeti.
- Yüksek/düşük iki rollü düğüm sayısı: İki rollü düğümler için yüksek değer ($İRDS \uparrow$) $İRDS = N$ ve düşük değer ($İRDS \downarrow$) $İRDS = \lfloor N/6 \rfloor$ olarak hesaplanmıştır.
- Olası dağıtım trafosu yerleşim düğümlerinin $P_{DT} = (N_D \cup N_T)/P_{DG}$ olarak artırılması ($DTS \uparrow$).

Çizelge 5.5'te 50 test problemi için parametre değerlerindeki değişmelerin ATDM performansı üzerindeki etkileri görülmektedir. Çizelgede öncelikle birinci, ikinci ve üçüncü çeyrek ortalama çözüm süresi ($\zeta S_1, \zeta S_2$ ve ζS_3) değerleri ve daha sonra en iyi çözümü bulunan problem sayısı ($\#EİÇ$) verilmiştir. Referans satırda ($ATDM^+$), $\zeta S_1, \zeta S_2$ ve ζS_3 değerleri için gerçek sayılar kullanılırken farklı parametre senaryolarında $\zeta S_1, \zeta S_2$ ve ζS_3 değerleri için referans değerden % olarak artış azalış değerleri verilmiştir. Ayrıca $\#EİÇ$ için bütün sütun değerleri gerçek sayıdır.

Çizelge 5.5. Başlangıç parametre değerlerindeki değişmelerin ATDM'nin performansına etkileri

	ÇS			#EİÇ
	ÇS ₁	ÇS ₂	ÇS ₃	
ATDM	230,4	510,7	786,0	45
P↑	-4,7	-25,0	-24,4	47
P↓	14,8	20,2	28,5	37
CT ^k ↑	8,2	27,9	29,5	41
CT ^k ↓	-5,0	-19,3	-22,3	46
CT _{sn} ↑	20,1	-10,5	5,1	40
CT _{sn} ↓	3,8	15,3	22,7	31
CT ^k ↑ CT _{sn} ↓	25,4	40,2	60,8	25
CT ^k ↓ CT _{sn} ↑	15,4	-13,5	-9,0	45
İRDS↑	22,1	41,5	63,9	28
İRDS↓	-6,2	-38,5	-49,8	48
DTS↑	40,4	35,2	48,6	35

Çizelge 5.5 incelendiğinde dağıtım hatlarındaki kapasitelerin model performansı ve çözüm süreleri üzerinde etkisinin olduğunu görmekteyiz. Hat kapasiteleri azaldıkça bulunan en iyi çözüm değeri sayısı azalırken modelin çözüm süresi artmaktadır. Kapasitelerin artırılması ise bu durumun tersi yönde etki yaratmaktadır. Başlangıç parametrelerinden dağıtım trafolarının kurulum maliyetlerinin artırılmasının ve ikincil dağıtım hatlarının kurulum maliyetlerinin azaltılmasının çözüm süreleri üzerinde belirgin bir artış yarattığı görülmektedir. Bu etki, iki durumun bir arada analiz edildiği parametre senaryosunda ($CT^k \uparrow$ $C_{sn} \downarrow$) daha belirgin olarak görülmektedir. Dağıtım trafolarının kurulum maliyetlerinin azaltılması çözüm sürelerinin azalmasına neden olmaktadır. İkincil dağıtım hatlarının kurulum maliyetlerinin artırılması ise bu maliyetlerin azaltılmasının tam tersi yönde etki yapmamaktadır. Genel olarak maliyet yapılarındaki değişmelerin model üzerindeki etkileri incelendiğinde, dağıtım trafolarının kurulum maliyetlerinin artırılması ve ikincil dağıtım hatlarının kurulum maliyetlerinin azaltılmasının bir arada dikkate alındığı durum hariç hiç bir maliyet değişiminin birinci, ikinci ve üçüncü çeyrek çözüm sürelerini %30'dan fazla artırmadığı görülmektedir. Buna bağlı olarak maliyet yapılarının modelin toplam performansı üzerinde küçük bir etkisi olduğu söylenebilir. İki rollü düğüm sayılarının etkilerine bakıldığında bu değerlerin çözüm sürelerini ve modelin performansını yüksek oranda etkilediği ve artan iki rollü düğüm sayısının model süresini artırdığı ve en iyi çözümü bulma sayısını azalttığı görülmektedir. Aynı şekilde azalan iki rollü düğüm sayısı da ters yönde etki yaratmaktadır. Dağıtım trafoları için olası yerleşim yerlerinin artırılması problem karmaşıklığını artırmakta ve uzun çözüm sürelerine neden olmaktadır. Bu beklenen bir durumdur çünkü dağıtım trafoları için olası yerleşimlerin artırılması aynı

zamanda iki rollü düğüm sayısını da artıran bir durum olduğu için aynı etkiyi yaratmaktadır.

Önerilen ATDM'nin performans ve çözüm süresi açısından etkin olduğunu deneysel sonuçlara bakarak söylemek mümkündür. Hatta DTDM ile karşılaştırıldığında, DTDM'nin çözemediği bir çok problem için en iyi çözümü bulduğu görülmektedir. Ancak ATDM'de iki rollü düğümlerin sayısına bağlı olarak orijinal test probleminin boyutları değişmektedir. İki rollü düğüm sayısı arttıkça hem dönüştürme işlemi zorlaşmakta hem de ana problemin düğüm ve ayrıt sayıları artmaktadır. Artan düğüm ve ayrıt sayıları karar değişkenlerinin ve kısıtların sayılarının da artmasına neden olmaktadır. Kısıt ve karar değişkenlerinin yer aldığı matrisin boyutunun artması doğrusal olarak matematiksel modelin çözümü için bellek ihtiyacını ve dolayısıyla çözüm süresini de artırmaktadır. Bu nedenlerle problemin çözümü için sezgisel yöntemlere ihtiyaç duyulabilecektir.

Bir sonraki bölümde BEDS tasarımı problemi için iki çapraz entropi tabanlı melez algoritma (ÇEHA_I ve ÇEHA_II) önerilecektir. Önerilen algoritmalara eklenen iki yeni iyileştirme işlemi ile her algoritma için birer varyant elde edilmiştir. Bu varyantlar sırası ile M_ÇEHA_I ve M_ÇEHA_II olarak tanımlanmıştır. Geliştirilen melez algoritmalar BEDS tasarımı problemini çözerken matematiksel modelin avantajları ile sezgisel yöntemin avantajlarını birleştiren melez bir yapıya sahiptir.

6. BEDS TASARIMI PROBLEMİ İÇİN SEZGİSEL ALGORİTMALAR

Bu bölümde BEDS tasarımı problemi için çapraz entropi (ÇE) tabanlı iki melez algoritma önerilmiştir. Problem tanımında verildiği gibi BEDS tasarımı problemi birbiri ile bağlantılı 5 karar problemi içermektedir. Bir önceki bölümde bu 5 alt problem bir arada ele alınmış ve önerilen matematiksel modeller ile problem bir bütün olarak çözülmeye çalışılmıştır. Problemi bir bütün olarak ele almak her ne kadar en iyi çözümü bulma olasılığını artırıyor olsa da problemin karmaşıklığının yüksek olması sebebi ile çok büyük boyutlu problemlerde bir çözüm bulmayı zorlaştırabilmektedir.

Bu bölümde önerilen çözüm yöntemleri, problemi alt problemlere ayrıştırıp problemin karmaşıklığını azaltarak problemleri hiyerarşik olarak çözmeyi hedeflemektedir. Burada temel nokta alt problemler için hızlı ve etkili algoritmalar kullanabilmek ve alt problemlerin birbirleriyle olan etkileşimlerini çözüm yönteminin tamamına yansıtılabilmektir. Yani ana problem ayrıştırıldığı halde alt problemler bağımsız problemler olarak ele alınmamalıdır.

Alt problemler içinde en kritik kararlardan biri birincil dağıtım şebekesi için talep noktaları ve ikincil dağıtım şebekesi için kaynak noktaları olarak görev yapan dağıtım trafolarının yer seçimi ve kapasite belirleme problemidir. Dağıtım trafolarının yerleri belirlendiğinde, DÜK içeren birincil dağıtım şebekesinin ve ikincil dağıtım şebekesinin rootalanması etkin olarak gerçekleştirilebilir. Dağıtım trafolarının yerleşimlerinin belirlenmesi bir tesis yerleştirme problemidir ve literatürde tesis yer seçimi problemleri için çok sayıda algoritma geliştirilmiştir. Kısaca tesis yeri seçim problemleri n adet tesisin m adet konuma, taşıma maliyetlerinin minimize edilecek şekilde yerleştirilmesi konusu ile ilgilenmektedir (Tavakkoli ve Shayan, 1998). Daha detaylı bir tanım verecek olursak; tesis yer seçimi problemleri, bir grup tesisin çeşitli kısıtlar göz önünde bulundurularak, tüketicilerin (talep düğümü) taleplerinin karşılanmasını, maliyetleri en küçükleyecek şekilde uygun konumlara yerleştirilmesini ve her bir müşterinin hizmet veren tesislere atanmasını kapsayan problemlerdir (Tavakkoli ve Shayan, 1998).

Bu çalışmada tesis yer seçimi ve şebeke tasarım problemlerinin çözümü için çapraz entropi yöntemine dayanan sezgisel iki melez algoritma geliştirilmiştir. Önerilen algoritmaların

melez yapısı ÇE ve matematiksel modellerin bir arada kullanılmasından kaynaklanmaktadır. İlerleyen bölümde öncelikle ÇE yönteminin kombinatoriyel eniyileme problemlerinde kullanılmasını sağlayan teori ve sonra BEDS tasarımı problemi için geliştirilen ÇEHA_I ve ÇEHA_II'nin detayları anlatılacaktır.

6.1. Çapraz Entropi Yöntemi

Entropi Yunanca kökenli bir kelime olup bir sisteme ait belirsizliğin ölçüsü olarak tanımlanabilir. Diğer bir tanımla herhangi bir olayın ortaya çıkma olasılığının göstergesidir. ÇE yöntemi karmaşık stokastik şebekelerde nadir olayların olasılıklarını belirlemek için kullanılan, değişkenlik en küçüklemesini dikkate alan uyarlamalı bir algoritmadır (Rubinstein, 1997). Kısa zamanda Rubinstein (1999), ÇE'nin sadece nadir olay olasılık tahmininde değil aynı zamanda zor kombinatoriyel eniyileme problemlerinin çözümünde de kullanılabileceği fark edilmiştir. Bunu yaparken, deterministik eniyileme problemi ilişkili bir stokastik eniyileme problemine dönüştürülür ve nadir olay benzetimi teknikleri kullanılarak problem çözülür. Bu işlem sırasında en iyi çözüme ya da kabul edilebilir bir çözüme yakınsayan çözümler rassal bir sırada oluşturulur. İlişkili stokastik eniyileme problemi tanımlandığı zaman ÇE yöntemi aşağıdaki iki aşamayı takip eder:

- Belirlenen bir mekanizmaya göre rassal veri örnekleri oluştur.
- Belirlenen mekanizmanın parametrelerini bir sonraki aşamada daha iyi sonuç elde edebilmek için elde edilen veriye göre güncelle.

ÇE yönteminin en belirgin özelliği, gelişmiş benzetim teorisine dayanan hızlı ve bir açıdan en iyi güncelleme/öğrenme kurallarını elde etmek için kesin bir matematiksel çerçeve tanımlamasıdır. Yukarıda bahsedildiği gibi ÇE yönteminde deterministik bir eniyileme problemi ilişkili bir stokastik probleme dönüştürülür. Örneğin bir şebeke probleminde problem tipine bağlı olarak (a) düğümlerde (b) ayrıtlarda rassallık tanımlanabilir. Düğümlerde rassallık sağlandığında stokastik düğümlü şebekeler (SDŞ) ve diğer durumda da stokastik ayrıtlı şebekeler (SAŞ) olarak isimlendirilirler.

ÇE yöntemi hem deterministik hem de stokastik kombinatoriyel eniyileme problemleri için başarı ile uygulanabilir. Stokastik durumda amaç fonksiyonunun kendisi rassaldır veya

benzetim ile tahmin edilmesi gerekir. Stokastik kombinatoriyel optimizasyon problem yapısı stokastik çizelgeleme, akış kontrolü ve veri şebekelerinin rotalanması ve birçok benzetim tabanlı eniyileme probleminde görülmektedir (Rubinstein ve Melamed, 1998).

Mühendislik uygulamalarında nadir olayların olasılıklarının tahminini yapmak önemlidir. Örneğin bir çağrı merkezinde normal çalışma koşullarında bir çağrının reddedilme olasılığı çok küçüktür. Bu küçük olasılığı tahmin etmek için sistemi normal çalışma koşullarında çok uzun bir süre çalıştırmak gereklidir. Ya da daha iyi bir yöntem bu olasılığı tahmin edebilmek için önem örnekleme yöntemini kullanmak ve nadir olayın oluşumunu daha fazlaştırmaktır. Önem örnekleme yöntemi, sistemin farklı parametre setleri ile benzetimini yapmaya dayanan bir varyans azaltma tekniğidir. Önem örnekleme tekniğinde zor olan, en iyi parametre setinin belirlenmesinin zor olmasıdır. ÇE yönteminin bir avantajı en iyi parametre setinin tahmin edilmesinde uyarlamalı basit bir prosedür kullanmasıdır. Bu prosedürün temeli etkin bir öğrenme mekanizmasından gelir. Orijinal eniyileme probleminin dönüştürüldüğü ilişkili stokastik problem ϕ yoğunluk fonksiyonu ile gösterilsin. Bu stokastik problem, Kullback-Leibler uzaklığını, diğer bir deyişle ÇE uzaklığını, orijinal ϕ yoğunluk fonksiyonuna göre en küçükleyen önem örnekleme ϕ^* yoğunluk fonksiyonunun tanımlanması ile çözülür. ÇE uzaklığının en küçükleme, en iyi güncelleme kurallarının tanımlanmasını ve iyileştirilmiş vektörlerin oluşumunu sağlar. Algoritma uygun çözüm alanında bir noktaya yakınsadığı zaman durur.

6.1.1. Eniyileme problemleri için ÇE

$\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_m)$, X uzayındaki değerlerden oluşan rassal bir vektör ve f , X üzerinde gerçel bir fonksiyon olsun. $f(\mathbf{X})$ fonksiyonunun \mathbf{u} parametre vektörü iken, X üzerinde $h(\cdot; \mathbf{u})$ olasılık yoğunluk fonksiyonu ailesindeki γ gerçel sayısından küçük olma olasılığı Eş. 6.1 ile gösterilir.

$$l = \mathbb{P}_{\mathbf{u}}(f(\mathbf{X}) \leq \gamma) = \mathbb{E}_{\mathbf{u}} I_{\{f(x) \leq \gamma\}} \quad (6.1)$$

l eğer çok küçük bir değerse $f(\mathbf{X}) < \gamma$, nadir bir olaydır doğru tahmini için çok uzun bir benzetim zamanı gerekir. l , önem örnekleme ile etkin bir şekilde tahmin edilebilir. Bunu yapabilmek için X üzerindeki farklı bir g yoğunluğundan rassal $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_M$ örnekleri alınır ve l tahmin edilir (Rubinstein ve Kroese, 2004).

$$\hat{l} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_{\{f(\mathbf{X}_i) \leq \gamma\}} \frac{h(\mathbf{X}_i, \mathbf{u})}{g(\mathbf{X}_i)} \quad (6.2)$$

\hat{l} , önem örnekleme veya olabilirlik oranı tahmin edicisi olarak tanımlanabilir.

$$g^*(x) = \frac{I_{\{f(x) \leq \gamma\}} h(x; \mathbf{u})}{l} \quad (6.3)$$

$$l = \frac{I_{\{f(\mathbf{X}_i) \leq \gamma\}} h(\mathbf{X}_i, \mathbf{u})}{g^*(\mathbf{X}_i)} \quad (6.4)$$

g^* değeri bilinmeyen l değerine bağlıdır fakat g^* , referans parametresi \mathbf{v} olan $\{h(\cdot; \mathbf{v})\}$ yoğunluk ailesinden g^* ile $h(\cdot; \mathbf{v})$ arasındaki mesafenin en küçük olduğu durumda yaklaşık olarak bulunabilir. Bu mesafenin ölçümü g ve h arasındaki Eş. 6.5 ve Eş. 6.6. ile verilen Kullback-Leibler veya çapraz entropi uzaklığıdır.

$$\mathcal{D}(g, h) = \mathbb{E}_g \ln \frac{g(\mathbf{X})}{h(\mathbf{X})} \quad (6.5)$$

$$= \int g(x) \ln g(x) dx - \int g(x) \ln h(x) dx \quad (6.6)$$

Eş. 6.3'teki g ve g^* arasındaki Kullback-Leibler uzaklığını en küçükleme için, $h(\cdot; \mathbf{v})$, \mathbf{v} , $-\int g^*(x) \ln h(x; \mathbf{v}) dx$ 'i en küçükleyecek şekilde seçilir. Bunu sağlayabilmek için Eş. 6.7'de verilen enbüyükleme problemi çözülür.

$$\max_{\mathbf{v}} \int g^*(x) \ln h(x; \mathbf{v}) dx \quad (6.7)$$

Eş. 6.3 Eş. 6.7'den çıkarıldığında Eş. 6.8 elde edilir ve bu da Eş. 6.9'da verilen enbüyükleme problemine eşittir.

$$\max_{\mathbf{v}} \int \frac{I_{\{f(x) \leq \gamma\}} h(x; \mathbf{u})}{l} \ln h(x; \mathbf{v}) dx \quad (6.8)$$

$$\max_{\mathbf{v}} \mathcal{D}(\mathbf{v}) = \max_{\mathbf{v}} \mathbb{E}_{\mathbf{u}} I_{\{f(\mathbf{X}) \leq \gamma\}} \ln h(\mathbf{X}; \mathbf{v}) dx \quad (6.9)$$

Genel tanımını yukarıda verilen ÇE yönteminin sürekli ve kesikli eniyileme problemlerine uygulanması ilerleyen bölümde ayrı olarak anlatılmaktadır.

Sürekli eniyileme için ÇE yöntemi

$f(\mathbf{X})$ sürekli fonksiyonunda \mathcal{X} kümesindeki tüm \mathbf{x} değerleri için en küçük değer γ^* iken, bu değer Eş. 6.10 ile gösterilir.

$$\gamma^* = \min_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} f(\mathbf{X}) \quad (6.10)$$

Bu deterministik problem \mathcal{X} kümesinde tanımlı $\{h(\cdot; \mathbf{v}), \mathbf{v} \in \mathcal{V}_p\}$ olasılık yoğunluk fonksiyonları ile rassallaştırılır. Eş. 6.10 ile ilişkili stokastik problem Eş. 6.11 ile gösterilir.

$$l(\gamma) = \mathbb{P}_{\mathbf{u}}(f(\mathbf{X}) \leq \gamma) = \mathbb{E}_{\mathbf{u}} I_{\{f(x) \leq \gamma\}} \quad (6.11)$$

$\mathbf{X}, \mathbf{u} \in \mathcal{V}_p$ iken olasılık yoğunluk fonksiyonu $h(\cdot; \mathbf{u})$ olan rassal bir vektördür. l 'yi tahmin ederken, $\{f(\mathbf{X}) \leq \gamma\}$ nadir olay olarak dikkate alınır, l değeri Kullback-Leibler uzaklığı kullanılarak olasılık yoğunluk fonksiyonunda uyarlamalı değişimler yaparak tahmin edilebilir. Bu aşamada teorik eniyi yoğunluğa yönelik sıralı olasılık yoğunluk fonksiyonları $h(\cdot; \mathbf{u}), h(\cdot; \mathbf{v}_1), h(\cdot; \mathbf{v}_2), \dots$ oluşturulur. Sıralı olarak üretilen ve en iyi değişken (γ^*, \mathbf{v}^*) setine yakınsayan $\{(\hat{\gamma}_t, \hat{\mathbf{v}}_t)\}$ değişkenler için $\mathbf{v}_0 = \mathbf{u}$ olarak seçildiğinde izlenen prosedür aşağı açıklandığı gibidir (Rubinstein ve Kroese, 2004).

Öncelikle γ_t 'nin uyarlamalı olarak güncellenmesi işlemi gerçekleştirilir. Sabit bir \mathbf{v}_{t-1} için, $\gamma_t, f(\mathbf{X})$ 'in \mathbf{v}_{t-1} için $(1-p)$ oranı iken $\mathbb{P}_{\mathbf{v}_{t-1}}(f(\mathbf{X}) \leq \gamma_t) \geq p$ dir. Bu durumda γ_t 'yi tahmin edebilmek için, $h(\cdot; \mathbf{v}_{t-1})$ den $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_M$ rassal örnekleri oluşturulur ve örnek performanslarından $(1-p)$ oranı belirlenir.

$$\hat{\gamma}_t = f_{((1-p)M)} \quad (6.12)$$

İkinci olarak \mathbf{v}_t 'nin uyarlamalı olarak güncellenmesi gerçekleştirilir. Bu işlemde γ_t ve

\mathbf{v}_{t-1} 'den \mathbf{v}_t 'nin elde edilmesi için Eş. 6.13 kullanılır.

$$\max_{\mathbf{v}} \mathcal{D}(\mathbf{v}) = \max_{\mathbf{v}} \mathbb{E}_{\mathbf{v}_{t-1}} I_{\{f(\mathbf{X}) \leq \gamma\}} \ln h(\mathbf{X}; \mathbf{v}) \quad (6.13)$$

Eş. 6.13'teki $\max_{\mathbf{v}} \mathcal{D}(\mathbf{v})$ değeri stokastik denklemin çözülmesi ile tahmin edilebilir.

$$\max_{\mathbf{v}} \widehat{\mathcal{D}}(\mathbf{v}) = \max_{\mathbf{v}} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M I_{\{f(\mathbf{X}_i) \leq \hat{\gamma}_t\}} \ln h(\mathbf{X}_i; \mathbf{v}) \quad (6.14)$$

$\hat{\mathbf{v}}$ parametre vektörü bir düzgünleştirme fonksiyonu kullanılarak güncellenebilir.

$$\hat{\mathbf{v}}_t = \alpha \tilde{\mathbf{v}}_t + (1 - \alpha) \hat{\mathbf{v}}_{t-1} \quad (6.15)$$

$\tilde{\mathbf{v}}_t$ Eş. 6.14'ten elde edilmektedir ve α sabit bir düzgünleştirme katsayısıdır ve genellikle 0.6-0.9 arasında bir değer almaktadır.

Yukarıda genel olarak tanımlanmış sürekli eniyileme için ÇE algoritması aşağıda Algoritma 1 olarak tanımlanmıştır (Rubinstein ve Kroese, 2004).

Algoritma 1. Sürekli eniyileme için temel ÇE algoritması

1. $h(\cdot; \mathbf{v})$ için $\hat{\mathbf{v}}_0$ belirle. $t = 1$
2. $h(\cdot; \mathbf{v}_{t-1})$ 'den X_1, X_2, \dots, X_M örneklerini oluştur.
3. Eş. 6.12 ile performansların $(1 - p)$ oranı $\hat{\gamma}_t$ hesapla.
4. X_1, X_2, \dots, X_M örnekleri ile Eş. 6.14 stokastik formülasyonu çöz ve $\tilde{\mathbf{v}}_t$ elde et.
5. Eş. 6.15'i kullanarak $\tilde{\mathbf{v}}_t$ 'yi düzgünleştir.
6. $t \geq \delta$ için $\hat{\gamma}_t = \hat{\gamma}_{t-1} = \dots = \hat{\gamma}_{t-\delta}$ ise DUR; değilse $t \leftarrow t + 1$ ve Adım 2'ye DÖN.

Kesikli eniyileme için ÇE yöntemi

$f(\mathbf{x})$ kesikli fonksiyonunda \mathcal{X} kümesindeki tüm \mathbf{x} değerleri için en küçük değer z^* iken, z^* Eş. 6.16 ile gösterilir.

$$(P): z^* = \min_{\mathbf{x} \in \mathcal{X}} f(\mathbf{x}) \quad (6.16)$$

ÇE yöntemi Eş. 6.16'daki eniyileme problemi ile ilişkili bir tahmin problemine ihtiyaç duyar. Bunu oluşturabilmek için $z \in \mathbb{R}$ 'nin farklı değerleri için \mathcal{X} üzerinde belirleyici fonksiyonlar $\{I_{\{f(\mathbf{x}) \leq z\}}\}$ dizisi tanımlamak gerekir. $\{\phi(\cdot, \mathbf{v}), \mathbf{v} \in V_p\}$, \mathcal{X} üzerinde \mathbf{v} parametrelili kesikli olasılık kütle fonksiyon ailesi olsun. Eş. 6.16 ile ilişkili problemi çözmek için $\mathbf{u} \in V_p$ varsayımı ile, olasılık Eş. 6.17 ile tahmin edilir.

$$l = \mathbb{P}_{\mathbf{u}}(f(\mathbf{X}) \leq z) = \sum_{\mathbf{x}} I_{\{f(\mathbf{x}) \leq z\}} \phi(\mathbf{x}, \mathbf{u}) = \mathbb{E}_{\mathbf{u}} I_{\{f(\mathbf{x}) \leq z\}} \quad (6.17)$$

$\phi(\mathbf{x}, \mathbf{u})$, \mathcal{X} üzerinde tanımlı parametresi \mathbf{u} olan yoğunluk fonksiyonları ailesidir. $\mathbb{P}_{\mathbf{u}}$ ise, $\phi(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ dan üretilmiş bir \mathbf{X} rassal durumunun amaç fonksiyonunun z değerine eşit veya daha küçük olma olasılığıdır. $l = \mathbb{P}_{\mathbf{u}}(f(\mathbf{X}) \leq z)$ değerini $z = z^*$ için tahmin edebilmek için $\phi(\mathbf{x}, \mathbf{u})$ dan rassal örnekler $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_M$ oluşturarak Monte Carlo benzetimi uygulanabilir. $\mathbf{X}_k = x^*$ olayı olasılığı $1/|\mathcal{X}|$ olan nadir olay olduğu için l nin doğru tahmini için çok uzun bir benzetim zamanı gerekir. Bu nedenle l 'nin tahmini için önem örnekleme kullanılabilir. Bu durumda rassal örnekler $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_M$ farklı bir g yoğunluk fonksiyonundan elde edilir ve l aşağıdaki gibi tahmin edilir.

$$\hat{l} = \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M I_{\{f(\mathbf{X}_k) \leq z\}} \frac{\phi(\mathbf{X}_k, \mathbf{u})}{g(\mathbf{X}_k)} \quad (6.18)$$

$$g^*(x) = \frac{I_{\{f(\mathbf{x}) \leq z\}} \phi(\mathbf{x}; \mathbf{u})}{l} \quad (6.19)$$

En iyi olasılık kütle fonksiyonu genellikle elde etmesi zor ve bilinmeyen l değerine bağlı olduğu için g ve g^* arasındaki Kullback-Leibler veya ÇE uzaklığının en küçük olduğu bir g seçilir. g ve h olasılık kütle fonksiyonları arasındaki Kullback-Leibler uzaklığı Eş. 6.20 ile hesaplanır.

$$\mathcal{D}(g, h) = \mathbb{E}_g \left[\log \frac{g(\mathbf{X})}{h(\mathbf{X})} \right]$$

$$\begin{aligned}
&= \sum_x g(x) \log \frac{g(x)}{h(x)} \\
&= \sum_x g(x) \log g(x) - \sum_x g(x) \log h(x)
\end{aligned} \tag{6.20}$$

$\{I_{\{f(x) \leq z\}}\}$ pozitif olduğu için ve ϕ fonksiyonu parametresi \mathbf{v} sonlu bir vektör olduğu için, referans parametre \mathbf{v} için $\phi(x) = \phi(x; \mathbf{v})$, $g(x) = \phi(x; \mathbf{v})$ olur (Kroese, Taimre ve Botev, 2011: 15). Eş. 6.18'deki l 'yi tahmin etmek için $\mathcal{D}(g^*, \phi(\cdot; \tilde{\mathbf{v}}))$ 'yi en küçük yapacak \mathbf{v} seçilir. Bu aynı zamanda $\mathbb{E}_{\mathbf{v}} I_{\{f(x) \leq z\}} \log \phi(\mathbf{X}; \tilde{\mathbf{v}})$ 'nin en büyük olması demektir. Bu değer, $\phi(\cdot, \mathbf{v})$ olasılık kütle fonksiyonundan rassal $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots, \mathbf{X}_M$ örnekleri alıp $A \subset B \subset \mathcal{X}$ iken Eş. 6.21'in değerlendirilmesi ile tahmin edilir.

$$\frac{\sum_{k=1}^M I_{\{f(x_k) \leq z\}} I_{\{x_k \in A\}}}{\sum_{k=1}^M I_{\{f(x_k) \leq z\}} I_{\{x_k \in B\}}} \tag{6.21}$$

Kesikli eniyileme problemlerinde karar vektörü içindeki $\mathbf{X}_i = (X_{i1}, \dots, X_{im})$, $j = 1, \dots, m$ rassal vektörlerindeki gözlemleri oluşturabilmek için p_j dağılımları kullanılabilir. p_j 'nin tahmini Eş. 6.22 ile yapılır (Alon ve diğerleri, 2005).

$$\hat{p}_j = \frac{\sum_{k=1}^M I_{\{f(x_k) \leq z\}} I_{\{x_{ij} = j\}}}{\sum_{k=1}^M I_{\{f(x_k) \leq z\}}} \tag{6.22}$$

Eş. 6.22'deki \hat{p}_j elemanları \hat{P}_t olasılık vektörünü oluştururlar. \hat{P}_t 'nin güncellenmesi düzgünlük katsayısı kullanılarak

$$\hat{P}_t = \alpha \tilde{P}_t + (1 - \alpha) \hat{P}_{t-1} \tag{6.23}$$

ile yapılır. P içindeki olasılıklar yeterli bir iterasyon sayısına ulaşıldığında 0'a yaklaşacaktır.

Yukarıda genel olarak tanımlanmış kesikli eniyileme için ÇE algoritması aşağıda Algoritma 2 olarak verilmektedir.

Algoritma 2. Kesikli eniyileme için temel ÇE algoritması

1. \hat{P}_0 'ın değerlerini üret. $t = 1$
2. P_{t-1} 'den X_1, X_2, \dots, X_M örneklerini oluştur ve Eş. 6.12 ile performansların $(1 - p)$ oranı \hat{Y}_t hesapla.
3. X_1, X_2, \dots, X_M örneklerini kullanarak Eş. 6.22'deki \hat{p}_j güncelle.
4. Eş. 6.23'ü kullanarak \hat{P}_t 'yi düzgünleştir.
5. $t \geq \delta$ için $\hat{Y}_t = \hat{Y}_{t-1} = \dots = \hat{Y}_{t-\delta}$ ise DUR; değilse $t \leftarrow t + 1$ ve Adım 2'ye DÖN.

ÇE algoritması parametreleri

Yukarıda kombinatoryel eniyileme problemleri için verilen temel ÇE algoritmalarında karar verilmesi gereken başlangıç parametreleri aşağıdaki gibidir.

- Popülasyon büyüklüğü (M): Algoritmanın her bir iterasyonunda üretilecek aday çözüm sayısını göstermektedir.
- Elit çözümler için oran (ρ): Her iterasyonda elde edilen çözümlerden ρ oranı kullanılarak elit çözümler seçilir. Elit çözümler referans vektörün güncellemesi için kullanılır. Elit çözümlerin oranı genellikle 1% - 10% arasındadır.
- Düzgünleştirme katsayısı (α): Algoritmanın çok hızlı bir şekilde yakınsamasını engellemek için bir düzgünleştirme katsayısı kullanılabilir. Bu durumda $\hat{P}_t = \alpha \tilde{P}_t + (1 - \alpha)\hat{P}_{t-1}$ olur. Düzgünleştirme katsayısı genellikle $0.7 \leq \alpha \leq 0.9$ dur.
- İyileşme sağlanmayan iterasyon sayısı limiti (k),
- Problemi durdurma koşulu (K): Algoritmayı durdurma koşuludur.

6.1.2. Eniyileme problemleri için ÇE uygulamaları

ÇE yöntemi son zamanlarda geliştirilmiş bir yöntem olmasına rağmen farklı alanlardaki çalışmalarda uygulanmıştır. ÇE yöntemi, tahmin, eniyileme ve Monte-Carlo benzetimi gibi çok çeşitli problemleri çözmek için kullanılan etkin bir yöntem olarak bilinmektedir. Bu yöntem özellikle deterministik ve stokastik NP-zor kombinatoryel problemlerin çözümünde etkili sonuçlar vermektedir (Rubinstein ve Kroese, 2004). ÇE yönteminin

uygulama alanları eniyileme ve nadir olay benzetimi olarak iki temel kategoride sınıflandırılabilir. ÇE yönteminin eniyileme problemlerinde kullanılabilmesi için alt problemin bir tahmin ya da rassallık oluşturacak ilişkili bir stokastik probleme dönüştürülmesi ve yöntemin probleme özgü olarak uyarlanması gerekmektedir (De Boer, Kroese ve Rubinstein, 2004). ÇE yöntemi literatürde deterministik ve stokastik eniyileme problemleri için kullanılmıştır. Deterministik problemler için kareli atama, en büyük kesme, kümeleme, gezgin satıcı, güvenilir şebeke tasarımı sayılabilirken, stokastik çizelgeleme, ara stok atama problemleri gibi stokastik eniyileme problemleri için de başarı ile uygulanmıştır.

Cohen, Golany ve Shtub (2005), ÇE yöntemini proje yönetiminde uygulamışlardır. Problemin amacı sistemdeki toplam kalış süresini en küçükleyerek, kapasite kısıtlı, stokastik ve dinamik proje sistemi yüklemesini sağlayacak proje sayısını bulmaktır. Bu proje sistemi kaynakların, proje tiplerinin geliş sürelerinin stokastik olması nedeni ile stokastik bir problem olarak tanımlanmıştır.

D'Acquisto ve Naldi (2005), ÇE yöntemini ara stok hizmet servislerinin benzetiminde kullanmışlardır. Ara stok hizmet servisleri genellikle önem örneklemesinin özel bir kullanımı ile benzetim teknikleri kullanılarak çözülmektedir. Araştırmacılar bu probleme ÇE yöntemini uyarlayarak, uygun koşulları belirlemede karşılaşılan problemleri ortadan kaldırmaya çalışmışlardır. ÇE yönteminin kullanımı ile benzetim başlamadan önce yanlı koşulların analitik olarak belirlenmesi ihtiyacını ortadan kalkmakta ve koşullar benzetim içinde direkt olarak elde edilmektedir.

Alon ve diğerleri (2005), ara stok atama problemi için ÇE yöntemine dayanan stokastik bir algoritma önermişlerdir. Algoritma öncelikle rassal bir mekanizmaya göre örnek buffer atamaları oluşturmakta ve daha sonra bu atamaların çıktılarına göre rassal mekanizmayı uyarlamaktadır. Uyarlama kuralları ÇE en küçüklemesi ile üretilmektedir.

Chepuri ve Homem de Mello (2005), stokastik talep içeren araç rotalama probleminin çözümü için ÇE yöntemini esas alan bir algoritma önermişlerdir. Önerilen algoritmada her aşamada amaç fonksiyonunu tahmin etmek için Monte-Carlo örneklemesi kullanılmıştır. Araştırmacılar bu yeni yapının ortaya çıkardığı “ne zaman” ve “ne kadar” örnek oluşturulması gerektiği konularını dikkate alarak stokastik talepli araç rotalama problemi

için formal bir algoritma önermişlerdir. Aynı zamanda problemde belirli talep dağılım aileleri için kesin çözüm veya sıkı alt sınırlar elde edebilmek için bir çerçeve tanımlanmıştır.

Kroese, Hui ve Nariai (2007), gürültülü amaç fonksiyonlu şebeke planlama problemi için bir ÇE yaklaşımı önermişlerdir. Problemde amaç fonksiyonu kesin olarak bulunmak yerine tahmin edilmektedir. Araştırmacılar amaç fonksiyonun kesin olarak bilindiği deterministik ÇE yöntemini bu probleme uyarlayarak algoritmanın yakınsama hızını arttırabilmek için farklı iki yapı önermişlerdir.

Caserta, Quinonez ve Marquez (2008), hazırlık maliyetli tam sayılı sırt çantası problemi için ÇE yöntemine dayanan bir çözüm önermişlerdir. Algoritma orijinal problemi bir sıra standart sırt çantası problemine dönüştürerek dinamik olarak çözmektedir. Araştırmacılar algoritmanın etkinliğini arttırmak için dinamik algoritma içinde iterasyon sayısını azaltan bir ücretli geçiş teoremi kullanmışlardır.

Laguna, Duarte ve Mart (2009), en büyük kesme problemi için ÇE yöntemine dayanan melez bir algoritma önermişlerdir. Problem öncelikle klasik ÇE algoritması ile çözülmüş ve algoritmanın performansını arttırmak için klasik ÇE algoritmasına yerel arama algoritması eklenmiştir. Klasik ÇE ve melez ÇE algoritmalarının performansı karşılaştırılarak kombinatöryel eniyileme problemlerinin gelecekteki uygulamaları için önerilerde bulunulmuştur.

Caserta ve Quinonez (2009), çok ürünlü çok dönemli kapasiteli hazırlık zamanlı parti büyüklüğü problemi için melez bir algoritma önermişlerdir. Problem belirli bir planlama döneminde kısıtlı kaynakları hazırlık zamanları ile kullanarak talepleri karşılamayı hedeflemektedir. Önerilen çözüm yöntemi, problemin Lagranj gevşetmesini dikkate alarak problemin kapasitesiz versiyonunu ÇE yöntemi ile çözmektedir. Algoritmanın etkinliğini test etmek için deney tasarımı uygulanmıştır.

Altıparmak ve Dengiz (2009), iletişim şebeke tasarım problemi için ÇE yöntemini kullanmışlardır. Tasarım problemi belirli bir güvenilirlik seviyesini sağlayacak en küçük maliyetli şebekeyi bulmayı hedeflemektedir. En iyi çözümü arama işleminde mümkün çözümler elde edebilmek için yeni bir şebeke oluşturma mekanizması ÇE algoritması

içinde tanımlanmıştır. Araştırmacılar ÇE algoritmasının parametre setini belirlemek için deney tasarımı uygulamışlardır. Önerilen algoritmanın etkinliği literatürde daha önce önerilen sezgisel yaklaşımlar kullanılarak üç aşamalı bir deneysel çalışma ile test edilmiştir.

Bekker ve Aldrich (2011), ÇE yöntemini çok amaçlı eniyileme problemleri için kullanmıştır. Tek amaçlı eniyileme problemlerinde elit küme içindeki çözümler yeni olasılık dağılımını hesaplamak için kullanılırken, çok amaçlı eniyileme problemlerinde en iyi çözüm birden çok amaç içerdiği için araştırmacılar Goldberg (1989)'da tanımlanan Pareto sıralama tekniğini uyarlayarak problemleri çözmüşlerdir.

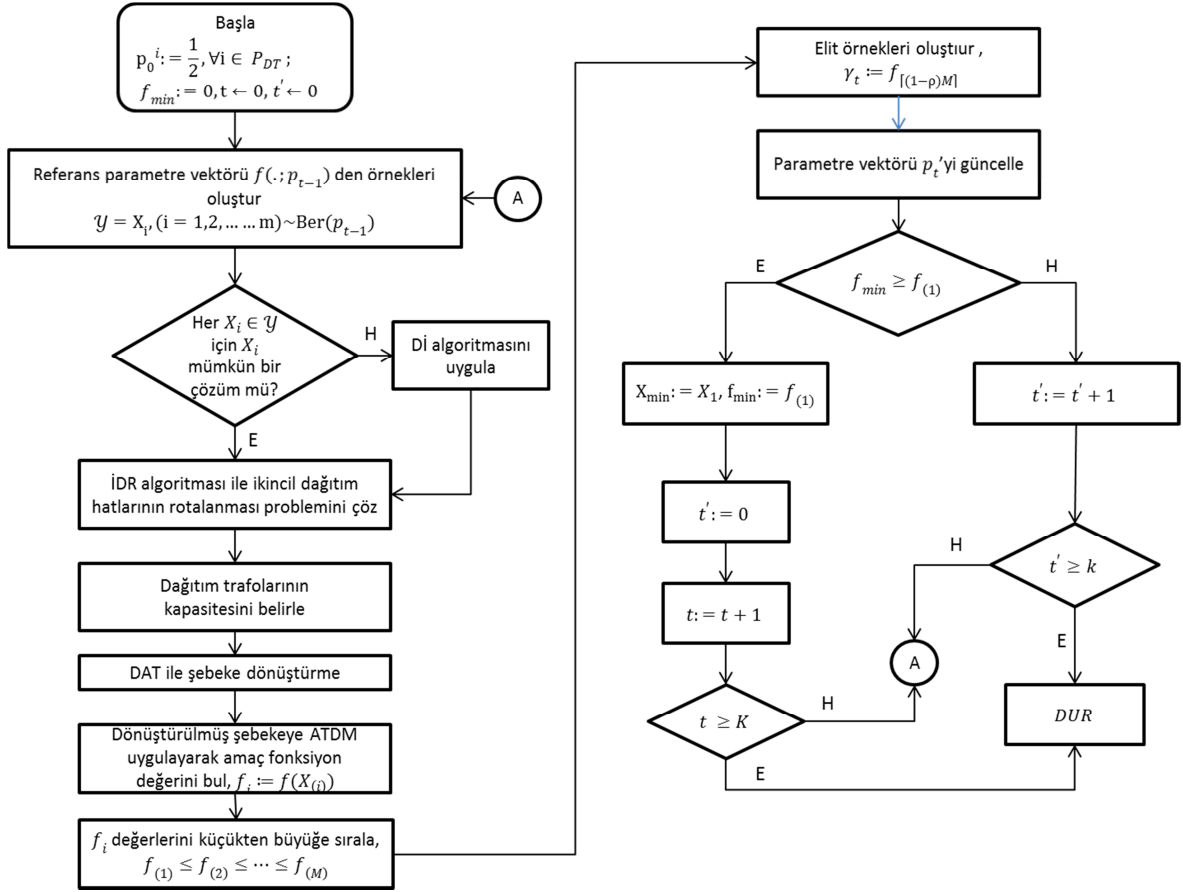
Ma (2011), ÇE yöntemini tek amaçlı zaman pencereli araç rotalama problemi için uygulamıştır. Dönüştürme matrisinin şebekedeki her bir düğüm ile ilişkilendirildiği ve her araç (bu örnekte her ajan) için mümkün bir rota oluşturabilmek için kullanıldığı çok ajanlı bir ortam tanımlamışlardır. Rassal bir mekanizma ile oluşturulan bu dönüştürme matrisi en iyi çözüm olan nadir olayım olasılığını arttıracak şekilde araçlar tarafından yapılan rotaların performansına göre güncellenmektedir.

ÇE yöntemi özellikle şebeke problemlerinde olmak üzere uygulandığı birçok problem tipinde etkin sonuçlar vermektedir. Literatür incelendiğinde ÇE yöntemi henüz bu çalışmadaki gibi tesis yer seçimi ve şebeke tasarımı bir arada içeren bir problem çözümünde kullanılmamış olduğu görülmektedir. İlerleyen bölümlerde BEDS tasarımı problemi için öncelikle iki temel ÇE tabanlı melez algoritma önerilmiştir. Daha sonra önerilen her algoritmaya farklı iyileştirme işlemleri eklenerek her algoritmadan bir algoritma daha türetilmiştir ve böylece 4 adet ÇE tabanlı melez sezgisel algoritma elde edilmiştir. Öncelikle önerilen ilk temel melez algoritma (ÇEHA_I) ve onun türevi olan algoritma (M_ÇEHA_I) detaylı olarak tanımlanmış ve daha sonra ikinci temel melez algoritma (ÇEHA_II) ve onun türevi olan algoritma (M_ÇEHA_II) tanımlanarak algoritmaların performansları test problemleri üzerinde incelenmiştir.

6.1.3. BEDS için ÇEHA_I

Bu bölümde BEDS tasarımı problemi için geliştirilen ÇEHA_I detaylı olarak anlatılmaktadır.

ÇEHA_I'in temeli BEDS tasarımı probleminin alt problemlerini hiyerarşik olarak çözme esasına dayanmaktadır. Algoritmanın amacı matematiksel model içindeki karar değişkeni sayısını sezgisel yöntemlerle azaltarak problem boyutundan kaynaklanan işlem zamanı problemini ortadan kaldırmaktır. Bunu yaparken en iyi çözüme yaklaşabilmek için sezgisel yöntemin iteratif olarak iyileştirme özelliğinden faydalanılmaktadır. Bu yaklaşımla BEDS tasarımı problemi çözülürken ana problem birincil dağıtım ve ikincil dağıtım şebekesi olmak üzere iki alt şebekeye ayrılmaktadır. İkincil dağıtım şebekesi içinde çözülecek alt problemler, dağıtım trafolarının yer seçimi ve talep düğümlerinin seçilmiş dağıtım trafolarına atanması problemleridir. Dağıtım trafolarına atanacak talep miktarı belirlendikten sonra her dağıtım trafosu için kapasite seçimleri de dağıtım trafosuna atanan toplam talep miktarına göre yapılmış olacaktır. Bu veriler ışığında birincil dağıtım şebekesindeki DÜK'lerin yer seçimi, birincil dağıtım hattının rotalanması ve trafo merkezinin kapasite seçimi matematiksel model ile çözülmektedir. Birincil dağıtım şebekesi öncelikle DAT ile dönüştürülmekte ve daha sonra dönüştürülmüş şebekede en iyi çözüm akış tabanlı model ile bulunmaktadır. Yeni durumda birincil dağıtım şebekesindeki düğüm ayrıştırma işlemi sadece DÜK'ler için söz konusudur. Çünkü tüm dağıtım trafosu için yerleşim yerleri belirlenmiştir. Birincil dağıtım şebekesindeki dağıtım trafosu olmayan düğümler olası aktarma düğümleridir. Bu durumda sadece belirlenmiş dağıtım trafosu veya olası aktarma düğümlerine denk gelen, DÜK kurulabilecek herhangi bir düğüm için ayrıştırma uygulanır. Elde edilen yeni şebekenin çözümü için kullanılan matematiksel model ATDM dir. Ancak şebeke indirgenmiş olduğundan ATDM formülasyonu için birçok değişken ve kısıt elenmiş ve böylece çözülen problem boyutları ve karmaşıklığı azalmıştır. Modelde artık iki rollü düğüm sayısı belirgin bir şekilde azaldığından ve ikincil dağıtım şebekesi ile ilgili bir değişken yer almadığından çözümün çok hızlı olması beklenmektedir. ATDM çözüldüğünde, belirlenen dağıtım trafosu yerleşim senaryosu için amaç fonksiyonu bulunmuş olur. Elde edilen çözüm mümkün ama en iyi olmayan çözümdür. Bu çözümler ÇEHA_I içinde iteratif olarak iyileştirilmekte ve durdurma koşulu sağlandığında bulunan en iyi çözüm seçilmektedir. ÇEHA_I ana problemi ayrıştırarak çözdüğü halde her bir dağıtım trafosu yer seçim senaryosu için ana problemin amaç fonksiyonu değerlendirildiği için birincil ve ikincil dağıtım şebeke çözümleri arasında bağlantı sağlanmaktadır. ÇEHA_I'in adımları ve alt işlemleri Şekil 6.1'de verilen akış şeması içinde gösterilmektedir. Ayrıca akış şemasında görülen adımların detaylı açıklaması ile ilgili işlemler Şekil 6.2-6.6 arasında 10 düğümlü bir örnek şebeke üzerinde detaylı olarak anlatılmaktadır.



Şekil 6.1. ÇEHA_I akış şeması

ÇEHA_I'in sözde kodu aşağıda verilmektedir.

Algoritma: ÇEHA_I

<i>Girdi:</i> N	(düğümler kümesi)
<i>Girdi:</i> A	(ayrıntlar kümesi)
<i>Girdi:</i> P_{DT}	(dağıtım trafosu kurulabilecek düğümler kümesi)
<i>Girdi:</i> $p_0 := (p_{0,1}, \dots, p_{0,m})$	(başlangıç referans vektörü)
<i>Girdi:</i> M	(popülasyon büyüklüğü)
<i>Girdi:</i> ρ	(elit çözüm oranı)
<i>Girdi:</i> α	(düzgünleştirme katsayısı)
<i>Girdi:</i> K	(iterasyon sayısı limiti)
<i>Girdi:</i> k	(iyileşme görülmeyen iterasyon sayısı limiti)
<i>Çıktı:</i> X_{min}	(en iyi çözüm örnek vektörü)

Çıktı : f_{min} (en iyi çözümün amaç fonksiyon değeri)

Başlangıç p_0 üret, $p_0^i := \frac{1}{2} \quad \forall i \in P_{DT}, f_{min} := 0, t \leftarrow 0, t' \leftarrow 0$

($t' := 0$ 'dan k ve $t := 0$ 'dan K)'ya kadar;

$i := 1$ 'den M 'ye kadar,

$f(\cdot; p_{t-1})$ den $\mathcal{Y} = X_i, (i = 1, 2, \dots, m) \sim \text{Ber}(p_{t-1})$

Eğer $DTS < \sum_{i \in N_D} d_i / (\text{enbüyük}_{k \in K}(PT^k))$ ise;

Dİ algoritmasını uygula.

$\forall X_i \in \mathcal{Y}$, İDR çöz.

Dağıtım trafo kapasitelerini Eş. 6.27 kullanarak hesapla.

İndirgenmiş şebekeyi DAT ile dönüştür.

$f_i := f(X_{(i)})$ değerlerini ATDM ile hesapla.

f_i değerlerini küçükten büyüğe sırala, $f_{(1)} \leq f_{(2)} \leq \dots \leq f_{(M)}$

$\gamma_t := f_{[(1-\rho)M]}$ (eşik seviyesini belirle)

$E_t := \{X_{(i)} | f(X_{(i)}) \geq \gamma_t\}$ (elit örnekleri oluştur)

$\tilde{p}_t := \text{argmax}_p \sum_{X_{(i)} \in E_t} \ln f(X_{(i)}; p)$ (en yakın dağılımın parametresini belirle)

$p_t := \alpha \tilde{p}_t + (1 - \alpha)p_{t-1}$ hesapla, (α değeri ile parametre vektörünü güncelle)

Eğer ($f_{min} \geq f_{(1)}$) ise,

$X_{min} := X_1$ ve $f_{min} := f_{(1)}$

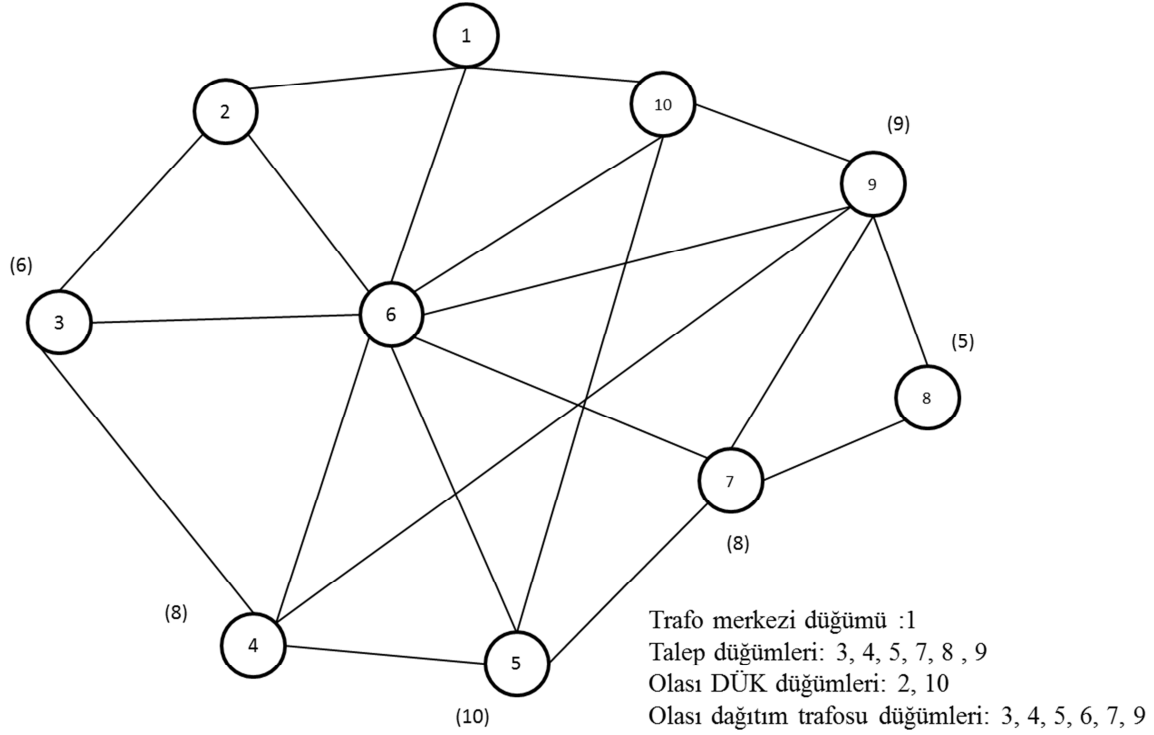
$t' := 0$

Değilse $t' := t' + 1$

$t := t + 1$

ÇEHA I'in alt işlemleri

Şekil 6.2 başlangıç şebekesi olup talep düğümlerinin yanında parantez içinde verilen değerler düğümlerin taleplerini göstermektedir.



Şekil 6.2. 10 düğümlü başlangıç şebekesi

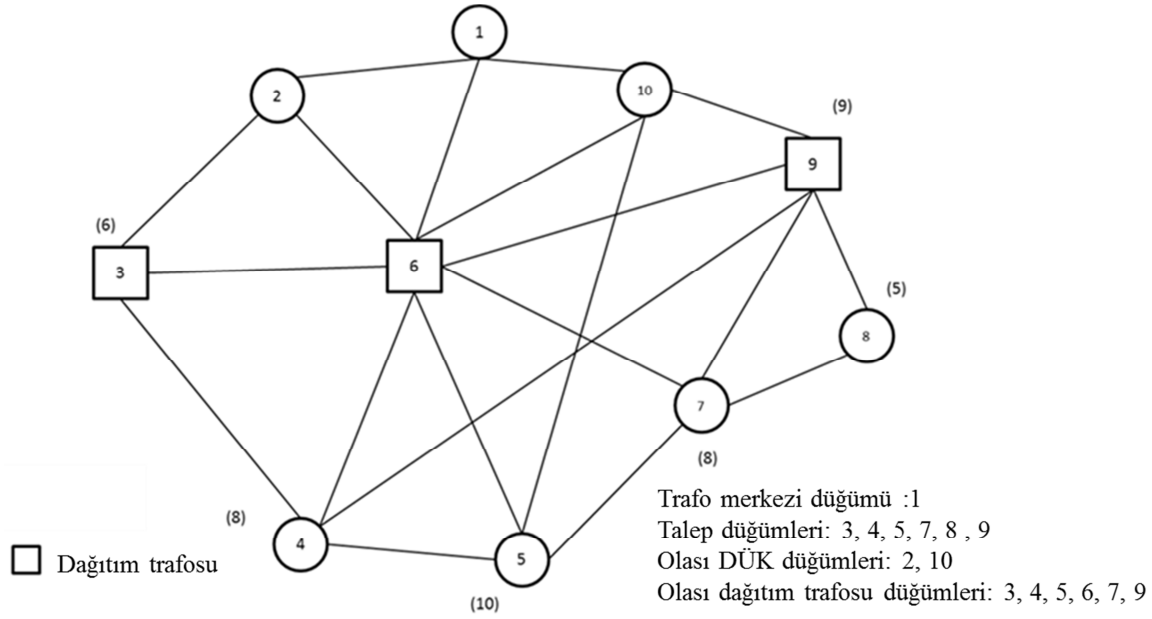
Dağıtım trafoları için yer seçimi kararı

Dağıtım trafoları için yer seçimi ÇE yöntemine dayanan bir yaklaşımla belirlenmektedir. Daha önceki bölümde anlatıldığı gibi deterministik bir kombinatoriyel eniyileme probleminin ÇE yöntemi ile çözülebilmesi için problemin ilişkili bir stokastik probleme dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu çalışmada stokastik yapı dağıtım trafoları için yer seçimi kararında sağlanmıştır. Diğer bir deyişle problemdeki rassallık şebeke üzerindeki dağıtım trafosu kurulabilecek olası düğümlerde dağıtım trafosunun yer almadığındadır. Dağıtım trafoları için yer seçimi kararı ikil değişken vektörü ile tanımlanmıştır. Bir dağıtım trafosunun bir düğümden yer alıp almadığını belirten referans vektör oluşturulurken elde etmek istediğimiz ikil değerler için Bernoulli yoğunluk fonksiyonları kullanılmıştır;

$$\phi(x, u) = \prod_{i=1}^m (u_i)^{x_i} (1 - u_i)^{1-x_i} \quad (6.24)$$

Örneğin Şekil 6.1’de verilen 10 düğümlü şebeke içinde dağıtım trafolarının kurulabileceği düğümler 3, 4, 5, 6, 7 ve 9 iken, dağıtım trafolarının 3, 6 ve 9 numaralı düğümlerde kurulduğu bir çözüm gösterimi aşağıdaki gibidir. Şebeke üzerinde dağıtım trafolarının yer seçim kararı Şekil 6.3’te gösterilmektedir.

Düğüm	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
İkil değer	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0



Şekil 6.3. Dağıtım trafosu yer seçim kararı

Dağıtım trafoları için yer seçimi yapılırken elde edilen çözümün mümkün bir çözüm olabilmesi için $DTS \geq \sum_{i \in N_D} d_i / (\text{enbüyük}_{k \in K}(PT^k))$ koşulunun sağlanması gereklidir. Bu nedenle ÇE yöntemi ile açılan dağıtım trafolarını belirleyen vektör (X) mümkün bir vektör değilse bu vektör koşulu sağlayacak şekilde mümkün bir çözüme dönüştürülmektedir. Dönüştürme işleminde (Dİ) iteratif olarak yeni bir dağıtım trafosu çözüme eklenmektedir.

Dİ'nin sözde kodu aşağıda verildiği gibidir. Burada P_{DT} ; X vektöründe belirlenmiş açılmış dağıtım trafolarını gösterirken $\bar{P}_{DT} = P_{DT} \setminus P_{DT}$ mümkün dağıtım trafoları düğüm kümesinde yer alan ancak X vektöründe açılmamış dağıtım trafo düğümler kümesini göstermektedir. $|\bar{P}_{DT}| = k_d$ iken, $\bar{P}_{DT} = \{(1), \dots, (k_d)\}$ X vektöründe açılmamış dağıtım

trafolarının sıralı kümesini göstermektedir. Bu dağıtım trafoları için olasılık vektörü $\bar{p} = \{p_{(1)}, \dots, p_{(k_d)}\}$ olarak gösterilmektedir.

Algoritma: Dİ

Girdi: $X, p, P_{DT}, \bar{P}_{DT}$

Çıktı: Mümkün bir X

$DTS < \sum_{i \in N_D} d_i / (\text{enbüyük}_{k \in K}(PT^k))$ iken

$r \leftarrow U[0,1]$

$k \leftarrow 1$

$\frac{\sum_{w=1}^k p_w}{\sum_{i \in P_{DT}} p_i} < r$ iken

$k \leftarrow k + 1$

iken bitir,

ekle (k) P_{DT}

çıkar (k) \bar{P}_{DT}

güncelle X

iken bitir.

İkincil dağıtım hatlarının rotalanması

Dağıtım trafolarının yerleri belirlendikten sonra ikincil dağıtım hatlarının rotalanması kararı verilecektir. Bu aşamada her bir talep düğümü kendisine en yakın dağıtım trafosuna atanmaktadır. En yakın dağıtım trafosu sadece uzaklıkla değil aynı zamanda düğümün talep değeri ile de ilişkilendirilmiştir. Bunun nedeni ikincil dağıtım hatlarının kurulum ve kayıp maliyetlerinin hem uzaklık hem de yük ile ilişkili olmasıdır. Aşağıda ikincil dağıtım hatlarının rotalanması (İDR) için kullanılan algoritmanın adımları verilmektedir.

İDR algoritması

Adım 1. Talep düğümlerini dağıtım trafolarına aşağıda verilen model ile ata.

$$\sum_{j \in N_{DT}} y_{ij} = 1 \quad \forall i \in N_D \quad (6.24)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i \in N_D, \forall j \in N_{DT} \quad (6.25)$$

kısıtları altında

$$Z = \text{Enküçük} \sum_{i \in N_D} \sum_{j \in N_{DT}} d_i x_{ij} y_{ij} \quad (6.26)$$

Adım 2. Dağıtım trafosu için kapasite kontrol işlemi

Eğer $\sum_{i \in N_D} d_i y_{ij} > \text{enbüyük}_{k \in K}(PT^k) \quad \forall j \in N_{DT}$ ise, Adım 3; değilse Adım 4'e git.

Adım 3. İkincil dağıtım hatları için kapasite kontrol işlemi

Eğer ikincil dağıtım hatları için kapasite kısıtı sağlanmıyorsa, kısıtı bozan dağıtım trafosundan en yüksek talepli düğümü çıkartarak en yakındaki dağıtım trafosundan başlayarak uygun bir dağıtım trafosuna ata. Adım 5'e git.

Adım 4. Tamir işlemi

Koşulu sağlamayan dağıtım trafosu içinden bir talep düğümü rassal olarak seç ve en yakındaki dağıtım trafosundan başlayarak uygun bir dağıtım trafosuna ata. Eğer uygun bir çözüm bulunuyorsa Adım 2'ye dön. Değilse Adım 5'e git.

Adım 5. Eğer uygun çözüm bulunamıyorsa olası dağıtım trafosu yerleşim yerlerinden rassal bir düğüm seçerek yeni bir dağıtım trafosu aç. Adım 1'e dön. Değilse Adım 6'ya git.

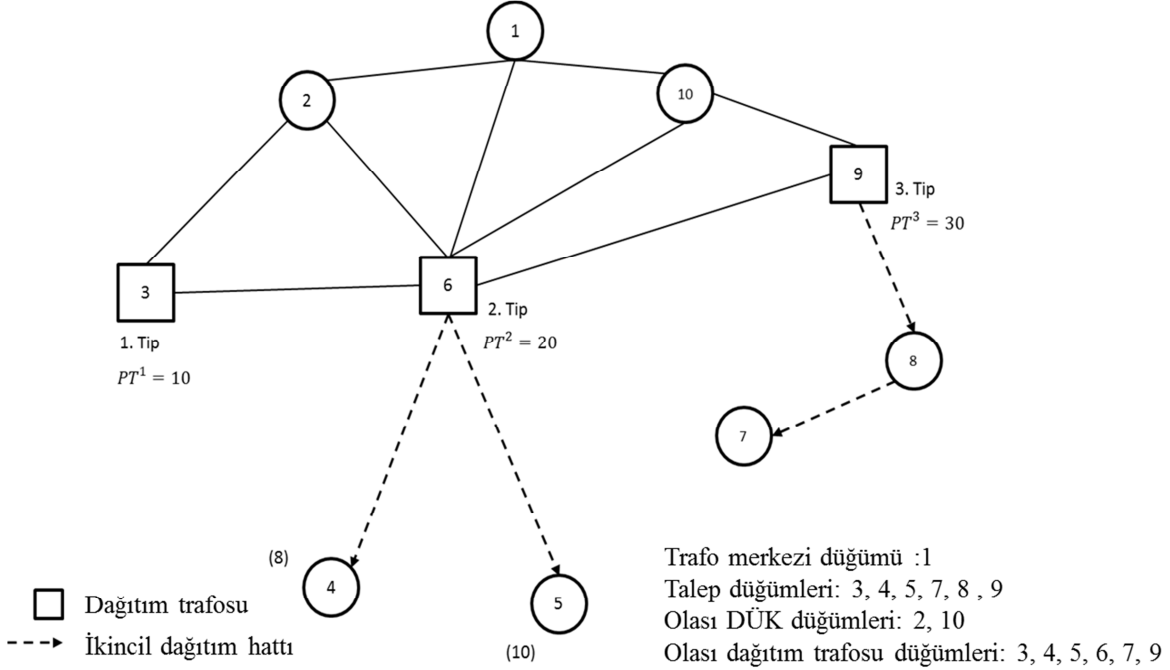
Adım 6. DUR.

Adım 1'de dağıtım trafoları kurulması için seçilmiş düğümlere talep düğümlerinin atanması problemi çözülmektedir. Bu modelde; N_{DT} ; dağıtım trafolarının açıldığı düğümler kümesi olmak üzere y_{ij} ; i. talep düğümü j. dağıtım trafosuna atanmış ise 1 değil ise 0 değerini almaktadır. x_{ij} ; i. talep düğümü ile j. dağıtım trafosu arasındaki en kısa yolu gösterirken d_i ; i. düğümün talebini vermektedir. Bu formülasyonda Eş. 6.24 her talebin sadece bir dağıtım trafosuna atanmasını sağlarken Eş 6.25 ikili değişkeni göstermektedir. Eş. 6.26 amaç fonksiyonudur ve her düğümün talep ve uzaklık ile ilişkili ağırlığının en küçük olduğu dağıtım trafosuna atanmasını sağlar.

Adım 2'de dağıtım trafoları için kapasite kontrolü yapılmaktadır. Bir dağıtım trafosuna atanan talep düğümlerinin toplamı, dağıtım trafo çeşitleri arasındaki en yüksek kapasiteli dağıtım trafosunun kapasitesini aşıyorsa elde ettiğimiz çözüm mümkün bir çözüm olmamaktadır. Böyle bir durumda Adım 4'te tanımlanan tamir işlemi ile çözüm mümkün

dağıtım trafosunun atanacağı Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Dağıtım trafoları için kapasite belirlerken aşağıdaki Eş. 6.27 kullanılır.

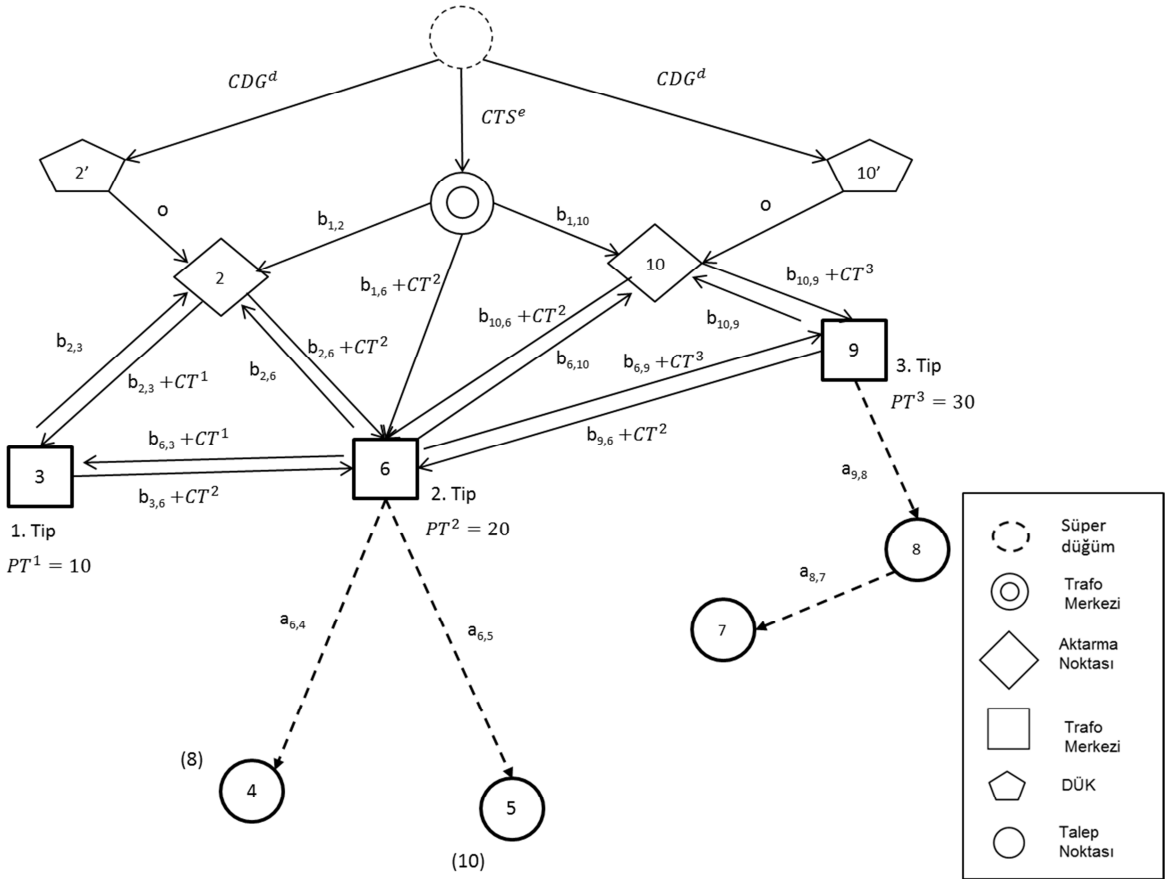
$$\sum_{i \in N_D} d_i y_{ij} \leq \text{enküçük} \left(\sum_{k \in K} Y_j^k P T^k \right) \quad \forall j \in N_{DT} \quad (6.27)$$



Şekil 6.5. Dağıtım trafolarının kapasitelerinin belirlenmesi

DAT ile şebeke dönüştürme

İkincil dağıtım şebekesinin bütün elemanları tasarlandıktan sonra elde edilen bu bilgiler ışığında birincil dağıtım şebekesinin tasarımı yapılmaktadır. Bu aşamada ilk önce şebeke DAT ile dönüştürülmekte ve dönüştürülmüş şebeke için ATDM modeli çalıştırılarak ana problem için çözüm elde edilmektedir. Yeni şebekede dağıtım trafoları ve ikincil dağıtım hatları biliniyor ve sabit olduğundan bu durum indirgenmiş şebeke olarak tanımlanmıştır. DAT ile indirgenmiş şebekenin dönüştürülmesi Şekil 6.6'da verilmektedir.



Şekil 6.6. DAT ile indirgenmiş şebekenin dönüştürülmesi

İndirgenmiş şebeke için en iyi çözümün bulunması

İndirgenmiş şebeke için en iyi çözüm ATDM formülasyonu ile bulunmaktadır. ATDM ile DÜK'lerin yerleşim yerlerinin belirlenmesi, trafo merkezinin kapasitesinin belirlenmesi ve birincil dağıtım ağlarının rotalanması kararları verilmektedir. Modelin karmaşıklığı indirgenmiş şebeke nedeni ile azalmaktadır. Bu kararlarla beraber ana problem için amaç fonksiyonu değeri hesaplanmaktadır.

Yukarıda detaylı olarak tanımlanan ÇEHA_I algoritması çalıştırıldığında elde edilen ilk çözümlerde aşağıdaki bulgulara rastlanmıştır:

1. ÇEHA_I yönteminin sonuçları en iyi çözümde bulunan dağıtım trafoları yerleri ile yakın sonuçlar vermektedir.
2. ÇEHA_I ile elde edilen ikincil dağıtım şebekesi rotalaması başarılı değildir.

Bu bulguların temel nedeni, rotalamada kullanılan algoritmanın kayıp maliyetlerini dikkate almamasıdır. İkincil dağıtım ağındaki kurulum maliyeti her ne kadar sadece uzaklık ve ilgili düğümün talebi ile ilişkili olsa da bu yaklaşımın kayıp maliyetlerinin etkisinin çözüme yansıtılmasında yetersiz kaldığı görülmüştür. İkincil dağıtım hatları için kayıp maliyetleri önemli bir unsur teşkil etmektedir ve elde edilen çözümlere göre algoritma içinde ikincil dağıtım hatlarında oluşan kayıp maliyetlerinin ihmal edilmesi ana problem için en iyi çözümden uzaklaşılmasına neden olmuştur.

6.1.4. ÇEHA_I için iyileştirme işlemi ve M_ÇEHA_I

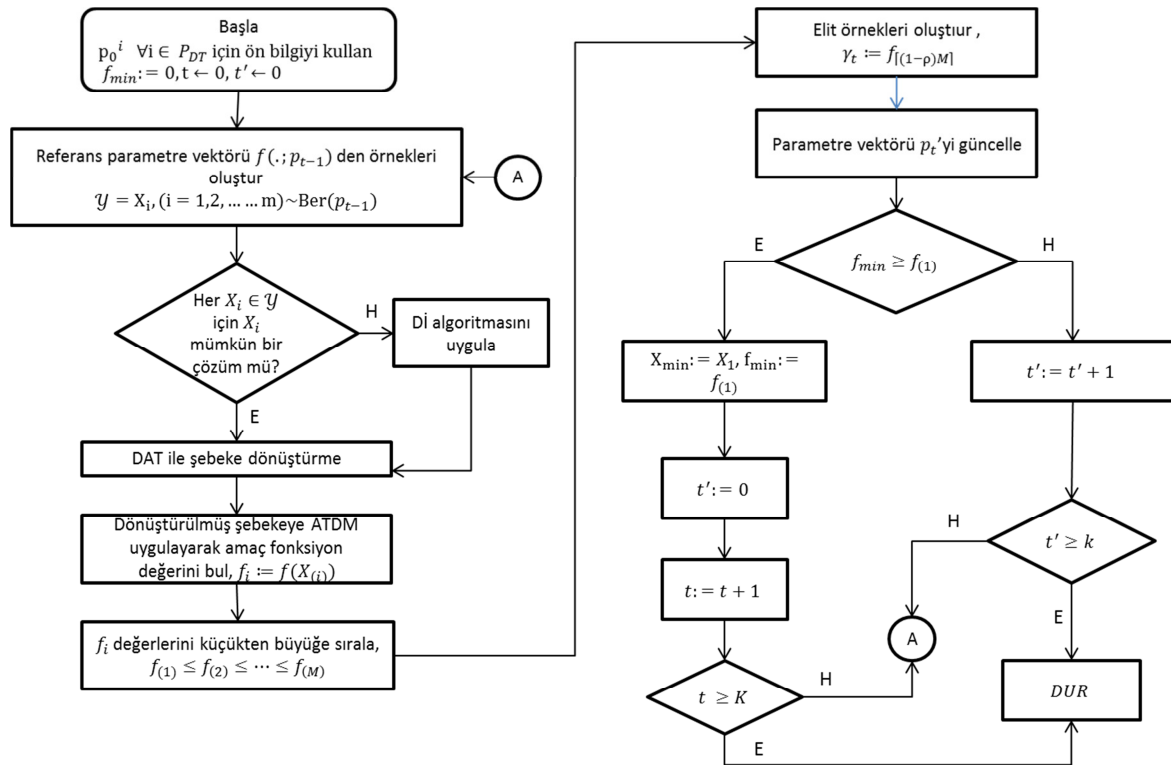
ÇEHA_I'in sonuçlarının iyileştirilebilmesi için ek bir yaklaşım denenmiştir. Bu işlemde ÇEHA_I algoritması çalıştırıldıktan sonra elde edilen en son elit kümedeki (en iyi çözümler kümesi) tüm çözümler için dağıtım trafosu yer seçim verileri ana modelde olası dağıtım trafo yerleri için kısıt olarak alınmış ve ana model sadece bu olası yerleşim yerleri kullanılarak çözdürülmüştür. Burada amaç dağıtım trafo yer seçim kararlarının en iyi sonuçlara göre yakın çözümler vermesinin avantajı ile matematiksel modelin işlem yükünü azaltmak ve ikincil dağıtım hatlarının rotalanmasında kayıp maliyetlerinin dikkate alınmamasından kaynaklanan zayıflığı gidermektir. Bu iyileştirme işleminde problemin çözümü için düğüm tabanlı model veya önce DAT uygulanarak akış tabanlı model kullanılabilir. Bu çalışmada çözüm süresinin daha kısa olması nedeni ile öncelikle problemlere DAT uygulanmış ve akış tabanlı model ile sonuçlar elde edilmiştir. ÇEHA_I üzerinde eklenen bu iyileştirme işlemi ile elde edilen algoritma M_ÇEHA_I olarak tanımlanmıştır.

Bir sonraki bölümde ÇEHA_I'in geliştirilmiş hali olan ÇEHA_II algoritması detaylı olarak anlatılmaktadır.

6.1.5. BEDS için ÇEHA_II

Bu bölümde ÇEHA_I'in ilk denemelerde dikkate çarpan zayıf yönlerini güçlendirmek için yeni bir algoritma önerilmiştir. ÇEHA_I dağıtım trafoları için yer seçimi kararlarında en iyi çözüm sonuçları ile karşılaştırıldığında başarılı, ancak ikincil dağıtım hattının rotalanmasında zayıf kalmaktadır. Bu nedenle ÇEHA_II ikincil dağıtım hatlarının rotalanması için kayıp maliyetlerini de dikkate alan daha etkin bir yöntem kullanılmaktadır.

ÇEHA_II algoritmasında, bir çözümün elde edilmesi iki aşamalı olarak gerçekleşmektedir. İlk aşamada dağıtım trafoları yer seçim kararı ÇEHA_I’de olduğu gibi ÇE yöntemi içinde elde edilen olasılık değerlerine bağlı olarak belirlenmektedir. Daha sonraki ikinci aşamada ilk aşamada elde edilen dağıtım trafo yer seçim kararları girdi olarak alınıp ilgili dağıtım trafosu yerleşim senaryosu için amaç fonksiyonu değeri matematiksel modelin çözümü ile hesaplanmaktadır. ÇEHA_II algoritmasının her adımında ÇE yönteminin öğrenme özelliği ile daha iyi sonuçlar elde edilerek çözümlerde iyileşme sağlanmaktadır. Bu yöntem ile dağıtım trafosu yer seçim kararı ana problemde artık yer almadığı için matematiksel modelin arama uzayı daralmış olmaktadır. Bu nedenle en iyi çözüm değerinin bulunması için gerekli çözüm süresinin kabul edilebilir seviyelerde olması beklenmektedir. Dağıtım trafosu yer seçim kararının verildiği ilk aşamada çözüm vektörünün mümkün bir çözüm olabilmesi için $DTS \geq \sum_{i \in N_D} d_i / (\text{enbüyük}_{k \in K}(PT^k))$ koşulunun sağlanmasına dikkat edilmektedir. Bu koşul sağlanmadığında Dİ algoritması ile çözüm vektörü mümkün bir vektör haline getirilmektedir. ÇEHA_II’nin akış şeması Şekil 6.7’de verilmektedir.



Şekil 6.7. ÇEHA_II akış şeması

ÇEHA_II'nin sözde kodu aşağıda verilmektedir.

Algoritma: ÇEHA II

<i>Girdi: N</i>	(düğümler kümesi)
<i>Girdi: A</i>	(ayrıntlar kümesi)
<i>Girdi: P_{DT}</i>	(dağıtım trafosu kurulabilecek düğümler kümesi)
<i>Girdi: p₀: = (p_{0,1},, p_{0,m})</i>	(başlangıç referans vektörü)
<i>Girdi: M</i>	(popülasyon büyüklüğü)
<i>Girdi: ρ</i>	(elit çözüm oranı)
<i>Girdi: α</i>	(düzgünleştirme katsayısı)
<i>Girdi: K</i>	(iterasyon sayısı limiti)
<i>Girdi: k</i>	(iyileşme görülmeyen iterasyon sayısı limiti)
<i>Çıktı : X_{min}</i>	(en iyi çözüm örnek vektörü)
<i>Çıktı : f_{min}</i>	(en iyi çözümün amaç fonksiyon değeri)

Başlangıç p₀ üret, $p_0^i := \frac{1}{2} \quad \forall i \in P_{DT}, f_{min} := 0, t \leftarrow 0, t' \leftarrow 0$

(t' := 0'dan k ve t := 0'dan K)'ya kadar;

i := 1'den M'ye kadar,

$f(\cdot; p_{t-1})$ den $\mathcal{Y} = X_i, (i = 1, 2, \dots, m) \sim \text{Ber}(p_{t-1})$

Eğer $DTS < \sum_{i \in N_D} d_i / (\text{enbüyük}_{k \in K}(PT^k))$ ise;

Dİ algoritmasını uygula.

$\forall X_i \in \mathcal{Y},$

İndirgenmiş şebekeyi DAT ile dönüştür.

$f_i := f(X_{(i)})$ değerlerini ATDM ile hesapla.

f_i değerlerini küçükten büyüğe sırala, $f_{(1)} \leq f_{(2)} \leq \dots \leq f_{(M)}$

$\gamma_t := f_{\lfloor (1-\rho)M \rfloor}$ (eşik seviyesini belirle)

$E_t := \{X_{(i)} | f(X_{(i)}) \geq \gamma_t\}$ (elit örnekleri oluştur)

$\tilde{p}_t := \text{argmax}_p \sum_{X_{(i)} \in E_t} \ln f(X_{(i)}; p)$ (en yakın dağılımın parametresini belirle)

$p_t := \alpha \tilde{p}_t + (1 - \alpha) p_{t-1}$ hesapla, (α değeri ile parametre vektörünü güncelle)

Eğer ($f_{min} \geq f_{(1)}$) ise,

$X_{min} := X_1$ ve $f_{min} := f_{(1)}$

$t' := 0$

Değilse $t' := t' + 1$

$t := t + 1$

Yukarıda sözde kodu verilen ÇEHA_II algoritmasında matematiksel model üretilen her dağıtım trafosu yer seçim alternatifi için çözdürülmektedir. Bu yaklaşım en iyi çözüme ulaşmada başarılı sonuçlar vermektedir. Ancak bazı durumlarda algoritmanın çözüm süresi her adımda matematiksel model çalıştırıldığı için uzamaktadır. Bu dezavantajın giderilmesi için başlangıç elit kümesine iyi bir çözümün dahil edilmesi ve algoritmanın iyi sonuçlara daha çabuk yaklaşmasının hedeflendiği yeni bir yaklaşım denenmiştir.

İleriki bölümde ÇEHA_II'nin iyileştirilmesi için önerilen yaklaşım detaylı olarak anlatılmıştır.

6.1.6. ÇEHA_II için iyileştirme işlemi ve M_ÇEHA_II

Bu bölümde ÇEHA_II'nin referans vektör değerleri oluşturulurken kullanılan olasılık değerlerinin ön bir bilgiye dayanarak elde edilmesinin algoritma performansına etkisinin incelenmesi için yeni bir yaklaşım önerilmektedir. Daha önceki bölümlerde referans vektör belirlenirken herhangi bir ön bilgi olmadığı için aday çözümlerin seçilme olasılığının birbirine eşit olduğu ($p_0^i := \frac{1}{2}, \forall i \in P_{DT}$) varsayılmıştı. Ancak referans vektör oluşturulurken bir ön bilgi kullanılarak algoritmayı arama uzayında iyi çözümlerin olduğu bölgeye hızlı bir şekilde yönlendirmenin algoritma performansını arttıracığı düşünülmüştür. Bu yapının etkisinin incelenmesi amacıyla iyi çözümlerin bulunabileceği durumların seçim olasılığının artırılması için bir yöntem geliştirilmiştir. Literatürde referans vektör oluştururken ön bilginin kullanıldığı bir çalışmaya rastlanmamıştır.

ÇEHA_II'de elit küme içerisindeki çözümler dağıtım trafosu için yer seçim kararlarından oluşmaktadır. Dağıtım trafosu için yer seçim kararı, ÇE yönteminde tanımlanan olasılık fonksiyonu değerlerine göre belirlenmektedir. Standart durumda bütün dağıtım trafolarının seçilme veya seçilmeme olasılığı eşittir. Bu bölümde önerilen yapıda iyi bir çözüm olduğu bilinen yer seçim kararlarının başlangıç olasılık değerleri daha yüksek olarak atanmaktadır. Bir yer seçim kararının iyi olup olmadığının belirlenmesi için matematiksel model tabanlı bir yaklaşım kullanılmıştır.

Dağıtım trafolarının yer seçim kararı bir tesis yerleştirme problemidir ve literatürde tesis yer seçimi problemleri için çok sayıda algoritma geliştirilmiştir. Tesis yeri seçim

problemleri n adet tesisin m adet konuma, taşıma maliyetlerinin minimize edilecek şekilde yerleştirilmesi konusu ile ilgilenmektedir (Tavakkoli ve Shayan, 1998). Daha detaylı bir tanım verilecek olursa; tesis yer seçimi problemleri bir grup tesisin çeşitli kısıtlar göz önünde bulundurularak, tüketicilerin (talep noktası) taleplerinin karşılanması maliyetlerini minimum düzeye indirecek şekilde uygun konumlara yerleştirilmesini ve her bir müşterinin hizmet veren tesislere atanmasını kapsayan problemlerdir. Literatürde tesis yer seçimi problemleri için farklı bir çok yöntem önerilmiştir. Bu çalışmada dağıtım trafoları için yer seçim kararı p -medyan problemi olarak modellenmiştir. P -medyan problemi n adet talep noktasına hizmet verecek olan p adet tesisin tüm sistemin ağırlıklı maliyetini en küçükleyecek şekilde şebeke üzerinde yerleştirilmesi ile ilgilenmektedir (Hakimi, 1965). P -medyan probleminde p adet tesis sadece şebeke üzerindeki düğümlere yerleştirilebilmektedir. P -medyan probleminin matematiksel modeli aşağıda verilmiştir.

Parametreler ve karar değişkenleri

d_{ij}	$n * n$ en kısa yol matrisi
w_i	i . düğümün talebi
p	atanacak tesis sayısı
x_{ij}	$n * n$ atama matrisi; i . düğümü j tesisine atanıyorsa 1, değilse 0,
x_{jj}	j düğümü bir tesis ise 1, değilse 0.

P-medyan matematiksel modeli

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1 \quad \forall i \in N \quad (6.28)$$

$$\sum_{j=1}^N x_{jj} = p \quad (6.29)$$

$$x_{ij} \leq x_{jj} \quad \forall i, j \in N \quad (6.30)$$

$$x_{ij}, x_{jj} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in N \quad (6.31)$$

Kısıtları altında

$$Z = \text{Enküçük} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_i d_{ij} x_{ij} \quad (6.32)$$

Eş. 6.28 her talebin sadece bir tesise atanmasını sağlayan kısıttır. Eş. 6.29 açılan tesis sayısının p değerine eşit olmasını sağlar. Eş. 6.30 kapalı bir tesise bir talebin atanmasını engeller. Eş. 6.31 ikil değişken kısıttır ve açılmamış bir tesise herhangi bir talebin atanmamasını sağlayan kısıttır. Amaç fonksiyonunu ifade eden Eş. 6.32, en küçük maliyetle bütün taleplerin p adet tesise atanmasını sağlar. P-medyan probleminin klasik hali NP-zor olmasına rağmen ağaç yapılı şebekelerde p-medyan problemi polinom zamanda çözülebilir (Kariv ve Hakimi, 1979). Bu çalışmada p-medyan probleminin çözümü için Lagranj gevşetme tekniğine dayalı bir sezgisel yöntem geliştirilmiştir. İlerleyen bölümlerde öncelikle Lagranj gevşetme tekniğinden bahsedilecek ve p-medyan problemi için uygulanması detaylı olarak anlatılacaktır.

Lagranj gevşetme tekniği doğrusal programlama ile formüle edilen bir problemin çözümünün elde edilebilmesi için problemin göreceli olarak daha kolay yeni bir probleme indirgenmesi esasına dayanmaktadır. Bu teknik zor kombinatoriyel problem formülasyonlarının, kolay problemlere eklenen kısıt kümeleri ile zorlaştığı gözlemine dayanılarak ortaya çıkarılmıştır. Problemi zorlaştıran bu kısıtların amaç fonksiyonuna bir ceza fonksiyonu ile transfer edilmesi Lagranj gevşetme tekniğinin arkasındaki temel fikirdir. Gevşetilmiş problemin amaç fonksiyonundan elde edilen değer orijinal probleme bir sınır değeri (en küçükleme problemi için alt sınır) üretmektedir. Üretilen bu sınır değeri genellikle orijinal problem için uygun çözüm oluşturmamaktadır. Bu nedenle, probleme bir uygun çözüm üretebilmek için, problemin yapısına uygun olarak tasarlanan bir sezgisel yaklaşım kullanılmaktadır (primal sezgisel). Lagranj gevşetme sezgiselinde amaç alt sınırı değerlerinin en yüksek değerini bulabilmektir. Bu çalışmada Lagranj gevşetme yöntemi ile orijinal probleme en yüksek alt sınır değerleri bulunmaya çalışırken altgradyan algoritmasından (Subgradient Algorithm) yararlanılmıştır. Algoritma sona erdiğinde elde edilen en yüksek alt sınır ve primal sezgiselden elde edilen en iyi uygun çözüm değeri arasında makul sayılabilecek bir fark kaldığında yeteri kadar iyi bir algoritma geliştirildiği söylenebilir. Lagranj sezgiselinin 3 temel bileşeni yukarıda belirtildiği gibi; Lagranj gevşetme, primal sezgisel ve altgradyan aramadır.

Lagranj sezgiseli geliştirilirken ilk adım hangi kısıtın (kısıtların) gevşetileceğine karar vermektir. Bizim problemimizde Lagranj sezgiseli p-medyan problemi çözmek için kullanılacaktır. Problemin matematiksel modeline baktığımızda seçilebilecek kısıtlara göre iki çeşit Lagranj gevşetme (LG1) ve (LG2) aşağıda verilmiştir;

Lagranj gevşetme 1 (LG1)

Eş. (6.28), (6.30), (6.31) kısıtları altında

$$Z_1(u) = \text{Enküçük} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_i d_{ij} x_{ij} + u \left(\sum_{j=1}^N x_{ij} - p \right) \quad (6.33)$$

Yukarıdaki gevşetme ile oluşan alt problem basit bir tesis yer seçimi problemidir. Hanjoul ve Peeters (1985), LG1'in p-medyan problemi için etkin bir yöntem olduğunu gösterdiği halde, LG1'in performansı bazı test problemlerinde LG2'nin belirgin şekilde altında kalmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada aşağıda verilen LG2 formülasyonu Lagranj gevşetme için kullanılmıştır.

Lagranj gevşetme 2 (LG2)

Eş. (6.29), (6.30), (6.31) kısıtları altında

$$Z_2(\lambda) = \text{Enküçük} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N w_i d_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^N \lambda_i \left(1 - \sum_{j=1}^N x_{ij} \right) \quad (6.34)$$

LG2 fonksiyonunun amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$Z_2(\lambda) = \text{Enküçük} \sum_{i=1}^N \lambda_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (w_i d_{ij} - \lambda_i) x_{ij} \quad (6.35)$$

Belirli Lagranj çarpanları vektörü için, $\lambda' = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N]$, en iyi x_{jj} , $j \in N$ değerleri aşağıdaki eniyileme problemini çözerek elde edilebilir;

$$\sum_{j=1}^N x_{jj} = p \quad (6.36)$$

$$x_{jj} \in \{0, 1\} \quad (6.37)$$

kısıtları altında

$$\text{Enküçük} \sum_{j=1}^N (x_{jj} \sum_{i=1}^N \min(w_i d_{ij} - \lambda_i, 0)) \quad (6.38)$$

Bu problemin çözümü $\sum_{i=1}^N \min(w_i d_{ij} - \lambda_i, 0)$ değerini en küçükleyen p düğümü seçmektir. Tesis yerleri seçildikten sonra atama değişkenleri x_{ij} aşağıdaki Eş. 6.39'da verildiği gibi elde edilebilir.

$$x_{ij} \begin{cases} 1 & \text{if } x_{jj} = 1 \text{ ve } w_i d_{ij} - \lambda_i < 0, \\ 0 & \text{dd} \end{cases} \quad (6.39)$$

Belirli bir λ değeri için x_{jj} , $j \in N$ ve x_{ij} , $i, j \in N$ değişkenlerinin en iyi değerlerini bulduktan sonra elde ettiğimiz $Z_2(\lambda)$ değeri orijinal problem Z için bir alt sınır değeridir. En büyük alt sınırı bulabilmek için, $Z_2(\lambda)$ değerini en büyük yapan λ değerini bulmak gerekir. Bu durumda çözmemiz gereken problem Eş. 6.40'da verilmiştir.

$$\text{Enbüyük} \left[Z_2(\lambda) = \text{Enküçük} \sum_{i=1}^N \lambda_i + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N (w_i d_{ij} - \lambda_i) x_{ij} \right] \quad (6.40)$$

Yukarıdaki formülasyonda büyük parantezler içindeki denklem Eş.6.36-6.39 kullanılarak çözülür. Dış en büyükleme probleminin çözümü için de bu çalışmada alt gradyan yöntemi kullanılmıştır (Agmon, 1954; Held ve Karp, 1971; Motzkin ve Schoenberg, 1954). Bu yöntemde başlangıç girdisi olarak, λ^0 , çarpan vektörü kullanılır ve dual problemin iyi çözümüne yakınsayan bir dizi çarpan vektör $(\lambda^1, \lambda^2, \dots, \lambda^\infty)$ üretilir. Çarpan vektör dizileri üretilirken kullanılan güncelleme formülasyonu Eş. 6.41'deki gibidir.

$$\lambda_i^{q+1} = \lambda_i^q + t^q \left(1 - \sum_{j=1}^N x_{ij}^q \right) \quad 1 \leq i \leq N \quad (6.41)$$

Eş. 6.41'de q , iterasyon indeksi; x_{ij}^q , $Z_2(\lambda^q)$ için en iyi çözüm ve t^q ise pozitif adım genişliğidir. Bu çalışmada t^q değeri Held, Wolfe ve Crowder (1974)'te kullanıldığı gibi Eş. 6.42'de verildiği gibi hesaplanmıştır:

$$t^q = \frac{\tau^q (Z_H^q - Z_2(\lambda^q))}{\sum_{i=1}^N (1 - \sum_{j=1}^N x_{ij}^q)^2} \quad (6.42)$$

Z_H^q , q . iterasyonda primal sezgisel ile elde edilen üst sınır ve τ^q ($0 < \tau^q < 2$) düzgünleştirme sabitidir. Bu çalışmada primal sezgisel ile bir iterasyondaki üst sınır değeri her düğümün en yakın medyana (dağıtım trafosuna) atanması ile bulunmaktadır.

Düzgünleştirme katsayısı Avella (2012)'de önerildiği gibi başlangıçta 2 olarak alınmış, $\tau^0 = 2$, ve 30 iterasyon boyunca alt sınır değerinde bir iyileşme görülmezse mevcut değer ikiye bölündüğünde elde edilen değer ($\tau^{q+1} = \frac{\tau^q}{2}$) kullanılmıştır. Alt gradyan yöntemi düzgünleştirme katsayısı 0,005'ten küçük olduğunda durmaktadır.

P-medyan probleminde şebeke üzerinde açılacak olan tesis sayısı önceden belirlidir. Bu tez kapsamında ele alınan problemde ise tesis sayısı yani dağıtım trafosu sayısı da ana problemin karar değişkenlerinden biridir. Bu nedenle bu değer in elde edilmesi için iteratif bir yaklaşım kullanılmıştır. Şekil 4.6'da açılan tesis sayısı ile toplam maliyet arasındaki ilişkiye bakıldığında, açılan tesis sayısındaki artışın belirli bir değerden sonra toplam maliyeti arttırdığı görülmektedir. Buradan yola çıkarak, p-medyan problemi mümkün bir çözüm oluşturabilecek en küçük dağıtım trafosu sayısı belirlenerek, öncelikle bu değer için çözümlenmektedir. Daha sonra bu değer her seferinde bir birim arttırılarak, her yeni değer için problem tekrar çözdürülmektedir. Bu arttırma işlemi amaç fonksiyonunda iyileşme görülme-yene (azalma yerine artış görülene) kadar devam eder. Amaç fonksiyonunda en son iyileşme görülen tesis sayısı p-medyan problemi için dikkate alınan değerdir.

Dağıtım trafoları için yer seçim kararı verildikten sonra bu bilgi ÇEHA_II'nin başlangıç olasılık değerlerini hesaplamada ön bilgi olarak kullanılmaktadır. Test problemlerinde p-medyan modelinin sonuçları ile en iyi çözüm değerleri karşılaştırıldığında, p-medyan probleminin bulunduğu sonuçların genellikle en iyi model sonuçları ile komşu ya da aynı dağıtım trafo yerleşimleri olduğu görülmüştür. Bu bilgiyi ÇEHA_II için kullanırken, p-medyan probleminin elde ettiği yer seçim kararları ve bu yerleşimlerin komşu aday yerleşim yerleri için seçilme olasılıkları daha yüksek olarak belirlenmiştir. Komşuluk ilişkileri belirlenirken küçük, orta ve büyük boyutlu test problemlerinde farklı sayıda komşu yerleşim yerleri kullanılmıştır. P-medyan modelinin bulunduğu bir çözümde her dağıtım trafosu yer seçim kararı için, dağıtım trafosu yerleşiminin kendisi ve en yakın c komşusu (küçük, orta ve büyük boyutlu test problemleri için c değeri sırasıyla 1, 2 ve 4 olarak alınmıştır) için başlangıç olasılık değerleri diğer aday yerleşim yerlerine göre daha yüksek olarak atanmıştır.

Başlangıç olasılık değerleri için yapılan deneysel analizlerde, $p_0^i := \frac{3}{4}, \forall i \in P_{CDT}$ olduğunda daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. P_{CDT} , p-medyan probleminin bulunduğu yerleşimleri ve her yerleşimin c komşu aday yerleşimlerinden oluşan kümeyi göstermektedir. ÇEHA_II'den türetilen ve ön bilgi kullanarak, başlangıç referans vektöründe farklı başlangıç olasılık değerlerinin kullanıldığı durum M_ÇEHA_II olarak kısaltılmıştır.

İlerleyen bölümde ÇEHA_I, M_ÇEHA_I, ÇEHA_II ve M_ÇEHA_II'nin performansları deneysel olarak test problemleri üzerinde analiz edilmiştir.

6.2. Deneysel Çalışmalar

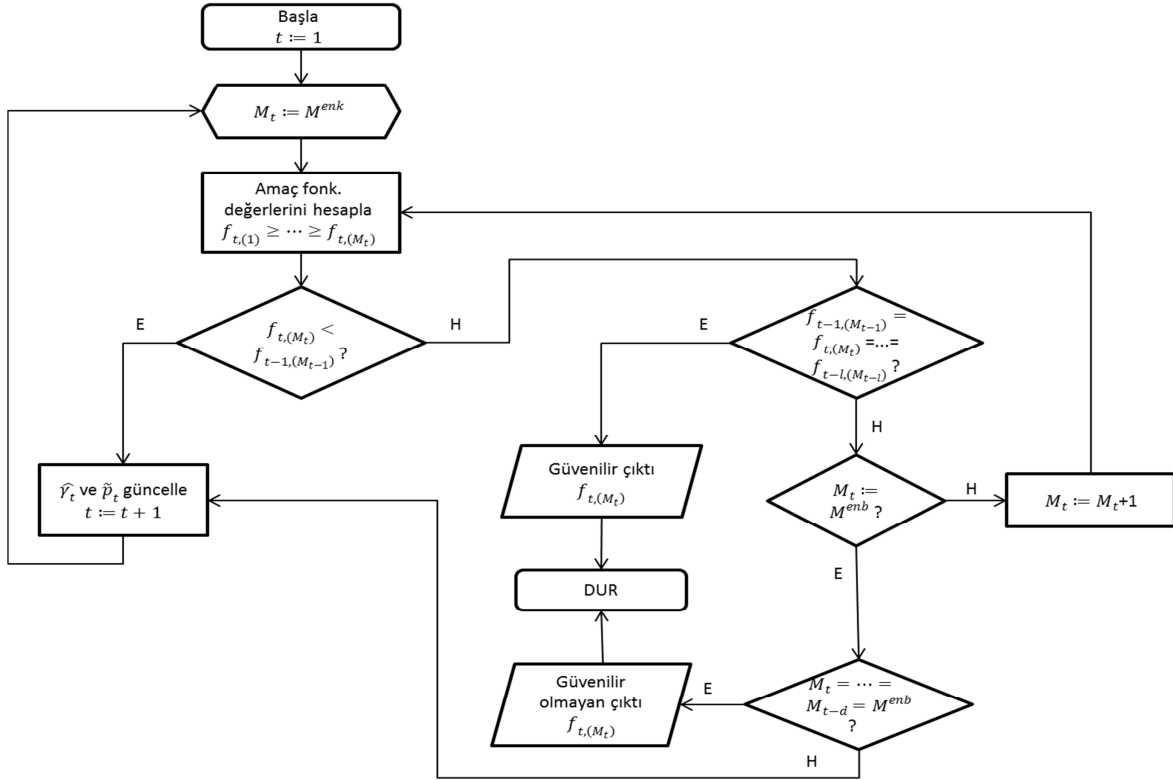
Önerilen melez sezgisel algoritmaların performanslarının deneysel olarak karşılaştırılabilmesi için Bölüm 5.4.2'de tanımlanan test problemleri kullanılmıştır. Bu bölümde öncelikle önerilen algoritmalara ait parametreler için uygun değerlerin belirlenmesi amacıyla yapılan çalışmalardan bahsedilmiştir. Son olarak test problemleri üzerinde önerilen algoritmalarının etkinliği karşılaştırmalı olarak incelenmiştir.

Parametrelerin belirlenmesi: Önerilen ÇE tabanlı melez algoritmaların parametreleri; popülasyon büyüklüğü (M), elit çözüm oranı (ρ), düzgünleştirme katsayısı (α), iyileşme sağlanmayan iterasyon sayısı limiti (k) ve problemi durdurma koşulu (K) olarak tanımlanmıştır. Literatürde CE parametrelerinin belirlenmesi için farklı yöntemler geliştirilmiştir (Habet, Li, Devendeville ve Vasquez, 2002; Kroese ve diğerleri, 2011; Margolin, 1975; Rubinstein ve Kroese, 2004). Bu yaklaşımlarda problem tipine göre popülasyon büyüklüğü, elit küme ve düzgünleştirme katsayısının sabit veya uyarlamalı olarak kullanıldığı durumlar, düzgünleştirme katsayısının kullanılıp kullanılmadığı durumlar, elit kümenin tüm çözümler arasından seçildiği ya da sadece mevcut iterasyon çözümleri arasından seçildiği durumlar ve algoritma performansına etkileri incelenmiştir. Popülasyon büyüklüğünün büyük seçilmesi her iterasyonda algoritmanın daha geniş bir arama uzayında çalışmasını sağladığından algoritmanın en iyi çözüme yaklaşma olasılığını arttırmaktadır. Ancak diğer taraftan çok büyük popülasyon büyüklüğü algoritma çalışma zamanını uzatacağından belirli bir zaman dilimi içinde daha az iterasyon sayısına neden olmaktadır. Bu nedenle en uygun parametre setinin belirlenebilmesi algoritmanın performansını önemli ölçüde etkilemektedir (Chockler, Ivrii, Matsliah, Rollini ve Sharygina, 2013).

Bu çalışmada algoritma parametre setinin belirlenmesinde tam otomatik çapraz entropi (TOÇE) (fully automated cross entropy_FACE) olarak adlandırılan yöntem kullanılmıştır (De Boer ve diğerleri, 2005). TOÇE algoritmasında popülasyon büyüklüğü, her iterasyonda uyarlamalı olarak belirlenmektedir, $M = M_t$. De Boer ve diğerleri (2005)'te, TOÇE algoritmasının popülasyon büyüklüğü ve elit örnek oranının sabit olarak alındığı klasik ÇE algoritmasına göre 2 kat hızlı yakınsadığını göstermiştir. Bir en küçükleme probleminde, t . iterasyondaki M_t örneğin performans değerlerinin sıralaması $f_{t,(1)} \geq f_{t,(2)} \geq \dots \geq f_{t,(M_t)}$ olsun. TOÇE algoritmasına göre her t iterasyonun sonunda parametre vektörünün güncellenmesi, önceden belirlenmiş sabit bir N^{elit} sayısına (elit örnekler) göre yapılmaktadır. Böylece elit örneklerin bulunduğu küme E_t , N^{elit} sayısı kadar çözüm içermektedir ve $\{X_{(1)}, \dots, X_{(M_t)}\}$ örnekleri için performans değeri en büyükten en küçüğe $f(X_{(1)}), \dots, f(X_{(M_t)})$ olarak sıralanmaktadır. $\hat{y}_t = f_{(M_t - N^{elit} + 1)}$, N^{elit} sayısı kadar örneğin içindeki en kötü performansa sahip örneği göstermektedir. Bu durumda parametre vektörünün güncellenmesi ise $\tilde{p}_t := \operatorname{argmax}_p \sum_{X_{(i)} \in E_t} \ln f(X_{(i)}; p)$ formülasyonuna göre yapılır. TOÇE algoritmasında popülasyon büyüklüğü (M) ve elit çözüm oranı (ρ),

uyarlamalı olarak hesaplanmaktadır. Bu iki parametre yerine TOÇE algoritmasında N^{elit} sayısı parametre olarak belirlenmektedir. Her iterasyondaki elit çözüm oranı $\rho_t = N^{elit} / M_t$ oranlaması ile elde edilebilir. Bu çalışmada N^{elit} parametre değeri $N^{elit} = 0,2 * n$ olarak belirlenmiştir. TOÇE'nin her iterasyonunda $f_{t,(M_t)} < f_{t-1,(M_{t-1})}$ olasılığının yüksek olduğu bir örnekleme planı oluşturulmaya çalışılır. Bunu sağlayabilmek için her iterasyonda M_t değeri için geniş bir aralık arasında bir değer seçilmelidir, $M^{enk} \leq M_t \leq M^{enb}$. Bu çalışmada stokastik düğümlü şebekelerde önerildiği gibi $M^{enk} = n$, $M^{enb} = 20 * n$ olarak alınmıştır. Her iterasyon için popülasyon genişliği (M_t) ilk olarak M^{enk} değerine eşit olarak alınır ve $f_{t,(M_t)} < f_{t-1,(M_{t-1})}$ koşulu sağlanana kadar M_t iteratif olarak artırılır. Eğer $M_t = M^{enb}$ olduğu halde koşul sağlanmamışsa, $\hat{\gamma}_t$ ve \tilde{p}_t diğer iterasyona geçilmeden mevcut duruma göre güncellenir. Ancak TOÇE belirli bir c iterasyon sayısı boyunca M^{enb} popülasyon genişliğini kullandığı halde $f_{t,(M_t)} < f_{t-1,(M_{t-1})}$ koşulunu sağlayamıyorsa, (örn. $c = 3$) problemin “zor” bir problem olduğu ve elde edilen çözümün en iyi çözümün güvenilir olmayan bir tahmini olduğu söylenir. Algoritma içinde $f_{t,(M_t)} < f_{t-1,(M_{t-1})}$ koşulunun yanısıra her iterasyonda $\hat{\gamma}_t < \hat{\gamma}_{t-1}$ koşulu da elit örnekler içindeki en kötü performansa sahip çözümün iyileştirilmesini sağlar.

TOÇE algoritmasının akış şeması Şekil 6.8'de gösterilmektedir.



Şekil 6.8. TOÇE algoritmasının akış şeması (De Boer ve diğerleri (2005)'ten esinlenilmiştir.)

Şekil 6.8'de akış şeması verilen TOÇE algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir:

- Her t iterasyonunda, $t = 1, 2, \dots, M_t$ ($M^{enk} \leq M_t \leq M^{enb}$) büyüklüğünde örnek parametre vektöründen elde edilir. Elde edilen örnekler performans değerlerine göre $f_{t,(1)} \geq f_{t,(2)} \geq \dots \geq f_{t,(M_t)}$ olarak sıralanır.
- Eğer $f_{t,(M_t)} < f_{t-1,(M_{t-1})}$ ve $\hat{y}_t < \hat{y}_{t-1}$ koşulları sağlanıyorsa \hat{y}_t ve \tilde{p}_t güncellenir.
- Eğer $f_{t,(M_t)} < f_{t-1,(M_{t-1})}$ ve $\hat{y}_t < \hat{y}_{t-1}$ koşulları sağlanmıyorsa $f_{t,(M_t)} = \dots = f_{t,(M_t-d)} = f_{t-1,(M_{t-1})}$ koşulu bir d tamsayı değeri için kontrol edilir. Eğer bu durum sağlanıyorsa $f_{t,(M_t)}$ en iyi çözümün güvenilir bir tahmini olarak kabul edilir ve algoritma durur. Algoritmanın durdurma koşulu olan bu kısıt her t iterasyonundaki en iyi d çözümünün bir önceki iterasyonun en iyi çözümü ile aynı olduğunu göstermektedir.
- Eğer $M_t = M^{enb}$ iken, $f_{t,(M_t)} < f_{t-1,(M_{t-1})}$, $\hat{y}_t < \hat{y}_{t-1}$ ve $f_{t,(M_t)} = \dots = f_{t,(M_t-d)} = f_{t-1,(M_{t-1})}$ koşullarının hiçbiri sağlanmıyorsa M^{enb} kadar örnek kullanılarak \hat{y}_t ve \tilde{p}_t güncellenir ve Adım 3'e geri dönlür.

- Eğer belirli c iterasyon sayısı boyunca $M_t = M^{\text{enb}}$ ve $f_{t,(M_t)} < f_{t-1,(M_{t-1})}$, $\hat{Y}_t < \hat{Y}_{t-1}$ ve $f_{t,(M_t)} = \dots = f_{t,(M_t-d)} = f_{t-1,(M_{t-1})}$ koşullarının hiçbiri sağlanmıyorsa TOÇE problemin “zor” bir problem olduğunu bildirir ve $f_{t,(M_t)}$ en iyi çözümün güvenilir olmayan bir tahmini olarak kabul edilir ve algoritma durur.

Sayısal sonuçların karşılaştırılması: Önerilen algoritmalar Intel(R) Core(TM) i7-3630QM CPU 2.40 GHz hızında, 8 GB hafızalı “Windows 8” işletim sistemi ile çalışan bilgisayar ortamında Visual C++ programlama dilinde kodlanmıştır. Önerilen algoritmanın içinde çözdürülen matematiksel modellerin çözümü için CPLEX 12.1 matematiksel model çözücüsü kullanılmıştır. Önerilen algoritmaların etkinliğinin belirlenmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmada, her test problemi önerilen algoritma ile 20 kez çözdürülerek elde edilen amaç fonksiyonu değerleri ve çözüm süreleri tutulmuştur.

Önerilen algoritmalar ÇEHA_I, M_ÇEHA_I, ÇEHA_II ve M_ÇEHA_II'nin etkinliğini analiz etmek amacıyla aşağıdaki performans ölçütleri dikkate alınmıştır:

- Ortalama yüzde sapma (OYS = $100 * Z^{\text{alg}} - Z^*$). Z^{alg} ; uygulanan algoritma ile bulunan uygun çözümün amaç fonksiyon değeri, Z^* ; problemin en iyi çözümü veya 7200 sn. içerisinde elde edilen en iyi alt sınır değeri,
- Enbüyük yüzde sapma (EYS),
- Ortalama çözüm süresi (OÇS),.
- Eniyi çözüme ulaşılan problem sayısı (EÇUPS).

Önerilen algoritmaların etkinliğini ölçmek için yapılan analizlerin sonuçları küçük orta ve büyük boyutlu test problemleri için sırasıyla Çizelge 6.1-3'te verilmiştir.

Çizelge 6.1. Küçük boyutlu problemler için deneysel sonuçlar

Problem	ÇEHA_I				M_ÇEHA_I				ÇEHA_II				M_ÇEHA_II			
	OYS %	EYS %	OÇS	EÇUPS	OYS %	EYS %	OÇS	EÇUPS	OYS %	EYS %	OÇS	EÇUPS	OYS %	EYS %	OÇS	EÇUPS
Kb1	0,00	0,00	3,01	20	0,00	0,00	4,06	20	0,00	0,00	6,13	20	0,00	0,00	5,06	20
Kb2	0,00	0,00	2,98	20	0,00	0,00	3,88	20	0,00	0,00	6,29	20	0,00	0,00	5,17	20
Kb3	0,00	0,00	3,14	20	0,00	0,00	4,97	20	0,00	0,00	7,13	20	0,00	0,00	6,02	20
Kb4	0,15	2,09	3,45	18	0,01	0,54	4,95	18	0,00	0,00	7,95	20	0,00	0,00	6,27	20
Kb5	0,55	3,75	3,80	16	0,45	4,76	5,08	18	0,00	0,00	8,65	20	0,00	0,00	6,96	20
Kb6	1,26	6,61	3,93	15	1,41	6,13	5,86	15	0,00	0,00	9,91	20	0,00	0,00	7,45	20
Kb7	2,13	9,55	4,98	14	0,91	4,20	5,25	15	0,00	0,00	11,24	20	0,00	0,00	8,10	20
Kb8	4,09	8,86	4,18	8	3,52	6,49	5,98	8	0,00	0,00	12,11	20	0,00	0,00	9,95	20
Kb9	3,28	6,48	4,83	7	2,55	5,07	6,19	8	0,00	0,00	19,25	20	0,00	0,00	11,57	20
Kb10	7,26	9,61	5,01	0	2,52	5,27	6,37	9	0,00	0,00	18,29	20	0,00	0,00	14,27	20
Kb11	8,58	10,63	5,14	0	4,08	8,91	9,25	8	0,41	8,20	24,41	19	0,00	0,00	13,55	20
Kb12	10,65	12,57	5,65	0	8,03	13,99	9,97	6	0,00	0,00	25,29	20	0,00	0,00	16,08	20
Kb13	11,67	13,86	5,89	0	6,46	9,47	10,54	8	1,02	11,54	28,09	18	0,00	0,00	19,63	20
Kb14	8,86	10,54	5,97	0	6,56	9,46	11,48	5	0,00	0,00	27,26	20	0,00	0,00	20,45	20
Kb15	11,69	14,90	6,25	0	6,93	11,94	13,00	8	1,45	13,98	39,28	17	0,00	0,00	25,55	20
Kb16	10,97	13,96	6,14	0	6,42	9,94	13,96	8	0,00	0,00	41,41	20	0,00	0,00	20,59	20
Kb17	10,51	12,70	6,18	0	7,40	10,21	14,19	5	0,00	0,00	50,45	20	0,19	3,82	24,96	19
Kb18	11,63	15,59	6,94	0	7,05	11,65	16,05	6	2,96	20,07	48,43	17	0,00	0,00	39,04	20
Kb19	9,10	11,68	7,20	0	6,65	8,32	16,86	5	0,00	0,00	54,77	20	0,00	0,00	40,81	20
Kb20	11,42	13,05	7,95	0	8,57	10,57	19,53	0	2,17	11,43	69,37	16	0,00	0,00	45,44	20
Ortalama	6,19	8,82	5,13	6,90	3,98	6,85	9,37	10,50	0,40	3,26	25,79	19,35	0,01	0,19	17,35	19,95

Çizelge 6.1’de görüldüğü gibi küçük boyutlu problemlerde ÇEHA_I 20 tane problemin 9 tanesinde en iyi çözümü bulurken, ÇEHA_I’nin iyileştirilmesi ile elde edilen M_ÇEHA_I 20 problemin 19’unda en iyi çözümü bulmaktadır. ÇEHA_II ve M_ÇEHA_II ise bütün problemlerde en iyi çözümü bulmaktadır. Her bir algoritmanın 20 kere çalıştırılması sonucu elde edilen en iyi çözümlerin bilinen en iyi çözümden sapma oranına bakıldığında, M_ÇEHA_II’nin 20 problem için ortalama 0.01 değeri ile diğerlerine göre daha üstün bir performans gösterdiği görülmektedir. M_ÇEHA_II, 20 problemin 20 denemesinde sadece 1 kere en iyi çözümü bulamamıştır. M_ÇEHA_II, ÇEHA_II’den farklı olarak bir ön bilgi kullanmaktadır ve bu bilginin kullanılması ortalama yüzde sapma değerinin ortalama değerinde ÇEHA_II’ye göre %97,5’lik bir iyileşme sağlamıştır. Ortalama çözüm sürelerine bakıldığında ise, ÇEHA_II ve M_ÇEHA_II’de algoritmanın her adımında birincil ve ikincil dağıtım şebekelerinin yer aldığı şebeke için matematiksel model kullanılmasının çözüm sürelerini arttırdığı görülmektedir. Ancak yine de küçük boyutlu problemlerde en uzun süre olan, ÇEHA_II algoritmasına ait 25.79 sn yarım dakikanın altındadır. M_ÇEHA_II, algoritmaya dağıtım trafolarının yer seçimi ile ilgili bir ön bilgi ile başladığı için çözüm süresi ortalaması 17.35 sn ile ÇEHA_II’ye göre daha kısadır. Burada M_ÇEHA_II için verilen çözüm süresi sadece algoritmanın çalışma süresi olup, ön bilginin elde edilmesi sırasında geçen zaman (p-medyan probleminin çözümü için geçen süre) toplam süreye dahil edilmemiştir.

Çizelge 6.2. Orta boyutlu problemler için deneysel sonuçlar

Problem	ÇEHA_I				M_ÇEHA_I				ÇEHA_II				M_ÇEHA_II			
	OYS %	EYS %	OÇS	EÇUPS	OYS %	EYS %	OÇS	EÇUPS	OYS %	EYS %	OÇS	EÇUPS	OYS %	EYS %	OÇS	EÇUPS
Ob1	8,52	12,28	8,15	0	6,34	9,88	18,24	5	0	0	72,54	20	0,00	0,00	62,34	20
Ob2	9,68	13,09	9,47	0	6,53	8,29	18,65	6	0	0	75,21	20	0,00	0,00	65,32	20
Ob3	11,57	12,24	10,02	0	8,2	11,47	19,25	0	0,25	2,8	79,25	18	0,00	0,00	70,21	20
Ob4	7,58	10,53	8,24	0	5,15	8,57	19,47	7	0,96	4,94	73,21	15	0,00	0,00	73,65	20
Ob5	9,88	11,64	11,25	0	7,11	11,55	21,35	4	1,87	7,21	78,33	14	0,17	1,97	76,31	18
Ob6	9,72	12,21	12,87	0	6,28	8,3	23,47	0	1,96	8,04	81,24	15	0,09	1,80	80,24	19
Ob7	10,21	11,47	13,65	0	7,21	12,86	24,65	4	0,45	5,23	77,28	18	0,00	0,00	75,24	20
Ob8	9,27	10,69	12,75	0	6,39	10,01	28,64	6	1,78	12,09	80,07	17	0,42	2,96	79,66	17
Ob9	9,34	12,28	11,28	0	7,21	9,05	19,47	0	1,02	3,17	91,28	12	0,00	0,00	80,24	20
Ob10	11,2	13,36	14,96	0	10,07	13,99	31,54	0	3,79	7,54	98,46	9	0,16	1,82	95,27	18
Ob11	10,17	14,01	16,78	0	9,46	11,07	33,28	0	2,45	6,3	105,37	11	0,05	1,00	100,08	19
Ob12	9,26	11,34	18,39	0	6,17	10,05	34,18	5	2,08	8,21	112,37	14	0,37	2,14	111,21	16
Ob13	11,34	12,49	22,45	0	8,68	11,27	37,14	4	2,96	8,14	115,28	12	0,11	2,78	118,64	19
Ob14	13,3	15,06	14,87	0	10,79	11,2	28,33	0	2,67	7,96	116,97	13	0,00	0,00	114,01	20
Ob15	11,46	14,66	24,36	0	7,88	9,21	39,57	4	2,98	6,86	121,54	11	0,07	1,21	118,34	18
Ob16	10,05	13,75	24,85	0	9,62	12,34	41,26	0	2,49	7,23	175,96	12	0,29	2,09	168,21	17
Ob17	9,45	13,79	28,34	0	7,45	11,57	45,21	5	1,01	5,28	197,31	16	1,01	4,25	280,01	15
Ob18	11,39	14,44	21,25	0	9,29	12,68	38,27	0	1,06	8,59	427,39	17	0,39	2,03	400,18	16
Ob19	9,31	12,32	29,42	0	6,32	9,85	50,12	2	0,96	4,45	398,64	15	0,04	0,99	375,12	19
Ob20	11,52	14,72	31,54	0	9,34	11,41	49,65	0	1,45	3,09	579,14	10	0,16	1,70	396,12	18
Ortalama	10,21	12,82	17,24	0	7,77	10,73	31,09	2,60	1,61	5,86	157,84	14,45	0,17	1,34	147,02	18,45

Çizelge 6.2’de orta boyutlu problemler için önerilen algoritmaların performansları karşılaştırıldığında, ÇEHA_I’in 20 problemin hiç birinde en iyi çözümü bulamadığı, ÇEHA_I’in iyileştirilmesi ile elde edilen M_ÇEHA_I’in 20 problemin 11’inde en iyi çözümü bulduğu görülmektedir. ÇEHA_II ve M_ÇEHA_II 20 problemin hepsinde en iyi çözümü bulmuştur. Ortalama yüzde sapma değerlerine bakıldığında, ÇEHA_II’ye göre M_ÇEHA_II %89,44’lük bir iyileşme sağlamıştır. Bu değerden algortmada ön bilgi kullanımının etkisinin yüksek olduğu görülmektedir. Ortalama çözüm sürelerinde ise en yüksek süre 157,84 sn ile ÇEHA_II algoritmasındadır. Orta boyutlu problemlerin sonuçlarına bakıldığında M_ÇEHA_II’nin en yüksek performansa sahip olduğu görülmektedir. M_ÇEHA_II, 20 problemin 20 denemesinde (400 deneme) sadece 31 kere en iyi çözümü bulamamıştır.

Çizelge 6.3. Büyük boyutlu problemler için deneysel sonuçlar

Problem	ÇEHA_I				M_ÇEHA_I				ÇEHA_II				M_ÇEHA_II			
	OYS %	EYS %	OÇS	EÇUPS	OYS %	EYS %	OÇS	EÇUPS	OYS %	EYS %	OÇS	EÇUPS	OYS %	EYS %	OÇS	EÇUPS
Bb1	12,35	14,65	40,06	0	10,25	13,96	51,27	3	2,2	9,01	645,98	15	2,07	11,05	518,21	16
Bb2	12,28	15,32	39,54	0	9,25	13,54	47,98	0	3,14	11,21	591,21	14	2,65	10,92	578,44	13
Bb3	11,47	13,78	45,67	0	9,47	12,97	55,98	2	5,21	14,52	726,87	12	3,44	13,86	689,45	15
Bb4	13,99	15,24	48,67	0	11,21	14,08	59,64	0	8,24	15,65	697,01	*	6,54	14,57	745,51	*
Bb5	14,98	16,49	52,98	0	13,54	16,22	60,21	0	5,41	10,83	859,99	9	3,31	9,28	825,17	12
Bb6	15,07	17,25	45,81	0	14,57	16,11	57,15	0	11,24	16,32	987,31	*	9,25	14,29	968,24	*
Bb7	13,67	16,87	58,33	0	11,56	15,27	70,05	0	7,86	15,29	1124,56	9	7,21	14,62	1017,8	10
Bb8	15,39	17,69	62,14	0	14,98	16,12	79,81	0	9,21	14,29	1024,91	*	8,25	12,22	957,24	*
Bb9	16,78	19,64	55,48	0	15,07	18,28	72,06	0	8,46	12,64	1349,11	*	5,56	12,07	1185,39	*
Bb10	18,21	22,74	69,34	0	18,05	21,75	88,78	0	12,35	17,36	1254,87	*	10,24	16,93	1267,58	*
Ortalama	14,42	16,97	51,80	0,00	12,80	15,83	64,29	0,50	7,33	13,71	926,18	5,90	5,85	12,98	875,30	6,60

Büyük boyutlu problemler için deneysel sonuçlara bakıldığında yine en iyi performansın M_ÇEHA_II'de olduğu görülmektedir. Tabloda * ile gösterilen hücreler bu problemler için en iyi çözümün bilinmediğini göstermektedir. ÇEHA_I, 10 tane büyük boyutlu problemin en iyi çözümünün bulunduğu 5 problemin hiçbirinde en iyi çözüme ulaşamazken, M_ÇEHA_I, 2 tane problemde en iyi çözümü bulmuştur. ÇEHA_II ve M_ÇEHA_II ise bu 5 problemin hepsi için 20 deneme içinde en iyi çözüme ulaşmışlardır. M_ÇEHA_II'nin ortalama yüzde sapma değeri ÇEHA_II'ye göre %20.19 daha iyidir. Ortalama çözüm süresine bakıldığında ise en yüksek değer ÇEHA_II'de olup, 926,18 sn dir. M_ÇEHA_II'de ise bu süre 875,30 sn ile 15 dakikamın altındadır.

Küçük, orta ve büyük boyutlu problemlerde M_ÇEHA_II'nin ortalama yüzde sapma değerinde ÇEHA_II'ye göre sağladığı iyileşme yüzdesi, sırasıyla 97,5 89,44 ve 20.19 dur. Buradan görüldüğü üzere algoritmaya başlarken ön bilgi kullanımının etkisinin problem boyutu büyüdükçe azaldığı söylenebilir.

Yukarıda verilen sonuç tablolarına göre en iyi performansa sahip görünen M_ÇEHA_II'nin etkinliğinin daha detaylı incelenebilmesi için farklı hipotezlerin test edildiği istatistiksel bir analiz yapılmıştır. Bu hipotezler, M_ÇEHA_II'nin OYS ve EYS değerleri açısından diğer algoritmalarından üstün olup olmadığının test edilmesini amaçlamaktadır. OÇS değeri için ise, M_ÇEHA_II'nin, ÇEHA_I ve M_ÇEHA_I'den uzun sürede sonuca ulaştığı tablolardan açıkça görüldüğü için sadece ÇEHA_II ile karşılaştırılmıştır. İstatistiksel analiz için paired-t testinin parametrik olmayan versiyonu olarak da bilinen Wilcoxon Signed Rank testi kullanılmıştır. Analizde kullanılan hipotezler aşağıda verilmektedir:

$$H1: \mu_{OYS}^{M_ÇEHA_II} - \mu_{OYS}^{ÇEHA_I} < 0$$

$$H2: \mu_{OYS}^{M_ÇEHA_II} - \mu_{OYS}^{M_ÇEHA_I} < 0$$

$$H3: \mu_{OYS}^{M_ÇEHA_II} - \mu_{OYS}^{ÇEHA_II} < 0$$

$$H4: \mu_{EYS}^{M_ÇEHA_II} - \mu_{EYS}^{ÇEHA_I} < 0$$

$$H5: \mu_{EYS}^{M_ÇEHA_II} - \mu_{EYS}^{M_ÇEHA_I} < 0$$

$$H6: \mu_{EYS}^{M_ÇEHA_II} - \mu_{EYS}^{ÇEHA_II} < 0$$

$$H7: \mu_{OÇS}^{M_ÇEHA_II} - \mu_{OÇS}^{ÇEHA_II} < 0$$

Çizelge 6.4-6'da yukarıda verilen hipotezlerin sonuçları sırasıyla küçük, orta ve büyük boyutlu test problemleri için verilmiştir.

Çizelge 6.4. Küçük boyutlu test problemleri için istatistiksel analiz sonuçları

Hipotez	Algoritma Çifti	Ortalama Fark	p-değeri
H1	M_ÇEHA_II/ÇEHA_I	-6,18	0,00015 ^a
H2	M_ÇEHA_II/M_ÇEHA_I	-3,97	0,00015 ^a
H3	M_ÇEHA_II/ÇEHA_II	-0,39	HATA
H4	M_ÇEHA_II/ÇEHA_I	-8,6305	0,00015 ^a
H5	M_ÇEHA_II/M_ÇEHA_I	-6,655	0,00015 ^a
H6	M_ÇEHA_II/ÇEHA_I	-3,07	HATA
H7	M_ÇEHA_II/M_ÇEHA_I	-8,4395	0,00004 ^a

^a 0.01 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı

Çizelge 6.4 incelendiğinde M_ÇEHA_II'nin, ÇEHA_I ve M_ÇEHA_I'den OYS ve EYS değerleri bakımından belirgin olarak iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir. Çizelgede HATA olarak verilen hücreler karşılaştırma yapabilmek için yeterli verinin olmadığını göstermektedir. M_ÇEHA_II ve ÇEHA_II küçük boyutlu problemlerin çoğunda en iyi çözümü bulduğu için OYS ve EYS değerleri 0 olmaktadır. Wilcoxon Signed Rank testinde iki analiz sonucu da 0 olduğunda bu veriler yok sayılarak deneme sayısı azaltılmaktadır ve bu nedenle yeterli veri bulunamamıştır hatasını vermektedir. Ancak M_ÇEHA_II'nin, OÇS değeri açısından ÇEHA_II'ye göre belirgin olarak iyi olduğu görülmektedir.

Çizelge 6.5. Orta boyutlu test problemleri için istatistiksel analiz sonuçları

Hipotez	Algoritma Çifti	Ortalama Fark	p-değeri
H1	M_ÇEHA_II/ÇEHA_I	-10,0445	0,00004 ^a
H2	M_ÇEHA_II/M_ÇEHA_I	-7,608	0,00004 ^a
H3	M_ÇEHA_II/ÇEHA_II	-1,443	0,00015 ^a
H4	M_ÇEHA_II/ÇEHA_I	-11,4815	0,00004 ^a
H5	M_ÇEHA_II/M_ÇEHA_I	-9,394	0,00004 ^a
H6	M_ÇEHA_II/ÇEHA_I	-4,5195	0,0001 ^a
H7	M_ÇEHA_II/M_ÇEHA_I	-10,822	0,00289 ^a

^a 0.01 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı

Orta boyutlu problemlerde istatistiksel analiz sonuçlarına Çizelge 6.5'ten bakıldığında M_ÇEHA_II'nin, diğer bütün algoritmalara göre OYS, EYS ve OÇS açısından belirgin olarak daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir. Büyük boyutlu problemler için yapılan analiz sonuçları ise Çizelge 6.6'da gösterilmektedir. Burada M_ÇEHA_II'nin, OYS ve EYS değerleri açısından ÇEHA_I ve M_ÇEHA_I'den daha iyi bir performansa sahip olduğu görülmektedir. Ancak M_ÇEHA_II'nin performansı büyük boyutlu problemlerde ÇEHA_II ile karşılaştırıldığında OYS değeri açısından anlamlı bir fark olduğu görülmesine rağmen, EYS ve OÇS değerlerinde anlamlı bir fark olmadığı görülmektedir. Buradan M_ÇEHA_II'nin performansının büyük boyutlu problemlerde küçük ve orta boyutlu problemlerde olduğu kadar yüksek olmadığı söylenebilir. Bunun nedeni M_ÇEHA_II'de kullanılan ön bilginin büyük boyutlu problemlerde arama uzayını yönlendirirken çok yeterli olmaması olabilir. Ancak yine de M_ÇEHA_II'nin ÇEHA_II'ye göre daha gürbüz bir algoritma olduğu OYS değerinin belirgin olarak iyi olması nedeni ile söylenebilir.

Çizelge 6.6. Büyük boyutlu test problemleri için istatistiksel analiz sonuçları

Hipotez	Algoritma Çifti	Ortalama Fark	p-değeri
H1	M_ÇEHA_II/ÇEHA_I	-8,567	0,00256 ^a
H2	M_ÇEHA_II/M_ÇEHA_I	-6,943	0,00256 ^a
H3	M_ÇEHA_II/ÇEHA_II	-1,48	0,00256 ^a
H4	M_ÇEHA_II/ÇEHA_I	-3,986	0,00347 ^a
H5	M_ÇEHA_II/M_ÇEHA_I	-2,849	0,0082 ^a
H6	M_ÇEHA_II/ÇEHA_I	-0,731	0,02938
H7	M_ÇEHA_II/M_ÇEHA_I	-50,879	0,01831

^a 0.01 anlamlılık düzeyinde istatistiksel olarak anlamlı

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Elektrik üretim sistemleri, bir ülkede ekonomik ve sosyal hayatın devam edebilmesi için hayati öneme sahip olan kritik altyapıların en başında gelmektedir. Bir ülkede veya bir bölgede kısa süreliğine bile yaşanan elektrik kesintileri ciddi sonuçlar ortaya çıkarabilir. Bu altyapının mevcut ve gelecekte ortaya çıkacak ihtiyaçları, elektriğin üretildiği andan son kullanıcılara ulaştığı ana kadar en ekonomik ve en verimli şekilde karşılayabilmesini sağlayabilmek, ülke yöneticilerinin ve sistem operatörlerinin sorumluluğundadır. Bu nedenle gelişen teknolojileri ve yeni altyapı sistemlerini kullanarak elektrik sistemlerinin gelişen dünyaya ayak uydurmasının sağlanması kaçınılmaz bir gerekliliktir.

Elektrik sistemlerinde yakın geçmişten başlayarak günümüzde hızla artan bir öneme sahip olan küçük ölçekli, kendi üretim kaynaklarını içeren dağıtım şebekeleri; hem kontrol kolaylığı, hem de tüketicilere yakın konumlanmış dağıtım yapıdaki üretim kaynaklarına (DÜK) bağlı olarak ortaya çıkan yüksek güvenilirlikleri nedeni ile geleceğin sistemleri olma yönünde hızla ilerlemektedirler. Ayrıca, genellikle yenilenebilir enerji kaynaklarından oluşan DÜK'ler çevresel faydaları ve yerel kaynaklarının kullanımını desteklemeleri gibi açılardan da önemlidirler.

Bu tezde bir bölgeye ait elektrik dağıtım şebekesinin tüm elemanlarının, bölgenin özelliklerine göre konumlandırılacak DÜK'leri de dikkate alarak yeniden tasarlanması problemi ele alınmıştır. Geleneksel bir elektrik dağıtım sisteminin elemanları olan trafo merkezi, dağıtım trafoları, birincil ve ikincil dağıtım hatları ve DÜK'leri içeren bu sistemin tasarlanması problemi bu tezde, bütünleşik elektrik dağıtım sistemi (BEDS) tasarımı problemi olarak literatürde ilk defa tanımlanmıştır. Ele alınan problem hem tesis yer seçimi, hem de şebeke tasarım alt problemlerini bir arada içermektedir ve NP-tam yapıdadır. Tesis yer seçimi alt problemleri; trafo merkezi için kapasite kararı, dağıtım trafoları için yer seçimi ve kapasite kararları ve DÜK'ler için yer seçimi problemlerinden oluşmaktadır. Şebeke tasarım problemleri ise; birincil ve ikincil dağıtım hatları için verilen rotalama kararlarını kapsamaktadır.

Bu tezde ilk defa tanımlanan BEDS tasarımı probleminin çözümü için, biri düğüm tabanlı bir diğeri akış tabanlı olmak üzere iki yeni doğrusal olmayan matematiksel model

geliştirilmiştir. Akış tabanlı model geliştirilmeden önce, şebekede farklı roldeki düğümlerin birbirinden ayrıştırılarak tüm maliyetlerin ayrıtlara atandığı bir düğüm ayrıştırma tekniği (DAT), literatürde kullanılan benzer bir yaklaşımdan faydalanılarak bu probleme özgü olarak ilk defa önerilmiştir. DAT ile dönüştürülmüş şebekede problemin çözümü için ise, akış tabanlı bir model kullanılmıştır. Önerilen iki matematiksel modelin performansları küçük, orta ve büyük boyutlu test problemleri üzerinde test edilmiştir. İki modelde de bulunan kayıp maliyetlerinden kaynaklanan doğrusal olmayan amaç fonksiyonu, parçalı doğrusallaştırma tekniği ile doğrusallaştırılarak çözülmüştür. Önerilen matematiksel modeller, eniyi çözüm değeri, eniyi çözüme ulaşma zamanı ve elde edilen alt sınırların yüzde sapma değeri açısından karşılaştırılmıştır.

Sonuç olarak, hem düğüm tabanlı hem de akış tabanlı modelin küçük boyutlu test problemlerinin hepsini çözdüğü görülmüştür. Küçük boyutlu test problemlerinde akış tabanlı model, düğüm tabanlı modele göre çözüm süresi açısından %97,81'lik, doğrusal gevşetme yüzde sapma değeri açısından ise %53,95'lik bir iyileşme sağlamıştır. Orta boyutlu test problemlerinde düğüm tabanlı model 20 problemin 5'inde en iyi çözümü bulurken, akış tabanlı model bütün orta boyutlu test problemlerinde en iyi çözümü bulmuştur. Ayrıca akış tabanlı model doğrusal gevşetme yüzde sapma değeri açısından düğüm tabanlı modele göre %41,03'lük bir iyileşme sağlamıştır. Büyük boyutlu test problemlerinde ise, düğüm tabanlı model en iyi çözümleri bulamazken, akış tabanlı model 10 test probleminin 5 tanesinde en iyi çözümü bulmuştur. Büyük boyutlu problemleri için doğrusal gevşetme yüzde sapma değerine bakıldığında, düğüm tabanlı model akış tabanlı modele göre %32,12 daha iyi sonuç vermiştir.

Bir sonraki aşamada, büyük boyutlu problem kümesinde akış tabanlı modelin çözemediği test problemlerini çözebilmek amacı ile çapraz entropi yöntemine dayanan iki temel melez sezgisel ve bu iki melez sezgiselden türetilmiş iki türev algoritma ile dört adet yeni sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Önerilen ilk temel melez sezgisel algoritma olan ÇEHA_I'in sonuçlarının iyileştirilmesi ile elde edilen türev algoritma M_ÇEHA_I olarak tanımlanmıştır. Önerilen ikinci temel algoritma olan ÇEHA_II'ye eklenen, başlangıç popülasyonu oluşturulurken ön bilgi kullanılması işlemi ile türetilen türev algoritma ise M_ÇEHA_II olarak tanımlanmıştır. Bu dört adet melez sezgisel algoritmanın performansları, aynı test problemleri üzerinde test edilmiştir. Sonuçlar, ortalama yüzde sapma (OYS), en yüksek yüzde sapma (EYS), ortalama çözüm süresi (OÇS) ve en iyi

çözümüne ulaşılan problem sayısı (EÇUPS) açısından karşılaştırılmışlardır. Sonuçlara bakıldığında, önerilen melez sezgisel algoritmaların içinde bütün test problem gruplarında en iyi performansa sahip olan algoritmanın M_ÇEHA_II ve daha sonra ÇEHA_II olduğu görülmüştür. İki algoritma da, küçük orta ve büyük boyutlu test problemlerinde en iyi çözümü bilinen bütün test problemleri için 20 deneme içinde en iyi çözümü bulmuşlardır. En iyi çözümü bilinmeyen 5 adet büyük test problemi için ise; ÇEHA_II bilinen en yüksek alt sınır değerlerine %8,24 ile %12,35 arasında değişen OYS değerleri ile çözümler bulurken, aynı test problemleri için M_ÇEHA_II'nin bulunduğu OYS değerleri %5,56 ile %10,24 arasında değişmektedir. M_ÇEHA_II, ÇEHA_II nin bir türevi olduğu için iki algoritma en iyi çözümü bulma açısından birbirlerine yakın sonuçlar vermektedir. Ancak daha detaylı bakıldığında M_ÇEHA_II'nin kendinden sonraki en iyi algoritma olan ÇEHA_II'ye göre diğer performans ölçütlerinde daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. M_ÇEHA_II ÇEHA_II ye göre küçük boyutlu test problemlerinde OYS değerinde %97,5, EYS değerinde %94,17, OÇS değerinde %32,73 ve EÇUPS değerinde %3,10'luk bir iyileşme sağlamıştır. Orta boyutlu test problemlerinde ise M_ÇEHA_II, ÇEHA_II'ye göre; OYS, EYS, OÇS ve EÇUPS değerlerinde sırası ile %89,45, %77,13, %6,85 ve %27,68 daha iyidir. Son olarak büyük boyutlu test problemlerinde M_ÇEHA_II'nin; OYS için %20,19, EYS için %5,32, OÇS için %5,49 ve EÇUPS için %11,86'luk bir iyileşme sağladığı görülmektedir. Bu sonuçlardan görüleceği gibi ÇEHA_II'ye eklenen ön bilgi kullanımı işlemi etkin sonuçlar vermektedir ve ÇEHA_II'nin sonuçlarına göre daha iyi sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. Ancak yine bu sonuçlara bakarak, bu iyileştirme işleminin etkisinin küçük ve orta boyutlu test problem grubunda daha fazla ve büyük boyutlu test problem grubunda daha az olduğu söylenebilir.

Sonuç olarak literatürde ilk defa tanımlanmış ve önemi göz ardı edilemez bu sistem tasarımı problemin çözümü için hem matematiksel tabanlı hem de matematiksel model ve sezgisel algoritmanın bir arada kullanıldığı melez yapıda farklı yöntemler geliştirilmiştir. Geliştirilen yöntemlerin, küçük boyutlu test problemlerinden gerçek hayat problemlerini yansıtan büyük boyutlu test problemlerine kadar geniş bir aralıktaki performansları test edilmiş ve makul zamanda iyi sonuçlara ulaşılabilirdiği gözlenmiştir.

Gelecek çalışmalarda BEDS tasarım probleminin, gerçek hayat uygulamalarındaki sistem ihtiyaçlarına göre geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Örneğin, DÜK yenilenebilir enerji kaynakları (rüzgar, güneş vb.) olursa, üretim miktarlarında belirsizlik söz konusu olabilir.

BEDS tasarım probleminin modeline DÜK'lerin üretim miktarlarındaki belirsizlikleri de dahil etmek daha gerçekçi bir problem tanımını elde edilmesini sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

- Acharya, N., Mahat, P., and Mithulananthan, N. (2006). An analytical approach for DG allocation in primary distribution network. *Electrical Power & Energy Systems*, 28(10), 669–78.
- Ackermann, T., Anderson, G., and Söder, L. (2001). Distributed generation: A definition. *Electric Power System Research*, 57(3), 195-204.
- Adams, R. N., Afuso, A., Rodriguez A., and Perez, V. (1984, 19-24 August). A methodology for distribution system planning. *Proceedings of the 8th Power Systems Computation Conference*, Finland.
- Adams, R. N., Laughton, M. A. (1973, 3-6 June). A dynamic programming network flow procedure for distribution system planning. *Proceedings of the 8th Power Industry Computer Application (PICA) Conference*, Minneapolis, USA.
- Adams, R. N., Laughton, M. A. (1974). Optimal planning of networks using mixed-integer programming. *Proceedings of IEEE*, 121(2), 139-148.
- Afuso, A., Gerez, V., and Rodriguez, A. (1982, 9-11 June). An integrated system for distribution planning. *Proceedings of the 4th IEEE International Symposium on Large Engineering Systems*, Canada.
- Agmon, S. (1954). The relaxation method for linear inequalities. *Canadian Journal of Mathematics*, 6, 382–392.
- Alagöz, B. B., Kaygusuz, A., and Karabiber, A. (2012). A user-mode distributed energy management architecture for smart grid applications. *Energy*, 44(1), 167-177.
- Alon, G., Kroese, D. P., Raviv, T., and Rubinstein, R. Y. (2005). Application of the cross-entropy method to the buffer allocation problem in a simulation-based environment. *Annals of Operations Research*, 134(1), 19–67.
- Altıparmak, F., Dengiz, B. (2009). A cross entropy approach to design of reliable networks. *European Journal of Operational Research*, 199 (2), 542-552.
- Aoki, K., Nara, K., Satoh, T., Kitagawa, M., and Yamanaka, K. (1990). New approximate optimization method for distribution system planning. *IEEE Transactions on Power System*, 5(1), 126-132.
- Arion, V., Cojocari, A., and Bejan, A. (2003). Integral measures of electric power distribution networks: load-length curves and line-network multipliers. *Energy Conversion Management*, 44, 1039-1051.
- Arsoy, A. B., Perdahçı, C. (2010). *Elektrik dağıtım sistemlerinde dağıtılmış üretim*. Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları.

- Avella, P., Boccia, M., Salerno, S., and Vasilyev, I. (2012). An aggregation heuristic for large p-median problem. *Computers and Operations Research*, 39(7), 1625-1632.
- Bardossy, M. G., Raghavan, S. (2010). Dual-based local search for the connected facility location and related problems. *INFORMS Journal on Computing*, 22(4), 584-602.
- Bayod-Rujula, A. A. (2009). Future development of the electricity systems with distributed generation. *Energy*, 34(3), 377-383.
- Bekker, J., Aldrich, C. (2011). The cross-entropy method in multi-objective optimisation: An Assessment. *European Journal of Operational Research*, 211(1), 112-121.
- Bitim, M. (2012). *Niğde ili merkezinde bulunan dağıtım trafolarının enerji kalitesinin araştırılması*. Yüksek lisans tezi, Niğde Üniversitesi.
- Boardman, J.T., Meckiff, C.C. (1985). A branch and bound formulation to an electricity distribution planning problem. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 104(8), 2112-2118.
- Cannas, B., Celli, G. (1999). Optimal MV distribution network planning with heuristic techniques. *IEEE 1999*, 2, 995-1000.
- Carneiro M., França P. M., and Silveira P. D. (1993). Long-range planning of power distribution systems: Primary networks. *Electric Power Systems Research*, 27(3), 223-231.
- Carneiro, M. S., Franca, P. M., and Silveira, P. D. (1996). Long-range planning of power distribution systems: Secondary networks. *Computers & Electrical Engineering*, 22(3), 179-91.
- Caserta, M., Quinonez, R. E., and Marquez, U. A. (2008). A cross entropy algorithm for the knapsack problem with setups. *Computers & Operations Research*, 35(1), 241-252.
- Caserta, M., Quinonez, R. E. (2009). A cross entropy-lagrangean hybrid algorithm for the multi-item capacitated lot-sizing problem with setup times. *Computers & Operations Research*, 36(2), 530-548.
- Celli, G., Ghaiani, E., Mocci, S., and Pilo, F. (2005, May). A multiobjective evolutionary algorithm for the sizing and siting of distributed generation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2), 750-757.
- Chen, J., Hsu, Y. (1989). An expert system for load allocation in distribution expansion planning, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 4(3), 1910-1917.
- Chepuri, K., Homem-de-Mello, T. (2005). Solving the vehicle routing problem with stochastic demands using the cross-entropy method. *Annals of Operations Research* 134(1), 153-181.

- Chockler, H., Ivrii, A., Matsliah, A., Rollini, S. F., and Sharygina, N. (2013). Using cross-entropy for satisfiability. *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, 1, 1196-1203.
- Cohen, I., Golany, B., and Shtub, A. (2005). Managing stochastic finite capacity multi-project systems through the cross-entropy method. *Annals of Operations Research*, 134(1), 183–199.
- Cossi, A. M., Romero, R., and Mantovani, J. R. S. (2005). Planning of secondary distribution circuits through evolutionary algorithms. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 20(1), 205–213.
- Cossi, A. M., Romero, R., and Mantovani, J. R. S. (2009). Planning and projects of secondary electric power distribution systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 24(3), 1599–608.
- Costa, A., França, P., and Filho, C. (2011). Two-level network design with intermediate facilities: An application to electrical distribution systems. *Omega*, 39(1), 3-13.
- Coster, E. J., Myrziq, J. M. A, Kruimer, B., and Kling, W. L. (2011). Integration issues of distributed generation in distribution grids. *Proceedings of the IEEE*, 99(1), 28-39.
- Crawford, D. M., Holt, S.B. (1975). A mathematical optimization technique for locating and sizing distribution substations and deriving their optimal service areas. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 94(2), 230-234.
- D'Acquisto, G., Naldi, M. (2005). Cross-entropy-based adaptive optimization of simulation parameters for Markovian-driven service systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 13(7), 619-645.
- Dalila, B. M. M., Rua Dr. Roberto, F. (2007). Optimal flow trees for networks with general nonlinear arc costs. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, 40(3), 321-340
- De Boer, P. T., Kroese, D. P., and Rubinstein, R. Y. (2004). A fast cross-entropy method for estimating buffer overflows in queueing networks. *Management Science*, 50(7), 883–895.
- De Boer, P. T., Kroese D. P., and Rubinstein, R. Y. (2005). A tutorial on the cross-entropy method. *Annals of Operational Research*, 134(1), 19-67.
- Diaz-Dorado, E., Miguez, E. (2001). Design of large rural low-voltage networks using dynamic programming optimization. *IEEE Transactions on Power Systems*, 16(4), 898-903.
- Diaz-Dorado, E., Cidras, J., and Miguez, E. (2002). Application of evolutionary algorithms for the planning of urban distribution networks of medium voltage. *IEEE Transactions on Power Systems*, 17(3), 879–884.

- Diaz-Dorado, E., Cidras, J. (2003). Planning of large rural low-voltage networks using evolution strategies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 18(4), 1594-1600.
- Driesen, J., Katiraei, F. (2008). Design for distributed energy resources. *Power and Energy Magazine IEEE*, 6(3), 30-40.
- Dueire, Lins Z., De Carvalho, J. R. M. (1996). An expert system for power distribution network feeders planning. *IEEE Circuits and Systems*, 1, 457-460.
- Elektrik Üretim Anonim Şirketi (2012). *Elektrik üretim sektör raporu 2012*. Ankara: Elektrik Üretim Anonim Şirketi, 11-18.
- El-Kadi, M. A. (1984). Computer-aided planning of distribution substations and primary feeders. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 103(6), 1183-1189.
- Fawzi, T. H., Ali, K. F., and El-Sobki, S. M. (1983). A new planning model for distribution systems. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 102(9), 3010-3017.
- El-Khattam, W., Hegazy, Y. G., and Salama, M. M. A. (2005). An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20(2), 1158-1165.
- Gomez, J. F., Khodr, H. M., Oliveira, P. M. D., Ocque, L., Yusta, J. M., Villasana, R., and Urdeneta, A. J. (2004). Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits. *IEEE Transactions on Power Systems*, 19(2), 996-1004.
- Gönen, T., Foote, B. L. (1981). Distributions system planning using mixed-integer programming. *IEE Proceedings C*, 128(2), 70-79.
- Gönen, T., Ramirez-Rosado, I. (1986). Review of distributions system planning models: A model for optimal multi-stage planning. *IEE Proceedings C*, 133(7), 397-408.
- Grijalva, S., Tariq, M. U. (2011). Prosumer-based smart grid architecture enables a flat, sustainable electricity industry. *Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) IEEE Physical Security Systems*, 1-6.
- Habet, D., Li, C., Devendeville, L., and Vasquez, M. (2002). A hybrid approach for SAT. Principles and practice of constraint programming. *Lecture Notes in Computer Science*, 2470, 172-184.
- Hadjsaid, N., Canard, J. F., and Dumas, F. (1999). Dispersed generation impacts on distribution networks. *IEEE Computer Applications in Power*, 12(2), 22-28.
- Haesen, E., Espinoza, M., Pluymers, B., Goethals, I., Thong, V. V., Driesen, J., Belmans, R., and Moor, B. (2005). Optimal placement and sizing of distributed generator units using genetic optimization algorithms. *Electrical Power Quality and Utilisation*, 11(1), 97-104.

- Hanjoul, P. and Peeters, D. (1985). A comparison of two dual-based procedures for solving the p-Median problem. *European Journal of Operations Research*, 20(3), 387-96.
- Held, M., Karp, R.M. (1971). The traveling-salesman problem and minimum spanning trees: Part II. *Mathematical Programming*, 1, 6–25.
- Held, M., Wolfe, P., and Crowder, H.P. (1974). Validation of subgradient optimization. *Mathematical Programming*, 6(1), 62–88.
- Hindi, K. S., Brameller, A. (1977). Design of low-voltage distribution networks: A mathematical programming method. *IEE Proceedings*, 124(1), 54-58.
- Holt, S. B., Crawford, D. M. (1976). Distribution substation planning using optimization methods. *IEEE Tutorial Course*, 69-76.
- Hsu, Y., Chen, J. (1990). Distribution planning using a knowledge-based expert system. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 5(3), 1514-1519.
- İnternet: Elektroforum teknik paylaşım platformu. İletim ve dağıtım şebekeleri. URL: <http://www.elektroforum.org/elektrik-iletimi-ve-ekipmanlari/70534-iletim-vedagitim-sebekeleri.html>, Son Erişim Tarihi: 1.06.2014.
- Jabr, R., Pal, B. (2009). Ordinal optimisation approach for locating and sizing of distributed generation. *IET Generation Transmission & Distribution*, 3(8), 713-723.
- Jahangiri, P. Firuzabad, M. (2008, 1-3 December). Reliability assessment of distribution system with distributed generation. *2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08)*, Johor Baharu, Malaysia.
- Jovanovic, D. (2003). Planning of optimal location and sizes of distribution transformers using integer programming. *Electrical Power & Energy Systems*, 25(9), 717-723.
- Kariv, O., Hakimi, L. (1979). An algorithmic approach to network location problems part 2: The p-medians. *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 37(3), 539-560.
- Kagan, N., Adams, R. N. (1992). A computational decision support system for electrical distribution systems planning. *IEEE CompEuro'92*, 133-138.
- Kroese D. P., Hui, K. P., and Nariyai, S. (2007). Network reliability optimization via the cross entropy method. *IEEE Transactions on Reliability*, 56(2), 275-287.
- Kroese, D. P., Taimre, T., Botev, Z. I., (2011). *Handbook of monte carlo methods*. John Wiley & Sons, New York, 15-38.
- Laguna, M., Duarte, A., and Mart, R.(2009). Hybridizing the cross-entropy method: An application to the max-cut problem. *Computers & Operations Research*, 36(2), 487-498.
- Lin, W. M., Su, Y.S., and Tsay, M. T. (1998). Genetic algorithm for optimal distribution system planning. *IEEE Proceedings on Power System Technology*, 1, 241-245.

- Ma, T. Y. (2011). A cross entropy multiagent learning for solving vehicle routing problems with time windows. *Lecture Notes in Computer Science*, 6971, 59-73.
- Mardaneh, M., Gharehpetian, G. B. (2004). Siting and sizing of DG units using GA and OPF based technique. *IEEE Region 10 Conference*, 3, 331-334.
- Margolin, L. (1975). On the convergence of the cross-entropy method. *Annals of Operations Research*, 134(1), 215–238.
- Masud, E. (1974). An interactive procedure for sizing and timing distribution substations using optimization techniques. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 5, 1281-1286.
- Masud, E. (1978). Distribution planning: state of the art and extensions to substation sizing. *Electric Power System Research*, 1(3), 203-212.
- Mikic, O. M. (1986). Mathematical dynamic model for long-term distribution system planning. *IEEE Transactions on Power System*, 1(1), 34-40.
- Miranda, V., Ranito J. V., and Proença L. M. (1994). Genetic algorithms in optimal multistage distribution network planning. *IEEE Transactions on Power System*, 9(4), 1927-1933.
- Motzkin, T., Schoenberg, I. J. (1954). The relaxation method for linear inequalities. *Canadian Journal of Mathematics*, 6, 393–404.
- Nara, K., Satoh, T., Aoki, K., and Kitagawa, M. (1991). Multi-year expansion planning for distribution system. *IEEE Transactions on Power System*, 6(3), 952- 958.
- Nara K., Satoh T., Kuwabara H., Aoki K., Kitagawa M., and Ishihara T. (1992). Distribution systems expansion planning by multi-stage branch exchange. *IEEE Transactions on Power System*, 7(1), 208-214.
- Nara, K. (2000). State of the arts of the modern heuristics application to power system. *IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, 2, 1279-1283.
- Özay, N., Güven, N., Türeli, A., ve Demiroğlu, M. (1993). *Türkiye OG dağıtım sistemi için gerilim seviyesinin belirlenmesi*. TÜBİTAK AEAGE Raporu, 7-14.
- Paiva, P .C. (2005). Integral planning of primary-secondary distribution systems using mixed integer linear programming. *IEEE Transactions on Power Systems*, 20 (2), 1134-1143.
- Peponis, G. J., Papadopoulos, M. P. (1997). New dynamic, branch exchange method for optimal distribution system planning. *IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution*, 114(3), 333-339.
- Ponnavaikko, M., Prakasa, K. S., and Venkata, S. S. (1987). Distribution system planning through a quadratic mixed integer programming approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2(4), 1157-1163.

- Ouyang, W., Cheng, H., Zhang, X., and Yao, L. (2010). Distribution network planning method considering distributed generation for peak cutting. *Energy Conversion and Management*, 51(12), 2394-2401.
- Ramakumar, R. (2012). *Handbook for Electric Power Systems: Distributed power generation* (Third Edition), CRC Press, 45-57.
- Ramirez-Rosado, I., Gönen, T. (1991). Pseudodynamic planning for expansion of power distribution systems. *IEEE Transactions on Power System*, 6(1), 245-253.
- Ramirez-Rosado, I., Bernal-Agustin, J. L. (1998). Genetic algorithms applied to the design of large power distribution system. *IEEE Transactions on Power System*, 13(2), 696-703.
- Ramirez-Rosado, I., Dominguez-Navarro, J., and Yusta-Loyo, J. (1999). A new model for optimal electricity distribution planning based on fuzzy set techniques. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 2, 1048-1054.
- Rubinstein, R. Y. (1997). Optimization of computer simulation models with rare events. *European Journal of Operations Research*, 99(1), 89–112.
- Rubinstein, R. Y. (1999). The cross-entropy method for combinatorial and continuous optimization. *Methodology and Computing in Applied Probability*, 1(2), 127–190.
- Rubinstein, R. Y. (2001). Combinatorial optimization, cross-entropy, ants and rare events. *Stochastic Optimization: Algorithms and Applications*, 54, 303–363.
- Rubinstein, R.Y., Kroese, D. (2004). *The cross-entropy method: A unified approach to combinatorial optimization, Monte-Carlo Simulation and Machine Learning*. Information Science and Statistics. Springer-Verlag, New York, 5-25.
- Rubinstein, R. Y., Melamed, B. (1998). *Modern simulation and modeling*. Wiley series in - probability and statistics, 7-12.
- Satman, A. (2007, 25-28 Ekim). Türkiye'nin enerji vizyonu, *Jeotermal Enerjiden Elektrik Üretimi Semineri, TESKON2007 VIII. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, İzmir.
- Silvestri, A, Berizzi, A, and Buonanno, S. (1999). Distributed generation planning using genetic algorithms. *Proceedings of International Conference on Electric Power Engineering, Power Tech Budapest 99*, 257.
- Skrlec, D., Krajcar, S., Prvicevic, B., and Blagajac, S. (1996). Exploiting the power of genetic algorithm in optimization of distribution networks. *Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference*, 3, 1607-1610.
- Sun, D. I., Farris, D R., Cote, P. J., Shoults, R. R., and Chenn, S. S. (1982). Optimal distribution substation and primary feeder planning via the fixed charge network formulation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 101(3), 602-608.

- Tan, H., Wang, B., Dichen, L., and Suxuan, G. (2012). Analysis of distributed generation system and the influence on voltage distribution. *2nd International Conference on Electronic & Mechanical Engineering and Information Technology*. EMEIT-2012. 2225-2229.
- Tang, Y. (1996). Power distribution system planning with reliability modeling and optimization. *IEEE Transactions on Power System*, 11(1), 181-189.
- Tavakkoli, R., Shayan, E. (1998). Facilities layout design by genetic algorithms. *Computers & Industrial Engineering*, 35(3-4), 527-530.
- Tosun, İ. (2007). *Enerji iletim ve dağıtım*. Birsen Yayınevi, İstanbul, 16-21.
- Thompson, G. L., Wall D. L. (1981). A branch and bound model for choosing optimal substations locations. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 100(5), 2683-2687.
- Tripathy, S. C., Prasad, G. D., Malik, O. P., and Hope, G. S. (1982). Load flow solutions for ill conditioned power systems by a Newton-like method. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 101(10), 3648-3657.
- Tumazos, S. (1997). Expert system / algorithm based radial low voltage distribution network configuration tool, ST118.101, 1-9.
- Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi. (2010). *Türkiye elektrik enerjisi 10 yıllık üretim kapasite projeksiyonu*. Ankara: Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi APK Dairesi Başkanlığı, 17-18.
- Viral, R., Khatod, D. K. (2012). Optimal planning of distributed generation systems in distribution system: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7), 5146-5165.
- Vytelingum, P., Voice, T. D., Ramchurn, S. D., Rogers, A., and Jennings, N. R. (2010). Agent-based micro-storage management for the smart grid. *The ninth international conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2010)*, 39-46.
- Wall, D. L., Thompson, G. L., and Northcote, J. E. D. (1979). An optimization model for planning radial distribution networks. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 98(3), 1061-1065.
- Willis, H. L., Scott, W. G. (2000). *Distributed power generation*. Marcel Dekker, New York, 30-35.
- Youssef, H. K., Hackan, R. (1988). Dynamic solution of distribution planning in intermediate time range. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 3(1), 341-344.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ÇAKIR ERDENER, Burçin
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 20.01.1981, Ankara
 Medeni hali : Evli
 Telefon : 0 (533) 737 93 26
 Faks : -
 e-mail : bcakir@baskent.edu.tr



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Doktora	Gazi Üniversitesi /Endüstri Mühendisliği	Devam Ediyor
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi /Endüstri Mühendisliği	2006
Lisans	Gazi Üniversitesi /Endüstri Mühendisliği	2002
Lise	Samsun Anadolu Lisesi	1998

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2006-Halen	Başkent Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

Çakır, E. B., Pambour, K.A., Bolado, L.R., Dengiz, B. (2014). An integrated simulation model for analysing electricity and gas systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 61, 410-420.

Hobiler

Yüzme, Dans