

**SÜREKLİ DÜZLEMSEL UZAYDA AĞAÇ-YILDIZ
BAĞLANTILI ELEKTRİK DAĞITIM AĞI TASARIMI**

**DESIGN OF TREE-STAR CONNECTED ELECTRIC
DISTRIBUTION NETWORK ON THE CONTINUOUS
PLANAR SPACE**

ERVA ÇELİK

PROF. DR. KAĞAN GÖKBAYRAK

Tez Danışmanı

DR. ÖĞR. ÜYESİ DERYA DİNLER

İkinci Danışman

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

Ocak 2023

ÖZET

SÜREKLİ DÜZLEMSEL UZAYDA AĞAÇ-YILDIZ BAĞLANTILI ELEKTRİK DAĞITIM AĞI TASARIMI

Erva ÇELİK

Yüksek Lisans, Endüstri Mühendisliği

Danışman: Prof. Dr. Kağan GÖKBAYRAK

İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Derya DİNLER

Ocak 2023, 63 sayfa

Bu tezde, elektrik enerjisine erişim güclüğü yaşanan kırsal bölgelerin taleplerini karşılayabilmek amacıyla iki seviyeli bir dağıtım ağı tasarım problemi ele alınmıştır. Alt düzeyde, talep noktalarının üreteç veya dönüştürücülere belli bir mesafe içinde yıldız biçiminde bağlanarak hizmet alması sağlanır. Üst düzeyde ise, üreteçler ağaç biçimli ağlar üzerinden dönüştürücüleri besler. Problem, dönüştürücülerin kapasitelerini aşmadan hizmet verebilmesini sağlayan ve talep noktalarının dönüştürücüye olan uzaklığına bağlı voltaj düşmesini engelleyen kısıtlamalar içermektedir. Dönüştürü ve üreteçler için düzlem üzerindeki tüm noktalar aday yerlerdir. Üreteç, dönüştürücü ve bağlantı maliyetlerini enküçülterek düşük maliyetli bir dağıtım ağı tasarlamak amaçlanmıştır. Sürekli uzayda çözülmesi zor olan bu problemi çözebilmek adına ilk olarak problemin ayrık ifadesi oluşturulmuştur. Büyük ölçekli örnekler için ayrık ifadenin çözümü de zor olmaktadır. Bu sebeple, problem ayrık ifadesini çözen üç farklı sezgisel önerilmiştir. İlk sezgiselde öncelikle tesisler için aday yerler belirlenir ve alt düzey problem olan talep noktaları ile tesisler arasında direkt bağlantı sağlayan düşük gerilim ağları oluşturulur. Daha sonra üst düzey problem çözülerek tesisler arasındaki orta gerilimli bağlantılar şebekeye eklenir.

Diğer iki sezgiselde ise tesisler için aday noktaların belirlenmesinde ve alt düzey problemde karşılaşılan uzun süreleri daha makul sürelerde çözmek hedeflenmiştir. Son olarak da elde edilen sonuçları, tesis yerlerini sürekli uzayda hareket ettirerek iyileştiren bir çözüm yöntemi önerilmiştir. Tüm bu metotların etkilerini gösterebilmek adına sayısal deneyler yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Sürekli uzayda tesis yerleşimi, Dağıtım ağı tasarımı, İki seviyeli elektrik dağıtımı, Eniyileme, Karışık tamsayılı doğrusal programlama, Ağaç-yıldız ağı, Sezgisel

ABSTRACT

DESIGN OF TREE-STAR CONNECTED ELECTRIC DISTRIBUTION NETWORK ON THE CONTINUOUS PLANAR SPACE

Erva ÇELİK

Master of Science, Industrial Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Kağan GÖKBAYRAK

2nd Supervisor: Asst. Prof. Dr. Derya DINLER

January 2023, 63 pages

In this thesis, a two-level distribution network design problem is studied in order to serve the demand points of rural areas where there is difficulty in accessing electrical energy. At the lower level, demand points are connected to generators or converters in a star pattern within a certain distance to receive service. At the higher level, the generators feed the converters over tree networks. The problem includes constraints that enable converters to serve without exceeding their capacities and prevent voltage drop due to the distance of demand points from the converter. All points on the plane are candidate locations for the converters and generators. It is aimed to design a distribution network by minimizing generator, converter and connection costs. The discrete problem is also difficult to solve for large-scale examples. Therefore, three different heuristic methods are proposed to solve the discrete expression of the problem. In the first heuristic method, candidate facility locations are found and local networks are created that provide a direct connection between demand points and the facilities. Then, the higher-level problem is solved and the connections between the facilities are added to the network. In the other two heuristics, we aim to obtain the solutions of the lower-level problem in more reasonable times. Finally, location adjustments on the

continuous space are proposed to improve the obtained results. The effects of all methods are demonstrated by numerical experiments.

Keywords: Facility location in continuous space, Distribution network design, Two-level electricity distribution, Optimization, Mixed integer linear programming, Tree-star network, Heuristic

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tezimin hazırlanması sürecinde değerli bilgilerini, tecrübelerini ve desteğini eksik etmeyen, tezin her aşamasında görüş ve önerilerini paylaşıp bana yol gösteren değerli tez danışmanım Sayın Prof. Dr. Kağan GÖKBAYRAK ve ikinci danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Derya DİNLER'e,

Tez çalışmam boyunca 121M658 numaralı proje kapsamında bursiyer desteği sağlayan TÜBİTAK'a,

Hayatımın her anında destekleriyle her zaman yanımda olan sevgili aileme ve arkadaşlarıma sonsuz teşekkür ederim.

Erva ÇELİK
Ocak 2023, Ankara

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR	x
1. GİRİŞ	1
2. GENEL BİLGİLER.....	3
2.1. Tesis Yerleşim Modelleri.....	3
2.1.1. Analitik Tesis Yerleşim Modeli	3
2.1.2. Sürekli Tesis Yerleşim Modeli	4
2.1.3. Ayrık Tesis Yerleşim Modeli	4
2.1.4. Ağ Tesis Yerleşim Modeli	5
2.2. Tesis Atama Modelleri	6
3. İLGİLİ ÇALIŞMALAR	7
4. METODOLOJİ.....	11
4.1. Sürekli Uzayda Ağaç-yıldız Dağıtım Ağı Eniyileme Problemi	11
4.2. Ayrıştırma Yöntemi.....	17
4.2.1. Alt Düzey Problemin İfadesi	22
4.2.2. Üst Düzey Problemin İfadesi	23
4.3. Ekleme Yöntemi	25
4.4. Birleştirici Sıradüzensel Kümeleme Yöntemi.....	27
4.5. Yerleştirme-Atama-Bağlama Yöntemi	31
4.5.1. Yerleştirme Adımı.....	31
4.5.2. Atama Adımı	32
4.5.3. Yerel Arama Yöntemi.....	34

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	36
5.1. Veriler ve Problem Parametreleri	36
5.2. Sürekli Problemin Çözümü	37
5.3. Ayrık Problemin Çözümü	38
5.4. Sezgisel Yöntemlerin Uygulanması	38
5.4.1. Ayrıştırma Yöntemi Sonuçları.....	39
5.4.2. Ekleme Yöntemi Sonuçları	42
5.4.3. Kümeleme Yöntemi Sonuçları	44
5.5. YAB Yöntemi.....	47
5.5.1. Yerel Arama Yöntemi.....	48
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	55

TABLULAR DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Tablo 3.1 Literatürdeki Çalışmalar	10
Tablo 4.1 Problem Parametreleri	12
Tablo 5.1 Parametre Değerleri	36
Tablo 5.2 Ayırık Problemin Sonuçları.....	39
Tablo 5.3 Dönüştürücü Aday Yerlerinin Maliyete Etkisi	41
Tablo 5.4 Eklenen Aday Dönüştürücü Sayıları ve Seçim için Çözüm Süreleri	42
Tablo 5.5 Ayırıştırma ve Ekleme Yöntemi Sonuçları	43
Tablo 5.6 Kümeleme Yöntemlerinin Karşılaştırması	45
Tablo 5.7 Sezgisel Yöntemlerin Karşılaştırması	46
Tablo 5.8 Ayırıştırma Yöntemi Sonrası YAB Uygulaması	48
Tablo 5.9 Ekleme Yöntemi Sonrası YAB Uygulaması	49
Tablo 5.10 Kümeleme Yöntemi Sonrası YAB Uygulaması	50
Tablo 5.11 YAB Uygulaması İterasyon Sayısı ve Toplam Süre	51
Tablo 5.12 YAB Uygulaması Sonrası Farklı Yerel Çözümlere Ulaşma Çalışması ..	52

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 4.1	Orta Gerilim Bağlantıları 13
Şekil 4.2	Örnek Talep Noktaları 18
Şekil 4.3	Çember Kesişim Noktaları 19
Şekil 4.4	Düzlemsel Kapsama Problemi Çözümü 19
Şekil 4.5	Ayrıştırma Yöntemi Adımları 22
Şekil 4.6	Kruskal Yöntemi Adımları 24
Şekil 4.7	Ekleme Yöntemi Adımları 26
Şekil 4.8	Kümeleme Uzaklık Tanımları 28
Şekil 4.9	Kümeleme Yöntemi Adımları 30
Şekil 4.10	YAB Yöntemi Adımları 33
Şekil 4.11	Yerel Arama Yöntemi Adımları 35
Şekil 5.1	13 Talep Noktalı Örnek Çözümü 37
Şekil 5.2	18 Talep Noktalı Örnek Çözümü 38
Şekil 5.3	18 Talep Noktalı Örnek için Ayrıştırma Yöntemi Çözümü 40
Şekil 5.4	18 Talep Noktalı Örnek için Ekleme Yöntemi Çözümü 40
Şekil 5.5	18 Talep Noktalı Örnek için Kümeleme Yöntemi Çözümü 40
Şekil 5.6	Yerel Arama Uygulanmadan Önce 53
Şekil 5.7	Yerel Arama ile Eklenen Bağlantı 53
Şekil 5.8	Yerel Arama ve YAB Uygulandıktan Sonra 54

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

N	:	Talep noktası sayısı
M	:	Aday dönüştürücü yerleri sayısı
(a, b)	:	Talep noktaları yerleri koordinatları
(x, y)	:	Dönüştürücü yerleri koordinatları
f	:	Dönüştürücüler arasındaki akış miktarı
ϕ	:	Üreteçten çıkan akış miktarı
v	:	Dönüştürücünün hizmet verme durumu
w	:	Dönüştürücünün aynı zamanda üreteç olma durumu
z	:	Talep noktasının dönüştürücüye bağlanma durumu
u	:	Dönüştürücülerin arasında bağlantı olma durumu
C_f	:	Dönüştürücü kapasitesi
D_{max}	:	Mesafe sınırı
c_F	:	Dönüştürücü maliyeti
c_S	:	Üreteç maliyeti
c_L	:	Düşük gerilim hatlarının birim uzunluk maliyeti
c_M	:	Orta gerilim hatlarının birim uzunluk maliyeti
d	:	Talep noktası ile dönüştürücü arasındaki mesafe
D	:	Dönüştürücü ile dönüştürücü arasındaki mesafe
J_1	:	Açılacak tesisler kümesi
J_0	:	Açılmayacak tesisler kümesi
σ	:	Tasarruf
S	:	Orta gerilim bağlantıları kümesi
C	:	Tesislere atanan talep noktaları kümesi

Kısaltmalar

ADP	:	Alt Düzey Problem
GSP	:	Gezgin Satıcı Problemi
ÜDP	:	Üst Düzey Problem
YAB	:	Yerleştirme-Atama-Bağlama Yöntemi

1. GİRİŞ

Birleşmiş Milletler Genel Kurulu tarafından kabul edilen Sürdürülebilir Kalkınma için 2030 Gündemi kapsamındaki 17 hedeften 7.'si herkese düşük maliyetli, güvenilir ve sürdürülebilir modern enerjilere erişim sağlanmasıdır. Dünya Bankası'nın verilerine göre 2017 yılında dünya nüfusunun %11'i elektrik enerjisine erişim olmadan yaşamaktadır. Bu kişilerin büyük çoğunluğu Sahra çölü güneyindeki Afrika ülkelerinin ve Güney Asya'nın kırsal bölgelerinde yaşamaktadır. Bu çalışma ile elektrik enerjisine erişim konusunda iyileştirme yapılması hedeflenmektedir.

10MW gücün altında elektrik üretimi yaparak ulusal şebekeye bağlı olmayan müşterilere yerel dağıtım ağları ile elektrik sağlayan şebekeler mini şebeke olarak adlandırılır. Uluslararası Enerji Ajansı, 2013 Dünya Enerji Görünümü'nde ulusal şebekeden coğrafi veya finansal sebeplerle izole kalmış kırsal yörelere elektrik sağlanmasında mini şebekeleri en uygun maliyetli yöntem olarak tanımlamıştır. Eğer kırsal yöredeki elektrik talep miktarı ulusal şebekeye bağlanmak için gerekli yatırıma yeterli dönüş sağlamıyorsa mini şebeke çözümleri tercih edilir. 2040 yılına kadar kırsal bölgelerde yaşayan 140 Milyon Afrikalının mini şebeke ile elektriğe kavuşacağı tahmin edilmektedir.

Mini şebekeler güneş enerjisini, rüzgâr, su veya dizel yakıt ile elde edilen mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirir. İki seviyeli dağıtım ağlarında jeneratörlerde (üreteç) üretilen elektrik 600V-35KV arası orta gerilim hatları ile dağıtım transformatörlerine (dönüştürücü) ulaştırılır. Dağıtım transformatörlerinden kullanıcılara ise 110V-240V düşük gerilim hatlarıyla elektrik dağıtımı yapılır. Orta gerilim hatlarındaki düşük akım seviyeleri sayesinde uzun mesafeler aşılabilmekte ancak yüksek akım seviyeli düşük gerilim hatları, elektrikli aletlerin gerilim düşmesinden olumsuz etkilenmesini önlemek için uzunluk sınırları içinde tutulmaktadır. Dolayısıyla kullanıcıların dönüştürücülere yakın olmaları gerekmektedir.

Kırsal bölgelerde herhangi bir altyapı olmadığından düzlemsel sürekli uzayda dönüştürücü yerleşim ve elektrik dağıtım problemi ele alınmaktadır. Dönüştürücülerin kökünde üreteç bulunan bir ağaç yapısıyla birbirleri üzerinden besleneceği, kullanıcıların dönüştürücülere

doğrudan yıldız biçimli ağ oluşturacak şekilde bağlantılı olacağı kabul edilmiştir. Ağaç-yıldız biçimli yerleşim ve dağıtım problemi, dönüştürücü yerleri için sonlu sayıda aday olacak şekilde ayrı bir problem olarak literatürde ele alınmıştır. Bu çalışmada, literatürdeki diğer çalışmalarda olduğu gibi var olan tek bir üreteç veya şebeke erişim noktasına bağlanmak için tasarım yapılmamaktadır. Gerek üreteçlerin gerekse dönüştürücülerin düzlem üzerinde herhangi bir yere konulması mümkündür, yani düzlemin bütün noktaları (sürekli uzay) aday yerlerdir.

Bu çalışmada sürekli uzayda ağaç-yıldız biçimli dağıtım ağı problemi için gerçek boyutta veriler kullanılarak sezgisel yöntemlerle problemin sonuçları elde edilecektir. Amaç hat ve tesis maliyetlerinden oluşan toplam maliyeti en-azaltacak şebekeyi tasarlayarak literatüre önemli bir katkı sağlamaktır. Geliştirilecek tasarım yönteminin bir planlama problemi için makul sayılabilecek sürelerde en iyi çözüme yakın sonuçlar vermesi amaçlanmaktadır.

Günümüzde hala varlığını sürdüren elektrik erişimi sorununa düşük maliyetli çözüm sağlamaya ve yaşam kalitesini artırmaya yönelik bir çalışma olması sebebiyle toplumsal etkisinin yüksek olacağını düşünülmektedir. Şebeke-dışı elektrik ağı inşa eden kurumların çalışmadaki çözüm önerilerini kullanıp maliyetlerini düşürmeleri, çalışmanın ekonomik katkısı olarak görülmektedir.

Tez çalışmasının akışı şu şekilde ilerlemektedir:

- 2. bölümde dağıtım ağı tasarımı problemi hakkında genel bilgiler verilmiştir.
- 3. bölümde ağaç-yıldız biçimli dağıtım ağı tasarımları konusunda yapılmış çalışmaları içermektedir.
- 4. bölümde problem ve problemi çözmek için kullanılan yöntemler tanıtılmıştır.
- 5. bölümde farklı veri kümeleri ile yapılan deneysel çalışmalar anlatılmıştır.
- Son olarak 6. bölümde yapılan çalışma ve gelecek çalışmalar ile ilgili değerlendirmeler yapılmıştır.

2. GENEL BİLGİLER

Dağıtım sistemi ile ilgili kararlar hemen hemen her şirket için stratejik bir konudur. Tesislerin konumlandırılması ve müşterilerin tahsis edilmesi sorunu, dağıtım sistemi tasarımının temel bileşenlerini kapsar. Özel sektör firmaları için konumlandırılması gereken depo, imalat ve montaj fabrikaları, perakende satış noktaları, mağazalar gibi farklı tipte tesisler bulunmaktadır. Bu tesislerin konumlandırılması yapılırken bazı kısıtlar da göz önünde bulundurulmalıdır; örneğin mağazalar, perakende satış noktalarının yakınında yer almalıdır. Firmaların ürünlerini üretme ve pazarlama yeteneği, kısmen tesislerin konumlandırıldığı yere bağlıdır. Benzer şekilde, devlet kurumları ofis, okul, hastane, itfaiye istasyonu vb. tesislerin yerlerine karar vermek zorundadır. Sağlanan hizmetlerin kalitesi tesislerin diğer tesislere göre konumuna bağlıdır [1]. Bu sebeple, Bölüm 2.1.'de dağıtım sistemi kararlarının en önemli bileşeni olan tesis yerleşim problemi ele alınmıştır. Bölüm 2.2.'de ise diğer bileşen olan atama problemine kısaca değinilmiştir.

2.1. Tesis Yerleşim Modelleri

Tesis yerleşim problemleri ve modelleri çeşitli şekillerde sınıflandırılabilir. Sınıflandırma, kullanılan topografyaya yani düzlemde bulunan aday tesislerin şekline, farklı mesafe ölçümlerini kullanan problemlere veya yerleştirilecek tesislerin sayısına dayalı olabilir [2]. Kapasite kısıtı olup olmaması veya tek aşamalı ve çok aşamalı olmasına göre de sınıflandırılabilir. Tesis yerleşim problemleri literatürde tek bir şekilde sınıflandırılmamıştır. Temel olarak tesis problemleri, analitik, sürekli, ayrık ve ağ modeller olarak dört sınıfa ayrılabilir [3].

2.1.1. Analitik Tesis Yerleşim Modeli

Analitik yerleşim modelleri, taleplerin bir şekle bağlı olarak mekana dağıldığını varsayar. Örneğin, tipik olarak, taleplerin baklava şeklindeki bir kare bölge üzerinde düzgün bir şekilde yani talep yoğunluğunun bölge üzerinde sabit dağıldığını varsayabilir [2]. Analitik modeller

basit varsayımlara dayanmaktadır. Bu varsayımlar, bir tesis kurmanın sabit maliyetleri gibi temel bilgilerle sınırlıdır. Gerçek dünya sorunlarını ifade etmek için pek kullanılmazlar [3].

2.1.2. Sürekli Tesis Yerleşim Modeli

Sürekli modellerde, konumlandırılacak tesisler seçilen düzlemde herhangi bir yere yerleştirilir ve bu nedenle talep noktalarının mesafelerine göre en iyi konumların belirlenmesi için hesaplamalar gerekir. Ayrıca, sürekli yerleşim modellerinde uygun teknikler kullanılarak müşteriler gruplandırılır ve her grubun ağırlık merkezi belirlenir. Her merkez daha sonra her grup için en iyi konum haline gelir [3]. Weber konum modeli, bu sınıftaki modellerin tipik bir örneğidir [2].

Sürekli yerleşim modelleri iki temel öznelik ile karakterize edilir [1]:

- Çözüm uzayı sürekli, yani tesislerin düzlemdeki her noktaya yerleştirilmesi mümkündür.
- Mesafe uygun bir metrik ile ölçülür.

Genel bir bakış açısıyla, tek tesis yerleştirme problemleri, çoklu tesis yerleştirme problemleri ve tesis yerleştirme-tahsis problemleri bu grupta yer alır. Tek tesis yerleştirme probleminde, yeni bir tesis, diğer tesislerle olan mesafeleri mümkün olduğunca en aza indirilecek şekilde yerleştirilmelir. Çoklu tesis yerleştirme problemlerinde ise yeni bir tesis yerine, birçok yeni tesisin optimum konumlarının belirlenmesi gerekir. Son olarak, tesis yerleştirme-tahsis problemleri, tesislerin en uygun yerlerini aramakla kalmaz aynı zamanda müşterilerin taleplerini karşılamak için bu tesisleri müşterilere en uygun şekilde atamaya çalışır [4].

2.1.3. Ayrık Tesis Yerleşim Modeli

Ayrık yerleşim modelleri, talep ve tesis konumları hakkında belirli bir varsayımda bulunmaz. Basitçe talep düğümlerinin ve aday tesislerin konumları veya koordinatları verilir. Talep ve

aday lokasyonlar arasındaki mesafelerin belirli bir formüle bağlı kalması gerekmez. Bu modeller genellikle tamsayı programlama modelleri olarak formüle edilir ve kesin veya sezgisel yöntemler kullanılarak çözülür [2].

Karesel atama problemi ve tesis yerleşim problemi, ayırık yerleşim problemlerinin en önemli unsurlarıdır. Karesel atama problemi, verilen tesislerden bazılarının verilen müşterilerden bazılarına tahsis edilmesi olarak yorumlanmaktadır. Genelde tesis yerleşim probleminde tesis, üretim, imalat, depo veya dağıtım tesisi olabilen bir dizi tesisten biri olarak düşünülmelidir [4].

2.1.4. Ağ Tesis Yerleşim Modeli

Ağ konum modellerinde mesafeler bir grafikteki en kısa yollar olarak hesaplanır. Düğümler, talep noktalarını temsil eder ve potansiyel tesis sahaları, düğümlerin bir alt kümesine ve kenarlar üzerindeki noktalara karşılık gelir [1]. Ağ modellerine, ulaşım planlamasında ve bir ağ üzerinde temsil edilen rotalarda tur yapılmasına izin veren diğer uygulamalarda sıklıkla rastlanır [3].

Bu tanıma dayalı olarak, ağ yerleşim modelleri beş ana kategoride sınıflandırılabilir. Bunlar, medyan problemi, kapsama problemi, merkez problemi, ana dağıtım üssü (hub) yerleşim problemleri ve hiyerarşik yerleşim problemleridir. Medyan problemleri, her bir talep noktasından en yakın tesise olan mesafelerin ağırlıklı toplamını enazlayacak şekilde tesislerin yerleştirilmesini amaçlar. Kapsama problemlerinde müşteri ve tesisin kapsama mesafesi adı verilen belirli bir mesafede bulunması koşuluyla, her müşteriye her tesis tarafından hizmet verilebilir. Merkez problemlerinde ise talep noktalarını kapsayacak dairelerin çaplarını en azlamak hedeflenmektedir. Mesafe açısından en kötü hizmeti alan talep noktasının dahi hizmetini iyileştirmek amaçlanmaktadır. Ana dağıtım üssü (hub) yerleşim problemleri, verilen talep noktaları arasındaki akışın belli noktalarda (üslerde) toplulaştırılıp taşınmasıyla maliyeti azaltmaya çalışır. Son olarak, hiyerarşik yerleşim problemlerinde birkaç hiyerarşik tesisin olduğu bir dağıtım sistemi vardır. Böyle

bir sistemde, bir üst seviyedeki tesisler, bir alt seviyedeki tesislerden bağımsız olarak konumlandırılabilir [4].

2.2. Tesis Atama Modelleri

Mal ve hizmet sağlayan tesisler ve bunları tüketen bir dizi talep noktası göz önüne alındığında, yer tahsisinin amacı, tesisleri talep noktalarına en verimli şekilde hizmet sağlamak için yerleştirmektir. Atamadan kaynaklanan maliyeti en aza indirmek için atama modellerinin amacı ise sabit miktarda kaynağın faaliyetlere en uygun şekilde tahsis edilmesidir. Atama probleminin en basit şekli, tahsis edilecek toplam kaynak miktarı verildiğinde dışbükey bir fonksiyonu en azlamaktır. Her talep noktasına tahsis edilecek kaynak miktarı, duruma bağlı olarak sürekli veya tamsayı değişkeni olarak ele alınır [5].

Kapasite tahsisi problemleri, birçok gerçek hayat çizelgeleme ve planlama probleminin özüdür. Bir kapasite tahsisi problemini çözenin ilk adımı, onu formüle etmek ve modellemektir. Bununla birlikte, bu adım oldukça zordur ve modelleme sürecinde hangi faktörlerin dikkate alınması gerektiğine dair genel bir kılavuz yoktur [6].

Basit yapısı nedeniyle atama/tahsis problemlerine, yük dağıtımı, üretim planlaması, bilgisayar kaynak tahsisi, kuyruk kontrolü, portföy seçimi ve paylaşırma gibi çeşitli uygulama alanlarında rastlanmaktadır. Amaç fonksiyonlarının ve kısıtların biçimine veya değişkenlerin türüne (sürekli veya tamsayı) bağlı olarak literatürde birçok verimli algoritma geliştirilmiştir [5]. Çoğu gerçek durumda ayrık modellerle çalışılmaktadır. Ayrık modeller, müşterilerin bir dizi potansiyel yerleşim noktasına tahsis edilmesiyle ilgilenir. Başka bir deyişle, ayrık bir modelde amaç, bilinen bir dizi lokasyondan tesisler için gerekli sayı kadarını seçmek ve ardından her müşteriyi bu tesislerden sadece birinden minimum maliyetle hizmet alacak şekilde tahsis etmektir. Bu modellerde kullanılan potansiyel noktalar genellikle ya sürekli modelin sonuçlarından ya da geçmiş deneyimlere dayalı olarak belirlenir [3].

3. İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Pirkul ve Nagarajan [7], ağaç-yıldız yapılı bilgisayar ağlarını ele almış, verilen bir ana bilgisayara bağlı toplayıcı yerlerinin sonlu sayıda aday yerler arası seçimini, toplayıcılar arası bağlantıların oluşumunu ve kullanıcı düğümlerinin toplayıcılara atanmasını gerçekleştirmiştir.

Kim ve Tcha [8], ağaç-yıldız yapısına sahip merkezlenmiş bir ağ için akış kısıtlı tam sayılı doğrusal programlama modeli geliştirmiş, dal-sınır yöntemiyle 50 aday yeri ve 200 kullanıcı için çözüm üretebilmiştir.

Lee, Lu, Qiu ve Glover [9], verilen bir sayıdaki anahtarlama merkezi ile sayısal veri dağıtım şebekesi planlama problemiyle ilgilenmiştir. Bu problemde aday yerler arasından anahtar merkezi yerlerini seçme, bu yerleri kapsayan ağaç ile birbirilerine bağlama ve müşterileri bu merkezlere atama kararları verilmektedir. Farklı döngü eleme kısıtları kullanan tam sayılı doğrusal programlama modelleri ve geçerli eşitsizlikler önermişlerdir. Elde edilen problem ifadelerinin doğrusal programlama gevşetmelerini kullanarak ifade güçlerini karşılaştırmışlardır. Ayrıca problemin NP-zor olduğunu kanıtlamışlardır. Lee, Chiu ve Ryan [10], problem için dal-kesim yöntemleri geliştirmiş, 70 aday yer ve 150 kullanıcı örnekleri çözebilmiştir. Problem için Lagrange gevşetmesi sezgiseli Lee, Lim ve Park'ın 1996 yılında yayımlanan makalesinde verilmiştir [11]. Daha büyük problemleri çözebilmek için Xu, Chiu ve Glover tabu arama metasezgiselini önermiştir [12].

Chamberland, Marcotte ve Sanso [13], geniş bant şebeke tasarımı problemini ele almış, ATM anahtarlarını, omurga ağı ve yerel ağları yerleştirme kararları vermiştir. Akış ve döngü eleme kısıtlarıyla ağaç-yıldız biçimli şebeke için farklı tam sayılı doğrusal programlama ifadeleri önermiştir. Ayrıca başka bir makalelerinde, Chamberland, Sanso ve Marcotte döngü eleme kısıtlı ifade için açgözlü sezgisel ve tabu arama sezgiseli önerip 500 kullanıcı ve 30 aday yerli örneklerde güzel sonuçlar elde edebilmişlerdir [14].

Chen, Campbell ve Thomas [15], teslim tarihi garantili karayolu taşımacılığı için ağ tasarımı problemini ele almış, doğrudan bağlantıların yüksek maliyetleri sebebiyle ağaç-yıldız

yapılı ağlara yoğunlaşmış, navlunu birleştirerek araç doluluğunu artırmayı ve paket tasnifini kolaylaştırmayı hedeflemişlerdir. Ağaç yapısı teslim tarihi garantisini her zaman sağlayamadığı için gecikmeleri en azaltacak ağacı tasarlamayı amaçlamışlardır. Contreras, Fernandez ve Marin [16], tek atamalı dağıtım göbeği yerleştirme problemini ele almış ve göbekleri ağaç yapısı üzerinde birbirilerine bağlamıştır. Çoklu ürün akış kısıtlı tam sayılı doğrusal programlama modelleri önermiş, problemlerin NP-zor olduğunu kanıtlamıştır. Bu sebeple problemi Lagrange gevşetmesiyle bağımsız alt problemlere parçalayarak çözmeyi önermiştir. Sa, Camargo ve Miranda ise aynı problem için bir Benders ayrıştırma algoritması önermiştir [17].

Gollowitzer ve Ljubic [18], geniş bant haberleşme ağı tasarımı problemini ele almıştır. Fiber optik dağıtım kabloları anahtarlama kabinlerine kadar gelmekte, kullanıcılar bu kabinlere bakır kablolar ile bağlanmaktadır. Kullanıcı yerlerinin, kabin ve Steiner düğümü aday yerlerinin verildiği durum için kabin yerlerine, Steiner ağaç yapısına ve hangi kabine hangi kullanıcının bağlanması gerektiğine karar verilmektedir. Bağlı tesis yerleştirme problemi adını verdikleri bu problem için tam sayılı doğrusal programlama modelleri önermişlerdir. Hem Ljubic ve Gollowitzer [19] hem de Gollowitzer, Gendron, ve Ljubic [20] makalelerinde problemin atama kısıtlı ve kapasite kısıtlı çeşitleri de sunulmuştur. Leitner, Ljubic, Salazar-Gonzalez, ve Sinnl [21], bağlı tesis yerleştirme problemi olurlu çözümlerinin çokyüzlü yapısını incelemiş, geçerli eşitsizlikler önermiş, yüzey tanımlar olmaları için gerekli şartları bulmuştur. Arulsevan, Bley, ve Ljubic [22], problemi zaman aralıklarına bölmüş, her bir zaman aralığında verilen kapsama seviyelerine göre bağlantılar ve kabinler ekleme problemine yoğunlaşmıştır.

Adasme [23], p-medyan problemini tesisler birbirlerine bağlı olacak şekilde ele almış, farklı alt döngü eleme kısıtlarıyla tam sayılı doğrusal programlama ifadeleri önermiştir. Ayrıca bu modellerin çözümü için değişken komşuluk arama metasezgiseli kullanmıştır.

Gokbayrak ve Kocaman 2017'de yayımlanan makalelerinde sürekli uzayda merkezi olmayan yıldız biçimli dağıtım problemini ele almıştır. Aday yer oluşturma, ayrık problem çözüp talep

noktalarını kümelere ayırma, her küme için çözümü sürekli uzayda iyileştirme adımlarıyla dağıtım ağı tasarlamıştır [24].

Daha sonra Gokbayrak ve Avcı [25], sürekli uzayda merkezi olmayan ağaç biçimli dağıtım problemini ele almış, önceki makaledekine benzer adımlarla talep noktalarını gruplayarak dağıtım ağları tasarlamıştır.

Son olarak Gokbayrak [26], sürekli uzayda iki seviyeli ağaç yıldız biçimli dağıtım ağı tasarımı üzerinde çalışmıştır. Sürekli problemi ayırık bir model ile ifade etmiş, daha sonra ayrıştırma metodu kullanarak bir çözüm elde etmiştir. Elde ettiği çözümler üzerinde sürekli düzlemde iyileştirmeler yapmıştır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, Gokbayrak [26] makalesinin devamı niteliğinde olup ayrıştırma yönteminin alt düzeyine yeni bir kısıt eklenerek güncellenmiş halini vermektedir. Bunun dışında ekleme ve kümeleme yöntemleri ile zamansal sorunlara alternatif çözümler aranmıştır. Sürekli uzayda iyileştirme için farklı alternatifler sunulmuştur.

Tablo 3.1 Literatürdeki Çalışmalar

Çalışma	Yıl	Problem	Uygulama/Yöntem
Pirkul ve Nagarajan [7]	1992	Ağaç-yıldız yapıtlı bilgisayar ağları	Süpürme buluşsal yöntemi
Kim ve Tcha [8]	1992	Ağaç-yıldız yapısına sahip merkezlenmiş ağ	Dal-sınır yöntemi ile
Lee, Lu, Qiu ve Glover [9]	1993	Sayısal veri dağıtım şebekesi planlama problemi	Tam sayılı doğrusal programlama
Lee, Chiu ve Ryan [10]	1996	Sayısal veri dağıtım şebekesi planlama problemi	Dal-kesim yöntemleri
Lee, Lim ve Park [11]	1996	Sayısal veri dağıtım şebekesi planlama problemi	Lagrange gevşetmesi sezgiseli
Xu, Chiu ve Glover [12]	1996	Sayısal veri dağıtım şebekesi planlama problemi	Tabu arama metasezgiseli
Chamberland, Marcotte ve Sanso [13]	1996	Geniş bant şebeke tasarımı problemi	Tabu arama metasezgiseli
Chamberland, Sanso ve Marcotte [14]	2000	Geniş bant şebeke tasarımı problemi	Akış ve döngü eleme kısıtlarıyla farklı tam sayılı doğrusal programlama ifadeleri
Chen, Campbell ve Thomas [15]	2000	Teslim tarihi garantili karayolu taşımacılığı için ağ tasarımı problemi	Döngü eleme kısıtlı ifade için açgözlü sezgisel ve tabu arama sezgiseli
Contreras, Fernandez ve Marin [16]	2008	Tek atamalı dağıtım göbeği yerleştirme problemi	Genel komşuluk yapılıan
Sa, Camargo ve Miranda [17]	2009	Tek atamalı dağıtım göbeği yerleştirme problemi	Lagrange gevşetmesiyle bağımsız alt problemlere parçalama
Ljubic ve Gollowitzer [18]	2011	Geniş bant haberleşme ağı tasarımı problemi	Benders ayrıştırma algoritması
Gollowitzer ve Gollowitzer [19]	2013	Geniş bant haberleşme ağı tasarımı problemi	Tam sayılı doğrusal programlama modelleri
Ljubic ve Gollowitzer [20]	2013	Geniş bant haberleşme ağı tasarımı problemi	Atama kısıtlı ve kapasite kısıtlı modeller
Gollowitzer, Gendron, ve Ljubic [21]	2013	Geniş bant haberleşme ağı tasarımı problemi	Atama kısıtlı ve kapasite kısıtlı modeller
Leitner, Ljubic, Salazar-Gonzalez, ve Simml [21]	2018	Geniş bant haberleşme ağı tasarımı problemi	Olurlu çözümlerin çokyüzlü yapısını inceleme
Arulselvan, Bley, ve Ljubic [22]	2018	Geniş bant haberleşme ağı tasarımı problemi	Zaman aralıklarına bölünmüş problem için bağlantı ve kabin ekleme
Adasme [23]	2018	P-medyan problemi	Tam sayılı doğrusal programlama ifadeleri, değişken komşuluk arama metasezgiseli
Gokbayrak ve Kocaman [24]	2017	Sürekli uzayda merkez olmayan yıldız biçimli dağıtım problemi	Ayrık problem çözümü, sürekli uzayda iyileştirme
Gokbayrak ve Avcı [25]	2020	Sürekli uzayda merkez olmayan ağaç biçimli dağıtım problemi	Ayrık problem çözümü, sürekli uzayda iyileştirme
Gokbayrak [26]	2022	Sürekli uzayda iki seviyeli ağaç yıldız biçimli dağıtım ağı problemi	Ayrık problem çözümü, sürekli uzayda iyileştirme

4. METODOLOJİ

Gökbayrak [26], sürekli uzayda tesis yerleşimi problemi için bir ayrıştırma yöntemi ve bu yöntemin sonuçlarını iyileştiren yerleştirme-atama-bağlama yöntemi önermiştir. Bu yöntemler uygulandığında gözlemlenen problemlerden biri olarak bazı veri kümeleri için çözüm sürelerinin yüksek olduğu söylenebilmektedir. Bu zaman problemine alternatifler üretmek adına uzun sürelere sebep olan adımlar için farklı yöntemler önerilmiştir.

Bu bölümde öncelikle, sürekli uzayda ağaç-yıldız dağıtım ağı tasarımı problemi için parametreler ve değişkenler tanımlanmış ve matematiksel model verilmiştir. Bu problem, mesafe sınırlı iki seviyeli sürekli dağıtım problemi modeli olarak tanımlanmıştır. Sonraki adımda, aday yerlerin belirlenmesi için bir yöntem tanıtılmış, sürekli problemin ayrık ifadesi verilmiş ve problemi iki düzeyde çözen ayrıştırma sezgiseli anlatılmıştır. Daha sonra, alternatif olarak her seferinde bir dönüştürücüyü ağa dahil eden aç gözlü bir algoritma olan ekleme yöntemi ve dört farklı bağlantı yöntemi kullanan kümeleme yöntemleri verilmiştir. Son olarak da sezgisel yöntemlerle elde edilmiş dağıtım ağında dönüştürücü yerlerini iyileştiren yerleştirme-atama-bağlama metodu incelenmiştir.

4.1. Sürekli Uzayda Ağaç-yıldız Dağıtım Ağı Eniyileme Problemi

Şebekeye uzak yerleşim yerlerine elektrik dağıtımını sağlanması için oluşturulacak şebeke tasarımında, kullanıcılar elektrik erişimi olan bir dönüştürüye veya direkt olarak üretece yıldız biçimli ağ oluşturulacak şekilde bağlanacaktır. Dönüştürücüler ise üreteç tarafından üretilen elektrik enerjisini birbirleri üzerinden veya direkt üreteçten ağaç yapısı olacak şekilde elde edecektir. Talep noktalarına elektrik iletimi, düşük gerilim hatları ile sağlanacaktır. Bu durumda gerilim düşmesinden kaynaklanacak sorunları azaltmak adına düşük gerilim hatlarının uzunlukları belli bir mesafeyi aşmayacak şekilde seçilmiştir. Dönüştürücü kapasitesini aşmamak için dönüştürücülerin hizmet vereceği kullanıcı sayısı sınırlandırılmıştır. Düşük gerilim hatları tek bir talep noktasına hizmet ettikleri için düşük gerilim hattı kapasitesi tanımlanmamıştır. Üreteçler ve dönüştürücüler arasındaki bağlantı

orta gerilim hatları ile sağlanmıştır. Orta gerilim hatlarının kapasitesi ele alınacak talep noktaları sayılarında kısıtlayıcı olmayacağı için modele dahil edilmemiştir. Aynı şekilde üreteç kapasitesi gerektiği kadar artırılabilirdiğinden üreteç kapasitesi tanımlanmamıştır. Şebeke maliyeti üreteç, dönüştürücü ve kablo maliyetlerinden oluşmaktadır. Bu bağlamda toplam maliyeti en azaltacak ağaç-yıldız biçimli şebekelerin tasarlanması hedeflenmektedir.

Düzlem üzerine yerleşmiş (a_i, b_i) koordinatlı N adet eşit güç talepli noktaya hizmet vermek istenildiğinde, her talep noktası tek bir dönüştürücüye bağlanacağı için en fazla N adet dönüştürücü kullanılabilir. Bu dönüştürücülerin koordinatları (x_j, y_j) , sürekli problemin karar değişkenlerindedir.

Tablo 4.1 Problem Parametreleri

Parametreler	
N	Talep noktası sayısı
(a_i, b_i)	Talep noktalarının koordinatları $i \in N$
C_f	Talep noktası cinsinden dönüştürücü kapasitesi
D_{max}	Düşük gerilim hatlarının birim talebe hizmet için uzunluk sınırı
c_F	Dönüştürücü maliyeti
c_S	Üreteç maliyeti
c_L	Düşük gerilim hatlarının birim uzunluk maliyeti
c_M	Orta gerilim hatlarının birim uzunluk maliyeti

Karar değişkenleri:

(x_j, y_j) : Dönüştürücü j 'nin koordinatları, $j \in N$

f_{kj} : k ve j dönüştürücüleri arası bağlantı üzerindeki hizmet verilen talep noktası sayısı cinsinden akış miktarı, $j, k \in N$

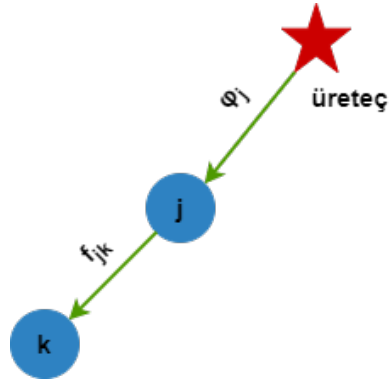
ϕ_j : j noktasındaki üreteçten ağa verilen hizmet verilen talep noktası sayısı cinsinden akış, $j \in N$

$$v_j = \begin{cases} 1 & \text{eğer } j \in N \text{ dönüştürücüsü hizmet veriyorsa,} \\ 0 & \text{aksi halde;} \end{cases}$$

$$w_j = \begin{cases} 1 & \text{eğer } j \in N \text{ dönüştürücüsü aynı zamanda üreteçse,} \\ 0 & \text{aksi halde;} \end{cases}$$

$$z_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } i \in N \text{ talep noktası } j \in N \text{ dönüştürücüsüne bağlanırsa,} \\ 0 & \text{aksi halde;} \end{cases}$$

$$u_{jk} = \begin{cases} 1 & \text{eğer } j \in N \text{ dönüştürücüsü } k \in N \text{ dönüştürücüsü üzerinden besleniyorsa,} \\ 0 & \text{aksi halde;} \end{cases}$$



Şekil 4.1 Orta Gerilim Bağlantıları

Orta gerilim bağlantıları üzerindeki üreteçten j tesisine olan akış miktarı ϕ_j ve j tesisi üzerinden k tesisine olan akış miktarı f_{kj} , Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Bütün talep noktalarına hizmet edecek kadar üreteç kapasitesi sabit bir maliyet oluşturduğundan eniyileme problemine katılmamaktadır. Bahsi geçen üreteç maliyeti, kapasiteden bağımsız gerekli donanımına ait maliyettir. Üreteç olarak hizmet veren noktanın getirdiği maliyet, dönüştürücü ve üreteç maliyeti toplamıdır. Diğer taraftan dağıtım ağlarında dönüştürücü kapasitesini yani çekilebilecek maksimum gücü aşmamak ve talep noktalarındaki dönüştürücüye olan uzaklığa

bağlı voltaj düşmesini sınırlamak gerekmektedir. Bu sebeple dönüştürücü kapasitesi (C_f) ve uzunluk sınırı (D_{max}) parametreleri kullanılmaktadır.

Bu karar değişkenleri ve parametreler ile sürekli uzayda doğrusal olmayan eniyileme problemi şu şekilde tanımlanabilir:

$$\text{enküçült} \sum_{j=1}^N (c_F v_j + c_S w_j) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_L z_{ij} \|(x_j, y_j) - (a_i, b_i)\| + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N c_M u_{jk} \|(x_j, y_j) - (x_k, y_k)\| \quad (1)$$

öyle ki

$$\sum_{j=1}^N z_{ij} = 1, i \in \{1, \dots, N\} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{ij} \leq C_f v_j, j \in \{1, \dots, N\} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{ij} + \sum_{k=1, k \neq j}^N f_{jk} = \sum_{k=1, k \neq j}^N f_{kj} + \phi_j, j \in \{1, \dots, N\} \quad (4)$$

$$\phi_j \leq N w_j, j \in \{1, \dots, N\}, \quad (5)$$

$$f_{kj} \leq N u_{jk}, j, k \in \{1, \dots, N\}, j \neq k \quad (6)$$

$$v_k \geq u_{jk}, j, k \in \{1, \dots, N\}, j \neq k \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^N \|(x_j, y_j) - (a_i, b_i)\| z_{ij} \leq D_{max}, i \in \{1, \dots, N\} \quad (8)$$

$$v_j, w_j \in \{0, 1\}, j \in \{1, \dots, N\} \quad (9)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (10)$$

$$u_{jk} \in \{0, 1\}, j, k \in \{1, \dots, N\} \quad (11)$$

$$x_j, y_j, \phi_j \geq 0, j \in \{1, \dots, N\} \quad (12)$$

$$f_{jk} \geq 0, j, k \in \{1, \dots, N\} \quad (13)$$

Enküçültülecek maliyet (1), dönüştürücü, üreteç ve kablo maliyetlerinden oluşmaktadır. Problem tanımındaki $\|\cdot\|$, Öklid mesafesini göstermektedir. Kısıt (2) talep noktalarının tek bir dönüştürücünden hizmet alacağını göstermektedir. Kısıt (3), yalnız hizmette olan dönüştürücüye bağlanılabileceğini ve dönüştürücüye bağlanan talep noktalarının kapasite ile kısıtlı olduğunu belirtir. Kısıt (4) akış dengesini gösterir. Kısıt (5) üreteçten ağa akış olacağını, kısıt (6) ise kullanılan orta gerilim bağlantılarında akış olacağını gösterir. Kısıt (7), orta gerilim bağlantısı için uçlarındaki dönüştürücülerin hizmette olması gerekliliğini ve hizmette olan dönüştürücünün ya üretece ya da başka bir dönüştürücüye bağlı olması gerekliliğini gösterir. Kısıt (8) ise düşük gerilim hat uzunluklarının D_{max} sınırı altında kalmasını sağlar. Geriye kalan kısıtlar değişkenlerin tanım kümelerini vermektedir.

Problem tanımında Öklid uzunluklarıyla ikili karar değişkenlerinin çarpımını içeren doğrusal olmayan terimler bulunmaktadır. Bu terimlerin doğrusallaştırılması mümkündür. Öncelikle, dönüştürücüler arası uzaklıklar, ve kullanıcılar ile dönüştürücüler arası uzaklıklar için değişkenler tanımlayıp ikinci dereceden koni kısıtları probleme eklenilebilir. Sonrasında bu uzaklıkların ikili değişkenlerle çarpımları için değişkenler tanımlayarak büyük-M kısıtlı bir problem ifadesi elde edilebilir. Her ne kadar bu doğrusallaştırma işlemi problem çözümünü değiştirmeyecek olsa da artan değişken ve kısıt sayısı, özellikle de büyük-M kısıtları, problemin ancak çok küçük örnekler için çözülebilmeye sebep olacaktır. Doğrusallaştırma adımları aşağıda verilmektedir.

Öncelikle dönüştürücüler arası uzaklık için D_{jk} ve kullanıcılar ve dönüştürücüler arası uzaklık için d_{ij} karar değişkenleri ifade edilmelidir. Ayrıca bu uzaklıkların x ve y koordinatlarındaki bileşenleri için D_{jk}^x , D_{jk}^y , d_{ij}^x , d_{ij}^y değişkenleri tanımlanmalıdır. Diğer taraftan $\delta_{ij} = d_{ij}z_{ij}$ ve $\Delta_{jk} = D_{jk}u_{jk}$ karar değişkenlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu yeni değişkenleri ve ikinci dereceden koni kısıtlarını içeren problemin son hali şu şekilde verilebilir:

$$enküçült \sum_{j=1}^N (c_F v_j + c_S w_j) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_L \delta_{ij} + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N c_M \Delta_{jk} \quad (14)$$

öyle ki

$$\sum_{j=1}^N z_{ij} = 1, i \in \{1, \dots, N\} \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{ij} \leq C_f v_j, j \in \{1, \dots, N\} \quad (16)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{ij} + \sum_{k=1, k \neq j}^N f_{jk} = \sum_{k=1, k \neq j}^N f_{kj} + \phi_j, j \in \{1, \dots, N\} \quad (17)$$

$$\phi_j \leq N w_j, j \in \{1, \dots, N\} \quad (18)$$

$$f_{kj} \leq N u_{jk}, j, k \in \{1, \dots, N\}, j \neq k \quad (19)$$

$$v_k \geq u_{jk}, j, k \in \{1, \dots, N\}, j \neq k \quad (20)$$

$$d_{ij}^x = x_j - a_i, i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (21)$$

$$d_{ij}^y = y_j - b_i, i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (22)$$

$$d_{ij}^2 \geq (d_{ij}^x)^2 + (d_{ij}^y)^2, i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (23)$$

$$D_{jk}^x = x_j - x_k, j, k \in \{1, \dots, N\} \quad (24)$$

$$D_{jk}^y = y_j - y_k, j, k \in \{1, \dots, N\} \quad (25)$$

$$D_{jk}^2 \geq (D_{jk}^x)^2 + (D_{jk}^y)^2, i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (26)$$

$$\delta_{ij} \leq D_{max} z_{ij}, i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (27)$$

$$\delta_{ij} \leq d_{ij}, i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (28)$$

$$\delta_{ij} \geq d_{ij} + M(z_{ij} - 1), i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (29)$$

$$\Delta_{jk} \leq M u_{jk}, j, k \in \{1, \dots, N\} \quad (30)$$

$$\Delta_{jk} \leq D_{jk}, j, k \in \{1, \dots, N\} \quad (31)$$

$$\Delta_{jk} \geq D_{jk} + M(u_{jk} - 1), i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (32)$$

$$v_j, w_j \in \{0, 1\}, j \in \{1, \dots, N\} \quad (33)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (34)$$

$$u_{jk} \in \{0, 1\}, j, k \in \{1, \dots, N\} \quad (35)$$

$$x_j, y_j, \phi_j \geq 0, j \in \{1, \dots, N\} \quad (36)$$

$$d_{ij}, \delta_{ij} \geq 0, i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (37)$$

$$D_{jk}, \Delta_{jk}, f_{jk} \geq 0, j, k \in \{1, \dots, N\} \quad (38)$$

$$D_{jk}^x, D_{jk}^y \in R, j, k \in \{1, \dots, N\} \quad (39)$$

$$d_{ij}^x, d_{ij}^y \in R, i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (40)$$

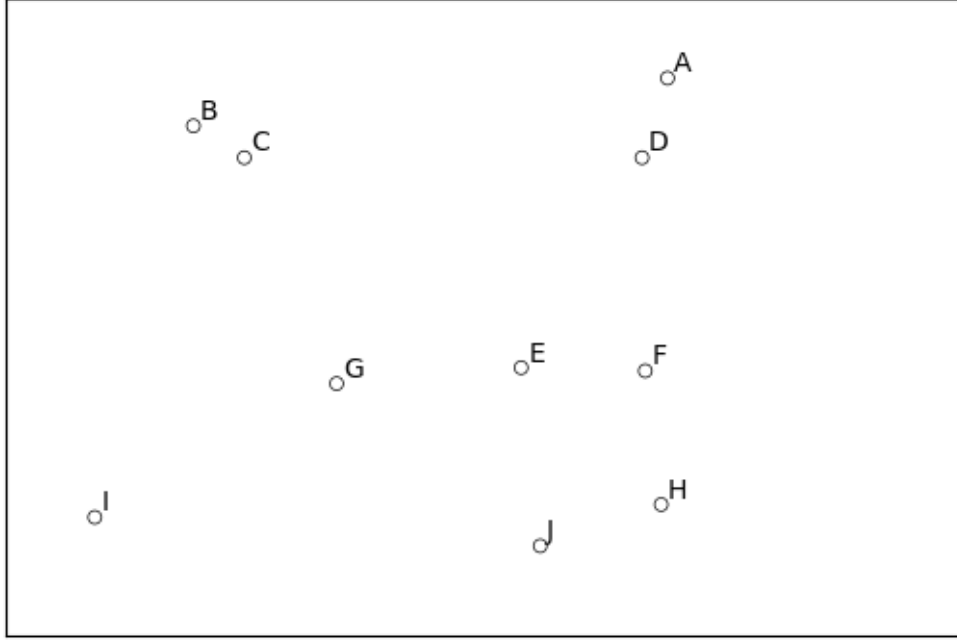
Sürekli uzayda ağaç-yıldız bağlantılı problemin ifadesi olan yukarıdaki modelin çözümü Bölüm 5.2.'de tartışıldığı gibi uygun sürelerde gerçekleştirilememektedir. Bu sebeple 3 farklı sezgisel yöntem kullanılarak en düşük maliyetlere yakın çözümler elde edilmek istenmiştir. Kullanılan sezgisellerin detayları Bölüm 4.2., 4.3., ve 4.4. içerisinde verilmekte ve Bölüm 5.4. deneysel çalışmalar bölümünde, önerilen yöntemler zaman ve maliyet açısından karşılaştırılmaktadır.

4.2. Ayırıştırma Yöntemi

Hansen, Mladenović, ve Taillard [27], sürekli bir problem olan çok kaynaklı Weber problemi sezgisel çözümünün, problemin ayrık karşılığı olan p-Medyan probleminin çözümünden elde edilmesini önermiştir.

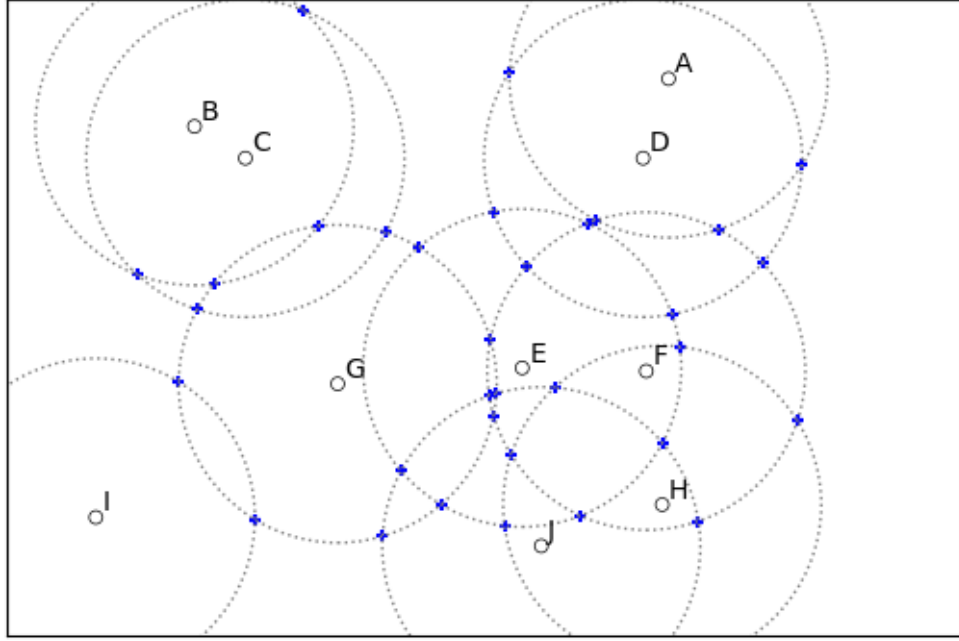
Benzer şekilde, bu çalışmada ele alınan sürekli problemin sezgisel olarak çözümü için problemin ayrık karşılığı ifade edilmiştir. Dönüştürücü yerlerine bağlı değişen uzaklıklar yerine sabit uzaklıklar tanımlayabilmek için ilk olarak dönüştürücü aday yerlerinin oluşturulması gerekmektedir. Dönüştürücü aday yerleri seçiminde geleneksel olarak sadece talep noktaları yerleri ile sınırlı kalınır. Fakat Church [28], dairesel alanla düzlemsel küme kapsama problemi için en iyi çözümün talep noktalarının etraflarında çizilen çemberlerin kesişim noktalarını aday yerler olarak kullanan ayrık problemle bulunabileceğini

göstermiştir. Bu bilgi, Gökbayrak ve Kocaman [24] tarafından şu şekilde kullanılmıştır: Örneğin Şekil 4.2’de görülen talep noktalarını en az sayıda D_{max} yarıçaplı daireler ile kapsama problemini çözmek için Şekil 4.3’de görüldüğü gibi talep noktaları etrafına D_{max} yarıçaplı daireler çizilir.



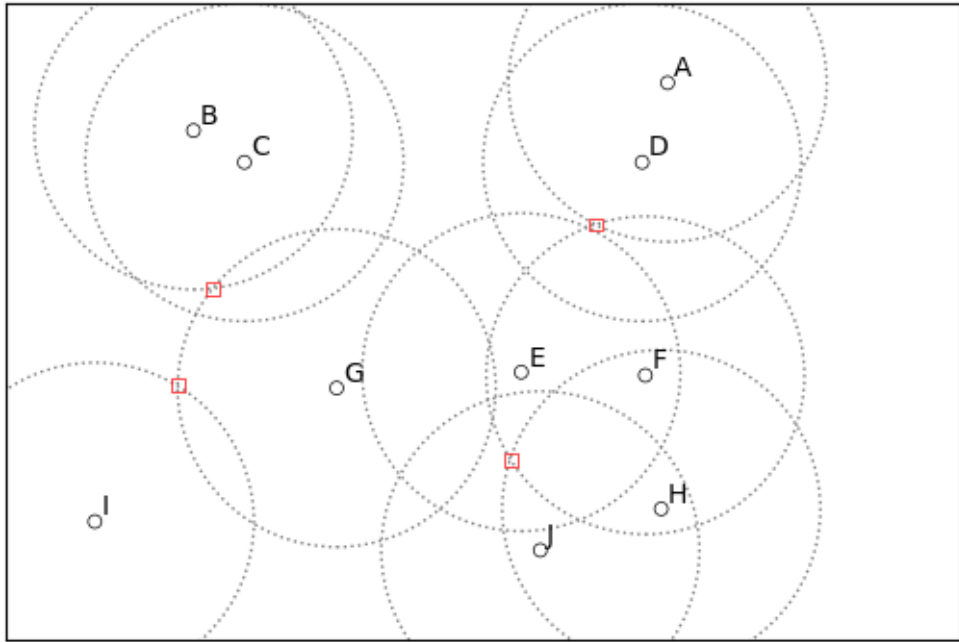
Şekil 4.2 Örnek Talep Noktaları

Bu dairelerin kesiştiği noktalar belirlenir. Ayrıca diğer talep noktalarına uzaklığı $2D_{max}$ 'tan fazla olan, başka bir deyişle D_{max} yarıçaplı çemberi diğer çemberler ile kesişmeyen, talep noktaları ve çember kesişim noktaları birlikte aday tesisleri oluşturur. Çok sayıda aday tesis oluşmasını engellemek için herhangi bir aday tesisin kapsadığı talep noktalarının alt kümelerini kapsayan tesisler elenir. Kalan tesisler C kümesini oluşturur. Talep noktaları kümesi de I olarak gösterildiğinde, kapsama göstergesi α_{ik} , $i \in I$ talep noktası $k \in C$ aday yeri tarafından kapsanıyorsa, yani talep noktasının aday yerine mesafesi D_{max} veya daha düşükse, 1 değerini alan ikili parametre tanımlanır. Bu ek tanımlarla oluşturulan ve dönüştürücülerin en fazla C_f kadar talebe hizmet verebildiği kapasite kısıtlı düzlemsel kapsama problemi çözümlenerek elde edilen çözüm noktaları talep noktalarıyla birlikte toplam M adet nokta ayrık problemin dönüştürücü aday yerleri olarak kullanılır. Şekil 4.2’de verilen



Şekil 4.3 Çember Kesişim Noktaları

örnek problemin yukarıda anlatılan yöntemle çözümü Şekil 4.4’de verilmiştir. Kırmızı noktalar seçilen tesis yerlerini göstermektedir.



Şekil 4.4 Düzlemsel Kapsama Problemi Çözümü

$$\text{enküçült} \sum_{k \in C} v_k \quad (41)$$

öyle ki

$$\sum_{k: \alpha_{ik}=1} z_{ik} = 1, i \in I \quad (42)$$

$$z_{ik} \leq v_k, i \in I, k \in C, \alpha_{ik} = 1 \quad (43)$$

$$\sum_{i: \alpha_{ik}=1} z_{ik} \leq C_f v_k, k \in C \quad (44)$$

$$v_k \in \{0, 1\}, k \in C \quad (45)$$

$$z_{ik} \in \{0, 1\}, i \in I, k \in C \quad (46)$$

Dikkat edilecek olursa kısıt (43), kısıt (44) ile aynı görevi yapmaktadır. Modelde sadece kısıt (44)'in varlığı optimal sonuca ulaşmak için yeterlidir. Fakat sayısal deneyler kısmında da görüleceği gibi kısıt (43) geçerli eşitsizliğinin modele eklenmesi daha avantajlıdır.

M adet dönüştürücü aday yerinin belirlenmesi sonrasında ayrık problem ifadesi şu şekilde verilmektedir.

$$\text{enküçült} \sum_{j=1}^N (c_F v_j + c_S w_j) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_L z_{ij} d_{ij} + \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N c_M u_{jk} D_{jk} \quad (47)$$

öyle ki

$$\sum_{j=1}^N z_{ij} = 1, i \in \{1, \dots, N\} \quad (48)$$

$$z_{ij} \leq v_j, i \in \{1, \dots, N\}, j \in \{1, \dots, M\} \quad (49)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{ij} \leq C_f v_j, j \in \{1, \dots, M\} \quad (50)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{ij} + \sum_{k=1, k \neq j}^N f_{jk} = \sum_{k=1, k \neq j}^N f_{kj} + \phi_j, j \in \{1, \dots, M\} \quad (51)$$

$$\phi_j \leq N w_j, j \in \{1, \dots, M\} \quad (52)$$

$$f_{kj} \leq Nu_{jk}, j, k \in \{1, \dots, M\}, j \neq k \quad (53)$$

$$v_k \geq u_{jk}, j, k \in \{1, \dots, M\}, j \neq k \quad (54)$$

$$\sum_{j=1}^N d_{ij} z_{ij} \leq D_{max}, i \in \{1, \dots, N\} \quad (55)$$

$$v_j, w_j \in \{0, 1\}, j \in \{1, \dots, M\} \quad (56)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, i \in \{1, \dots, N\}, j \in \{1, \dots, M\} \quad (57)$$

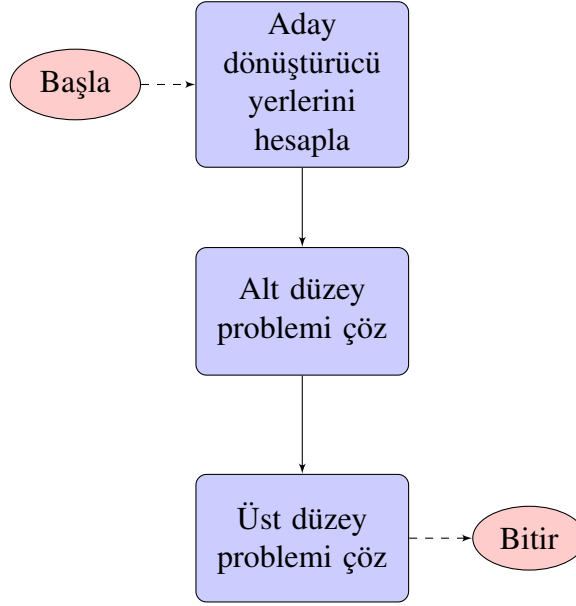
$$u_{jk} \in \{0, 1\}, j, k \in \{1, \dots, M\} \quad (58)$$

$$\phi_j \geq 0, j \in \{1, \dots, M\} \quad (59)$$

$$f_{jk} \geq 0, j, k \in \{1, \dots, M\} \quad (60)$$

Bir önceki modelde bahsedildiği gibi kısıt (49)'nin kısıt (50)'e ek geçerli eşitsizlik olarak modele eklenmesi sayısal deneylerde tartışıldığı üzere eklenmemesinden daha avantajlıdır.

Yukarıda verilen ayrık modelin çözümü sürekli modele göre daha kolay olmasına rağmen yine de büyük ölçekli örnekler için makul sürelerde çözülememektedir. Dolayısıyla ayrık problemin çözümü için sezgisel yöntemlere başvurulmaktadır. Ayrık model ile 4 farklı karar alınmaktadır: (1) dönüştürücü yerlerinin belirlenmesi, (2) dönüştürücü - talep noktası atamalarının yapılması, (3) dönüştürücü - dönüştürücü bağlantılarının belirlenmesi, (4) üreteç yerlerinin belirlenmesi. (1) ve (2) kararları bilindiğinde, (3) ve (4) kararlarının alınması kolay olduğu için problemi 2 düzeye ayırıp hiyerarşik olarak çözmek akla ilk gelen sezgisel yöntem olmaktadır. Önce (1) ve (2) kararlarının verildiği alt düzey problem tanımlanıp çözülür, bu çözüm (3) ve (4) kararlarının verildiği üst düzey probleme girdi olarak verilerek nihai sonuç elde edilebilir. Şekil 4.5'de, bu çalışmada uygulanan ilk sezgisel olan ayırıştırma yöntemi adımları verilmektedir.



Şekil 4.5 Ayrıştırma Yöntemi Adımları

4.2.1. Alt Düzey Problemin İfadesi

Ayrık problemin parçalanarak çözüldüğü ayrıştırma yönteminin ilk adımı, dönüştürücü ve düşük gerilim ağlarının maliyetlerini enküçültten en iyileme probleminin çözümesidir. Bu problemin çözümü ile hangi dönüştürücülerin hizmette olacağı ve hangi talep noktalarına bağlanarak hizmet vereceği belirlenebilmektedir. Alt düzey problem şu şekilde tanımlanır:

$$\text{enküçült} \sum_{j=1}^M c_F v_j + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M c_L z_{ij} d_{ij} \quad (61)$$

öyle ki

$$\sum_{j=1}^M z_{ij} = 1, i \in \{1, \dots, N\} \quad (62)$$

$$z_{ij} \leq v_j, i \in \{1, \dots, N\}, j \in \{1, \dots, M\} \quad (63)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{ij} \leq C_f v_j, j \in \{1, \dots, M\} \quad (64)$$

$$\sum_{j=1}^M d_{ij} z_{ij} \leq D_{max}, i \in \{1, \dots, N\} \quad (65)$$

$$v_j \in \{0, 1\}, j \in \{1, \dots, M\} \quad (66)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, i \in \{1, \dots, N\}, j \in \{1, \dots, M\} \quad (67)$$

Problemin çözümü ile talep noktalarının tamamının hizmet alması kapasite ve uzaklık kısıtlamaları altında sağlanmış olur. Böylelikle düşük gerilim hatları oluşturularak yöntemin ilk kısmı tamamlanır.

4.2.2. Üst Düzey Problemin İfadesi

Ayrık problemin ilk adımından elde edilen çözümden elde edilen v_j ve z_{ij} değerleri kullanılarak üreteç yerleri ve orta gerilim hatlarının belirleneceği üst düzey bir problem ifade edilmiştir:

$$\text{enküçült} \sum_{j=1}^M c_S w_j + \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^M c_M u_{jk} D_{jk} \quad (68)$$

öyle ki

$$\sum_{i=1}^N z_{ij} + \sum_{k=1, k \neq j}^M f_{jk} = \sum_{k=1, k \neq j}^M f_{kj} + \phi_j, j \in \{1, \dots, M\} \quad (69)$$

$$\phi_j \leq N w_j, j \in \{1, \dots, M\} \quad (70)$$

$$f_{kj} \leq N u_{jk}, j, k \in \{1, \dots, M\}, j \neq k \quad (71)$$

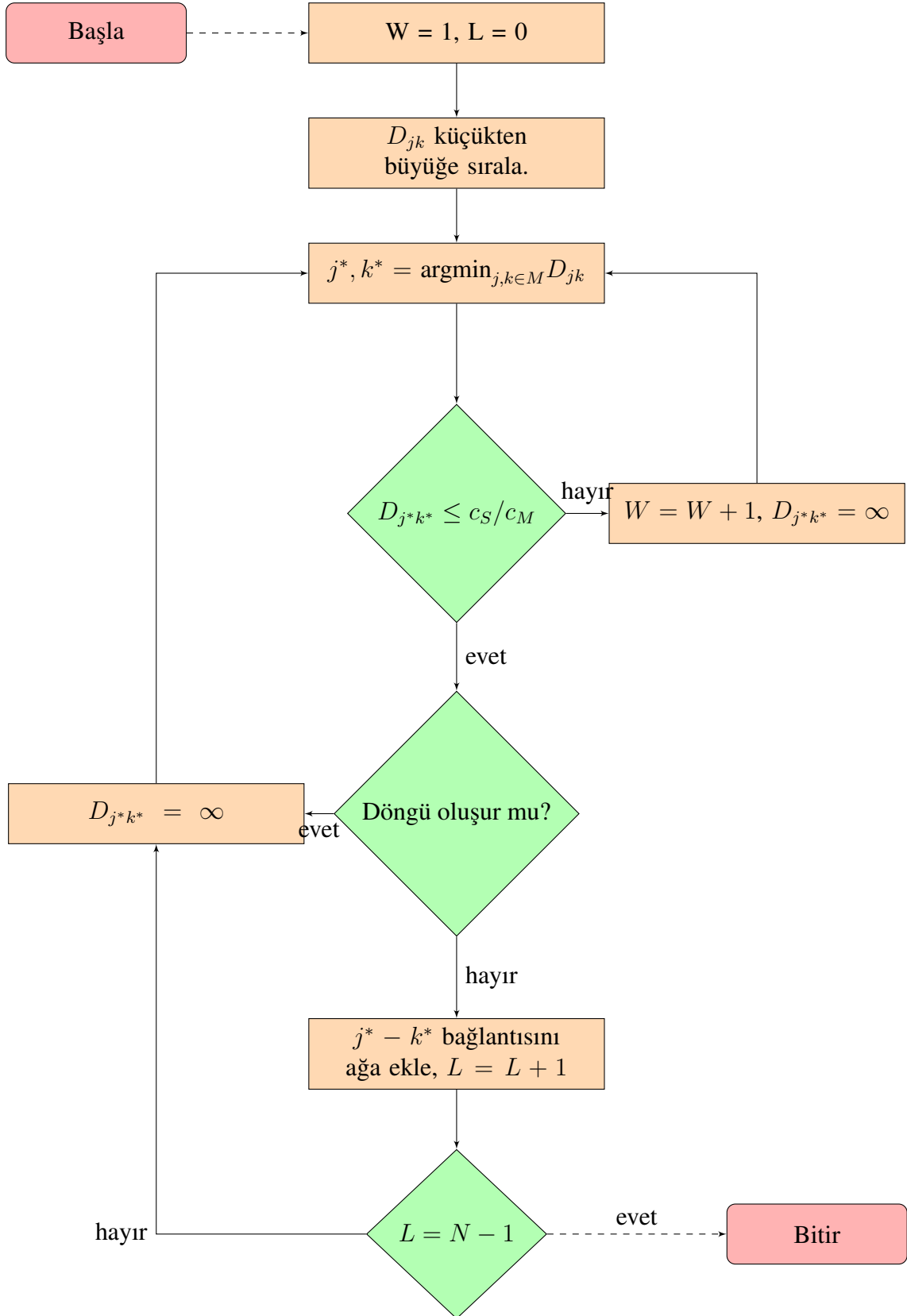
$$v_k \geq u_{jk}, j, k \in \{1, \dots, M\}, j \neq k \quad (72)$$

$$w_j \in \{0, 1\}, j \in \{1, \dots, M\} \quad (73)$$

$$u_{jk} \in \{0, 1\}, j, k \in \{1, \dots, M\} \quad (74)$$

$$\phi_j \geq 0, j \in \{1, \dots, M\} \quad (75)$$

$$f_{jk} \geq 0, j, k \in \{1, \dots, M\} \quad (76)$$



Şekil 4.6 Kruskal Yöntemi Adımları

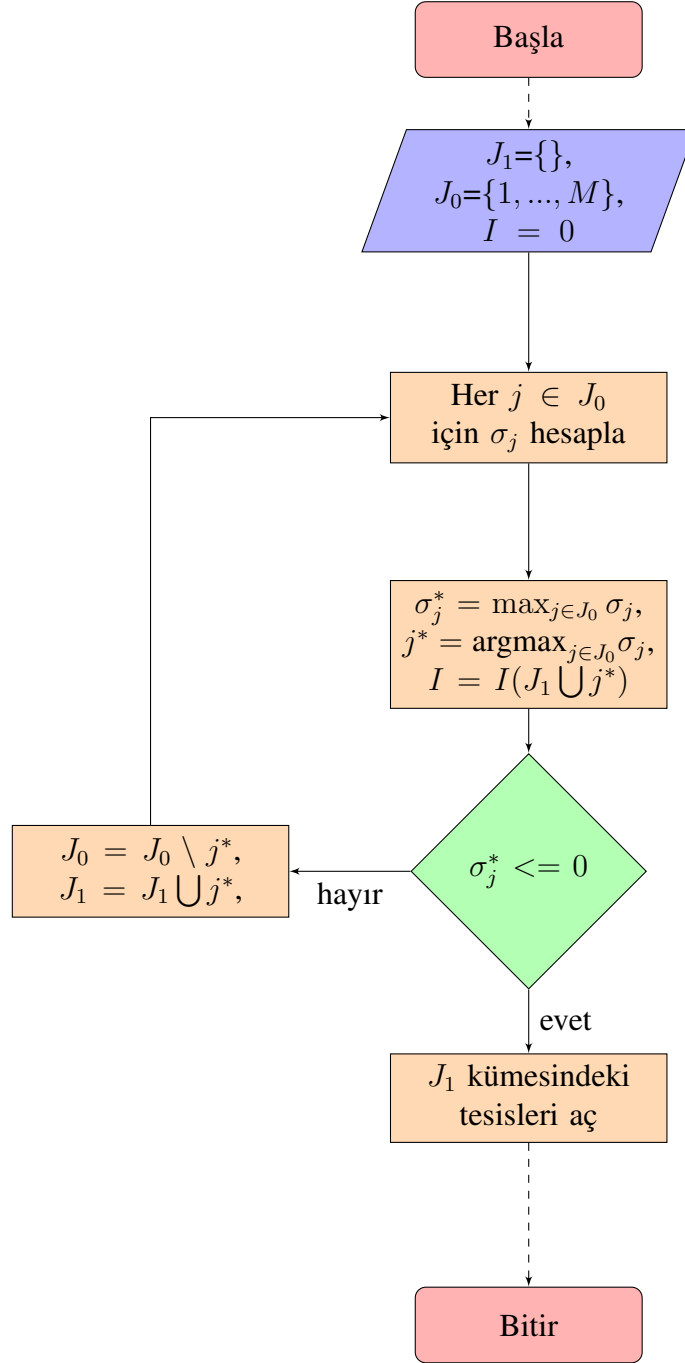
Bu problemin çözümü için Kruskal [29] tarafından sunulan yöntem ile alt düzey problemde elde edilen düşük gerilim hatları üzerine orta gerilimli bir ağ oturtulur. En iyi çözümde hiçbir orta gerilim hattının c_S/c_M oranından daha uzun olmaması gerektiği söylenebilir. Çünkü daha uzun hatlar yerine yeni bir üreteç eklenerek maliyet azaltılabilir. Bu orandan daha kısa olan dönüştürücüler arası bütün olası bağlantılar Kruskal yönteminde olduğu gibi küçükten büyüğe sıralanarak sırasıyla ağaç yapısını bozmayacak ise omurgaya eklenir. Bütün bağlantılar denedikten sonra oluşan ormandaki her ağaç içindeki herhangi bir dönüştürücüye üreteç eklenir. Üreteç sayısı W ve bağlantı sayısı L olarak alındığında Kruskal yöntemi adımları Şekil 4.6’te verilmiştir.

Tüm bu aşamalar sonunda oluşan çözüm “Ayrıştırma Yöntemi” olarak adlandırmakta ve deneysel çalışmalar kısmında diğer yöntemlerle karşılaştırılmaktadır.

4.3. Ekleme Yöntemi

Ayrıştırma yönteminin alt düzey problemde matematiksel model çözümü bazı büyük ölçekli örnekler için oldukça uzun sürmektedir. Matematiksel çözümün yerine Jacobsen [30] tarafından kapasite kısıtlı tesis yer seçimi problemi için önerilen ve bu konuda yaygın olarak kullanılan açgözlü bir yöntem olan ekleme algoritması, mesafe kısıtları da göz önünde bulundurularak güncellenmiş ve kullanılmıştır. Ekleme yöntemi, her adımda tüm seçenekleri değerlendirerek en fazla tasarruf sağlayan tesisi seçmeyi hedefler ve aynı zamanda problemin gerektirdiği kısıtlamaların da sağlanıp sağlanmadığının kontrolünü yapar. Literatürde kapasite kısıtlı uygulamaları mevcuttur. Bu problem için talep noktaları tesislere atanırken mesafe sınırı da dikkate alınmıştır. Böylelikle aday dönüştürücüler içinden, dönüştürücü yerleri ve taleplerin dönüştürücülere atamaları belirlendikten sonra ikinci aşama olan orta gerilimli ağın oluşturulması yine ayrıştırma yöntemindeki gibi Kruskal yöntemi ile yapılır. Elde edilen çözüm “Ekleme Yöntemi” olarak adlandırılmakta ve deneysel çalışmalar kısmında diğer yöntemlerle karşılaştırılmaktadır.

Ekleme yöntemi, tüm talep noktalarının dönüştürücü ve üreteç olduğu varsayımı ile başlar. Burada ilk maliyet $T_0 = N(c_F + c_S)$ olarak hesaplanır. Daha sonra her aday tesis için



Şekil 4.7 Ekleme Yöntemi Adımları

bu nokta hizmet verdiğinde oluşacak tasarruflar hesaplanır. Her $j \in J_0$ tesisi ile bu tesise atanmış talep noktaları arasındaki bağlantı maliyeti toplamı $\sum_{i \in N_j} c_L d_{ij}$ ve bu tesisi açmanın maliyeti c_F toplamı, k adet atanmış tesisin atanmadan önceki maliyetlerinden $k(c_F + c_S)$ çıkarılır. Tüm adaylar için artış tasarruf yapıldıktan sonra en fazla tasarruf sağlayan aday tesis

hizmete açılır. Sonraki adımda kullanılacak maliyet hesaplanırken toplam maliyetten tasarruf değeri çıkarılır. Bu adımlar tasarruflar sıfırdan büyük olduğu sürece tekrarlanır. Şekil 4.7’de ekleme yönteminin adımları verilmektedir. Şekilde kullanılan ek sembollerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

J_1 : Açılacak tesisler kümesi

J_0 : Açılmayan tesisler kümesi

σ_j : $j, j \in \{1, \dots, M\}$ tesisi için hesaplanan tasarruf

T : Toplam Maliyet

N_j : j tesisinin hizmet verdiği talep noktaları kümesi

k_j : j tesisinin hizmet verdiği talep noktaları sayısı

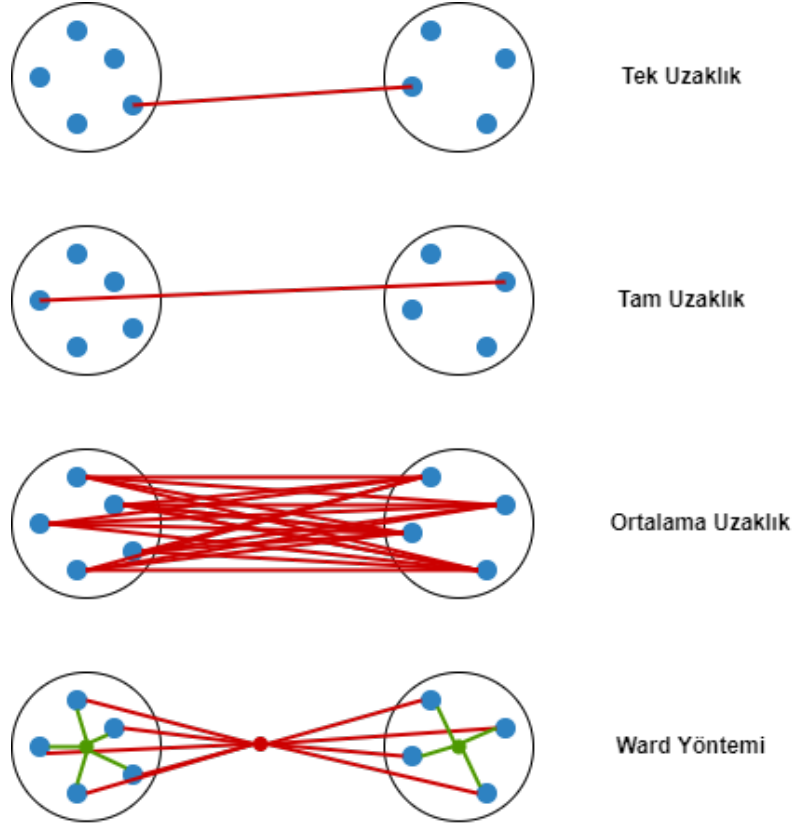
$$\sigma_j = k_j(c_F + c_S) - \sum_{i \in N_j} c_L d_{ij} - c_F, j \in J_0$$

4.4. Birleştirici Sıradüzensel Kümeleme Yöntemi

Kümeleme yöntemleri genel olarak sıradüzensel ve bölümleyici yöntemler olarak iki kategoriye ayrılır. Sıradüzensel kümeleme algoritmaları birleştirerek ya da bölerek iç içe geçmiş kümeler oluşturur. Birleştiren yöntemler, her noktanın kendi başına ayrı bir küme olduğu çözümle başlayarak her adımda en yakın iki kümeyi birleştirerek birleştirerek tek bir küme elde edene kadar devam eder. Bölen yöntemler ise, tüm noktaların tek bir kümede olduğu çözümle başlayarak her adımda kümelerden birini iki ayrı kümeye bölerek her noktanın kendi başına ayrı bir küme olduğu aşamaya kadar devam eder. Bu çalışmada birleştirici sıradüzensel kümeleme yöntemi kullanılmıştır.

Ayrıştırma ve ekleme yöntemlerinde yapılan dönüştürücü aday yerlerinin belirlenmesi adımı atlanarak, sadece talep noktalarıyla çalışılmıştır. Başlangıçta, her talep noktası tek elemanlı birer küme olarak alınmıştır. Talep noktaları sıradüzensel kümeleme yardımıyla farklı bağlantı şekilleri kullanılarak dönüştürücü kapasiteleri ve mesafe kısıtları göz önünde bulundurularak gruplanmış ve bu gruplama sonucunda elde edilen çözümle yerel ağ çözümleri elde edilmiştir. Burada, küme sayısı dönüştürücü sayısını, kümelerin

geometrik medyan değerleri dönüştürücü yerlerini ve her kümeye atanan noktalar talep noktası-dönüştürücü bağlantılarını vermektedir. Elde edilen yerel ağ çözümü üzerine orta gerilim bağlantılarını ve üreteçleri yerleştirmek için önceki bölümlerde anlatılan Kruskal yöntemi uygulanmıştır.



Şekil 4.8 Kümeleme Uzaklık Tanımları

(a_i, b_i) talep noktası i 'nin koordinatları, K_j ve K_k j ve k kümesine atananları, $d(j, k)$ ise j ve k kümesi arası mesafeyi göstermektedir. Bu ifadeler kullanılarak, yöntemin her adımında birleştirilecek en yakın iki kümeyi belirlemek için kümeler arası mesafeler Şekil 4.8'de gösterilen farklı uzaklık tanımları kullanılarak hesaplanmıştır .

Tam uzaklık: Birbirine en uzak noktalar arası mesafe

$$d(j, k) = \max_{i \in K_j, l \in K_k} \|(a_i, b_i) - (a_l, b_l)\| \quad (77)$$

Tek uzaklık: Birbirine en yakın noktalar arası mesafe

$$d(j, k) = \min_{i \in K_j, l \in K_k} \|(a_i, b_i) - (a_l, b_l)\| \quad (78)$$

Ortalama uzaklık: Tüm nokta çiftleri arası uzaklıkların ortalaması

$$d(j, k) = \frac{1}{|K_j||K_k|} \sum_{i \in K_j} \sum_{l \in K_k} \|(a_i, b_i) - (a_l, b_l)\| \quad (79)$$

Ward yöntemi: iki kümenin küme merkezleri ve küme elemanları arasındaki mesafelerin karelerinin toplamı

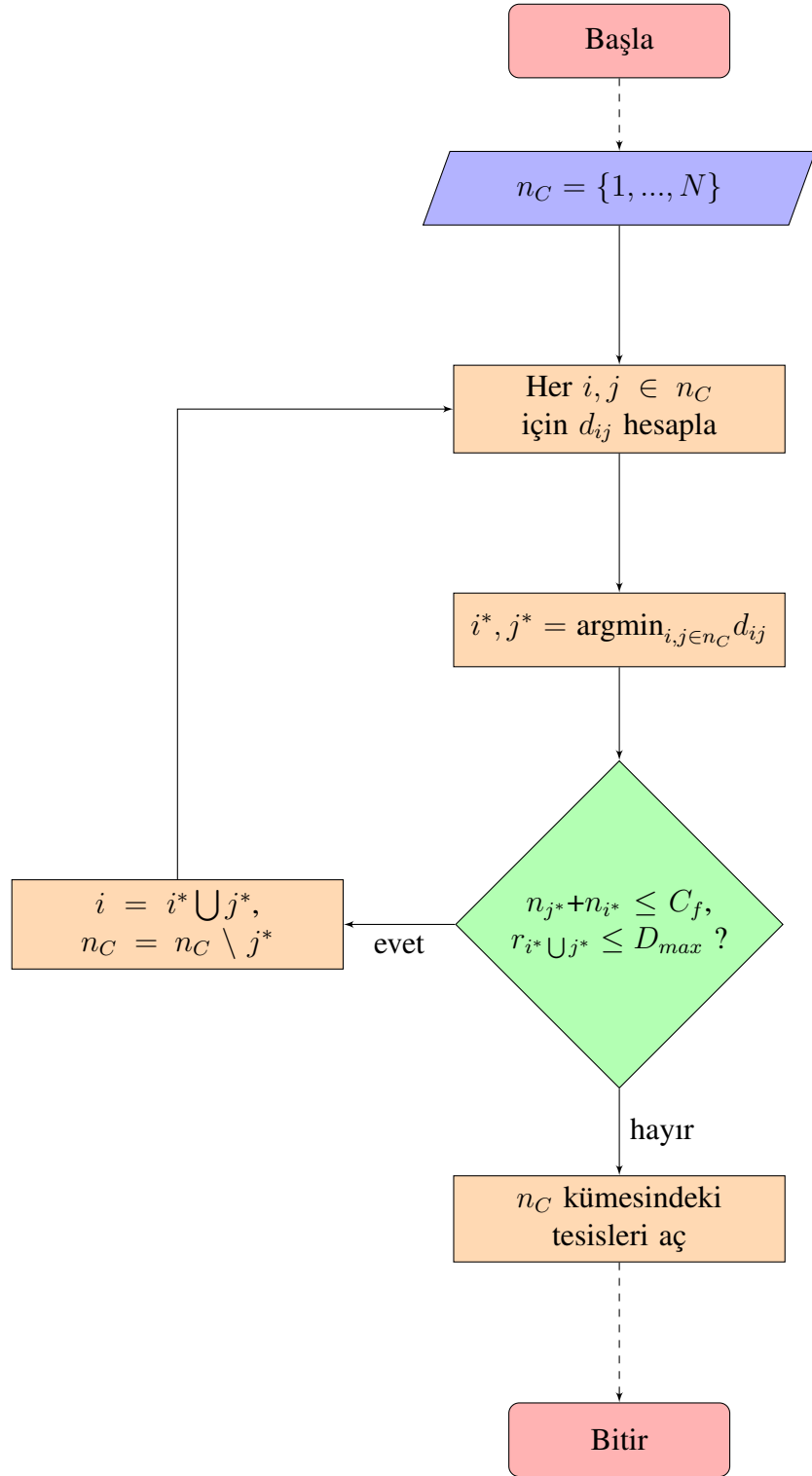
$$d(j, k) = \sqrt{\frac{2|K_j||K_k|}{|K_j| + |K_k|}} \left\| \frac{1}{|K_j|} \sum_{i \in K_j} (a_i, b_i) - \frac{1}{|K_k|} \sum_{l \in K_k} (a_l, b_l) \right\| \quad (80)$$

Her olası küme birleştirme alternatifi için yukarıdaki yöntemlerden biriyle mesafeler hesaplandıktan sonra aşağıdaki şartları sağlayan 2 küme birleştirilip adımlar başka küme birleşimi mümkün olmayana kadar tekrarlanır.

- $d(j, k)$ mesafeleri arasından en küçük değeri alan ikili seçilmelidir.
- K_j ve K_k kümelerinin tüm elemanlarını kapsayan ve merkezi küme elemanlarının merkezi olan en küçük dairenin çapı $2D_{max}$ değerinden büyük olmamalıdır.
- K_j ve K_k kümelerinin eleman sayıları toplamı en fazla C_f olmalıdır.

Her bir kümeye hizmet verecek tesisin yeri (x, y) , bu kümelerde bulunan talep noktalarının konumlarının geometrik medyanı hesaplanarak belirlenir. Bu hesaplama için aşağıdaki matematiksel model çözülmektedir.

$$\text{enküçült} \sum_{i \in K_j} \|(x, y) - (a_i, b_i)\| \quad (81)$$



Şekil 4.9 Kümeleme Yöntemi Adımları

öyle ki

$$\|(x, y) - (a_i, b_i)\| \leq D_{max}, i \in K_j \quad (82)$$

$$x, y \geq 0 \quad (83)$$

Tüm farklı bağlantı tanımları ve belirtilen şartlar kullanılarak uygulanan bu metot “Kümeleme Yöntemi” olarak adlandırmış ve deneysel çalışmalar kısmında diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Şekil 4.9’de kümeleme yönteminin adımları verilmektedir. Bu şekilde kullanılan ek sembollerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

n_C : Küme etiketleri

n_i : $K_i, i \in n_C$ kümesinin eleman sayısı

r_i : $K_i, i \in n_C$ kümesinin çember yarıçapı

4.5. Yerleştirme-Atama-Bağlama Yöntemi

Bu bölümde, yukarıdaki bölümlerde detayları verilen 3 farklı sezgiselden biriyle dağıtım ağı oluşturulduktan sonra sürekli düzlemde dönüştürücü yerlerini değiştiren ve bağlantıları yenileyen bir iyileştirme yöntemi önerilmiştir. Sürekli düzlemde dönüştürücü yerlerinde değişiklikler yaparak bağlantı maliyetlerini azaltmak hedeflenmektedir. Bu yöntem, Cooper’ın yerleştirme-atama yöntemine benzer bir yöntemdir [31]. Yöntemde, çözüm yakınsayana kadar yinelenmekte olan yerleştirme ve atama adımlarının bu tezde ele alınan problem için uyarlanması detayları aşağıda verilmiştir.

4.5.1. Yerleştirme Adımı

Sezgisellerle ayrık problem için elde edilen çözümle, hizmette olan dönüştürücüler kümesi $V = \{j : v_j = 1\}$, omurga üzerindeki bağlantılar kümesi $E = \{(j, k) : j, k \in V, u_{jk} = 1\}$ ve her dönüştürücü $j \in V$ için hizmet verilen talep noktası kümesi $K_j = \{i : z_{ij} = 1\}$ belirlenir. Dönüştürücülerin bağlı olduğu talep noktaları (z_{ij} değerleri)

ve dönüştürücüler arası bağlantılar (u_{jk} değerleri) sabit kabul edilerek aşağıdaki dışbükey problem çözülmektedir:

$$enküçült \sum_{j \in V} \sum_{i \in K_j} c_L \|(x_j, y_j) - (a_i, b_i)\| + \sum_{j \in V} \sum_{k: (j,k) \in E} c_M \|(x_j, y_j) - (x_k, y_k)\| \quad (84)$$

öyle ki

$$\|(x_j, y_j) - (a_i, b_i)\| \leq D_{max}, j \in V, i \in K_j \quad (85)$$

$$x_j, y_j \geq 0, j \in V \quad (86)$$

Bağlantı maliyetlerini enküçükleyen bu problem, tesislere atanan talep noktalarını koruyacak şekilde sadece dönüştürücü yerlerinde değişiklikler yapar. Çözüm sonucunda yeni dönüştürücü yerleri (x_j, y_j) elde edilir.

4.5.2. Atama Adımı

Bu adımda, yerleştirme adımından elde edilen yeni dönüştürücü yerleri kullanılarak aşağıda verilen mesafe kısıtlı kapasiteli atama problemi çözülmektedir. Talep noktaları ve önceki adımdan gelen dönüştürücüler arasındaki mesafeler, $d_{ij} = \|(x_j, y_j) - (a_i, b_i)\|$ şeklinde yeniden hesaplanarak modelde parametre olarak kullanılmıştır:

$$enküçült \sum_{i=1}^N \sum_{j \in V} z_{ij} d_{ij} \quad (87)$$

öyle ki

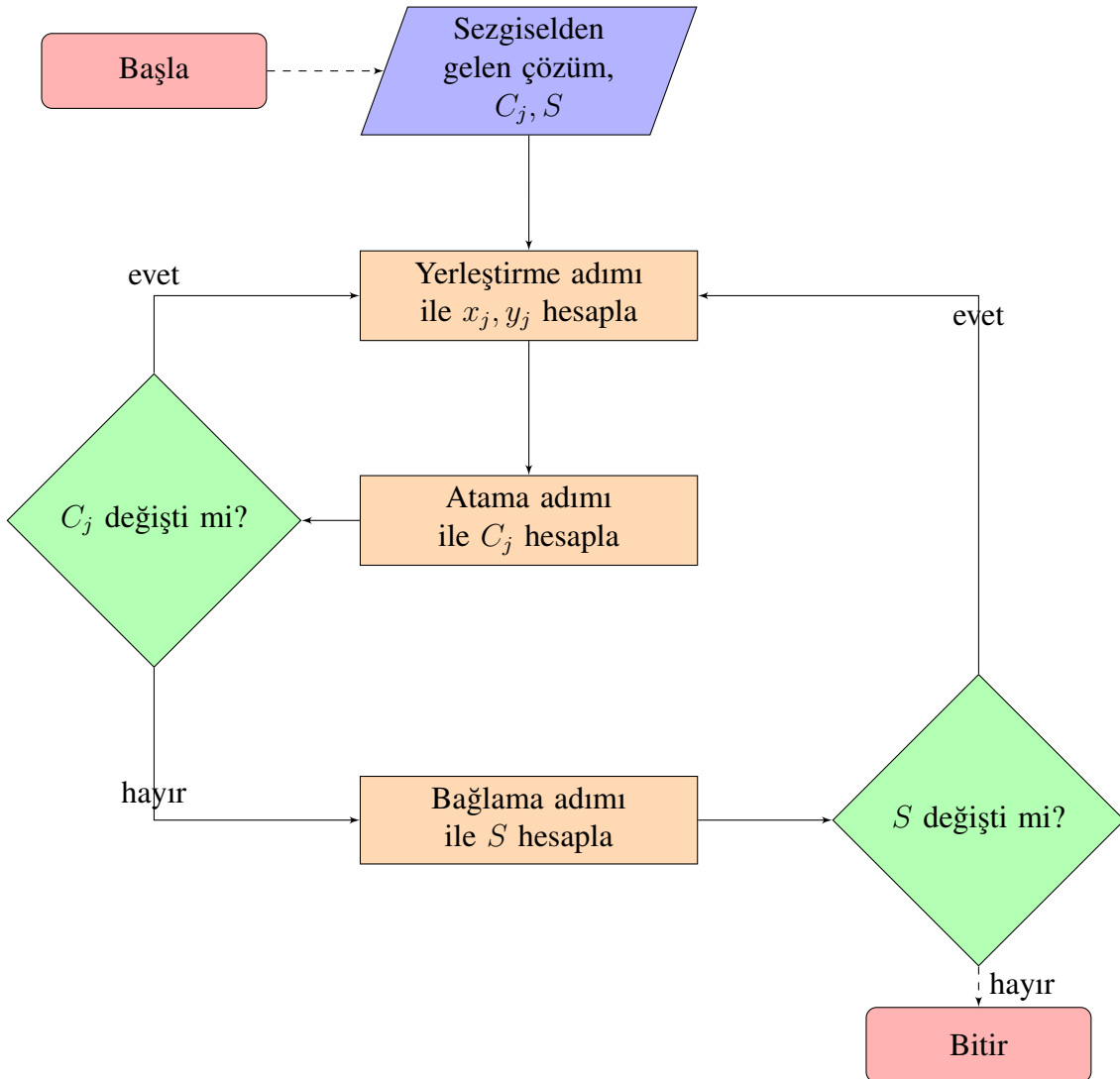
$$\sum_{j \in V} z_{ij} = 1, i \in \{1, \dots, N\} \quad (88)$$

$$\sum_{i=1}^N z_{ij} \leq C_f, j \in V \quad (89)$$

$$\sum_{j \in V} z_{ij} d_{ij} \leq D_{max}, i \in \{1, \dots, N\} \quad (90)$$

$$z_{ij} \in \{0, 1\}, i \in \{1, \dots, N\}, j \in V \quad (91)$$

Talep noktaları ve tesisler arasındaki mesafeler toplamını en küçükleyecek şekilde atamalar yapmayı sağlayan bu adım ile her talep noktası tesis kapasitelerini aşmayacak şekilde yeniden atanmıştır. Elde edilen çözüm, yeni talep noktası-dönüştürücü bağlarını vermekte ve bu bağlar bir sonraki yerleştirme adımına girdi olmaktadır.



Şekil 4.10 YAB Yöntemi Adımları

Yerel bağlantılar değişmeyene kadar yerleştirme ve atama adımları tekrarlanır. Bu adımlar tamamlandıktan sonra orta gerilim hatlarını oluşturmak için Kruskal yöntemi kullanılır. Dönüştürücü-dönüştürücü bağlarında bir değişiklik olmuşsa yeni bağlantılarla en başa dönülerek çözümler tekrarlanır. Dağıtım ağı artık herhangi bir değişikliğin olmadığı durumda son halini alır. Son durumda elde edilen dönüştürücü yerleri, başta kullanılan aday yerlerden farklı olacaktır. Yeni oluşturulan bu şebeke için her orta gerilim bağlantı ağacında o ağacın dönüştürücüleri arasından birisine üreteç eklenir. Şekil 4.10'de YAB yönteminin adımları verilmektedir. Bu şekilde kullanılan ek sembollerin açıklamaları aşağıda verilmiştir.

S : Orta gerilim bağlantıları kümesi

C_j : $j, j \in \{1, \dots, M\}$ tesisine atanan talep noktaları kümesi

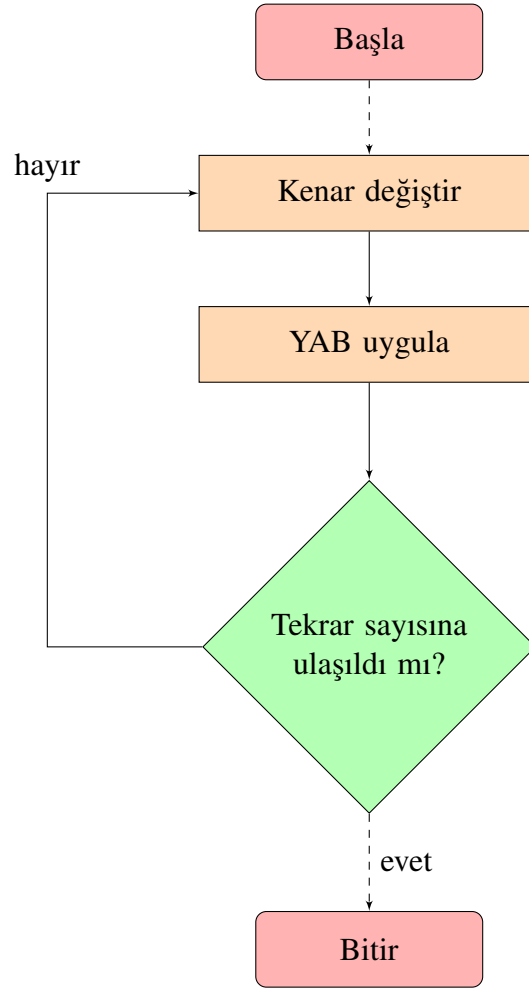
4.5.3. Yerel Arama Yöntemi

Sürekli uzayda yapılan bu iyileştirmeye elde edilen sonuç başlangıç çözümüne bağlıdır. Farklı başlangıç çözümleriyle farklı yerel sonuçlara ulaşılabilir. İyileştirme sonucu elde edilen çözümde birkaç farklı biçimde yerel arama yaparak ulaşılan yerel çözümden kurtulup daha iyi bir çözüme ulaşabilmek hedeflenmiştir. Bu amaçla denenilen 4 farklı yerel arama yöntemi önerisi aşağıdaki gibidir:

1. Orta gerilim bağlantılarından biri eşit olasılıkla rastgele seçilerek koparılmış, oluşan ağın ağaç yapısına gelebilmesi için koparılan bağlantı dışında en az maliyetli olan orta gerilim alternatifi eklenmiştir.
2. Orta gerilim bağlantılarına uzunluklarıyla doğru orantılı olarak olasılıklar atanmış ve bu olasılıklara göre seçilen bağlantı koparılmış, oluşan ağın ağaç yapısına gelebilmesi için koparılan bağlantı dışında en az maliyetli olan orta gerilim alternatifi eklenmiştir.
3. Düşük gerilim bağlantılarından biri rastgele seçilerek koparılmış, boşta kalan talep noktası mesafe ve kapasite kısıtlarını sağlayan koparılan bağlantı dışında en uzak tesise bağlanmıştır.

4. Düşük gerilim bağlantılarından biri rastgele seçilerek koparılmış, boşta kalan talep noktası mesafe ve kapasite kısıtlarını sağlayan koparılan bağlantı dışında en yakın tesise bağlanmıştır.

İlk iki yöntemde, dönüştürücüler arası bağlantılar değiştirilerek, son ikisinde ise talep noktası-dönüştürücü atamaları değiştirilerek farklı bir çözüm elde edilir. Her yöntem için, bu yeni çözümü sürekli uzayda iyileştirmek adına yine yerleştirme-atama-bağlama (YAB) yöntemi uygulanır, sonrasında tekrar bahsi geçen yerel arama yöntemiyle başka bir çözüme geçilir. Belli bir tekrar sayısında bu işlemler devam eder ve her yöntem için en iyi sonucu veren çözüm alınarak uygulama sonlandırılır.



Şekil 4.11 Yerel Arama Yöntemi Adımları

5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde çeşitli veri kümeleri kullanılarak önerilen yöntemler test edilmiş ve elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir. Bölüm 5.1.'de kullanılan veriler ve seçilen parametreler tanımlanmıştır. Bölüm 5.2.'de sürekli uzayda ağaç-yıldız biçimli dağıtım ağı probleminin gerçek boyuttaki örnekler üzerinde çözüm kabiliyeti incelenmiştir. Bölüm 5.3.'de ayrık tam sayılı doğrusal programlama modeli, örnek veriler üzerinde verdiği sonuçlar incelenmiştir. Sezgisel yöntemlerin her bir veri setinde uygulanması ve elde edilen sonuçlar Bölüm 5.4.'de verilmiştir. Son olarak, Bölüm 5.5.'de sezgisel yöntemlerin sonuçlarında sürekli uzayda dönüştürücülerin yerlerini değiştirerek (YAB yöntemi uygulanarak) maliyetlerin iyileştirilmesi gösterilmiştir.

5.1. Veriler ve Problem Parametreleri

Bu çalışmada, talep noktaları için 14 farklı veri kümesi kullanılarak sayısal deneyler gerçekleştirilmiştir. Bu veri kümelerinin 9 tanesi gezgin satıcı problemi (GSP) için literatürde Reinelt tarafından kullanılan verilerdir [32]. Bu veri kümelerinin bazıları literatürdeki başka çalışmalarda da kullanılmıştır [24, 25, 33].

Tablo 5.1 Parametre Değerleri

Parametre Değerleri	
C_f	15
D_{max}	50 veya 100
c_F	2000
c_S	10000
c_L	1
c_M	3

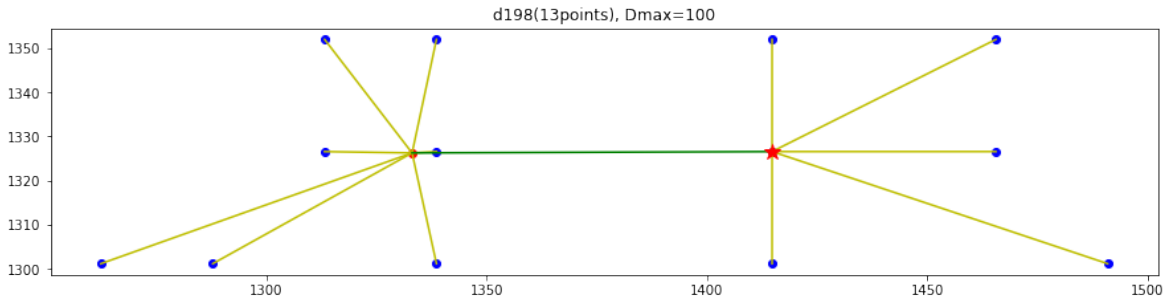
Geriye kalan 5 adet veri kümesi elektrik şebekesine uzakta kırsal bölgelerden seçilmiş ve Google tarafından hazırlanan açık kaynak bina verileri kullanılarak hazırlanmıştır. Mbola, Potou, Tiby, Môle-Saint-Nicolas ve Ighombwe bölgelerinin verileri kullanılmıştır.

Problemin çözümü için Gökbayrak'ın 2022 yılında yayımlanan makalesinde kullanılan maliyetler bu çalışma için de parametre olarak tercih edilmiştir [26]. Uygulama için kullanılmış tüm parametreler Tablo 5.1'de gösterilmiştir.

Sayısal deneyler, 2.4 GHz Intel Xeon Gold 6240R işlemci ve 192GB hafıza ile Windows 11 üzerinde çalıştırılmıştır. Eniyileme modelleri Python ile hazırlanmıştır. Karma tamsayılı doğrusal programlama modelleri Gurobi 9.5.0 kullanılarak çözülürken, dışbükey modeller CVX'in Gömülü Konik Çözücüsü ile çözdürülmüştür.

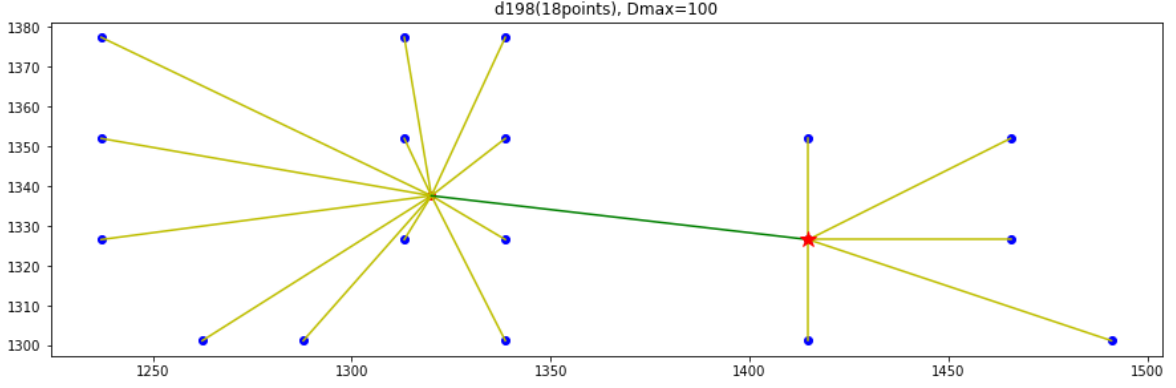
5.2. Sürekli Problemin Çözümü

Sürekli uzayda ağaç-yıldız biçimli dağıtım ağı en iyileme problemi, doğrusal olmayan bazı ifadeler içermektedir. Bu haliyle mevcut çözücüler ile hesaplamalar yapmanın mümkün olmamasından dolayı bu ifadeler doğrusallaştırılmıştır. Sürekli problemin doğrusallaştırılmış modeli kullanılarak d198 veri kümesi ile bazı denemeler yapılmıştır. Bu veri kümesinden çeşitli sayılarda talep noktası içeren örneklemeler alınarak kaç adet talep noktası ile ne kadar sürede çözülebildiği incelenmiştir. Denemeler yapılırken D_{max} parametresi 100 olarak seçilmiştir.



Şekil 5.1 13 Talep Noktalı Örnek Çözümü

Şekil 5.1'de görüldüğü üzere 1 saat içinde ancak 13 talep noktasından oluşan örnek çözülebilmektedir. Kırmızı yıldız simgesi üretici, kırmızı noktalar dönüştürücüyü, mavi noktalar talep noktalarını göstermektedir. Düşük gerilim bağlantılar sarı, orta gerilim bağlantılar yeşil ile çizilmiştir. Bu örneğe 5 talep noktası daha eklenerek elde edilen 18 talep noktasından oluşan örnek 5 saatte çözülebilmiş ve çözümü Şekil 5.2'de sunulmuştur.



Şekil 5.2 18 Talep Noktalı Örnek Çözümü

Sonrasında 2 talep noktası daha eklenerek elde edilen 20 talep noktasından oluşan örnek çözümü 5 saat sonunda %4.5 civarı bir eniyileme aralığı göstermektedir. Dolayısıyla bu ifadenin gerçek boyuttaki örneklerde kullanılması pek mümkün görünmemektedir.

5.3. Ayrık Problemin Çözümü

Sürekli düzlemde ağaç-yıldız dağıtım ağı eniyileme problemi için dönüştürücü ve üreteç yerleri belli olmamakla birlikte düzlem üzerinde sonsuz sayıda alternatif bulunmaktadır. Problem çözümünde dönüştürücü yerleri ve bunlara bağlı mesafeler sürekli değişim göstermektedir. Bu sebeple aday dönüştürücü yerleri tanımlanarak problem yeniden düzenlenmiş ve problem, ayrık tam sayılı doğrusal programlama modeli olarak ifade edilmiştir. Böylece problemin doğrusal olmaması sorunu da ortadan kalkmıştır. Tablo 5.2’de görüldüğü gibi küçük boyutlu problemler için çözümler elde edilebilirken büyük boyutlu örnekler için makul sürelerde çözümler elde edilememiştir.

5.4. Sezgisel Yöntemlerin Uygulanması

Önerilen ayrıştırma, ekleme ve kümeleme yöntemleri, bölüm 5.2.’de sürekli problemle çözülebilmüş 18 talep noktası üzerinde uygulanmıştır. Sürekli yöntem ile çözüldüğünde maliyet 15100,95 olarak elde edilmişken Şekil 5.3’te gösterilen ayrıştırma ve Şekil 5.4’te ekleme yöntemlerinde maliyetler sırasıyla 15259,53 ve 15291,34 olarak gözlemlenmiştir.

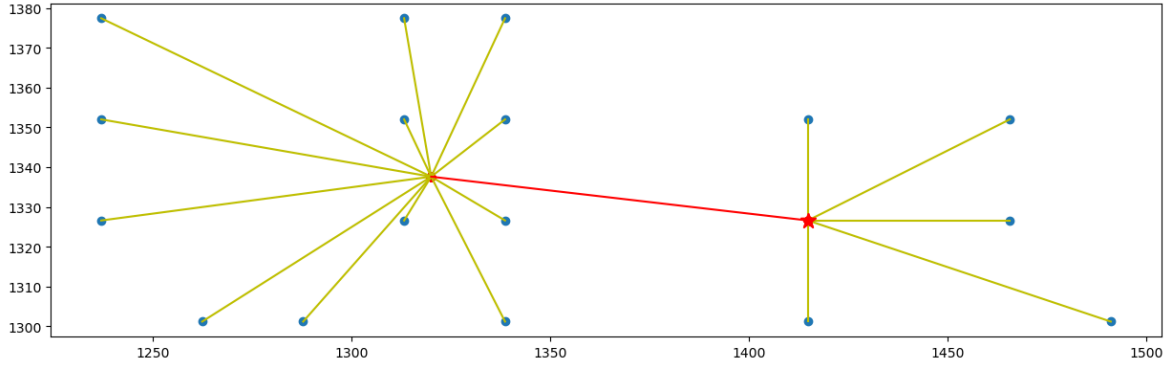
Tablo 5.2 Ayrık Problemin Sonuçları

Veri Kümesi	N	Dmax	Dönüştürücü Sayısı	Üreteç Sayısı	Maliyet	Alt Sınır	Boşluk
u159	159	50	133	1	387765	510	
u159	159	100	103	1	326060	338	
d198	198	50	59	1	161483	535	
d198	198	100	25	1	93983	89649	4,61%
kroA200	200	50	144	1	374697	2960	
kroA200	200	100	89	1	260648	3313	
kroB200	200	50	143	1	374214	3874	
kroB200	200	100	88	1	260945	2767	
w287	287	50	173	1	464592	2195	
w287	287	100	100	1	310633	305405	1,68%
u574	574	50	209	1	518313	516179	0,41%
u574	574	100	92	1	285790	283362	0,85%
p654	654	50	109	1	310774	289595	6,81%
p654	654	100	73	1	242662	222103	8,47%
u724	724	50	258	1	632946	625719	1,14%
u724	724	100	102	1	320469	315859	1,44%
u1060	1060	50	801	1	2225470	2147284	3,51%
u1060	1060	100	591	1	1755888	1691178	3,69%
MoleStNicholas	859	50	156	2	480117	397230	17,26%
MoleStNicholas	859	100	98	2	349104	281840	19,27%
Ighombwe	1428	50	440	1	1282297	1144634	10,74%
Ighombwe	1428	100	319	1	1076344	919495	14,57%
Tiby	1545	50	353	2	982123	848853	13,57%
Tiby	1545	100	174	1	622527	457809	26,46%
Mbola	1768	50	382	1	994767	859033	13,64%
Mbola	1768	100	1180	892	13073250	519795	96,02%
Potou	1781	50	606	150	2911126	1255390	56,88%
Potou	1781	100	284	1	892539	786414	11,89%

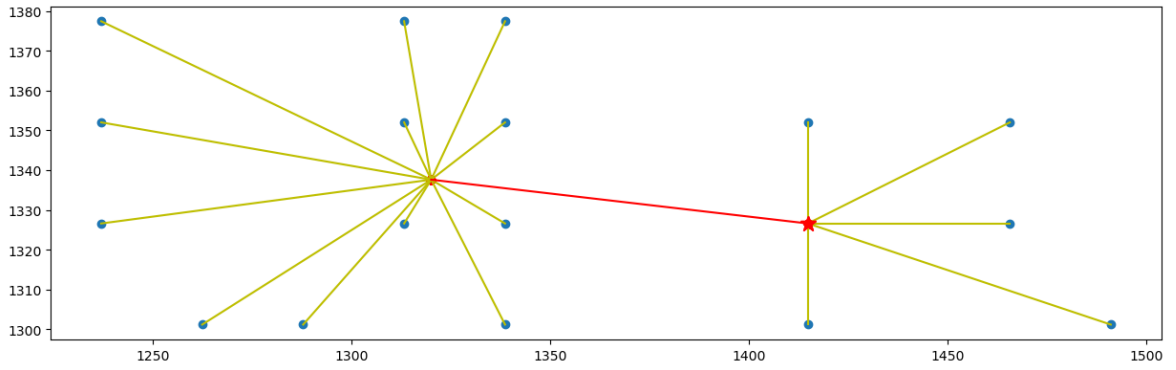
Şekil 5.5'te gösterilen kümeleme yönteminde her bir uzaklık tanımı için de 15184,55 maliyeti elde edilmiştir. Hepsinde optimal çözüme kıyasla %1 civarında kayıp söz konusu olmakla birlikte tüm yöntemler için YAB uygulaması sonucunda her birinde optimal değere ulaşılmıştır.

5.4.1. Ayrıştırma Yöntemi Sonuçları

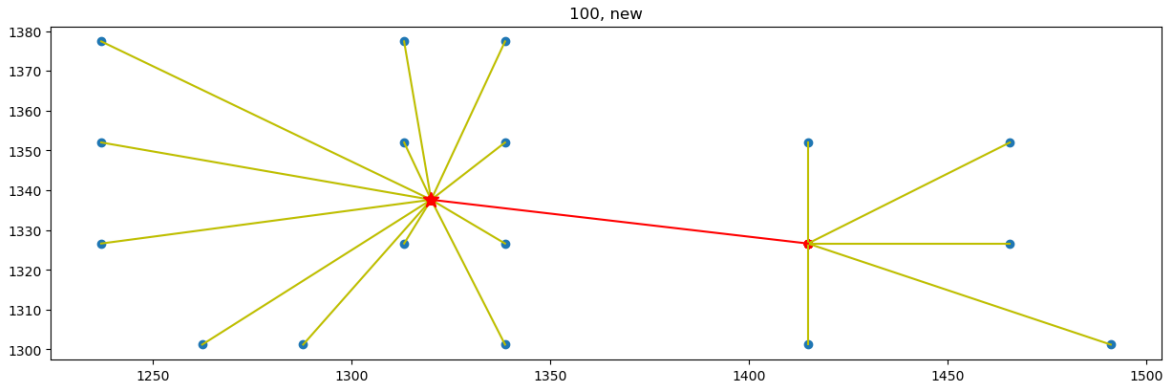
Dönüştürücü yerleri tespit edilirken, talep noktalarının hepsinin hizmet alabilmesi için en fazla talep noktası kadar dönüştürücünün hizmet vermesi gerektiği bilinmektedir. Geleneksel olarak her bir talep noktası aday dönüştürücü yeri olarak tanımlanabilir. Ancak dönüştürücü



Şekil 5.3 18 Talep Noktalı Örnek için Ayrıştırma Yöntemi Çözümü



Şekil 5.4 18 Talep Noktalı Örnek için Ekleme Yöntemi Çözümü



Şekil 5.5 18 Talep Noktalı Örnek için Kümeleme Yöntemi Çözümü

aday yerleri olarak sadece talep noktaları ile yetinilmeyip ayrıca bir saatlik bir zaman sınırı altında indirgenmiş çember kesişim noktalarını kullanan kapasite kısıtlı düzlemsel kapsama problemi çözülmesi ile elde edilen çember kesişim noktalarının kullanılması önerilmektedir (bkz. Bölüm 4.2.).

Eklenen az sayıda çember kesişim noktaları sayesinde bütün talep noktalarına hizmet vermek için gerekli uzaklık kısıtlı dönüştürücülerin sayısında kayda değer bir azalma sağlanabilmektedir. Bu durum toplam maliyeti önemli ölçüde düşürmektedir. Tablo 5.3'te 8 örnek durum için çözümlerdeki dönüştürücü ve kaynak sayıları, eklenen çember kesişim noktalarının sayıları ve maliyetler sunulmuştur. Bu tabloda dönüştürücü sayısındaki azalmanın toplam maliyeti %11 ile %33 arasında bir oranda düşürdüğü son sütunda görülmektedir. Bu sebeple, sadece talep noktalarını aday tesis olarak almak yerine çember kesişim noktaları ile kapsama problemini çözerek dönüştürücü aday yerlerine ekleme yapılması tercih edilmiştir.

Tablo 5.3 Dönüştürücü Aday Yerlerinin Maliyete Etkisi

Veri	N	Dmax	Sadece talep noktaları ile			Seçili çember kesişim noktaları ile				
			Dönüştürücü Sayısı	Üreteç Sayısı	Maliyet	Eklenen Nokta	Dönüştürücü Sayısı	Üreteç Sayısı	Maliyet	Kazanç
u159	159	50	159	1	439,46	34	133	1	387,76	12%
u159	159	100	122	1	365,07	25	103	1	326,06	11%
d198	198	50	98	1	239,50	42	59	1	161,48	33%
d198	198	100	40	1	122,75	18	25	1	93,98	23%
kroA200	200	50	180	1	447,22	42	144	1	374,70	16%
kroA200	200	100	135	1	354,71	61	89	1	260,65	27%
kroB200	200	50	178	1	443,98	46	143	1	374,21	16%
kroB200	200	100	129	1	344,42	50	88	1	260,94	24%

Yeni aday yerleri eklemek için kapasite kısıtlı düzlemsel kapsama problemi çözüm süreleri (saniye cinsinden) ve ayrık probleme eklenen nokta sayıları Tablo 5.4'te gösterilmiştir. Çözüm sürelerinin 45 dakikaya kadar çıkabildiği gözlemlenmiştir. Fakat Tablo 5.3'te gösterildiği gibi maliyetlerdeki azalma karşılığında bu sürelerin kabul edilebilir olduğu düşünülmektedir.

Olası dönüştürücü yerleri belirlendikten sonra yarım saatlik zaman kısıtı altında düşük gerilim ağ maliyetlerini enküçülten alt düzey problem çözdürülmüştür. Üst düzey problemin çözümü, alt düzey problemin çözümündeki dönüştürücüler arasına orta gerilimli ağın Kruskal yöntemi ile eklenmesiyle elde edilir. Orta gerilim ağının oluşturulması saniyeler içinde gerçekleşebilmektedir. Böylece ayrıştırma yöntemi ile problemin çözümü tamamlanmış olur.

Tablo 5.4 Eklenen Aday Dönüştürücü Sayıları ve Seçim için Çözüm Süreleri

Veri	N	Dmax	Eklenen Nokta	Süre
u159	159	50	34	0,02
u159	159	100	25	0,05
d198	198	50	42	0,14
d198	198	100	18	0,81
kroA200	200	50	42	0,13
kroA200	200	100	61	0,37
kroB200	200	50	46	0,17
kroB200	200	100	50	0,31
W287	287	50	121	0,35
w287	287	100	45	1,05
u574	574	50	153	0,72
u574	574	100	82	10,08
p654	654	50	52	34,17
p654	654	100	34	11,40
u724	724	50	215	1,25
u724	724	100	94	1801,70
u1060	1060	50	244	0,83
u1060	1060	100	241	1,48
MolestNicholas	859	50	52	15,09
MolestNicholas	859	100	38	2530,37
Ighombwe	1428	50	86	247,00
Ighombwe	1428	100	93	51,05
Tiby	1545	50	193	14,16
Tiby	1545	100	107	683,61
Mbola	1768	50	131	5,43
Mbola	1768	100	109	232,00
Potou	1781	50	201	5,46
Potou	1781	100	155	6,97

5.4.2. Ekleme Yöntemi Sonuçları

Ekleme yöntemi ile, ayrıştırma yönteminde bazı alt düzey problemler için gözlemlenen yüksek çözüm sürelerini maliyetten ödün vererek daha kısa süreye indirmek hedeflenmiştir. Hem ayrıştırma hem de ekleme yöntemi kapasite kısıtlı düzlemsel kapsama problemi çözülmesi ile elde edilen çember kesişim noktaları ile talep noktalarının aday dönüştürücüler olarak kullanıldığı problemi çözmektedir. Ekleme yöntemi ile düşük gerilim hatları belirlendikten sonra orta gerilim hatları Kruskal ile oluşturulur.

Tablo 5.5'te görüldüğü üzere ekleme yöntemi sadece 3 durum için ayrıştırma yöntemine maliyet açısından üstün gelmiştir. Bu farklar oldukça küçük olup hesaplama hassasiyetinden

Tablo 5.5 Ayrıştırma ve Ekleme Yöntemi Sonuçları

Veri Kümesi	N	Dmax	Ayrıştırma Yöntemi			Ekleme Yöntemi			ADP Süre	Toplam Maliyette Kayıp	
			Dönüştürücü Sayısı	ADP Maliyet	ÜDP Maliyet	ADP Süre	Dönüştürücü Sayısı	ADP Maliyet			ÜDP Maliyet
ul59	159	50	133	268600,00	119630,41	0,02	133	268600,00	119396,68	0,46	0%
ul59	159	100	103	213600,00	114269,30	0,05	104	215300,00	113885,64	0,40	0%
d198	198	50	59	124957,21	36904,34	0,07	61	128953,75	36864,56	0,69	2%
d198	198	100	25	62347,17	31769,31	0,11	30	72202,26	32636,12	0,53	11%
kroA200	200	50	144	292203,85	82975,18	0,07	144	292203,85	83460,31	0,73	0%
kroA200	200	100	89	190749,76	72127,33	0,05	89	190712,27	72631,15	0,70	0%
kroB200	200	50	143	290133,80	84701,53	0,06	143	290162,66	84827,83	0,73	0%
kroB200	200	100	88	188890,85	73477,85	0,06	91	193930,98	75733,86	1,21	3%
w287	287	50	173	357400,00	107605,47	0,07	173	357400,00	107605,20	1,82	0%
u574	574	100	100	220703,53	91553,25	0,22	114	246800,00	93139,85	1,35	9%
u574	574	50	209	438241,34	81892,79	0,3	218	455592,08	82954,62	6,15	4%
p654	654	100	92	223567,13	62656,78	0,32	104	246648,83	65224,60	3,64	9%
p654	654	50	109	234406,18	76810,20	2,22	123	264994,35	77225,94	5,81	10%
u724	724	100	73	170097,07	72292,86	1800,52	85	195761,43	72868,53	5,64	11%
u724	724	50	258	542227,74	92194,61	0,46	270	565094,55	93373,39	9,55	4%
u724	724	100	102	255764,19	65530,26	0,49	113	276407,78	66979,95	6,80	7%
u1060	1060	50	801	1625600,00	568091,96	0,65	801	1625550,00	567423,06	30,11	0%
u1060	1060	100	591	1240567,45	524137,63	0,89	609	1272885,47	528207,57	28,15	2%
MoleStNicholas	859	50	151	328728,47	122986,94	0,89	174	373840,62	124027,83	9,68	10%
MoleStNicholas	859	100	89	219850,01	113228,11	1712,12	105	252465,05	113519,12	10,04	10%
Ighombwe	1428	50	440	915973,94	367905,67	1,48	452	940475,23	369198,33	67,95	2%
Ighombwe	1428	100	317	695191,54	351940,29	5,82	323	709462,58	351879,63	58,40	1%
Tibby	1545	50	346	741813,87	211886,86	2,8	400	846275,59	216105,08	48,35	11%
Tibby	1545	100	151	392787,94	181929,03	38,74	195	473546,93	189038,18	36,43	15%
Mbola	1768	50	332	755814,81	178992,07	5,64	393	837585,74	181984,65	63,38	9%
Mbola	1768	100	193	476876,51	160390,24	1802,17	214	523540,20	161830,26	46,97	8%
Potou	1781	50	512	1074939,19	262234,20	2,56	552	1153266,35	266512,78	37,25	6%
Potou	1781	100	278	651885,56	230174,24	7,41	309	716767,15	230460,13	34,47	7%

kaynaklanmaktadır. Matematiksel yöntemlerin sezgisel yöntemlerden daha iyi sonuç vermesi beklenen bir durumdur. Yine de 14 örnekte maliyette %15'ten fazla kötüleşme gözlenmemektedir. Veri kümelerinin her iki yöntemle çözümünde süre açısından çok büyük farklar olmamaktadır. Çözücünden kaynaklı 1800 saniyede çözülen problemler için ekleme yöntemi daha iyi sonuç vermiştir ancak ayrıştırma yöntemi maliyet ve zaman açısından daha avantajlıdır.

Tablo 5.5'te görüldüğü üzere ayrıştırma yöntemi için yarım saatlik zaman diliminde çözülmüş örnekler, ekleme yöntemi için en fazla 77 saniye sürmüştür. MoleStNicholas örneğinde ekleme yöntemiyle 10 saniyede 105 dönüştürücü ve 255675,20 ADP maliyeti ile hizmet sağlanırken ayrıştırma yöntemini 60 saniyelik zaman sınırı içinde çalıştırdığımızda 381 tesis ile 781426,23 ADP maliyeti vermiştir. Ayrıştırma yönteminde alt düzey problemin matematiksel bir yöntem olması sebebiyle maliyet açısından ekleme yöntemine üstün gelmesi beklenen bir durumdur ancak çözümü uzun zaman alan büyük boyutlu verilerin kullanılması gerektiği durumlar için görüldüğü üzere ekleme yönteminin ayrıştırma yöntemine tercih edilmesi konusu değerlendirilebilir.

5.4.3. Kümeleme Yöntemi Sonuçları

Ayrıştırma yöntemi, maliyetler açısından güzel sonuçlar verse de aday dönüştürücülerin belirlenip alt düzey problemin çözümü tamamlanana kadar geçen süre özellikle büyük ölçekli örnekler için oldukça fazla olmaktadır. Ekleme yöntemi için de aynı şekilde dönüştürücü aday yerleri belirlenmektedir. Birleştirici sıradüzensel kümeleme yöntemi ile kümeler birleştikçe aday dönüştürücü yerleri, bu kümelerin geometrik medyanı bulunarak hesaplandığı için önceden aday yerlerin tespit edilmesine gerek kalmamaktadır. Böylece problemin çözüm süresinden tasarruf sağlanmaktadır. Her talep noktası belli bir kümeye dahil olup dönüştürücü yerleri son halini aldıktan sonra orta gerilim ağı hızlı ve iyi sonuçlar veren Kruskal yöntemi ile oluşturulmuştur.

Kümeleme yöntemi için dört farklı bağlantı şekli kullanılarak elde edilen çözümler Tablo 5.6'de birbirleriyle karşılaştırılmıştır. Çoğu veri kümesinde tek bağlantı yöntemi diğer

Tablo 5.6 Kümeleme Yöntemlerinin Karşılaştırması

Veri	N	Dmax	Kümeleme - Tek			Kümeleme - Tam			Kümeleme - Ortalama			Kümeleme - Ward		
			Dönüştürücü Sayısı	Toplam Maliyet	Toplam Süre	Dönüştürücü Sayısı	Toplam Maliyet	Toplam Süre	Dönüştürücü Sayısı	Toplam Maliyet	Toplam Süre	Dönüştürücü Sayısı	Toplam Maliyet	Toplam Süre
u159	159	50	133	388085,27	1,37	133	388085,27	0,93	133	388085,27	0,85	133	388085,27	1,50
u159	159	100	104	329616,85	2,11	107	335310,89	1,35	107	335310,89	1,38	107	335310,89	2,50
d198	198	50	66	175478,82	6,31	67	176627,05	3,61	66	176627,05	4,0391	67	176846,32	6,64
d198	198	100	31	104464,03	7,42	31	104750,18	5,12	32	106088,89	5,94	32	106820,30	8,05
kroA200	200	50	148	383256,80	1,67	148	383256,80	1,37	148	383256,80	1,58	148	383256,80	3,15
kroA200	200	100	92	268420,76	3,51	91	266021,52	2,33	91	266227,08	2,61	91	265842,18	4,93
kroB200	200	50	143	374493,22	1,68	143	374493,22	1,48	143	374493,22	1,48	143	374493,22	2,90
kroB200	200	100	94	274183,39	3,4428	94	274106,36	2,41	93	272103,17	2,54	93	272171,70	4,92
w287	287	50	177	472133,10	8,51	177	472133,10	2,82	177	472133,10	2,74	177	472133,10	7,26
w287	287	100	107	326873,54	16,65	131	376637,47	6,19	131	376637,47	7,33	132	378506,86	11,278
u574	574	50	233	567231,84	15,60	233	567215,90	10,60	234	568857,09	11,77	234	568555,75	23,87
u574	574	100	115	330534,98	29,46	114	324977,09	16,13	117	331549,26	18,86	117	332381,69	31,63
p654	654	50	116	324632,18	32,31	138	366187,38	23,29	136	362300,53	23,85	138	368295,08	38,91
p654	654	100	79	252168,59	39,26	101	294339,25	30,76	99	289667,29	31,29	102	298376,80	45,65
u724	724	50	283	683235,96	24,61	290	696779,46	15,01	284	684823,62	16,87	284	684718,98	36,94
u724	724	100	133	379704,08	44,92	141	395040,86	26,24	137	385300,83	28,43	140	392880,81	49,27
u1060	1060	50	812	2212502,55	16,59	813	2214908,92	13,39	813	2214767,82	13,37	814	2216667,33	41,58
u1060	1060	100	614	1807042,04	27,21	613	1805197,72	19,39	617	1812977,13	21,26	615	1809187,78	53,18
MSN	859	50	173	496034,13	104,68	191	530568,27	28,43	204	556933,33	34,87	211	571720,26	64,78
MSN	859	100	98	353202,64	80,52	107	365545,62	42,15	107	365829,66	47,43	116	384418,79	81,135
Ighombwe	1428	50	450	1304168,82	68,30	458	1318547,10	44,328	458	1318750,94	46,489	465	1333003,10	104,59
Ighombwe	1428	100	326	1061460,52	74,887	325	1057904,40	53,88	324	1055873,77	56,31	326	1060650,92	114,02
Tibby	1545	50	385	1031411,38	138,46	422	1103071,00	63,62	429	1117131,63	72,83	436	1132244,46	149,30
Tibby	1545	100	188	647332,86	154,62	195	652561,46	91,14	194	650608,95	95,53	198	662518,73	168,42
Mbola	1768	50	374	979964,32	153,41	404	1036737,56	80,46	406	1040805,87	86,55	411	1050823,17	179,31
Mbola	1768	100	212	673089,24	167,10	226	692937,86	101,62	227	694108,75	105,69	227	697679,24	192,59
Potou	1781	50	541	1395782,09	115,18	559	1428474,96	74,67	561	1431818,18	78,20	565	1440406,87	172,07
Potou	1781	100	307	934973,45	141,25	308	931950,24	98,62	309	934466,22	101,44	306	930363,17	186,28

Tablo 5.7 Sezgisel Yöntemlerin Karşılaştırması

Veri	N	Dmax	Ayrıştırma Yöntemi		Ekleme Yöntemi		Kümeleme Yöntemi - Tek Bağlantı	
			Toplam Maliyet	Aday Yerleri Belirleme ve ADP Süreleri Toplamı	Toplam Maliyet	Aday Yerleri Belirleme ve ADP Süreleri Toplamı	Toplam Maliyet	Kümeleme Süresi
u159	159	50	388230,40	1,28	387996,68	1,79	388085,30	1,37
u159	159	100	327869,30	8,27	329185,64	8,74	329616,80	2,11
d198	198	50	161861,60	3,04	165818,31	3,68	175478,80	6,31
d198	198	100	94116,48	16,42	104838,37	17,05	104464,00	7,42
kroA200	200	50	375179,00	1,12	375664,17	1,87	383256,80	1,67
kroA200	200	100	262877,10	10,09	263343,43	10,91	268420,80	3,51
kroB200	200	50	374835,30	1,15	374990,49	1,98	374493,20	1,68
kroB200	200	100	262368,70	11,62	269664,84	12,41	274183,40	3,44
w287	287	50	465005,50	3,12	465005,20	4,97	472133,10	8,51
w287	287	100	312256,80	19,99	339939,85	21,57	326873,50	16,65
u574	574	50	520134,10	16,93	538546,69	24,17	567231,80	15,60
u574	574	100	286223,90	101,62	311873,43	107,51	330535,00	29,46
p654	654	50	311216,40	87,53	342220,29	98,85	324632,20	32,31
p654	654	100	242389,90	2074,62	268629,96	289,09	252168,60	39,26
u724	724	50	634422,40	29,98	658467,94	42,78	683236,00	24,61
u724	724	100	321294,50	176,18	343387,73	185,73	379704,10	44,92
u1060	1060	50	2193692,00	27,40	2193692,00	61,80	2212503,00	16,59
u1060	1060	100	1764705,00	185,89	1801093,04	222,51	1807042,00	27,21
MSN	859	50	451715,40	107,95	497868,44	123,34	496034,10	104,68
MSN	859	100	333078,10	2221,15	365984,17	528,74	353202,60	80,52
Ighombwe	1428	50	1283880,00	119,52	1309673,56	173,63	1304169,00	68,30
Ighombwe	1428	100	1047132,00	549,22	1061342,21	600,08	1061461,00	74,89
Tiby	1545	50	953700,70	253,25	1062380,68	317,65	1031411,00	138,46
Tiby	1545	100	574717,00	1220,14	662585,11	1241,34	647332,90	154,62
Mbola	1768	50	934806,90	285,30	1019570,40	360,04	979964,30	153,41
Mbola	1768	100	637266,70	2935,66	685370,46	1210,27	673089,20	167,10
Potou	1781	50	1337173,00	222,65	1416226,00	318,69	1419779,13	115,18
Potou	1781	100	882059,80	987,99	947227,28	1068,10	934973,50	141,25

yöntemlere kıyasla daha düşük maliyetler sağlamıştır. Diğer bağlantı yöntemleri ile de iyi sonuçlar veren veriler gözlemlenmiştir. Tek bağlantı yönteminin maliyet açısından daha iyi olduğu durumlara bakıldığında daha az dönüştürücü açılmasına izin verdiği görülmektedir. Yöntemler süre açısından karşılaştırıldığında tam bağlantı ve ortalama bağlantı tanımları çoğunlukla tek bağlantı ve Ward yöntemlerine göre hızlı çözümler üretmiştir.

Tablo 5.7’de ayrıştırma, ekleme ve kümelemeden elde edilen en iyi sonuçlar karşılaştırılmaktadır. Kümeleme maliyet açısından sadece bir örnek için diğer ikisinden daha iyi sonuç vermekle birlikte toplam süre açısından örneklerin 8 tanesinde ayrıştırma ve ekleme yöntemine göre iyi bir performans sergilemiştir. Çözümü uzun zaman alan veri kümeleri dışında diğer iki yöntem daha iyi sonuçlar vermiştir.

Tüm yöntemlerle elde edilen çözümlerde MoleStNicholas haricinde tüm veri kümelerinde üreteç sayısı bir adettir. Kruskal yöntemi ile orta gerilim hatları oluşturulurken eklenecek bağlantının maliyetinin yeni bir üreteç eklemenin maliyetini geçtiği durumda o bağlantıyı ağa eklemek yerine yeni bir üreteçten beslenen bir ağ oluşturulmaktadır. c_S/c_M ’yi aşan orta gerilim bağlantı uzunlukları olduğu durumlarda üreteç eklendiği için mevcut veri kümelerinde çoğunlukla bir üreteç hizmet vermektedir.

5.5. YAB Yöntemi

En iyi çözümü veren ayrıştırma yönteminin oluşturduğu dağıtım ağları üzerinde yerleştirme-atama-bağlama (YAB) uygulaması ile dönüştürücülerin yerleri değiştirilerek maliyetlerde iyileştirmeler sağlanmıştır. Yöntem, her seferinde dönüştürücü yerlerini düşük gerilim hatlarını koparmayacak şekilde günceller, yeni dönüştürücü yerlerini kullanarak talep noktalarını yeniden atar ve orta gerilim hatlarını yeni duruma göre tekrar bağlar.

Tablo 5.8’de ayrıştırma yöntemi sonrası uygulanan yerleştirme-atama-bağlama (YAB) yöntemiyle sağlanan maliyet indirimi gösterilmektedir. Yöntem, maliyette %0.9 ile %3.2 arası değerlerde iyileştirmeler sağlamıştır. Tablo 5.9 ve 5.10’de ekleme ve kümeleme yöntemleri sonrasında YAB uygulandığında benzer oranlarda iyileşmeler gözlenmiştir.

Tablo 5.8 Ayırıştırma Yöntemi Sonrası YAB Uygulaması

Veri	N	Dmax	Ayırıştırma Yöntemi	YAB	
			Maliyet	Maliyet	Kazanç
u159	159	50	388230	381109	1,80%
u159	159	100	327869	317523	3,20%
d198	198	50	161862	158983	1,80%
d198	198	100	94116	92038	2,20%
kroA200	200	50	375179	367976	1,90%
kroA200	200	100	262877	256275	2,50%
kroB200	200	50	374835	367196	2,00%
kroB200	200	100	262369	254693	2,90%
w287	287	50	465005	460871	0,90%
w287	287	100	312257	306915	1,70%
u574	574	50	520134	513516	1,30%
u574	574	100	286224	282734	1,20%
p654	654	50	311216	306925	1,40%
p654	654	100	242390	237890	1,90%
u724	724	50	634422	624735	1,50%
u724	724	100	321294	318049	1,00%
u1060	1060	50	2193692	2152273	1,90%
u1060	1060	100	1764705	1710612	3,10%
MSN	859	50	451715	447364	1,00%
MSN	859	100	333078	329390	1,10%
Ighombwe	1428	50	1283880	1267521	1,30%
Ighombwe	1428	100	1047132	1027114	1,90%
Tiby	1545	50	953701	942811	1,10%
Tiby	1545	100	574717	568122	1,10%
Mbola	1768	50	934807	925668	1,00%
Mbola	1768	100	637267	628966	1,30%
Potou	1781	50	1337173	1318885	1,40%
Potou	1781	100	882060	866196	1,80%

YAB uygulaması sırasında yerleştirme, atama ve bağlama adımlarının kaçar kez gerçekleştirildiği Tablo 5.11’de gösterilmiştir. Ayrıca toplam süre de saniye cinsinden bu tabloda sunulmuştur. Her bir örnek için ayırıştırma yöntemi sonrası uygulanan YAB yöntemi en fazla 5 saniye içinde tamamlanmaktadır.

5.5.1. Yerel Arama Yöntemi

YAB uygulaması sonrası daha iyi çözümlere ulaşabilmek adına çeşitli yerel arama çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmalarda düşük veya orta gerilim hatları farklı koşullarda koparılıp uzaklık ve kapasite kısıtlarını sağlayan başka noktalara bağlanmaya zorlanmıştır.

Tablo 5.9 Ekleme Yöntemi Sonrası YAB Uygulaması

Veri	N	Dmax	Ekleme Yöntemi	YAB	
			Maliyet	Maliyet	Kazanç
u159	159	50	387996,68	380749,30	1,87%
u159	159	100	329185,64	318941,91	3,11%
d198	198	50	165818,31	163044,97	1,67%
d198	198	100	104838,37	101114,60	3,55%
kroA200	200	50	375664,17	368267,07	1,97%
kroA200	200	100	263343,42	255515,90	2,97%
kroB200	200	50	374990,49	367365,52	2,03%
kroB200	200	100	269664,84	260320,58	3,47%
w287	287	50	465005,20	460727,11	0,92%
w287	287	100	339939,85	332518,67	2,18%
u574	574	50	538546,70	530856,03	1,43%
u574	574	100	311873,43	304636,77	2,32%
p654	654	50	342220,29	334467,15	2,27%
p654	654	100	268629,96	259368,69	3,45%
u724	724	50	658467,94	648012,11	1,59%
u724	724	100	343387,73	336730,38	1,94%
u1060	1060	50	2192973,06	2152332,60	1,85%
u1060	1060	100	1801093,04	1744048,90	3,17%
MoleStNicholas	859	50	497868,45	491609,44	1,26%
MoleStNicholas	859	100	365984,17	357216,94	2,40%
Ighombwe	1781	50	1419779,13	1396798,29	1,62%
Ighombwe	1781	100	947227,28	920551,41	2,82%
Tiby	1545	50	1062380,68	1046815,34	1,47%
Tiby	1545	100	662585,11	644288,60	2,76%
Mbola	1768	50	1019570,40	1004900,41	1,44%
Mbola	1768	100	685370,46	664772,59	3,01%
Potou	1428	50	1309673,56	1290952,00	1,43%
Potou	1428	100	1061342,21	1037094,60	2,28%

Bölüm 5.5.'ün son kısmında bahsedilen 4 farklı yöntemle yerel arama yapılıp döngü 10 kez tekrarlanmıştır. Bu tekrarlardan elde edilen en iyi sonuçların iyileştirme oranları Tablo 5.12'de verilmiştir. Yerel arama yöntemi ile maliyetlerde daha fazla iyileştirmeler yapılabildiği gözlemlenmiştir. Bu yöntemle şebeke üzerinde bir bağlantıyı koparıp başka bir yerde yeni bir bağlantı oluşturmaya zorlanmıştır. Yeni oluşturulan şebekede YAB yöntemi uygulanarak tesis yerleri ve bu tesislerin talep noktaları veya diğer tesislerle arasındaki bağlantılar maliyetleri azaltacak şekilde yenilendiğinde daha düşük maliyetli sonuçlara da ulaşılabileceği görülmektedir. Şekil 5.6, 5.7 ve 5.8, yerel arama uygulanan ağ üzerindeki değişimleri adımlar halinde bir örnek üzerinde göstermektedir.

Tablo 5.10 Kümeleme Yöntemi Sonrası YAB Uygulaması

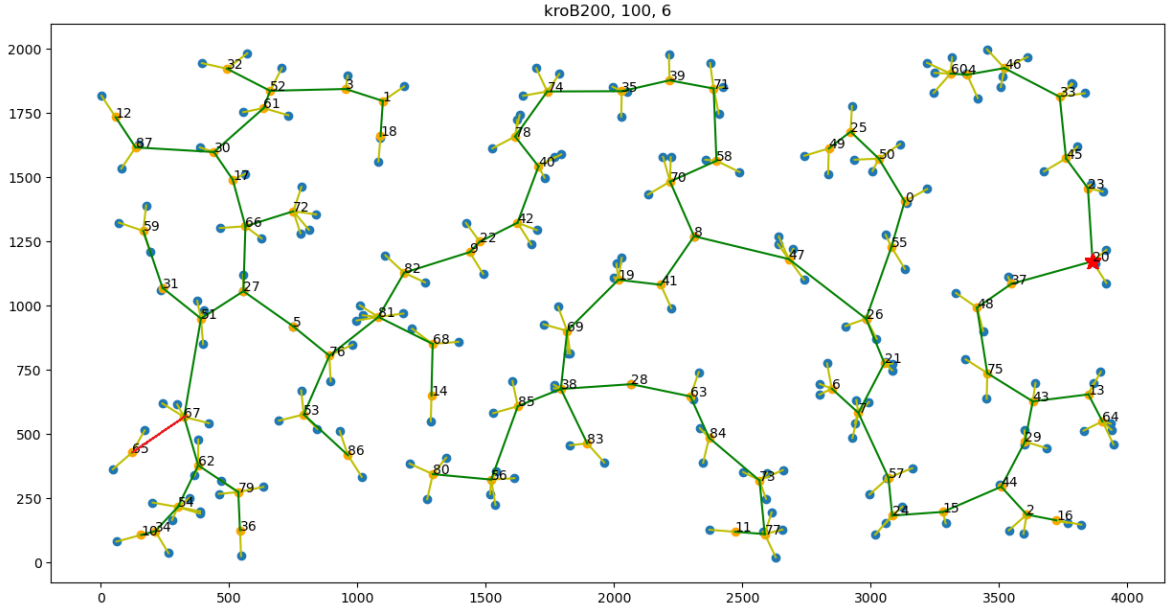
Veri	N	Dmax	Kümeleme Yöntemi	YAB	Kazanç
			Maliyet	Maliyet	
u159	159	50	388085,27	381010,24	1,82%
u159	159	100	329616,85	319370,00	3,11%
d198	198	50	175478,82	172159,63	1,89%
d198	198	100	104464,03	102788,91	1,60%
kroA200	200	50	383256,80	375541,09	2,01%
kroA200	200	100	268420,76	261161,70	2,70%
kroB200	200	50	374493,22	366568,22	2,12%
kroB200	200	100	274183,39	265730,32	3,08%
w287	287	50	472133,10	467637,64	0,95%
w287	287	100	326873,54	320271,01	2,02%
u574	574	50	567231,84	559477,79	1,37%
u574	574	100	330534,98	323206,88	2,22%
p654	654	50	324632,18	320580,29	1,25%
p654	654	100	252168,59	248017,44	1,65%
u724	724	50	683235,96	672596,11	1,56%
u724	724	100	379704,08	372706,70	1,84%
u1060	1060	50	2212502,55	2172899,83	1,79%
u1060	1060	100	1807042,04	1752042,07	3,04%
MSN	859	50	496034,13	489943,84	1,23%
MSN	859	100	353202,64	344868,65	2,36%
Ighombwe	1428	50	1304168,82	1287052,53	1,31%
Ighombwe	1428	100	1061460,52	1042273,94	1,81%
Tiby	1545	50	1031411,38	1018277,65	1,27%
Tiby	1545	100	647332,86	632195,76	2,34%
Mbola	1768	50	979964,32	968295,51	1,19%
Mbola	1768	100	673089,24	660021,50	1,94%
Potou	1781	50	1395782,09	1374628,08	1,52%
Potou	1781	100	934973,45	915255,89	2,11%

Tablo 5.11 YAB Uygulaması İterasyon Sayısı ve Toplam Süre

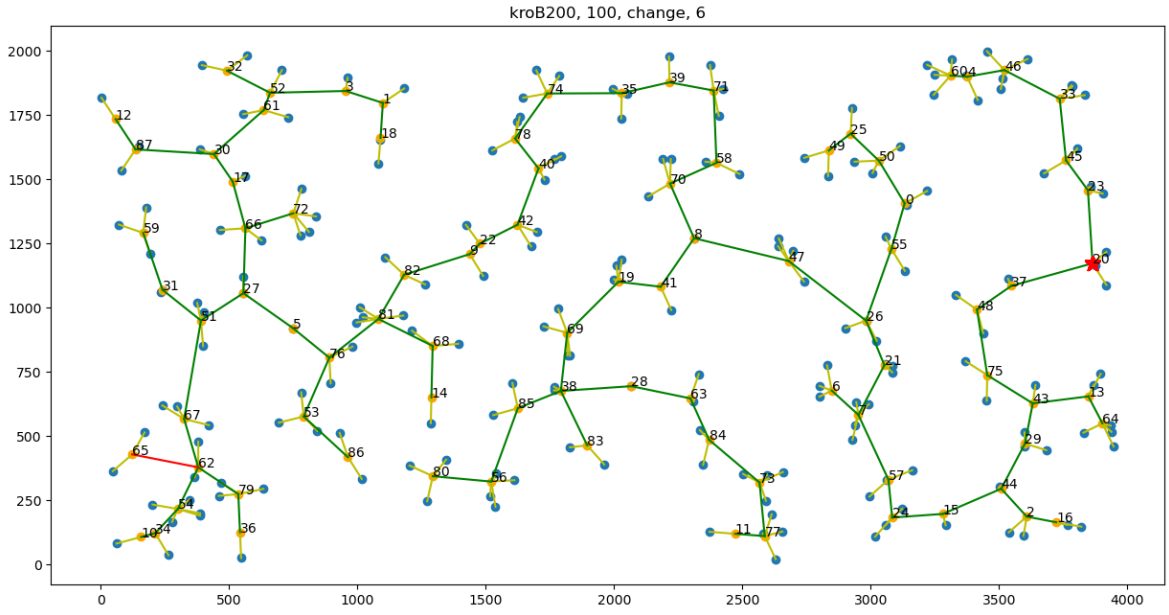
Veri	N	Dmax	Bağlama	Yerleştirme ve Atama	Süre
u159	159	50	2	2	0,1
u159	159	100	2	2	0,1
d198	198	50	2	4	0,1
d198	198	100	2	3	0,0
kroA200	200	50	2	2	0,1
kroA200	200	100	2	3	0,1
kroB200	200	50	2	2	0,1
kroB200	200	100	2	3	0,1
w287	287	50	2	2	0,4
w287	287	100	3	6	0,6
u574	574	50	2	4	0,5
u574	574	100	2	5	0,3
p654	654	50	3	4	0,5
p654	654	100	2	4	0,5
u724	724	50	3	6	1,2
u724	724	100	3	7	0,9
u1060	1060	50	2	3	3,5
u1060	1060	100	3	8	5,1
MSN	859	50	3	5	0,8
MSN	859	100	1	4	0,7
Ighombwe	1428	50	2	3	1,5
Ighombwe	1428	100	2	6	2,1
Tiby	1545	50	3	8	3,0
Tiby	1545	100	3	8	3,0
Mbola	1768	50	2	5	2,0
Mbola	1768	100	2	4	1,5
Potou	1781	50	2	5	3,1
Potou	1781	100	2	5	2,4

Tablo 5.12 YAB Uygulaması Sonrası Farklı Yerel Çözümlere Ulaşma Çalışması

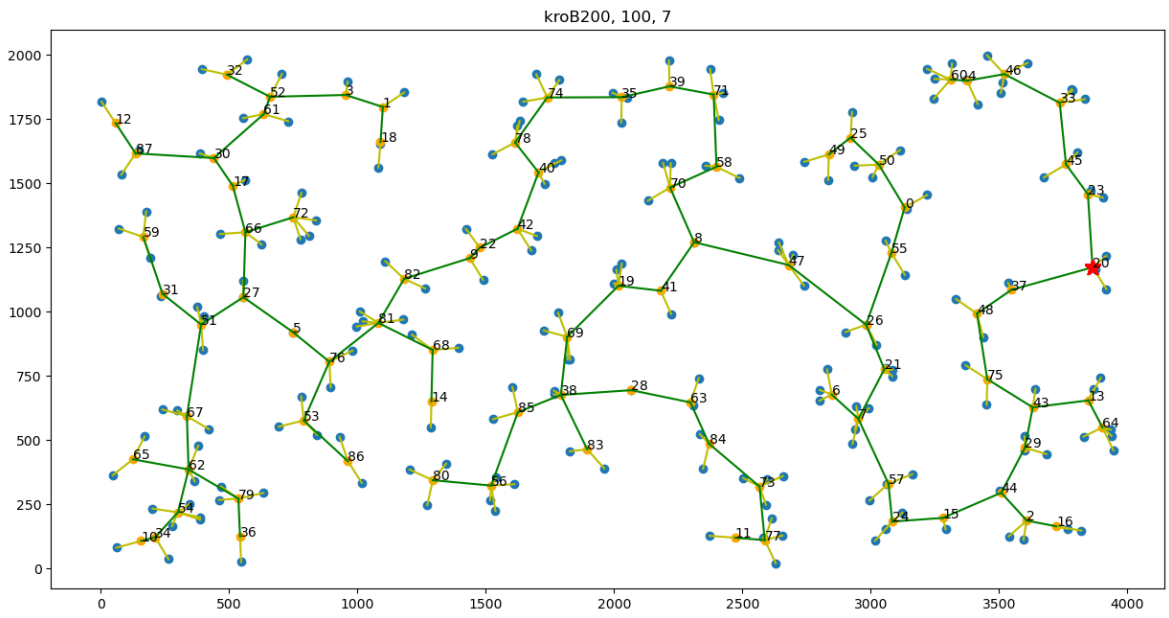
Veri	N	Dmax	Maliyet	% Kazanç			
				1	2	3	4
u159	159	50	381046,9	0,00	0,00	0,00	0,04
u159	159	100	317876,7	0,00	0,03	0,03	0,08
d198	198	50	159133,3	0,07	0,00	0,00	0,01
d198	198	100	93966,78	0,09	0,00	0,08	0,00
kroA200	200	50	367917,9	0,00	0,00	0,00	0,02
kroA200	200	100	255614	0,11	0,00	0,00	0,10
kroB200	200	50	367123,8	0,03	0,00	0,00	0,00
kroB200	200	100	254709,9	0,19	0,03	0,03	0,11
w287	287	50	461049	0,02	0,00	0,00	0,00
w287	287	100	307129,1	0,00	0,00	0,00	0,04
u574	574	50	513055	0,01	0,00	0,00	0,05
u574	574	100	283026,2	0,00	0,00	0,00	0,06
p654	654	50	307200,3	0,00	0,00	0,00	0,00
p654	654	100	237917	0,01	0,00	0,00	0,02
u724	724	50	624727,9	0,03	0,00	0,00	0,04
u724	724	100	318139,2	0,07	0,00	0,00	0,04
u1060	1060	50	2152355	0,02	0,00	0,00	0,00
u1060	1060	100	1711195	0,02	0,00	0,00	0,04
MSN	859	50	447484,5	0,00	0,00	0,00	0,00
MSN	859	100	330621,3	0,00	0,01	0,02	0,01
Potou	1781	50	1318918	0,00	0,00	0,00	0,01
Potou	1781	100	870763,8	0,02	0,00	0,00	0,00
Tiby	1545	50	943113	0,01	0,00	0,00	0,00
Tiby	1545	100	572122,2	0,02	0,00	0,00	0,00
Mbola	1768	50	925448,5	0,00	0,00	0,00	0,00
Mbola	1768	100	629991,1	0,01	0,00	0,00	0,00
Ighombwe	1428	50	1267441	0,00	0,00	0,00	0,00
Ighombwe	1428	100	1027027	0,00	0,00	0,00	0,00



Şekil 5.6 Yerel Arama Uygulanmadan Önce



Şekil 5.7 Yerel Arama ile Eklenen Bağlantı



Şekil 5.8 Yerel Arama ve YAB Uygulandıktan Sonra

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, kırsal arazi üzerinde bulunan ve şebeke dışında kalan yerleşim yerlerine enerji sağlayabilmek adına elektrik dağıtım ağı tasarımı problemi tanımlanmış ve çözüm yöntemleri önerilmiştir. Mevcutta bulunan bir üreteç veya şebeke erişim noktası ile bağlantı sağlamanın mümkün olmadığı bir durum söz konusudur. Bu sebeple, literatürde sıklıkla rastlandığı gibi sonlu sayıda aday yerler arasından yer seçimi yapmak yerine, düzlem üzerinde bulunan bütün noktaların dönüştürücü ve üreteçler için aday yerler olduğu bir şebeke tasarlamak gerekmektedir. Önceki çalışmalardan edinilen bilgiler ışığında direkt bağlantıların ağaç biçimli bağlantılara kıyasla daha fazla maliyet gerektirmesi sebebiyle ağaç-yıldız biçimli dağıtım ağı tasarlanarak maliyetlerin azaltılması hedeflenmiştir. Problem, sürekli uzayda ağaç-yıldız dağıtım ağı tasarımı olarak ifade edilmiştir ve daha önce bu problem için uygulanmamış çözüm yöntemleri ile makul sürelerde en uygun maliyetlere ulaşılması hedeflenmiştir.

Talep noktaları, dönüştürücüler veya üreteçlere direkt bağlanarak hizmet alırlar. Bu bağlantılar düşük gerilim hatları veya yerel ağlar olarak belirtilmiştir. Dönüştürücüler ise üreteç veya diğer dönüştürücüler üzerinden aldıkları elektrik enerjisi ile hizmet vermektedir. Ağaç biçimli bu bağlantılardan orta gerilim hatları olarak bahsedilmiştir. Problemi tanımlarken talep noktalarının eşit düzeyde enerji ihtiyacı olduğu varsayılmış ve buna bağlı olarak dönüştürücüler için hizmet edebileceği kapasite, talep noktası sayısı olarak tanımlanmıştır. Bu kapasite, dönüştürücünün çekebileceği en fazla güç olarak tanımlanır. Orta gerilim hatlarının kapasitesi ele alınacak talep noktaları sayılarında kısıtlayıcı olmayacağı için modele dahil edilmemiştir. Aynı şekilde üreteç kapasitesi örneğin ek güneş panelleriyle gerektiği kadar artırılabilirdiğinden tanımlanmamıştır. Talep noktalarındaki dönüştürücüye olan uzaklığa bağlı gerilim düşmesini sınırlamak adına bir mesafe kısıtı kullanımı söz konusu olmuştur.

Problemin tanımlandığı haliyle çözümü zor olması sebebiyle sürekli problem, ayrık bir ifadeye dönüştürülmüştür. Bunun için öncelikle dönüştürücü yerleri için sonsuz seçenek

sunmak yerine sonlu sayıda aday yerleri oluşturulmuştur. Bu şekilde hem aday yerleri sınırlandırılarak her adımda dönüştürücü yerlerinin yeniden hesaplanması hem de problemin doğrusal olmayan ifadelerinin getirdiği diğer zorluklar engellenmiştir. Ayrık problemi de gerçek boyutlu örnekler ile çözmek zor olduğu için 3 sezgisel yöntem (ayırıştırma yöntemi, ekleme yöntemi, kümeleme yöntemi) kullanılmıştır.

Ayırıştırma yönteminde, alt düzeyde hizmet verecek dönüştürücü sayılarını ve düşük gerilim hatlarını belirleyen matematiksel bir model belli bir zaman sınırlaması altında çözdürülmüştür. Üst düzeyde ise dönüştürücüler arasındaki orta gerilim hatları oluşturularak şebeke tasarlanmıştır. Maliyetler açısından diğer yöntemlere göre en iyi ayırıştırma yöntemi olmakla birlikte bazı örnekler için alt düzey problemin çözümü uzun sürmüştür. Her adımda dağıtım ağına en yüksek tasarrufu sağlayan dönüştürücü eklenerek uygulanan ekleme yöntemi ile ayırıştırma yönteminde gözlenmiş uzun süren örnekler daha makul sürelerde çözülmüş ancak diğer örneklerin çözüm sürelerinde kötüleşmeler görülmüştür. Ayrıca maliyetler açısından ayırıştırma yöntemi kadar etkili olmamıştır. Alt düzey problemde gözlemlenen uzun sürelerle birlikte olası tesis yerlerinin belirlenmesi için harcanan zamanın da fazla olduğu durumlar söz konusudur. Bu sebeple talep noktalarını belli bağlantı yöntemleriyle gruplandırarak bu grupların merkezlerini dönüştürücü yeri olarak belirleyen bir kümeleme yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem süreler açısından oldukça etkili olduğu halde maliyetler açısından ayırıştırma yöntemine üstünlük sağlayamamıştır. Son olarak da ayırıştırma, ekleme ve kümeleme yöntemleri ile elde edilen şebekelerin maliyetlerinde iyileştirme yapabilmek adına YAB yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntem ile dönüştürücü yerlerinde sürekli düzlem üzerinde değişiklikler yapılmış ve maliyetlerde düşüşler gözlemlenmiştir. YAB uygulaması sonrasında daha iyi çözümlere ulaşabilmek adına çeşitli düşük ve orta gerilim hatlarının koparılıp eklenmesi şeklinde ilerleyen bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar sonucunda sonuçların daha fazla iyileştirilebildiği gözlemlenmiştir.

Uygulamada kullanılan büyük ölçekli veriler, kırsal arazi üzerinde bulunarak sonsuz uzayda aday yerler seçilebilmesine imkan sağlayan gerçek yerleşim yerlerine aittir. Böylece önerilen yöntemlerin gerçek hayat sorunlarına makul sürelerde çözüm sağlayabildiği

gözlemlenebilmiştir. Ayrıca şebeke tasarımında güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması önerilmektedir. Böylece hem sürdürülebilir enerji ve çevreye katkı sağlanmış olacaktır hem de ana şebekeden bağımsız çalıştığı için şebekede yaşanabilecek herhangi bir sıkıntıdan etkilenmeyecektir.

Önerilen yöntemlere ek olarak maliyetleri iyileştiren YAB yöntemi üzerinde veya olası tesis yerlerinin seçiminde geliştirmeler yapılarak daha düşük maliyetler elde edilmeye çalışılabilir. Orta gerilim ağlarının oluşturulmasında kullanılan Kruskal yöntemi hem hızlı hem de optimal sonuçlar verdiği için iyileştirme gerektirmemektedir.

Gelecek çalışmalarda talep noktaları ve dönüştürücüler arasındaki bağlantıların da ağaç biçimli olduğu bir problem tanımlanabilir. Talep noktalarının birbirileri üzerinden dönüştürücüye erişebildiği ağaç biçimli ağlar için tanımlanacak model için daha karmaşık kısıtlar gerekeceği öngörülmektedir. Buna karşın ağaç bağlantıların direkt bağlantılara kıyasla daha az maliyet gerektirmesi sebebiyle talep noktalarına daha az maliyetle hizmet sağlanması konusunda etkili olacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] A. Klose and A. Drexl. Facility location models for distribution system design. *European Journal of Operational Research*, 162(1):4–29, **2005**. ISSN 0377-2217. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.10.031>. Logistics: From Theory to Application.
- [2] M. Daskin. Network and discrete location: Models, algorithms and applications. *Journal of the Operational Research Society*, 48(7):763–764, **1997**. doi:10.1057/palgrave.jors.2600828.
- [3] O. Adeleke and D. Olukanni. Facility location problems: models, techniques, and applications in waste management. *Recycling*, 5(2):10, **2020**.
- [4] A. B. Arabani and R. Z. Farahani. Facility location dynamics: An overview of classifications and applications. *Computers Industrial Engineering*, 62(1):408–420, **2012**. ISSN 0360-8352. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.09.018>.
- [5] Naoki Katoh and Toshihide Ibaraki. *Resource Allocation Problems*, pages 905–1006. Springer US, Boston, MA, **1998**. ISBN 978-1-4613-0303-9. doi:10.1007/978-1-4613-0303-9_14.
- [6] A. Idrissi and Chu Min Li. Modeling and optimization of the capacity allocation problem with constraints. In *2006 International Conference on Research, Innovation and Vision for the Future*, pages 107–116. IEEE, Ho Chi Minh City, Vietnam, **2006**. ISBN 9781424403165. doi:10.1109/RIVF.2006.1696426.
- [7] H. Pirkul and V. Nagarajan. Locating concentrators in centralized computer networks. *Annals of Operations Research*, 36(1):247–261, **1992**.
- [8] J. Kim and D. Tcha. Optimal design of a two-level hierarchical network with tree-star configuration. *Computers & industrial engineering*, 22(3):273–281, **1992**.

- [9] Y. Lee, L. Lu, Y. Qiu, and F. Glover. Strong formulations and cutting planes for designing digital data service networks. *Telecommunication Systems*, 2(1):261–274, **1993**.
- [10] Y. Lee, S. Chiu, and J. Ryan. A branch and cut algorithm for a steiner tree-star problem. *INFORMS Journal on Computing*, 8(3):194–201, **1996**.
- [11] Y. Lee, B. Lim, and J. Park. A hub location problem in designing digital data service networks: Lagrangian relaxation approach. *Location Science*, 4(3):185–194, **1996**.
- [12] J. Xu, S. Chiu, and F. Glover. Using tabu search to solve the steiner tree-star problem in telecommunications network design. *Telecommunication Systems*, 6(1):117–125, **1996**.
- [13] S. Chamberland, O. Marcotte, and B. Sansó. On the joint topological, dimensioning and location problem for broadband networks. In *International Conference on Broadband Communications*, pages 525–536. Springer, **1996**.
- [14] S. Chamberland, B. Sanso, and O. Marcotte. Topological design of two-level telecommunication networks with modular switches. *Operations Research*, 48(5):745–760, **2000**.
- [15] H. Chen, A. Campbell, and B. Thomas. Network design for time-constrained delivery. *Naval Research Logistics (NRL)*, 55(6):493–515, **2008**.
- [16] I. Contreras, E. Fernández, and A. Marín. Tight bounds from a path based formulation for the tree of hub location problem. *Computers & Operations Research*, 36(12):3117–3127, **2009**.
- [17] E. d. Sá, R. d. Camargo, and G. d. Miranda. An improved benders decomposition algorithm for the tree of hubs location problem. *European Journal of Operational Research*, 226(2):185–202, **2013**.

- [18] S. Gollowitzer and I. Ljubić. Mip models for connected facility location: A theoretical and computational study. *Computers & Operations Research*, 38(2):435–449, **2011**.
- [19] I. Ljubić and S. Gollowitzer. Layered graph approaches to the hop constrained connected facility location problem. *INFORMS Journal on Computing*, 25(2):256–270, **2013**.
- [20] S. Gollowitzer, B. Gendron, and I. Ljubić. A cutting plane algorithm for the capacitated connected facility location problem. *Computational Optimization and Applications*, 55(3):647–674, **2013**.
- [21] M. Leitner, I. Ljubić, J. Salazar-González, and M. Sinnl. The connected facility location polytope. *Discrete Applied Mathematics*, 234:151–167, **2018**.
- [22] A. Arulselman, A. Bley, and I. Ljubić. The incremental connected facility location problem. *Computers & Operations Research*, 112:104763, **2019**.
- [23] P. Adasme. p-median based formulations with backbone facility locations. *Applied Soft Computing*, 67:261–275, **2018**.
- [24] K. Gokbayrak and A. Kocaman. A distance-limited continuous location-allocation problem for spatial planning of decentralized systems. *Computers & Operations Research*, 88:15–29, **2017**.
- [25] K. Gokbayrak and H. Avci. A voltage drop limited decentralized electric power distribution network. *Computers & Operations Research*, 118:104907, **2020**.
- [26] K. Gokbayrak. A two-level off-grid electric distribution problem on the continuous space. *Computers & Operations Research*, 144:105853, **2022**. ISSN 0305-0548. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cor.2022.105853>.
- [27] P. Hansen, N. Mladenović, and E. Taillard. Heuristic solution of the multisource weber problem as a p-median problem. *Operations Research Letters*, 22(2-3):55–62, **1998**.

- [28] R. L. Church. The planar maximal covering location problem.(symposium on location problems: in memory of leon cooper). *Journal of regional science Philadelphia*, 24(2):185–201, **1984**.
- [29] J. B. Kruskal. On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. *Proceedings of the American Mathematical society*, 7(1):48–50, **1956**.
- [30] S. K. Jacobsen. Heuristics for the capacitated plant location model. *European Journal of Operational Research*, 12(3):253–261, **1983**. ISSN 0377-2217. doi:[https://doi.org/10.1016/0377-2217\(83\)90195-9](https://doi.org/10.1016/0377-2217(83)90195-9).
- [31] L. Cooper. Heuristic methods for location-allocation problems. *SIAM review*, 6(1):37–53, **1964**.
- [32] Gerhard Reinelt. TSPLIB—A Traveling Salesman Problem Library. *ORSA Journal on Computing*, 3(4):376–384, **1991**. ISSN 0899-1499, 2326-3245. doi:10.1287/ijoc.3.4.376.
- [33] J. Brimberg, N. Mladenovic, and S. Salhi. The multi-source Weber problem with constant opening cost. *Journal of the Operational Research Society*, 55(6):640–646, **2004**. ISSN 0160-5682, 1476-9360. doi:10.1057/palgrave.jors.2601754.
- [34] N. Aras, S. Yumusak, and I. Altmel. Solving the capacitated multi-facility weber problem by simulated annealing, threshold accepting and genetic algorithms. In *Metaheuristics*, pages 91–112. Springer, **2007**.
- [35] I. Contreras, E. Fernández, and A. Marín. The tree of hubs location problem. *European Journal of Operational Research*, 202(2):390–400, **2010**.
- [36] Z. Drezner, J. Brimberg, N. Mladenović, and S. Salhi. New heuristic algorithms for solving the planar p-median problem. *Computers & Operations Research*, 62:296–304, **2015**.

- [37] S. C. Johnson. Hierarchical clustering schemes. *Psychometrika*, 32(3):241–254, **1967**.
- [38] A. S. Kocaman, W. T. Huh, and V. Modi. Initial layout of power distribution systems for rural electrification: A heuristic algorithm for multilevel network design. *Applied energy*, 96:302–315, **2012**.
- [39] R. Prim. Shortest connection networks and some generalizations. *The Bell System Technical Journal*, 36(6):1389–1401, **1957**.
- [40] M. Qiu, L. Liu, H. Ding, J. Dong, and W. Wang. A new hybrid variable-length ga and pso algorithm in continuous facility location problem with capacity and service level constraints. In *2009 IEEE/INFORMS International Conference on Service Operations, Logistics and Informatics*, pages 546–551. IEEE, **2009**.
- [41] S. Salhi and M. Gamal. A genetic algorithm based approach for the uncapacitated continuous location–allocation problem. *Annals of Operations Research*, 123(1):203–222, **2003**.
- [42] R. R. Sokal. The principles and practice of numerical taxonomy. *Taxon*, 12(5):190–199, **1963**. ISSN 00400262.
- [43] J. H. Ward. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *Journal of the American statistical association*, 58(301):236–244, **1963**.