
GAZİ ÜNİVERSİTESİ
Gazi
1926

KARMA FİLOLU ELEKTRİKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

Sercan DÖNMEZ

DOKTORA TEZİ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ARALIK 2022

ETİK BEYAN

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

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

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

Sercan DÖNMEZ

30/12/2022

KARMA FİLOLU ELEKTRİKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMLERİ VE ÇÖZÜM YAKLAŞIMLARI

(Doktora Tezi)

Sercan DÖNMEZ

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Aralık 2022

ÖZET

Dünya çapında yeşil lojistik kavramı büyük önem kazanmış ve bu alanda alınacak önlemler kaçınılmaz hale gelmiştir. Fosil yakıta bağımlılığın azaltılması için yapılan yatırımlar hızla artmaktadır. Dolayısıyla, lojistik sisteminde önemli yer tutan araç filolarının sera gazı salınımı yapmayan çevreye duyarlı araçlardan oluşması hedeflenmektedir. Şirketler çevreci araç filosu hedefiyle alternatif yakıtlı, elektrikli ve hibrit elektrikli araçlara yönelmeye başlamışlardır. İlerleyen dönemlerde filoların bu tip araçlardan oluşacağı gözetilerek akademik dünyada da "Yeşil Araç Rotalama Problemleri (Y-ARP)" sınıfında olan "Elektrikli Araç Rotalama Problemleri" büyük ilgi çekmektedir. Ancak, bu problemler araç rotalama problemlerine şarj işleminden doğan ilave zorluklar getirmiştir. Bu tezde Y-ARP sınıfında yer alan "Çoklu Şarj Teknolojisine Dayalı Kısmi Şarj Politikalı Karma Filolu Elektrikli Araç Rotalama Problemi (KF-E-ARP)" ele alınmıştır. Karma filo, elektrikli ve konvansiyonel araçları içermektedir. Kısmi şarj, farklı şarj teknolojilerinin seçimi, toplam emisyon limiti dikkate alınan diğer özelliklerdendir. Çoklu şarj teknolojilerinden birinin seçimi karma filolu problemlerde ilk defa ele alınmıştır. KF-E-ARP için öncelikle karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Problem NP-zor olduğundan büyük boyutlu problemlere makul sürelerde çözüm elde edebilmek için uyarlamalı geniş komşu aramaya (UGKA) dayalı bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Probleme uyumlu komşuluk mekanizmaları tanımlanmış ve çeşitlendirme etkisini artırıcı yeni yaklaşımlar üretilmiştir. Yeni komşuluk puanlama politikası ve iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir. Deneysel analizlerde, önerilen UGKA orta ve büyük boyutlu problemlerde matematiksel modele kıyasla çözüm kalitesi ve çözüm zamanı açısından daha iyi performans göstermiştir. Duyarlılık analizleri ile UGKA içerisinde tanımlanan mekanizmaların etkinliği doğrulanmış ve filo genişliği ile emisyon üst limiti artışının maliyete etkisi gösterilmiştir.

Bilim Kodu	:	90610
Anahtar Kelimeler	:	Araç rotalama, elektrikli araç, karma filo, emisyon salınımı, çoklu şarj teknolojisi, kısmi şarj politikası, ekleme tabanlı çözüm kurucu sezgisel, uyarlamalı geniş komşu arama
Sayfa Adedi	:	112
Danışman	:	Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK
İkinci Danışman	:	Doç. Dr. Çağrı KOÇ

MIXED FLEET ELECTRIC VEHICLE ROUTING PROBLEM AND SOLUTION METHODS

(Ph. D. Thesis)

Sercan DÖNMEZ

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

December 2022

ABSTRACT

Green logistics concept has gained worldwide importance and precautions on environmental protection have become inevitable. Accordingly, investments to reduce dependence on fossil fuels have increased rapidly. For this reason, it is aimed that the vehicle fleets, which have an important place in the logistics system, will consist of environmentally friendly vehicles not emiting greenhouse gases. Companies have started to turn to alternative fuel, electric and hybrid electric vehicles. Considering that fleets will consist of such vehicles in the future, "Electric Vehicle Routing Problems (E-VRP)", in the "Green Vehicle Routing Problems" class, have attracted great attention in the academic world. However, these problems bring additional challenges to pure VRPs arising from the recharging process. In this thesis, we have introduced a Mixed Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows and Partial Recharging by Multiple Chargers (MF-VRP-MC). Mixed fleet includes electric and conventional vehicles. Partial recharge policy, selection of recharging technology and emission limitation are the other aspects within the problem. Selection of recharging technology is addressed for the first time in the solution phase of a mixed fleet problem. Firstly, we have developed a mixed integer mathematical model for MF-VRP-MC. In consideration of NP-hardness, then, we have developed an Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) algorithm to solve large-size instances in a reasonable time. New neighborhood mechanisms and new approaches for scaling up diversification effect are introduced. Extensive computational analyses have revealed that ALNS outperforms the mathematical model in terms of solution quality and solution time on medium and large size instances. By sensitivity analyses, effectiveness of ALNS mechanisms is validated and the effect of fleet size and emission upper bound on the cost is observed.

Science Code	:	90610
Key Words	:	Vehicle routing, electric vehicle, mixed fleet, emission, multiple charger technologies, partial recharging policy, insertion based constructive heuristic, adaptive large neighborhood search
Page Number	:	112
Supervisor	:	Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK
Co-Supervisor	:	Assoc. Prof. Dr. Çağrı KOÇ

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamın her aşamasında değerli bilgi ve katkılarıyla bana rehberlik eden danışmanlarım Prof. Dr. Fulya ALTIPARMAK'a ve Doç. Dr. Çağrı KOÇ'a, destekleri, yönlendirmeleri, ilgileri ve sabırları için sonsuz saygı ve şükranlarımı sunarım. Tez süreci boyunca değerli katkı ve önerilerinden faydalandığım Prof. Dr. İsmail KARAOĞLAN'a ve Prof. Dr. Selçuk Kürşat İŞLEYEN'e çok teşekkür ederim. Bu meşakkatli ve muteber yolculukta; her daim desteğini esirgemeyen ve moralimi yüksek tutan sevgili eşim, hayat arkadaşım Ayça DÖNMEZ'e ve neşe kaynağım, biricik kızım İdil DÖNMEZ'e, varlıklarından güç bulduğum, layık olmak için çabaladığım, bugünlere gelmemde en büyük emeğe ve fedakârlığa sahip olan kıymetli babam Ali DÖNMEZ'e, canım annem Serpil DÖNMEZ'e ve sevgili kardeşim Şeref Can DÖNMEZ'e, motivasyonumun düştüğü anlarda desteğiyle yeniden çalışma şevk ve azmimi yükselten, iyi ve kötü günümde yanımda olan can dostum Murat DERİNDE'ye, iş yoğunluğuna rağmen benden destek, güler yüz ve sabırlarını esirgemeyen mesai arkadaşlarım ve değerli büyüklerim Levent ŞAHİNTÜRK'e ve Berrin BAL ŞAHİN'e hayatlarımda oldukları için sonsuz saygı, sevgi ve şükranlarımı sunarım.

Bu tez; Ulu Önder Gazi Mustafa Kemal ATATÜRK ve Silah Arkadaşları başta olmak üzere Türkiye Cumhuriyetinin geleceği ve Yüce Türk Milletinin değerli fertleri olan Türk Gençliğine ithaf edilmiştir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET iv

ABSTRACT v

TEŞEKKÜR vi

İÇİNDEKİLER vii

ÇİZELGELERİN LİSTESİ ix

ŞEKİLLERİN LİSTESİ x

SİMGELER VE KISALTMALAR xi

1. GİRİŞ 1

2. ELEKTRİKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI 5

2.1. Araç Rotalama Problemi (ARP) ve Sınıflandırması 5

2.2. Elektrikli Araç Rotalama Problemi (E-ARP) 7

2.3. Literatür Araştırması 7

2.3.1. E-ARP için literatür araştırması 7

2.3.2. KF-E-ARP için literatür araştırması 12

2.3.3. Değerlendirme 16

3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL 17

3.1. Problemin Tanımı ve Notasyon 17

3.2. KF-E-ARP için Matematiksel Model Yaklaşımları 22

3.3. Geliştirilen Matematiksel Model 23

3.4. Deneysel Çalışma 29

3.4.1. Test problemleri 30

3.4.2. Sayısal sonuçlar 33

3.5. Değerlendirme 40

Sayfa

4. UYARLAMALI GENİŞ KOMŞU ARAMA 41
4.1. Çözüm Gösterimi..... 45
4.2. Başlangıç Çözümü Fazı..... 46
4.2.1. Kümeleme prosedürü 47
4.2.2. Ekleme prosedürü 51
4.3. Uyarlamalı Geniş Komşu Arama Fazı..... 55
4.3.1. Uygun olmayan çözümlerin ele alınması 60
4.3.2. İyileştirme prosedürü 61
4.3.3. Komşuluk mekanizmaları 62
4.4. Deneysel Çalışma..... 72
4.4.1. E-ÇKS ve UGKA için parametrelerin belirlenmesi 73
4.4.2. Sayısal sonuçlar 76
4.4.3. Duyarlılık analizleri 83
4.5. Değerlendirme..... 89
5. SONUÇ VE ÖNERİLER 91
KAYNAKLAR 95
EKLER..... 101
EK-1. KF-E-ARP için Kopya Düğümlü Matematiksel Model 102
ÖZGEÇMİŞ..... 111

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 2.1. Literatürde ele alınan E-ARP özellikleri 13

Çizelge 2.2. Karma filolu problemlerin karşılaştırması 16

Çizelge 3.1. Problem parametreleri özeti 31

Çizelge 3.2. Model yaklaşımlarının performans karşılaştırması 34

Çizelge 3.3. Küçük boyutlu problemler için sayısal sonuçlar 37

Çizelge 3.4. Orta boyutlu problemler için sayısal sonuçlar 38

Çizelge 3.5. Büyük boyutlu problemler için sayısal sonuçlar 39

Çizelge 4.1. Komşuluk mekanizmaları listesi 63

Çizelge 4.2. UGKA parametreleri 73

Çizelge 4.3. Ağırlıkların başlangıç çözümüne etkisi 74

Çizelge 4.4. Küçük boyutlu problemlerde A-MM ve UGKA çözümleri 77

Çizelge 4.5. Orta boyutlu problemlerde A-MM ve UGKA çözümleri 79

Çizelge 4.6. Büyük boyutlu problemlerde A-MM ve UGKA çözümleri 80

Çizelge 4.7. A-MM ve UGKA çözüm kıyaslamaları özeti 81

Çizelge 4.8. Kabul olasılık fonksiyonu ve yeniden ısıtma mekanizmasının küçük boyutlu problemlerdeki etkisi 84

Çizelge 4.9. Kabul olasılık fonksiyonu ve yeniden ısıtma mekanizmasının orta boyutlu problemlerdeki etkisi 85

Çizelge 4.10. Kabul olasılık fonksiyonu ve yeniden ısıtma mekanizmasının büyük boyutlu problemlerdeki etkisi 86

Çizelge 4.11. Artan filo genişliği ve emisyon üst limitinin etkisi 87

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 2.1. E-ARP'lerin şarj özelliklerine göre sınıflandırması 8

Şekil 2.2. E-ARP'lerin parametre ve kısıtlara göre sınıflandırması 8

Şekil 2.3. Şarj eğrisi 10

Şekil 3.1. KF-E-ARP'ye ilişkin görsel örnek 20

Şekil 3.3. Birim mesafedeki emisyon salınım miktari 32

Şekil 3.2. Birim mesafedeki şarj tüketim miktari 32

Şekil 4.1. Geliştirilen UGKA temelli sezgisel algoritmanın ana hatları 41

Şekil 4.2. GKA algoritması sözde kodu 42

Şekil 4.3. UGKA için çözüm gösterimi 46

Şekil 4.4. Ekleme tabanlı çözüm kurucu sezgisel için akış diyagramı 48

Şekil 4.5. Önerilen UGKA algoritması sözde kodu 57

Şekil 4.6. İyileştirme prosedürü sözde kodu 62

Şekil 4.7. Komşuluk mekanizmaları özet görünümü 63

Şekil 4.8. Rassal müşteri çıkarma sözde kodu 64

Şekil 4.9. Rassal rota seçme ve en kötü mesafeli müşteri çıkarma sözde kodu 65

Şekil 4.10. En sıkı rota seçme ve en kötü mesafeli müşteri çıkarma sözde kodu 66

Şekil 4.11. En kötü mesafeli müşteri çıkarma sözde kodu 66

Şekil 4.12. Rassal rota seçme ve eniyi mesafeli müşteri ekleme sözde kodu 68

Şekil 4.13. En yakın rota seçme ve eniyi mesafeli müşteri ekleme sözde kodu 70

Şekil 4.14. Eniyi mesafeli müşteri ekleme sözde kodu 72

Şekil 4.15. Ağırlık kombinasyonlarının performansı 75

Şekil 4.16. A-MM - UGKA çözüm zamanı dağılımları karşılaştırması 82

Şekil 4.17. A-MM - UGKA çözümlerinin karşılaştırması 82

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
$\boldsymbol{V}$	Müşteri düğümleri kümesi
$\boldsymbol{0}$	Depo
$\boldsymbol{V_0}$	Müşteri düğümleri ve depo kümesi
$\boldsymbol{R}$	Şarj İstasyonları kümesi
$\boldsymbol{A}$	Ayrıtlar kümesi
$\boldsymbol{d_{ij}}$	*i-j* düğümleri arası mesafe ($\forall i,j \in V_0,\ i \neq j$)
$\boldsymbol{t_{ij}}$	*i-j* düğümleri arası ulaşım süresi ($\forall i,j \in V_0,\ i \neq j$)
$\boldsymbol{s}$	Ortalama hız
$\boldsymbol{c_{ij}^{C}}$	Konvansiyonel araçlar için *i-j* düğümleri arası birim ulaşım maliyeti ($\forall i,j \in V_0,\ i \neq j$)
$\boldsymbol{c_{ij}^{E}}$	Elektrikli araçlar için *i-j* düğümleri arası birim ulaşım maliyeti ($\forall i,j \in V_0,\ i \neq j$)
$\boldsymbol{d_{ijk}}$	*k* şarj istasyonu uğraklı *i-j* düğümleri arası mesafe ($\forall i,j \in V_0, i \neq j,\ \forall k \in R$)
$\boldsymbol{t_{ijk}}$	*k* şarj istasyonu uğraklı *i-j* düğümleri arası ulaşım süresi ($\forall i,j \in V_0,\ i \neq j,\ \forall k \in R$)
$\boldsymbol{q_i}$	*i* müşterisinin dağıtım talebi miktarı ($\forall i \in V$)
$\boldsymbol{S_i}$	*i* müşterisinin servis süresi ($\forall i \in V$)
$\boldsymbol{e_i}$	*i* müşterisinin en erken servise başlama zamanı ($\forall i \in V$)
$\boldsymbol{l_i}$	*i* müşterisinin en geç servise başlama zamanı ($\forall i \in V$)
$\boldsymbol{n^C}$	Filodaki konvansiyonel araç sayısı
$\boldsymbol{n^E}$	Filodaki elektrikli araç sayısı
$\boldsymbol{C^C}$	Konvansiyonel araçların yük kapasitesi
$\boldsymbol{C^E}$	Elektrikli araçların yük kapasitesi
$\boldsymbol{Q^E}$	Elektrikli araçların pil şarj kapasitesi

Simgeler	**Açıklamalar**
$\boldsymbol{T_{max}}$	Azami tur tamamlanma zamanı
$\boldsymbol{M}$	Şarj cihazı konfigürasyonları kümesi
$\boldsymbol{g^m}$	*m* şarj konfigürasyonu ile birim şarj etme hızı ($m \in M$)
$\boldsymbol{c^m}$	*m* şarj konfigürasyonu ile birim şarj etme maliyeti ($m \in M$)
$\boldsymbol{h(u_{ij}^E)}$	*i-j* düğümleri arasında taşınan yüke bağımlı birim şarj tüketim hızı
$\boldsymbol{\varepsilon(u_{ij}^C)}$	*i-j* düğümleri arasında taşınan yüke bağımlı birim emisyon salınım miktarı
$\boldsymbol{UB}$	Toplam emisyon üst limiti

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
ARP	Araç Rotalama Problemi
C	Kümelenmiş Müşteri Dağılımı
EA	Elektrikli Araç
E-ARP	Elektrikli Araç Rotalama Problemi
E-ÇKS	Ekleme Tabanlı Çözüm Kurucu Sezgisel
GKA	Geniş Komşu Arama
İP	İyileştirme Prosedürü
KA	Konvansiyonel Araç
KF-E-ARP	Karma Filolu Elektrikli Araç Rotalama Problemi
R	Rassal Müşteri Dağılımı
RC	Rassal Kümelenmiş Müşteri Dağılımı
TB	Tavlama Benzetimi
UGKA	Uyarlamalı Geniş Komşu Arama
YA	Yerel Arama

1. GİRİŞ

Dünya çapında "yeşil lojistik" ve "yeşil tedarik zinciri" kavramları; genel anlamıyla lojistik faaliyetlerin ekolojik etkilerini ölçümleyerek, bu etkilerin enaza indirilmesi ya da tamamıyla ortadan kaldırılması için yapılan tüm çabaları içermektedir. Dünyada çevre bilincinin artması ile birlikte hem kanun koyucuların öne sürdüğü birtakım düzenlemeler, hem de kurumsal müşterilerin lojistik firmaları tercih etme kriterlerinde yeşil lojistiğin önemli bir yer tutması bu çabaları kaçınılmaz hale getirmiştir.

Gündemde olan çevre kirliliği, küresel ısınma ve iklim krizinin etkenlerinden biri de sera gazı salınımına neden olan fosil yakıtlardır. Bu sebeple araştırmacılar, küresel sıcaklıkların hedefler içerisinde kalması için dünya çapında üretilen fosil yakıt miktarının 2020 yılındaki zirveyi aşmaması ve yıllık üretim rezervinin 2050'ye kadar her sene %3'lük sabit bir düşüş göstermesi gerektiğini ortaya koymuştur.

Ulaştırma sektörü, özellikle fosil yakıt tüketen araçlardan dolayı global enerji tüketimi ve emisyon salınım miktarı dağılımı içerisinde çok büyük bir paya sahiptir. Ulaştırma ve taşımacılık sistemlerinin ise global enerji tüketiminde ve CO_2 salınımında, toplamın yaklaşık %20-25 gibi bir dilimine sahip olduğu bilinmektedir.

2014 yılında ABD'de toplam sera gazı salınımlarının %26'sının fosil yakıt tüketen ulaştırma sistemlerine ait olduğu ifade edilmektedir (U.S. Environmental Protection Agency, 2018). Bununla birlikte 2012 yılında icra edilen iç hat taşımacılığının %74'ünün tırlar vasıtasıyla sağlandığı belirtilmiş olup, 2040 yılına kadar bu taşıma hacminin yaklaşık %39 kadar artması beklenmektedir (Bureau of Transportation Statistics, 2014). Taşımacılık ve beraberindeki çevre kirliliği artış trendleri dikkate alınarak üst yönetim kademeleri tarafından sera gazı salınımlarının ve fosil yakıta bağımlılıkların azaltılması yönünde birtakım önlemler ve düzenlemelere başvurulmaktadır. Örneğin ABD'de 2020 yılında, 2008 yılındaki salınım seviyelerinin %20 aşağılara çekilmesi (US Department of State, 2012), benzer şekilde Avrupa Birliği tarafından 1990 yılına kıyasla 2050 yılında salınım seviyesinin %80-95 azaltılması amaçlanmaktadır (European Comission White Paper on Transport, 2011). Bu tip hedeflerin sağlanması amacıyla birçok Avrupa ülkesinde konvansiyonel araçların sayısını azaltmak ya da tamamıyla hizmet dışına çıkararak sıfır

emisyon salınımı sunan araçların (elektrikli ve karma) kullanımı için kademeli geçiş planları yayımlanmaktadır. Örneğin; Avrupa Birliği konvansiyonel araçların şehir içi ulaşımda 2030 yılına kadar %50 civarında azaltılmasını, 2050'de ise tamamen ortadan kaldırılmasını öngörmektedir. Hollanda ve Norveç 2025 yılında, Almanya ise 2030 yılında fosil yakıt tüketen araçların satışına son vereceğini açıklamıştır. Avrupa Birliğinin, Kasım 2019'da yayımladığı "Avrupa Yeşil Mutabakatı"nda da benzer hedeflere yer verilmiştir.

Fosil yakıt tüketen araçlara olan bağımlılığın ve dolayısıyla emisyon salınımın azaltılması için alınan önlemler çerçevesinde "yeşil lojistik" ile birlikte "yeşil rotalama problemleri" de büyük önem kazanmıştır. Gerçek hayatta çok fazla uygulama alanı olan "yeşil rotalama problemleri", çevrenin korunmasını aşağıda belirtilen ana başlıklar altında farklı bakış açıları ile ele almaktadır:

- Konvansiyonel araçların yakıt tüketimi sebebiyle açığa çıkan sera gazı salınımının enazlanması,
- Konvansiyonel araçların yerine alternatif yakıtlı araçların kullanımı,
- Konvansiyonel araçların yerine elektrikli ya da hibrit elektrikli araçların kullanımı.

Yukarıda belirtilen yeşil rotalama problemlerine araştırmacılar tarafından kesin algoritmalar, sezgisel algoritmalar ve karma algoritmalar ile çözüm bulunmuştur. Ayrıca, yeşil rotalama problemleri için yakın dönemde Ghorbani ve ark. (2020), Marrekchi ve ark. (2021) ve Asghari ve ark. (2021) tarafından literatür araştırma çalışmaları yapılmıştır.

Elektrikli araç teknolojisi, emisyon salınımını ortadan kaldırırken yüksek enerji verimliliği sağlamaktadır. Fosil yakıt tüketen araçlara göre daha sessiz çalışan elektrikli araçların ayrıca bakım-idame maliyetleri de daha azdır (Arslan ve ark., 2015). Araç rotalama problemlerinin (ARP) birçok çeşidi uzun yıllardır çalışılmıştır. Verimli ve yeşil teknolojinin önem kazandığı günümüzde, elektrikli araçların ulaştırma sektöründe ve özellikle ARP'de kullanımı akademi dünyasında büyük ilgi çekmiştir. Ancak, elektrikli araçların ARP'de ele alınması ile birlikte bu araçların pil kapasitelerinden dolayı menzillerinin az olması, şarj edilme sürelerinin uzun zaman alması ve sınırlı sayıda şarj istasyonu bulunması probleme ilave zorluklar getirmiştir.

Bu tez kapsamında Elektrikli ARP'nin (E-ARP) bir çeşidi olan Çoklu Şarj Teknolojisine Dayalı Kısmi Şarj Politikalı Karma Filolu Elektrikli Araç Rotalama Problemi (KF-E-ARP) ele alınmıştır. Literatürde ayrık biçimde ele alınan bir çok özellik, yeşil lojistik konseptine uygun ve daha gerçekçi biçimde önerilen problem içerisinde birleştirilmiştir. Karma filo, elektrikli ve konvansiyonel araçları içermektedir. Kısmi şarj, farklı şarj teknolojilerinin seçimi ve emisyonun sınırlandırılması dikkate alınan diğer özelliklerdir. Ayrıca emisyon ve şarj tüketim fonksiyonları içerisinde araçtaki yük miktarı da dikkate alınmıştır. Çoklu şarj teknolojilerinden birinin seçilmesi ise karma filolu problemlerde ilk defa ele alınmıştır. Önerilen problem, tanımlı kısıtlara bağlı olarak dağıtım taleplerini karşılarken toplam maliyeti enazlayan rotaların elde edilmesi olarak tanımlanabilir. KF-E-ARP için öncelikle karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Modelde ayrıt tabanlı üç indisli karar değişkenleri kullanılarak literatürde baskın olarak tercih edilenin aksine aynı şarj istasyonuna birden fazla uğramayı temsil eden kopyalara gerek kalmamıştır. Basamak fonksiyon formundaki emisyon ve şarj tüketim fonksiyonları ise doğrusallaştırılmıştır. Problem NP-zor sınıfında olduğundan orta ve büyük boyutlu problemlere makul sürelerde çözüm elde edebilmek için uyarlamalı geniş komşu aramaya (UGKA) dayalı bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritma içerisinde problemin karmaşık kısıtlarına uyumlu komşuluk mekanizmaları tanımlanmış ve çeşitlendirme etkisini artırıcı yeni yaklaşımlar üretilmiştir. Yeni komşuluk puanlama politikası ile yeni çözüm iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir. Çözüm iyileştirme yöntemi ile gereksiz şarj istasyonu ziyaretleri ve ihtiyaç fazlası enerji transferleri ortadan kaldırılmıştır. Deneysel analizlerde, önerilen UGKA orta ve büyük boyutlu problemlerde matematiksel modele kıyasla çözüm kalitesi ve çözüm zamanı açısından daha iyi performans göstermiştir. Duyarlılık analizleri ile UGKA içerisinde tanımlanan mekanizmaların etkinliği doğrulanmış ve filo genişliği ile emisyon üst limiti artışının maliyete etkisi gösterilmiştir.

Bu tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Tezin diğer bölümleri şu şekilde düzenlenmiştir.

İkinci bölümde, ilgilenilen probleme ilişkin tanımlamalar yapıldıktan sonra bu problemin belirli özelliklerine göre yapılan sınıflandırma dikkate alınarak literatür taramalarına yer verilmiştir. Daha sonra, tez çalışmasının literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırması yapılmıştır. Literatür taramaları ilk aşamada E-ARP özelinde verilirken, ikinci aşamada KF-E-ARP'ye odaklanılmıştır.

Üçüncü bölümde, öncelikle KF-E-ARP için literatürdeki matematiksel model yaklaşımları ve geliştirilen matematiksel model verilmiştir. Daha sonra matematiksel modelin performansının analizi için yapılan deneysel çalışma sunulmuştur.

Dördüncü bölümde, probleme çözüm üretmek için geliştirilen Ekleme Tabanlı Çözüm Kurucu Sezgisel (E-ÇKS) algoritma ve Uyarlamalı Geniş Komşu Aramaya (UGKA) dayalı sezgisel algoritma anlatılmış ve algoritmaların performansı matematiksel model ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Tez çalışması kapsamında E-ÇKS ile uygun başlangıç çözümü elde edilmiş ve bu çözüm UGKA'ya dayalı sezgisel algoritma ile iyileştirilmiştir. Son olarak, duyarlılık analizleri ile UGKA içerisinde tanımlanan mekanizmaların etkinliği ve filo genişliği ile emisyon üst limiti artışının maliyete etkisi incelenmiştir.

Beşinci bölümde ise yapılan çalışma özetlenmiş ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

2. ELEKTRİKLİ ARAÇ ROTALAMA PROBLEMİ VE LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Tezin bu bölümünde öncelikle araç rotalama problemi (ARP) ve elektrikli araç rotalama problemi (E-ARP) genel özellikleri ile açıklanmıştır. Daha sonra tez kapsamında çalışılan problemin karma filo bünyesinde elektrikli araçları içermesi nedeniyle önce E-ARP ve devamında karma filolu E-ARP'ye (KF-E-ARP) ilişkin literatür araştırmalarına yer verilmiştir.

2.1. Araç Rotalama Problemi (ARP) ve Sınıflandırması

ARP, müşterilerin taleplerini karşılamak için bir ya da daha fazla depodan hareket eden homojen ya da heterojen araçların toplam maliyet ya da toplam seyahat süresi gibi amaç fonksiyonunu eniyileyen rotaların belirlenmesi olarak tanımlanabilir. İlk defa Dantzig ve Ramser (1959) tarafından tanımlanan ARP için temel kısıtlar aşağıda verilmektedir.

- Müşteriler araçlar tarafından bir defa ziyaret edilmelidir.
- Araç rotaları depoda başlamalı ve depoda sonlanmalıdır.
- Araçta taşınan yük miktarı araç kapasitesini aşmamalıdır.

ARP'nin başlıca farklı türleri ise aşağıda belirtilmiş (Toth ve Vigo, 2014) olup, ARP tipleri farklı bakış açıları ile çoğaltılabilir. Son dönemde Vidal ve ark. (2020) tarafından ARP'nin sınıflandırılmasına ilişkin detaylı bir literatür araştırması yapılmıştır.

- Kapasite Kısıtlı ARP: Filodaki araçlar belirli bir yük kapasitesine sahiptir.
- Mesafe Kısıtlı ARP: Araçların rotaları, mesafe ya da süre bazında bir üst limit ile sınırlıdır.
- Zaman Pencereli ARP: Müşterilerin talepleri tanımlı bir zaman aralığında karşılanmalıdır.
- Topla-Dağıt ARP: Müşterilerin dağıtım talepleri ile birlikte toplama taleplerinin de olabildiği problemlerdir. Bu problemler, kaynak ve hedef noktasının adet ve özelliklerine göre çoka-çok (many to many), bire-bir (one to one) ve bire-çoka-bir (one to many to one) şeklinde farklılık gösterebilir. Ayırca talep tipinin (toplama ve dağıtım) karşılanma şekli (aynı anda ya da ayrı ayrı) ile toplama-dağıtım hizmetlerinin rota

üzerindeki sıralamasına (talep tipinin önceliklerinden bağımsız ya da önce dağıt-sonra topla) göre çeşitler artırılabilir.

- Çok Depolu ARP: Müşterilere önceden tanımlı birden fazla depodan hizmet verilebilir.
- Heterojen ARP: Filodaki araçlar kapasite, sürat, rotalama maliyeti gibi özellikleri ile farklılık göstermektedir.
- Açık Uçlu ARP: Müşteri taleplerini karşılamak için depodan çıkan aracın talebi karşıladıktan sonra depoya dönme zorunluluğu bulunmamaktadır.
- Bölünmüş Talepli ARP: Bir müşterinin toplam talebinin birden fazla araç ile karşılanabildiği problem tipidir.
- Dinamik ARP: Sağlanan hizmet süresince şartların değişiklik gösterdiği ARP'dir.
- Stokastik ARP: Probleme özgü bazı verilerde belirsizlik söz konusu olduğu ve bu verilerin olasılık dağılımları ile tanımlandığı problemlerdir.
- Çok Kullanım ARP: Filodaki araçlar müşteri taleplerini karşılamak üzere planlama ufku içerisinde birden fazla rotada görevlendirilebilmektedirler.
- Çok Amaçlı ARP: Problem kapsamında birden fazla amaç fonksiyonunun eniyilenmeye çalışıldığı ARP'dir.
- Yeşil ARP: Sera gazı salınımını enazlamayı hedefleyen (Figliozzi, 2010; Zhang ve ark., 2015; Li ve ark., 2018; Olgun ve ark., 2021; Dewi ve Utama, 2021) ya da yakıt ilave edilmesi ile şarj işlemini dikkate alarak alternatif yakıtlı (Erdoğan ve Miller-Hooks, 2012; Montoya ve ark., 2016; Bruglieri ve ark., 2019; Sadati ve Çatay, 2021; Bruglieri, 2022), elektrikli ve hibrit elektrikli (Felipe ve ark., 2014; Schneider ve ark., 2014; Keskin ve Çatay, 2016; Montoya ve ark., 2017; Pelletier ve ark., 2017; Keskin ve Çatay, 2018; Cortés-Murcia ve ark., 2019; Vidal ve ark., 2020; Tahami ve ark., 2020; Yaşar Boz ve Aras, 2021; Küçükoğlu ve ark., 2021; Guo ve ark., 2022) araçları dikkate alan ARP'dir. Tez kapsamıda ele alınan problemin de dahil olduğu yeşil rotalama problemlerine araştırmacılar tarafından kesin algoritmalar (Desaulniers ve ark., 2016; Andelmin ve Bartolini, 2017; Leggieri ve Haouari, 2017; Lam ve ark., 2022), sezgisel algoritmalar (Rezgui ve ark., 2019; Olgun ve ark., 2021; Dewi ve Utama, 2021; Bruglieri, 2022) ve karma algoritmalar (Koç ve Karaoğlan, 2016; Keskin ve Çatay, 2018; Hiermann ve ark., 2019) ile çözüm bulunmuştur.

2.2. Elektrikli Araç Rotalama Problemi (E-ARP)

Elektrikli araçların kullanıldığı ARP (E-ARP) ilk olarak Conrad ve Figliozzi (2011) tarafından çalışılmıştır. E-ARP'de, ARP özelliklerine ilaveten elektrikli araçların pil kapasitesinden dolayı sınırlı ulaşım menzili ve belirli lokasyonlarda şarj edilme durumu söz konusudur. Bu durumda E-ARP için ARP ana kısıtlarına ilaveten aşağıdaki kısıt eklenmektedir.

- Pil şarj seviyesi, depoya geri dönmeden ya da şarj istasyonuna uğramadan önce "0" seviyesine inmemelidir.

Elektrikli araçların avantajları arasında dağıtım esnasında sıfır CO_2 salınımı, düşük gürültü, yüksek enerji verimliliği, düşük bakım-idame maliyeti ve konvansiyonel araçlar için yürürlüğe girecek şehir-içi trafiğindeki kullanım kısıtlamalarından bağımsız olma sayılabilir. Ancak elektrikli araçlar, pil kapasitesinden kaynaklı sınırlı ulaşım menzili, uzun şarj periyotları ve kurulum için yüksek maliyet gerektiren şarj istasyonlarının ve altyapılarının azlığı gibi dezavantajları da beraberinde getirmektedir.

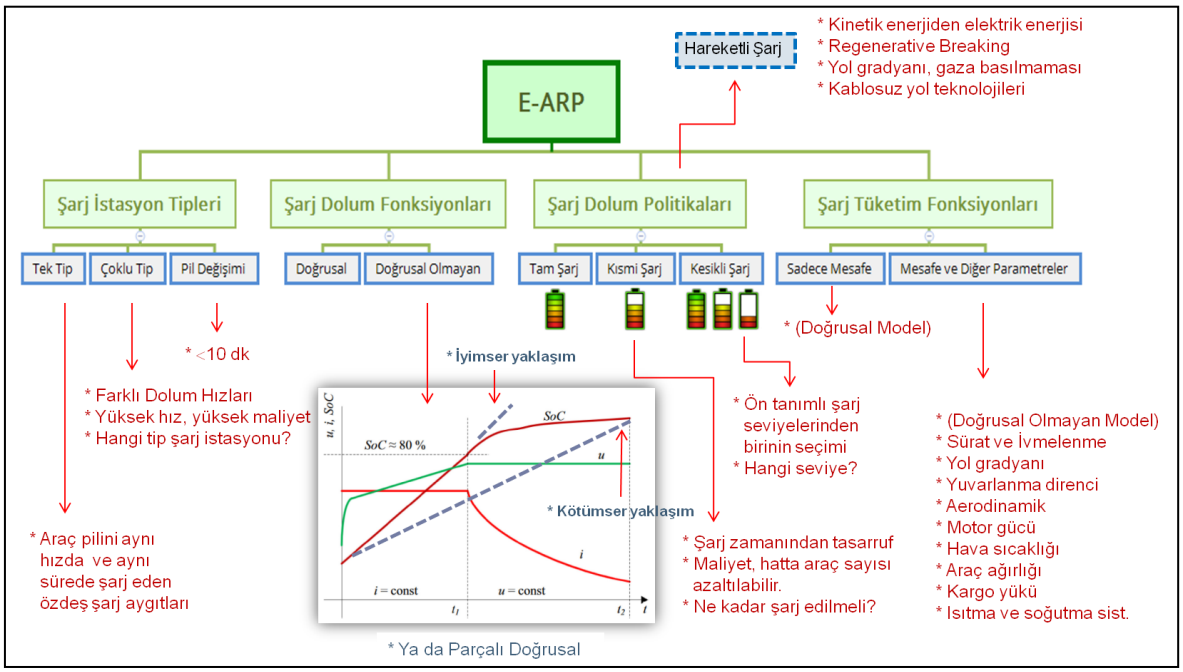
2.3. Literatür Araştırması

Bu bölümde öncelikle E-ARP'ye ilişkin literatür araştırmasına ve sınıflandırmaya yer verilmiştir. Daha sonra karma filolu E-ARP (KF-E-ARP) için literatür araştırması detaylandırılmıştır.

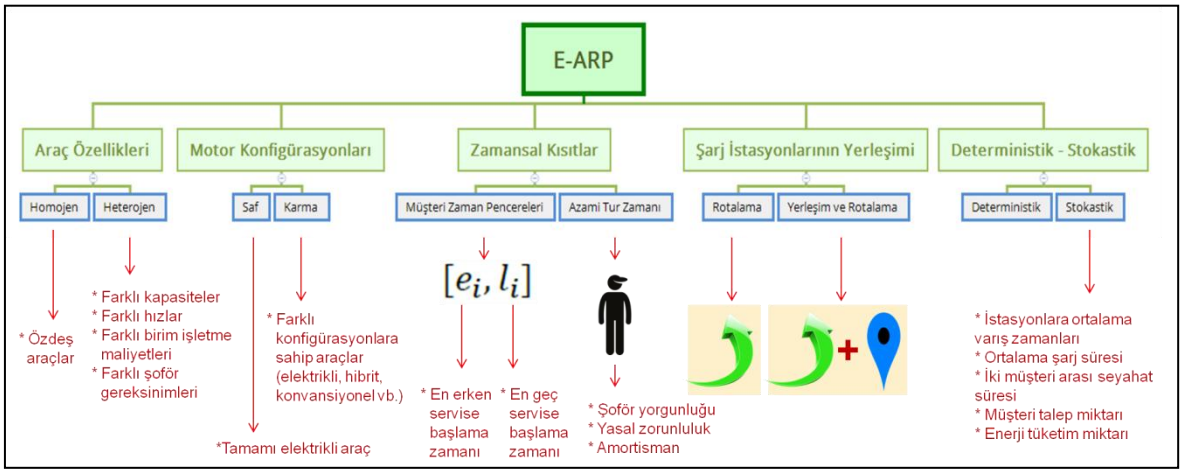
2.3.1. E-ARP için literatür araştırması

ARP'lerin Bölüm 2.1'de belirtilen sınıflandırmasına ilaveten, E-ARP öncelikle şarj istasyonu tipleri, şarj dolum fonksiyonları, şarj dolum politikaları ve şarj tüketim fonksiyonları gibi ana şarj özelliklerine göre sınıflandırılmaktadır. Buna ilaveten filodaki araçların motor konfigürasyonları ve müşteri taleplerinin zamana bağımlılığı gibi parametre ve kısıtlara göre de sınıflandırma genişletilmektedir (Erdelić ve Carić, 2019; Vidal ve ark., 2019; Xiao ve ark., 2021).

E-ARP'lerin şarj özelliklerine göre sınıflandırmasının özeti Şekil 2.1'de, parametre ve kısıtlara göre sınıflandırmasının özeti ise Şekil 2.2'de verilmiştir. Bu bölümde bu sınıflandırmalar dikkate alınarak literatürdeki çalışmalar incelenecektir.



Şekil 2.1. E-ARP'lerin şarj özelliklerine göre sınıflandırması



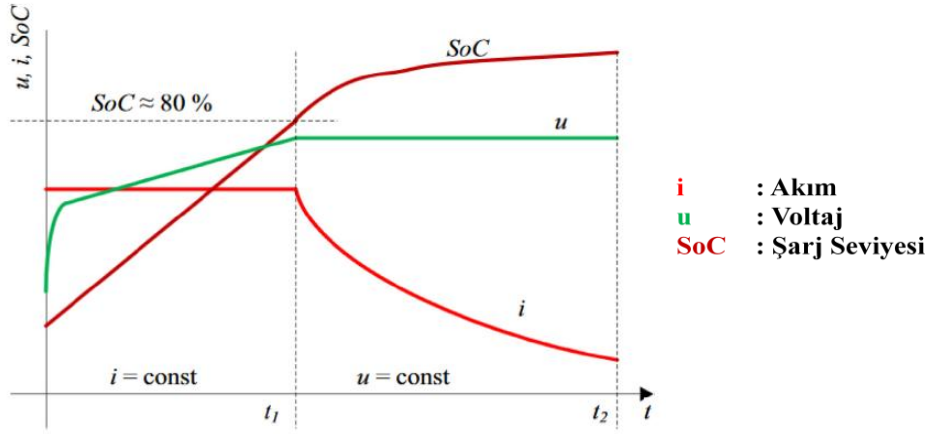
Şekil 2.2. E-ARP'lerin parametre ve kısıtlara göre sınıflandırması

Şarj istasyonu tipleri

Bazı E-ARP'lerde pil dolumu için aynı özelliklere (araç pilini aynı hızda ve aynı sürede dolduran) sahip tek tip şarj istasyonları dikkate alınırken, bazı problemlerde ise pil şarj etme hızı farklı olan normal, hızlı ve süper-hızlı gibi farklı şarj istasyonu konfigürasyonları dikkate alınmaktadır (Felipe ve ark., 2014; Keskin ve Çatay, 2018). Farklı şarj istasyonları söz konusu olduğunda hangi tip şarj istasyonundan (normal, hızlı, süper hızlı vb.) hizmet alınacağına da karar verilmesi gerekir. İstasyonun şarj hızına dayalı olarak şarj maliyeti de artmaktadır. Ancak, tur süresi ve/veya müşterilerin zaman penceresi kısıtlarının sağlanması dikkate alındığında hız ve maliyet arasında bir ödünleşim söz konusudur. Bazı problemlerde ise şarjı azalmış ya da boşalmış pilin istasyonda tam dolu yeni pil ile değiştirilmesi (swap) dikkate alınmıştır (Yang ve Sun, 2015; Chen ve ark., 2021). Amaç, pil dolumu için harcanan zamanı enazlayarak aracın dağıtım/toplama hizmetine devam etmesini sağlamaktır. Ayrıca bazı problemlerde şarj istasyonunda şarj işlemi ya da pil değiştirme işleminden birinin seçilmesi de mümkündür. (Paz ve ark., 2018)

Şarj dolum fonksiyonları

Bazı E-ARP'ler pil dolumunda pil şarj seviyesi için zamana bağlı doğrusal bir fonksiyonu dikkate alırken, bazı problemler ise gerçeği daha iyi yansıtmak için doğrusal olmayan bir şarj dolum fonksiyonundan faydalanmaktadır. Hatta dolum fonksiyonunun doğrusal olmayan davranışının ihmal edilmesi ile gerçek hayatta mümkün olmayan ya da yüksek maliyetli çözümler elde edileceği öne sürülmektedir. (Montoya ve ark., 2017; Pelletier ve ark., 2017; Pelletier ve ark., 2018; Koç ve ark., 2019; Guo ve ark., 2022). Gerçek hayattaki şarj fonksiyonları, voltaj ve akımın şarj sürecinde değişiklik göstermesinden dolayı doğrusal değildir. Bu süreç iki fazdan oluşur. Birinci fazda akım sabitken voltaj yükseltilerek pil şarj seviyesi doğrusal olarak belli bir seviyeye ulaşır. İkinci fazda ise pilin zarar görmesini önlemek amacıyla voltaj en yüksek seviyeye ulaştığında akım üstel azaltılarak voltaj sabit tutulur (Şekil 2.3). Doğrusal olmayan davranışı ikinci faz göstermekle birlikte bu davranışın başladığı an pil seviyesinde yaklaşık %80'e denk gelmektedir (Pelletier ve ark., 2017). Birçok çalışmada doğrusal kabul edilen şarj dolum fonksiyonunun doğrusal olmaması gerektiği Pelletier ve ark. (2017) ve Montoya ve ark. (2017) tarafından vurgulanmış ve çalışmaları kapsamında da doğrusal olmayan fonksiyon parçalı doğrusal fonksiyona çevrilmiştir.



Şekil 2.3. Şarj eğrisi

Şarj dolum politikaları

Bazı E-ARP'lerde şarj istasyonlarında pil her seferinde tam kapasite şarj edilirken, bazı problemlerde ise zamana bağlı kısıtların (zaman penceresi, tur süresi, vb.) ihlal edilmemesi ya da turun daha kısa sürede tamamlanması için pil, ihtiyacı karşılayacak düzeyde kısmi şarj edilir (Felipe ve ark., 2014; Keskin ve Çatay, 2016; Keskin ve Çatay, 2018; Schiffer ve Wallter, 2018). Gerçek hayatı daha iyi yansıtan kısmi şarj politikasında pilin hangi seviyede şarj edileceği belirlenmelidir. Bu politika, şarj zamanından tasarrufun yanısıra ihtiyaç duyulan araç sayısının azaltılmasını da sağlayabilir. Bu politikanın kullanımında bir diğer motivasyon ise pilin şarj edilmeyen kısmının depoda çok daha az maliyetle şarj edilebilmesidir. Bununla birlikte bazı çalışmalarda da pilin tam kapasite şarjı ya da %80 seviyesinde (doğrusal olmayan şarj dolum davranışının başladığı seviye) şarjı şeklinde iki politikadan birisinin tercih edildiği görülmektedir (Conrad ve Figliozzi, 2011). Ayrıca frene basılması ile yavaşlama ya da yol eğimine bağlı olarak gaza basılmaması gibi durumlarda mevcut kinetik enerjiden pilin şarj edilebilmesinin (rejeneratif frenleme) yanısıra, seyir halindeki aracın yüksek enerjili istasyonlardan kablosuz olarak şarj edilebilmesine ilişkin teknolojiler üzerinde çalışılmaktadır.

Şarj tüketim fonksiyonları

Bazı E-ARP'lerde pil şarjının yalnızca rotalarda katedilen mesafeye bağlı olarak doğrusal azalacağı varsayılırken, bazı problemlerde ise şarj tüketim fonksiyonunun katedilen mesafenin yanısıra rotadaki yollarda yapılan sürat ve ivmelenmeler, yol eğimi ve yuvarlanma direnci, aracın aerodinamik ve motor gücü gibi karakteristik özellikleri, hava

sıcaklığı, araç ağırlığı ve kargo yükü, araç ısıtma ve soğutma sistemleri gibi gerçek hayatın içinde olan faktörlere de bağlı olacağı varsayılmıştır (Goeke ve Shneider, 2015; Lin ve ark., 2016; Macrina ve ark., 2019b; Vincent ve ark., 2021).

Motor konfigürasyonları

Bazı çalışmalarda sadece elektrikli araçlardan oluşan filolar için araç rotaları planlanırken, bazı çalışmalarda ise özellikle elektrikli araçlara geçiş aşamasını dikkate alarak elektrikli araçlar ile birlikte konvansiyonel araçların da olduğu karma filolar için araç rotaları planlanmaktadır (Gonçalves ve ark., 2011; Sassi ve ark., 2014; Goeke ve Shneider, 2015; Macrina ve ark., 2019a; Macrina ve ark., 2019b; Vincent ve ark., 2021).

Müşteri taleplerinin zamana bağımlılığı

E-ARP'lerin bazıları müşterilerin taleplerini planlanan rotalar üzerinde zamana bağlı kalmaksızın karşılamaya çalışırken, bazıları ise müşteri taleplerini asgari ve azami limitleri tanımlı zaman pencereleri içerisinde karşılamaya odaklanmaktadır (Shneider ve ark., 2014; Keskin ve Çatay, 2016; Keskin ve Çatay, 2018; Goeke ve Shneider, 2015; Schiffer ve Wallter, 2017).

Bu özellikler dışında ele alınan E-ARP çalışmalarından bazıları aşağıda verilmiştir.

Filo bünyesindeki araçlar özdeş özelliklere sahip homojen yapıda olabilirken, yük kapasitesi, şarj kapasitesi, sürat, farklı tip sürücü ihtiyacı ve birim işletme maliyetleri gibi bazı özellikleri ile heterojen olabilirler (Koç ve ark., 2016; Koç ve ark., 2019).

Literatürdeki çoğu çalışmada, zamana ilişkin problem parametreleri deterministiktir. Ancak, gerçek hayatta şarj istasyonu farklı müşteriler tarafından kullanıldığı için her zaman müsait olmayabilir. Bu durumda araçların istasyonlara ortalama varışlar arası zamanları, araçların istasyonda ortalama şarj süresi gibi istasyonun müsaitliğini etkileyen parametreler olasılık dağılımları ile tanımlanır (Keskin ve ark., 2021). Bununla birlikte hava şartları, trafik, kaza ve yol çalışması yoğunluğu gibi sebeplerden aracın iki müşteri arasındaki seyahat süresi stokastik olabilir. Diğer taraftan müşteri talep miktarları ya da enerji tüketim miktarının da stokastik olduğu çalışmalar bulunmaktadır. Yakın dönemde

çalışılan stokastik E-ARP'lere örnek olarak Rabbani ve ark. (2018), Pelletier ve ark. (2019), Keskin ve ark. (2021) ile Kumar ve ark. (2022) tarafından yapılan çalışmalar verilebilir.

Bir firmaya ait araçlar, planlanan rotada farklı firmaların şarj istasyonlarını da kullanabilir. Bu durumda istasyonların şarj için ortak kullanımına ilişkin işbirliğini dikkate alan çalışmalar da bulunmaktadır. (Arslan ve ark., 2019; Koç ve ark., 2019).

Problem, belirli yerlerdeki şarj istasyonlarını kullanarak araç rotalarının planlanması yerine önce şarj istayonlarının maliyet-etkin yerleştirilmesi, sonra araçların rotalanması şeklinde daha bütüncül bir yaklaşımla ele alınabilir (Yang ve Sun, 2015; Schiffer ve Wallter, 2017, 2018; Paz ve ark., 2018; Koç ve ark., 2019; Arslan, 2021; Chen ve ark., 2021; Guo ve ark., 2022).

Çizelge 2.1'de bu çalışmayı da içeren literatürdeki tüm çalışmalarda ele alınan E-ARP'lerin özellikleri verilmektedir. Çizelge 2.1 incelendiğinde çoğu çalışmada dikkate alınan E-ARP'de zaman penceresi, kısmi şarj ve doğrusal şarj özelliği varken, sadece birkaç çalışmada tanımlanan E-ARP'de doğrusal olmayan şarj, enerji tüketim modeli ve topla-dağıt faaliyetleri vardır. Benzer şekilde şarj teknolojisi seçimi özelliği sadece 5 çalışmada ele alınmıştır.

Bununla birlikte, bu çalışmayı da içeren 10 çalışmada KF-E-ARP'nin ele alındığı ve literatürde ilk defa bu çalışmada ele alınan KF-E-ARP'de şarj teknolojisi seçimi özelliğinin olduğu görülmektedir. Bu aşamada KF-E-ARP'yi ele alan bu çalışmanın hem problem özellikleri hem de çözüm yaklaşımı açısından farklılığını ortaya koymak için diğer 9 çalışma bir sonraki bölümde detaylı incelenmiş ve elde edilen bulgular özetlenmiştir.

2.3.2. KF-E-ARP için literatür araştırması

Literatürde KF-E-ARP ile ilgili ilk çalışma Gonçalves ve ark. (2011) tarafından yapılmıştır. Gonçalves ve ark. (2011), topla-dağıt faaliyetlerini gerçekleştiren KF-E-ARP üzerinde çalışmışlardır. Bu problemde araçlar rota üzerinde herhangi bir anda şarj olabilmekte ve her aracın sabit bir erişim mesafesi ile sabit şarj dolum süresi bulunmaktadır.

Çizelge 2.1. Literatürde ele alınan E-ARP özellikleri

Referans	Zaman Pencereleri	Kısmi Şarj	Şarj Teknolojisi Seçimi	Doğrusal Şarj	Doğrusal Olmayan Şarj	Enerji Tüketim Modeli	Topla-Dağıt	Karma Filo	Yerleşim Rotalama
Conrad ve Figliozzi (2011)	●			●					
Gonçalves ve ark. (2011)							●	●	
Felipe ve ark. (2014)		●	●	●					
Sassi ve ark. (2014)	●	●		●				●	
Goeke ve Schneider (2015)	●			●		●		●	
Yang ve Sun (2015)									●
Lin ve ark. (2016)				●		●	●		
Keskin ve Çatay (2016)	●	●		●					
Schiffer ve Wallter (2017)	●	●		●					●
Montoya ve ark. (2017)					●				
Pelletier ve ark. (2018)			●		●				
Keskin ve Çatay (2018)	●	●	●	●					
Schiffer ve Wallter (2018)	●	●		●					●
Paz ve ark. (2018)	●	●		●					●
Koç ve ark. (2019)		●	●		●				●
Hiermann ve ark. (2019)	●	●		●				●	
Macrina ve ark. (2019a)	●	●		●				●	
Macrina ve ark. (2019b)	●	●		●		●		●	
Al-dal'ain ve Çelebi (2021)	●							●	
Chen ve ark. (2021)	●							●	●
Keskin ve ark. (2021)	●	●		●					
Vincent ve ark. (2021)	●	●		●		●		●	
Guo ve ark. (2022)		●			●				●
Bu Çalışma	●	●	●	●		●		●	

Problem, Portekiz'de pil dağıtıcısına ait bir gerçek hayat problemine dayalı olarak tanımlanmış ve aynı problemin çözümü için sadece konvansiyonel araçlardan oluşan saf bir filo, konvansiyonel ve elektrikli araçlardan oluşan karma bir filo ve sadece elektrikli araçlardan oluşan saf bir filo olmak üzere 3 farklı senaryo dikkate alınmıştır.

Sassi ve ark. (2014), elektrikli araçların pil şarj kapasiteleri ve işletme maliyetleri açısından farklılık gösterdiği KF-E-ARP'yi ele almışlardır. Çalışmada, şarj istasyonları da hizmet için zaman pencerelerine sahiptir. Ayrıca, şarj için şarj istasyonları ile elektrikli araçların teknolojik olarak uyumlu olması gerekmektedir. Şarj istasyonlarındaki birim şarj maliyeti, şarj istasyonundaki teknolojiye ve elektrikli aracın gün içerisinde şarj edilme zamanına göre değişiklik göstermektedir. Bu problem tipinde ayrıca kısmi şarj politikasına da izin verilmektedir.

Goeke ve Schneider (2015), kısmi şarj yerine şarj istasyonlarında tam kapasite pil dolumunun yapıldığı zaman pencereli KF-E-ARP üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Şarj süresi, aracın istasyona ulaştığındaki şarj seviyesine göre değişiklik göstermekte olup şarj tüketim fonksiyonu sürat, ağırlık ve yol eğimine dayalıdır. Çalışmada, problemin çözümü için uyarlamalı geniş komşu arama (UGKA) algoritması önerilmiştir.

Macrina ve ark. (2019a), literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak şarj istasyonlarında birden fazla konfigürasyona sahip şarj aygıtları, bu aygıtlarda kısmi şarj edilme imkanı ve konvansiyonel araçlarda yüke bağlı emisyon salınım miktarının kısıtlanmasının söz konusu olduğu KF-E-ARP'yi ele almışlardır. Araştırmacılar, problem için yinelemeli yerel arama algoritması önermişlerdir.

Macrina ve ark. (2019b) bir diğer çalışmalarında karma filolu yeşil ARP için daha gerçekçi bir enerji tüketim fonksiyonunu kullanmışlardır. Bu enerji tüketim fonksiyonu hız, ivmelenme, yavaşlama, araç yükü ve yol eğimine dayalıdır. Ancak, bir önceki çalışmadan farklı olarak bu çalışmada emisyon salınımı için bir kısıtlama yoktur. Her iki çalışmada da (Macrina ve ark., 2019a; Macrina ve ark., 2019b) çözüm yaklaşımında ve deneysel analizlerde tek tip şarj konfigürasyonu dikkate alınmıştır.

Hiermann ve ark. (2019) tarafından konvansiyonel, hibrit elektrikli ve elektrikli araçlardan oluşan karma filolu problem çalışılmıştır. Bu çalışmada elektrikli araçlar şarja ihtiyaç duyarken, hibrit elektrikli araçlar ise şarj istasyonuna uğramamak için motor konfigürasyonunu fosil yakıtlıya çevirebilmektedir. Konvansiyonel araçların hızlı yakıt bütünlemeleri problem çerçevesinde ihmal edilmiştir. Problemin çözümü için genetik algoritma, yerel arama, geniş komşu arama ve tamsayılı programlamayı birleştiren metasezgisel bir algoritma önerilmiştir.

Chen ve ark. (2021), rotalama ve pil değişim istasyonunun yerseçimi kararının birlikte ele alındığı zaman pencereli KF-E-ARP üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Problemin çözümü için tamsayılı programlama modeli ile kesin ve sezgisel politikalara dayalı bir dal-fiyat algoritması geliştirmişlerdir.

Al-dal'ain ve Çelebi (2021), rotalama ve filo karışımı kararlarını birlikte ele alan KF-E-ARP üzerinde çalışmışlardır. Öncelikle farklı filo karışımları için rotalar

eniyilenmiştir. Daha sonra farklı filo karışımlarından oluşan sonuçlar önerilen yerdeğiştirme modeline girdi oluşturmuştur. Konvansiyonel araçların yakıt dolumu ve elektrikli araçların şarjı tur öncesi depoda tam kapasiteye kadar sağlanmıştır. Bu nedenle, şarj etme işlemi ve yakıt dolumu problem içerisinde ele alınmamıştır.

Vincent ve ark. (2021), daha gerçekçi bir enerji tüketim fonksiyonuna sahip KF-E-ARP üzerinde bir çalışma yapmıştır. Toplam emisyon maliyeti amaç fonksiyonu içerisine dahil edilmiştir. Problemin çözümü için UGKA algoritması önerilmiştir.

Son olarak bu çalışma kapsamında da, filolardaki konvansiyel araçlardan elektrikli araçlara geçişin kademeli olacağı göz önüne alınarak KF-E-ARP ele alınmıştır. Bu problemde zaman pencereli müşteriler, azami tur tamamlanma zamanı, kısmı şarj politikası, farklı şarj teknolojileri ve şarj istasyonunda bu teknolojilerden birinin seçimi, katedilen mesafe ile birlikte araç yüküne dayalı tanımlanan toplam emisyon ve enerji tüketim fonksiyonları ve emisyon salınımda üst sınır birlikte ele alınmıştır. Problem için öncelikle bir karma tamsayılı matemetiksel model ve problemin NP-zor yapısından dolayı büyük boyutlu KF-E-ARP'lere uygun çözümleri çok hızlı bulabilmek amacıyla da UGKA tabanlı bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir.

Çizelge 2.2'de bu çalışma, hem ele alınan problemin özellikleri hem de çözüm yaklaşımları açısından literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmaktadır. Karşılaştırmada, sadece rotalalama kararını içeren KF-E-ARP üzerinde çalışan 6 çalışma dikkate alınmıştır. Çizelge 2.2 incelendiğinde tez kapsamındaki çalışmamızın diğer çalışmalardan ana farkları; matematiksel modelde aynı şarj istasyonlarına birden fazla uğranılmasını modellemek için kopya düğümlerin kullanılmaması ve şarj istasyonunda enerji transferi için kullanılacak şarj teknolojisinin seçilmesidir. Çizelge 2.2 incelendiğinde çoğu çalışmada zaman penceresi, kısmi şarj politikası, doğrusal şarj ve enerji tüketim modeli özelliklerine sahip KF-E-ARP'nin ele alındığı ve çözüm yaklaşımı olarak sezgisel algoritmaların kullanıldığı görülmektedir.

Çizelge 2.2. Karma filolu problemlerin karşılaştırması

Referans	Çözüm Yaklaşımı	Matematiksel Model		Zaman Pencereleri	Kısmi Şarj	Şarj Teknolojisi Seçimi	Doğrusal Şarj	Enerji Tüketim Modeli	Emisyon Modeli
		Kopya Düğümlü	Kopya Düğümsüz						
Gonçalves ve ark. (2011)		•							
Sassi ve ark. (2014)	Sezgisel	•		•	•		•		
Goeke ve Schneider (2015)	Sezgisel	•		•			•	•	
Macrina ve ark. (2019a)	Sezgisel	•		•	•		•		•
Macrina ve ark. (2019b)	Sezgisel	•		•	•		•	•	
Vincent ve ark. (2021)	Sezgisel	•		•	•		•	•	•
Bu Çalışma	Sezgisel		•	•	•	•	•	•	•

2.3.3. Değerlendirme

Bu bölümde ARP ve E-ARP'nin temel özellikleri verildikten sonra E-ARP ve KF-E-ARP'ye ilişkin literatür araştırması yapılmıştır. Problemin zorluk seviyesini büyük ölçüde artıran zaman pencereleri, kısmi şarj politikası, şarj teknolojisi seçimi, doğrusal olmayan şarj teknolojisi, enerji tüketim modeli ve emisyon modeli özelliklerinin tamamının tek bir problem içerisinde ele alınmadığı görülmektedir.

Bu tez kapsamında bu özelliklerin büyük bir çoğunluğunu içeren bir KF-E-ARP ele alınmış ve problemin çözümü için matematiksel model ve sezgisel algoritma geliştirilmiştir. İlerleyen bölümlerde bu yaklaşımlar detaylı verilecektir.

3. PROBLEMİN TANIMI VE MATEMATİKSEL MODEL

Tezin bu bölümünde tüm parametreler, fonksiyonlar, notasyon, özellikler ve varsayımlara dayalı olarak KF-E-ARP tanımı yapılmakta, KF-E-ARP için önerilen matematiksel model verilmektedir.

3.1. Problemin Tanımı ve Notasyon

KF-E-ARP, $G = (V_0 \cup R, A)$ tam bağlı ve yönlü bir şebeke üzerinde tanımlanır. $V_0 = V \cup 0$ düğümler kümesidir. $V = \{1, .., N\}$ müşteri düğümlerini, 0 ise depoyu temsil etmektedir. Depo, tüm rotalar için hem başlangıç hem de bitiş düğümüdür. R kümesi, elektrikli araçların şarj taleplerini karşılayacak şarj istasyonlarını temsil etmektedir. $A = \{(i,j) | i,j \in V_0 \cup R, i \neq j\}$, ayrıtlar kümesidir. Herbir ayrıt, mesafeler d_{ij} ile doğru orantılı olarak negatif olmayan bir maliyete sahiptir. Ayrıca, herbir ayrıtın elektrikli ve konvansiyonel araçlar için sırasıyla c_{ij}^C ve c_{ij}^E olmak üzere birim ulaşım maliyetleri bulunmaktadır. C ve E üst simgeleri, parametrelerin sırasıyla konvansiyonel ve elektrikli araçlar ile ilişkisini ifade etmektedir. s ayrıtlarda varsayılan ortalama hız olmak üzere, ayrıtlardaki ulaşım zamanı $t_{ij} = d_{ij}/s$ olarak hesaplanmaktadır. i müşterisinden j müşterisine k şarj istasyonunu kullanarak ulaşım mesafesi $d_{ijk} = d_{ik} + d_{kj}$, ulaşım zamanı da $t_{ijk} = t_{ik} + t_{kj}$ olarak hesaplanmaktadır.

Herbir müşteri $i \in V$, q_i dağıtım talebine, S_i servis zamanına ve $[e_i, l_i]$ zaman penceresine sahiptir. Zaman penceresindeki e_i ve l_i, sırasıyla en erken ve en geç servise başlama zamanlarıdır. Diğer bir ifadeyle, araçlar i müşterisine l_i zamanından önce ulaşmak zorunda olup e_i zamanından önce ulaşmaları durumunda ise bu zamana kadar servis için beklemek zorundadırlar. Herbir müşteriye $i \in V$, sadece bir konvansiyonel ya da elektrikli araç ile hizmet verilmektedir.

Karma filo, sınırlı sayıda ve kendi içlerinde homojen olan konvansiyonel (KA) ve elektrikli (EA) araçlardan oluşmaktadır. n^Cve n^E sırasıyla konvansiyonel ve elektrikli araç sayısını, C^C ve C^E sırasıyla konvansiyel ve elektrikli araçların yük kapasitesini, Q^E ise elektrikli araçlar için pil kapasitesini temsil etmektedir. Planlama ufku içerisinde herbir

araç sadece tek bir rotada hizmet vermektedir. Ayrıca, herbir araç azami tur tamamlanma zamanı T_{max} içerisinde turunu tamamlamak zorundadır.

Elektrikli araçlar pil kapasitesine (Q^E) bağlı olarak sınırlı bir ulaşım mesafesine sahiptir. Bu nedenle şarj istasyonlarında şarj olmak zorundadırlar. Şarj istasyonları, rota ihtiyaçlarına bağlı olarak aynı ya da farklı araçlar tarafından birden fazla ziyaret edilebilmektedir. Şarj istasyonlarında $m \in M$ farklı şarj dolum konfigürasyonu olup, g^m ve c^m sırasıyla birim şarj etme hızı ve birim şarj etme maliyetini göstermektedir. Şarj etme hızı arttıkça şarj maliyeti de artmaktadır. Dolayısıyla, şarj maliyetlerinin enazlanması ile zamana bağlı kısıtların sağlanması arasında bir ödünleşim söz konusudur.

Elektrikli araçlar, depoda en yavaş şarj konfigürasyonu ile tam kapasite şarj politikası ile şarj edilirken rota üzerinde müsait herhangi bir şarj istasyonunda ihtiyaç duydukları ölçüde kısmi şarj politikası ile şarj edilmektedir. Şarj istasyonlarının, şarj işlemi için her zaman müsait olduğu kabul edilmektedir. Pil şarj seviyesi, şarj dolum zamanına bağlı doğrusal bir fonksiyon ile tanımlanır. Şarj tüketim fonksiyonu ise katedilen mesafe ve araç yüküne bağlı parçalı doğrusal bir fonksiyondur. Bu fonksiyon, yük kırılım noktalarından (o_l) oluşan α kümesi ve yüke bağımlı şarj tüketim hızı $h(u_{ij}^E)$ ile temsil edilmektedir. α kümesinin eleman sayısı (Ω)'dır. Müşteri taleplerinin karşılandığı servis esnasında pil şarj tüketimi yoktur.

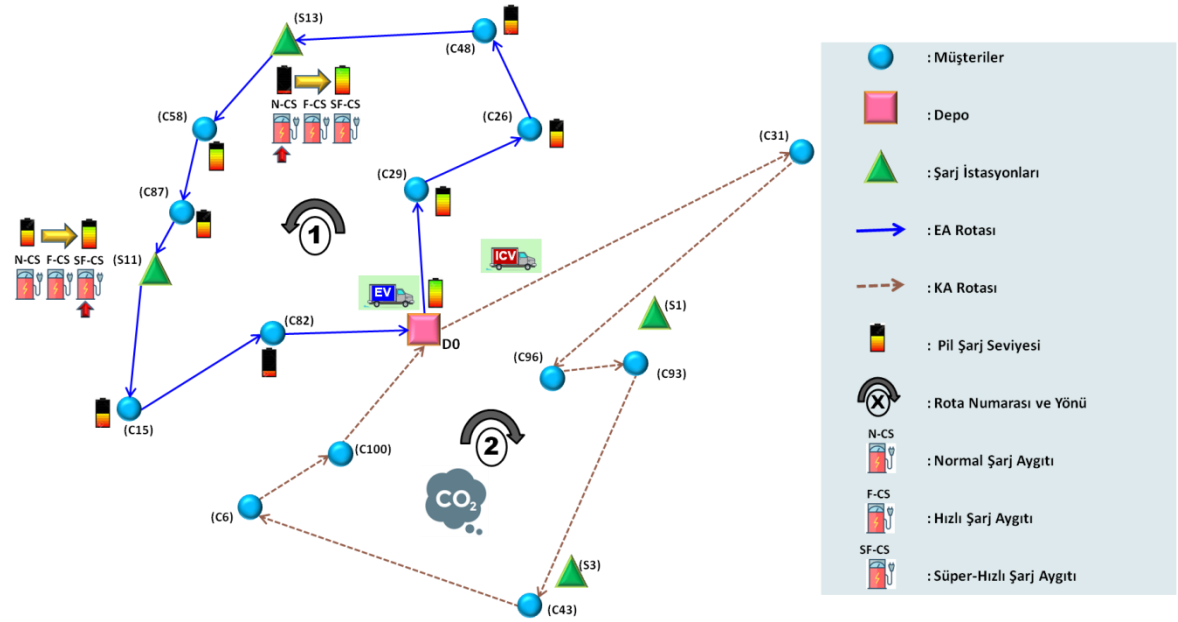
Servis için kullanılan konvansiyonel araçlardan salınan toplam CO_2 emisyon miktarı, üst limit (*UB*) ile sınırlandırılmaktadır. Yeşil lojistik konseptine uyumlu olarak önerilen bu üst limit değeri konvansiyonel araçların kullanım oranı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Toplam salınan emisyon miktarı, katedilen mesafe ve araç yüküne bağlı olarak değişmektedir. Birim mesafe için yüke bağlı ortalama emisyon salınım miktarı $\varepsilon(u_{ij}^C)$, parçalı doğrusal bir fonksiyon ile tanımlanır. Bu fonksiyon, yük kırılım noktalarından (o_l') oluşan β kümesi ve yüke bağımlı birim emisyon salınım değeri $\varepsilon(u_{ij}^C)$ ile temsil edilmektedir. β kümesinin eleman sayısı (Ω')'dır.

Probleme ait varsayımlar aşağıda verilmiştir.

- Her müşteri sadece bir tip araç (konvansiyel ya da elektrikli) ile bir kez ziyaret edilmelidir.

- Araçların kapasitesi özdeştir.
- Her rota depoda başlayıp depoda bitmelidir.
- Her araç depodan en fazla kapasitesi kadar yük ile ayrılır.
- Araçların hızı trafik yoğunluğu, kaza durumu, hava şartları, yol çalışması gibi faktörlerden etkilenmez ve sabittir.
- Her müşteriye zaman penceresi $[e_i, l_i]$ içerisinde servise başlanır.
- Elektrikli araçlar için;
  - Pilleri özdeştir. Kullanım sayısına bağlı olarak oluşabilecek değişiklikler ihmal edilmiştir.
  - Şarj işlemi esnasında pil şarj seviyesi değişimi zamana bağlı doğrusal bir fonksiyondur.
  - Şarj tüketimi katedilen mesafe ile birlikte araçta taşınan yük miktarına bağlıdır.
  - Şarj istasyonları şarj hizmeti için her zaman müsaittir.

KF-E-ARP'ye ilişkin görsel bir örnek Şekil 3.1'de verilmiştir. Örnekte 1 adet depo, 13 adet müşteri ve 4 adet şarj istasyonu bulunmaktadır. Filo, müşteri taleplerini tanımlı zaman pencereleri içerisinde karşılamak üzere 1 adet konvansiyonel araç (KA) ve 1 adet elektrikli araç (EA)'dan oluşmaktadır. Bu sebeple 7 müşterinin talebini karşılamak üzere EA 1 nolu rotaya, KA ise 6 müşterinin talebini karşılamak üzere 2 nolu rotaya atanmıştır. EA'nın herbir müşteriye varıştaki kalan şarj seviyesi şekilde gösterilmiştir. EA, rota başlangıcında depoyu tam şarj ile terk etmektedir. Ancak rota üzerinde C48 nolu 3'üncü müşteriden sonra S13 nolu şarj istasyonuna uğrayarak normal şarj aygıtı ile tam kapasite şarj olmaktadır. Daha sonra C87 nolu 5'inci müşteriden sonra tekrar şarj olmak üzere S11 nolu şarj istasyonuna uğramaktadır. Bu defa, bir sonraki müşteriye zaman penceresi sınırları dâhilinde ulaşabilmek için süper şarj aygıtı ile şarj olmaktadır. KA ise 2 nolu rota üzerindeki müşterilere hizmetini CO_2 emisyon miktarı üst limitini geçmeyecek şekilde yapmıştır.



Şekil 3.1. KF-E-ARP'ye ilişkin görsel örnek

Probleme ait karar değişkenleri aşağıda verilmiştir.

<u>İkili karar değişkenleri</u>

$$x_{ij}^{E} = \begin{cases} 1, \text{elektrikli araç } (i,j) \in A \text{ ayrıtı üzerinde seyahat ederse,} \\ 0, \text{diğer durumda, } i,j \in V_0,\ i \neq j \end{cases}$$

$$x_{ij}^{C} = \begin{cases} 1, \text{konvansiyonel araç } (i,j) \in A \text{ ayrıtı üzerinde seyahat ederse,} \\ 0, \text{diğer durumda, } i,j \in V_0,\ i \neq j \end{cases}$$

$$z_{ijk} = \begin{cases} 1, \text{elektrikli araç } i \text{ müşterisinden } j \text{ müşterisine } k \text{ istasyonu üzerinden seyahat ederse,} \\ 0, \text{diğer durumda, } \forall i,j \in V_0,\ \forall k \in R,\ i \neq j \end{cases}$$

$$a_{ijk}^{m} = \begin{cases} 1, \text{elektrikli araç } i \text{ ve } j \text{ müşterileri arasında } k \text{ şarj istasyonunda } m \text{ şarj konfigürasyonu ile şarj olursa,} \\ 0, \text{diğer durumda, } \forall i,j \in V_0,\ \forall k \in R,\ \forall m \in M,\ i \neq j \end{cases}$$

Sürekli karar değişkenleri

T_i : i müşterisinde servise başlama zamanı, $i \in V$

u_{ij}^E : i müşterisinden j müşterisine elektrikli araç ile taşınan yük miktarı, $\forall i,j \in V_0,\ i \neq j$

u_{ij}^C : i müşterisinden j müşterisine konvansiyonel araç ile taşınan yük miktarı, $\forall i,j \in V_0, i \neq j$

y_i : i müşterisine varıldığında pil şarj seviyesi, $\forall i \in V_0 \cup R$

y_i^{bd} : Rota üzerinde bitiş deposundan bir önceki i müşterisine varıldığında pil şarj seviyesi, $\forall i \in V \cup R$ (Aşağıda belirtilen y^{SR} karar değişkeninin değerini belirlemek için tanımlanmıştır.)

y^{SR} : Bitiş deposuna varıldığında elektrikli araçların kalan şarj miktarlarının toplamı

θ_{ijk}^m : i ve j müşterileri arasında k şarj istasyonunda m şarj konfigürasyonu ile transfer edilen enerji miktarı, $\forall i,j \in V_0,\ \forall k \in R,\ \forall m \in M,\ i \neq j$

Yardımcı değişkenler

$$p_{ijl} = \begin{cases} 1, (i,j) \in A \text{ ayrıtı üzerinde elektrikli araçta taşınan yük } [o_l, o_{l+1}) \text{ aralığında ise,} \\ 0, \text{diğer durumda, } \forall i,j \in V_0,\ l \in \alpha \backslash \{o_\Omega\},\ i \neq j \end{cases}$$

f_{ijl} : $(i,j) \in A$ ayrıtı üzerinde $[o_l, o_{l+1})$ aralığındaki yüke bağlı olarak birim şarj tüketim miktarını belirleyen ve negatif olmayan sürekli değişken, $\forall i,j \in V_0,\ l \in \alpha,\ i \neq j$

$$p_{ijl}^k = \begin{cases} 1, i \text{ müşterisinden } j \text{ müşterisine } k \text{ şarj istasyonu üzerinden seyahat edilirken elektrikli araçta taşınan yük } [o_l, o_{l+1}) \text{ aralığında ise,} \\ 0, \text{diğer durumda, } \forall i,j \in V_0, \forall k \in R,\ l \in \alpha \backslash \{o_\Omega\},\ i \neq j \end{cases}$$

f_{ijl}^k : i müşterisinden j müşterisine k şarj istasyonu üzerinden seyahat edilirken $[o_l, o_{l+1})$ aralığındaki yüke bağlı olarak birim şarj tüketim miktarını belirleyen ve negatif olmayan sürekli değişken, $\forall i,j \in V_0 \cup R,\ \forall k \in R,\ l \in \alpha,\ i \neq j$

$$p_{ijl}^{'} = \begin{cases} 1, (i,j) \in A \text{ ayrıtı üzerinde konvansiyonel araçta taşınan yük } [o_l^{'}, o_{l+1}^{'}) \text{ aralığında ise,} \\ 0, \text{diğer durumda, } \forall i,j \in V_0,\ l \in \beta \backslash \{o_\Omega^{'}\},\ i \neq j \end{cases}$$

$f_{ijl}^{'}$: $(i,j) \in A$ ayrıtı üzerinde $[o_l^{'}, o_{l+1}^{'})$ aralığındaki yüke bağlı olarak birim emisyon değerini belirleyen ve negatif olmayan sürekli değişken, $\forall i,j \in V_0,\ l \in \beta,\ i \neq j$

3.2. KF-E-ARP için Matematiksel Model Yaklaşımları

Literatürde E-ARP'lerin modellenmesi için aynı şarj istasyonuna birden fazla uğramayı temsilen istasyonların kopyalandığı yaklaşımın sıklıkla kullanıldığı görülmektedir.

Kopyaların kullanıldığı modelleme yönteminde araç başına depodan çıkış ve depoya dönüşler için depolar kopyalanmakta ve benzer yaklaşımla aynı şarj istasyonuna aynı ya da farklı araç tarafından her ilave uğrama için ise şarj istasyonu kopyalanmaktadır. Bu şekilde birden fazla uğranan düğümlere herbir ziyaret tekil olarak model bünyesinde takip edilebilmektedir. Ancak bu yaklaşım şebekenin boyutunu ve paralelinde arama ağacını genişletmektedir. Problemde yalnızca bir depo olmasına rağmen n^E ve n^C sırasıyla filodaki elektrikli ve konvansiyonel araç sayıları olmak üzere modeldeki depo sayısı $[2 * (n^E + n^C) - 1]$ kadar artmaktadır. Benzer şekilde şarj istasyon sayısı da şarj istasyonlarına aynı çözümde birden fazla uğranılmasına izin veren σ değerine bağlı olarak artmaktadır. Yani, $s(R)$; problemdeki şarj istasyon sayısı ve σ; bir şarj istasyonuna birden fazla uğramayı belirleyen girdi parametresi olmak üzere kopyaları ile birlikte şarj istasyon sayısı, $s(R') = s(R) * (\sigma + 1)$ değerine eşit olmaktadır. Bu yöntemde problem çözümü, σ girdi parametresine de bağımlı hale gelmektedir. Eniyi çözümde enaz bir şarj istasyonuna birden fazla ziyaret sayısı, σ'den büyükse, bu yaklaşım ile eniyi çözüme ulaşmak küçük ve orta boyutlu problemlerde bile mümkün olmayacaktır.

Ele alınan KF-E-ARP için kopyaların kullanıldığı matematiksel model (K-MM) Ek-1'de verilmiştir.

Tez kapsamında KF-E-ARP için ayrıt-tabanlı matematiksel model (A-MM) geliştirilmiştir. Koç ve Karaoğlan'ın (2016) çalışmasına dayalı olarak geliştirilen bu ayrıt tabanlı matematiksel modelde üç indisli karar değişkenleri kullanılmıştır. Amaç, literatürdeki matematiksel modelin aksine aynı şarj istasyonuna birden fazla uğramayı sağlamak için şarj istasyonu kopyalarını kullanmamaktır. Dolayısıyla şebeke boyutu değişmemekte ve şarj istasyonlarına her ziyaret, i düğümünden j düğümüne k şarj istasyonu üzerinden

gidildiğinde "1" değeri alan (z_{ijk}) ikili karar değişkeni ile takip edilebilmektedir. Böylece, matematiksel modelin boyutu gereğinden fazla büyümeyeceği için küçük ve orta boyutlu problemlere eniyi çözümlerin elde edilmesi mümkün olacaktır.

3.3. Geliştirilen Matematiksel Model (A-MM)

KF-E-ARP için geliştirilen matematiksel model aşağıda verilmiştir:

$$Min \sum_{i\in V_0}\sum_{\substack{j\in V_0\\ i\neq j}}\sum_{k\in R}\sum_{m\in M} c^m\,\theta_{ijk}^m + c^1\left(Q^E(\sum_{j\in V} x_{0j}^E + \sum_{j\in V}\sum_{k\in R} z_{0jk}) - y^{SR}\right)$$
$$+\left(\sum_{i\in V_0}\sum_{\substack{j\in V_0\\ i\neq j}} c_{ij}^E\, d_{ij} x_{ij}^E + \sum_{i\in V_0}\sum_{\substack{j\in V_0\\ i\neq j}}\sum_{k\in R}(c_{ik}^E d_{ik} + c_{kj}^E d_{kj}) z_{ijk}^E\right) + \sum_{i\in V_0}\sum_{\substack{j\in V_0\\ i\neq j}} c_{ij}^C\, d_{ij}\, x_{ij}^C \qquad (3.1)$$

Beş bileşenden oluşan amaç fonksiyonu Eş. 3.1, toplam maliyeti enazlamayı hedeflemektedir. İlk bileşen tüm şarj istasyonlarında tüm şarj konfigürasyonları ile şarj edilen toplam enerjinin maliyetini, ikinci bileşen elektrikli araçların yavaş şarj konfigürasyonu ile tur öncesi depodaki tam kapasite şarj edilme maliyetlerini vermektedir. İkinci bileşende hesaplanan elektrikli araçların tur öncesi depodaki toplam şarj edilme maliyeti, depodan bir müşteriye doğrudan seyahat veya şarj istasyonu uğraklı seyahat olmak üzere iki durumdan birisi ile ortaya çıkmaktadır. Üçüncü bileşen elektrikli araçların tur sonunda kalan şarj miktarlarının toplam maliyeti ($c^1 y^{SR}$) olmak üzere kazanım olarak depodaki şarj maliyetlerinden düşülmektedir. Dördüncü ve beşinci bileşenler ise sırasıyla elektrikli ve konvansiyonel araçların rotalama maliyetlerini vermektedir. İkinci bileşende olduğu gibi dördüncü bileşende de hesaplanan elektrikli araçların toplam rotalama maliyeti, iki müşteri arasında doğrudan seyahat veya şarj istasyonu uğraklı seyahat olmak üzere iki durumdan birisi ile ortaya çıkmaktadır. Elektrikli araçlara ilişkin tüm kısıtlarda bu iki durum dikkate alınmıştır.

$$\sum_{\substack{j\in V_0\\ i\neq j}}(x_{ij}^E + \sum_{k\in R} z_{ijk}) + \sum_{\substack{j\in V_0\\ i\neq j}} x_{ij}^C = 1 \qquad \forall i \in V \qquad (3.2)$$

Eş. 3.2'deki kısıtlar, herbir müşterinin elektrikli ya da konvansiyonel araç ile yalnızca bir defa ziyaret edilmesini garanti etmektedir.

$$\sum_{\substack{i\in V_0\\ i\neq j}} x_{ij}^{E} + \sum_{\substack{i\in V_0\\ i\neq j}} \sum_{k\in R} z_{ijk} = \sum_{\substack{i\in V_0\\ i\neq j}} x_{ji}^{E} + \sum_{\substack{i\in V_0\\ i\neq j}} \sum_{k\in R} z_{jik} \qquad \forall j \in V \tag{3.3}$$

$$\sum_{\substack{i\in V_0\\ i\neq j}} x_{ij}^{C} = \sum_{\substack{i\in V_0\\ i\neq j}} x_{ji}^{C} \qquad \forall j \in V \tag{3.4}$$

Eş. 3.3 - Eş. 3.4'deki kısıtlar, sırasıyla elektrikli ve konvansiyonel araçların akış korunumunu sağlamaktadırlar. Eş. 3.2 - Eş. 3.4'deki kısıtlar birlikte ele alındığında; bir müşteriye servis için uğrayan elektrikli ya da konvansiyonel aracın, aynı müşteriyi terk etmesi sağlanmaktadır.

$$\sum_{j\in V} x_{0j}^{E} + \sum_{j\in V} \sum_{k\in R} z_{0jk} \leq n^{e} \tag{3.5}$$

Eş. 3.5'deki kısıt ile depodan servis için çıkan tüm elektrikli araçların, en fazla filodaki elektrikli araç sayısı kadar olması sağlanmaktadır.

$$\sum_{i\in V} x_{i0}^{E} + \sum_{i\in V} \sum_{k\in R} z_{i0k} \leq n^{e} \tag{3.6}$$

Eş. 3.6'daki kısıt ise servis sonrası depoya dönen elektrikli araçların, yine en fazla filodaki elektrikli araç sayısı kadar olmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{j\in V} x_{0j}^{C} \leq n^{C} \tag{3.7}$$

$$\sum_{i\in V} x_{i0}^{C} \leq n^{C} \tag{3.8}$$

Eş. 3.7 – Eş. 3.8'deki kısıtlar, Eş. 3.5 – Eş. 3.6'daki kısıtlarda belirtilen şartları konvansiyonel araçlar için sağlamaktadır. Eş. 3.5 – Eş. 3.8'deki kısıtlar birlikte ele alındığında, servis için kullanılan elektrikli ve konvansiyonel araç sayılarının ilgili filodaki araç sayısını aşması önlenmektedir.

$$\sum_{j\in V} x_{0j}^{E} + \sum_{j\in V} \sum_{k\in R} z_{0jk} = \sum_{i\in V} x_{i0}^{E} + \sum_{i\in V} \sum_{k\in R} z_{i0k} \tag{3.9}$$

$$\sum_{j\in V} x_{0j}^{C} = \sum_{i\in V} x_{i0}^{C} \tag{3.10}$$

Eş. 3.9 – Eş. 3.10'daki kısıtlar, sırasıyla depoyu terk eden herbir elektrikli ve konvansiyonel aracın tur sonunda tekrar depoya dönmesini garanti etmektedir.

$$T_i + \left(t_{ij} + S_i\right)x_{ij}^E + \sum_{k\in R}\left(\left(t_{ijk} + S_i\right)z_{ijk} + \sum_{m\in M} g^m\,\theta_{ijk}^m\right)$$
$$-M\left(1 - x_{ij}^E - \sum_{k\in R} z_{ijk}\right) \le T_j \;\forall i \in V_0, \forall j \in V, i \ne j \qquad (3.11)$$

$$T_i + \left(t_{ij} + S_i\right)x_{ij}^C - M\left(1 - x_{ij}^C\right) \le T_j \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V, i \ne j \qquad (3.12)$$

Eş. 3.11 – Eş. 3.12'deki kısıtlar, sırasıyla elektrikli ve konvansiyonel araçların servise başlama zamanlarının takibini sağlamaktadır. Eş. 3.11'deki kısıtlar; elektrikli araçlar için i müşterisinden j müşterisine doğrudan ya da şarj istasyonu uğraklı olarak seyahat edilmediyse pasif hale gelmektedir. Eş. 3.12'deki kısıtlar ise konvansiyonel araçlar için i müşterisinden j müşterisine doğrudan seyahat edilmediyse pasif hale gelmektedir.

$$T_i + (t_{i0} + S_i)x_{i0}^E + \sum_{k\in R}\left((t_{i0k} + S_i)z_{i0k} + \sum_{m\in M} g^m\,\theta_{i0k}^m\right) \le T_{max} \quad \forall i \in V \qquad (3.13)$$

$$T_i + (t_{i0} + S_i)x_{i0}^C \le T_{max} \quad \forall i \in V \qquad (3.14)$$

Eş. 3.13 – Eş. 3.14'deki kısıtlar sırasıyla tüm elektrikli ve konvansiyonel araç rotalarının tur sonunda depoya varış zamanlarını hesaplayarak, azami tur tamamlanma zamanından önce turların tamamlanmasını sağlamaktadır.

$$e_j \le T_j \le l_j \quad \forall j \in V_0 \qquad (3.15)$$

Eş. 3.15'deki kısıtlar, müşterilerde servise başlama zamanlarının zaman penceresi limitleri içerisinde kalmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{\substack{i\in V_0\\ i\ne j}} u_{ij}^E - \sum_{\substack{i\in V_0\\ i\ne j}} u_{ji}^E = q_j\left(\sum_{\substack{i\in V_0\\ i\ne j}} x_{ij}^E + \sum_{\substack{i\in V_0\\ i\ne j}}\sum_{k\in R} z_{ijk}\right) \quad \forall j \in V \qquad (3.16)$$

$$\sum_{\substack{i\in V_0\\ i\ne j}} u_{ij}^C - \sum_{\substack{i\in V_0\\ i\ne j}} u_{ji}^C = q_j \sum_{\substack{i\in V_0\\ i\ne j}} x_{ij}^C \quad \forall j \in V \qquad (3.17)$$

$$0 \le u_{ij}^{E} \le C^{E}(x_{ij}^{E} + \sum_{k \in R} z_{ijk}) \quad \forall i \in V_{0,}\, \forall j \in V_{0}\,, i \ne j \tag{3.18}$$

$$0 \le u_{ij}^{C} \le C^{C} x_{ij}^{C} \quad \forall i \in V_{0}\,, \forall j \in V_{0}, i \ne j \tag{3.19}$$

Eş. 3.16 – Eş. 3.17'deki kısıtlar, sırasıyla elektrikli ve konvansiyonel araçlar için ayrıtlar üzerinde taşınan yük miktarlarını takip ederken Eş. 3.18 – Eş. 3.19'daki kısıtlar ise yine sırasıyla elektrikli ve konvansiyonel araçlar için bu yük miktarlarının araç kapasitesini aşmamasını garanti etmektedir.

$$0 \le y_j \le y_i - \left[\{\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{ijl}\, h(o_l)\} d_{ij} + \sum_{k \in R}\left(\{\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{ijl}^{k}\, h(o_l)\} d_{ijk} - \sum_{m \in M} \theta_{ijk}^{m}\right)\right]$$
$$+ Q^{E}\left(1 - x_{ij}^{E} - \sum_{k \in R} z_{ijk}\right) \forall i \in V_{0,} \forall j \in V, i \ne j \tag{3.20}$$

$$0 \le y_i - \left(\{\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{i0l}\, h(o_l)\} d_{i0} + \sum_{k \in R}\left(\{\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{i0l}^{k}\, h(o_l)\} d_{i0k} - \sum_{m \in M} \theta_{i0k}^{m}\right)\right) \quad \forall i \in V \tag{3.21}$$

Eş. 3.20'deki kısıtlar, rota üzerinde elektrikli araçların pil şarj seviyesinin yüke bağlı şarj tüketim hızını da dikkate alarak takibini sağlarken depoya dönmek için yeterli şarj seviyesine sahip olunması ise yine yüke bağlı şarj tüketim hızını dikkate alarak Eş. 3.21'deki kısıtlar ile sağlanmaktadır.

$$0 \le y_i - \left(\sum_{\substack{j \in V_0 \\ i \ne j}} \sum_{k \in R} \{\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{ijl}^{k}\, h(o_l)\} d_{ik}\right) \quad \forall i \in V_0 \tag{3.22}$$

Eş. 3.22'deki kısıtlar, bir sonraki müşteriye ulaşım bir şarj istasyonu üzerinden olacaksa bu şarj istasyonuna erişim için yeterli şarj seviyesine sahip olunmasını sağlamaktadır.

$$y_i^{bd} \le \left(x_{i0}^{E} + \sum_{k \in R} z_{i0k}\right) Q^{E} \quad \forall i \in V \tag{3.23}$$

$$y_i^{bd} \le y_i \quad \forall i \in V \tag{3.24}$$

$$y^{SR} = \sum_{i \in V}\left(y_i^{bd} - \left[\{\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{i0l}\, h(o_l)\} d_{i0} + \sum_{k \in R}\left(\{\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{i0l}^{k}\, h(o_l)\} d_{i0k} - \sum_{m \in M} \theta_{i0k}^{m}\right)\right]\right) \tag{3.25}$$

Eş. 3.23 – Eş. 3.25'deki kısıtlar, rota sonlarında elektrikli araç pillerinde kalan şarj seviyelerini amaç fonksiyonundan kazanım olarak düşülmek üzere belirlemektedir.

$$y_i - \sum_{\substack{j \in V_0 \\ i \neq j}} \sum_{k \in R} \left(\{ \sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{ijl}^k \, h(o_l) \} (d_{ik}) - \sum_{m \in M} \theta_{ijk}^m \right) \leq Q^E \quad \forall i \in V_0 \tag{3.26}$$

Eş. 3.26'daki kısıtlar, şarj istasyonlarında transfer edilen enerji miktarı ile pil şarj kapasitesinin aşılmasını engellemektedirler.

$$y_0 = Q^E \tag{3.27}$$

Eş. 3.27'deki kısıt, elektrikli araçların depoyu tam şarj ile terk etmesini sağlamaktadır.

$$u_{ij}^E = \sum_{l \in \alpha} f_{ijl}\,(o_l) + \sum_{k \in R} \sum_{l \in \alpha} f_{ijl}^k\,(o_l) \quad \forall i \in V_0\,, \forall j \in V_0, i \neq j \tag{3.28}$$

$$f_{ij1} \leq p_{ij1} \quad \forall i \in V_0\,, \forall j \in V_0\,, i \neq j \tag{3.29}$$

$$f_{ijl} \leq p_{ijl} + p_{ijl-1} \quad \forall i \in V_0\,, \forall j \in V_0\,, \forall l \in \{2 \dots \Omega - 1\}, i \neq j \tag{3.30}$$

$$f_{ijl} \leq p_{ijl-1} \quad \forall i \in V_0\,, \forall j \in V_0\,, l = \Omega, i \neq j \tag{3.31}$$

$$\sum_{l \in \alpha} f_{ijl} = x_{ij}^E \quad \forall i \in V_0\,, \forall j \in V_0\,, i \neq j \tag{3.32}$$

$$\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{ijl} = x_{ij}^E \quad \forall i \in V_0, \forall\, j \in V_0\,, i \neq j \tag{3.33}$$

$$f_{ij1}^k \leq p_{ij1}^k \quad \forall i \in V_0\,, \forall j \in V_0\,, \forall k \in R, i \neq j, \tag{3.34}$$

$$f_{ijl}^k \leq p_{ijl}^k + p_{ijl-1}^k \quad \forall i \in V_0\,, \forall j \in V_0\,, \forall k \in R, \forall l \in \{2 \dots \Omega - 1\}, i \neq j \tag{3.35}$$

$$f_{ijl}^k \leq p_{ijl-1}^k \quad \forall i \in V_0\,, \forall j \in V_0\,, \forall k \in R, l = \Omega, i \neq j \tag{3.36}$$

$$\sum_{l \in \alpha} f_{ijl}^k = z_{ijk} \quad \forall i \in V_0\,, \forall\, j \in V_0\,, \forall k \in R, i \neq j \tag{3.37}$$

$$\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{ijl}^k = z_{ijk} \quad \forall i \in V_0\,, \forall\, j \in V_0\,, \forall k \in R, i \neq j \tag{3.38}$$

Eş. 3.28 – Eş. 3.38'deki kısıtlar elektrikli araçların taşınan yüke bağlı basamak şarj tüketim fonksiyonunu doğrusallaştırmak için kullanılmıştır. Eş. 3.28'deki kısıtlar, ayrıt üzerindeki

elektrikli araç yükünü birim şarj tüketim miktarını değiştiren yük kırılım noktalarının doğrusal afin kombinasyonu olarak ifade etmektedir. Bu durumda model; i müşterisinden j müşterisine yük taşındıysa, ya $\sum_{l\in\alpha} f_{ijl} = 1$ (i müşterisinden j müşterisine doğrudan seyahat) ya da $\sum_{k\in R}\sum_{l\in\alpha} f_{ijl}^{k} = 1$ (i müşterisinden j müşterisine k şarj istasyonu uğraklı seyahat) olmasını sağlamaktadır. Eş. 3.29 – Eş. 3.33'daki kısıtlar, müşteriler arasında doğrudan taşınan yüke göre birim şarj tüketim değerinin atanmasını sağlamaktadır. Eş. 3.34 – Eş. 3.38'deki kısıtlar ise şarj istasyonu uğraklı olarak müşteriler arasında taşınan yüke göre birim şarj tüketim değerinin atanmasını sağlamaktadırlar.

$$0 \le \theta_{ijk}^{m} \le Q^{E} a_{ijk}^{m} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall \mathrm{k} \in \mathrm{R}, \forall m \in M, \mathrm{i} \neq \mathrm{j} \tag{3.39}$$

$$\sum_{m\in M} a_{ijk}^{m} = z_{ijk} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, i \neq j \tag{3.40}$$

Eş. 3.39 – Eş. 3.40'daki kısıtlar, şarj istasyonunda yalnızca bir şarj konfigürasyonunun kullanılmasını sağlar. Eş. 3.39'daki kısıtlarda transfer edilen enerji miktarı enfazla pil kapasitesi kadar değer alabilen sürekli bir değişken olduğundan ve şarj maliyeti de amaç fonksiyonu ile enazlanmaya çalışıldığından kısmi şarj politikası model kapsamında uygulanabilmektedir.

$$\sum_{i\in V_0}\sum_{j\in V_0}\left(\sum_{l\in\beta\setminus\{o'_{\Omega'}\}} p'_{ijl}\,\varepsilon(o'_l)\right) d_{ij} \le UB \tag{3.41}$$

Eş. 3.41'deki kısıt, konvansiyonel aracın kullanıldığı rotalarda toplam CO_2 emisyonu miktarının tanımlı üst limiti aşmasını engeller.

$$u_{ij}^{C} = \sum_{l\in\beta} f'_{ijl}\,(o'_l) \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, i \neq j \tag{3.42}$$

$$f'_{ij1} \le p'_{ij1} \quad \forall i \in V_0, \forall\, j \in V_0, i \neq j \tag{3.43}$$

$$f'_{ijl} \le p'_{ijl} + p'_{ijl-1} \quad \forall i \in V_0, \forall\, j \in V_0, \forall l \in \{2 \dots \Omega' - 1\}, i \neq j \tag{3.44}$$

$$f'_{ijl} \le p'_{ijl-1} \quad \forall i \in V_0, \forall\, j \in V_0, \forall l = \Omega', i \neq j \tag{3.45}$$

$$\sum_{l\in\beta} f'_{ijl} = x_{ij}^{C} \quad \forall i \in V_0, \forall\, j \in V_0, i \neq j \tag{3.46}$$

$$\sum_{l\in\beta\setminus\{o_{\Omega'}^{'}\}} p_{ijl}^{'} = x_{ij}^{C} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, i \neq j \tag{3.47}$$

Eş. 3.42 – Eş. 3.47'deki kısıtlar konvansiyonel araçların taşınan yüke bağlı basamak emisyon salınım fonksiyonunu doğrusallaştırmak için kullanılmıştır. Eş. 3.42'deki kısıtlar, ayrıt üzerindeki konvansiyonel araç yükünü birim emisyon değerini değiştiren yük kırılım noktalarının doğrusal afin kombinasyonu olarak ifade etmektedir. Bu durumda model; i müşterisinden j müşterisine yük taşındıysa $\sum_{l\in\beta} f_{ijl}^{'} = 1$ (i müşterisinden j müşterisine doğrudan seyahat) olarak değer almasını sağlamaktadır. Eş. 3.43 – Eş. 3.47'deki kısıtlar, taşınan yüke göre birim emisyon salınımı değerinin atanmasını sağlamaktadırlar.

$$x_{ij}^{E}, z_{ijk} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R \tag{3.48}$$

$$x_{ij}^{C} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0 \tag{3.49}$$

$$p_{ijl}, p_{ijl}^{k} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, \forall l \in \alpha\setminus\{o_\Omega\} \tag{3.50}$$

$$p_{ijl}^{'} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall l \in \beta\setminus\{o_{\Omega'}^{'}\} \tag{3.51}$$

$$f_{ijl}, f_{ijl}^{k} \geq 0 \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, \forall l \in \alpha \tag{3.52}$$

$$f_{ijl}^{'} \geq 0 \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0 \forall l \in \beta \tag{3.53}$$

$$u_{ij}^{E}, u_{ij}^{C}, T_i, y_i, \theta_{ijk}^{m} \geq 0 \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, \forall m \in M. \tag{3.54}$$

$$a_{ijk}^{m} \in \{0,1\} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, \forall m \in M. \tag{3.55}$$

$$y_i^{bd}, y^{SR} \geq 0 \quad \forall i \in V \tag{3.56}$$

Son olarak Eş. 3.48 – Eş. 3.56'daki kısıtlar, karar değişkenlerinin tanım kümelerini belirtmektedir.

3.4. Deneysel Çalışma

Bu bölümde matematiksel modelin performansını analiz etmek için yapılan iki aşamalı çalışmaya yer verilmiştir. Birinci aşamada, geliştirilen matematiksel modelin performansı küçük boyutlu test problemleri üzerinde kopyalama yönteminin kullanıldığı matematiksel model ile karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. İkinci aşamada ise geliştirilen matematiksel modelin performansı küçük, orta ve büyük boyutlu test problemleri üzerinde incelenmiştir.

Sayısal analizlerde K-MM ve A-MM, GAMS 24.2.2. geliştirme ortamında kodlanarak CPLEX 12.6.0.0 çözücünün varsayılan ayarları kullanılarak çözülmüştür. Deneysel çalışmalar, Core i5 CPU işlemcili, 2.5 GHz hızında 4 GB ara belleğe sahip, "Windows 8.1" işletim sistemi ile çalışan bilgisayarda 7200 saniye (2 saat) süre sınırı ile gerçekleştirilmiştir.

3.4.1. Test problemleri

Schneider ve ark. (2014), zaman pencereli E-ARP için ilk veri setini türeten araştırmacılardır. Bu veri seti, Solomon'un (1987) zaman pencereli ARP veri setine rassal olarak şarj istasyonları yerleştirilerek elde edilmiştir. Solomon'un (1987) veri setinde müşteriler coğrafik yerleşimine göre "Rassal Müşteri Dağılımı (R)", "Kümelenmiş Müşteri Dağılımı (C)" ve her iki yaklaşımın birleşimi olarak "Rassal Kümelenmiş Müşteri Dağılımı (RC)" şeklinde 3 farklı şekilde sınıflandırılmaktadır. R1, C1 ve RC1 kısa vadeli bir planlama ufkuna ve sıkı zaman pencerelerine, R2, C2 ve RC2 uzun vadeli bir planlama ufkuna ve gevşek zaman pencerelerine sahiptir. Test verileri, "rc108C5" gibi kodlar ile etiketlenmektedir. "rc108C5", test verisinin rassal kümelenmiş müşteri dağılımına (rc), kısa vadeli planlama ufkuna ve sıkı zaman pencerelerine (1) ve son olarak 5 müşteriye (C5) sahip olduğunu göstermektedir.

Schneider ve ark. (2014), elektrikli araçlar için şarj istasyonlarına ilaveten zaman pencereleri ile uyumlu olarak pil kapasitesi, enerj tüketimi ve şarj etme hızı gibi parametreleri de veri setine eklemiştir.

Birisi depoda olacak şekilde 20 şarj istasyonu test verilerine eklenmiştir. Şarj istasyonları, uygun çözümler elde edecek ve her müşteriye en fazla 2 şarj istasyonu uğraklı erişilebilecek şekilde rassal olarak yerleştirilmiştir.

Şarj kapasitesi, şarj istasyonlarına ziyaretler ve şarj süreleri; müşteri zaman pencereleri ile uyumlu hale getirilmiş, uygun çözüm olmaması durumunda müşteri zaman pencerelerinde gerekli düzenlemeler yapılmıştır.

Çizelge 3.1'de problem parametrelerinin özeti görülmektedir.

Çizelge 3.1. Problem parametreleri özeti

		Schneider ve Ark.	Felipe ve Ark.	Çalışma
Düğümlerin Lokasyonları ve Coğrafi Yerleşim Yaklaşımları	C : Kümelenmiş	●		
	R : Rassal			
	RC : Karışım			
Planlama Ufku	Kısa Vadeli	●		
	Uzun Vadeli			
Müşteri ve Şarj İstasyonu Adetleri	Küçük Boyutlu Problemler : Müşteri Sayısı : 5-10-15 İstasyon Sayısı : [0, N/5]	●		
	Orta Boyutlu Problemler : Müşteri Sayısı : 25-30-50 İstasyon Sayısı : [0, N/5]			●
	Büyük Boyutlu Problemler : Müşteri Sayısı : 100 İstasyon Sayısı : [0, N/5]	●		
Müşterilerin Talep Miktarları (q_i)		●		
Müşterilerin Servis Süreleri (S_i)		●		
Araçların Yük Kapasitesi (C^C ve C^E)				●
Filodaki Araç Adetleri ($n^E ve\ n^C$)				●
Müşterilerin Zaman Pencereleri $[e_i, l_i]$		●		
Tur Tamamlanma Zamanı (T_{max})		●		
Emisyon Salınım Miktarı Üst Limiti (UB)				●
Şarj Aygıtı Konfigürasyonları (Şarj Dolum Hızları ve Maliyetleri) (g^m ve c^m)			●	
Pil Kapasiteleri (Q^E)		●		
Araçların Ortalama Hızı (s)		●		
Birim Ulaşım Maliyetleri (c_{ij}^C ve c_{ij}^E)				●
Yüke Bağlı Emisyon Salınım Fonksiyonu ($\varepsilon(u_{ij}^C)$)				●
Yüke Bağlı Şarj Tüketim Fonksiyonu ($h(u_{ij}^E)$)				●

Gerçekleştirilen ön analizler sonunucunda tez kapsamında önerilen probleme özgü düzenlenen parametreler ise aşağıda verilmiştir.

KF-E-ARP'de, birim şarj zamanları g^m ve birim şarj maliyetleri c^m değişen farklı şarj aygıtı konfigürasyonları dikkate alınmıştır. Dolayısıyla, bu parametrelerin değerleri Felipe ve ark. (2014) tarafından teknik verilere dayalı olarak üretilmiş şarj teknolojileri verilerinden elde edilmiştir. Yavaş, orta ve hızlı şarj konfigürasyonları için birim şarj zamanları; 0,277 h/Kwh, 0,05 h/Kwh ve 0,022 h/Kwh, birim şarj maliyetleri ise 0,160 pb/Kwh, 0,176 pb/Kwh ve 0,192 pb/Kwh olarak alınmıştır.

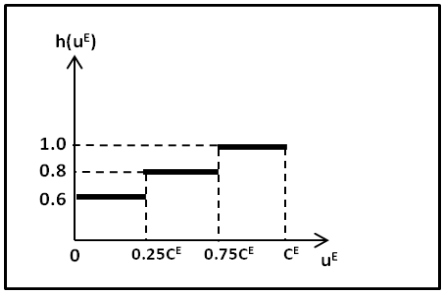
KF-E-ARP'de elektrikli araç yükü birim şarj tüketim miktarını etkileyen bir parametredir. Dolayısıyla, taşınan yüke bağlı olarak birim şarj tüketim miktarı $h(u_{ij}^E)$ taşınan yükün

kapasiteye oranına göre belirlenmiştir. Bu değerler; [0, 0,25C^E] aralığı (düşük yük) için 0,6 kw/km, [0,25C^E, 0,75C^E] aralığı (orta yük) için 0,8 kw/km ve [0,75C^E, C^E] aralığı (ağır yük) için 1 kw/km olarak alınmıştır. İlgili basamak fonksiyon Şekil 3.2'de verilmiştir.

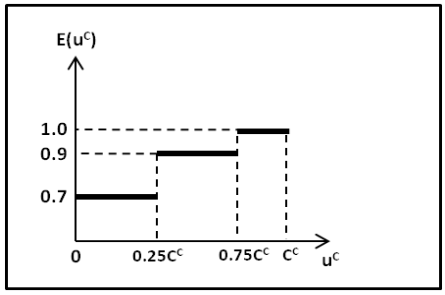
KF-E-ARP'de emisyon salınım miktarı, mesafe ile birlikte yüke de bağlıdır. Dolayısıyla, yüke göre birim emisyon miktarı da $\varepsilon(u_{ij}^C)$; birim şarj tüketim miktarında olduğu gibi taşınan yükün kapasiteye oranına göre 0,7, 0,9 ve 1 kg CO_2/km alınmıştır. Şekil 3.3'de verilen ilgili basamak fonksiyon, Ubeda ve ark. (2014) tarafından 10 ton kapasiteli bir araç için elde edilen verilere dayalı olarak hazırlanmıştır.

Emisyon üst sınırları (*UB*), 5 müşteri için 100 kg CO_2/km, 10 ve 15 müşteri için 150 ve 200 kg CO_2/km, 25 müşteri için 250 ve 300 kg CO_2/km, 30 müşteri için 250, 350 ve 400 kg CO_2/km, 50 müşteri için 400, 450 ve 500 kg CO_2/km, son olarak 100 müşteri için 800, 1000 ve 1200 kg CO_2/km olarak alınmıştır.

Araç kapasitesi her iki araç tipi için 200 kg, birim ulaşım maliyetleri c_{ij}^C ve c_{ij}^E ise her iki araç tipi için 1 pb/km olarak alınmıştır. Her iki araç tipi için filo genişliği toplam müşteri talebine ve araç kapasitesine göre belirlenmiştir. Dolayısıyla, filo genişlikleri küçük boyutlu problemler için 1 ile 3, orta boyutlu problemler için 2 ile 8 ve büyük boyutlu problemler için 5 ile 10 arasında değişmektedir. Filo genişlikleri belirlenirken; filoya ilk etapta atanan araç sayıları ile tanımlanmış süre (2 saat) içerisinde tamsayılı uygun bir çözüm bulunamaması durumunda, eğer bu araç sayıları ile tez kapsamında önerilen ekleme tabanlı çözüm kurucu sezgisel (E-ÇKS) algoritma tarafından da tamsayılı ve uygun bir çözüm bulunamazsa, araç sayıları birer artırılmıştır.



Şekil 3.3. Birim mesafedeki şarj tüketim miktari



Şekil 3.2. Birim mesafedeki emisyon salınım miktari

Deponun en geç servise başlama zamanı, azami tur tamamlanma zamanı olarak kabul edilmiştir.

Son olarak ortalama sürat, müşteri talep miktarları, servis zamanları ve pil kapasiteleri Schneider ve ark. (2014) veri setlerinde olduğu gibi kabul edilmiştir.

Test amacıyla; küçük (5, 10 ve 15 müşterili), orta (25, 30 ve 50 müşterili) ve büyük (100 müşterili) boyutlu problemler için herbir tip veri setinden (R1, C1, RC1, R2, C2 ve RC2) 2 adet test problem seçilmiştir. 36 küçük, 36 orta ve 12 büyük boyutlu olmak üzere toplam 84 test problemi üzerinde analizler gerçekleştirilmiştir. Orta boyutlu problemler, büyük boyutlu problemlerden bazı müşteri ve istasyon düğümleri alınarak üretilmiştir. Dolayısıyla, büyük boyutlu problemlerin düğüm listesinin rassal olarak seçilmiş bir yerinden başlayarak sırasıyla 25, 30 ve 50 müşteri çekilmiştir. Müşteri sayıları ve yerleri ile uyumlu olarak, N müşteri sayısı olmak üzere, $[0, \lfloor N/5 \rfloor]$ aralığında değişen sayıda şarj istasyonu (depo hariç) test verisine eklenmiştir.

3.4.2. Sayısal sonuçlar

Bu bölümde, A-MM'nin performansı K-MM ile karşılaştırmalı olarak incelendikten sonra, A-MM'nin küçük, orta ve büyük boyutlu problemler üzerinde performans analizi yapılacaktır.

KF-E-ARP için K-MM ve A-MM'nin Performans Analizi

A-MM ve K-MM'nin performans analizinde küçük boyutlu problemler kullanılmıştır. Bu test problemlerinde elektrikli araç yükü birim şarj tüketim miktarının sabit ve 1 kw/km olduğu kabul edilmiş ve müşterilerin zaman pencereleri ihmal edilmiştir. Ayrıca K-MM'de şarj istasyonlarına iki kez uğranabileceği dikkate alınarak herbir şarj istasyonunun yalnızca bir kopyası olduğu varsayılmıştır. (σ = 1)

Her iki model yaklaşımı ile elde edilen çözümler Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Model yaklaşımlarının performans karşılaştırması

Problem	K-MM				A-MM				ÜİY	AİY
	Maliyet	Alt Sınır	#EA-#KA	Çözüm Süresi (sn)	Maliyet	Alt Sınır	#EA-#KA	Çözüm Süresi (sn)		
c101C5	**225,61**	**-**	**1-1**	**0,86**	**225,61**	**-**	**1-1**	**1,23**	**0,00**	**-**
c103C5	**163,26**	**-**	**1-1**	**0,50**	**163,26**	**-**	**1-1**	**0,59**	**0,00**	**-**
c206C5	**233,25**	**-**	**1-1**	**1,50**	**233,25**	**-**	**1-1**	**1,51**	**0,00**	**-**
c208C5	**188,11**	**-**	**1-0**	**2,03**	**188,11**	**-**	**1-0**	**1,86**	**0,00**	**-**
r104C5	**145,52**	**-**	**1-1**	**1,16**	**145,52**	**-**	**1-1**	**3,34**	**0,00**	**-**
r105C5	**135,20**	**-**	**0-1**	**1,06**	**135,20**	**-**	**0-1**	**1,31**	**0,00**	**-**
r202C5	**126,52**	**-**	**0-1**	**1,83**	**126,52**	**-**	**0-1**	**1,58**	**0,00**	**-**
r203C5	**207,71**	**-**	**1-0**	**4,94**	**207,71**	**-**	**1-0**	**5,55**	**0,00**	**-**
rc105C5	**226,22**	**-**	**1-1**	**2,08**	**226,22**	**-**	**1-1**	**1,99**	**0,00**	**-**
rc108C5	**273,66**	**-**	**1-1**	**1,56**	**273,66**	**-**	**1-1**	**1,38**	**0,00**	**-**
rc204C5	**190,64**	**-**	**1-1**	**1,64**	**190,64**	**-**	**1-1**	**1,50**	**0,00**	**-**
rc208C5	**194,86**	**-**	**1-0**	**1,78**	**194,86**	**-**	**1-0**	**1,34**	**0,00**	**-**
Ortalama				**1,75**				**1,93**	**0,00**	
c101C10	**272,69**	**-**	**1-1**	**414,70**	**272,69**	**-**	**1-1**	**94,17**	**0,00**	**-**
c104C10	**234,22**	**-**	**0-1**	**10,98**	**234,22**	**-**	**0-1**	**2,23**	**0,00**	**-**
c202C10	**237,66**	**-**	**1-1**	**725,81**	**237,66**	**-**	**1-1**	**10,70**	**0,00**	**-**
c205C10	**219,82**	**-**	**0-1**	**236,08**	**219,82**	**-**	**0-1**	**27,64**	**0,00**	**-**
r102C10	**224,35**	**-**	**1-1**	**424,16**	**224,35**	**-**	**1-1**	**223,61**	**0,00**	**-**
r103C10	**159,64**	**-**	**1-1**	**186,33**	**159,64**	**-**	**1-1**	**147,64**	**0,00**	**-**
r201C10	**171,47**	**-**	**0-1**	**12,63**	**171,47**	**-**	**0-1**	**2,13**	**0,00**	**-**
r203C10	**213,21**	**-**	**0-1**	**100,92**	**213,21**	**-**	**0-1**	**25,86**	**0,00**	**-**
rc102C10	**356,04**	**-**	**1-1**	**708,39**	**356,04**	**-**	**1-1**	**198,74**	**0,00**	**-**
rc108C10	**343,92**	**-**	**1-1**	**953,41**	**343,92**	**-**	**1-1**	**856,59**	**0,00**	**-**
rc201C10	**234,36**	**-**	**0-1**	**18,88**	**234,36**	**-**	**0-1**	**1,75**	**0,00**	**-**
rc205C10	**326,07**	**-**	**1-1**	**533,69**	**326,07**	**-**	**1-1**	**314,16**	**0,00**	**-**
Ortalama				**360,50**				**158,77**	**0,00**	
c103C15	**297,55**	**-**	**1-1**	**7200,00**	**297,55**	**-**	**1-1**	**1052,97**	**0,00**	**-**
c106C15	**230,39**	**-**	**1-1**	**4547,97**	**230,39**	**-**	**1-1**	**7200,00**	**0,00**	**-**
c202C15	328,66	322,16	1-1	7200,00	328,66	293,89	1-1	7200,00	0,00	-8,78
c208C15	**295,91**	**-**	**1-1**	**7200,00**	**277,55**	**-**	**1-1**	**380,05**	**6,20**	**-**
r102C15	**279,13**	**-**	**1-1**	**7200,00**	**252,10**	**-**	**1-1**	**1396,39**	**9,68**	**-**
r105C15	265,76	237,95	1-2	7200,00	265,20	240,34	1-2	7200,00	0,21	1,00
r202C15	311,50	279,85	1-1	7200,00	311,50	283,16	1-1	7200,00	0,00	1,18
r209C15	**271,16**	**-**	**1-1**	**6592,84**	**271,16**	**-**	**1-1**	**698,69**	**0,00**	**-**
rc103C15	404,56	277,64	2-1	7200,00	400,25	295,14	1-1	7200,00	1,10	6,31
rc108C15	390,18	279,99	2-1	7200,00	380,38	292,39	1-2	7200,00	2,51	4,43
rc202C15	350,57	293,72	1-1	7200,00	350,57	287,87	1-1	7200,00	0,00	-1,99
rc204C15	**338,32**	**-**	**1-1**	**7200,00**	**315,76**	**-**	**1-1**	**2336,95**	**6,67**	**-**
Ortalama				**6928,40**				**4688,75**	**2,20**	**0,36**

Çizelgedeki ilk sütunda problemin etiketi verilmektedir. "*Maliyet*" sütunları 2 saatlik süre içerisinde matematiksel modeller ile elde edilen uygun çözümün amaç fonksiyonu değerini vermektedir. Matematiksel modeller ile bulunan eniyi çözümler kalın karakterler ile, uygun olmayan çözüm ise ("-") ile gösterilmektedir. "*#EA-#KA*" başlıklı sütunlarda çözümler içerisinde filodan görevlendirilen elektrikli ve konvansiyonel araç sayıları verilirken, "*Çözüm Süresi (sn)*" sütunlarında ise saniye cinsinden çözüm zamanları verilmektedir.

Matematiksel modellerin performanslarını karşılaştırmak için üst sınır iyileşme yüzdesi (*ÜİY*) ve alt sınır iyileşme yüzdesi (*AİY*) kullanılmıştır.

Üst Sınır İyileşme Yüzdesi (ÜİY)

K-MM ve A-MM ile 2 saat içerisinde elde edilen eniyi tamsayılı çözümler sırasıyla Z^1 ve Z^2 olmak üzere, A-MM ile K-MM'ye göre elde edilen üst sınır iyileşme yüzdesi Eş. 3.57 ile hesaplanmaktadır.

$$\text{ÜİY} = 100 * ((Z^1 - Z^2)/Z^1) \tag{3.57}$$

Alt Sınır İyileşme Yüzdesi (AİY)

Eniyi çözümün bulunamadığı problemler için üst sınırlar ile birlikte bulunan alt sınırların da karşılaştırması yapılmıştır. K-MM ve A-MM ile 2 saat içerisinde elde edilen eniyi alt sınırlar sırasıyla AS^1 ve AS^2 olmak üzere, A-MM ile K-MM'ye göre elde edilen alt sınır iyileşme yüzdesi Eş. 3.58 ile hesaplanmaktadır.

$$A\text{İ}Y = 100 * ((AS^2 - AS^1)/AS^1) \tag{3.58}$$

Çizelge 3.2 incelendiğinde 5 ve 10 müşteriden oluşan toplam 24 adet küçük boyutlu problemin tamamında her iki modelleme yöntemi ile eniyi çözümlerin elde edildiği görülmektedir. 5 müşterili problemler için ortalama çözüm zamanı açısından önemli bir farklılık görülmezken (K-MM için 1,75 sn, A-MM için 1,93 sn), 10 müşterili problemlere A-MM ile ortalamada çok daha kısa sürede (K-MM için 360,50 sn, A-MM için 158,77 sn) çözüme ulaşmıştır.

15 müşteriden oluşan küçük boyutlu problemlerde ise K-MM ile 12 adet problemin 3'ünde eniyi çözüme ulaşılırken, A-MM ile 6 problemde eniyi çözüme ulaşılmıştır. Eniyi çözümün elde edilemediği 6 problemin, 2'sinde K-MM'nin alt sınırı daha sıkı iken, 4 problemde ise A-MM'nin alt sınırı daha sıkıdır. Ayrıca, 15 müşterili problemlerde ortalama çözüm zamanı açısından da A-MM, K-MM'ye kıyasla daha avantajlıdır (K-MM için 6928,40 sn, A-MM için 4688,75 sn).

Küçük boyutlu problemlerin sadece ikisinde çözüm içerisinde kullanılan araç tip ve adetleri farklılık göstermiştir. "rc103C15"te EA sayısı bir azaltılarak, "rc108C15"te ise EA sayısı 1 azaltılıp, KA sayısı bir artırılarak A-MM ile üst ve alt sınır çözümleri iyileştirilmiştir.
Küçük boyutlu problemlerin 23'ünde A-MM daha kısa sürede çözüme ulaşırken, K-MM 7 problemde (6 adet 5 müşterili ve 1 adet 15 müşterili problem) daha hızlı çözüm vermiştir.

Tüm sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde A-MM'nin K-MM'ye kıyasla çözüm kalitesi ve çözüm zamanı açısından daha iyi performans gösterdiği görülmüştür.

A-MM'nin Performans Analizi

Bu bölümde tez kapsamında geliştirilen matematiksel modelin (A-MM) performansı küçük, orta ve büyük boyutlu problemler üzerinde incelenmiştir.

Çizelge 3.3 - Çizelge 3.5'de, sırasıyla küçük, orta ve büyük boyutlu problemler için sayısal sonuçlar verilmektedir. Çizelge 3.3 - Çizelge 3.5'de ilk sütun problemin etiketini, sonraki iki sütun "$s(V)$" ve "$s(R)$", sırasıyla problemdeki müşteri ve depo hariç şarj istasyonu sayısını vermektedir. "*UB*", izin verilen emisyon üst limitini, "T_{max}" ise azami tur tamamlanma zamanını göstermektedir. Takip eden sütunlardaki "n^E" ve "n^C", sırasıyla filolardaki elektrikli ve konvansiyonel araç sayılarını tanımlamaktadır. "*Maliyet*", "*#EA-#KA*" ve "*Çözüm Süresi (sn)*" sütunları Çizelge 3.2'de tanımlandığı gibi olup, "Δ_{opt}" sütunu, matematiksel model ile 2 saat içerisinde bulunan çözümün amaç fonskiyonu değeri (Z^*) ve alt sınır (Z^{AS}) arasındaki yüzde sapma değerini vermektedir. Bu değer, Eş. 3.59 ile hesaplanmaktadır.

$$\Delta_{opt} = 100 * \left((Z^* - Z^{AS})/Z^{AS}\right) \quad (3.59)$$

Çizelge 3.3 incelendiğinde 5, 10 ve 15 müşteriden oluşan toplam 36 adet küçük boyutlu problemin 33'ünde A-MM ile eniyi çözümün elde edildiği görülmektedir. Eniyi çözüm elde edilemeyen 15 müşterili 3 probleme bulunan çözümlerin, alt-sınırdan sapma değeri %16,66'dır. Ortalama çözüm zamanı 5 müşterili problemler için 1 saniye (sn) iken, 10 ve

15 müşterili problemler için ortalama çözüm zamanı sırasıyla 88,07 ve 2962,42 sn'ye yükselmiştir. Çözüm zamanlarından da görüldüğü gibi problem NP-zor olduğundan 15 müşterili problem için çözüm zamanı hızla artış göstermektedir.

Çizelge 3.3. Küçük boyutlu problemler için sayısal sonuçlar

Problem	s(V)	s(R)	*UB*	T_{max}	n^E	n^C	A-MM			
							Maliyet	#EA-#KA	Çözüm Süresi (sn)	Δ_{opt}
c101C5	**5**	**2**	**100**	**1236**	**1**	**1**	**253,42**	**1-1**	**0,42**	**0,00**
c103C5	**5**	**1**	**100**	**1236**	**1**	**1**	**168,37**	**1-1**	**0,86**	**0,00**
c206C5	**5**	**3**	**100**	**3390**	**1**	**1**	**227,19**	**1-1**	**0,89**	**0,00**
c208C5	**5**	**2**	**100**	**3390**	**1**	**1**	**175,35**	**1-0**	**0,92**	**0,00**
r104C5	**5**	**2**	**100**	**230**	**1**	**1**	**142,55**	**1-1**	**1,02**	**0,00**
r105C5	**5**	**2**	**100**	**230**	**1**	**1**	**157,14**	**1-1**	**0,31**	**0,00**
r202C5	**5**	**2**	**100**	**1000**	**1**	**1**	**126,52**	**0-1**	**0,55**	**0,00**
r203C5	**5**	**3**	**100**	**1000**	**1**	**1**	**198,54**	**1-0**	**1,89**	**0,00**
rc105C5	**5**	**3**	**100**	**240**	**1**	**1**	**238,73**	**1-1**	**0,63**	**0,00**
rc108C5	**5**	**3**	**100**	**240**	**1**	**1**	**261,02**	**1-1**	**0,69**	**0,00**
rc204C5	**5**	**3**	**100**	**960**	**1**	**1**	**184,11**	**1-1**	**2,41**	**0,00**
rc208C5	**5**	**2**	**100**	**960**	**1**	**1**	**179,62**	**1-0**	**1,45**	**0,00**
Ortalama							**192,71**		**1,00**	**0,00**
c101C10	**10**	**4**	**200**	**1236**	**2**	**2**	**385,64**	**1-2**	**2,53**	**0,00**
c104C10	**10**	**3**	**200**	**1236**	**1**	**1**	**259,92**	**1-1**	**48,55**	**0,00**
c202C10	**10**	**4**	**200**	**3390**	**1**	**1**	**250,38**	**1-1**	**2,11**	**0,00**
c205C10	**10**	**2**	**200**	**3390**	**1**	**1**	**237,24**	**1-1**	**1,72**	**0,00**
r102C10	**10**	**3**	**200**	**230**	**2**	**2**	**245,37**	**1-2**	**4,56**	**0,00**
r103C10	**10**	**2**	**200**	**230**	**1**	**1**	**196,22**	**1-1**	**901,08**	**0,00**
r201C10	**10**	**3**	**200**	**1000**	**1**	**1**	**221,34**	**1-1**	**2,31**	**0,00**
r203C10	**10**	**4**	**200**	**1000**	**1**	**1**	**213,65**	**0-1**	**30,27**	**0,00**
rc102C10	**10**	**3**	**200**	**240**	**2**	**2**	**397,08**	**1-2**	**2,14**	**0,00**
rc108C10	**10**	**3**	**200**	**240**	**2**	**2**	**347,15**	**1-1**	**55,73**	**0,00**
rc201C10	**10**	**3**	**200**	**960**	**1**	**1**	**320,22**	**1-1**	**3,16**	**0,00**
rc205C10	**10**	**3**	**200**	**960**	**1**	**1**	**334,45**	**1-1**	**2,63**	**0,00**
Ortalama							**284,06**		**88,07**	**0,00**
c103C15	**15**	**4**	**200**	**1236**	**1**	**1**	**361,20**	**1-1**	**3979,75**	**0,00**
c106C15	**15**	**2**	**200**	**1236**	**2**	**2**	**270,82**	**1-2**	**4,16**	**0,00**
c202C15	**15**	**4**	**200**	**3390**	**1**	**1**	**374,91**	**1-1**	**2353,36**	**0,00**
c208C15	**15**	**3**	**200**	**3390**	**1**	**1**	**305,55**	**1-1**	**32,97**	**0,00**
r102C15	**15**	**7**	**200**	**230**	**3**	**3**	**387,98**	**2-3**	**20,59**	**0,00**
r105C15	**15**	**5**	**200**	**230**	**2**	**2**	**321,96**	**1-2**	**2,27**	**0,00**
r202C15	15	5	150	1000	2	2	382,23	2-1	7200,00	9,27
r209C15	**15**	**4**	**150**	**1000**	**2**	**2**	**280,09**	**1-1**	**3218,92**	**0,00**
rc103C15	15	4	150	240	3	3	406,33	2-2	7200,00	5,59
rc108C15	15	4	150	240	2	2	396,89	2-1	7200,00	35,14
rc202C15	**15**	**4**	**150**	**960**	**2**	**2**	**413,75**	**1-1**	**151,03**	**0,00**
rc204C15	**15**	**6**	**150**	**960**	**2**	**2**	**325,92**	**1-1**	**4185,94**	**0,00**
Ortalama							**352,30**		**2962,42**	**4,17**

Çizelge 3.4 incelendiğinde 25, 30 ve 50 müşteriden oluşan toplam 36 adet orta boyutlu problemin 5'inde eniyi çözüm elde edilirken, 16 probleme ise 7200 sn (2 saat) içerisinde tamsayılı uygun çözümün elde edilemediği görülmüştür.

Eniyi çözüm elde edilemeyen 15 adet orta boyutlu probleme bulunan çözümlerin alt-sınırdan sapma değeri %52,29'dur. Ayrıca, 7200 sn. içerisinde uygun çözüm elde edilemeyen 6 problem 30 müşterili iken, 10 problem 50 müşterilidir.

Çizelge 3.4. Orta boyutlu problemler için sayısal sonuçlar

Problem	s(V)	s(R)	*UB*	T_{max}	n^E	n^C	A-MM			
							Maliyet	#EA-#KA	Çözüm Süresi (sn)	Δ_{opt}
c101C25	**25**	**6**	**250**	**1236**	**2**	**2**	**269,85**	**2-2**	**8,78**	**0,00**
c103C25	25	6	250	1236	2	2	507,26	1-2	7200,00	122,07
c206C25	25	7	300	3390	2	2	327,39	1-2	7200,00	19,98
c208C25	25	7	300	3390	2	2	327,48	1-2	7200,00	36,59
r104C25	25	12	250	230	3	3	521,67	2-2	7200,00	58,96
r105C25	**25**	**12**	**250**	**230**	**3**	**3**	**535,67**	**3-3**	**156,34**	**0,00**
r202C25	25	12	250	1000	2	2	640,04	2-2	7200,00	72,32
r203C25	25	12	250	1000	3	3	487,90	2-1	7200,00	36,46
rc105C25	**25**	**10**	**300**	**240**	**4**	**4**	**558,01**	**2-4**	**4130,27**	**0,00**
rc108C25	25	12	300	240	3	3	449,43	1-3	7200,00	27,91
rc204C25	25	10	300	960	2	2	434,95	2-1	7200,00	31,11
rc208C25	25	12	300	960	2	2	444,69	1-2	7200,00	42,03
Ortalama							**458,70**		**5757,95**	**37,29**
c101C30	**30**	**7**	**350**	**1236**	**2**	**2**	**327,86**	**2-2**	**32,28**	**0,00**
c104C30	30	8	350	1236	4	4	364,40	2-2	7200,00	47,34
c202C30	30	9	250	3390	3	3	618,97	2-3	7200,00	100,52
c205C30	30	11	250	3390	3	3	446,41	2-2	7200,00	41,88
r102C30	30	14	350	230	5	5	-	-	7200,00	-
r103C30	30	15	350	230	5	5	-	-	7200,00	-
r201C30	**30**	**14**	**350**	**1000**	**3**	**3**	**614,31**	**3-3**	**7106,81**	**0,00**
r203C30	30	13	350	1000	2	2	-	-	7200,00	-
rc102C30	30	15	400	240	4	4	-	-	7200,00	-
rc108C30	30	11	350	240	4	4	-	-	7200,00	-
rc201C30	30	11	400	960	2	2	653,62	2-2	7200,00	21,18
rc205C30	30	10	350	960	2	2	-	-	7200,00	-
Ortalama							**504,26**		**6594,92**	**35,15**
c103C50	50	18	400	1236	3	3	-	-	7200,00	-
c106C50	50	18	400	1236	4	4	794,74	4-3	7200,00	61,34
c202C50	50	18	400	3390	3	3	-	-	7200,00	-
c208C50	50	18	400	3390	3	3	707,40	2-3	7200,00	64,61
r102C50	50	18	400	230	8	8	-	-	7200,00	-
r105C50	50	18	400	230	6	6	-	-	7200,00	-
r202C50	50	18	450	1000	2	2	-	-	7200,00	-
r209C50	50	18	450	1000	2	2	-	-	7200,00	-
rc103C50	50	17	450	240	4	4	-	-	7200,00	-
rc108C50	50	17	500	240	5	5	-	-	7200,00	-
rc202C50	50	18	500	960	5	5	-	-	7200,00	-
rc204C50	50	19	500	960	3	3	-	-	7200,00	-
Ortalama							**751,07**		**7200,00**	**62,98**

25 müşterili 3 problemde eniyi çözüm 8,78 sn, 156,34 sn ve 4130,27 sn'de elde edilirken diğer 9 probleme 7200 sn'de uygun çözüm elde edilmiş olup ortalama çözüm zamanı 5757,95 sn'dir. Benzer şekilde 30 müşterili 2 problemde eniyi çözüm 32,28 sn ve 7106,81 sn'de elde edilirken, 4 probleme 7200 sn'de uygun çözüm elde edilebilmiştir ve ortalama

çözüm zamanı 6594,92 sn'dir. Son olarak 50 müşterili sadece 2 probleme 7200 sn'de alt-sınırdan ortalama %62,98 sapma değeri ile uygun çözüm bulunmuştur.

Çizelge 3.5'de 100 müşterili 12 adet büyük boyutlu problemin tümüne 7200 sn içerisinde tamsayılı uygun çözüm elde edilemediği görülmektedir.

Çizelge 3.5. Büyük boyutlu problemler için sayısal sonuçlar

Problem	s(V)	s(R)	*UB*	T_{max}	n^E	n^C	A-MM			
							Maliyet	#EA-#KA	Çözüm Süresi (sn)	Δ_{opt}
C101_21	100	20	800	1236	7	7	-	-	7200	-
C102_21	100	20	800	1236	7	7	-	-	7200	-
C201_21	100	20	800	3390	5	5	-	-	7200	-
C202_21	100	20	800	3390	5	5	-	-	7200	-
r101_21	100	20	1200	230	10	10	-	-	7200	-
r102_21	100	20	1000	230	10	10	-	-	7200	-
r201_21	100	20	800	1000	5	5	-	-	7200	-
r202_21	100	20	800	1000	5	5	-	-	7200	-
rc101_21	100	20	1000	240	9	9	-	-	7200	-
rc102_21	100	20	1000	240	9	9	-	-	7200	-
rc201_21	100	20	800	960	5	5	-	-	7200	-
rc202_21	100	20	800	960	5	5	-	-	7200	-
Ortalama							-	-	**7200**	-

Ayrıca, 10, 15, 25 ve 30 müşterili problemlerin çözüm zamanları ayrı ayrı incelendiğinde bazı problem çiftlerinin (c101C10-c104C10, r102C10-r103C10, rc102C10-rc108C10, c103C15-c106C15, c202C15-c208C15, rc202C15-rc204C15, c101C25-c103C25, r104C25-r105C25, c101C30-c104C30) çözüm zamanları arasında büyük farklar gözlemlenmiştir.

Örneğin; çözüm zamanı r102C10 ve r103C10 çifti için sırasıyla 4,56 sn. ve 901,08 sn. iken c103C15-c106C15 çifti için sırasıyla 3979,75 sn. ve 4,16 sn.'dir. Bu problem çiftlerinin probleme özgü parametreleri incelendiğinde tüm çiftlerin şarj istasyonu sayısı (*s(R)*) farklı iken 10 müşterili problem çiftlerinde ayrıca filodaki elektrikli ve konvansiyel araç sayılarının da (n^E ve n^C) farklı olduğu görülmüştür. Bu parametreler açısından bir değerlendirme yapıldığında 10 müşterili problem çiftlerinde *s(R)*, n^E ve n^C değerleri azaldıkça problemin çözümünün zorlaştığı ve dolayısıyla çözüm zamanının arttığı gözlenmiştir. 15, 25 ve 30 müşterili problem çiftlerinde ise özellikle *s(R)* değeri arttıkça problemin çözümü zorlaşmakta ve çözüm zamanı artmaktadır.

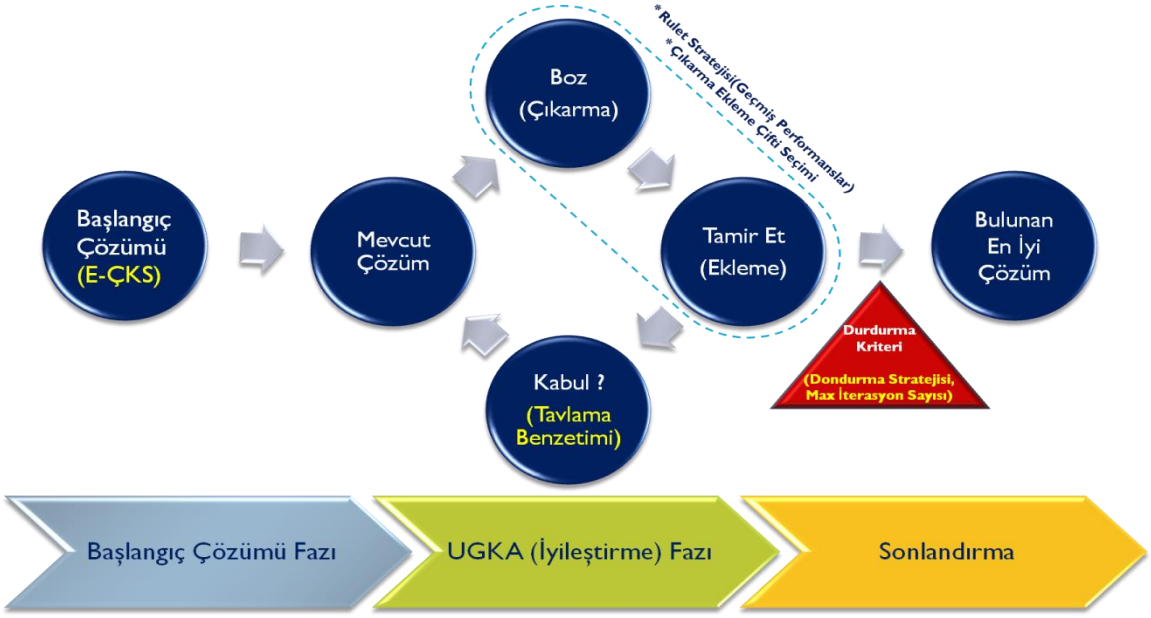
3.5. Değerlendirme

Özet olarak, KF-E-ARP için A-MM'nin, K-MM'den daha iyi performansa sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca, KF-E-ARP NP-zor problemler sınıfında olduğundan dolayı matematiksel modelin (A-MM) çözüm zamanı problem boyutuna bağlı olarak üstel artış göstermektedir. 30 müşterili problemlerden itibaren A-MM ile 2 saat (7200 sn) içerisinde tamsayılı uygun çözüme ulaşmak zorlaşmış, 50 müşterili sadece 2 problem için uygun çözüme ulaşılırken 100 müşterili problemlerin tamamında uygun çözüme bile ulaşılamamıştır. Dolayısıyla bu sonuçlar, probleme makul zamanlarda bir çözümün elde edilmesi için sezgisel algoritmalara olan ihtiyacın bir göstergesidir. Bir sonraki bölümde KF-E-ARP için geliştirilen Uyarlamalı Geniş Komşu Arama (UGKA) algoritması detaylı olarak verilecektir.

4. UYARLAMALI GENİŞ KOMŞU ARAMA

KF-E-ARP, NP-Zor problemler sınıfında olduğu için kesin çözüm yöntemleri ile eniyi çözüme ulaşmak problem boyutuna bağlı olarak üstel artış gösterir. Literatürde bu tip problemlere makul sürelerde çözümler elde etmek amacıyla sezgisel yöntemlerden faydalanılmaktadır. Bu tez kapsamında ise KF-E-ARP'ye kısa sürede çözüm bulabilmek için Uyarlamalı Geniş Komşu Arama (UGKA) temelli sezgisel bir algoritma geliştirilmiştir.

Geliştirilen UGKA temelli sezgisel algoritmanın ana hatları Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1. Geliştirilen UGKA temelli sezgisel algoritmanın ana hatları

Bu bölümde öncelikle Geniş Komşu Arama (GKA) algoritmasından kısaca bahsedilecek ve daha sonra GKA algoritmasının geliştirilmesi ile önerilen UGKA algoritması ana hatlarıyla aktarılacaktır.

GKA algoritması ilk olarak ARP'yi çözmek için Paul Shaw (1997) tarafından önerilmiştir. Önerilen GKA algoritmasının sözde kodu Şekil 4.2'de verilmiştir. Paul Shaw (1997) tarafından önerilen GKA çerçevesinde özetle belli sayıda müşteri rassal olarak rotalardan çıkarılmakta ve çıkarılan müşteriler açgözlü bir yaklaşımla tekrar rotalara eklenmektedir.

Algoritma 1 : GKA

1: S_0 üret, $S_{eniyi} \leftarrow S_0$, $S \leftarrow S_0$
2: **repeat**
3: $S' \leftarrow S$
4: q müşteriyi (S')'dan çıkar
5: çıkarılan q müşteriyi tekrar (S')'a ekle
6: **if** $f(S') < f(S_{eniyi})$ **then**
7: $S_{eniyi} \leftarrow S'$
8: **if** accept(S', S) **then**
9: $S \leftarrow S'$
10: **until** (durdurma kriteri)
11: **return** S_{eniyi} ve $f(S_{eniyi})$

S_0	: Başlangıç çözümü
S_{eniyi}	: Eniyi çözüm
S	: Mevcut çözüm
S'	: Komşu çözüm
$f(\ )$	: Çözümün amaç fonksiyonu değeri

Şekil 4.2. GKA algoritması sözde kodu

Tanımlı çıkarma ve ekleme komşuluk mekanizmaları da her iterasyonda rassal olarak seçilmektedir. Eğer oluşturulan komşu çözüm (S') bilinen eniyi çözümden (S_{eniyi}) daha iyi ise bilinen eniyi çözüm güncellenmekte ve bu çözüm mevcut çözüm (S) olarak alınmaktadır. Aksi takdirde komşu çözüm (S') belirlenen bir kabul kriterine göre mevcut çözüm (S) olarak alınmaktadır. Durdurma koşulu sağlandığında ise bilinen eniyi çözüm (S_{eniyi}) problemin çözümü olarak kabul edilmektedir.

İlk defa Ropke ve Pisinger (2006a) tarafından Zaman Pencereli Topla-Dağıt Araç Rotalama problemlerinin çözümü için önerilen UGKA algoritmasında ise, komşuluk mekanizmalarının rassal seçimi yerine geçmiş performanslarına göre tanımlanan olasılıklı seçim yöntemi kullanılmıştır.

Bu yöntem, GKA ile karşılaştırıldığında aşağıdaki avantajlara sahiptir.

- Kaliteli komşu üreten mekanizmalar aldığı puanlar ile ön plana çıkarak daha fazla seçilme olasılığına sahip olmaktadır. Böylece düşük performanslı komşuluk mekanizmaları ile komşu üretmek için işlem yükü kaybı azaltılmaktadır.
- Algoritmanın çalışma süresince farklı dönemlerde farklı performans gösteren mekanizmalar ile komşu üretebilme imkânı kazanılmaktadır. (Hottenrott, 2015)

Bu avantajlar da dikkate alınarak tez kapsamında KF-E-ARP'nin çözümü için diğer sezgisel yöntemler yerine UGKA'nın tercih edilme sebepleri aşağıda özetlenmiştir (Toth ve Vigo, 2014; Turkeš ve ark., 2019).

- Algoritma deterministik olmadığından farklı koşumlarda daha kaliteli çözümler elde etme ihtimali bulunmaktadır.
- Algoritma içerisinde tanımlanan çok sayıda komşuluk mekanizması sayesinde UGKA'nın çözüm uzayında arama kabiliyeti yüksektir ve çözüm uzayının farklı bölgelerine sıçrayabilir. Bu sebeple yerel eniyi çözümlere takılı kalma ihtimali azalmaktadır.
- ARP'ler birçok farklı ve probleme göre değişen parametrelere (müşteri sayısı, müşterileri konumlarının yayılımı, zaman pencerelerinin sıkılığı ve gevşekliği, azami tur tamamlanma zamanı, müşteri talep miktarları, araçların azami yük kapasitesi vb.) sahip olabilmektedir. Bu değişen parametrelere uyum sağlamak için UGKA, uyarlamalı yapısı sayesinde algoritmanın farklı dönemlerinde fayda sağlayan farklı komşuluk mekanizmalarının kullanımını mümkün kılmaktadır. Bu sebeple problem için en etkin komşuluk mekanizmalarını önceden bilme zorunluluğu ortadan kalkmaktadır. Dolayısıyla, UGKA'da ne kadar fazla sayıda bozma ve tamir etme operatörü tanımlanırsa algoritmanın etkinliği o ölçüde artmaktadır.
- Son olarak UGKA, son yıllarda birçok farklı tipte ARP probleminde uygulanarak etkinliğini kanıtlamıştır.

UGKA literatürde birçok ARP türüne uygulanmıştır. E-ARP'lere çözüm bulmak için önerilen başlıca UGKA algoritmaları ise aşağıda belirtilmiştir.

- Zaman pencereli karma filolu E-ARP'nin çözümü için Goeke ve Schnider (2015) tarafından UGKA ve yerel arama algoritmasına dayalı karma algoritma önerilmiştir. Algoritmanın işleyişinde öncelikle veri seti; zaman penceresi, azami tur tamamlanma zamanı ve şarj seviyesi kısıtlarını ihlal edebilecek hatlar şebekeden çıkarılacak şekilde ön-işleme tabi tutulmaktadır. Başlangıç çözümü ekleme tabanlı sezgisel ile elde edilirken tüm rotalar elektrikli araç rotası olarak oluşturulmakta ve konvansiyonel araç adedi kadar en yüksek maliyetli rota konvansiyonel araç rotasına dönüştürülmektedir. Karma UGKA içerisinde farklı tip kısıt ihlalleri farklı ağırlıklar ile cezalandırılmakta ve bu ağırlıklar dinamik biçimde artmaktadır.
- Kısmi şarj politikası uygulanan zaman pencereli E-ARP'nin çözümü için Keskin ve Çatay (2016) tarafından UGKA'ya dayalı bir algoritma geliştirilmiştir. Agoritma içerisinde probleme özgü yeni komşuluk mekanizmaları tanımlanmıştır. Müşterilerin, öncesindeki ya

da sonrasındaki şarj istasyonları ile rotalardan çıkarılıp, yeni rotalara eklenilmesi önerilmiştir.

- Kısmi şarj politikası uygulanan ve farklı şarj konfigürasyonları olan zaman pencereli E-ARP'nin çözümü için Keskin ve Çatay (2018) tarafından matematiksel model tabanlı UGKA geliştirilmiştir. Algoritmada, belli sayıda iterasyon sonrası rota sabit tutularak şarja ilişkin kararlar matematiksel model ile verilmektedir.
- Farklı firmaların şarj istasyonlarının karşılıklı paylaşımını dikkate alan, doğrusal olmayan bir şarj dolum fonksiyonunu kullanan, farklı şarj konfigürasyonları olan çoklu depolu E-ARP ve yerseçimi probleminin çözümü için Koç ve ark. (2019) tarafından UGKA'ya dayalı bir algoritma geliştirilmiştir. Algoritma içerisinde şarja ilişkin kararlar matematiksel model ile verilmektedir.
- Gerçekçi bir enerji tüketim fonksiyonunu ve kısmi şarj politikasını dikkate alan karma filolu E-ARP'nin çözümü için Vincent ve ark. (2021) tarafından UGKA'ya dayalı bir algoritma geliştirilmiştir. Şarj istasyonlarına ilişkin kararların verilmesi için dinamik programlama UGKA'ya entegre edilmiştir. Ayrıca, komşuluk mekanizmalarının sebep oldukları kısıt ihlallerine göre değerlendirilmesine zaman etkin bir yöntem önerilmiştir.

Bu tezde önerilen algoritmanın tasarım kararları aşamasında çok sayıda UGKA algoritmasını, özellikle uyarlama mekanizmasının performansı açısından değerlendiren Turkeš ve ark. (2019) çalışmasından faydalanılmıştır.

Geliştirilen UGKA'da çözüm uzayında etkin arama yapmak için probleme özgü ve karmaşık kısıtlara uyumlu yeni komşuluk mekanizmaları önerilmiştir. Tekil bir komşuluk mekanizmasının, birlikte çalıştıklarında etkili olacakları dikkate alınarak bir çıkarma ve bir ekleme sezgiseli çiftinden oluştuğu kabul edilmiştir. Bu yaklaşım ile komşuluk mekanizmalarının seçimi, çıkarma ve ekleme sezgisellerinin ayrı ayrı seçimi yerine çiftlerin seçimi olarak değerlendirilmiştir. Literatürden farklı olarak açgözlülük ve rassallık, bütüncül bir yaklaşım yerine hem çıkarma operatöründe hem de ekleme operatöründe rotanın ve müşterinin seçimi için ayrı ayrı uygulanabilmektedir. Yeniden ısıtma, komşuluk mekanizmalarının ağırlıklarına ilk değerlerini atama ve başlangıç çözümüne geri dönme gibi çeşitlendirme etkisini artırıcı yeni yaklaşımlar kullanılmıştır. Böylece UGKA'nın yerel eniyi çözümlere takılma şansı azaltılmıştır. Uygun komşu çözüm üretemeyen mekanizmaları cezalandırabilmek için yeni komşuluk puanlama politikası önerilmiştir. Komşu çözüm oluşturulurken yalnızca müşterilerin çıkarılıp eklenmesinden

kaynaklı oluşabilecek gereksiz şarj işlemlerini iptal etmek için yeni iyileştirme yaklaşımı önerilmiştir. Ayrıca, UGKA'da belirli aralıklarla çözümü iyileştirmek için değiş-tokuşa dayalı bir yerel arama algoritması geliştirilmiştir.

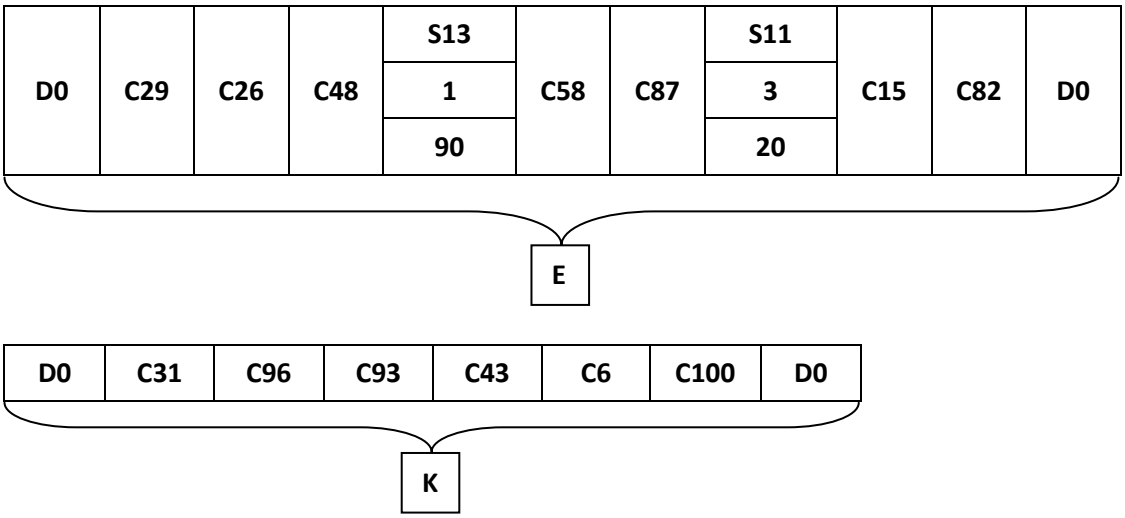
Bu bölümde, öncelikle tez kapsamında önerilen sezgisel algoritmada kullanılan çözüm gösterimi ve algoritmayı oluşturan başlangıç çözümü fazı ile UGKA fazı anlatılacaktır. Daha sonra deneysel çalışmalar ve değerlendirmeler verilecektir.

4.1. Çözüm Gösterimi

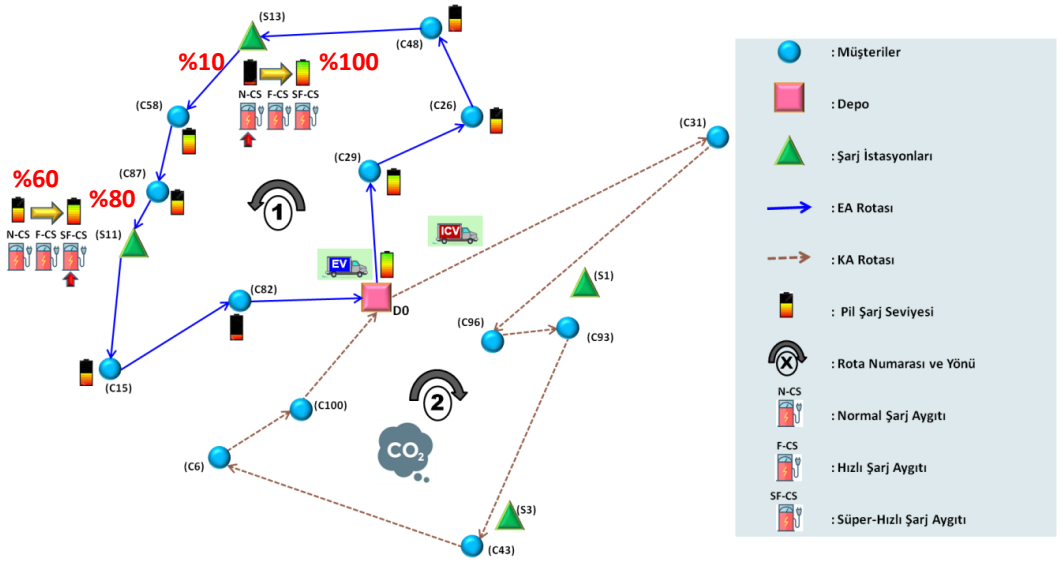
Önerilen UGKA tabanlı sezgisel algoritmada çözüm gösterimi için çözüm içerisindeki rotaları temsilen diziler kullanılmıştır. Diziler, rotanın tipini belirten semboller ile etiketlenmiştir. Bu dizilerde rota bilgisi ile birlikte EA'lar için rota üzerinde şarj istasyonu ziyaret edildiyse bu hücrede şarj kararlarına ilişkin ilave bilgiler de tutulmaktadır. Rotaların başında ve sonunda depo yer almaktadır. Şekil 4.3'te çözüm gösterimi için bir örnek verilmiştir. Şekil 4.3(a)'da ilk dizi EA rotasını, ikinci dizi ise KA rotasını göstermektedir. Her rotanın başında ve sonunda depo (D0), arada ise müşterilerin ve (EA rotası için) şarj istasyonlarının ziyaret sırası verilmektedir. EA rotasını temsil eden ilk dizide depodan başlayarak sırasıyla;

- C29, C26 ve C48 nolu müşterilerin ziyaret edildiği,
- S13 nolu şarj istasyonunda yavaş şarj konfigürasyonu (1) ile şarj kapasitesinin %90'ı oranında enerji transferi gerçekleştiği,
- C58 ve C87 nolu müşterilerin ziyaret edildiği,
- S11 nolu şarj istasyonunda hızlı şarj konfigürasyonu (3) ile şarj kapasitesinin %20'si oranında enerji transferinin gerçekleştiği,
- Son olarak C15 ve C82 nolu müşterilerin ziyaret edilerek depoya geri dönüldüğü gösterilmektedir.

KA rotasını temsil eden ikinci dizide ise depodan başlayarak sırasıyla C31, C96, C93, C43, C6 ve C100 nolu müşterilerin ziyaret edilerek depoya geri dönüldüğü gösterilmektedir. Şekil 4.3(b)'de çözümün şekilsel gösterimi verilmiştir.



(a) Çözüm gösterimi



(b) Gösterime karşılık gelen çözüm

Şekil 4.3. UGKA için çözüm gösterimi

4.2. Başlangıç Çözümü Fazı

UGKA algoritmasına başlangıç çözümü elde etmek için açgözlü ve rassallaştırılmış açgözlü yaklaşımlara dayalı ekleme tabanlı 2 adet çözüm kurucu sezgisel algoritma (E-ÇKS) geliştirilmiştir. Literatürde çözüm kurucu sezgisel algoritmaların farklı NP-zor problemlerin çözümünde sıklıkla kullanıldığı görülmektedir (Gajpal ve Abad, 2010; Keçeci ve ark. 2015; Yıldız ve ark. 2021). Bu algoritmaların en önemli özellikleri, kullanımlarının basit ve esnek olması ve büyük boyutlu zor problemlere kısa sürelerde

uygun çözümler üretebilmeleridir (Cordeau ve ark., 2002). Bu özelliklerinden dolayı dal-kesme ve dal-kesme-fiyat gibi kesin çözüm algoritmalarının yanısıra tavlama benzetimi, tabu arama, genetik algoritmalar gibi metasezgisel algoritmalara başlangıç çözümü elde etmek amacıyla ÇKS algoritmalarından yararlanılmaktadır. Bu nedenle bu tezde KF-E-ARP'ye başlangıç çözümü elde etmek için öncelikle E-ÇKS geliştirilmiştir. E-ÇKS, Macrina ve ark.'nın (2019a) sezgisel algoritmasına dayalıdır. Ancak, E-ÇKS hem ele alınan problemin ilave özellikleri hem de algoritmanın tasarımı açısından farklılıklar göstermektedir. Önerilen E-ÇKS'nin akış diyagramı Şekil 4.4'de verilmiştir.

E-ÇKS'de öncelikle tüm müşterilere ($i \in V$) bir kümeleme prosedürü uygulanır ve konvansiyonel ya da elektrikli araç rotası üzerinde servis sağlanacağını belirlemek üzere müşterilere i_C yada i_E etiketleri atanır. Bu etiketlemeye dayalı olarak, konvansiyonel ve elektrikli araç rotalarında hizmet görecek iki ayrık müşteri kümesi V_C ($\forall i_C \in V_C$) ve V_E ($\forall i_E \in V_E$) oluşturulur. Bu kümelere sıralı olarak uygulanan iki aşamalı ekleme sezgiseli ile konvansiyonel ve elektrikli araç rotaları oluşturularak probleme çözüm elde edilir.

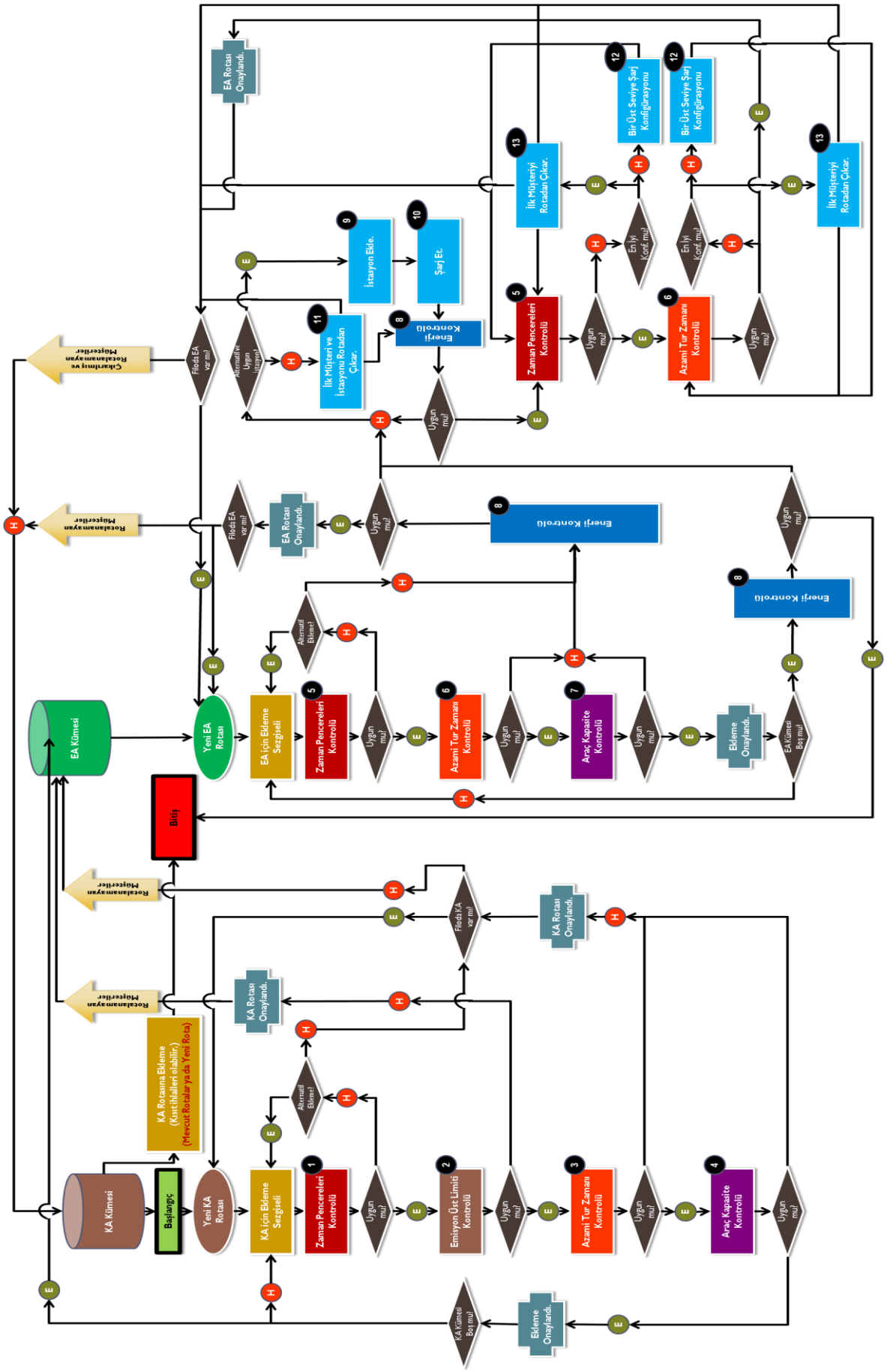
4.2.1. Kümeleme prosedürü

Kümeleme prosedüründe iki adet p_i^E ve p_i^C puanı hesaplanır. Bu puanlar, mesafe, talep miktarı ve en erken servise başlama zamanına dayalı olarak hesaplanan alt-puanların ağırlıklı ortalamasıdır. Bu puanlar, etiketlenmemiş müşterilerin $i \in V^u$, i_C veya i_E ile etiketlenmesi için kullanılırlar. Etiketlenmemiş müşteriler kümesi V^u, başlangıçta tüm müşterileri kapsar. i müşterisinin EA rotasına atanması için etiketlemede kullanılan p_i^E puanı Eş. 4.1 ile hesaplanır.

$$p_i^E = w_1(pDist_i^E) + w_2(pQ_i) + w_3(pStaDist_i^E) + w_4(pRD_i) \quad (4.1)$$

Eş. 4.1'de farklı katsayılar (w_1, w_2, w_3, w_4 ve $\sum_{j\in\{1,2,3,4\}} w_j = 1$) ile ağırlıklandırılmış alt-puanların hesaplama yöntemleri aşağıda verilmiştir. Tüm alt puanlar ve p_i^E, 1 ile 10 arasında değer almaktadır.

$$pDist_i^E = 11 - (1 + (d_i^E - d_{min}^E)/(d_{max}^E - d_{min}^E) * 9) \quad (4.2)$$



Şekil 4.4. Ekleme tabanlı çözüm kurucu sezgisel için akış diyagramı

Eş. 4.2'de d_i^E, henüz etiketlenmemiş müşteri $i \in V^u$ ile EA rotasında planlanacak şekilde etiketlenmiş tüm müşterilerin $i_E \in V_E$ barisentrik koordinatı b_E (i_E ile etiketlenmiş müşterilerin koordinatlarının aritmetik ortalaması) arasındaki mesafedir. d_{min}^E, b_E ile b_E'ye en yakın etiketlenmemiş müşteri $j^+ \in V^u$ arasındaki mesafe, d_{max}^E ise aksine b_E ile b_E'ye en uzak etiketlenmemiş müşteri $j^- \in V^u$ arasındaki mesafedir.

$$pQ_i = 11 - (1 + (q_i - q_{min})/(q_{max} - q_{min}) * 9) \tag{4.3}$$

Eş. 4.3'te q_i, henüz etiketlenmemiş müşterinin $i \in V^u$ talep miktarı, q_{min} ve q_{max} ise sırasıyla henüz etiketlenmemiş müşterilerin $i \in V^u$ sahip olduğu asgari ve azami talep miktarlarıdır.

$$pStaDist_i^E = 11 - (1 + (Sd_i^E - Sd_{min})/(Sd_{max} - Sd_{min}) * 9) \tag{4.4}$$

Eş. 4.4'te Sd_i^E, etiketlenmemiş müşteri $i \in V^u$ ile V_E kümesine son olarak eklenmiş müşteriye j_E^{last} en yakın şarj istasyonu $k^* \in R$ arasındaki mesafe, Sd_{min}, k^* istasyonu ile bu istasyona en yakın etiketlenmemiş müşteri $i^+ \in V^u$ arasındaki mesafe, Sd_{max} ise k^* istasyonu ile bu istasyona en uzak etiketlenmemiş müşteri $i^- \in V^u$ arasındaki mesafedir.

$$pRD_i^E = 11 - (1 + (RD_i^E - RD_{min}^E)/(RD_{max}^E - RD_{min}^E) * 9) \tag{4.5}$$

Eş. 4.5'te RD_i^E, etiketlenmemiş müşterinin $i \in V^u$ en erken servise başlama zamanı ile etiketlenmiş müşterilerin $i_E \in V_E$ en erken servise başlama zamanlarının ortalamasına $\overline{RD}_{j_E \in V_E}^E$ olan zaman aralığıdır. RD_{min}^E, $\overline{RD}_{j_E \in V_E}^E$ ile etiketlenmemiş müşteriler içerisinden bu ortalamaya en yakın en erken servise başlama zamanı $i^+ \in V^u$ arasındaki zaman aralığıdır. RD_{max}^E ise $\overline{RD}_{j_E \in V_E}^E$ ile etiketlenmemiş müşteriler içerisinden bu ortalamaya en uzak en erken servise başlama zamanı $i^- \in V^u$ arasındaki zaman aralığıdır.

Macrina ve ark.'nın (2019a) önerdiği sezgisel algoritmadan farklı olarak E-ÇKS, Eş. 4.3 – Eş. 4.5'deki alt puanları kullanmaktadır. Taşınan yük artışı daha fazla enerji tüketimine yol açacağından dolayı, Eş. 4.3'teki alt puan taşınan yükün etkisini kümeleme prosedürüne yansıtmaktadır. Eş. 4.4'teki alt puan, şarj istasyonuna nispeten yakın olma durumunun müşterinin elektrikli rota üzerinde hizmet görmesi için belirleyici bir rol

oynayabileceği motivasyonu ile önerilmiştir. Eş. 4.5'teki alt puan ise müşterilerin birbirine yakınlığının yanısıra müşterilerin en erken servise başlama zamanlarının da rotanın yapısına yön verebileceği motivasyonu ile eklenmiştir.

i müşterisinin konvansiyel araç rotasına atanması için etiketlemede kullanılan p_i^C puanı Eş. 4.6 ile hesaplanır.

$$p_i^C = w_5\left(pDist_i^C\right) + w_6(pQ_i) + w_7(pRD_i) \tag{4.6}$$

Eş. 4.6'da farklı katsayılar (w_5, w_6, w_7 ve $\sum_{j\in\{5,6,7\}} w_j = 1$) ile ağırlıklandırılmış altpuanların hesaplama yöntemleri aşağıda verilmiştir. Tüm alt puanlar ve p_i^C, 1 ile 10 arasında değer almaktadır.

$$pDist_i^C = 11 - (1 + (d_i^C - d_{min}^C)/d_{max}^C - d_{min}^C) * 9) \tag{4.7}$$

$$pRD_i^C = 11 - (1 + RD_i^C - RD_{min}^C)/(RD_{max}^C - RD_{min}^C) * 9) \tag{4.8}$$

Eş. 4.7'deki alt puan ve önerilen Eş. 4.8'deki alt puan, sırasıyla Eş. 4.2'deki ve Eş. 4.5'deki alt puanlar gibi hesaplanmaktadır.

Kümeleme prosedürünün başlangıcında, V_E ve V_C kümelerinin her ikisine de depo ataması yapılır. Her iterasyonda, en yüksek EA rota puanına sahip müşteri $i^* = argmax_{i\in V^u}\{p_i^E\}$ ile en yüksek KA rota puanına sahip müşteri $j^* = argmax_{j\in V^u}\{p_j^C\}$, sırasıyla i_E veya i_C şeklinde etiketlenmek üzere seçilir. Eğer $i^* \neq j^*$ ise i^* ve j^*, V^u kümesinden çıkarılarak sırasıyla V_E ve V_C kümelerine atanır. Ancak $i^* = j^*$ ise i^*, puanların birbirlerine üstünlüğüne göre ($p_{i^*}^E > p_{j^*}^C$ veya $p_{i^*}^E \leq p_{j^*}^C$) V_E ya da V_C kümesine atanır.

Etiketlenmemiş müşteriler kümesinde müşteri kalmayıncaya ($V^u = \emptyset$) kadar etiketleme işlemi devam eder. Her iterasyonun başında EA ve KA rotalarında hizmet görmek için etiketlenmiş müşterilerin barisentrik koordinatları (b_E ve b_C) ve ortalama en erken servise başlama zamanları ($\overline{RD}_{j_E\in V_E}^E$ ve $\overline{RD}_{j_C\in V_C}^C$) yeniden hesaplanır. Ayrıca, V_E kümesine en son

eklenen müşteriye j_E^{last} en yakın şarj istasyonu $k^* \in R$ yeniden belirlenir. Kümeleme prosedürünün sonunda V_E ve V_C kümeleri elde edilir.

4.2.2. Ekleme prosedürü

İki aşamalı ekleme prosedüründe, ilk aşama V_C kümesi üzerinde uygulanarak KA rotaları oluşturulurken, ikinci aşama V_E kümesi üzerinde uygulanarak EA rotaları elde edilir. İkinci aşamadaki V_E kümesi, ilk aşamada KA'lara ilişkin kısıtlar nedeniyle rotalanamayan ve bu sebeple V_E kümesine transfer edilen müşterileri $i_C \in V_C$ de içerebilir. Benzer şekilde, ikinci aşamada EA'lara ilişkin kısıtlar nedeniyle uygun biçimde rotalanmayan müşteriler V_E'den V_C kümesine transfer edilir. V_C kümesine transfer edilen bu yeni müşteriler ya daha önceden oluşturulmuş bir KA rotasına ya da yeni oluşturulacak bir KA rotasına atanırlar.

<u>İlk aşama (Konvansiyonel Araç Rotaları)</u>

Önerilen ilk yöntemde; ekleme sezgiseli rotalanmamış müşterileri Eş. 4.9 ile hesaplanan değerlere (k_C^*) göre artan şekilde sıralar ve bu listenin ilk belli sayıdaki sırasında yer alanlardan rassallaştırılmış açgözlü yaklaşım ile seçilecek bir müşteriyi $k_C^* \in V_C$ başlangıç ve bitiş depoları arasına atar. Bu atama işlemi ile uygun çözüm elde ediliyorsa KA rotası $R_{cr}^C = \{0, k_C^*, 0\}$ olarak başlatılır. R_{cr}^C rotalanmış müşterileri içeren KA rotasını, cr de oluşturulmuş konvansiyonel rotanın indeksini gösterir. Rotalanmış müşteri k_C^*, V_C kümesinden çıkartılır $V_C \longleftarrow V_C \backslash \{k_C^*\}$, $R_{cr}^C \longleftarrow R_{cr}^C \cup \{k_C^*\}$.

$$k_C^* = arg_{1 \le \lambda \le AI \mid k \in V_C \mid i,j \in R_{cr}^C \mid A_{ij}=1} \{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\} \quad (4.9)$$

($A_{ij} = 1$: i ve j düğümleri oluşturulmuş cr'nci rota üzerinde bitişiktir.)

Değerlendirme kriteri, eklenecek müşteriyi ve rota üzerindeki konumunu bu kriter değerinde enaz artışa sebep olacaklar arasından belirler.

Eş. 4.9'daki değerlendirme kriteri, rassallaştırılmış açgözlü bir yaklaşımı kullanır. Ekleme için değerlendirilecek müşteri ve konumu, artan sırada dizilen mesafe artış değerlerinden ilk sırada yer alan λ değer içinden düzgün dağılıma göre rassal olarak belirlenir. Rassallaştırma etkisi $[1, AI]$ aralığında değişen λ değeri ile sağlanır. AI alternatif

eklemelerin sayısını ifade eder ve $AI = s(V_C) * (s(R_{cr}^C) - 1)$ eşitliği ile hesaplanır. Bu eşitlikte $s(V_C)$, V_C kümesindeki eleman sayısını, diğer bir anlatımla i_C ile etiketlenmiş ve henüz rotalanmamış müşteri sayısını, $s(R_{cr}^C)$ ise R_{cr}^C rotasındaki düğüm sayısını belirtir. Bu nedenle rota içerisindeki ekleme için alternatif konum sayısı $(s(R_{cr}^C) - 1)$ değerine eşittir.

Önerilen ikinci yöntemde ise; ekleme sezgiseli rotalanmamış müşterileri Eş. 4.10 ile hesaplanan değerlere (k_C^*) göre artan şekilde sıralar ve açgözlü yaklaşım ile en düşük k_C^* değerine sahip müşteriyi $k_C^* \in V_C$ başlangıç ve bitiş depoları arasına atar. Bu atama işlemi ile uygun çözüm elde ediliyorsa KA rotası $R_{cr}^C = \{0, k_C^*, 0\}$ olarak başlatılır. R_{cr}^C rotalanmış müşterileri içeren KA rotasını, cr de oluşturulmuş konvansiyonel rotanın indeksini gösterir. Rotalanmış müşteri k_C^*, V_C kümesinden çıkartılır $V_C \longleftarrow V_C \backslash \{k_C^*\}$, $R_{cr}^C \longleftarrow R_{cr}^C \cup \{k_C^*\}$.

$$k_C^* = argmin_{k \in V_C |\, i,j \in R_{cr}^C \,|\, A_{ij}=1} \{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\} \tag{4.10}$$

($A_{ij} = 1$: i ve j düğümleri oluşturulmuş cr'nci rota üzerinde bitişiktir.)

Değerlendirme kriteri, eklenecek müşteriyi ve rota üzerindeki konumunu bu kriter değerinde enaz artışa sebep olacak şekilde belirler.

Önerilen her iki yöntemde de ekleme yapılmadan önce, ilk olarak tüm müşterilerin zaman penceresi kısıtları kontrol edilir. (Şekil 4.4 akış diyagramı Adım 1.) Tüm müşterilerin zaman penceresi kısıtları sağlanıyorsa, diğer kontrollere geçilir. Aksi durumda, tüm müşterilerin zaman penceresi kısıtları sağlanana kadar artan sırada dizilen d_k listesine göre belirlenen yöntem (Eş. 4.9 ya da Eş. 4.10) ile seçilen alternatif ekleme aday olarak değerlendirilir. Tüm alternatif eklemelerin enaz bir zaman penceresi kısıtını ihlal etmesi durumunda, eğer rotada kullanılmamış KA varsa yeni bir konvansiyonel rota başlatılır. Eğer rotada tüm KA'lar kullanılmışsa rotalanamayan müşteriler V_E kümesine transfer edilir ve V_C kümesinden çıkarılır.

Eklemeler, aşağıda belirtilen sırada kontrolü yapılan 4 farklı tip kısıttan biri ihlal edilinceye kadar, değerlendirme kriterine (Eş. 4.9 ya da Eş. 4.10) göre seçilen müşterinin $k_C^* \in V_C$, R_{cr}^C rotasında en uygun pozisyona atanması ile devam eder.

- Tüm alternatif eklemelerin değerlendirilmesine rağmen enaz bir zaman penceresi kısıtının ihlal edilmesi (Şekil 4.4 akış diyagramı Adım 1)
- Ekleme yapıldığı takdirde emisyon üst limitinin aşılması
  (Böyle bir durumda filoda müsait KA olup olmadığına bakılmaksızın rotalanamayan tüm müşteriler doğrudan V_E kümesine transfer edilir ve ikinci aşama başlar) (Şekil 4.4 akış diyagramı Adım 2)
- Ekleme yapıldığı takdirde azami tur tamamlanma zamanının aşılması (Şekil 4.4 akış diyagramı Adım 3)
- Ekleme yapıldığı takdirde araç yük kapasitesinin aşılması (Şekil 4.4 akış diyagramı Adım 4)

Bu kontrol basamaklarından birinde kısıt ihlali olması durumunda prodesür eklemeleri durdurur ve yeni bir rota başlatılmasını değerlendirir. Kısıt ihlali olduğunda cr indeks değerinin, filodaki KA sayısı olan n^C değerine eşit olması durumunda ilk aşama biter ve rotalanamayan müşterilerin $i_C \in V_C$, V_E kümesine transfer edilmesi ile ikinci aşama başlar.

İkinci aşama (Elektrikli Araç Rotaları)

İkinci aşamadaki müşteri ekleme prosedürü de ilk aşamadaki yaklaşıma benzer şekilde aşağıdaki değerlendirme kriterlerinden (rassallaştırılmış açgözlü veya açgözlü) biri dikkate alınarak uygulanır.

$$k_E^* = arg_{1\le\lambda\le AI \mid k\in V_E \mid i,j \in R_{cr}^E \mid A_{ij}=1}\{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\} \quad (4.11)$$

($A_{ij} = 1$: i ve j düğümleri oluşturulmuş cr'nci rota üzerinde bitişiktir.)

$$k_E^* = argmin_{k\in V_E \mid i,j \in R_{cr}^E \mid A_{ij}=1}\{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\} \quad (4.12)$$

($A_{ij} = 1$: i ve j düğümleri oluşturulmuş cr'nci rota üzerinde bitişiktir.)

Müşteri eklemelerine ilaveten rotanın enerji uygunluğuna göre şarj istasyonu eklemeleri de ikinci aşamada dikkate alınır. Kısıt ihlali ya da son müşterinin eklenmesi ile eklemelere son verildiğinde, oluşturulan EA rotası enerji kontrolünden geçirilir (Şekil 4.4 akış diyagramı Adım 8). Eğer araç rotası enerji uygunsa, filodaki müsait EA sayısına bağlı olarak yeni rota ile müşteri eklemelerine devam edilir. Aksi durumda Eş. 4.13 ile en yakın

şarj istasyonu $k_S^* \in R$ rotaya eklenir (Şekil 4.4 akış diyagramı Adım 9). Enerji uygunluk sağlanana kadar aynı şekilde şarj istasyonu eklemeleri devam eder. Eklenen şarj istasyonları öncelikle en yavaş şarj konfigürasyonu ile tam kapasite şarj sağlayacak şekilde rotaya eklenirler (Şekil 4.4 akış diyagramı Adım 10).

$$k_S^* = \ argmin_{k \in R |\ i,j \in R_{cr}^E \setminus \{(j^{u+1}),\ldots,(j^{s(R_{cr}^E)}\} \mid A_{ij}^n = 1} \{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\} \tag{4.13}$$

Şarj istasyonu $k_S^* \in R$ rotadaki ardışık müşteriler $i,j \in R_{cr}^E$ arasına eklendiğinde, Eş. 4.14'e bağlı olarak i düğümünden bu şarj istasyonuna erişilebilir olmalıdır. Eş. 4.14'te, y_i, i müşterisine varıldığında pil şarj seviyesini ve $h(u_{ik}^E)$, $i-k$ arasında taşınan yüke bağımlı şarj tüketim hızını ifade etmektedir. EA, $k_S^* \in R$ şarj istasyonunda tam kapasite şarj olduktan sonra j müşterisine erişebilmelidir (Eş. 4.15). Eş. 4.16'ya bağlı olarak $k_S^* \in R$ şarj istasyonunda tam kapasite şarj sonrası j müşterisine ulaşıldıktan sonra kalan pil şarj seviyesi, j müşterisine i müşterisinden doğrudan erişildiğinde kalan pil şarj seviyesinden y_j^{WR} büyük olmalıdır. Aksi durumda şarj istasyonuna uğranılması anlamlı olmayacaktır. Eğer bu eşitsizlikleri sağlayabilen rotaya eklenebilecek uygun şarj istasyonu kalmaz ise, enerji uygun rota elde edilene kadar rotadaki ilk müşteri ve şarj istasyonu rotadan çıkarılır (Şekil 4.4 akış diyagramı Adım 11).

$$y_i - h(u_{ik}^E) * d_{ik} \geq 0 \tag{4.14}$$

$$Q^E - h\left(u_{kj}^E\right) * d_{kj} \geq 0 \tag{4.15}$$

$$Q^E - h\left(u_{kj}^E\right) * d_{kj} \geq y_j^{WR} \tag{4.16}$$

Şarj istasyonu eklemeleri ile enerji uygun bir rota elde edildikten sonra, şarj süresinden doğacak gecikmeler nedeniyle rota tekrardan zamana bağlı kısıtlar açısından kontrol edilir. Eğer zamana bağlı enaz bir kısıt ihlal edilirse ilk eklenenden başlamak üzere kısıt sağlanana kadar şarj istasyonları bir üst şarj konfigürasyonuna yükseltilir (Şekil 4.4 akış diyagramı Adım 12). Zaman uygun rota elde etmek için zaman penceresi ihlali olan müşterinin öncülü tüm şarj istasyonlarındaki konfigürasyonlar en üst seviyeye yükseltilene kadar bu işlem devam eder. Buna rağmen zaman uygun rota elde edilemezse algoritma

zamana bağlı kısıtları sağlayana kadar rotadaki ilk müşteriyi rotadan çıkarır (Şekil 4.4 akış diyagramı Adım 13).

Filoda EA kalmadığında tüm rotalanamayan müşteriler aynı yaklaşımlar ile son oluşturulan KA rotasına eklenir. Başka bir alternatif yoksa böyle bir ekleme kısıt ihlallerine izin verebilir. İkinci aşamanın sonunda rota sonunda tüketilmeyen pil şarj seviyeleri ise son şarj işleminden düşülür.

4.3. Uyarlamalı Geniş Komşu Arama Fazı

Başlangıç fazında elde edilen çözümü iyileştirmek için UGKA algoritması geliştirilmiştir. UGKA algoritmasının sözde kodu Şekil 4.5'de verilmiştir. Geliştirilen UGKA algoritması içerisinde aşağıda belirtilen iki farklı yaklaşım ile komşular üretilmiştir. Bu yaklaşımlar ile oluşturulan komşuluk mekanizmaları $km_i \in KM$ (i'nci komşuluk mekanizması) içerisinde probleme özgü bozma (çıkarma) ve tamir etme (ekleme) stratejileri bulunmaktadır.

- **Bir rotadan diğerine müşteri transferi:** Bu yaklaşım ile toplam 48 adet komşuluk mekanizması önerilmiştir. 16 adedi konvansiyonel rotalar arasında müşteri transferine dayanırken 16 adedi de elektrikli rotalar arası müşteri transferine dayanmaktadır. Geriye kalan 16 adedi ise farklı tipteki rotalar arasında müşteri transferi sağlamaktadır.

- **Yeni rota açma:** Bu yaklaşım ile toplam 8 adet komşuluk mekanizması önerilmiştir. 4 adedi müşterileri konvansiyonel rotalardan rassal ya da açgözlü yaklaşımla çıkarmakta ve başlangıç çözümü elde eden çözüm kurucu sezgiseldeki gibi yeni rota oluşturmaktadır. Diğer 4 adedi ise aynı yaklaşımla elektrikli rotalardan müşteri çıkarmakta ve yeni rota oluşturmaktadır.

Algoritma 2: UGKA Algoritması Genel Çerçevesi

1: Başlangıç fazı ile uygun S_0 üret, $S \longleftarrow S_0$, $S_{eniyi} \longleftarrow S_0$
2: $w_{km_i}^0$, $\pi_{km_i}^0$ ve $\theta_{km_i}^0$ değerlerini komşuluk mekanizmalarına $(km_i \in KM)$, s, $n_{ilk_ağırlıklar}$, $n_{tekrar_başla}$, $n_{iyileşmeYok_Sıcak}$, T_0, n_{Son} ve $n_{\text{İ}yileşmeYok_Son}$ başlangıç değerlerini ata.
3: # of Iters $\longleftarrow$ 1, $r_{\text{İ}yileşmeYok_Son} \longleftarrow 0$, $r_{iyileşmeYok_Sıcak} \longleftarrow 0$, # of NoNeighbor1 $\longleftarrow$ 0, # of NoNeighbor2 $\longleftarrow$ 0, # of Generations $\longleftarrow$ 0, $N_{yeniden_ısıt} \longleftarrow 1$.
4: **while** ($r_{\text{İ}yileşmeYok_Son} < n_{\text{İ}yileşmeYok_Son}$) **and** (# of Iters < n_{Son}) **do**
5: **if** ((# of Iters **mod** s) = 0) **then**
6: $w_{km_i}^{s+1} = (1-r)w_{km_i}^s + (r)\pi_{km_i}^s/\theta_{km_i}^s$ (Ağırlıkları güncelle)
7: $\pi_{km_i}^s \longleftarrow \pi_{km_i}^0$, $\theta_{km_i}^s \longleftarrow \theta_{km_i}^0$, $(km_i \in KM)$
8: **end if**
9: **if** (# of NoNeighbor1 = $n_{ilk_ağırlıklar}$) **then**
10: $w_{km_i}^0$, $\pi_{km_i}^0$ ve $\theta_{km_i}^0$ değerlerini komşuluk mekanizmalarına ata $(km_i \in KM)$
11: # of NoNeighbor1 $\longleftarrow$ 0
12: **end if**
13: **if** (# of NoNeihgbor2 = $n_{tekrar_başla}$) **then**
14: $S \longleftarrow S_0$
15: # of NoNeighbor2 $\longleftarrow$ 0
16: **end if**
17: Komşuluk mekanizmasını km_i^* rulet stratejisi($w_{km_i}^s$) ile seç
18: $\theta_{km_i^*}^s \longleftarrow \theta_{km_i^*}^s + 1$
19: $S' \longleftarrow km_i^*(S)$
20: **if** (S' uygun çözüm) **then**
21: $S' \longleftarrow \dot{I}P(S')$
22: Komşu çözümü TB prosedürü (Δ, T) ile mevcut çözüm olarak kabul et ya da reddet
23: **if** ($f(S') < f(S_{eniyi})$) **then**
24: $\pi_{km_i^*}^s = \pi_{km_i^*}^s + S_1$
25: $S \longleftarrow S'$
26: $S_{eniyi} \longleftarrow S$
27: $r_{\text{İ}yileşmeYok_Son} \longleftarrow 0$
28: $r_{iyileşmeYok_Sıcak} \longleftarrow 0$
29: **end if**
30: **else then**
31: $r_{\text{İ}yileşmeYok_Son} \longleftarrow r_{\text{İ}yileşmeYok_Son} + 1$
32: $r_{iyileşmeYok_Sıcak} \longleftarrow r_{iyileşmeYok_Sıcak} + 1$
33: **end else**
34: **if** ($f(S') \leq f(S)$ **and** $f(S') > f(S_{eniyi})$) **then**
35: $\pi_{km_i^*}^s = \pi_{km_i^*}^s + S_2$
36: $S \longleftarrow S'$
37: **end if**
38: **if** ($f(S') > f(S)$ **and** (TB prosedürü (Δ, T) ile komşu çözüm kabul edildi)) **then**
39: $\pi_{km_i^*}^s = \pi_{km_i^*}^s + S_3$
40: $S \longleftarrow S'$
41: **end if**

Şekil 4.5. Önerilen UGKA algoritması sözde kodu

42: # of NoNeighbor1 ⟵ 0
43: # of NoNeighbor2 ⟵ 0
44: # of Generations ⟵ # of Generations + 1
45: **end if**
46: **else then**
47: $\pi^{s}_{km_i^*} = \pi^{s}_{km_i^*} - S_4$
48: # of NoNeighbor1 ⟵ # of NoNeighbor1 + 1
49: # of NoNeighbor2 ⟵ # of NoNeighbor2 + 1
50: **end else**
51: **if** ((# of Iters **mod** s) = 0) **then**
52: $S \longleftarrow \text{YA}(S)$
53: **if** ($f(S) < f(S_{eniyi})$) **then**
54: $S_{eniyi} \longleftarrow S$
55: $r_{\text{İyileşmeYok_Son}} \longleftarrow 0$
56: $r_{iyileşmeYok_Sıcak} \longleftarrow 0$
57: **end if**
58: **end if**
59: **if** ((# of Generations **mod** $n_{soğutma}$) = 0) **then**
60: $T = T * c$
61: **end if**
62: **if** ($(r_{iyileşmeYok_Sıcak}$ **mod** $n_{iyileşmeYok_Sıcak}) = 0$)
63: $T = T_0 * ((100 - N_{yeniden_ısıt} * 5) \,/\, 100)$
64: $r_{iyileşmeYok_Sıcak} \longleftarrow 0$
65: $N_{yeniden_ısıt} \longleftarrow N_{yeniden_ısıt}$ + 1
66: **end if**
67: # of Iters ⟵ # of Iters + 1
68: **end while**
69: **return** S_{eniyi} ve $f(S_{eniyi})$

$w^0_{km_i}$: Başlangıç ağırlıkları
$\pi^0_{km_i}$: Başlangıç toplam puanları
$\theta^0_{km_i}$: Başlangıç çağrılma sayıları
s : Segment uzunluğu
$n_{ilk_ağırlıklar}$: Ağırlıkların başlangıç değerlerine döneceği iterasyon sayısı
$n_{tekrar_başla}$: Mevcut çözümün başlangıç çözümüne döneceği iterasyon sayısı
$n_{iyileşmeYok_Sıcak}$: İyileşme olmazsa sıcaklığın tekrardan yükseltileceği iterasyon sayısı
$n_{İyileşmeYok_Sıcak}$: İyileşme olmazsa algoritmanın sonlanacağı iterasyon sayısı
T_0 : Başlangıç sıcaklığı
n_{Son} : Toplam iterasyon sayısı
S_0 : Başlangıç çözümü
S_{eniyi} : Eniyi çözüm
S : Mevcut çözüm
S' : Komşu çözüm
$f(\ )$: Çözümün amaç fonksiyonu değeri
İP : İyileştirme Prosedürü
TB : Tavlama Benzetimi
YA : Yerel Arama

Şekil 4.5. (devam) Önerilen UGKA algoritması sözde kodu

Tez kapsamında tekil bir komşuluk mekanizması bir çıkarma ve bir ekleme sezgiseli çiftinden oluşmaktadır. Bu yaklaşım ile komşuluk mekanizmalarının seçimi, çıkarma ve ekleme sezgisellerinin ayrı ayrı seçimi yerine çiftlerin seçimi olarak değerlendirilmiştir. Ayrıca, algoritma içerisinde komşu çözüm oluşturulurken yalnızca müşterilerin çıkarılıp eklenmesi yaklaşımı kullanılmıştır. Şarj istasyonlarının çıkarılması ve eklenmesi söz konusu değildir.

Herbir iterasyonda komşuluk mekanizmalarının seçimi rulet seçim stratejisi ile yapılmaktadır. Ruletteki sektör alanı, komşuluk mekanizmalarının önceki iterasyonlarda mevcut çözümde meydana getirdikleri iyileştirme performanslarına göre değer alan ağırlıklara $w^s_{km_i}$ (i'nci komşuluk mekanizmasının s'nci segmentteki ağırlığı) göre

ayarlanmaktadır. Segment belli sayıdaki ardışık iterasyondan oluşmaktadır. Bu sebeple komşuluk mekanizması i için sektör alanı Eş. 4.17 ile hesaplanmaktadır. Bu alan i'nci komşuluk mekanizmasının diğerleri arasında seçilme olasılığına $P(km_i)$ eşittir.

$$P(km_i) = w^s_{km_i} \,/\, \sum_{i \in KM} w^s_{km_i} \tag{4.17}$$

Ağırlıklar her segment "s" başında Eş. 4.18 ile güncellenmektedir. Bu eşitlikte $w^{s+1}_{km_i}$ km_i'nin bir önceki segmenti takip eden mevcut ağırlığını, reaksiyon faktörü r ise [0,1] arasında değer alıp etki derecesini, $\pi^s_{km_i}$, segment sonunda i'nci komşuluk mekanizmasının aldığı toplam puanı ve $\theta^s_{km_i}$ i'nci komşuluk mekanizmasının diğerleri arasından kaç defa seçildiğini tanımlamaktadır.

$$w^{s+1}_{km_i} = (1-r)w^s_{km_i} + (r)\pi^s_{km_i}/\theta^s_{km_i} \tag{4.18}$$

Her segment başında $\pi^s_{km_i}$ = $\theta^s_{km_i}$ = 0'dır. i'nci komşuluk mekanizması km_i iterasyon içerisinde seçilirse, $\pi^s_{km_i}$ aşağıda belirtilen puan kadar artırılırken, $\theta^s_{km_i}$ = $\theta^s_{km_i}$ + 1 olarak güncellenmektedir. İterasyon içerisinde seçilmeyen diğer komşuluk mekanizmalarının $\pi^s_{km_i}$ ve $\theta^s_{km_i}$ değerleri ise aynı kalır.

- S_1 , eğer eniyi çözüm iyileştirildiyse,
- S_2 , eğer iterasyondaki mevcut çözüm iyileştirildiyse,
- S_3 , eğer iterasyondaki mevcut çözüm iyileştirilmedi ancak elde edilen komşu çözüm tavlama benzetimi (TB) ile seçildiyse,
- S_4 , eğer komşuluk mekanizması tüm kısıtları sağlayan bir komşu çözüm üretemediyse. (S_4, bu komşuluk mekanizmasının seçilme olasılığını azaltmak üzere negatif bir etkiye sahip olmalıdır.)

Eğer komşu çözüm (S') mevcut çözümü (S) iyileştiriyorsa, yeni mevcut çözüm olmakta ($S \leftarrow S'$) ve yeniden iyileştirilene kadar mevcut çözüm olarak kalmaktadır. Aksi takdirde mevcut çözümden daha kötü olan komşu çözüm, $P_{kabul} = e^{-\Delta/T}$ kabul olasılık değerine göre seçilebilmektedir. Seçim kriterindeki $\Delta = f(S') - f(S)$'dır. Seçilme olasılığını

doğrudan etkileyen başlangıç sıcaklığı T_0, herbir soğutma döngüsü $n_{soğutma}$ sonrası, soğutma çizelgesi $T_{n+1} = T_n * c$ ile kademeli olarak soğutulmaktadır. Böylece çeşitlendirme etkisi yavaş yavaş azaltılırken, yoğunlaşma etkisi yinelemeli olarak yükseltilmektedir. Soğutma çizelgesindeki soğutma oranı c, 0 ile 1 arasında bir değer almaktadır.

Eğer belli sayıda iterasyon $n_{\text{İyileşmeYok_Sıcak}}$ sonunda bulunan eniyi çözümde iyileşme olmazsa, algoritmanın yerel eniyi çözüme takılmış olabileceği varsayılmakta ve TB'deki sıcaklık değeri tekrardan yeni bir T sıcaklığına yükseltilmektedir. Yükseltme işlemi, $T = T_0 * ((100 - N_{yeniden_ısıt} * 5) \,/\, 100)$ eşitliği ile yapılmaktadır. Bu eşitlikte $N_{yeniden_ısıt}$ sıcaklığın daha önceden kaç defa yükseltildiğini ifade etmektedir. Böylece her sıcaklık yükseltme işleminde başlangıç sıcaklığın daha az bir oranına sıcaklığın yükseltilmesi hedeflenmektedir. Bu çerçevede mevcut çözüme kıyasla daha kötü olan komşu çözümler algoritmanın başlarında daha yüksek seçilme olasılığına sahipken, bu olasılık algoritma süresince sonlara doğru azalmaktadır.

Mevcut çözümlerin yakınsama grafiği analiz edildiğinde, bazı koşumlarda algoritmanın erken safhalarında bir çözüme takılı kalabildiği gözlemlenmektedir. Bu durum aşağıdaki nedenlerden kaynaklanabilmektedir.

- Algoritma zamansız biçimde yerel eniyi çözüme takılı kalıyor olabilir.
- Ulaşılan sıcaklık değeri ile mevcut çözümden daha kötü çözümleri kabul etmek mümkün olmayabilir.
- Geçmiş performanslarına göre öne çıkan komşuluk mekanizmaları ile mevcut çözümden yeni komşu çözümler üretmek mümkün olmayabilir.

Bu duruma çözüm bulmak için birtakım mekanizmalar tanımlanmıştır. Öncelikle eğer belli bir iterasyon sayısı $n_{ilk_ağırlıklar}$ süresince komşu üretilemezse tüm komşuluk mekanizmalarının mevcut ağırlık değerlerine başlangıç ağırlıkları atanmaktadır. Bu şekilde tüm komşuluk mekanizmalarının tekrardan aynı seçilme olasılıklarına sahip olması sağlanır. Aynı şekilde, eğer belli bir iterasyon sayısında ($n_{tekrar_başla}$) komşu çözüm üretilemezse mevcut çözümün komşuluk mekanizmaları ile yeni komşu üretilemeyecek kadar sıkı olduğu kabul edilmekte ve algoritma aramaya başlangıç çözümünden devam

etmektedir. Bu yaklaşım UGKA'nın çoklu-başlangıç özelliğine sahip gibi davranmasını sağlamaktadır. Ayrıca her segment (s) sonunda yerel arama (YA) uygulanmaktadır. YA'da mevcut çözümdeki rotalardan rassal seçilen bir rota üzerinde olası tüm müşteri değişimleri denenerek mevcut çözüm iyileştirilmektedir.

Çalışma kapsamında UGKA için iki durdurma kriteri kullanılmıştır:

- Belli bir iterasyon sayısı $n_{\text{İyileşmeYok_Son}}$ süresince bulunan eniyi çözümde iyileşme sağlanmazsa,
- İterasyon sayısı toplam iterasyon sayısına (n_{Son}) ulaşırsa.

Sonuç olarak UGKA, durdurma kriterlerinden biri sağlanana kadar çözümleri yinelemeli olarak iyileştirir ve durdurma kriteri sağlandığında bulunan eniyi çözümü problemin çözümü olarak rapor eder.

4.3.1. Uygun olmayan çözümlerin ele alınması

Probleme özgü ve etkin bir cezalandırma fonksiyonunun tasarlanmasının zorluğu nedeniyle, UGKA'da uygun olmayan çözümlere izin verilmemektedir. Bu nedenle, ekleme yapılırken uygun olmayan çözümler ile karşılaşıldığında uygun çözümler elde etmek üzere komşuluk mekanizmaları içerisinde:

- Çıkarmalar listesindeki müşterileri sırasıyla ekleme yapmak için deneyen,
- Ekleme yapılacak rotaları değiştiren,
- Rota içerisindeki ekleme yapılacak pozisyonları değiştiren,

yapılar tanımlanmıştır. Bu yapılar araç kapasitesi, zaman penceresi, azami tur tamamlanma zamanı ve emisyon üst limiti (sadece konvansiyonel rotalar için) kısıtlarını inceleyerek farklı ekleme alternatiflerini dikkate almaktadır. Tüm denemelere rağmen uygun çözüm elde edilememesi durumunda uygun olmayan çözüm tamir edilmek yerine ihmal edilmekte ve algoritma son uygun çözüm ile devam etmektedir. Tamir etme stratejisinin seçilmemesindeki diğer bir neden ise çok kısıtlı bir problemde boz operatörlerinden sonra tamir mekanizmasının işe yaramama olasılığının yüksek olmasıdır. Özet olarak, işlem

yükü; uygun olmayan çözümü tamir etmek yerine çok fazla ihtimali deneyerek uygun çözüm elde etmeye odaklanmıştır. Ayrıca, uygun olmayan çözümlere izin verildiğinde her uygun olmayan komşu çözümde kısıt ihlallerinin büyüklüklerinin hesaplanması da ek zaman getirecektir (Vincent ve ark., 2021).

Bunun yanısıra, algoritma da enerji uygunluğu sağlamak için EA rotalarına açgözlü yaklaşımla şarj istasyonlarının eklendiği, şarj istasyonu eklendikten sonra zaman pencerelerinin ihlal edilmesi durumunda şarj konfigürasyonlarının bir üst seviyeye çıkarıldığı kısmi bir tamir mekanizması kullanılmıştır.

4.3.2. İyileştirme prosedürü

Mevcut çözümden (S) komşu çözüm (S') elde etmek için sadece müşteriler rotalardan çıkarılıp, yeni rotalara eklenmektedir. Böyle bir stratejinin uygulanması sonucunda oluşturulan komşu çözümler içerisinde gereksiz şarj istasyonları kalmakta ya da şarj istasyonlarında gereğinden fazla enerji transferleri olmaktadır. Bu sorunları düzeltmek için Şekil 4.6'da sözde kodu belirtilen iyileştirme prosedürü (İP) komşu çözümler üzerinde uygulanmaktadır.

İP'de elektrikli rotalarda sondan başa doğru şarj istasyonlarından bir önceki müşterilerin şarj seviyesi incelenmektedir. Eğer *i*'nci sırada incelenen müşterinin şarj seviyesi, *i+1*'nci sıradaki şarj istasyonuna uğramadan sonraki şarj istasyonuna ya da depoya ulaşmaya yetiyorsa, *i+1*'nci sıradaki şarj istasyonuna gerek olmadığı anlaşılmakta ve bu şarj istasyonu rotadan çıkarılmaktadır. Ancak, eğer *i+1*'nci sıradaki şarj istasyonuna şarj seviyesi nedeniyle uğramak zorunluysa, bu defa bu şarj istasyonunda transfer edilen şarj miktarı sorgulanmaktadır. Değerlendirme sonucunda *i+1*'nci sıradaki şarj istasyonunda transfer edilen şarj miktarı bir sonraki şarj istasyonuna ya da depoya ulaşılabilecek minimum seviyeye indirilmektedir.

Algoritma 3: İyileştirme Prosedürü

1: s_CS ⟵ incelenen rotanın $R_{incelenen}$ son şarj istasyonunun rotadaki konumu
2: **while** (incelenmeyen şarj istasyonu mevcut) **do**
3: SoC ⟵ $y_{(s_CS-1)}$
4: i ⟵ V(s_CS-1)
5: **while** ($i \neq CS$ **or** $i \neq 0$) **do**
6: SoC ⟵ SoC – **ŞarjTüketimMiktarı**(d_{ij}, $h(u_{ij}^{E})$){j ⟵ i+1} {(s_CS)'nci sıradaki istasyonu atla}
7: **if** ("SoC > 0" **and** (j = CS **or** j = 0)) **then**
8: $R_{incelenen} \leftarrow R_{incelenen}$ \ CS(s_CS)
9: **end if**
10: **if** ("SoC < 0" **and** (j = CS **or** j = 0)) **then**
11: $\theta^{m}_{ij\text{CS(s_CS)}} \leftarrow argmin\{\theta^{m}_{ij\text{CS(s_CS)}}\} \mid y_j = 0$
12: **end if**
13: i ⟵ $(V_0 \cup R)_{(i+1)}$
14: **end while**
15: s_CS ⟵ İncelenen rotanın $R_{incelenen}$, incelenmeyen bir önceki şarj istasyonunun rotadaki konumu (eğer incelenmeyen şarj istasyonu varsa)
16: **end while**

$R_{incelenen}$: İncelenen rota
$y_{(s_CS-1)}$: (s_CS − 1)'nci düğüme varıldığında pil şarj seviyesi
V(s_CS-1): (s_CS-1)'nci sıradaki düğüm
CS : Şarj istasyonu
0 : Depo
d_{ij} : i-j düğümleri arası mesafe
$h(u_{ij}^{E})$: i-j düğümleri arası taşınan yüke bağlı birim şarj tüketim hızı
CS(s_CS) : s_CS'nci konumdaki şarj istasyonu
$\theta^{m}_{ij\text{CS(s_CS)}}$: i-j düğümleri arasında s_CS'nci konumdaki şarj istasyonunda m şarj konfigürasyonu ile transfer edilen enerji miktarı
$(V_0 \cup R)_{(i+1)}$: (i+1)'inci sıradaki düğüm

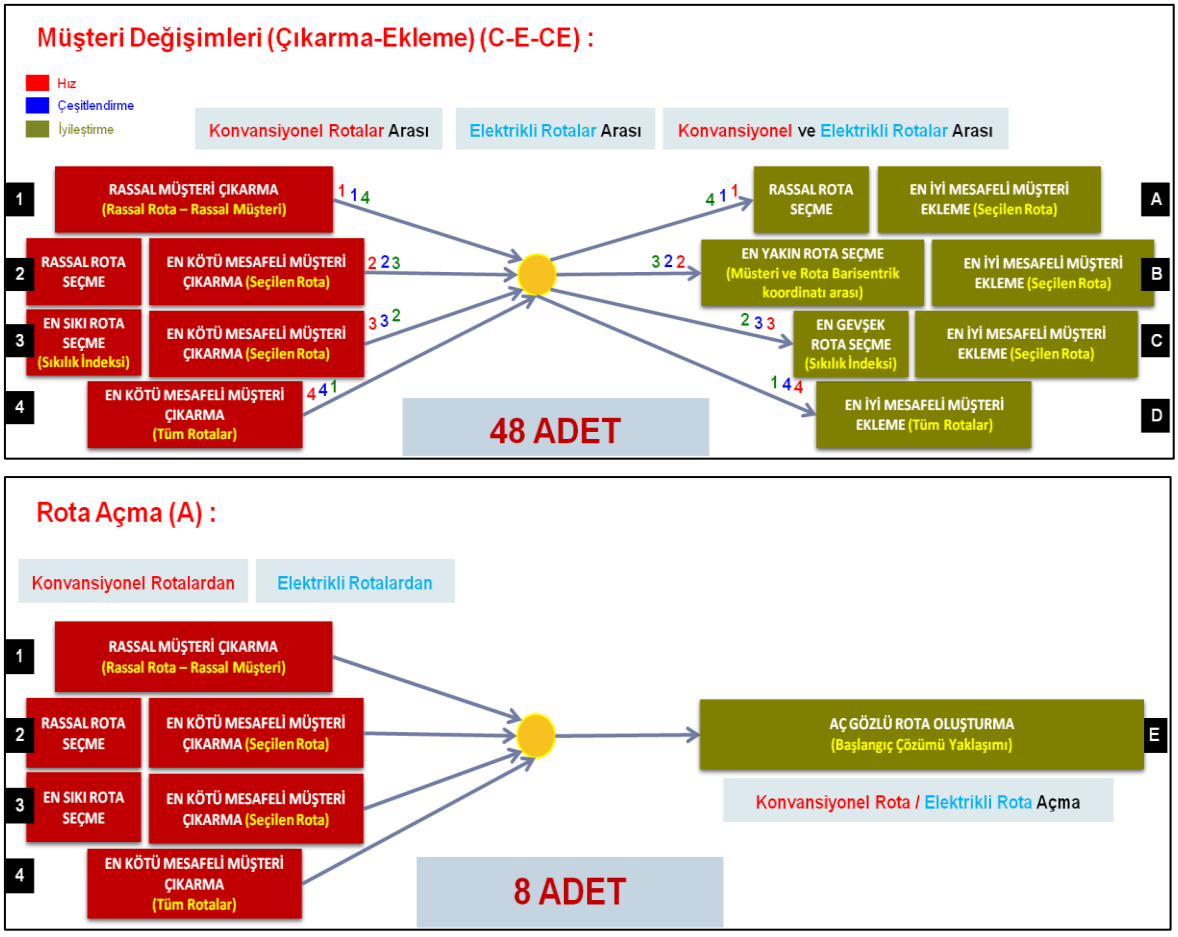
Şekil 4.6. İyileştirme prosedürü sözde kodu

4.3.3. Komşuluk mekanizmaları

UGKA içerisinde 4 adet çıkarma ve 5 adet ekleme operatörü kullanılmıştır. Herbir operatör bir etiket ile isimlendirilmiştir. Etiketin, başındaki büyük harf Bölüm 4.2'de açıklanan komşu üretme metodunu temsil etmektedir. "C" harfi konvansiyonel rotalar arasındaki müşteri transferini, "E" harfi elektrikli rotalar arasındaki müşteri transferini ve "CE" harfleri farklı tipteki rotalar arasındaki müşteri transferini ifade etmektedir. "A" harfi ise yeni rota açmayı temsil etmektedir. Eğer komşuluk mekanizmasının etiketi "CE(3B)" ise, farklı tipteki rotalar arasında müşteri transferi "CE" yapıldığı, (3) numaralı çıkarma operatötünün ve (B) ekleme operatörünün kullanıldığı anlaşılmaktadır. Yeni rota açma komşuluk mekanizmaları ise "A(1cE)" gibi isimler ile etiketlenmektedir. Müşteri transferi etiketlerinden farklı olarak küçük harfler "c" ve "e", sırasıyla konvansiyonel ve elektrikli rota açılmasını temsil etmektedir. Komşuluk mekanizmalarının listesi Çizelge 4.1'de ve özet görünümü Şekil 4.7'de verilmiştir. Literatürden farklı olarak açgözlülük ve rassallık, bütüncül bir yaklaşım yerine, hem çıkarma operatöründe hem de ekleme operatöründe rotanın ve müşterinin seçimi için ayrı ayrı uygulanabilmektedir.

Çizelge 4.1. Komşuluk mekanizmaları listesi

Mekanizma Numarası	Mekanizma Etiketi	Mekanizma Numarası	Mekanizma Etiketi	Mekanizma Numarası	Mekanizma Etiketi	Mekanizma Numarası	Mekanizma Etiketi
1	C(1A)	17	E(1A)	33	CE(1A)	49	A(1cE)
2	C(1B)	18	E(1B)	34	CE(1B)	50	A(1eE)
3	C(1C)	19	E(1C)	35	CE(1C)	51	A(2cE)
4	C(1D)	20	E(1D)	36	CE(1D)	52	A(2eE)
5	C(2A)	21	E(2A)	37	CE(2A)	53	A(3cE)
6	C(2B)	22	E(2B)	38	CE(2B)	54	A(3eE)
7	C(2C)	23	E(2C)	39	CE(2C)	55	A(4cE)
8	C(2D)	24	E(2D)	40	CE(2D)	56	A(4eE)
9	C(3A)	25	E(3A)	41	CE(3A)		
10	C(3B)	26	E(3B)	42	CE(3B)		
11	C(3C)	27	E(3C)	43	CE(3C)		
12	C(3D)	28	E(3D)	44	CE(3D)		
13	C(4A)	29	E(4A)	45	CE(4A)		
14	C(4B)	30	E(4B)	46	CE(4B)		
15	C(4C)	31	E(4C)	47	CE(4C)		
16	C(4D)	32	E(4D)	48	CE(4D)		



Şekil 4.7. Komşuluk mekanizmaları özet görünümü

Çıkarma Operatörleri

Bu bölümde çıkarma operatörleri açıklanmaktadır.

- Rassal Müşteri Çıkarma (1): Bu operatör öncelikle müşteri çıkarmak üzere rassal olarak ψ adet KA ya da EA rotasını belirlemektedir. Eğer etiket "C" ise ψ, $[1, R^C * RRP]$ aralığında değişmektedir. R^C, mevcut çözümdeki KA rota sayısını ifade ederken, RRP ise rota çıkarma yüzdesidir. Eğer etiket "E" ise ψ, $[1, R^E * RRP]$ aralığında değişmektedir. R^E, mevcut çözümdeki EA rota sayısını ifade etmektedir. Son olarak, eğer etiket "CE" ise ψ, 1'e eşitlenmektedir. Daha sonra rassal olarak seçilen ψ adet rotanın herbirinden, yine rassal olarak belirlenen χ müşteri çıkarılmakta ve çıkarılanlar listesine $L_{çıkarmalar}$ eklenmektedir. χ, $[1, s(R_{cr}) * CRP]$ aralığında değer almaktadır. $s(R_{cr})$, seçilen rotadaki müşteri sayısını ifade ederken CRP, müşteri çıkarma yüzdesini ifade etmektedir. Operatörün sözde kodu Şekil 4.8'de verilmiştir.

Algoritma 4: Rassal Müşteri Çıkarma (1)

1: Müşteri çıkarılacak rota sayısını ψ, rassal olarak belirle.
{"C": $1 \leq \psi \leq (R^C * RRP)$, $\psi \in Z^+$}
{"E": $1 \leq \psi \leq (R^E * RRP)$, $\psi \in Z^+$}
{"CE" : $\psi = 1$}
2: $rss \longleftarrow 0$
3: **while** ($rss \neq \psi$) **do**
4: Sonraki rotayı rassal seç
5: $\chi \sim \cup [1, s(R_{cr}) * CRP]$
6: $mss \longleftarrow 0$
7: **while** ($mss \neq \chi$) **do**
8: Seçilen rotadan çıkarılacak müşteriyi j^* rassal seç
$L_{çıkarmalar} \longleftarrow L_{çıkarmalar} \cup j^*$
9: $mss \longleftarrow mss + 1$
10: **end while**
11: $rss \longleftarrow rss + 1$
12: end while

ψ	: Müşteri çıkarılacak rota sayısı
RRP	: Rota çıkarma yüzdesi
rss	: Rota sayısı sayacı
χ	: Çıkarılacak müşteri sayısı
$s(R_{cr})$	: Seçilen rotadaki müşteri sayısı
CRP	: Müşteri çıkarma yüzdesi
mss	: Müşteri sayısı sayacı
j^*	: Seçilen rotadan çıkarılacak müşteri
$L_{çıkarmalar}$	: Çıkarılanlar listesi

Şekil 4.8. Rassal müşteri çıkarma sözde kodu

- Rassal Rota Seçme ve En Kötü Mesafeli Müşteri Çıkarma (2): Bu operatör, en fazla mesafe artışına neden olan χ adet müşteriyi, rassal seçilen herbir KA ya da EA rotasından açgözlü yaklaşım ile seçmektedir. Operatörün sözde kodu Şekil 4.9'da verilmiştir.

Algoritma 5: Rassal Rota Seçme ve En Kötü Mesafeli Müşteri Çıkarma (2)

1: Müşteri çıkarılacak rota sayısını ψ, rassal olarak belirle.
{"C": $1 \leq \psi \leq (R^C * RRP)$, $\psi \in Z^+$}
{"E": $1 \leq \psi \leq (R^E * RRP)$, $\psi \in Z^+$}
{"CE" : $\psi = 1$}
2: $rss \longleftarrow 0$
3: **while** ($rss \neq \psi$) **do**
4: Sonraki rotayı rassal seç
5: $\chi \sim \cup [1, s(R_{cr}) * CRP]$
6: $mss \longleftarrow 0$
7: **while** ($mss \neq \chi$) **do**
8: Seçilen rotadan çıkarılacak müşteriyi k^* en kötü mesafeye bağlı açgözlü yaklaşım ile seç
$\{k^* = argmin_{k \in R_{seçilen} | A_{ij}=1}\{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\}\}$
$L_{çıkarmalar} \longleftarrow L_{çıkarmalar} \cup k^*$
9: $mss \longleftarrow mss + 1$
10: **end while**
11: $rss \longleftarrow rss + 1$
12: end while

ψ	: Müşteri çıkarılacak rota sayısı
RRP	: Rota çıkarma yüzdesi
rss	: Rota sayısı sayacı
χ	: Çıkarılacak müşteri sayısı
$s(R_{cr})$	: Seçilen rotadaki müşteri sayısı
CRP	: Müşteri çıkarma yüzdesi
mss	: Müşteri sayısı sayacı
k^*	: Seçilen rotadan çıkarılacak müşteri
$L_{çıkarmalar}$	: Çıkarılanlar listesi

Şekil 4.9. Rassal rota seçme ve en kötü mesafeli müşteri çıkarma sözde kodu

- <u>En Sıkı Rota Seçme ve En Kötü Mesafeli Müşteri Çıkarma (3):</u> Bu operatör, müşteri çıkarmak için Eş. 4.19'da önerilen sıkılık indeksine göre en sıkı rotayı seçmektedir. Bu strateji, daha sıkı rotalardan müşteri çıkararak daha gevşek rotalara müşteri eklemenin kısıtların ihlaline daha düşük olasılıkla neden olabileceği motivasyonu ile önerilmiştir. $(\sum_{j \in \{8,9,10\}} w_j = 1)$.

$$Sıkılık_R = w_8(T_0^R / T_{Max}) + w_9(s(V^R_{sonra_RD})/s(V^R)) + w_{10}(u^R_{0j} / C^R) \quad (4.19)$$

$Sıkılık_R$, R rotasının sıkılık indeksini temsil etmektedir. Eş.4.19'daki ilk bileşen, R rotasının tamamlanma zamanının T_0^R, izin verilen maksimum tur tamamlanma zamanına T_{Max} oranıdır. İkinci bileşen, en erken servise başlama zamanından sonra varılan müşteri sayısının $s(V^R_{sonra_RD})$, R rotasındaki toplam müşteri sayısına $s(V^R)$ oranıdır. Son olarak üçüncü bileşen ise depoyu terkeden araçta taşınan yük miktarının u^R_{0j}, R rotasına atanan aracın yük kapasitesine C^R oranını ifade etmektedir. Operatörün sözde kodu Şekil 4.10'da verilmiştir.

Algoritma 6: En Sıkı Rota Seçme ve En Kötü Mesafeli Müşteri Çıkarma (3)

1: Müşteri çıkarılacak rota sayısını ψ, rassal olarak belirle.
{"C": $1 \leq \psi \leq (R^C * RRP)$, $\psi \in Z^+$}
{"E": $1 \leq \psi \leq (R^E * RRP)$, $\psi \in Z^+$}
{"CE" : $\psi = 1$}

ψ	: Müşteri çıkarılacak rota sayısı	RRP	: Rota çıkarma yüzdesi
rss	: Rota sayısı sayacı	$Sıkılık_R$	: R'nci rotanın sıkılık indeksi
χ	: Çıkarılacak müşteri sayısı	$s(R_{cr})$	: Seçilen rotadaki müşteri sayısı
CRP	: Müşteri çıkarma yüzdesi	*mss*	: Müşteri sayısı sayacı
k^*	: Seçilen rotadan çıkarılacak müşteri	$L_{çıkarmalar}$	: Çıkarılanlar listesi

2: $rss \longleftarrow 0$
3: **while** ($rss \neq \psi$) **do**
4: Sonraki rotayı, en sıkı rota olacak şekilde açgözlü yaklaşım ile seç
$\{R_{seçilen} \longleftarrow argmin_{tüm\ rotalar}(Sıkılık_R)\}$
5: $\chi \sim \cup\ [1, s(R_{cr}) * CRP]$
6: $mss \longleftarrow 0$
7: **while** ($mss \neq \chi$) **do**
8: Seçilen rotadan çıkarılacak müşteriyi k^* en kötü mesafeye bağlı açgözlü yaklaşım ile seç
$\{k^* = argmin_{k \in R_{seçilen} | A_{ij}=1}\{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\}\}$
$L_{çıkarmalar} \longleftarrow L_{çıkarmalar} \cup k^*$
9: $mss \longleftarrow mss + 1$
10: **end while**
11: $rss \longleftarrow rss + 1$
12: end while

Şekil 4.10. En sıkı rota seçme ve en kötü mesafeli müşteri çıkarma sözde kodu

• <u>En Kötü Mesafeli Müşteri Çıkarma (4):</u> Bu operatör, öncelikle mevcut çözümden çıkarılacak müşteri sayısını χ rassal olarak belirlemektedir. $s(V)$, problemdeki müşteri sayısını ve CRP, müşteri çıkarma yüzdesini belirtmek üzere χ, $[1, s(V) * CRP]$ aralığında değişmektedir. Daha sonra en fazla mesafe artışına sebep olan müşteriler, tamamı KA ya da tamamı EA rotalarından olacak şekilde açgözlü bir yaklaşım ile çıkarılmakta ve çıkarılanlar listesine $L_{çıkarmalar}$ eklenmektedir. Operatörün sözde kodu Şekil 4.11'de verilmiştir.

Algoritma 7: En Kötü Mesafeli Müşteri Çıkarma (4)

1: (Tamamı KA ya da tamamı EA rotalarından oluşan) Kısmi çözümden çıkarılacak müşteri sayısını χ, $\{\chi \sim \cup\ [1, s(V) * CRP]\}$
2: $mss \longleftarrow 0$
3: **while** ($mss \neq \chi$) **do**
4: Kısmi çözümden çıkarılacak müşteriyi k^* en kötü mesafeye bağlı açgözlü yaklaşım ile seç
$\{k^* = argmin_{k \in R_{seçilen} | A_{ij}=1}\{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\}\}$
$L_{çıkarmalar} \longleftarrow L_{çıkarmalar} \cup k^*$
5: $mss \longleftarrow mss + 1$
6: end while

Şekil 4.11. En kötü mesafeli müşteri çıkarma sözde kodu

Ekleme Operatörleri

Bu bölümde ekleme operatörleri açıklanmaktadır.

• Rassal Rota Seçme ve Eniyi Mesafeli Müşteri Ekleme (A): Bu operatör, ekleme yapılacak KA veya EA rotasını rassal olarak seçmektedir. Eğer $L_{çıkarmalar}$ listesinde seçilen rotaya uygun biçimde eklenebilecek müşteri yoksa ekleme için yeni rota seçilmektedir. Aksi takdirde, ekleme için seçilen rotada enaz mesafe artışına neden olan müşteri rotaya eklenmektedir. Eğer ekleme ile enaz bir zamansal kısıt ihlal ediliyorsa, tüm zamansal kısıtlar sağlanana kadar alternatif eklemeler denenmektedir. Eğer ekleme KA rotasına yapılacaksa, emisyon üst limitinin aşım kontrolü yapılmaktadır. Eğer ekleme EA rotasına yapılacaksa, başlangıç çözümü fazında olduğu gibi eklemeden sonra enerji uygunluğu kontrolü yapılmaktadır. Operatörün sözde kodu Şekil 4.12'de verilmiştir.

Algoritma 8: Rassal Rota Seçme ve Eniyi Mesafeli Müşteri Ekleme (A)

while ($L_{çıkarmalar} \neq Ø$) **or** (müşteri eklemek için tüm alternatif rotalar denenmedi) **do**
  $R_{seçilen} \longleftarrow$ Ekleme yapmak için rotayı rassal seç
  while capacity_check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}$) = false **do**
    $j^* \longleftarrow$ sıradaki müşteri $j \in L_{çıkarmalar}$
    if ($R_{seçilen}$ için $\forall j \in L_{çıkarmalar}$ denendi) **then**
      break
    end if
  end while
  if capacity_check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}$) = true **then**
    while timeWindows_check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}, p^*$) = false **do**
      $p^* \longleftarrow$ sıradaki $p \in P$
      if ($R_{seçilen}$ için $\forall p \in P$ değerlendirildi) **then**
        break
      end if
    end while
    if timeWindows_check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}, p^*$) = true **then**
      if ($R_{seçilen} \in R^C$)
        if emission_Check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}, p^*$) = true **then**
          Çıkarma ve ekleme işlemlerini gerçekleştir
          $L_{çıkarmalar} \longleftarrow L_{çıkarmalar} \setminus j^*$
        end if
        else then
          $L_{çıkarmalar} \longleftarrow L_{çıkarmalar} \setminus j^*$
        end else

Şekil 4.12. Rassal rota seçme ve eniyi mesafeli müşteri ekleme sözde kodu

25: **end if**
26: **if** ($R_{seçilen} \in R^E$)
27: Çıkarma ve ekleme işlemlerini gerçekleştir
28: $L_{çıkarmalar} \leftarrow L_{çıkarmalar} \setminus j^*$
29: **while energy_Check**($R_{seçilen}$) = false **and** (ekleme için uygun *CS* yok) = false **do**
30: $R_{seçilen}$ için takip eden eniyi şarj istasyonunu CS^* açgözlü yaklaşım ile ekle
$CS^* = argmin_{CS \in R|(erişilemeyen\ düğümden\ önceki\ konumlar)} \{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\}$
31: Yavaş şarj konfigürasyonu ile tam kapasite şarj uygula $\{\theta^1_{ijCS^*} = Q^E\}$
32: **end while**
33: **if energy_Check**($R_{seçilen}$) = false **then**
34: Son uygun mevcut çözüme S geri dön
35: **break**
36: **end if**
37: **if energy_Check**($R_{seçilen}$) = true **then**
38: **while** (**timeWindows_Check**($R_{seçilen}$) = false) **and** (Konfigürasyonu yükseltilebilecek ($m < 3$) uygun *CS* yok = false) **do**
39: **if** (CS^* için $m < 3$) **then**
40: $m \leftarrow m + 1$
41: **end if**
42: **else then**
43: $CS^* \leftarrow$ sonraki $CS \in R$
44: $m \leftarrow m + 1$
45: **end else**
46: **end while**
47: **if energy_Check**($R_{seçilen}$) = false **then**
48: Son uygun mevcut çözüme S geri dön
49: **break**
50: **end if**
51: **end if**
52: **end if**
53: **end if**
54: **end if**
55: **end while**

$R_{seçilen}$	: Ekleme için seçilen rota	R^E	: Elektrikli rotalar kümesi
j^*	: Seçilen eniyi mesafeli müşteri	CS	: Şarj istasyonu
p^*	: Eniyi konum	CS^*	: Eniyi şarj istasyonu
P	: Konumlar kümesi	m	: Şarj konfigürasyonu
R^C	: Konvansiyonel rotalar kümesi	(1:yavaş, 2:orta, 3:hızlı)	
$L_{çıkarmalar}$	: Çıkarılanlar listesi		

Şekil 4.12. (devam) Rassal rota seçme ve eniyi mesafeli müşteri ekleme sözde kodu

- En Yakın Rota Seçme ve Eniyi Mesafeli Müşteri Ekleme (B): Bu operatör, seçilen müşteriye barisentrik koordinatları en yakın olan KA ya da EA rotasını seçmektedir. Eğer kapasite kısıtı bu müşterinin seçilen rotaya eklenmesi ile aşılacaksa, müşteri çıkarılacaklar listesinden $L_{çıkarmalar}$ çıkarılmaktadır. Aksi takdirde müşteri enaz mesafe artışına neden olan pozisyona konumlandırılmaktadır. Eğer tüm alternatif pozisyonlara konumlandırmalar enaz bir zamansal kısıtın ihlaline neden oluyorsa, $L_{çıkarmalar}$ listesindeki bir sonraki müşteriye en yakın rota seçilmektedir. Eğer ekleme KA rotasına yapılacaksa, emisyon üst limitinin aşım kontrolü yapılmaktadır. Eğer ekleme EA rotasına yapılacaksa, başlangıç

çözümü fazında olduğu gibi eklemeden sonra enerji uygunluğu kontrolü yapılmaktadır. Operatörün sözde kodu Şekil 4.13'de verilmiştir.

Algoritma 9: En Yakın Rota Seçme ve Eniyi Mesafeli Müşteri Ekleme (B)

while ($L_{çıkarmalar} \neq \emptyset$) **do**
  Seçilen müşterinin $j^* \in L_{çıkarmalar}$ konumuna, barisentrik koordinatı en yakın olan rotayı seç
  if capacity_check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}$) = false **then**
    $L_{çıkarmalar} \leftarrow L_{çıkarmalar} \setminus j^*$
  end if
  if capacity_check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}$) = true **then**
    while timeWindows_check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}, p^*$) = false **do**
      $p^* \leftarrow$ sıradaki $p \in P$
      if ($R_{seçilen}$ için $\forall p \in P$ değerlendirildi) **then**
        $L_{çıkarmalar} \leftarrow L_{çıkarmalar} \setminus j^*$
        break
      end if
    end while
    if timeWindows_check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}, p^*$) = true **then**
      if ($R_{seçilen} \in R^C$)
        if emission_Check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}, p^*$) = true **then**
          Çıkarma ve ekleme işlemlerini gerçekleştir
          $L_{çıkarmalar} \leftarrow L_{çıkarmalar} \setminus j^*$
        end if
        Else
          $L_{çıkarmalar} \leftarrow L_{çıkarmalar} \setminus j^*$
        end else
      end if
      if ($R_{seçilen} \in R^E$)
        Çıkarma ve ekleme işlemlerini gerçekleştir
        $L_{çıkarmalar} \leftarrow L_{çıkarmalar} \setminus j^*$
        while energy_Check($R_{seçilen}$) = false **and** (ekleme için uygun *CS* yok) = false **do**
          $R_{seçilen}$ için takip eden eniyi şarj istasyonunu CS^* açgözlü yaklaşım ile ekle $CS^* = argmin_{CS \in R|(erişilemeyen\ düğümden\ önceki\ konumlar)} \{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\}$
          Yavaş şarj konfigürasyonu ile tam kapasite şarj uygula $\{\theta^1_{ijCS^*} = Q^E\}$
        end while
        if energy_Check($R_{seçilen}$) = false **then**
          Son uygun mevcut çözüme S geri dön
          break
        end if
        if energy_Check($R_{seçilen}$) = true **then**
          while timeWindows_Check($R_{seçilen}$) = false **and** (Konfigürasyonu yükseltilebilecek ($m < 3$) uygun *CS* yok = false) **do**
            if (CS^* için $m < 3$) **then**
              $m \leftarrow m + 1$

Şekil 4.13. En yakın rota seçme ve eniyi mesafeli müşteri ekleme sözde kodu

```
                    end if
                    else then
                        CS* ← sonraki CS ∈ R
                        m ← m + 1
                    end else
                end while
                if energy_Check(R_seçilen) = false then
                    Son uygun mevcut çözüme S geri dön
                    break
                end if
            end if
        end if
    end if
end while
```

$R_{seçilen}$: Ekleme için seçilen enyakın rota
j^* : Seçilen eniyi mesafeli müşteri
p^* : Eniyi konum
P : Konumlar kümesi
R^C : Konvansiyonel rotalar kümesi
$L_{çıkarmalar}$: Çıkarılanlar listesi
R^E : Elektrikli rotalar kümesi
CS : Şarj istasyonu
CS^* : Eniyi şarj istasyonu
m : Şarj konfigürasyonu (1:yavaş, 2:orta, 3:hızlı)

Şekil 4.14. (devam) En yakın rota seçme ve eniyi mesafeli müşteri ekleme sözde kodu

- En Gevşek Rota Seçme ve Eniyi Mesafeli Müşteri Ekleme (C): Bu operatör, rota seçme stratejisi dışında operatör (B) ile aynı şekilde çalışmaktadır. Ekleme için Eş. 4.19'daki sıkılık indeksine göre en düşük değeri alan rota seçilmektedir. Bu operatörün, operatör (B) ile benzerliği nedeniyle sözde kodu verilmemiştir.

- Eniyi Mesafeli Müşteri Ekleme (D): Bu operatör, eniyi mesafeli müşteri eklemesini yapmak üzere $L_{çıkarmalar}$ listesindeki kapasite kısıtını ihlal etmeyecek tüm müşterileri, mevcut çözümdeki tüm rotaları ve rotalardaki tüm pozisyonları değerlendirmektedir. Daha sonra seçilen ekleme özelinde zaman penceresi kontolleri yapılmaktadır. Tüm alternatif eklemelerin enaz bir zamansal kısıtı ihlal etmesi durumunda operatör komşu çözüm üretmeden sonlanmakta ve son uygun çözüme geri dönmektedir. Eğer ekleme KA rotasına yapılacaksa, emisyon üst limitinin aşım kontrolü yapılmaktadır. Emisyon üst limiti aşılmıyorsa ekleme işlemi gerçekleştirilmekte, aşılıyorsa operatör yine komşu çözüm üretmeden sonlanmakta ve son uygun çözüme geri dönmektedir. Eğer ekleme EA rotasına yapılacaksa, başlangıç çözümü fazında olduğu gibi eklemeden sonra enerji uygunluğu kontrolü yapılmaktadır. Bu adımlar $L_{çıkarmalar}$ listesinde müşteri kalmayana kadar tekrarlanmaktadır. Operatörün sözde kodu Şekil 4.14'de verilmiştir.

Algoritma 10: Eniyi Mesafeli Müşteri Ekleme (D)

while ($L_{çıkarmalar} \neq \emptyset$) **do**
  j^*, $R_{seçilen}$, $p^* \leftarrow$ Enaz mesafe artışına sebep olan eklemeyi seç
  $\{\forall j \in L_{çıkarmalar} \,|kapasite\ kısıdı\ sağlansın., \forall R \in R^C ya\ da\ \forall R \in R^E, \forall p \in P\}$
  while timeWindows_check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}, p^*$) = false **do**
    $p^* \leftarrow$ sıradaki $p \in P$
    if (Tüm eklemeler değerlendirildi ($\forall j \in L_{çıkarmalar}, \forall R \in R^C ya\ da\ \forall R \in R^E,\ \forall p \in P$)) **then**
      $L_{çıkarmalar} \leftarrow \{\}$
      break
    end if
  end while
  if timeWindows_check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}, p^*$) = true **then**
    if ($R_{seçilen} \in R^C$)
      if emission_Check($R_{seçilen}, j^* \in L_{çıkarmalar}, p^*$) = true **then**
        Çıkarma ve ekleme işlemlerini gerçekleştir
        $L_{çıkarmalar} \leftarrow L_{çıkarmalar} \setminus j^*$
      end if
      Else
        $L_{çıkarmalar} \leftarrow L_{çıkarmalar} \setminus j^*$
      end else
    end if
    if ($R_{seçilen} \in R^E$)
      Çıkarma ve ekleme işlemlerini gerçekleştir
      $L_{çıkarmalar} \leftarrow L_{çıkarmalar} \setminus j^*$
      while energy_Check($R_{seçilen}$) = false **and** (ekleme için uygun *CS* yok) = false **do**
        $R_{seçilen}$ için takip eden eniyi şarj istasyonunu CS^* açgözlü yaklaşım ile ekle $CS^* = argmin_{CS \in R|(erişilemeyen\ düğümden\ önceki\ konumlar)} \{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\}$
        Yavaş şarj konfigürasyonu ile tam kapasite şarj uygula $\{\theta^1_{ijCS^*} = Q^E\}$
      end while
      if energy_Check($R_{seçilen}$) = false **then**
        Son uygun mevcut çözüme S geri dön
        break
      end if
      if energy_Check($R_{seçilen}$) = true **then**
        while timeWindows_Check($R_{seçilen}$) = false **and** (Konfigürasyonu yükseltilebilecek ($m < 3$) uygun *CS* yok = false) **do**
          if (CS^* için $m < 3$) **then**
            $m \leftarrow m + 1$
          end if
          else then
            $CS^* \leftarrow$ sonraki $CS \in R$
            $m \leftarrow m + 1$
          end else
        end while

$R_{seçilen}$: Ekleme için seçilen rota		R^E	: Elektrikli rotalar kümesi
j^*	: Seçilen eniyi mesafeli müşteri	CS	: Şarj istasyonu
p^*	: Eniyi konum	CS^*	: Eniyi şarj istasyonu
P	: Konumlar kümesi	m	: Şarj konfigürasyonu (1:yavaş, 2:orta, 3:hızlı)
R^C	: Konvansiyonel rotalar kümesi		
$L_{çıkarmalar}$: Çıkarılanlar listesi			

Şekil 4.15. Eniyi mesafeli müşteri ekleme sözde kodu

```
41:                 if energy_Check(R_seçilen) = false then
42:                     Son uygun mevcut çözüme S geri dön
43:                     break
44:                 end if
45:             end if
46:         end if
47:     end if
48: end while
```

Şekil 4.14. (devam) Eniyi mesafeli müşteri ekleme sözde kodu

- Açgözlü Rota Oluşturma (E): Bölüm 4.2'de bahsedildiği gibi bir rotadan başka bir rotaya müşteri transferi ile yeni komşu çözüm üretilen komşuluk mekanizmaları ile çıkarma operatörleri nedeniyle bazı rotalar kapanabilmektedir. Bu durum, görevlendirilen araç sayısının azalmasına sebep olarak eniyi çözümden sapmalara yol açabilir. Eniyi çözüm, üretilen yeni komşu çözümdeki rota sayısından daha fazla rota içerebilir. Bu nedenle tez kapsamında yeni rota açmaya ilişkin de komşuluk mekanizması önerilmiştir. Bu operatörde, çıkarılacaklar listesi $L_{çıkarmalar}$ öncelikle önerilen 4 çıkarma operatöründen biri ile doldurulmaktadır. Daha sonra başlangıç çözümü fazında belirtilen yöntem ile yeni rota oluşturulmaktadır. Uygunluk sağlanmadıysa rota oluşturma komşu çözüm üretmeden sonlanmakta ve son uygun çözüme geri dönmektedir. Bu mekanizma, başlangıç çözümü fazında detaylı olarak açıklandığından sözde kodu verilmemiştir.

4.4. Deneysel Çalışma

Bu bölümde geliştirilen UGKA'nın performansını analiz etmek için çeşitli sayısal deneyler yapılmıştır. Öncelikle, UGKA, A-MM ile çözüm kalitesi ve çözüm zamanı açısından karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Daha sonra, UGKA'da kabul olasılık fonksiyonunun ve yeniden ısıtma mekanizmasının performans ölçütlerine etkileri analiz edilmiştir. Son olarak filo genişliği ve emisyon üst limitinin artırılmasının amaç fonksiyonu üzerindeki etkisi incelenmiştir.

UGKA, Microsoft Visual Studio 2010 geliştirme ortamında C# programlama dili ile herhangi bir kütüphane kullanılmadan geliştirilmiştir. A-MM ise GAMS 24.2.2. geliştirme ortamında kodlanarak CPLEX 12.6.0.0 çözücünün varsayılan ayarları kullanılarak çözülmüştür. A-MM ve UGKA için tüm sayısal deneyler, Intel Core i5, CPU 2.5 GHz ve 4 GB RAM özelliklere sahip bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

4.4.1. E-ÇKS ve UGKA için parametrelerin belirlenmesi

UGKA'nın ön analizler neticesinde belirlenen parametre değerleri Çizelge 4.2'de verilmiştir. Çizelgenin alt tarafında belirtilen parametrelerin değerleri, problemdeki müşteri sayısına *s(V)* göre değişkenlik göstermektedir.

Çizelge 4.2. UGKA parametreleri

Parametre Notasyonu	Değer	Parametre Notasyonu	Değer	Parametre Notasyonu	Değer
w_1	0,3	w_9	0,30	RRP	50
w_2	0,2	w_{10}	0,35	CRP	20
w_3	0,2	λ	5	r	0,05
w_4	0,3	S_1	4	$w_{nm_i}^0$	1
w_5	0,4	S_2	2	T_{init}	500
w_6	0,2	S_3	1	c	0,99
w_7	0,4	S_4	-4	$n_{cool.}$	5
w_8	0,35				

	Değer	s(V)		Değer	s(V)		Değer	s(V)
S	100	5	$n_{Ter.}$	2000	5	$n_{NoImp.Ter.}$	200	5
	1000	10		150000	10		20000	10
	4000	≥ 15		600000	≥ 15		80000	≥ 15
	Değer	s(V)		Değer	s(V)		Değer	s(V)
$n_{NoImp.Heat.}$	-	5	$n_{reinitialize}$	-	5	$n_{annihilate}$	-	5
	200	10		-	10		-	10
	500	≥ 15		8000	≥ 15		16000	≥ 15

Çizelge 4.2'de belirtilen E-ÇKS ağırlıklarının belirlenmesi için yapılan analiz çalışmasının detayları ise aşağıda verilmiştir. Analiz çalışmasında eklemeler esnasında Eş. 4.10 ve Eş. 4.12'de kullanılan açgözlü yaklaşımlar kullanılmıştır.

Öncelikle E-ÇKS'nin Kümeleme Prosedüründe Eş. 4.1'de kullanılan *w1*, *w2*, *w3* ve *w4* ağırlıkları ile Eş. 4.6'da kullanılan *w5*, *w6* ve *w7* ağırlıkları üzerinde bir analiz yapılmıştır. Bu analiz, C, R, ve RC sınıflanlarından seçilen 21 veri seti üzerinde iki adımda gerçekleştirilmiştir. İlk adımda, E-ÇKS'nin performansına etkilerine dayalı olarak ağırlıkların önem dereceleri sıralanmıştır. Bu sıralamaya karar vermek için öncelikle ağırlıklardan birine sıfır değeri atanmış ve geri kalanlarına da toplamı bir olacak şekilde yaklaşık eşit değerler atanmıştır. Örneğin Eş. 4.1'de eğer $w_1 = 0$ ise $w_2 \cong w_3 \cong w_4$. Benzer şekilde Eş. 4.6'da eğer $w_5 = 0$ ise $w_6 = w_7 = 0.5$'dir.

Çizelge 4.3'de görüldüğü üzere, Eş. 4.1 ve Eş. 4.6'daki w_1-w_5 (mesafeye dayalı ağırlıklar), w_2-w_6 (yüke dayalı ağırlıklar), w_3 (şarj istasyonuna dayalı ağırlık) ve w_4-w_7 (en erken

servise başlama zamanına dayalı ağırlıklar) ağırlıklarına sırasıyla sıfır değeri atanmıştır. Daha sonra bu değerler ile elde edilmiş başlangıç çözümleri Çizelge 4.3'de sırasıyla raporlanmış ve ağırlıkların önem dereceleri, başlangıç çözümünün kötüleşme durumuna göre belirlenmiştir. Öncelikle, her satırdaki en kötü çözüm çifti (Çizelge 4.3'de kalın karakterler ile ifade edilen) tespit edilmiş ve her sütun için kalın yazılmış değerlerin toplam adedi Çizelge 4.3'ün en alt satırında belirtilmiştir.

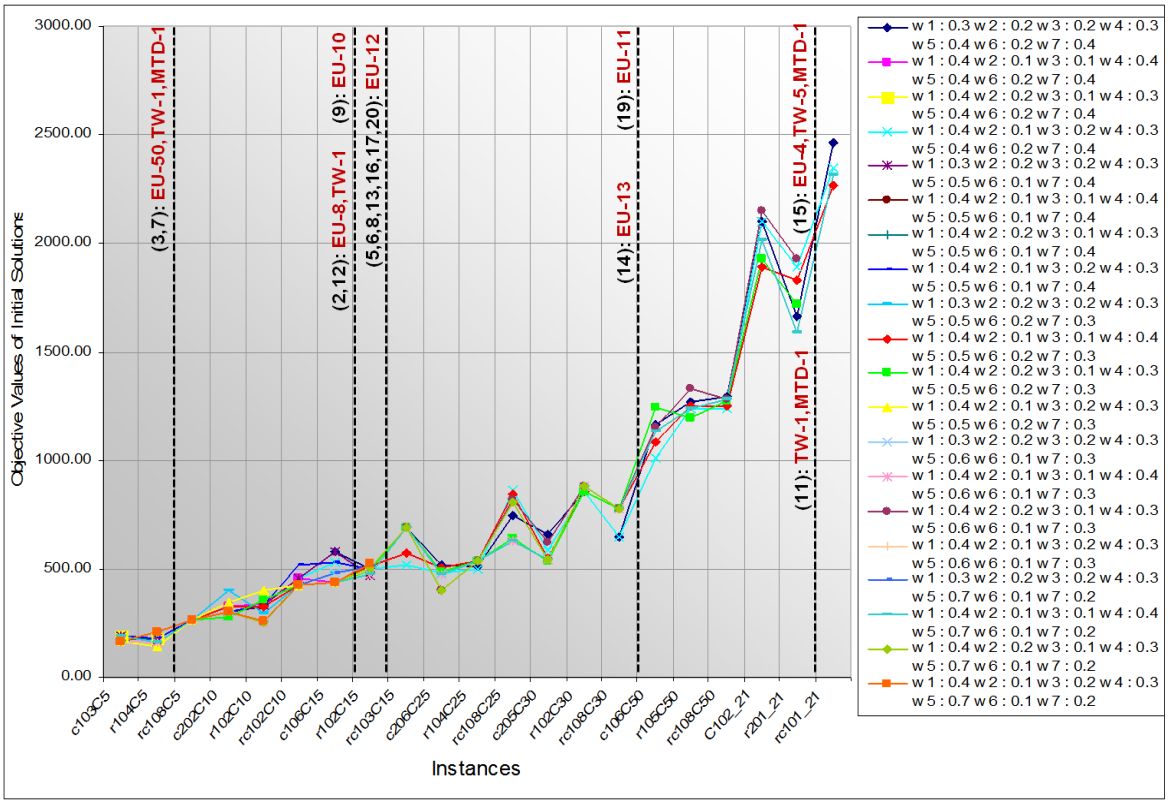
Çizelge 4.3. Ağırlıkların başlangıç çözümüne etkisi

Test Verisi	w_1: 0,0 w_2, w_3: 0,33 w_4: 0,34 w_5: 0,0 w_6, w_7: 0,5	w_1: 0,34 w_2: 0,0 w_3, w_4: 0,33 w_5, w_7: 0,5 w_6: 0,0	w_1: 0,34 w_2, w_4: 0,33 w_3: 0,0 w_5: 0,34 w_6: 0,33 w_7: 0,33	w_1: 0,34 w_2, w_3: 0,33 w_4: 0,0 w_5, w_6: 0,5 w_7: 0,0
c103C5	**188,08**	**189,88**	168,37	168,37
r104C5	**169,44**	**178,66**	160,91	142,55
rc108C5	262,43	262,43	262,43	262,43
c202C10	**378,07**	302,55	280,87	**313,96**
r102C10	**323,40**	310,67	284,17	**334,17**
rc102C10	**517,80**	444,38	457,69	**476,01**
c106C15	527,72	**581,24**	434,35	**581,24**
r102C15	499,38	493,92	**510,83**	**507,86**
rc103C15	681,95	**EU-12***	**EU-18***	634,46
c206C25	**607,76**	**612,97**	447,69	534,56
r104C25	**760,33**	**616,08**	535,19	517,15
rc108C25	691,62	**707,96**	480,20	**709,30**
c205C30	**622,88**	555,84	556,69	**701,16**
r102C30	856,56	857,34	**902,06**	**EU-6***
rc108C30	**995,12**	674,16	741,61	**817,21**
c106C50	**EU-31***	**EU-12***	EU-1*	1364,39
r105C50	**EU-5***	1210,81	**1261,14**	1232,31
rc108C50	**1485,38**	1220,83	1222,76	**1274,23**
C102_21	**EU-10***	2089,60	2020,26	**2132,00**
r201_21	**2083,39**	1758,46	1739,41	**1883,79**
rc101_21	EU-9, TW-3, MTD-1*	**EU-11, TW-5, MTD-1***	2283,03	**EU-3, TW-6, MTD-1***
Toplam	**14**	**9**	**4**	**13**

* "EU-X": Elde edilen çözüm emisyon üst limitini %X oranında ihlal etmiştir.
"TW-Y": Elde edilen çözüm zaman penceresi kısıtlarının Y adedini ihlal etmiştir.
"MTD-Z": Elde edilen çözüm azami tur tamamlanma zamanı kısıtlarının Z adedini ihlal etmiştir.

Kalın yazılmış değerlerin toplam adetleri (14, 9, 4 ve 13) ağırlıkların denklemler içerisindeki önem derecesini belirlemek için kullanılmıştır. Sonuç olarak, ağırlıkların Eş. 4.1 ve Eş. 4.6'daki önem dereceleri; sırasıyla, $w_1 \geq w_4 > w_2, w_3$ ve $w_5 \geq w_7 > w_6$, şeklinde belirlenmiştir ($w_i \geq 0.1 * x,\ x \in Z^+$). Bu sıralamaya bağlı olarak, mesafeye dayalı ağırlıkların (*w1* ve *w5*), her iki denklemde (Eş. 4.1 ve Eş. 4.6) de en önemli ağırlık olduğu, bu sebeple değerlerinin en erken başlama zamanına dayalı ağırlıklara (*w4* ve *w7*) göre daha büyük ya da eşit olmasına karar verilmiştir.

Ayrıca, mesafeye dayalı (*w1* ve *w5*) ve en erken başlama zamanına dayalı (*w4* ve *w7*) ağırlıkların da yüke dayalı (*w2* ve *w6*) ve şarj istasyonuna dayalı (*w3*) ağırlıklara göre daha büyük olması ile daha kaliteli başlangıç çözümleri elde edilebileceği gözlemlenmiştir. Analizin ikinci adımında, önem derecelerine göre belirlenmiş sıralamanın tüm kombinasyonları (20 adet) ile başlangıç çözümleri elde edilmiştir. Sonuçlar Şekil 4.15'de verilmiştir. Ağırlık kombinasyonları ile uygun olmayan çözüm elde edilene kadar test verileri çözülmüştür. Eğer bir kombinasyon ile test verisinin çözümünde uygun çözüm elde edilemezse bu kombinasyon, geri kalan test verilerini çözmek için değerlendirmeye alınmamıştır. Şekil 4.15'den görüldüğü üzere, 3 ve 7 nolu kombinasyonlar "rc108C5" etiketli test verisi için uygun çözüm elde edememiştir. Bu sonuç; Şekil 4.15'deki grafik üzerinde "rc108C5" etiketli test verisini dik kesen noktalı doğrunun sol tarafında "(3,7): EU-50, TW-1, MTD-1" ifadesi ile belirtilmiştir. Bu ifade ("(3,7): EU-50, TW-1, MTD-1"), 3 ve 7 nolu kombinasyonlar ile elde edilen başlangıç çözümünün emisyon üst limiti kısıtını %50 (EU-50) oranında, zaman penceresi kısıtlarının birini (TW-1) ve azami tur tamamlanma zamanı kısıtlarının birini (MTD-1) sağlamadığını göstermektedir.



Şekil 4.16. Ağırlık kombinasyonlarının performansı

Analizin sonucunda sadece 1, 4, 10 ve 18 numaralı kombinasyonlar, tüm test verileri için ihmal edilebilir sapmalarla uygun çözümler elde etmiştir. (Varyasyon katsayısı 1,99'dur). Bu kombinasyonlar aşağıda verilmiştir:

Kombinasyon 1 : $w_1 = 0{,}3, w_2 = 0{,}2, w_3 = 0{,}2, w_4 = 0{,}3$ ve $w_5 = 0{,}4, w_6 = 0,2, w_7 = 0{,}4$

Kombinasyon 4 : $w_1 = 0{,}4, w_2 = 0{,}1, w_3 = 0{,}2, w_4 = 0{,}3$ ve $w_5 = 0{,}4, w_6 = 0,2, w_7 = 0{,}4$

Kombinasyon 10: $w_1 = 0{,}4, w_2 = 0{,}1, w_3 = 0{,}1, w_4 = 0{,}4$ ve $w_5 = 0{,}5, w_6 = 0,2, w_7 = 0{,}3$

Kombinasyon 18: $w_1 = 0{,}4, w_2 = 0{,}1, w_3 = 0{,}1, w_4 = 0{,}4$ *ve* $w_5 = 0{,}7, w_6 = 0,1, w_7 = 0{,}2$

Dolayısıyla, tüm test verisi parametrelerinin değişimlerine eşit biçimde cevap verebilecek en dengeli ağırlık değerleri dağılımına sahip olduğundan kombinasyon 1 tercih edilmiştir. (Eş. 4.1'de $w_1 = w_4 = 0{,}3,\ w_2 = w_3 = 0{,}2$ ve Eş. 4.6'da $w_5 = w_7 = 0{,}4,\ w_6 = 0{,}2$)

4.4.2. Sayısal sonuçlar

Çizelge 4.4 – Çizelge 4.6'da A-MM ve UGKA ile elde edilen çözümler verilmektedir. Çizelgelerde ilk sütun problemin etiketini belirtmektedir. Takip eden 2 sütun sırasıyla A-MM için eniyi ya da eniyi üst sınır (Z^*) ile saniye cinsinden çözüm zamanını (*Çözüm Süresi (sn)*) ifade etmektedir. (Δ_{opt}) sütunu ise A-MM ile 2 saat içerisinde bulunan çözümün amaç fonskiyonu değeri (Z^*) ve alt sınır (Z^{AS}) arasındaki yüzde sapma değerini vermektedir. Bu değer, $\Delta_{opt} = 100 * \left((Z^* - Z^{AS})/Z^{AS}\right)$ ile hesaplanır. Sonraki 2 sütun, sırasıyla UGKA için başlangıç çözümünün amaç fonksiyonu değerini ($Z^{BÇ}$) ve bu değerin A-MM'nin bulduğu çözümün amaç fonksiyonu değerinden yüzde sapma değerini ($\Delta_{BÇ}$) vermektedir. Bu değer, $\Delta_{BÇ} = 100 * \left((Z^{BÇ} - Z^*)/Z^*\right)$ ile hesaplanır. Takip eden 3 sütun da sırasıyla UGKA'nın 10 bağımsız koşumu elde edilen eniyi çözümü ($Eniyi$), 10 koşumun ortalamasını ($Ort.$) ve bu çözüm değerlerinin varyasyon katsayısını (VK) vermektedir. Son 3 sütun ise 10 koşum içerisinde UGKA ile elde edilen eniyi çözümün çözüm zamanını (*Çözüm Süresi (sn)*), yüzde sapma değerini (Δ_{UGKA}) ve başlangıç çözümüne göre iyileşme yüzdesini ($\Delta_{iyileş.}$) vermektedir.

(Δ_{UGKA}), UGKA ile bulunan eniyi çözüm ile A-MM'nin 2 saat içerisindeki eniyi ya da eniyi üst sınırı (Z^*) arasındaki yüzde sapma değeridir ve $\Delta_{UGKA} = 100 * \left((Z^{UGKA} - Z^*)/Z^*\right)$ ile

hesaplanır. Başlangıç çözümüne göre iyileşme yüzdesi ($\Delta_{iyileş.}$) ise $\Delta_{iyileş.} = 100 * \left(\left(Z^{BÇ} - Z^{UGKA} \right) / Z^{BÇ} \right)$ ile hesaplanır. (Z^*) sütunundaki "-" ile işaretlenen hücreler, matematiksel model ile 2 saat içerisinde uygun çözüm bulunamadığını ifade etmektedir. Bu sebeple "-" işaretine karşılık gelen satırlarda (Δ_{opt}) ve (Δ_{UGKA}) değerleri de hesaplanamamıştır.

Çizelge 4.4. Küçük boyutlu problemlerde A-MM ve UGKA çözümleri

Problem	A-MM			UGKA							
						Z^{UGKA}					
	Z^*	Çözüm Süresi (sn)	Δ_{opt}	$Z^{BÇ}$	$\Delta_{BÇ}$	Eniyi	Ort.	VK	Çözüm Süresi (sn)	Δ_{UGKA}	$\Delta_{iyileş.}$
c101C5	253,42	0,42	0,00	**253,42**	**0,00**	**253,42**	253,42	0,00	0,27	**0,00**	0,00
c103C5	168,37	0,86	0,00	189,88	12,77	**168,37**	171,99	4,43	0,19	**0,00**	11,33
c206C5	227,19	0,89	0,00	233,03	2,57	**227,19**	233,03	0,00	0,07	**0,00**	2,51
c208C5	175,35	0,92	0,00	265,25	51,27	**175,35**	175,35	0,00	0,18	**0,00**	33,89
r104C5	142,55	1,02	0,00	178,66	25,33	**142,55**	143,48	0,56	0,18	**0,00**	20,21
r105C5	157,14	0,31	0,00	177,67	13,06	**157,14**	162,15	5,06	0,23	**0,00**	11,56
r202C5	126,52	0,55	0,00	176,28	39,33	**126,52**	130,28	6,29	0,22	**0,00**	28,23
r203C5	198,54	1,89	0,00	**198,54**	**0,00**	**198,54**	198,54	0,00	0,06	**0,00**	0,00
rc105C5	238,73	0,63	0,00	243,81	2,13	**238,73**	240,63	0,60	0,38	**0,00**	2,08
rc108C5	261,02	0,69	0,00	262,43	0,54	**261,02**	261,02	0,00	0,30	**0,00**	0,54
rc204C5	184,11	2,41	0,00	196,83	6,91	**184,11**	185,80	1,16	0,19	**0,00**	6,46
rc208C5	179,62	1,45	0,00	214,14	19,22	**179,62**	188,22	4,09	0,18	**0,00**	16,12
Ortalama		**1,00**	0,00		**14,43**			**1,85**	**0,20**	**0,00**	**11,08**
c101C10	385,64	2,53	0,00	463,50	20,19	**385,64**	389,90	0,82	3,98	**0,00**	16,80
c104C10	259,92	48,55	0,00	306,31	17,85	**259,92**	259,92	0,00	17,49	**0,00**	15,15
c202C10	250,38	2,11	0,00	301,61	20,46	**250,38**	250,42	0,03	1,45	**0,00**	16,99
c205C10	237,24	1,72	0,00	354,58	49,46	**237,24**	246,56	4,56	2,45	**0,00**	33,09
r102C10	245,37	4,56	0,00	334,17	36,19	**245,37**	247,43	1,02	2,38	**0,00**	26,57
r103C10	196,22	901,08	0,00	226,41	15,39	**196,22**	196,22	0,00	1,01	**0,00**	13,33
r201C10	221,34	2,31	0,00	314,43	42,06	**221,34**	222,88	1,24	3,41	**0,00**	29,61
r203C10	213,65	30,27	0,00	300,85	40,81	**213,65**	234,42	8,18	0,36	**0,00**	28,98
rc102C10	397,08	2,14	0,00	457,69	15,26	**397,08**	408,58	2,02	2,58	**0,00**	13,24
rc108C10	347,15	55,73	0,00	472,74	36,18	**347,15**	353,55	2,69	3,63	**0,00**	26,57
rc201C10	320,22	3,16	0,00	417,15	30,27	**320,22**	347,26	4,93	1,74	**0,00**	23,24
rc205C10	334,45	2,63	0,00	348,66	4,25	**334,45**	346,90	1,28	1,20	**0,00**	4,08
Ortalama		**98,09**	0,00		**27,36**			**2,23**	**3,47**	**0,00**	**20,64**
c103C15	361,20	3979,75	0,00	416,55	15,32	361,27	385,43	2,20	4,18	0.02	13.27
c106C15	270,82	4,16	0,00	581,03	114,54	**270,82**	275,55	1,97	11,60	**0.00**	53.39
c202C15	374,91	2353,36	0,00	591,70	57,82	**374,91**	390,43	4,00	4,48	**0.00**	36.64
c208C15	305,55	32,97	0,00	489,08	60,06	313,40	316,36	0,84	4,73	2.57	35.92
r102C15	387,98	20,59	0,00	496,09	27,86	**387,98**	390,78	0,76	9,87	**0.00**	21.79
r105C15	321,96	2,27	0,00	335,19	4,11	**321,96**	323,45	1,29	7,88	**0.00**	3.95
r202C15	382,23	7200,00	9,27	500,19	30,86	**380,58**	388,54	1,54	17,97	**-0.43**	23.91
r209C15	280,09	3218,92	0,00	334,13	19,29	**280,09**	283,00	2,74	11,27	**0.00**	16.18
rc103C15	406,33	7200,00	5,59	691,38	70,15	**406,33**	408,22	0,56	9,63	**0.00**	41.23
rc108C15	396,89	7200,00	35,14	425,66	7,25	**385,10**	389,68	1,97	2,46	**-2.97**	9.53
rc202C15	413,75	151,03	0,00	517,14	24,99	420,89	425,19	1,07	13,19	1.73	18.61
rc204C15	325,92	4185,94	0,00	459,57	41,01	329,14	334,06	1,23	31,03	0.99	28.38
Ortalama		**2918,18**	4,17		**39,44**			**1,68**	**10,69**	**0,16**	**25,23**

Çizelge 4.7, A-MM ve UGKA ile elde edilen çözümleri özetlemektedir. *"İyileştirme Adedi"* sütunu, iyileştirilen uygun çözümler ile birlikte A-MM'nin uygun çözüm

bulamayıp UGKA'nın bulabildiği çözümleri de içermektedir. "*Sapma*" sütunu A-MM ve UGKA ile elde edilen uygun çözümlerin alt sınırdan sapma değerlerinin ortalamasını vermektedir. *"Üst Sınır İyileştirmesi"* sütunu UGKA'nın CPLEX üst sınırlarına göre ortalama iyileştirme yüzdesidir. "$\Delta_{iyileş.}$" sütunu UGKA'nın başlangıç çözümüne göre ortalama iyileştirme yüzdesini vermektedir. "*VK*" sütunu ise 10 koşumda elde edilen çözümlerin ortalama varyasyon katsayısıdır.

Çizelge 4.4'de görüldüğü üzere, 36 küçük boyutlu problemin 33'ünde A-MM ile eniyi çözüm elde edilmiştir. Geri kalan 3 problemde ise, ortalama %16,66 sapmayla uygun çözümler elde edilmiştir. Ortalama Δ_{UGKA}, %0,05'tir. A-MM ile 15 müşterili 2 problem için elde edilen uygun çözümler ise, UGKA ile ortalama %1,7 iyileştirilmiştir. Ayrıca, UGKA 29 küçük boyutlu problem için eniyi çözümü elde etmiştir. Çözüm zamanları incelendiğinde UGKA'nın A-MM'ye kıyasla oldukça hızlı olduğu gözlemlenmektedir. UGKA'nın E-ÇKS ile elde edilen başlangıç çözümlerini ortalama iyileştirme oranı ise %18,98'dir. Küçük boyutlu problemler için UGKA ile 10 bağımsız koşum ile elde edilen çözümlerin ortalama varyasyon katsayısı 1,92'dir. Küçük boyutlu problemler için UGKA'nın A-MM'ye göre çok daha kısa sürelerde çözüme ulaştığı ve problemlerin büyük bir çoğunluğu için eniyi çözüm elde ettiği gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.5 incelendiğinde A-MM'nin sadece 5 orta boyutlu problem için eniyi çözümü elde edebildiği görülmektedir. A-MM ile uygun çözüm bulunan 15 problem için ise ortalama sapma değeri %52,29'dur. Ayrıca, 16 orta boyutlu problem için 2 saat içerisinde uygun çözüm dahi bulunamamıştır. UGKA, A-MM ile bulunan 15 (9 adet 25 müşterili, 4 adet 30 müşterili ve 2 adet 50 müşterili) uygun çözümü ortalama %19,55 iyileştirmiştir. Tüm orta boyutlu problemler için ortalama iyileştirme ise yaklaşık %15'tir. UGKA ile 2 orta boyutlu probleme eniyi çözüm elde edilmiştir. UGKA (37,69 sn) ortalamada A-MM'den (6517,62 sn) çok daha hızlıdır. UGKA, başlangıç çözümlerini ise ortalama %35,22 iyileştirmiştir. Orta boyutlu problemler için UGKA ile 10 bağımsız koşum sonrası elde edilen çözümlerin ortalama varyasyon katsayısı 2,31 olup, küçük boyutlu problemlerdeki katsayıya (1,92) oldukça yakındır. Dolayısıyla, orta boyutlu problemler için UGKA'nın hem çözüm kalitesi hem de çözüm zamanı açısından A-MM'den üstün olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.6, büyük boyutlu problemler için sonuçlar vermektedir. A-MM büyük boyutlu problemlerin tümünde 2 saat içerisinde uygun çözüm bulamamıştır. UGKA ise, A-MM'nin aksine büyük boyutlu problemlere makul çözüm sürelerinde uygun çözüm bulmuştur.

UGKA'nın büyük boyutlu problemler için ortalama çözüm zamanı yaklaşık 312 saniye olup, A-MM'den oldukça hızlıdır. Bununla birlikte UGKA, başlangıç çözümlerini ortalama % 30,57 iyileştirmiştir.

Çizelge 4.5. Orta boyutlu problemlerde A-MM ve UGKA çözümleri

Problem	A-MM			UGKA							
						Z^{UGKA}			Çözüm Süresi (sn)		
	Z^*	Çözüm Süresi (sn)	Δ_{opt}	$Z^{BÇ}$	$\Delta_{BÇ}$	Eniyi	Ort.	VK		Δ_{UGKA}	$\Delta_{iyileş.}$
c101C25	269,85	8,78	0,00	493,60	82,92	**269,85**	282,02	3,05	12,90	**0,00**	45,33
c103C25	507,26	7200,00	122,07	513,28	1,19	**331,31**	340,35	2,18	19,12	**-34,69**	35,45
c206C25	327,39	7200,00	19,98	518,55	58,39	**316,03**	326,28	2,08	25,31	**-3,47**	39,06
c208C25	327,48	7200,00	36,59	465,54	42,16	**277,84**	285,60	1,67	25,97	**-15,16**	40,32
r104C25	521,67	7200,00	58,96	**513,29**	**-1,61**	**407,42**	418,26	3,03	20,67	**-21,90**	20,63
r105C25	535,67	156,34	0,00	723,30	35,03	539,87	542,39	0,77	7,56	0,78	25,36
r202C25	640,04	7200,00	72,32	652,43	1,94	**469,03**	475,43	1,05	26,12	**-26,72**	28,11
r203C25	487,90	7200,00	36,46	578,81	18,63	**410,28**	426,01	3,17	26,19	**-15,91**	29,12
rc105C25	558,01	4130,27	0,00	829,26	48,61	559,33	568,16	1,38	16,51	0,24	32,55
rc108C25	449,43	7200,00	27,91	747,21	66,26	**447,55**	466,97	2,65	11,90	**-0,42**	40,10
rc204C25	434,95	7200,00	31,11	472,45	8,62	**372,53**	389,66	3,53	23,04	**-14,35**	21,15
rc208C25	444,69	7200,00	42,03	494,39	11,18	**349,84**	367,21	2,55	33,19	**-21,33**	29,24
Ortalama		**5757,95**	37,29		**31,11**			**2,26**	**20,71**	**-12,74**	**32,20**
c101C30	327,86	32,28	0,00	477,27	45,57	**327,86**	330,69	2,42	38,27	**0,00**	31,31
c104C30	364,40	7200,00	47,34	547,48	50,24	**285,54**	304,72	6,68	38,89	**-21,64**	47,85
c202C30	618,97	7200,00	100,52	675,56	9,14	**360,07**	393,40	5,06	11,89	**-41,83**	46,70
c205C30	446,41	7200,00	41,88	656,15	46,98	**376,44**	417,43	4,51	26,66	**-15,67**	42,63
r102C30	-	7200,00	-	858,00	-	**668,16**	674,68	0,83	26,16	-	22,13
r103C30	-	7200,00	-	889,49	-	**580,05**	600,03	1,30	28,44	-	34,79
r201C30	614,31	7106,81	0,00	1089,06	77,28	614,55	620,94	1,35	64,45	0,04	43,57
r203C30	-	7200,00	-	653,99	-	**441,53**	453,61	1,91	27,88	-	32,49
rc102C30	-	7200,00	-	843,24	-	**529,59**	554,85	3,23	47,43	-	37,20
rc108C30	-	7200,00	-	646,47	-	**455,51**	464,87	1,37	32,63	-	29,54
rc201C30	653,62	7200,00	21,18	914,97	39,99	**571,71**	586,34	1,17	20,18	**-12,53**	37,52
rc205C30	-	7200,00	-	777,79	-	**481,03**	494,59	2,42	42,69	-	38,15
Ortalama		**6594,92**	35,15		**44,87**			**2,69**	**33,80**	**-15,27**	**36,99**
c103C50	-	7200,00	-	1077,94	-	**489,59**	507,67	2,04	42,85	-	54,58
c106C50	794,74	7200,00	61,34	1161,66	46,17	**611,62**	638,14	2,04	43,61	**-23,04**	47,35
c202C50	-	7200,00	-	943,77	-	**569,60**	583,70	1,95	39,91	-	39,65
c208C50	707,40	7200,00	64,61	732,15	3,50	**533,33**	540,23	0,87	94,24	**-24,61**	27,16
r102C50	-	7200,00	-	1654,34	-	**1033,55**	1050,98	1,80	48,82	-	37,53
r105C50	-	7200,00	-	1271,08	-	**907,69**	921,26	0,88	54,74	-	28,59
r202C50	-	7200,00	-	932,21	-	**629,93**	644,86	1,33	77,80	-	32,43
r209C50	-	7200,00	-	867,52	-	**617,48**	646,43	2,10	64,42	-	28,82
rc103C50	-	7200,00	-	1012,72	-	**741,65**	772,65	2,47	26,44	-	26,77
rc108C50	-	7200,00	-	1295,60	-	**734,19**	795,15	3,55	74,64	-	43,33
rc202C50	-	7200,00	-	1319,66	-	**824,33**	858,33	3,42	87,30	-	37,53
rc204C50	-	7200,00	-	996,03	-	**659,96**	674,36	1,43	48,10	-	33,74
Ortalama		**7200,00**	62,98		**24,83**			**1,99**	**58,57**	**-23,82**	**36,46**

Büyük boyutlu problemler için UGKA ile 10 bağımsız koşum sonrası elde edilen çözümlerin ortalama varyasyon katsayısı 1,58 olup, küçük ve orta boyutlu problemler (sırasıyla 1,92 ve 2,31) ile kıyaslandığında varyasyon katsayılarının tüm problemler boyutları için oldukça yakın olduğu görülebilir. Dolayısıyla, UGKA'nın çözüm kalitesi problem boyutuna göre değişmemektedir. Sonuç olarak UGKA büyük boyutlu problemlerde de hem çözüm kalitesi hem de çözüm zamanı açısından A-MM'den daha iyi bir performans sergilemiştir.

Çizelge 4.6. Büyük boyutlu problemlerde A-MM ve UGKA çözümleri

Problem	A-MM			UGKA							
						Z^{UGKA}					
	Z^*	Çözüm Süresi (sn)	Δ_{opt}	$Z^{BÇ}$	$\Delta_{BÇ}$	Eniyi	Ort.	VK	Çözüm Süresi (sn)	Δ_{UGKA}	$\Delta_{iyileş.}$
C101_21	-	7200,00	-	2163,04	-	1090,60	1135,41	1,73	600,33	-	49,58
C102_21	-	7200,00	-	2102,78	-	1064,37	1091,91	1,65	355,71	-	49,38
C201_21	-	7200,00	-	1369,55	-	1009,01	1020,75	0,83	140,66	-	26,33
C202_21	-	7200,00	-	1299,12	-	1018,55	1039,79	1,61	112,51	-	21,60
r101_21	-	7200,00	-	2159,56	-	1623,14	1648,32	0,77	341,15	-	24,84
r102_21	-	7200,00	-	2078,82	-	1486,91	1513,01	1,60	339,15	-	28,47
r201_21	-	7200,00	-	1664,06	-	1235,73	1275,41	1,98	187,37	-	25,74
r202_21	-	7200,00	-	1611,03	-	1131,24	1164,01	1,73	221,71	-	32,02
rc101_21	-	7200,00	-	2463,60	-	1714,47	1742,27	1,18	643,43	-	30,41
rc102_21	-	7200,00	-	2281,02	-	1547,10	1587,05	1,89	290,43	-	32,12
rc201_21	-	7200,00	-	1881,19	-	1410,68	1457,99	2,05	347,26	-	25,01
rc202_21	-	7200,00	-	1748,38	-	1337,54	1376,51	1,92	159,93	-	23,50
Ortalama		**7200,00**						**1,58**	**311,64**		**30,57**

Çizelge 4.7'de sayısal sonuçların özeti verilmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi UGKA, 29'u küçük boyutlu ve 2'si orta boyutlu olmak üzere toplam 31 probleme eniyi çözümü bulmuştur. A-MM ile eniyi çözüm bulunan 7 problem için ise ortalama sapma değeri sadece %0,91 civarındadır. Aynı zamanda UGKA, A-MM'nin 2 saat içerisinde çözüm bulamadığı 28 probleme uygun çözüm bulmuştur. Bununla birlikte UGKA, A-MM ile elde edilen üst sınırları 45 problem (2 küçük boyutlu, 31 orta boyutlu ve 12 büyük boyutlu) için iyileştirmiştir. UGKA'nın ortalama eniyi çözümden sapma yüzdeleri, küçük ve orta boyutlu problemler için sırasıyla %1,33 ve %0,35 iken, A-MM üst sınırları da yine küçük ve orta boyutlu problemler için %1,7 ve %19,55 iyileştirilmiştir.

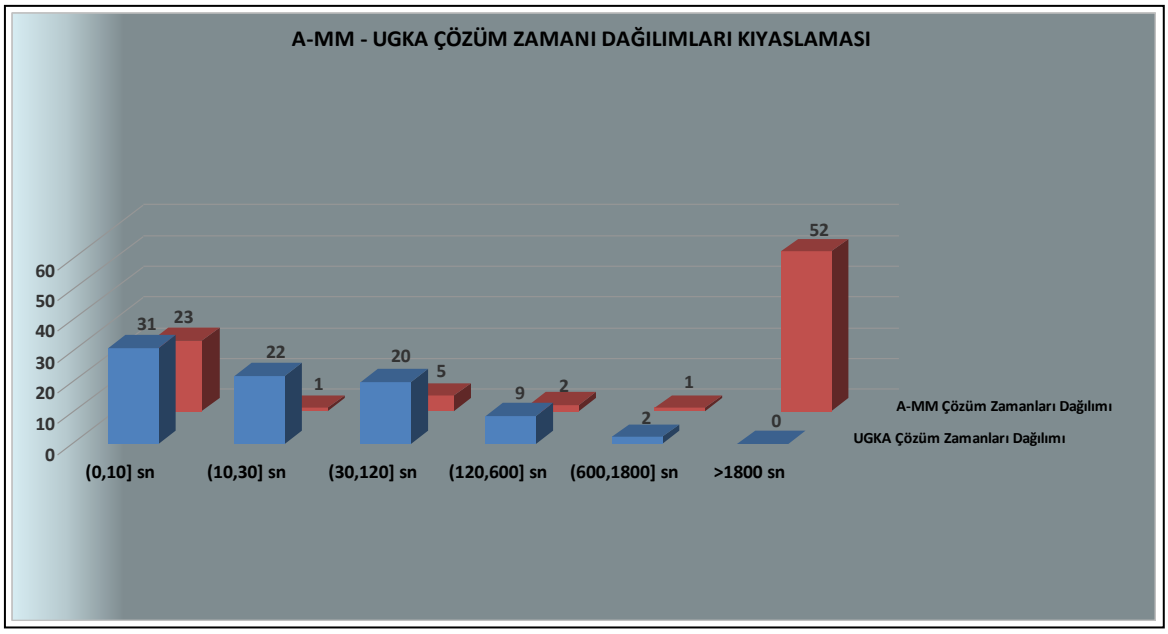
Çizelge 4.7. A-MM ve UGKA çözüm kıyaslamaları özeti

Problem Boyutu	Sonuç (Çözüm Süresi (sn))	A-MM	UGKA	İyileştirme Adedi	Ortalama			
					Sapma	Üst Sınır İyileştirmesi	$\Delta_{iyileş.}$	VK
Küçük (36)	Çözüm yok	-	-	2	1,33	1,7	18,98	1,92
	Uygun çözüm	3	7					
	Eniyi çözüm	33	29					
	(Çözüm Süresi)	(1005,76)	(4,79)					
Orta (36)	Çözüm yok	16	-	31	0,35	19,55	35,21	2,31
	Uygun çözüm	15	34					
	Eniyi çözüm	5	2					
	(Çözüm Süresi)	(6517,23)	(37,69)					
Büyük (12)	Çözüm yok	12	-	12	-	-	30,57	1,58
	Uygun çözüm	-	12					
	Eniyi çözüm	-	-					
	(Çözüm Süresi)	(7200)	(311,64)					

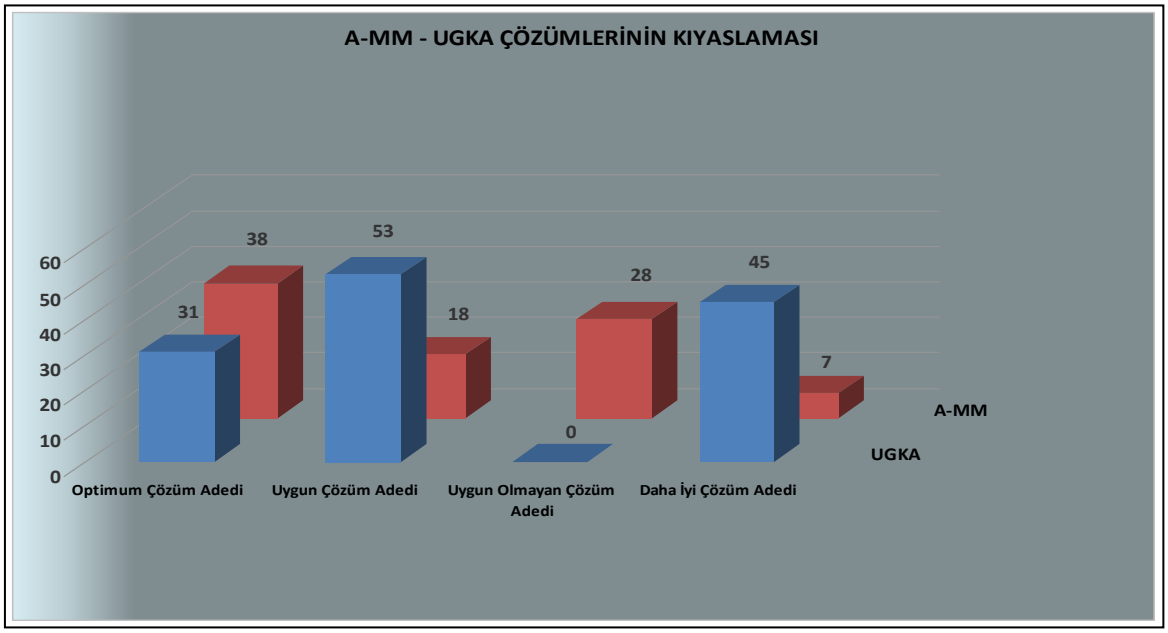
A-MM, büyük boyutlu hiçbir problem için uygun çözüm elde edememiştir. Bu nedenle başlangıç çözümlerinin ortalama %30,57 iyileştirilmesi, UGKA'nın büyük boyutlu problemlerdeki başarısının bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

UGKA, eniyi ya da eniyiye yakın çözümlere çok kısa sürelerde (küçük, orta ve büyük boyutlu problemler için sırasıyla ortalama 4,78, 37,69 ve 312 sn.) eriştiğinden çözüm zamanı ve çözüm kalitesi açısından A-MM'den daha üstün olduğu görülmektedir. UGKA; küçük, orta ve büyük boyutlu problemlerin başlangıç çözümlerini sırasıyla ortalama %18,97, %35,21 ve %30,57 iyileştirmiştir. Bu iyileştirme oranları, UGKA'nın kaliteli çözümlere erişebilmek için çözüm uzayındaki arama kabiliyetinin kanıtıdır. Son olarak, tüm problem boyutlarında başlangıç çözümlerinin ortalama %18'in üzerinde iyileştirilebilmesi ve yine tüm problem boyutları için 2,5'in altındaki ortalama varyasyon katsayıları, önerilen UGKA algoritmasının gürbüzlüğünün göstergesidir.

Sonuç olarak, sırasıyla çözüm zamanı dağılımlarının ve çözümlerin karşılaştırıldığı Şekil 4.16 ve Şekil 4.17.'de de görüldüğü üzere UGKA, A-MM'den hem çözüm kalitesi hem de çözüm zamanı açısından çok daha iyi performans göstermektedir.



Şekil 4.17. A-MM - UGKA çözüm zamanı dağılımları karşılaştırması



Şekil 4.18. A-MM - UGKA çözümlerinin karşılaştırması

Başlangıç çözümü üreten E-ÇKS algoritması tek başına değerlendirildiğinde ise 5, 10 ve 15 müşterili küçük boyutlu problemler için elde ettiği çözümlerin A-MM ile bulunan eniyi / tamsayılı çözümden ortalama yüzde sapma değerlerinin sırasıyla %14,43, %27,36 ve %39,44 olduğu Çizelge 4.4'den görülmektedir. Ayrıca, E-ÇKS ile 5 müşterili 2 problem için eniyi çözüme ulaşılmıştır.

Çizelge 4.5 incelendiğinde, A-MM'nin 2 saat içerisinde bir çözüm bulamadığı 30 müşterili 6 problem ve 50 müşterili 10 problem dâhil olmak üzere orta boyutlu 36 problemin tümünde E-ÇKS ile çözüme ulaşıldığı görülmektedir. 25, 30 ve 50 müşterili orta boyutlu problemler için E-ÇKS çözümlerinin A-MM ile bulunan eniyi tamsayılı çözümden ortalama yüzde sapma değerleri ise sırasıyla %31,11, %44,87 ve %24,83'tür. Ayrıca, 25 müşterili 1 problem için matematiksel model ile bulunan çözüm, E-ÇKS ile %1,61 iyileştirilmiştir.

Son olarak, Çizelge 4.6 incelendiğinde de A-MM ile tamsayılı uygun çözümün bulunamadığı 100 müşterili 12 probleme E-ÇKS ile uygun çözüm bulunduğu görülmektedir. Dolayısıyla, tüm problemlere çözümleri yaklaşık 1 saniye gibi çok kısa sürede elde eden E-ÇKS de, orta ve büyük boyutlu KF-E-ARP'nin çözümü için bir çözüm aracı olarak kullanılabilir.

4.4.3. Duyarlılık analizleri

Bu bölümde 2 aşamalı olarak duyarlılık analizleri yapılmaktadır. İlk aşamada UGKA'da kullanılan kabul olasılık fonksiyonunun ve yeniden ısıtma mekanizmasının algoritma performansına etkileri analiz edilmiştir. İkinci aşamada ise seçilen örnek problemlerde filo genişlikleri ve emisyon üst limitleri artırılarak amaç fonksiyonu değerlerinin değişimi gözlemlenmiştir.

Kabul olasılık fonksiyonu ve yeniden ısıtma mekanizmasının etkileri

Kabul olasılık fonksiyonunun ve yeniden ısıtma mekanizmasının UGKA'nın performansı üzerindeki etkisini incelemek için UGKA'dan kabul olsılık fonksiyonunu çıkararak $UGKA_{w_KF}$ ve yeniden ısıtma mekanizmasını çıkararak $UGKA_{w_YI}$ adında iki yeni versiyon üretilmiştir. $UGKA_{w_KF}$, mevcut çözümün iyileştirilmesi durumunda komşu çözümü yeni mevcut çözüm olarak kabul etmektedir. Tüm problemler $UGKA_{w_KF}$ ve $UGKA_{w_YI}$ ile tekrar çözülmüş ve 10 koşum sonucunda bulunan eniyi çözümler (Z^{W_KF} ve Z^{W_YI}) toplam maliyeti artırması açısından incelenmiştir.

Çizelge 4.8 – Çizelge 4.10, sırasıyla küçük, orta ve büyük boyutlu problemler için sonuçları vermektedir. Çizelgelerdeki ilk iki sütun, problemin etiketini ve UGKA ile

bulunan eniyi çözümü, takip eden iki sütun ise $UGKA_{w_KF}$ ile bulunan eniyi çözümü ve Z^{UGKA}'den yüzde artışı ($\Delta_{W_KF} = 100 * \left((Z^{W_KF} - Z^{UGKA})/Z^{UGKA}\right)$) vermektedir. Son iki sütunda da sırasıyla $UGKA_{w_YI}$ ile bulunan eniyi çözüm ve yine Z^{UGKA}'den yüzde artış ($\Delta_{W_YI} = 100 * \left((Z^{W_YI} - Z^{UGKA})/Z^{UGKA}\right)$ gösterilmektedir. 5 müşterili problemlerde yeniden ısıtma mekanizması kullanılmadığından Çizelge 4.8'in hücrelerinde "*" simgesi kullanılmıştır.

Çizelge 4.8. Kabul olasılık fonksiyonu ve yeniden ısıtma mekanizmasının küçük boyutlu problemlerdeki etkisi

Problem	Z^{UGKA}	Kabul fonksiyonu olmadan		Yeniden Isıtma olmadan	
		Z^{W_KF}	Δ_{W_KF}	Z^{W_YI}	Δ_{W_YI}
c101C5	253,42	253,42	0,00	*	*
c103C5	168,37	168,37	0,00	*	*
c206C5	227,19	227,19	0,00	*	*
c208C5	175,35	175,35	0,00	*	*
r104C5	142,55	178,66	20,21	*	*
r105C5	157,14	158,45	0,83	*	*
r202C5	126,52	149,61	15,44	*	*
r203C5	198,54	198,54	0,00	*	*
rc105C5	238,73	243,81	2,08	*	*
rc108C5	261,02	261,02	0,00	*	*
rc204C5	184,11	186,06	1,05	*	*
rc208C5	179,62	193,14	7,00	*	*
Ortalama			**3,88**		
c101C10	385,64	402,03	4,08	385,64	0,00
c104C10	259,92	293,65	11,49	283,92	8,46
c202C10	250,38	277,29	9,70	250,38	0,00
c205C10	237,24	331,53	28,44	237,24	0,00
r102C10	245,37	264,59	7,26	245,37	0,00
r103C10	196,22	196,22	0,00	196,22	0,00
r201C10	221,34	276,35	19,91	221,34	0,00
r203C10	213,65	241,67	11,60	213,65	0,00
rc102C10	397,08	418,82	5,19	397,08	0,00
rc108C10	347,15	356,58	2,64	347,15	0,00
rc201C10	320,22	364,76	12,21	339,29	5,62
rc205C10	334,45	348,66	4,08	346,98	3,61
Ortalama			**9,72**		**1,47**
c103C15	361,27	389,64	7,28	370,59	2,52
c106C15	270,82	286,39	5,44	270,82	0,00
c202C15	374,91	463,76	19,16	376,92	0,53
c208C15	313,40	472,40	33,66	313,40	0,00
r102C15	387,98	393,55	1,42	387,98	0,00
r105C15	321,96	331,83	2,97	321,96	0,00
r202C15	380,58	398,51	4,50	377,04	-0,94
r209C15	280,09	280,09	0,00	280,09	0,00
rc103C15	406,33	412,40	1,47	406,33	0,00
rc108C15	385,10	405,55	5,04	386,22	0,29
rc202C15	420,89	422,31	0,34	420,89	0,00
rc204C15	329,14	384,47	14,39	329,14	0,00
Ortalama			**7,97**		**0,20**

Çizelgelerden görüldüğü üzere UGKA'da kabul olasılık fonksiyonu kullanılmadığında amaç fonksiyonu değeri küçük, orta ve büyük boyutlu problemlerde sırasıyla ortalama %7,19, %8,97 ve %4,74 kötüleşmektedir. Bu sonuçlar, kabul olasılık fonksiyonunun çeşitlendirme etkisinin çözümlerin kalitesini artırdığını ortaya koymaktadır.

Çizelge 4.9. Kabul olasılık fonksiyonu ve yeniden ısıtma mekanizmasının orta boyutlu problemlerdeki etkisi

Problem	Z^{UGKA}	Kabul fonksiyonu olmadan		Yeniden Isıtma olmadan	
		Z^{W_KF}	Δ_{W_KF}	Z^{W_YI}	Δ_{W_YI}
c101C25	269,85	280,48	3,94	275,28	2,01
c103C25	331,31	375,99	13,49	335,20	1,17
c206C25	316,03	366,02	15,82	324,12	2,56
c208C25	277,84	314,78	13,30	291,04	4,75
r104C25	407,42	460,83	13,11	419,11	2,87
r105C25	539,87	539,87	0,00	544,89	0,93
r202C25	469,03	486,58	3,74	489,74	4,41
r203C25	410,28	429,34	4,64	417,66	1,80
rc105C25	559,33	634,34	13,41	566,05	1,20
rc108C25	447,55	595,63	33,09	449,43	0,42
rc204C25	372,53	409,42	9,90	374,86	0,63
rc208C25	349,84	402,87	15,16	370,73	5,97
Ortalama			**11,63**		**2,39**
c101C30	327,86	375,68	12,73	328,00	0,04
c104C30	285,54	330,50	13,60	293,10	2,58
c202C30	360,07	389,52	7,56	383,40	6,08
c205C30	376,44	410,23	8,24	409,05	7,97
r102C30	668,16	676,14	1,18	670,03	0,28
r103C30	580,05	651,01	10,90	606,38	4,34
r201C30	614,55	661,81	7,14	619,11	0,74
r203C30	441,53	456,35	3,25	442,05	0,12
rc102C30	529,59	672,61	21,26	537,92	1,55
rc108C30	455,51	500,66	9,02	465,31	2,10
rc201C30	571,71	580,37	1,49	579,21	1,30
rc205C30	481,02	528,57	8,99	484,79	0,78
Ortalama			**8,78**		**2,32**
c103C50	489,58	551,44	11,22	510,46	4,09
c106C50	611,62	691,68	11,57	653,44	6,40
c202C50	569,60	631,48	9,80	588,59	3,23
c208C50	533,33	580,64	8,15	544,91	2,12
r102C50	1033,55	1076,71	4,01	1058,40	2,35
r105C50	907,69	953,12	4,77	920,29	1,37
r202C50	629,93	674,60	6,62	650,99	3,24
r209C50	617,47	636,81	3,04	620,37	0,47
rc103C50	741,65	793,96	6,59	793,96	6,59
rc108C50	734,19	787,03	6,71	747,56	1,79
rc202C50	824,33	849,12	2,92	837,88	1,62
rc204C50	659,96	677,94	2,65	669,03	1,36
Ortalama			**6,50**		**2,88**

Benzer şekilde UGKA'da yeniden ısıtma mekanizması kullanılmadığında amaç fonksiyonu değeri küçük, orta ve büyük boyutlu problemlerde sırasıyla ortalama %0,84, %2,53 ve %2,00 kötüleşmektedir. Dolayısıyla, yeniden ısıtma mekanizmasının da kabul olasılık fonksiyonu kadar olmamakla birlikte çözüm kalitesine olumlu etkisinin olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.10. Kabul olasılık fonksiyonu ve yeniden ısıtma mekanizmasının büyük boyutlu problemlerdeki etkisi

Problem	Z^{UGKA}	Kabul fonksiyonu olmadan		Yeniden Isıtma olmadan	
		Z^{W_KF}	Δ_{W_KF}	Z^{W_YI}	Δ_{W_YI}
C101_21	1090,60	1123,78	2,95	1088,57	-0,19
C102_21	1064,37	1106,63	3,82	1088,16	2,19
C201_21	1009,01	1014,05	0,50	1008,30	-0,07
C202_21	1018,55	1022,01	0,34	1033,18	1,42
r101_21	1623,14	1739,60	6,69	1696,33	4,31
r102_21	1486,91	1507,58	1,37	1479,64	-0,49
r201_21	1235,73	1253,36	1,41	1256,49	1,65
r202_21	1131,24	1225,06	7,66	1154,03	1,98
rc101_21	1714,47	1752,07	2,15	1714,13	-0,02
rc102_21	1547,10	1634,91	5,37	1680,09	7,92
rc201_21	1410,68	1553,64	9,20	1464,23	3,66
rc202_21	1337,54	1581,97	15,45	1360,71	1,70
Ortalama			**4,74**		**2,00**

Filo genişliğinin ve emisyon üst limitinin etkileri

Bu bölümde de artan filo genişliğinin ve emisyon üst limitinin amaç fonksiyonu değeri üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Bu nedenle emisyon üst limiti ve mevcut durumun filo genişliğinin 2 ve 4 katı dikkate alınarak 25, 30 ve 50 müşterili problemler çözülmüştür. Çizelge 4.11'de elde edilen sonuçlar raporlanmıştır. Çizelge 4.11'de ilk sütun problemin etiketini, sonraki iki sütun "n^E" ve "n^C", sırasıyla filolardaki elektrikli ve konvansiyonel araç sayılarını tanımlamaktadır. "*UB"* sütununda sırasıyla izin verilen orijinal emisyon (CO_2) üst limiti ile bu limit miktarının 2 katı ve 4 katı kg cinsinden verilmektedir. Takip eden sütunlarda ise problemin orijinal filo genişliği ve bu genişliğin 2 katı ve 4 katı araç sayıları ile çözülmesi durumunda elde edilen amaç fonksiyonu değeri "*Maliyet*", filodan rotalanan elektrikli ve konvansiyonel araç sayıları "*#EA-#KA*" ve emisyon miktarı "*Emisyon*" gösterilmektedir.

Dolayısıyla, seçilen herbir problem 9 farklı senaryo ile çözülmüş ve sonuçlar raporlanmıştır. Sıralı artışlar ile elde edilen ilk eniyi değerler kalın puntolar ile ifade edilmiştir.

Çizelge 4.11. Artan filo genişliği ve emisyon üst limitinin etkisi

				Orijinal Filo Genişliği			2 x Orijinal Filo Genişliği			4 x Orijinal Filo Genişliği		
Problem	n^E	n^C	*UB*	Maliyet	#EA-#KA	Emisyon	Maliyet	#EA-#KA	Emisyon	Maliyet	#EA-#KA	Emisyon
c101C25	2	2	250	269,85	2-2	143,14	**260,58**	**0-4**	**208,57**	260,58	0-4	208,57
			500	269,85	2-2	143,14	260,58	0-4	208,57	260,58	0-4	208,57
			1000	269,85	2-2	143,14	260,58	0-4	208,57	260,58	0-4	208,57
r104C25	3	3	250	407,42	1-3	249,37	407,42	1-3	249,37	407,42	1-3	249,37
			500	**404,85**	**0-3**	**336,04**	404,85	0-3	336,04	404,85	0-3	336,04
			1000	404,85	0-3	336,04	404,85	0-3	336,04	404,85	0-3	336,04
rc108C25	3	3	300	447,55	1-3	269,31	447,55	1_3	269,31	447,55	1_3	269,31
			600	447,55	1-3	269,31	**438,16**	**0_4**	**335,10**	438,16	0_4	335,10
			1200	447,55	1-3	269,31	438,16	0_4	335,10	438,16	0_4	335,10
c101C30	2	2	350	327,86	2-2	152,54	**313,42**	**0_4**	**254,52**	313,42	0_4	254,52
			700	327,86	2-2	152,54	313,42	0_4	254,52	313,42	0_4	254,52
			1400	327,86	2-2	152,54	313,42	0_4	254,52	313,42	0_4	254,52
r102C30	5	5	350	668,16	3-5	313,25	667,19	2_6	346,23	667,19	2_6	346,23
			700	668,16	3-5	313,25	**645,57**	**0_8**	**482,51**	645,57	0_8	482,51
			1400	668,16	3-5	313,25	645,57	0_8	482,51	645,57	0_8	482,51
rc108C30	4	4	350	455,51	2-2	159,72	455,51	2_2	159,72	455,51	2_2	159,72
			700	**453,11**	**0-4**	**371,54**	453,11	0_4	371,54	453,11	0_4	371,54
			1400	453,11	0-4	371,54	453,11	0_4	371,54	453,11	0_4	371,54
c103C50	3	3	400	489,59	2-3	225,44	485,54	0_6	399,76	485,54	0_6	399,76
			800	489,59	2-3	225,44	**480,34**	**0_6**	**403,01**	480,34	0_6	403,01
			1600	489,59	2-3	225,44	480,34	0_6	403,01	480,34	0_6	403,01
r102C50	8	8	400	1033,55	6-5	370,85	1033,55	6_5	370,85	1033,55	6_5	370,85
			800	1017,92	4-7	440,90	**977,86**	**0_11**	**735,39**	977,86	0_11	735,39
			1600	1017,92	4-7	440,90	977,86	0_11	735,39	977,86	0_11	735,39
rc103C50	4	4	450	741,65	2-4	402,71	741,65	2_4	402,71	741,65	2_4	402,71
			900	741,65	2-4	402,71	**705,63**	**0_6**	**582,37**	705,63	0_6	582,37
			1800	741,65	2-4	402,71	705,63	0_6	582,37	705,63	0_6	582,37

“c101C25” ve “c101C30” etiketli problemlerin değişen senaryolardaki amaç fonksiyonu değerleri sadece filodaki araç sayılarının artışı ile azalmıştır. “c101C25” ve “c101C30” etiketli problemlerde filodaki araç sayıları 2 katına çıkarıldığında amaç fonksiyonu değerleri sırasıyla %3,44 ve %4,41 azalmıştır. Bunun sebebi her iki problem için de orijinal problemde rotalanan 2 elektrikli aracın yerine konvansiyonel araçların görevlendirilmesidir. Ancak araç sayıları yeterli seviyede olduğundan 4 katına çıkarıldığında amaç fonksiyonu değerinde değişim olmamıştır. Sonuçların, emisyonun artışına duyarsız kalmasının sebebi ise orijinal emisyon üst limiti içerisinde problemin çözülebilir olmasıdır.

“r104C25” ve “rc108C30” etiketli problemlerin değişen senaryolardaki amaç fonksiyonu değerleri ise sadece emisyon üst limitinin artışı ile azalmıştır. “r104C25” ve “rc108C30” etiketli problemlerde izin verilen emisyon üst limiti 2 katına çıkarıldığında amaç fonksiyonu değerleri sırasıyla %0,63 ve %0,53 azalmıştır. Bunun sebebi her iki problem için de, orijinal problemde emisyon üst limiti nedeniyle görevlendirilemeyen ya da daha kısa mesafeler için görevlendirilen konvansiyonel araçların daha fazla kullanılabilir hale gelmesidir. Problemlerin orijinal emisyon üst limiti dahilindeki çözümlerinde bulunan elektrikli araçların (“r104C25” için 1 EA, “rc108C30” için 2 EA) ziyaret ettiği müşterilerin talepleri, limit 2 katına çıkarıldığında konvansiyonel araçlar tarafından karşılanabilmiştir. Sonuçların, filo genişliği artışına duyarsız kalmasının sebebi ise orijinal filo genişliği ile problemin çözülebilir olmasıdır.

“rc108C25” ve “rc103C50” etiketli problemlerin amaç fonksiyonu değerleri ise emisyon üst limitinin sabit kalıp filo genişliğinin artırıldığı ya da filo genişliğinin sabit kalıp emisyon üst limitinin artırıldığı 4 senaryoda da değişmemiştir. Emisyon üst limiti sabitken filo genişliğinin artışı, filoya ilave konvansiyonel araçlar dahil edilse bile emisyon kısıtı nedeniyle kullanılamadığından çözümü değiştirmemiştir. Filo genişliği sabitken emisyon üst limitinin artırılması ise, diğer parametrelerin (azami tur tamamlanma zamanı, müşterilen zaman pencereleri, toplam talep miktarı ve araç kapasiteleri) rotalanması gereken asgari araç sayısında belirleyici olması sebebiyle çözümü değiştirmemiştir. Diğer bir deyişle, orijinal problemlerin çözümlerinde bulunan elektrikli araçların (“rc108C25” için 1 EA, “rc103C50” için 2 EA) ziyaret ettiği müşterilerin talepleri filodaki konvansiyonel araçlar ile karşılanamamıştır. Emisyon üst limiti ve filo genişliği aynı anda 2 katına çıkarıldığında ise amaç fonksiyonu değerleri “rc108C25” ve “rc103C50” için sırasıyla %2,10 ve %4,86 azalmıştır. Filo genişliğinin ya da emisyon üst limitinin 4 katına çıkarılması çözümde daha fazla bir değişikliğe neden olmamıştır.

“r102C30” ve “c103C50” etiketli problemlerde emisyon üst limiti sabitken filo genişliği 2 katına çıkarıldığında amaç fonksiyonu değerleri sırasıyla %0,14 ve %0,83 oranında azalmıştır. “r102C30” etiketli problemde görevlendirilen elektrikli araç sayısı 3‘den 2’ye düşmüş, konvansiyonel araç sayısı ise 5’den 6’ya çıkmıştır. “c103C50” etiketli problemde görevlendirilen elektrikli araç sayısı 2’den 0’a düşmüş, konvansiyonel araç sayısı ise 3’den 6’ya çıkmıştır. Filo genişliği, orijinal genişliğin 2 katı iken emisyon üst limiti 2 katına çıkarıldığında ise amaç fonksiyonu değerleri tekrardan sırasıyla %3,24 ve %1,07

azalmaktadır. Bu durumda; “r102C30” etiketli problemde görevlendirilen elektrikli araç sayısı 2‘den 0’a düşmüş, konvansiyonel araç sayısı ise 6’dan 8’e çıkmıştır. “c103C50” etiketli problemde ise görevlendirilen araç sayılarında değişiklik olmamıştır. Orijinal problemlerin amaç fonksiyonu değerlerinde ise toplamda sırasıyla %3,38 ve %1,89 iyileşme sağlanmıştır. Filo genişliğinin ya da emisyon üst limitinin 4 katına çıkarılması çözümde daha fazla bir değişikliğe neden olmamıştır.

Son olarak “r102C50” etiketli problemde ise filo genişliği sabitken emisyon üst limiti 2 katına çıkarıldığında amaç fonksiyonu değeri %1,51 azalmıştır. Problem çözümünde görevlendirilen elektrikli araç sayısı 6‘dan 4’e düşmüş, konvansiyonel araç sayısı ise 5’den 7’ye çıkmıştır. Emisyon üst limiti, orijinal limitin 2 katı iken filo genişliği 2 katına çıkarıldığında ise amaç fonksiyonu değeri tekrardan %3,93 azalmaktadır. Bu durumda, problem çözümünde görevlendirilen elektrikli araç sayısı 4‘den 0’a düşmüş, konvansiyonel araç sayısı ise 7’den 11’e çıkmıştır. Orijinal problemin amaç fonksiyonu değerlerinde ise toplamda %5,39 iyileşme sağlanmıştır. Filo genişliğinin ya da emisyon üst limitinin 4 katına çıkarılması çözümde daha fazla bir değişikliğe neden olmamıştır.

Sonuç olarak azami tur tamamlanma zamanı, müşterilerin zaman pencereleri ve toplam talep miktarı, filodaki diğer konvansiyonel araçların görevlendirilmesine ya da mevcut rotalardan daha uzun mesafelerde görevlendirilmesine engel teşkil etmiyorsa emisyon üst limitinin ve filodaki konvansiyonel araç sayısının artışı, elektrikli araçların şarj maliyetine katlanılmadığından elektrikli araçların kullanımını azaltmakta dolayısıyla amaç fonksiyonu değerini azaltmaktadır.

4.5. Değerlendirme

Bu bölümde orta ve büyük boyutlu problemlere kısa sürelerde çözüm üretebilmek amacıyla başlangıç çözümünü üreten E-ÇKS algoritması ve bu çözümü iyileştiren UGKA’ya dayalı sezgisel algoritma geliştirilmiştir. UGKA’ya dayalı algoritma içerisinde çözüm uzayında etkin arama yapmak için probleme özgü ve karmaşık kısıtlara uyumlu yeni komşuluk mekanizmaları önerilmiştir. Algoritmada, yeniden ısıtma, komşuluk mekanizmalarının ağırlıklarına ilk değerlerini atama ve başlangıç çözümüne geri dönme gibi çeşitlendirme etkisini artırıcı yeni yaklaşımlar kullanılmıştır. Yeni komşuluk puanlama politikası ile iyileştirme yaklaşımı önerilmiştir. Ayrıca, UGKA’da belirli

aralıklarla çözümü iyileştirmek amacıyla değiş-tokuşa dayalı bir yerel arama algoritması geliştirilmiştir.

UGKA'nın performansını değerlendirmek için deneysel analiz yapılmıştır. Analizde UGKA ile karma tamsayılı matematiksel modelin (A-MM) sonuçları karşılaştırılmıştır. A-MM ile bulunan 17 problemin (2 küçük ve 15 orta boyutlu) üst sınırı UGKA tarafından iyileştirilmiştir. A-MM ile uygun çözüm bulunamayan 28 probleme (16 orta ve 12 büyük boyutlu) ise UGKA ile makul sürelerde çözüm bulunmuştur. Bununla birlikte aynı 28 probleme UGKA içerisindeki başlangıç çözümü üreten E-ÇKS ile de 1 sn'den daha kısa sürelerde uygun çözüm elde edilmiştir. Çözüm zamanı açısından karşılaştırıldığında ise UGKA'nın A-MM'ye kıyasla küçük, orta ve büyük boyutlu problemler için çok daha hızlı olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca UGKA, küçük, orta ve büyük boyutlu problemlerin başlangıç çözümlerini sırasıyla ortalama %18,97, %35,21 ve %30,57 iyileştirmiştir. Bu iyileştirme yüzdeleri, UGKA'nın kaliteli çözümlere erişebilmek için çözüm uzayındaki arama kabiliyetinin kanıtıdır. Tüm problemler için başlangıç çözümlerinin ortalama %18'in üzerinde iyileştirilebilmesi ve yine tüm problemlerde 10 koşum için 2,5'in altındaki varyasyon katsayıları, önerilen UGKA algoritmasının gürbüzlüğünün göstergesidir.

Ayrıca, bu bölümde çeşitli analizler yapılmıştır. İlk analizde UGKA içerisindeki kabul olasılık fonksiyonunun ve yeniden ısıtma mekanizmasının kullanımının algoritma performansına etkileri analiz edilmiştir. Analiz sonucunda kabul olasılık fonksiyonunu UGKA'dan çıkarmanın amaç fonksiyonu değerini ortalama %6,97, yeniden ısıtma mekanizmasını UGKA'dan çıkarmanın ise ortalama %1,79 kötüleştirdiği gözlemlenmiştir. Yeniden ısıtma mekanizmasının da kabul olasılık fonksiyonu kadar olmamakla birlikte çözüm kalitesine olumlu etkisinin olduğu görülmüştür. İkinci analizde seçilen örnek problemlerdeki filo genişlikleri ve emisyon üst limitleri artırılarak amaç fonksiyonu değerlerinin değişimi gözlemlenmiştir. Analiz sonucunda da emisyon üst limitinin ve filodaki konvansiyonel araç sayısının artışının, elektrikli araç kullanımını azaltması sebebiyle amaç fonksiyonu değerlerini iyileştirdiği görülmüştür.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde emisyon salınımı kaynaklı çevresel problemlerin çözümüne ilişkin ilginin arttığını gözlemlemekteyiz. Bu sebeple "yeşil lojistik" ve "yeşil tedarik zinciri" gibi yeni konseptler de aynı ölçüde önem kazanmıştır. Bu konseptler özetle lojistik zincirinin çevre üzerindeki olumsuz etkilerini enazlamayı hedefleyen önlem ve sürdürülebilir politikaları içermektedir. Lojistik zincirinin en önemli aşamalarından biri olan taşımacılık ve ulaştırma ise en yüksek karbon ayak izine sahiptir. Dünya emisyon salınımında da taşımacılık ve ulaştırma sektörünün büyük bir paya sahip olduğu gözetilerek bu sektörlerde daha çevre dostu sistem ve araçlara yatırımlar artmaktadır. Ayrıca kanun koyucuların öne sürdüğü birtakım düzenlemeler ve fosil yakıtlı araç kullanım kısıtlamaları lojistik firmalarını bu yönde planlamalar yapmaya sevk etmektedir. Bununla birlikte, birçok ülke sınırları içerisinde bulunan fosil yakıtlı araçların sayısını kademeli olarak azaltmak için gelecek yol haritalarını yayımlamaya başlamışlardır.

Dünya gündemini meşgul eden çevre kirliliği, küresel ısınma ve iklim krizi gibi global problemlerin baskın nedenlerinden biri de sera gazı salınımına neden olan fosil yakıtlardır. Bu sebeple araştırmacılar, küresel sıcaklıkların hedefler içerisinde kalması için dünya çapında üretilen yıllık fosil yakıt miktarının kademeli biçimde bir düşüş göstermesi gerektiğine dikkat çekmektedirler. Avrupa Birliğinin, Kasım 2019'da yayımladığı "Avrupa Yeşil Mutabakatı"nda da yıllık fosil yakıt miktarı üretiminin ve fosil yakıt tüketen araç kullanımının azaltılması gibi hedeflere yer verilmiştir.

Fosil yakıt tüketen araçlara olan bağımlılığın ve dolayısıyla emisyon salınımın azaltılması için alınan önlemler çerçevesinde "yeşil lojistik" ile birlikte "yeşil araç rotalama problemleri (Y-ARP)" de akademik dünyada büyük önem kazanmıştır. Gerçek hayatta çok fazla uygulama alanı olan Y-ARP, çevrenin korunması amacıyla açığa çıkan sera gazı salınımını enazlamak için teslimat rotasını kısaltmayı ya da sıfır emisyon üreten araçların kullanımını ele almaktadır.

Elektrikli araç teknolojisi de emisyon salınımını ortadan kaldıran ve yüksek enerji verimliliği sağlayan yeşil teknolojilerden biridir. Ayrıca fosil yakıt tüketen araçlara göre daha sessiz çalışan elektrikli araçların bakım-idame maliyetleri de daha azdır.

Bu gelişmeler çerçevesinde akademik çalışmalarda elektrikli araçların ARP'de ele alınması, "elektrikli araç rotalama problemleri (E-ARP)" adı ile Y-ARP altında ayrı bir çalışma alanı oluşturmuştur. Ancak konvansiyonel araçlara kıyasla elektrikli araçların, pil kapasitelerinden dolayı menzilleri daha kısadır. Buna ilaveten şarj edilme süreleri de daha uzundur. Ayrıca, şarj işlemi için ihtiyaç duyulan istasyonlar henüz sınırlı sayıda ve sınırlı lokasyondadır. Bu kısıtlar ARP'ye ilave zorluklar getirmiştir. Bu tez kapsamında belirtilen tüm bu durumlar ile birlikte elektrikli araçlara geçişin kademeli olacağı da dikkate alınarak "Çoklu Şarj Teknolojisine Dayalı Kısmi Şarj Politikalı Karma Filolu Elektrikli Araç Rotalama Problemi (KF-E-ARP)" tanımlanmıştır.

Literatürde ayrık biçimde ele alınan birçok özellik, gerçek hayatı daha iyi yansıtmak ve yeşil lojistik konseptine uyumluluğu artırmak için bu çalışmada birleştirilmiştir. Problemdeki karma filo, elektrikli ve konvansiyonel araçlardan oluşmaktadır. Elektrikli araçlar şarj istasyonlarında kısmi şarj poitikası gereği ihtiyaç duyulan seviyede şarj olmaktadırlar. Ayrıca istasyonlarda farklı şarj konfigürasyonlarından birinin seçimi yapılmaktadır. Bu sebeple şarj miktarı ve şarj konfigürasyonu seçimi problem içindeki karar noktalarındandır. Konvansiyonel araçlar tarafından salınan emisyon miktarı ise belirli bir üst limit ile sınırlandırılmaktadır. Bu özelliklere ilaveten emisyon ve şarj tüketim fonksiyonları içerisinde araçta taşınan yük miktarı da dikkate alınmıştır. Basamak fonksiyon formundaki bu fonksiyonlar önerilen matematiksel model içerisinde doğrusallaştırıldığından problemin zorluk seviyesi artmıştır. İstasyonlarda bulunan çoklu şarj teknolojilerinden birinin seçilmesi ve önerilen karma tamsayılı matematiksel modelde şarj istasyonları kopyalarının kullanılmaması karma filolu problemlerde ilk defa ele alınmıştır. Problem NP-zor olduğundan orta ve büyük boyutlu problemlere çok kısa sürelerde uygun çözüm elde edebilmek için ekleme tabanlı çözüm kurucu sezgisel (E-ÇKS) bir algoritma ve makul sürelerde kaliteli çözüm elde edebilmek için uyarlamalı geniş komşu aramaya (UGKA) dayalı bir algoritma geliştirilmiştir. UGKA içerisinde problemin karmaşık kısıtlarına uyumlu gelişmiş komşuluk mekanizmaları tanımlanmış ve çeşitlendirme etkisini artırıcı yeni yaklaşımlar üretilmiştir. Bu yaklaşımlar; yeniden ısıtma, komşuluk ağırlıklarına ilk değerlerini atama ve başlangıç çözümüne geri dönme mekanizmalarıdır. Ayrıca, yeni komşuluk puanlama politikası ile yeni (ihtiyaç fazlası şarj işlemlerini budayan) iyileştirme yöntemi geliştirilmiştir.

Sayısal analizler ile küçük, orta ve büyük boyutlu 84 problem üzerinde matematiksel model ve UGKA'nın performansı incelenmiştir. Bu analizler aşağıda özetlenmiştir.

Literatürde E-ARP'lerin modellenmesi için aynı şarj istasyonuna birden fazla uğramayı temsilen istasyonların kopyalandığı modelleme yaklaşımı (K-MM) yerine kopyalara gerek duyulmayan yöntemin kullanılabilirliği incelenmiştir. Bu kapsamda, ayrıt tabanlı üç indisli karar değişkenleri kullanılarak kopyalara gerek duymayan matematiksel model (A-MM) geliştirilmiş ve K-MM ile performansı küçük boyutlu problemler üzerinde karşılaştırılmıştır. Analiz sonucunda 5 ve 10 müşteriden oluşan problemlerin tümünde her iki modelleme yöntemi ile eniyi çözümlerin elde edildiği görülmüştür. 10 ve 15 müşterili problemler için A-MM ortalamada çok daha kısa sürede (sırasıyla 159 - 4689 sn) çözüme ulaşmıştır. 15 müşteriden oluşan küçük boyutlu problemlerde K-MM ile 12 adet problemin 3'ünde eniyi çözüme ulaşılırken, A-MM ile 6 problemde eniyi çözüme ulaşılmıştır. Bu sonuçlar KF-E-ARP'nin çözümünde A-MM'nin daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermiştir. Dolayısıyla 84 problem üzerinde A-MM'nin performansı analiz edilmiştir.

KF-E-ARP NP-zor problemler sınıfında olduğundan dolayı matematiksel modelin çözüm zamanı problem boyutuna bağlı olarak üstel artış göstermiştir. (5, 25 ve 50 müşteri için ortalama çözüm zamanları sırasıyla 1,00, 5757,95 ve 7200 sn'dir.) 5, 10 ve 15 müşterili 36 problemin 33'ünde A-MM ile eniyi çözüm elde edilirken 25, 30 ve 50 müşterili 36 problemin 5'inde eniyi çözüm elde edilmiştir. 100 müşterili 12 problem için ise 7200 sn içerisinde tamsayılı uygun çözüm bile bulunamamıştır. Özetle, 30 müşterili problemlerden itibaren A-MM ile 2 saat (7200 sn) içerisinde tamsayılı uygun çözüme ulaşmak zorlaşmış, 50 müşterili sadece 2 problem için uygun çözüme ulaşılmıştır.

İkinci aşamada geliştirilen UGKA'nın performansı analiz edilmiştir. UGKA, 29'u küçük boyutlu ve 2'si orta boyutlu olmak üzere toplam 31 probleme eniyi çözümü elde etmiştir. A-MM ile eniyi çözüm bulunan 7 problem için ortalama sapma değeri sadece %0,91 civarındadır. Aynı zamanda UGKA, A-MM'nin 2 saat içerisinde çözüm bulamadığı 28 probleme makul sürelerde uygun çözüm bulmuştur. Bununla birlikte UGKA, A-MM ile elde edilen üst sınırları 45 problem için iyileştirmiştir. UGKA'nın ortalama eniyi çözümden ortalama sapma yüzdeleri, küçük ve orta boyutlu problemler için sırasıyla %1,17 ve %0,35'tir. UGKA, eniyi ya da eniyi çözüme yakın çözümlere A-MM'ye göre çok daha kısa sürelerde erişmektedir. UGKA; küçük, orta ve büyük boyutlu problemlerin

başlangıç çözümlerini sırasıyla ortalama %18,97, %35,21 ve %30,57 iyileştirmiştir. Bu iyileştirme oranları, UGKA'nın kaliteli çözümlere erişebilmek için çözüm uzayındaki arama kabiliyetinin bir göstergesidir.

Ayrıca (A-MM ile çözüm bulunamayan 28 problem dâhil) tüm problemlere yaklaşık 1 saniye gibi çok kısa sürede uygun çözüm verebilen E-ÇKS de orta ve büyük boyutlu KF-E-ARP'nin çözümü için alternatif bir çözüm aracı olarak kullanılabilir.

Performans analizlerine ilaveten bir takım duyarlılık analizleri de yapılmıştır. İlk olarak, UGKA içerisindeki kabul olasılık fonksiyonunun ve yeniden ısıtma mekanizmasının algoritma performansına etkileri analiz edilmiştir. Analiz sonucunda kabul olasılık fonksiyonunu UGKA'dan çıkarmanın amaç fonksiyonu değerini ortalama %6,97, yeniden ısıtma mekanizmasını UGKA'dan çıkarmanın ise ortalama %1,79 kötüleştirdiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla, yeniden ısıtma mekanizmasının da kabul olasılık fonksiyonu kadar olmamakla birlikte çözüm kalitesine olumlu etkisinin olduğu görülmüştür. Daha sonra seçilen örnek problemlerdeki filo genişlikleri ve emisyon üst limitleri artırılarak amaç fonksiyonu değerlerinin değişimi gözlemlenmiştir. Analiz sonucunda da emisyon üst limitinin ve filodaki konvansiyonel araç sayısının artışının, elektrikli araç kullanımını azaltması sebebiyle amaç fonksiyonu değerlerini iyileştirdiği görülmüştür.

Elde edilen sonuçlara dayalı olarak ileride yapılabilecek çalışmalar şu şekilde sıralanabilir:

- KF-E-ARP, heterojen yapıdaki elektrikli ve konvansiyonel araçlardan oluşan karma filo, şarj konfigürasyonlarına ilaveten pil değişimi (swap), doğrusal olmayan şarj dolum fonksiyonu gibi ilave özellikler dikkate alınarak genişletilebilir.
- Algoritmanın arama gücünü artımak için yeni komşuluk mekanizmaları tanımlanabilir ve kısıt ihlal boyutlarına göre ağırlıklandırılan bir cezalandırma fonksiyonu kullanılabilir.
- Matematiksel model ve meta-sezgisel algoritmaların birlikte kullanıldığı karma matematik tabanlı bir sezgisel (mathheuristic) geliştirilebilir.
- KF-E-ARP için dal-kesme, dal-fiyat gibi kesin çözüm yöntemleri geliştirilebilir.
- KF-E-ARP çok amaçlı problem olarak ele alınabilir ve probleme pareto-optimal çözümler elde edecek meta-sezgisel algoritmalar geliştirilebilir.

KAYNAKLAR

Al-dal'ain, R., & Celebi, D. (2021). Planning a mixed fleet of electric and conventional vehicles for urban freight with routing and replacement considerations. *Sustainable Cities and Society*, 73, 103105.

Andelmin, J., Bartolini, E., (2017). An exact algorithm for the green vehicle routing problem. *Transportation Science*, 51(4), 1288-1303.

Arslan, O., Yıldız, B., Karaşan, O. E., (2015). Minimum cost path problem for plug-in hybrid electric vehicles. *Transportation Research Part E* 80, 123–141.

Arslan, O., Karaşan, O. E., Mahjoub, A. R., Yaman, H., (2019). A branch-and-cut algorithm for the alternative fuel refueling station location problem with routing. *Transportation Science*, 53, 1107-1125.

Arslan, O., (2021). The location-or-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological* 147, 1–21.

Asghari, M., & Al-e, S. M. J. M., (2021). Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. *International Journal of Production Economics*, 231, 107899.

Bruglieri, M., Mancini, S., Pisacane, O., (2019). The green vehicle routing problem with capacitated alternative fuel stations. *Computers & Operations Research*, 112, 104759.

Bruglieri, M., Ferone, D., Festa, P., Pisacane, O., (2022). A GRASP with penalty objective function for the green vehicle routing problem with private capacitated stations. *Computers & Operations Research*, 143, 105770.

Chen, Y., Li, D., Zhang, Z., Wahab, M. I. M., Jiang, Y. (2021). Solving the battery swap station location-routing problem with a mixed fleet of electric and conventional vehicles using a heuristic branch-and-price algorithm with an adaptive selection scheme. *Expert Systems with Applications*, 186, 115683.

Conrad, R.G., Figliozzi, M.A., (2011). The recharging vehicle routing problem. In: Doolen, T., Van Aken, E. (Eds.), *Proceedings of the 2011 Industrial Engineering Research Conference*.

Cordeau, J.F., Gendreau, M., Laporte, G., Potvin, J.Y., & Semet, F., (2002). A Guide to Vehicle Routing Heuristic, *The Journal of the Operational Research Society*, 53, 512-522.

Cortés-Murcia, D. L., Prodhon, C., Afsar, H. M., (2019). The electric vehicle routing problem with time windows, partial recharges and satellite customers. *Transportation Research Part E*, 130, 184–206.

Desaulniers, G., Errico, F., Irnich, S., Schneider, M., (2016). Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows. *Operations Research* 64, 1388–1405.

Dewi, S. K., & Utama, D. M., (2021). A new hybrid whale optimization algorithm for green vehicle routing problem. *Systems Science & Control Engineering*, 9(1), 61-72.

Erdelić, T., & Carić, T., (2019). A survey on the electric vehicle routing problem: variants and solution approaches. *Journal of Advanced Transportation*.

Erdoğan, S., & Miller-Hooks, E., (2012). A green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 48(1), 100-114.

Felipe, Á., Ortuño, M.T., Righini, G., Tirado, G., (2014). A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges. *Transportation Research Part E* 71, 111–128.

Figliozzi, M., (2010). Vehicle routing problem for emissions minimization. *Transportation Research Record*, 2197(1), 1-7.

Gajpal, Y., Abad, P., (2010). Saving-Based Algorithms for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery, *The Journal of the Operational Research Society*, 61, 10,1498-1509.

Goeke, D., Schneider, M., (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research* 245, 81–99.

Gonçalves, F., Cardoso, S. R., Relvas, S., Barbosa-Póvoa, A., (2011). Optimization of a distribution network using electric vehicles: A VRP problem. In: *15th Congresso Nacional da Associação Portuguesa de Investigação Operacional*, pp. 18–20.

Ghorbani, E., Alinaghian, M., Gharehpetian, G., Mohammadi, S., Perboli, G., (2020). A survey on environmentally friendly vehicle routing problem and a proposal of its classification. *Sustainability*, 12(21), 9079.

Guo, F., Zhang, J., Huang, Z., & Huang, W., (2022). Simultaneous charging station location-routing problem for electric vehicles: Effect of nonlinear partial charging and battery degradation. *Energy*, 250, 123724.

Hiermann, G., Hartl, R. F., Puchinger, J., Vidal, T., (2019). Routing a mix of conventional, plug-in hybrid, and electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 272(1), 235-248.

Hottenrott, A., (2015). An adaptive large neighborhood search algorithm for the tail assignment problem of airlines. *Aachen: PhD Thesis*.

Keçeci B., Altıparmak F., Kara İ., (2015). Heterogeneous Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery: Mathematical Formulations and a Heuristic Algorithm, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 30 (2), 185-195.

Keskin, M., Çatay, B., (2016). Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part C* 65, 111–127.

Keskin, M., Çatay, B., (2018). A matheuristic method for the electric vehicle routing problem with time windows and fast chargers. *Computers & Operations Research* 100, 172–188.

Keskin, M., Çatay, B., Laporte, G., (2021). A simulation-based heuristic for the electric vehicle routing problem with time windows and stochastic waiting times at recharging stations. *Computers & Operations Research* 125, 105060.

Koç, Ç., Karaoglan, I., (2016). The green vehicle routing problem: A heuristic based exact solution approach. *Applied Soft Computing* 39, 154–164.

Koç, Ç., Jabali, O., Mendoza, J. E., Laporte, G., (2019). The electric vehicle routing problem with shared charging stations. *International Transactions in Operational Research* 26, 1211–1243.

Kucukoglu, I., Dewil, R., & Cattrysse, D., (2021). The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 161, 107650.

Kumar, A., Kumar, R., & Aggarwal, A., (2022). S2RC: A multi-objective route planning and charging slot reservation approach for electric vehicles considering state of traffic and charging station. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(5), 2192-2206.

Lam, E., Desaulniers, G., & Stuckey, P. J., (2022). Branch-and-cut-and-price for the Electric Vehicle Routing Problem with Time Windows, Piecewise-Linear Recharging and Capacitated Recharging Stations. *Computers & Operations Research*, 105870.

Leggieri, V., & Haouari, M., (2017). A practical solution approach for the green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 104, 97-112.

Li, J., Wang, D., Zhang, J., (2018). Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem based on fuel and carbon emissions. *Journal of Cleaner Production*, 201, 896-908.

Lin, J., Zhou, W., Wolfson, O., (2016). Electric vehicle routing problem. *Transportation Research Procedia* 12, 508–521.

Macrina, G., Pugliese, L. D. P., Guerriero, F., Laporte, G., (2019a). The green mixed fleet vehicle routing problem with partial battery recharging and time windows. *Computers & Operations Research*, 101, 183–199.

Macrina, G., Laporte, G., Guerriero, F., Pugliese, L. D. P., (2019b). An energy-efficient green-vehicle routing problem with mixed vehicle fleet, partial battery recharging and time windows. *European Journal of Operational Research*, 276, 971–982.

Marrekchi, E., Besbes, W., Dhouib, D., Demir, E. (2021). A review of recent advances in the operations research literature on the green routing problem and its variants. *Annals of Operations Research*, 304(1), 529-574.

Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E., & Villegas, J. G., (2016). A multi-space sampling heuristic for the green vehicle routing problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 70, 113-128.

Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J. E., Villegas, J. G., (2017). The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function. *Transportation Research Part B* 103, 87–110.

Olgun, B., Koç, Ç., & Altıparmak, F., (2021). A hyper heuristic for the green vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery. *Computers & Industrial Engineering*, 153, 107010.

Shaw, P., (1997). A new local search algorithm providing high quality solutions to vehicle routing problems. *APES Group, Dept of Computer Science, University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, UK, 46*.

Paz, J.C., Granada-Echeverri, M., Escobar, J.W., (2018). The multi-depot electric vehicle location routing problem with time windows. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 123–136.

Pelletier, S., Jabali, O., Laporte, G., Veneroni, M., (2017). Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models. *Transportation Research Part B* 103, 158–187.

Pelletier, S., Jabali, O., & Laporte, G., (2018). Charge scheduling for electric freight vehicles. *Transportation Research Part B: Methodological*, 115, 246-269.

Pelletier, S., Jabali, O., Laporte, G., (2019). The electric vehicle routing problem with energy consumption uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 225-255.

Rabbani, M., Bosjin, S., Yazdanparast, R., & Saravi, N., (2018). A stochastic time-dependent green capacitated vehicle routing and scheduling problem with time window, resiliency and reliability: a case study. *Decision Science Letters*, 7(4), 381-394.

Rezgui, D., Siala, J. C., Aggoune-Mtalaa, W., & Bouziri, H., (2019). Application of a variable neighborhood search algorithm to a fleet size and mix vehicle routing problem with electric modular vehicles. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 537-550.

Ropke, S., Pisinger, D., (2006a). An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science* 40, 455–472.

Ropke, S., Pisinger, D., (2006b). A unified heuristic for a large class of vehicle routing problems with backhauls. *European Journal of Operational Research* 171, 750–775.

Sadati, M. E. H., Çatay, B., (2021). A hybrid variable neighborhood search approach for the multi-depot green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E*, 149, 102293.

Sassi, O., Cherif, W. R., Oulamara, A., (2014). Vehicle routing problem with mixed feet of conventional and heterogenous electric vehicles and time dependent charging costs. *Technical Report. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01083966*.

Schiffer, M., Walther, G., (2017). The electric location routing problem with time windows and partial recharging. *European Journal of Operational Research* 260, 995–1013.

Schiffer, M., Walther, G., (2018). An adaptive large neighborhood search for the location-routing problem with intra-route facilities. *Transportation Science* 52, 331–352.

Schneider, M., Stenger, A., Goeke, D., (2014). The electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation Science* 48, 500–520.

Solomon, M. M., (1987). Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints. *Operations Research*, 35, 254–265.

Tahami, H., Rabadi, G., Haouari, M., (2020). Exact approaches for routing capacitated electric vehicles. *Transportation Research Part E*, 144, 102126.

Toth, P., & Vigo, D. (Eds.), (2014). Vehicle routing: problems, methods, and applications. *Society for Industrial and Applied Mathematics*.

Turkeš, R., Sörensen, K., Hvattum, L. M., (2021). Meta-analysis of metaheuristics: Quantifying the effect of adaptiveness in adaptive large neighborhood search. *European Journal of Operational Research* 292, 423-442.

Úbeda, S., Faulin, J., Serrano, A., & Arcelus, F. J., (2014). Solving the green capacitated vehicle routing problem using a tabu search algorithm. *Lecture Notes in Management Science*, 6(1), 141-149.

Vidal, T., Laporte, G., Matl, P., (2020). A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants. *European Journal of Operational Research* 286, 401-416.

Vincent, F. Y., Jodiawan, P., Gunawan, A., (2021). An adaptive large neighborhood search for the green mixed fleet vehicle routing problem with realistic energy consumption and partial recharges. *Applied Soft Computing* 105, 107251.

Xiao, Y., Zhang, Y., Kaku, I., Kang, R., & Pan, X, (2021). Electric vehicle routing problem: A systematic review and a new comprehensive model with nonlinear energy recharging and consumption. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 151, 111567.

Yaşar Boz, E., Aras, F., (2021). Yeşil araç rotalama problemi araştırması: geçmiş ve gelecekteki eğilimler. *Journal of Turkish Operations Management*, 5 (2), 806-821.

Yang, J., Sun, H., (2015). Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles. *Computers and Operations Research* 55, 217–232.

Yıldız, E.A., Karaoğlan, I., Altıparmak, F., (2021). A mixed integer mathematical model and a heuristic approach for two-echelon location routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 807-822.

Zhang, J., Zhao, Y., Xue, W., Li, J., (2015). Vehicle routing problem with fuel consumption and carbon emission. *International Journal of Production Economics*, 170, 234-242.

EKLER

EK-1. KF-E-ARP için Kopya Düğümlü Matematiksel Model (K-MM)

Kümeler ve parametreler

V : Müşteriler kümesi

R : Şarj istasyonları kümesi

R' : Kopyaları ile birlikte şarj istasyonları kümesi

(Aynı şarj istasyonunun ihtiyaçlar doğrultusunda aynı ya da farklı araçlar tarafından birden fazla ziyaret edilebileceği dikkate alınarak herbir ziyaret farklı kopya ile temsil edilmiş ve model kapsamında kopyalar dâhil herbir istasyonun sadece bir defa ziyaret edilmesi garanti altına alınmıştır.)

V' : Müşteriler ve kopyaları ile birlikte şarj istasyonları kümesi $(V \cup R')$

EDD : Elektrikli araçlar için tur başlangıcındaki depolar kümesi s(EDD)= n^E

EAD : Elektrikli araçlar için tur sonundaki depolar kümesi s(EAD)= n^E

CDD : Konvansiyonel araçlar için tur başlangıcındaki depolar kümesi s(CDD)= n^C

CAD : Konvansiyonel araçlar için tur sonundaki depolar kümesi s(CAD)= n^C

AD : Tur sonundaki depolar kümesi s(AD)= $n^C + n^E$

DD : Tur başındaki depolar kümesi s(DD)= $n^C + n^E$

V_{EDD} : Müşteriler ve elektrikli araçlar için tur başlangıcındaki depolar kümesi $(V \cup EDD)$

V_{EAD} : Müşteriler ve elektrikli araçlar için tur sonundaki depolar kümesi $(V \cup EAD)$

V_{CDD} : Müşteriler ve konvansiyonel araçlar için tur başlangıcındaki depolar kümesi $(V \cup CDD)$

V_{CAD} : Müşteriler ve konvansiyonel araçlar için tur sonundaki depolar kümesi $(V \cup CAD)$

V'_{AD} : Müşteriler, tur sonundaki depolar ve kopyaları ile birlikte şarj istasyonları kümesi $(V' \cup AD)$

V'_{EDD} : Müşteriler, elektrikli araçlar için tur başlangıcındaki depolar ve kopyaları ile birlikte şarj istasyonları kümesi $(V' \cup EDD)$

V'_{EAD} : Müşteriler, elektrikli araçlar için tur sonundaki depolar ve kopyaları ile birlikte şarj istasyonları kümesi $(V' \cup EAD)$

R'_{EDD} : Elektrikli araçlar için tur başlangıcındaki depolar ve kopyaları ile birlikte şarj istasyonları kümesi $(F' \cup EDD)$

$V'_{EDD,EAD}$: Müşteriler, elektrikli araçlar için tur sonundaki ve tur başındaki depolar ve kopyaları ile birlikte şarj istasyonları kümesi $(V' \cup EDD \cup EAD)$

$V_{CDD,CAD}$: Müşteriler, konvansiyonel araçlar için tur sonundaki ve tur başındaki depolar kümesi $(V \cup CDD \cup CAD)$

B : Emisyon faktörü değerinde değişikliğe neden olan yük kırılım noktası kümesi

d_{ij} : i-j ayrıtı üzerindeki ulaşım mesafesi

EK-1. (devam) KF-E-ARP için Kopya Düğümlü Matematiksel Model (K-MM)

t_{ij} : *i-j* ayrıtı üzerindeki ulaşım zamanı

c_{ij}^{E} : Elektrikli araç için *i-j* ayrıtı üzerindeki birim ulaşım maliyeti

c_{ij}^{C} : Konvansiyonel araç için *i-j* ayrıtı üzerindeki birim ulaşım maliyeti

q_i : *i* müşterisinin dağıtım talebi miktarı

S_i : *i* müşterisi için servis zamanı

m : Şarj aygıt tipi

c^m : *m* tipi şarj aygıtının birim şarj etme maliyeti

g^m : *m* tipi şarj aygıtının birim şarj etme zamanı

C^E : Elektrikli araçların yük kapasitesi

C^C : Konvansiyonel araçların yük kapasitesi

n^E : Elektrikli araçların sayısı

n^C : Konvansiyonel araçların sayısı

Q^E : Elektrikli araçların pil şarj kapasitesi

h : Bir birim mesafede tüketilen şarj miktarı

$\varepsilon(u_i^C)$: Yüke bağlı olarak bir birim mesafede CO_2 salınım miktarı (Emisyon Faktörü)

$o_l^{'}$: Emisyon faktörü değerinde değişikliğe neden olan yük kırılım noktası değeri

β : Emisyon faktörü değerinde değişikliğe neden olan yük kırılım noktası sayısı

T_{max} : Azami tur tamamlanma zamanı

UB : Emisyon üst sınırı

Probleme ait karar değişkenleri aşağıda verilmiştir.

<u>İkili karar değişkenleri</u>

$$x_{ij}^{E} : \begin{cases} 1, \text{ elektrikli araç } (i,j) \in A \text{ ayrıtı üzerinde seyahat ederse,} \\ 0, \text{ diğer durumda, } i,j \in V_0,\ i \neq j \end{cases}$$

$$x_{ij}^{C} : \begin{cases} 1, \text{ konvansiyonel araç } (i,j) \in A \text{ ayrıtı üzerinde seyahat ederse,} \\ 0, \text{ diğer durumda, } i,j \in V_0,\ i \neq j \end{cases}$$

$$a_k^m : \begin{cases} 1, \text{ elektrikli araç } k \text{ şarj istasyonunda } m \text{ şarj konfigürasyonu ile şarj olursa,} \\ 0, \text{ diğer durumda, } \forall k \in R',\ \forall m \in M \end{cases}$$

EK-1. (devam) KF-E-ARP için Kopya Düğümlü Matematiksel Model (K-MM)

Sürekli karar değişkenleri

T_i : i müşterisinde servise başlama zamanı, $i \in V$

u_i^E : i müşterisine varıldığında elektrikli araç ile taşınan yük miktarı, $\forall i \in V$

u_i^C : i müşterisine varıldığında konvansiyonel araç ile taşınan yük miktarı, $\forall i \in V$

y_i : i düğümüne varıldığında pil şarj seviyesi, $\forall i \in V'$

Y_i : i düğümü terk edilirken pil şarj seviyesi, $\forall i \in V'$

θ_k^m : k şarj istasyonunda m şarj konfigürasyonu ile transfer edilen enerji miktarı, $\forall k \in R', \forall m \in M$

Yardımcı değişkenler

$p_{ijl}^{'}$: $\begin{cases} 1, \text{ } i\text{-}j \text{ ayrıtı üzerinde konvansiyonel araçta taşınan yük } [o_l^{'}, o_{l+1}^{'}) \text{ aralığında ise,} \\ 0, \text{ diğer durumda, } \forall i,j \in V_0,\ l \in \beta \backslash \{o_{\Omega'}^{'}\},\ i \neq j \end{cases}$

$f_{ijl}^{'}$: i-j ayrıtı üzerinde $[o_l^{'}, o_{l+1}^{'})$ aralığındaki yüke bağlı olarak birim emisyon değerini belirleyen ve negatif olmayan sürekli değişken, $\forall i,j \in V_0,\ l \in \beta,\ i \neq j$

Amaç Fonksiyonu

$$Min \sum_{i \in R'} \sum_{m \in M} c^m \theta_i^m + c^1 \left(Q^E \sum_{i \in EDD} \sum_{j \in V'} x_{ij}^E - \sum_{i \in EAD} y_i \right) + \sum_{i \in V'_{EDD}} \sum_{j \in V'_{EAD}} c_{ij}^E d_{ij} x_{ij}^E + \sum_{i \in V_{CDD}} \sum_{j \in V_{CAD}} c_{ij}^C d_{ij} x_{ij}^C \quad (1.1)$$

Beş bileşenden oluşan amaç fonksiyonu Eş. 1.1, toplam maliyeti enazlamayı hedeflemektedir. İlk bileşen tüm şarj istasyonlarında tüm şarj konfigürasyonları ile şarj edilen toplam enerjinin maliyetini, ikinci bileşen elektrikli araçların yavaş şarj konfigürasyonu ile tur öncesi depodaki tam kapasite şarj edilme maliyetlerini vermektedir. Üçüncü bileşen elektrikli araçların tur sonunda kalan şarj miktarlarının toplam maliyeti ($c^1 \sum_{i \in EAD} y_i$) olmak üzere kazanım olarak depodaki şarj maliyetlerinden düşülmektedir. Dördüncü ve beşinci bileşenler ise sırasıyla elektrikli ve konvansiyonel araçların rotalama maliyetlerini vermektedir.

EK-1. (devam) KF-E-ARP için Kopya Düğümlü Matematiksel Model (K-MM)

$$\sum_{j \in V'_{EAD}} x_{ij}^{E} + \sum_{j \in V_{CAD}} x_{ij}^{C} = 1 \quad \forall i \in V \tag{1.2}$$

Eş. 1.2'deki kısıtlar, herbir müşterinin elektrikli ya da konvansiyonel araç ile yalnızca bir defa ziyaret edilmesini garanti etmektedir.

$$\sum_{j \in V_{EAD}} x_{ij}^{E} \leq 1 \quad \forall i \in R' \tag{1.3}$$

Eş. 1.3'deki kısıtlar, bir şarj istasyonundan diğer tüm düğümlere en fazla bir defa çıkış olmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{i \in V'_{EDD}} x_{ij}^{E} = \sum_{i \in V'_{EAD}} x_{ji}^{E} \quad \forall j \in V', i \neq j, j \in R' \Longrightarrow i \notin R' \tag{1.4}$$

$$\sum_{i \in V_{CDD}} x_{ij}^{C} = \sum_{i \in V_{CAD}} x_{ji}^{C} \quad \forall j \in V, i \neq j \tag{1.5}$$

Eş. 1.4 - Eş. 1.5'deki kısıtlar, sırasıyla elektrikli ve konvansiyonel araçların akış korunumunu sağlamaktadırlar.

$$\sum_{j \in V'} x_{ij}^{E} \leq 1 \quad \forall i \in EDD \tag{1.6}$$

Eş. 1.6'daki kısıtlar depodan tüm düğümlere en fazla bir defa çıkış olmasını sağlamaktadır. Bu kısıtlar ile elektrikli araçların depodan çıkışları takip edilmektedir.

$$\sum_{i \in V'} x_{ij}^{E} \leq 1 \quad \forall j \in EAD \tag{1.7}$$

Eş. 1.7'deki kısıtlar depoya en fazla bir defa giriş olmasını sağlamaktadır. Bu kısıtlar ile elektrikli araçların depoya girişleri takip edilmektedir.

$$\sum_{j \in V} x_{ij}^{C} \leq 1 \quad \forall i \in CDD \tag{1.8}$$

EK-1. (devam) KF-E-ARP için Kopya Düğümlü Matematiksel Model (K-MM)

Eş. 1.8'deki kısıtlar depodan tüm düğümlere en fazla bir defa çıkış olmasını sağlamaktadır. Bu kısıtlar ile konvansiyonel araçların depodan çıkışları takip edilmektedir.

$$\sum_{i \in V} x_{ij}^{C} \leq 1 \quad \forall j \in CAD \tag{1.9}$$

Eş. 1.9'daki kısıtlar depoya en fazla bir defa giriş olmasını sağlamaktadır. Bu kısıtlar ile konvansiyonel araçların depoya girişleri takip edilmektedir.

$$\sum_{i \in EDD} \sum_{J \in V'} x_{ij}^{E} = \sum_{i \in EAD} \sum_{J \in V'} x_{ji}^{E} \tag{1.10}$$

Eş. 1.10'daki kısıtlar elektrikli araçlar için depodan çıkış sayısı kadar depoya giriş olmasını sağlamaktadır. Bu kısıtlar vasıtasıyla depodan çıkan her elektrikli aracın tur sonunda depoya dönüşü garanti edilmektedir.

$$\sum_{i \in CDD} \sum_{J \in V} x_{ij}^{C} = \sum_{i \in CAD} \sum_{J \in V} x_{ji}^{C} \tag{1.11}$$

Eş. 1.11'deki kısıtlar konvansiyonel araçlar için depodan çıkış sayısı kadar depoya giriş olmasını sağlamaktadır. Bu kısıtlar vasıtasıyla depodan çıkan her konvansiyonel aracın tur sonunda depoya dönüşü garanti edilmektedir.

$$T_i + \left(t_{ij} + S_i\right)x_{ij}^{E} - M\left(1 - x_{ij}^{E}\right) \leq T_j \quad \forall i \in V_{EDD}\,, \forall j \in V_{EAD}^{'}, i \neq j \tag{1.12}$$

Eş. 1.12'deki kısıtlar, elektrikli araçlar için müşteri ya da başlangıç deposunu takip eden düğümde servise başlama zamanının takip edilmesini sağlamaktadır.

$$T_i + t_{ij}x_{ij}^{E} + \sum_{m \in M} g^{m}\theta_i^{m} - M\left(1 - x_{ij}^{E}\right) \leq T_j \quad \forall i \in R^{'}, \forall j \in V_{EAD} \tag{1.13}$$

Eş. 1.13'deki kısıtlar, elektrikli araçlar için şarj istasyonunu takip eden düğümde servise başlama zamanının takip edilmesini sağlamaktadır.

$$T_i + \left(t_{ij} + S_i\right)x_{ij}^{C} - M\left(1 - x_{ij}^{C}\right) \leq T_j \quad \forall i \in V_{CDD}\,, \forall j \in V_{CAD}, i \neq j \tag{1.14}$$

EK-1. (devam) KF-E-ARP için Kopya Düğümlü Matematiksel Model (K-MM)

Eş. 1.14'deki kısıtlar, konvansiyonel araçlar için müşteri ya da başlangıç deposunu takip eden düğümde servise başlama zamanının takip edilmesini sağlamaktadır.

$$T_i \leq T_{max} \quad \forall i \in AD \tag{1.15}$$

Eş. 1.15'deki kısıtlar, tüm araçların tur sonunda depoya varış zamanlarının azami tur tamamlanma zamanından önce olmasını sağlamaktadır.

$$0 \leq u_j^E \leq u_i^E - [(q_i)x_{ij}^E] + C^E\left(1 - x_{ij}^E\right) \quad \forall i \in V_{EDD}^{'}, \forall j \in V_{EAD}^{'}, i \neq j \tag{1.16}$$

Eş. 1.16'daki kısıtlar, elektrikli araçların yük miktarının takip edilmesini sağlamaktadır.

$$\sum_{i \in V_{CDD}} u_{ij}^C - \sum_{i \in V_{CAD}} u_{ji}^C = q_j \sum_{i \in V_{CDD}} x_{ij}^C \quad \forall j \in V \tag{1.17}$$

Eş. 1.17'deki kısıtlar, konvansiyonel araçların yük miktarının takip edilmesini sağlamaktadır.

$$0 \leq u_i^E \leq C^E \quad \forall i \in EDD \tag{1.18}$$

Eş. 1.18'deki kısıtlar, depoadan çıkacak elektrikli araca azami araç kapasitesi yükleme yapılmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{j \in V} u_{ij}^C \leq C^C \sum_{j \in V} x_{ij}^C \quad \forall i \in CDD \tag{1.19}$$

Eş. 1.19'daki kısıtlar, depoadan çıkacak konvansiyonel araca azami araç kapasitesi yükleme yapılmasını sağlamaktadır.

$$0 \leq y_j \leq y_i - h\left(d_{ij}\right)x_{ij}^E + Q^E\left(1 - x_{ij}^E\right) \quad \forall i \in V, \forall j \in V_{EAD}^{'} \tag{1.20}$$

Eş. 1.20'deki kısıtlar, müşterilerden ayrılışta şarj seviyesinin takibini sağlamaktadır.

$$0 \leq y_j \leq Y_i - h\left(d_{ij}\right)x_{ij}^E + Q^E\left(1 - x_{ij}^E\right) \quad \forall i \in R_{EDD}^{\prime}, \forall j \in V_{EAD}^{\prime}, i \in R^{\prime} \Longrightarrow j \notin R^{\prime} \tag{1.21}$$

EK-1. (devam) KF-E-ARP için Kopya Düğümlü Matematiksel Model (K-MM)

Eş. 1.21'deki kısıtlar, depodan ve şarj istasyonlarından ayrılışta şarj seviyesinin takibini sağlamaktadır.

$$y_j \leq Q^E \sum_{i \in V'} x_{ij}^E \quad \forall j \in EAD \tag{1.22}$$

Eş. 1.22'deki kısıtlar, tur sonunda depoya dönüşte şarj seviyesinin takibini sağlamaktadır.

$$0 \leq y_i \leq Y_i \leq Q^E \quad \forall i \in R'_{EDD} \tag{1.23}$$

Eş. 1.23'deki kısıtlar, şarj istasyonundan ayrılıştaki şarj seviyesinin, enaz bu şarj istasyonuna varıştaki şarj seviyesine, en fazla ise pil şarj kapasitesine eşit olmasına sağlamaktadır.

$$Y_i = Q^E \sum_{j \in V'} x_{ij}^E \quad \forall i \in EDD \tag{1.24}$$

Eş. 1.24'deki kısıtlar, elektrikli araçların depoyu tam kapasite şarj ile terk etmesini sağlamaktadır.

$$Y_i - y_i = \sum_{m \in M} \theta_k^m \quad \forall k \in R' \tag{1.25}$$

Eş. 1.25'deki kısıtlar, şarj istasyonundaki enerji transferi miktarını belirlemektedir.

$$0 \leq \theta_k^m \leq Q^E a_k^m \quad \forall i \in R' \tag{1.26}$$

Eş. 1.26'daki kısıtlar, şarj istasyonundaki enerji transferi miktarının azami pil kapasitesi kadar olmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{m \in M} a_k^m = 1 \quad \forall k \in R' \tag{1.27}$$

Eş. 1.27'deki kısıtlar, şarj istasyonunda yalnızca bir şarj konfigürasyonunun kullanılmasını sağlamaktadır.

EK-1. (devam) KF-E-ARP için Kopya Düğümlü Matematiksel Model (K-MM)

$$\sum_{i\in V_{CDD}}\sum_{j\in V_{CAD}}\{\sum_{l\in\beta\setminus\{\Omega\}} p'_{ijl}\,\varepsilon(o'_l)\}d_{ij} \le UB \tag{1.28}$$

Eş. 1.28'deki kısıt, toplam CO_2 emisyonu miktarının tanımlı üst limiti aşmasını engeller.

$$u^C_{ij} = \sum_{l\in\beta} f'_{ijl}\,(o'_l) \quad \forall i \in V_{CDD}, \forall j \in V_{CAD} \tag{1.29}$$

$$f'_{ij1} \le p'_{ij1} \quad \forall i \in V_{CDD}, \forall j \in V_{CAD} \tag{1.30}$$

$$f'_{ijl} \le p'_{ijl} + p'_{ijl-1} \quad \forall i \in V_{CDD}, \forall j \in V_{CAD}, \forall l \in \{2 \dots \Omega - 1\} \tag{1.31}$$

$$f'_{ijl} \le p'_{ijl-1} \quad \forall i \in V_{CDD}, \forall j \in V_{CAD}, l = \Omega \tag{1.32}$$

$$\sum_{l\in\beta} f'_{ijl} = x^C_{ij} \quad \forall i \in V_{CDD}, \forall j \in V_{CAD} \tag{1.33}$$

$$\sum_{l\in\beta\setminus\{\Omega\}} p'_{ijl} = x^C_{ij} \quad \forall i \in V_{CDD}, \forall j \in V_{CAD} \tag{1.34}$$

Eş. 1.29 – Eş. 1.34'deki kısıtlar konvansiyonel araçların taşınan yüke bağlı basamak emisyon salınım fonksiyonunu doğrusallaştırmak için kullanılmıştır. Eş. 1.29'daki kısıt, ayrıt üzerindeki konvansiyonel araç yükünü birim emisyon değerini değiştiren yük kırılım noktalarının doğrusal afin kombinasyonu olarak ifade etmektedir. Bu durumda model; i müşterisinden j müşterisine yük taşındıysa $\sum_{l\in\beta} f'_{ijl} = 1$ olarak değer almasını sağlamaktadır. Eş. 1.30 – Eş. 1.34'deki kısıtlar, taşınan yüke göre birim emisyon salınımı değerinin atanmasını sağlamaktadırlar.

$$x^E_{ij}, x^C_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall (i,j) \in A \tag{1.35}$$

$$p'_{ijl} \in \{0,1\} \quad \forall j \in V_{CAD}, \forall l \in \beta\setminus\{\Omega\} \tag{1.36}$$

$$f'_{ijl} \ge 0 \quad \forall i \in V'_{DD,AD}, \forall j \in V_{CAD}, \forall l \in \beta \tag{1.37}$$

$$u^E_i, u^C_i, T_i, y_i, Y_i, \theta^m_i, f_{ijl} \ge 0 \quad \forall i \in V'_{DD,AD}, \forall m \in M, \forall j \in V_{CAD}, \forall l \in \beta \tag{1.38}$$

EK-1. (devam) KF-E-ARP için Kopya Düğümlü Matematiksel Model (K-MM)

Son olarak Eş. 1.35 – Eş. 1.38'deki kısıtlar, karar değişkenlerinin tanım kümelerini belirtmektedir.



Gazili olmak ayrıcalıktır