



## The mixed fleet vehicle routing problem with partial recharging by multiple chargers: A formulation and an insertion based constructive heuristic

Sercan Dönmez<sup>1\*</sup>, Çağrı Koç<sup>2</sup>, Fulya Altıparmak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Business Administration, Faculty of Political Science, Social Sciences University of Ankara, 06050, Ankara, Türkiye

### Highlights:

- Partial recharging by multiple chargers
- A mixed integer arc based mathematical model
- Insertion based constructive heuristic algorithm

### Keywords:

- Vehicle routing
- Electric vehicles
- Mixed fleet
- Insertion based constructive heuristic
- Partial recharging

### Article Info:

Research Article

Received: 20.04.2022

Accepted: 24.12.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.1106198

### Correspondence:

Author: Sercan Dönmez

e-mail:

22.s.donmez@gmail.com

phone: +90 506 688 4832

### Graphical/Tabular Abstract

This study considers Mixed Fleet Electrical Vehicle Routing Problem with Partial Recharging by Multiple Chargers (MF-E-VRP). A mixed integer arc based mathematical model is presented and an insertion based constructive heuristic algorithm (I-CH) is developed in order to attain solution to the proposed problem. Performances of the mathematical model and heuristic algorithm are evaluated on 84 test instances (36 small-, 36 medium- and 12 large-sized). As MF-E-VRP is NP-hard, mathematical model is only able to attain optimal solutions for small-size instances. Furthermore, mathematical model does not find any feasible solution for 16 medium-size instances and all large-size instances within 2 hours. Table A depicts the computational results of the proposed I-CH. Performance criteria are average solution time (second), (for mathematical model) average percentage gap value ( $\Delta_{opt}$ ) from the lower bound with respect to LP relaxation, (for I-CH) average percentage gap value ( $\Delta_z$ ) from the upperbound found with mathematical model and number of problems with upper bound (NPUB). Computational results have shown that in a very short computation time, i.e., shorter than 1 second, the proposed I-CH attains feasible solutions on all medium- and large-size benchmark instances which mathematical model fails.

**Table A.** Computational results of the proposed I-CH

Number of Customers	Mathematical Model		I-CH			
	Average Solution Time (s)	$\Delta_{opt}$	NPUB	Average Solution Time (s)	$\Delta_z$	NPUB
5	1.00	0.00	(12/12)	<1	16.52	(12/12)
10	88.07	0.00	(12/12)	<1	23.09	(12/12)
15	2962.42	4.17	(12/12)	<1	36.93	(12/12)
25	5757.95	37.29	(12/12)	<1	35.87	(12/12)
30	6594.92	35.15	(6/12)	<1	38.23	(12/12)
50	7200.00	62.98	(2/12)	<1	18.29	(12/12)
100	7200.00	-	(0/12)	<1	-	(12/12)

**Purpose:** The aim of this study is to introduce MF-E-VRP which holistically consolidates several aspects in the literature and propose a mathematical model and an insertion based constructive heuristic algorithm for medium- and large-size instances.

**Theory and Methods:** A mixed integer arc based mathematical model is presented for the problem. In addition to mathematical model, an insertion based constructive heuristic algorithm (I-CH) which successfully handles complex problem constraints is developed in order to attain solution to medium- and large-size instances.

**Results:** Performances of the mathematical model and proposed heuristic algorithm are evaluated on test instances. Computational results have shown that shorter than 1 second, the proposed heuristic attains feasible solutions on all medium- and large-size benchmark instances which mathematical model fails.

**Conclusion:** A mixed integer arc based mathematical model is proposed for the problem. However, solution time extends exponentially due to problem size. Moreover, because of the NP-hardness of the problem, achieving an integer feasible solution becomes harder starting from the instances with 30 customers. Hence, I-CH is developed to solve medium- and large-size instances in a reasonable time. As a further research, exact solution or metaheuristic algorithm should be initialized by solutions found with proposed I-CH.



## Çoklu şarj teknolojisine dayalı kısmi şarj politikalı karma filolu araç rotalama problemi: Matematiksel model ve çözüm kurucu sezgisel

Sercan Dönmez<sup>1\*</sup>, Çağrı Koç<sup>2</sup>, Fulya Altıparmak<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup>Ankara Sosyal Bilimler Üniversitesi, Siyasal Bilgiler Fakültesi, İşletme Bölümü, 06050, Ulus, Ankara, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Çoklu şarj teknolojisine dayalı kısmi şarj politikası
- Karma tam sayılı matematiksel model
- Ekleme tabanlı çözüm kurucu sezgisel algoritma

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 20.04.2022

Kabul: 24.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1106198

### Anahtar Kelimeler:

Araç rotalama,  
elektrikli araç,  
karma filo,  
ekleme tabanlı çözüm kurucu  
sezgisel

### ÖZ

Bu çalışmada Çoklu Şarj Teknolojisine Dayalı Kısmi Şarj Politikalı Karma Filolu Elektrikli Araç Rotalama Problemi (KF-E-ARP) ele alınmıştır. Karma filo, elektrikli araçları (EA) ve konvansiyonel araçları (KA) içermektedir. Konvansiyonel araçların emisyon fonksiyonu ve elektrikli araçların şarj tüketim fonksiyonu içerisinde katedilen mesafe ile birlikte araçta taşınan yük miktarı da dikkate alınmıştır. Ayrıca şarj istasyonunda çoklu şarj konfigürasyonlarından birinin seçilmesi, karma filolu problemlerde ilk defa ele alınmıştır. Problem, müşteri dağıtım taleplerini karşılarken toplam maliyeti enazlayan araç rotalarının elde edilmesi olarak tanımlanabilir. KF-E-ARP için öncelikle karma tamsayılı matematiksel model geliştirilmiştir. Problem NP-zor olduğundan dolayı, orta ve büyük boyutlu problemlere makul sürelerde çözüm elde edebilmek amacıyla ekleme tabanlı bir çözüm kurucu sezgisel algoritma önerilmiştir. Deneysel analizlerde, matematiksel model ile 2 saat içerisinde çözüm bulunamayan tüm orta ve büyük boyutlu problemlere önerilen çözüm kurucu sezgisel algoritmalar ile yaklaşık 1 saniye gibi çok kısa sürede uygun çözümler elde edilmiştir.

## The mixed fleet vehicle routing problem with partial recharging by multiple chargers: A formulation and an insertion based constructive heuristic

### HIGHLIGHTS

- Partial recharging by multiple chargers
- A mixed integer arc based mathematical model
- Insertion based constructive heuristic algorithm

### Article Info

Research Article

Received: 20.04.2022

Accepted: 24.12.2022

DOI:

10.17341/gazimmfd.1106198

### Keywords:

Vehicle routing,  
electric vehicles,  
mixed fleet,  
insertion based constructive  
heuristic

### ABSTRACT

In this study, the Mixed Fleet Electric Vehicle Routing Problem (MF-E-VRP) with Partial Recharging by Multiple Chargers is considered. It composes of electric and internal combustion vehicles. The travelled distance and carried load on vehicles are taken into account in the emission function of internal combustion vehicles and the energy consumption function of electric vehicles. Additionally, selection of one of the multiple charging configurations at the charging station is addressed for the first time in the MF-E-VRP. The problem can be described as obtaining vehicle routes that minimize the total cost while meeting customer delivery demands. First, we develop a mixed integer mathematical programming formulation for the KF-E-ARP. Because of the NP-hardness of the problem, we propose an insertion based constructive heuristic algorithm to solve medium- and large-size instances in reasonable computation times. Computational analysis indicates that in a very short computation time, i.e., around 1 second, the proposed insertion based constructive heuristic attains feasible solutions on all medium- and large-size benchmark instances which mathematical model fails within 2 hours.

## 1. Giriş (Introduction)

Dünya çapında “yeşil lojistik” ve “yeşil tedarik zinciri” kavramları; genel anlamıyla lojistik faaliyetlerin ekolojik etkilerini ölçümleyerek, bu etkilerin enaza indirilmesi için yapılan tüm çabaları içermektedir. Dünyada çevre bilincinin artması ile birlikte kanun koyucuların öne sürdüğü birtakım düzenlemeler bu çabaları kaçınılmaz hale getirmiştir. Ulaştırma sektörü, özellikle fosil yakıt tüketen araçlardan dolayı global enerji tüketimi ve emisyon salınım miktarı dağılımı içerisinde çok büyük bir paya sahiptir. Bu nedenle fosil yakıt tüketen araçlara olan bağımlılığın azaltılması için yönetimler tarafından birtakım önlemler uygulamaya konmakta ve konvansiyonel araçların sayısını azaltmak için kademeli geçiş planları yayımlanmaktadır. “Yeşil lojistik” ile birlikte “yeşil rotalama problemleri” de büyük önem kazanmıştır. Gerçek hayatta çok fazla uygulama alanı olan bu problemler, çevrenin korunmasını 3 ana başlık altında farklı bakış açıları ile ele almaktadır. Bu ana başlıklar sırasıyla, konvansiyonel araçların yakıt tüketimi sebebiyle açığa çıkan sera gazı salınımının enazlanması [1-4], alternatif yakıtlı araçların kullanımı [5-8] ve elektrikli ya da hibrit elektrikli araçların kullanımıdır [9-12]. Bu tip yeşil rotalama problemlerine kesin algoritmalar [13-15], sezgisel algoritmalar [16-17] ve karma algoritmalar [18-19] ile çözüm bulunmuştur. Ayrıca, yeşil rotalama problemleri için literatür araştırma makaleleri Ghorbani vd. [20], Marrekchi vd. [21] ve Asghari vd. [22] tarafından yapılmıştır. Araç rotalama problemlerinin (ARP) birçok çeşidi uzun yıllardır çalışılmıştır [23, 24]. Yeşil teknolojinin önem kazandığı günümüzde ise, elektrikli araçların ulaştırma sektöründe kullanımı akademi dünyasında büyük ilgi çekmiştir [25, 26]. Ancak, bu araçların pil kapasitelerinden dolayı tur süresinin az olması, şarj sürelerinin uzun zaman alması ve sınırlı sayıda istasyon bulunması probleme ilave zorluklar getirmiştir. Bu çalışma kapsamında da karma filolu E-ARP ele alınmış ve problemin çözümü için matematiksel model ve ekleme tabanlı çözüm kurucu sezgisel algoritma önerilmiştir.

### 1.1. Literatür Araştırması (Literature Review)

Literatürde elektrikli ARP (E-ARP), öncelikle şarj istasyonu tipleri, şarj dolun fonksiyonları ve politikaları, motor konfigürasyonları ve şarj tüketim fonksiyonları gibi özelliklere göre sınıflandırılmaktadır. Bu bölümde bu sınıflandırma dikkate alınarak literatürdeki çalışmalar incelenecektir.

**Şarj İstasyonu Tipleri:** Bazı E-ARP’lerde pil dolumu için aynı özelliklere sahip tek tip şarj istasyonları dikkate alınırken, bazı problemlerde ise pil dolun hızı farklı olan şarj istasyonları dikkate alınmaktadır [27]. 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. Bazı problemlerde ise şarjı azalmış ya da boşalmış pilin istasyonda tam dolu yeni pil ile değiştirilmesi (swap) dikkate alınmıştır [28, 29]. 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 [30].

**Şarj Dolun Fonksiyonları:** Bazı E-ARP’ler pil dolusunda pil şarj seviyesi için zamana bağlı doğrusal bir fonksiyonu dikkate alırken, bazı problemler ise gerçeği daha iyi yansıtmak için doğrusal olmayan bir şarj dolun fonksiyonundan faydalanmaktadır. Hatta dolun fonksiyonunun doğrusal olmayan davranışının ihmal edilmesi ile gerçek hayatta mümkün olmayan ya da çok maliyetli çözümler elde edileceği öne sürülmektedir [31, 32]. Birçok çalışmada doğrusal kabul edilen şarj dolun fonksiyonunun doğrusal olmaması gerektiği

Pelletier vd. [10] ve Montoya vd. [9] tarafından vurgulanmış ve çalışma kapsamında da doğrusal olmayan fonksiyon parçalı doğrusal fonksiyona çevrilmiştir.

**Şarj Dolun Politikaları:** Bazı E-ARP’lerde şarj istasyonlarında pil her seferinde tam kapasite şarj edilirken, bazı problemlerde ise zamana bağlı kısıtların ihlal edilmemesi ya da turun daha kısa sürede tamamlanması için pil, ihtiyacı karşılayacak düzeyde kısmi şarj edilir [33, 34]. Kısmi şarj politikasında pilin hangi seviyede şarj edileceği belirlenmelidir. Bununla birlikte bazı çalışmalarda da pilin tam kapasite şarjı ya da %80 seviyesinde (doğrusal olmayan şarj dolun davranışının başladığı seviye) şarjı şeklinde iki politikadan birinin tercih edildiği görülmektedir [35].

**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 [36-39].

**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 [40-42].

Bu özellikler dışında ele alınan E-ARP çalışmalarından bazıları bu kısımda verilmiştir. Araçların istasyonlara ortalama varışlar arası zamanları ve istasyonda ortalama şarj süresi gibi istasyonun müsaitliğini etkileyen parametreler olasılık dağılımları ile tanımlanabilir [43]. Bununla birlikte çevresel sebeplerden dolayı aracın iki müşteri arasındaki seyahat süresi de stokastik olabilir. Diğer taraftan müşteri talep miktarları ya da enerji tüketim miktarının da stokastik olduğu çalışmalar bulunmaktadır. Çalışılan stokastik E-ARP’lere örnek olarak Rabbani vd. [43], Pelletier vd. [44] ile Kumar vd. [45] tarafından yapılan çalışmalar verilebilir. Ayrıca problem, önce şarj istasyonlarının maliyet-etkin yerleştirilmesi, sonra araçların rotalanması şeklinde daha bütüncül bir yaklaşımla ele alınabilir [46, 47].

Tablo 1’de bu çalışmayı da içeren literatürdeki tüm çalışmalarda ele alınan E-ARP’lerin özellikleri verilmektedir. Tablo 1’de şarj teknolojisi seçimi özelliği sadece 5 çalışmada ele alınmıştır. Ayrıca 10 çalışmada karma filolu E-ARP’nin (KF-E-ARP) 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 detaylı incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir.

Gonçalves vd. [36], 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 dolun süresi bulunmaktadır. 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 vd. [48], 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

**Tablo 1.** Literatürde ele alınan E-ARP özellikleri (E-VRP properties in the literature)

Referans	Zaman Pencere	Kısmi Şarj	Şarj Teknoloji Seçimi	Doğrusal Şarj	Doğrusal Olmayan Şarj	Enerji Tüketim Modeli	Topla Dağıt	Karma Filo	Yerleşim Rotalama
Conrad ve Figliozzi [35]	•			•					
Gonçalves vd. [36]							•	•	
Felipe vd. [27]		•	•	•					
Sassi vd. [48]	•	•		•				•	
Goeke ve Schneider [37]	•			•		•		•	
Yang ve Sun [28]									•
Lin vd. [40]				•		•	•		
Keskin ve Çatay [33]	•	•		•					
Schiffer ve Wallter [46]	•	•		•					•
Montoya vd. [9]					•				
Pelletier vd. [31]			•		•				
Keskin ve Çatay [11]	•	•	•	•					
Schiffer ve Wallter [34]	•	•		•					•
Paz vd. [30]	•	•		•					•
Koç vd. [32]		•	•		•				•
Hiermann vd. [19]	•	•		•				•	
Macrina vd. [38]	•	•		•				•	
Macrina vd. [39]	•	•		•		•		•	
Al-dal'ain ve Çelebi [1]	•			•				•	
Chen vd. [29]	•			•					•
Keskin vd. [42]	•	•		•					
Vincent vd. [41]	•	•		•		•		•	
Guo vd. [12]		•			•				•
<i>Bu Çalışma</i>	•	•	•	•		•		•	

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 [37], şarj istasyonlarında tam kapasite pil dolununun 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 vd. [38], 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. Problem için yinelemeli yerel arama algoritması önerilmiştir. Macrina vd. [39] 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 [38, 39] çözüm yaklaşımında ve deneysel analizlerde tek tip şarj konfigürasyonu dikkate alınmıştır. Hiermann vd. [19] 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 yakıtla çevirebilmektedir. Problemin çözümü için genetik algoritma, yerel arama, geniş komşu arama ve tamsayı programlamayı birleştiren metasezgisel bir algoritma önerilmiştir. Chen vd. [29], rotalama ve pil değişim istasyonunun yerleşimi kararının birlikte ele alındığı zaman pencereli KF-E-ARP üzerinde bir çalışma yapmışlardır. Problemin çözümü için tamsayı programlama modeli ile kesin ve sezgisel politikalara dayalı bir dalfiyat algoritması geliştirmişlerdir. Al-dal'ain ve Çelebi [1], rotalama ve filo karışımı kararlarını birlikte ele alan KF-E-ARP üzerinde çalışmışlardır. Öncelikle farklı filo karışımları için rotalar

eniyelemiştir. 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 alınmıştır. Vincent vd. [41], 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 konvansiyonel araçlardan elektrikli araçlara geçişin kademeli olacağı göz önüne alınarak KF-E-ARP ele alınmıştır. Bu problemde zaman pencereli müşteriler, azami tur tamamlanma zamanı, kısmi 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 salınımında üst sınır birlikte ele alınmıştır. Problem için öncelikle bir karma tamsayı matematiksel model, problemin NP-zor yapısından dolayı büyük boyutlu KF-E-ARP'lere uygun çözümleri çok hızlı bulabilmek amacıyla bir kurucu sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Tablo 2'de bu çalışma, hem ele alınan problemin özellikleri hem de çözüm yaklaşımları açısından literatürdeki çalışmalar ile karşılaştırılmaktadır. Sadece rotalama kararını içeren KF-E-ARP üzerinde çalışan 6 çalışma dikkate alınmıştır.

### 1.2. Literatüre Katkı (Contributions to Literature)

Özellikleri verilen KF-E-ARP, literatürde ilk kez bu çalışmada ele alınmıştır. Problem için karma tamsayı matematiksel model geliştirilmiştir. Matematiksel modelde, Koç ve Karaoğlan'ın [18] çalışmasına dayalı olarak ayrırt tabanlı üç indisli karar değişkenleri kullanılmıştır. Amaç, literatürdeki matematiksel modellerin aksine aynı şarj istasyonuna birden fazla uğramayı sağlamak için şarj istasyonu kopyalarını kullanmamaktır. Böylece, matematiksel modelin boyutu gereğinden fazla büyümeyeceği için küçük ve orta boyutlu problemlere yeni çözümlerin elde edilmesi mümkün

**Tablo 2.** Karma filolu problemlerin kıyaslanması (Benchmarking of mixed fleet problems)

Referans	Çözüm Yaklaşımı	Matematiksel Model		Zaman Pencereleri	Kısmi Şarj	Şarj Teknoloji Seçimi	Doğrusal Şarj	Enerji Tüketim Modeli	Emisyon Modeli
		Kopya Düşümlü	Kopya Düşümsüz						
Gonçalves vd. [36]		•							
Sassi vd. [48]	Sezgisel	•		•	•		•		
Goeke ve Schneider [37]	Sezgisel	•		•			•	•	
Macrina vd. [38]	Sezgisel	•		•	•		•		•
Macrina vd. [39]	Sezgisel	•		•	•		•	•	•
Vincent vd. [41]	Sezgisel	•		•	•		•	•	•
<i>Bu Çalışma</i>	Sezgisel		•	•	•	•	•	•	•

olacaktır. Ayrıca araçta taşınan yüke göre değişen emisyon salınım miktarı, bir üst limit ile sınırlanmıştır. Şarj istasyonları, birim şarj etme hızı ve birim şarj etme maliyeti değişen 3 farklı konfigürasyona sahiptir. Zaman kısıtlarını sağlamak ve gerçek hayattaki gibi gereksiz maliyetlere katlanmamak için seyahat mesafesine dayalı kısmi şarj politikası uygulanmıştır. Bununla birlikte, enerji tüketim miktarı katedilen mesafe ve araç yüküne dayalı olarak modellenmiştir. Son olarak, NP-zor problemler sınıfında yer alan bu problem için orta ve büyük boyutlu problemlere makul sürelerde çözüm elde etmek amacıyla ekleme tabanlı çözüm kurucu sezgisel algoritma önerilmiştir. Çalışmanın geri kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir. İkinci bölümde KF-E-ARP tanımlanmış ve geliştirilen matematiksel model verilmiştir. Üçüncü bölümde orta ve büyük boyutlu KF-E-ARP'nin çözümü için önerilen ekleme tabanlı çözüm kurucu sezgisel algoritma tanımlanmıştır. Dördüncü bölümde, matematiksel model ve sezgisel algoritmanın performans analizi yapılmış, son bölümde ise sonuç ve ileride yapılabilecek çalışmalara yer verilmiştir.

## 2. Problemin Tanımı ve Matematiksel Model (Problem Definition and Mathematical Model)

Bu bölümde KF-E-ARP tanımı yapılmakta ve matematiksel model verilmektedir.

### 2.1. Problem Tanımı ve Notasyon (Problem Definition and Notation)

KF-E-ARP,  $G = (V_0 \cup R, A)$  tam ve yönlü bir graf üzerinde tanımlanır.  $V_0 = V \cup 0$  düğümler kümesidir.  $V = \{1, \dots, N\}$  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.  $A = \{(i, j) | i, j \in V_0 \cup R, i \neq j\}$ , ayrıntlar kümesidir. Herbir ayrınt, mesafeler  $d_{ij}$  ile doğru orantılı olarak negatif olmayan bir maliyete sahiptir. Ayrıca, herbir ayrıntın 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.  $s$  ayrıntlarda varsayılan ortalama hız olmak üzere, ayrıntlardaki ulaşım zamanı  $t_{ij} = d_{ij}/s$  olarak hesaplanmaktadır.  $i$  müşterisinden  $j$  müşterisine  $k$  şarj istasyonunu kullanarak ulaşım mesafesi  $d_{ijk} = d_{ik} + d_{kj}$  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. 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.  $n^C$  ve  $n^E$  sırasıyla konvansiyonel ve elektrikli araç sayısını,  $C^C$  ve  $C^E$  sırasıyla konvansiyonel ve elektrikli araçların yük kapasitesini tanımlamaktadır.  $Q^E$ , elektrikli araçlar için pil kapasitesini gösterir. 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, 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 maliyetidir. Şarjın hızı arttıkça şarj maliyeti de artmaktadır. Dolayısıyla, şarj maliyetlerinin enazlanması ile zamana bağlı kısıtların sağlanması arasında bir ödünleşim vardır. 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. 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 ( $o_i$ ) oluşan  $\alpha$  kümesi ve yüke bağımlı tüketim hızı  $h(u_{ij}^E)$  ile temsil edilmektedir.  $\alpha$  kümesinin eleman sayısı ( $|\Omega|$ )'dır. Servis için kullanılan konvansiyonel araçlardan salınan toplam CO<sub>2</sub> emisyon miktarı, üst limit ( $UB$ ) ile sınırlanmaktadır. 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 ( $o_i$ ) oluşan  $\beta$  kümesi ve yüke bağımlı birim emisyon salınım değeri  $\varepsilon(u_{ij}^C)$  ile temsil edilmektedir.  $\beta$  kümesinin eleman sayısı ( $|\Omega'|$ )'dir. Probleme ait varsayımlar bu kısımda belirtilmiştir. Her müşteri sadece bir tip araç ile bir kez ziyaret edilmelidir. Araçların hızı çevresel faktörlerden etkilenmez ve sabittir. Elektrikli araçlar için ise piller özdeştir. 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. Probleme ait karar değişkenleri aşağıda verilmiştir.

#### 2.1.1. İkili karar değişkenleri (Binary decision variables)

- $x_{ij}^E$  : 1, eğer elektrikli araç  $(i, j) \in A$  ayrıntı üzerinde seyahat ederse, 0 diğer durumda,  $i, j \in V_0, i \neq j$   
 $x_{ij}^C$  : 1, eğer konvansiyonel araç  $(i, j) \in A$  ayrıntı üzerinde seyahat ederse, 0 diğer durumda,  $i, j \in V_0, i \neq j$   
 $z_{ijk}$  : 1, eğer elektrikli araç  $i$  müşterisinden  $j$  müşterisine  $k$  istasyonu üzerinden seyahat ederse, 0, diğer durumda,  $\forall i, j \in V_0, \forall k \in R, i \neq j$   
 $a_{ijk}^m$  : 1, eğer elektrikli araç  $i$  ve  $j$  müşterileri arasında  $k$  şarj istasyonunda  $m$  şarj konfigürasyonu ile şarj olursa, 0, diğer durumda,  $\forall i, j \in V_0, \forall k \in R, \forall m \in M, i \neq j$

#### 2.1.2. Sürekli karar değişkenleri (Continuous decision variables)

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

### 2.1.3. Yardımcı değişkenler (Auxiliary variables)

$p_{ijl}$  : 1, eğer  $(i, j) \in A$  ayrıtı üzerinde elektrikli araçta taşınan yük  $[o_l, o_{l+1})$  aralığında ise, 0 diğer durumda,  $\forall i, j \in V_0, l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}, i \neq j$   
 $f_{ijl}$  :  $(i, j) \in A$  ayrıtı üzerinde  $[o_l, o_{l+1})$  aralığındaki yüke bağlı olarak birim şarj tüketim miktarını belirleyen ve negatif olmayan sürekli değişken,  $\forall i, j \in V_0, l \in \alpha, i \neq j$   
 $p_{ijl}^k$  : 1, eğer  $i$  müşterisinden  $j$  müşterisine  $k$  şarj istasyonu üzerinden seyahat edilirken elektrikli araçta taşınan yük  $[o_l, o_{l+1})$  aralığında ise, 0 diğer durumda,  $\forall i, j \in V_0, \forall k \in R, l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}, i \neq j$   
 $f_{ijl}^k$  :  $i$  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,  $\forall i, j \in V_0 \cup R, \forall k \in R, l \in \alpha, i \neq j$   
 $p'_{ijl}$  : 1, eğer  $i$ - $j$  ayrıtı üzerinde konvansiyonel araçta taşınan yük  $[o'_l, o'_{l+1})$  aralığında ise, 0 diğer durumda,  $\forall i, j \in V_0, l \in \beta \setminus \{o'_\Omega\}, i \neq j$   
 $f'_{ijl}$  :  $i$ - $j$  ayrıtı üzerinde  $[o'_l, o'_{l+1})$  aralığındaki yüke bağlı olarak birim emisyon değerini belirleyen ve negatif olmayan sürekli değişken,  $\forall i, j \in V_0, l \in \beta, i \neq j$

### 2.2. Matematiksel Model (Mathematical Model)

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

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_0} \sum_{k \in R} \sum_{m \in M} c^m \theta_{ijk}^m + c^1 (Q^E (\sum_{j \in V} x_{0j}^E + \\
 & \sum_{j \in V} \sum_{k \in R} z_{0jk}) - y^{SR}) + \left( \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_0} \sum_{i \neq j} c_{ij}^E d_{ij} x_{ij}^E + \right. \\
 & \left. \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_0} \sum_{k \in R} (c_{ik}^E d_{ik} + c_{kj}^E d_{kj}) z_{ijk}^E \right) + \sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_0} \sum_{i \neq j} c_{ij}^C d_{ij} x_{ij}^C \quad (1)
 \end{aligned}$$

Beş bileşenden oluşan amaç fonksiyonu Eş. 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. Dördüncü bileşende ve elektrikli araçlara ilişkin tüm kısıtlarda bu iki durum dikkate alınmıştır. 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.

$$\sum_{j \in V_0} (x_{ij}^E + \sum_{k \in R} z_{ijk}) + \sum_{j \in V_0} x_{ij}^C = 1 \quad \forall i \in V, i \neq j \quad (2)$$

Eş. 2, herbir müşterinin elektrikli ya da konvansiyonel araç ile yalnızca bir defa ziyaret edilmesini garanti etmektedir.

$$\begin{aligned}
 & \sum_{i \in V_0} x_{ij}^E + \sum_{i \in V_0} \sum_{k \in R} z_{ijk} = \sum_{i \in V_0} x_{ji}^E + \sum_{i \in V_0} \sum_{k \in R} z_{jik} \\
 & \forall j \in V, i \neq j \quad (3)
 \end{aligned}$$

$$\sum_{i \in V_0} x_{ij}^C = \sum_{i \in V_0} x_{ji}^C \quad \forall j \in V, i \neq j \quad (4)$$

Eş. 3 ve Eş. 4, sırasıyla elektrikli ve konvansiyonel araçların akış korunumunu sağlamaktadırlar. Eş. 2-Eş. 4 birlikte ele alındığında; bir müşteriye servis için uğrayan elektrikli ya da konvansiyonel aracın, aynı müşteriye terk etmesi de sağlanmaktadır.

$$\sum_{j \in V} x_{0j}^E + \sum_{j \in V} \sum_{k \in R} z_{0jk} \leq n^e \quad (5)$$

Eş. 5 ile depodan servis için çıkan tüm elektrikli araçların, en fazla filodaki elektrikli araç sayısı kadar olması sağlanmaktadır.

$$\sum_{i \in V} x_{i0}^E + \sum_{i \in V} \sum_{k \in R} z_{i0k} \leq n^e \quad (6)$$

Eş. 6 ise servis sonrası depoya dönen elektrikli araçların, yine en fazla filodaki elektrikli araç sayısı kadar olmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{j \in V} x_{0j}^C \leq n^c \quad (7)$$

$$\sum_{i \in V} x_{i0}^C \leq n^c \quad (8)$$

Eş. 7 ve Eş. 8, Eş. 5 ve Eş. 6'da belirtilen şartları konvansiyonel araçlar için sağlamaktadır.

Eş. 5-Eş. 8 birlikte ele alındığında, servis için kullanılan elektrikli ve konvansiyonel araç sayılarının ilgili filodaki araç sayısını aşması önlenmektedir.

$$\sum_{j \in V} x_{0j}^E + \sum_{j \in V} \sum_{k \in R} z_{0jk} = \sum_{i \in V} x_{i0}^E + \sum_{i \in V} \sum_{k \in R} z_{i0k} \quad (9)$$

$$\sum_{j \in V} x_{0j}^C = \sum_{i \in V} x_{i0}^C \quad (10)$$

Eş. 9 ve Eş. 10, sırasıyla depoyu terk eden her bir elektrikli ve konvansiyonel aracın tur sonunda tekrar depoya dönmelerini garanti etmektedir.

$$\begin{aligned}
 & T_i + (t_{ij} + S_i) x_{ij}^E + \sum_{k \in R} ((t_{ijk} + S_i) z_{ijk} + \sum_{m \in M} g^m \theta_{ijk}^m) \\
 & - M(1 - x_{ij}^E - \sum_{k \in R} z_{ijk}) \leq T_j \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V, i \neq j \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$T_i + (t_{ij} + S_i) x_{ij}^C - M(1 - x_{ij}^C) \leq T_j \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V, i \neq j \quad (12)$$

Eş. 11 ve Eş. 12, sırasıyla elektrikli ve konvansiyonel araçların servise başlama zamanlarının takibini sağlamaktadır. Eş. 11;  $i$  müşterisinden  $j$  müşterisine doğrudan ya da şarj istasyonu uğraklı olarak seyahat edilmediyse pasif hale gelmektedir. Eş. 12 ise;  $i$  müşterisinden  $j$  müşterisine doğrudan seyahat edilmediyse pasif hale gelmektedir.

$$\begin{aligned}
 & T_i + (t_{i0} + S_i) x_{i0}^E + \sum_{k \in R} ((t_{i0k} + S_i) z_{i0k} + \sum_{m \in M} g^m \theta_{i0k}^m) \leq \\
 & T_{max} \quad \forall i \in V \quad (13)
 \end{aligned}$$

$$T_i + (t_{i0} + S_i) x_{i0}^C \leq T_{max} \quad \forall i \in V \quad (14)$$

Eş. 13 ve Eş. 14, sırasıyla tüm elektrikli ve konvansiyonel araç rotalarının, tur sonunda depoya varış zamanlarını hesaplayarak azami tur tamamlanma zamanından önce tamamlanmasını sağlamaktadır.

$$e_j \leq T_j \leq l_j \quad \forall j \in V_0 \quad (15)$$

Eş. 15, müşterilerde servise başlama zamanlarının zaman penceresi limitleri içerisinde kalmasını sağlamaktadır.

$$\sum_{i \in V_0} u_{ij}^E - \sum_{i \in V_0} u_{ji}^E = q_j (\sum_{i \in V_0} x_{ij}^E + \sum_{i \in V_0} \sum_{k \in R} z_{ijk}) \quad \forall j \in V, i \neq j \quad (16)$$

$$\sum_{i \in V_0} u_{ij}^C - \sum_{i \in V_0} u_{ji}^C = q_j \sum_{i \in V_0} x_{ij}^C \quad \forall j \in V, i \neq j \quad (17)$$

$$0 \leq u_{ij}^E \leq C^E (x_{ij}^E + \sum_{k \in R} z_{ijk}) \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, i \neq j \quad (18)$$

$$0 \leq u_{ij}^C \leq C^C x_{ij}^C \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, i \neq j \quad (19)$$

Eş. 16 ve Eş. 17, sırasıyla elektrikli ve konvansiyonel araçlar için ayrıtlar üzerinde taşınan yük miktarlarını takip ederken Eş. 18 ve Eş. 19 ise yine sırasıyla elektrikli ve konvansiyonel araçlar için bu yük miktarlarının araç kapasitesini aşmamasını garanti etmektedir.

$$0 \leq y_j \leq y_i - \left[ \sum_{k \in R} (\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{ijl}^k h(o_l)) d_{ij} + \sum_{k \in R} (\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{ijl}^k h(o_l)) d_{ijk} - \sum_{m \in M} \theta_{ijk}^m \right] + Q^E (1 - x_{ij}^E - \sum_{k \in R} z_{ijk}) \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V, i \neq j \quad (20)$$

$$0 \leq y_i - \left( \sum_{k \in R} (\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{i0l}^k h(o_l)) d_{i0} + \sum_{k \in R} (\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{i0l}^k h(o_l)) d_{i0k} - \sum_{m \in M} \theta_{i0k}^m \right) \quad \forall i \in V \quad (21)$$

Eş. 20, 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. 21 ile sağlanmaktadır.

$$0 \leq y_i - (\sum_{j \in V_0} \sum_{k \in R} (\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{ijl}^k h(o_l)) d_{ik}) \quad \forall i \in V_0, i \neq j \quad (22)$$

Eş. 22, bir sonraki müşteriye ulaşım bir şarj istasyonu üzerinden olacaksa bu şarj istasyonuna erişim için yeterli şarj seviyesine sahip olunmasını sağlamaktadır.

$$y_i^{bd} \leq (x_{i0}^E + \sum_{k \in R} z_{i0k}) Q^E \quad \forall i \in V \quad (23)$$

$$y_i^{bd} \leq y_i \quad \forall i \in V \quad (24)$$

$$y^{SR} = \sum_{i \in V} \left( \sum_{k \in R} (\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{i0l}^k h(o_l)) d_{i0} + \sum_{k \in R} (\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{i0l}^k h(o_l)) d_{i0k} - \sum_{m \in M} \theta_{i0k}^m \right) \quad (25)$$

Eş. 23-Eş. 25, rota sonlarında elektrikli araç pillerinde kalan şarj seviyelerini, amaç fonksiyonundan kazanım olarak düşülmek üzere belirlemektedir.

$$y_i - \sum_{j \in V_0} \sum_{k \in R} (\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{ijl}^k h(o_l)) (d_{ik}) - \sum_{m \in M} \theta_{ijk}^m \leq Q^E \quad \forall i \in V_0, i \neq j \quad (26)$$

Eş. 26, şarj istasyonlarında transfer edilen enerji miktarı ile pil şarj kapasitesinin aşılmasını engellemektedirler.

$$y_0 = Q^E \quad (27)$$

Eş. 27, elektrikli araçların depoyu tam şarj ile terk etmesini sağlamaktadır.

$$u_{ij}^E = \sum_{l \in \alpha} f_{ijl} (o_l) + \sum_{k \in R} \sum_{l \in \alpha} f_{ijl}^k (o_l) \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, i \neq j \quad (28)$$

$$f_{ij1} \leq p_{ij1} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, i \neq j \quad (29)$$

$$f_{ijl} \leq p_{ijl} + p_{ijl-1} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall l \in \{2 \dots \Omega - 1\}, i \neq j \quad (30)$$

$$f_{ijl} \leq p_{ijl-1} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, l = \Omega, i \neq j \quad (31)$$

$$\sum_{l \in \alpha} f_{ijl} = x_{ij}^E \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, i \neq j \quad (32)$$

$$\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{ijl} = x_{ij}^E \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, i \neq j \quad (33)$$

$$f_{ij1}^k \leq p_{ij1}^k \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, i \neq j \quad (34)$$

$$f_{ijl}^k \leq p_{ijl}^k + p_{ijl-1}^k \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, \forall l \in \{2 \dots \Omega - 1\}, i \neq j \quad (35)$$

$$f_{ijl}^k \leq p_{ijl-1}^k \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, l = \Omega, i \neq j \quad (36)$$

$$\sum_{l \in \alpha} f_{ijl}^k = z_{ijk} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, i \neq j \quad (37)$$

$$\sum_{l \in \alpha \setminus \{o_\Omega\}} p_{ijl}^k = z_{ijk} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, i \neq j \quad (38)$$

Eş. 28-Eş. 38 elektrikli araçların taşınan yüke bağlı basamak şarj tüketim fonksiyonunu doğrusallaştırmak için kullanılmıştır. Eş. 28, 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. 29-Eş. 33, müşteriler arasında doğrudan taşınan yüke göre birim şarj tüketim değerinin atanmasını sağlamaktadır. Eş. 34-Eş. 38 ise şarj istasyonu uğraklı olarak müşteriler arasında taşınan yüke göre birim şarj tüketim değerinin atanmasını sağlamaktadır.

$$0 \leq \theta_{ijk}^m \leq Q^E a_{ijk}^m \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, \forall m \in M, i \neq j \quad (39)$$

$$\sum_{m \in M} a_{ijk}^m = z_{ijk} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, i \neq j \quad (40)$$

Eş. 39 ve Eş. 40, şarj istasyonunda yalnızca bir şarj konfigürasyonunun kullanılmasını sağlar.

$$\sum_{i \in V_0} \sum_{j \in V_0} \left( \sum_{l \in \beta \setminus \{o_{\Omega'}\}} p'_{ijl} \varepsilon(o'_l) \right) d_{ij} \leq UB \quad (41)$$

Eş. 41, toplam CO<sub>2</sub> emisyonu miktarının tanımlı üst limiti aşmasını engeller.

$$u_{ij}^C = \sum_{l \in \beta} f'_{ijl} (o'_l) \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0 \quad (42)$$

$$f'_{ij1} \leq p'_{ij1} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, i \neq j \quad (43)$$

$$f'_{ijl} \leq p'_{ijl} + p'_{ijl-1} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall l \in \{2 \dots \Omega' - 1\}, i \neq j \quad (44)$$

$$f'_{ijl} \leq p'_{ijl-1} \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall l = \Omega', i \neq j \quad (45)$$

$$\sum_{l \in \beta} f'_{ijl} = x_{ij}^C \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, i \neq j \quad (46)$$

$$\sum_{l \in \beta \setminus \{o_{\Omega'}\}} p'_{ijl} = x_{ij}^C \quad \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, i \neq j \quad (47)$$

Eş. 42-Eş. 47 konvansiyonel araçların taşınan yüke bağlı basamak emisyon salınım fonksiyonunu doğrusallaştırmak için kullanılmıştır. Eş. 42, 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. 43-Eş. 47, taşınan yüke göre birim emisyon salınımı değerinin atanmasını sağlamaktadırlar.

$$x_{ij}^E, z_{ijk} \in \{0,1\} \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R \quad (48)$$

$$x_{ij}^C \in \{0,1\} \forall i \in V_0, \forall j \in V_0 \quad (49)$$

$$p_{ijl}, p_{ijl}^k \in \{0,1\} \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, \forall l \in \alpha \setminus \{0_\Omega\} \quad (50)$$

$$p'_{ijl} \in \{0,1\} \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall l \in \beta \setminus \{0'_\Omega\} \quad (51)$$

$$f_{ijl}, f_{ijl}^k \geq 0 \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, \forall l \in \alpha \quad (52)$$

$$f'_{ijl} \geq 0 \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall l \in \beta \quad (53)$$

$$u_{ij}^E, u_{ij}^C, T_i, y_i, \theta_{ijk}^m \geq 0 \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, \forall m \in M \quad (54)$$

$$a_{ijk}^m \in \{0,1\} \forall i \in V_0, \forall j \in V_0, \forall k \in R, \forall m \in M \quad (55)$$

$$y_i^{bd}, y^{SR} \geq 0 \forall i \in V \quad (56)$$

Son olarak Eş. 48-Eş. 56, karar değişkenlerinin tanım kümelerini belirtmektedir.

### 3. Önerilen Ekleme Tabanlı Çözüm Kurucu Sezgisel (Proposed Insertion Based Constructive Heuristic)

KF-E-ARP, NP-zor problemler sınıfında yer aldığından dolayı orta ve büyük boyutlu problemlere makul sürelerde çözüm elde edebilmek için rassallaştırılmış ağırlıklı yaklaşıma dayalı ekleme tabanlı çözüm kurucu sezgisel algoritma (E-ÇKS) geliştirilmiştir. Literatürde çözüm kurucu sezgisel algoritmaların farklı NP-zor problemlerin çözümünde sıklıkla kullanıldığı görülmektedir [49-51]. Bu algoritmaların en önemli özellikleri, kullanımlarının basit ve esnek olması ve büyük boyutlu zor problemlere kısa sürelerde uygun çözümler üretebilmeleridir. Bu nedenle bu çalışmada KF-E-ARP'nin çözümünü için E-ÇKS geliştirilmiştir. E-ÇKS, Macrina vd.'nin [38] sezgisel algoritmasına dayalıdır. Ancak, E-ÇKS hem ele alınan problemin ilave özellikleri hem de algoritmanın tasarımı açısından farklılık göstermektedir. Önerilen sezgiselin akış diyagramı Şekil 1.'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 göreceği iki ayrı 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.

#### 3.1. Kümeleme Prosedürü (Clustering Procedure)

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 elektrikli araç rotasına atanması için etiketlenmesi amacıyla kullanılan  $p_i^E$  puanı Eş. 57 ile hesaplanır.

$$p_i^E = w_1(pDist_i^E) + w_2(pQ_i) + w_3(pStaDist_i^E) + w_4(pRD_i) \quad (57)$$

Eş. 57'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.

$$pDist_i^E = 11 - (1 + (d_i^E - d_{min}^E)/(d_{max}^E - d_{min}^E) * 9) \quad (58)$$

Eş. 58'de  $d_i^E$ , henüz etiketlenmemiş müşteri  $i \in V^u$  ile, elektrikli araç 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.

$$pQ_i = 11 - (1 + (q_i - q_{min})/(q_{max} - q_{min}) * 9) \quad (59)$$

Eş. 59'da  $q_i$ , 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.

$$pStaDist_i^E = 11 - (1 + (Sd_i^E - Sd_{min})/(Sd_{max} - Sd_{min}) * 9) \quad (60)$$

Eş. 60'da  $Sd_i^E$ , etiketlenmemiş müşteri  $i \in V^u$  ile  $V_E$  kümesine son olarak eklenmiş müşteriye  $j_E^{son}$  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.

$$pRD_i^E = 11 - (1 + (RD_i^E - RD_{min}^E)/(RD_{max}^E - RD_{min}^E) * 9) \quad (61)$$

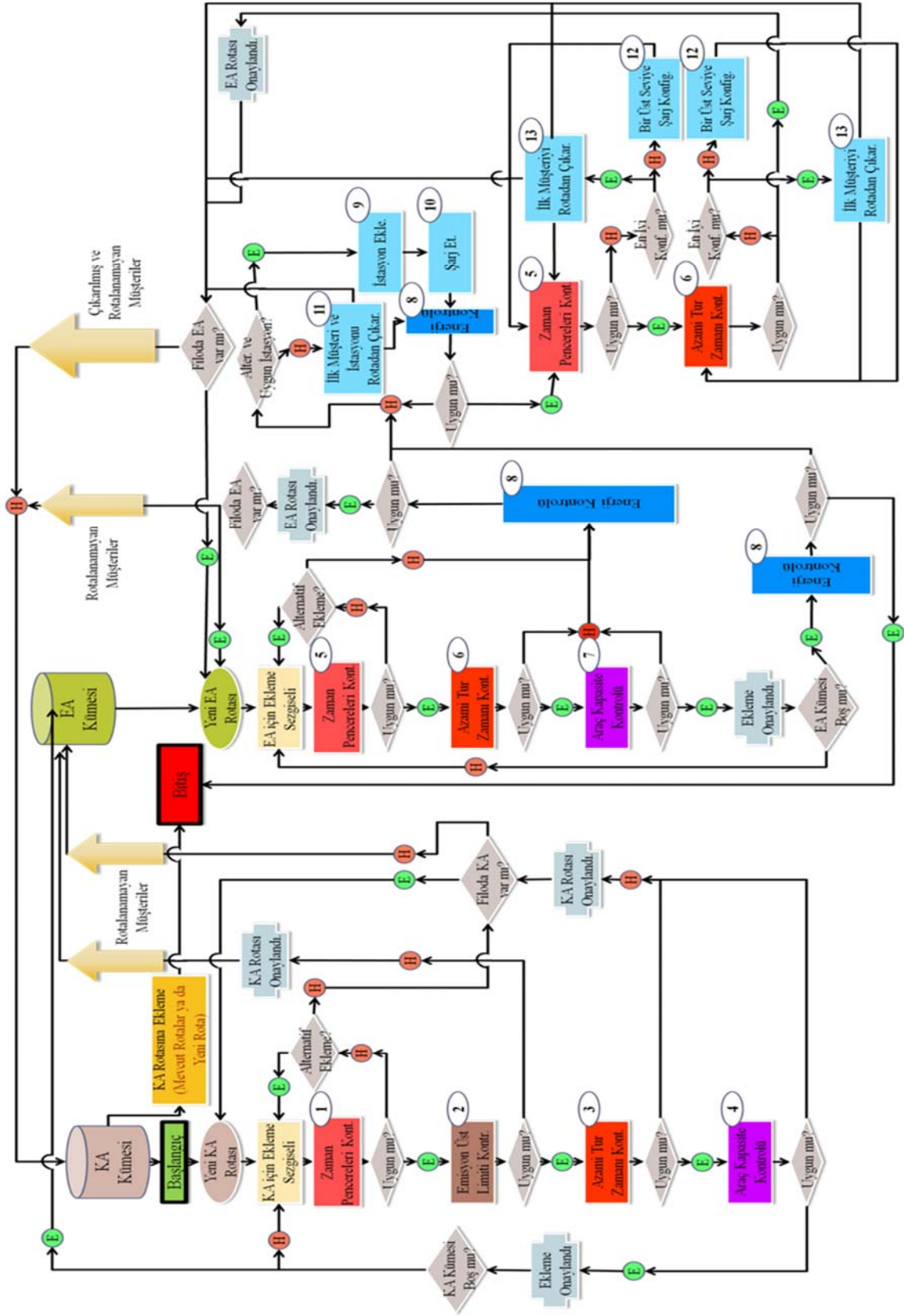
Eş. 61'de  $RD_i^E$ , etiketlenmemiş müşterinin  $i \in V^u$  en erken servise başlama zamanı ile etiketlenmiş müşterilerin  $i_E \in V_E$  en erken servise başlama zamanlarının ortalamasına  $\overline{RD}_{j_E \in V_E}^E$  olan zaman aralığıdır.  $RD_{min}^E$ ,  $\overline{RD}_{j_E \in V_E}^E$  ile etiketlenmemiş müşteriler içerisinde 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 içerisinde bu ortalamaya en uzak en erken servise başlama zamanı  $i^- \in V^u$  arasındaki zaman aralığıdır.

Macrina vd.'nin [38] önerdiği sezgisel algoritmadan farklı olarak E-ÇKS, Eş. 59-Eş. 61'deki alt puanları kullanmaktadır. Taşınan yük artışının daha fazla enerji tüketimine yol açacağından dolayı, Eş. 59'daki alt puan taşınan yükün etkisini kümeleme prosedürüne yansıtmaktadır. Eş. 60'daki alt puan, şarj istasyonuna nispeten yakın olma durumunun müşterinin elektrikli rota üzerinde hizmet görmesi için belirleyici bir rol oynayabileceği motivasyonu ile önerilmiştir. Eş. 61'deki alt puan ise müşterilerin birbirine yakınlığının yansısı müşterilerin en erken servise başlama zamanlarının da rotanın yapısına yön verebileceği motivasyonu ile eklenmiştir.  $i$  müşterisinin konvansiyonel araç rotasına atanması için etiketlenmesi amacıyla kullanılan  $p_i^C$  puanı Eş. 62 ile hesaplanır.

$$p_i^C = w_5(pDist_i^C) + w_6(pQ_i) + w_7(pRD_i) \quad (62)$$

Eş. 62'de farklı katsayılar ( $w_5, w_6, w_7$  ve  $\sum_{j \in \{5,6,7\}} w_j = 1$ ) ile ağırlıklandırılmış alt-puanlar, sırasıyla Eş. 58, Eş. 59 ve Eş. 61'deki alt puanlar gibi hesaplanmaktadır. Tüm alt puanlar ve  $p_i^C$ , 1 ile 10 arasında değer almaktadır.





Şekil 1. E-ÇKS akış şeması (Flow chart of insertion based constructive heuristic algorithm)

Kümeleme prosedürünün başlangıcında,  $V_E$  ve  $V_C$  kümelerinin her ikisine de depo ataması yapılır. Her iterasyonda, en yüksek elektrikli araç rota puanına sahip müşteri  $i^* = \operatorname{argmax}_{i \in V^u} \{p_i^E\}$  ile en yüksek konvansiyonel araç rota puanına sahip müşteri  $j^* = \operatorname{argmax}_{j \in V^v} \{p_j^C\}$ , 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 kalmayınca ( $V^u = \emptyset$ ) kadar etiketleme işlemi devam eder. Her iterasyonun başında elektrikli ve konvansiyonel araç 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  $j_E^{son}$  en yakın şarj istasyonu  $k^* \in R$  yeniden belirlenir. Kümeleme prosedürünün sonunda  $V_E$  ve  $V_C$  kümeleri elde edilir.

### 3.2. Ekleme Prosedürü (Insertion Procedure)

İki aşamalı ekleme prosedüründe, ilk aşama  $V_C$  kümesi üzerinde uygulanarak konvansiyonel araç rotaları oluşturulurken, ikinci aşama  $V_E$  kümesi üzerinde uygulanarak elektrikli araç rotaları elde edilir. İkinci aşamadaki  $V_E$  kümesi, ilk aşamada konvansiyonel araçlara ilişkin kısıtlar nedeniyle rotalanamayan ve bu sebeple  $V_E$  kümesine transfer edilen müşterileri  $i_C \in V_C$  de içerebilir. Benzer şekilde, ikinci aşamada elektrikli araçlara 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 konvansiyonel araç rotasına ya da yeni oluşturulacak bir konvansiyonel araç rotasına atanır.

*İlk aşama (Konvansiyonel Araç Rotaları):* Ekleme sezgisel rotalanmamış müşterileri Eş. 63 ile hesaplanan değerlere ( $k_C^*$ ) göre artan şekilde sıralar ve en düşük  $k_C^*$  değerine sahip müşteri arasında düzgün dağılıma göre rassal olarak seçilecek bir müşteriyi  $k_C^* \in V_C$  başlangıç ve bitiş depoları arasında atar. Bu atama işlemi ile uygun çözüm elde ediliyorsa konvansiyonel araç rotası  $R_{cr}^C = \{0, k_C^*, 0\}$  olarak başlatılır.  $R_{cr}^C$  rotalanmış müşterileri içeren konvansiyonel araç rotasını,  $cr$  de oluşturulmuş konvansiyonel rotanın indeksini gösterir. Rotalanmış müşteri  $k_C^*$ ,  $V_C$  kümesinden çıkartılır  $V_C \leftarrow V_C \setminus \{k_C^*\}$ ,  $R_{cr}^C \leftarrow R_{cr}^C \cup \{k_C^*\}$ .

$$k_C^* = \operatorname{arg}_{1 \leq \lambda \leq AI} \mid k \in V_C \mid i, j \in R_{cr}^C \mid A_{ij}=1 \{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\} \quad (63)$$

Değerlendirme kriteri, eklenecek müşteriyi ve rota üzerindeki konumunu bu kriter değerinde en az artışa sebep olacaklar arasından belirler. Eş. 63'deki değerlendirme kriteri, rassallaştırılmış ağırlıklı bir yaklaşım kullanır. Ekleme için değerlendirilecek müşteri ve konumu, artan sırada dizilen mesafe artış değerlerinden ilk sırada yer alan  $\lambda$  değer içinden düzgün dağılıma göre rassal olarak belirlenir. Rassallaştırma etkisi  $[1, AI]$  aralığında değişen  $\lambda$  değeri ile sağlanır.  $AI$  alternatif ekleme 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 pozisyon sayısı  $(s(R_{cr}^C) - 1)$  değerine eşittir. Ekleme yapılmadan önce, ilk olarak tüm müşterilerin zaman penceresi kısıtları kontrol edilir. (Şekil 1. 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 takip eden alternatif ekleme aday olarak değerlendirilir. Tüm alternatif ekleme adayları en az bir zaman penceresi kısıtlarını ihlal etmesi durumunda, eğer rotada kullanılmamış

konvansiyonel araç varsa yeni bir konvansiyonel rota başlatılır. Eğer rotada tüm konvansiyonel araçlar kullanılmışsa rotalanamayan müşteriler  $V_E$  kümesine transfer edilir ve  $V_C$  kümesinden çıkarılır. Ekleme, sırasıyla kontrolü yapılan 4 farklı tip kısıttan biri ihlal edilinceye kadar, değerlendirme kriterine göre en iyi müşterinin  $k_C^* \in V_C, R_{cr}^C$  rotasında en uygun pozisyona atanması ile devam eder. (*Kısıt kontrolü-1:* Tüm alternatif ekleme değerlendirmesine rağmen en az bir zaman penceresi kısıtlarının ihlal edilmesi (Şekil 1. akış diyagramı adım 1), *Kısıt kontrolü-2:* Ekleme yapıldığı takdirde emisyon üst limitinin aşılması (Böyle bir durumda filoda müsait konvansiyonel araç olup olmadığına bakılmaksızın rotalanamayan tüm müşteriler doğrudan  $V_E$  kümesine transfer edilir ve ikinci aşama başlar) (Şekil 1. akış diyagramı adım 2), *Kısıt kontrolü-3:* Ekleme yapıldığı takdirde azami tur tamamlanma zamanının aşılması (Şekil 1. akış diyagramı adım 3), *Kısıt kontrolü-4:* Ekleme yapıldığı takdirde araç yük kapasitesinin aşılması (Şekil 1. akış diyagramı adım 4)) Bu kontrol basamaklarından birinde kısıt ihlali olması durumunda prosedür ekleme durdurur ve yeni bir rota başlatılmasını değerlendirir. Kısıt ihlali olduğunda  $cr$  indeks değerinin, filodaki konvansiyonel araç 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 Eş. 64'deki değerlendirme kriteri dikkate alınarak uygulanır.

$$k_E^* = \operatorname{arg}_{1 \leq \lambda \leq AI} \mid k \in V_E \mid i, j \in R_{cr}^E \mid A_{ij}=1 \{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\} \quad (64)$$

Müşteri ekleme ilaveten rotanın enerji uygunluğuna göre şarj istasyonu ekleme de ikinci aşamada dikkate alınır. Kısıt ihlali ya da son müşterinin eklenmesi ile ekleme son verildiğinde, oluşturulan elektrikli araç rotası enerji kontrolünden geçirilir (Şekil 1. akış diyagramı adım 8). Eğer araç rotası enerji uygunsa, filodaki müsait elektrikli araç sayısına bağlı olarak yeni rota ile müşteri ekleme devam edilir. Aksi durumda Eş. 65 ile en yakın şarj istasyonu  $k_E^* \in R$  rotaya eklenir (Şekil 1. akış diyagramı adım 9). Enerji uygunluk sağlanana kadar aynı şekilde şarj istasyonu ekleme devam eder. Eklenen şarj istasyonları öncelikli olarak yavaş şarj konfigürasyonu ile tam kapasite şarj sağlayacak şekilde rotaya eklenirler (Şekil 1. akış diyagramı adım 10).

$$k_E^* = \operatorname{argmin}_{k \in R \mid i, j \in R_{cr}^E \setminus \{j^{u+1}, \dots, j^{s(R_{cr}^E)}\} \mid A_{ij}=1} \{d_k = d_{ik} + d_{kj} - d_{ij}\} \quad (65)$$

Şarj istasyonu  $k_E^* \in R$  rotadaki ardışık müşteriler  $i, j \in R_{cr}^E$  arasına eklendiğinde, Eş. 66'ya bağlı olarak  $i$  düğümünden bu şarj istasyonuna erişilebilir olmalıdır. Eş. 66'de,  $y_i$ ,  $i$  müşterisine varıldığında pil şarj seviyesini ve  $h(u_{ik}^E)$ ,  $i - k$  arasında taşınan yüke bağımlı şarj tüketim hızını ifade etmektedir. Elektrikli araç, Eş. 67'de belirtildiği üzere  $k_E^* \in R$  şarj istasyonunda tam kapasite şarj olduktan sonra  $j$  müşterisine erişebilmelidir. Eş. 68'e bağlı olarak  $k_E^* \in R$  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 1. akış diyagramı adım 11).

$$y_i - h(u_{ik}^E) * d_{ik} \geq 0 \quad (66)$$

$$Q^E - h(u_{kj}^E) * d_{kj} \geq 0 \quad (67)$$

$$Q^E - h(u_{kj}^E) * d_{kj} \geq y_j^{WR} \quad (68)$$

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 en az bir kısıt ihlal edilirse ilk eklenenden başlamak üzere kısıt sağlanana kadar şarj istasyonları bir üst şarj konfigürasyonuna yükseltilir (Şekil 1. akış diyagramı adım 12). Zaman uygun rota elde etmek için zaman penceresi ihlali olan müşterinin öncüllü 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 1. akış diyagramı adım 13). Filoda elektrikli araç kalmadığında tüm rotalanamayan müşteriler aynı yaklaşımlar ile son oluşturulan konvansiyonel araç rotasına eklenir. Başka bir alternatif yoksa böyle bir ekleme kısıt ihlallerine izin verebilir. İkinci aşamanın sonunda rota sonunda tüketilmeyen pil şarj seviyeleri son şarj işleminden düşülür.

#### 4. Deneysel Analizler (Experimental Analyses)

Bu bölümde, KF-E-ARP için geliştirilen matematiksel model ve E-ÇKS algoritmasının performansı analiz edilmiştir. Test problemlerine yeni çözümleri elde edebilmek amacıyla matematiksel model kullanılmıştır. Matematiksel model, CPLEX 12.6.0.0. çözücü ile kodlanmış ve 2 saatlik bir süre için çözdürülmüştür. E-ÇKS ise Visual Studio 2010 geliştirme ortamında C# yazılım dili ile kodlanmıştır. Tüm sayısal deneyler, Intel Core i5, CPU 2.5 GHz ve 4 GB RAM özelliklere sahip bilgisayar üzerinde gerçekleştirilmiştir.

##### 4.1. Veri Seti (Data Set)

Schneider vd. [52], zaman pencereli E-ARP için ilk veri setini türeten araştırmacılarıdır. Bu veri seti, Solomon'un [53] zaman pencereli ARP veri setine rassal olarak şarj istasyonları yerleştirilerek elde edilmiştir. Bu 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 ufku ve sıkı zaman pencerelerine, R2, C2 ve RC2 uzun vadeli bir planlama ufku ve gevşek zaman pencerelerine sahiptir. Test verileri, "rc108C5" gibi kodlar ile etiketlenmektedir. "rc108C5", test verisinin rassal kümelenmiş müşteri dağılımına (rc), kısa vadeli planlama ufku ve sıkı zaman pencerelerine (1) ve 5 müşteriye sahip olduğunu göstermektedir. Schneider vd. [52], birisi depoda olacak şekilde eklenen 20 şarj istasyonlarına ilaveten zaman pencereleri ile uyumlu olarak pil kapasitesi, enerji tüketimi ve şarj hızı gibi parametreleri de veri setine eklemiştir.

Gerçekleştirilen ön analizler sonucunda düzenlenen probleme özgü parametreler bu kısımda verilmiştir. KF-E-ARP'de, birim şarj zamanları ve birim şarj maliyetleri değişen farklı şarj aygıtı konfigürasyonları dikkate alınmıştır. Bu parametrelerin değerleri ise Felipe vd. [27] tarafından 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 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. KF-E-ARP'de emisyon salınım miktarı, mesafe ile birlikte yüke de bağlıdır. Dolayısıyla, yüke göre birim emisyon miktarı da; birim şarj tüketim miktarında olduğu gibi taşınan yükün kapasiteye oranına göre 0.7, 0.9 ve 1 CO2/km alınmıştır. Emisyon üst sınırları müşteri sayısına göre düzenlenmiştir. Araç kapasitesi her iki araç tipi için 200 kg, birim ulaşım maliyetleri 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. Son olarak ortalama sürat, müşteri talep miktarları, servis zamanları ve pil kapasiteleri Schneider vd. [52] veri setlerinde olduğu gibi kabul edilmiştir. Test amacıyla; küçük (5, 10, 15 müşterili), orta (25, 30, 50 müşterili) ve büyük (100 müşterili) boyutlu problemler için her bir tip veri setinden 2 adet test problem seçilmiştir. Toplamda 36 küçük, 36 orta ve 12 büyük boyutlu olmak üzere 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 test verisine eklenmiştir.

##### 4.2. Sayısal Sonuçlar (Computational Results)

Bu bölümde, KF-E-ARP için geliştirilen matematiksel model ve E-ÇKS algoritmanın performans analizi yapılmaktadır. E-ÇKS algoritmanın parametre değerleri Tablo 3'de verilmektedir.

Tablo 4-Tablo 6'da, sırasıyla küçük, orta ve büyük boyutlu problemler için sayısal sonuçlar verilmektedir. Tablo 4-Tablo 6'da 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, " $T_{max}$ ", azami tur tamamlanma zamanını, takip eden sütunlardaki " $n^E$ " ve " $n^C$ " ise, sırasıyla filolardaki elektrikli ve konvansiyonel araç sayılarını tanımlamaktadır. "Maliyet" sütunu 2 saatlik süre içerisinde matematiksel model ile elde edilen uygun çözümün amaç fonksiyonu değerini vermektedir. Tablolarda matematiksel model ile bulunan yeni çözüm eğik karakterler ile verilirken, uygun olmayan çözüm ("-") ile gösterilmektedir. "#EA-#KA" başlıklı sütunda çözüm içerisinde filodan görevlendirilen elektrikli ve konvansiyonel araç sayıları belirtilirken, saniye cinsinden çözüm zamanı ise "Zaman" sütununda belirtilmektedir. " $\Delta_{opt}$ " sütunu, matematiksel model ile 2 saat içerisinde bulunan çözümün amaç fonksiyonu değeri ( $Z^*$ ) ve alt sınır ( $Z^{LB}$ ) arasındaki yüzde sapma değerini vermektedir. Bu değer,  $\Delta_{opt} = 100 * ((Z^* - Z^{LB}) / Z^{LB})$  formülü ile hesaplanır. Son 2 sütun E-ÇKS için sırasıyla elde edilen çözümün amaç fonksiyonu değerini (Maliyet) ve sezgisel çözümün matematiksel model ile elde edilen çözümden yüzde sapma değerini ( $\Delta_z = 100 * ((Z^{CKS} - Z^*) / Z^*)$ ) vermektedir. E-ÇKS, tüm problemlere 1 saniyenin altında bir çözüm zamanı ile çözüm bulmuştur. Bu nedenle çözüm zamanı tablolarda verilmemiştir.

**Tablo 3.** E-ÇKS algoritma parametreleri (Algorithm parameters)

Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer	Parametre	Değer
$w_1$	0.3	$w_3$	0.2	$w_5$	0.4	$w_7$	0.4
$w_2$	0.2	$w_4$	0.3	$w_6$	0.2	$\lambda$	5

Tablo 4 incelendiğinde 5, 10 ve 15 müşteriden oluşan toplam 36 problemin 33'ünde matematiksel model ile en iyi çözümün elde edildiği görülmektedir. En iyi çözüm elde edilemeyen 15 müşterili 3 probleme bulunan çözümlerin, alt-sınırdan yüzde sapma değeri 16.66'dır. Ortalama çözüm zamanı 5 müşterili problemler için 1 sn iken, 10 ve 15 müşterili problemler için ortalama çözüm zamanı sırasıyla 88.07 ve 2962.42 sn'ye yükselmiştir. Problem NP-zor olduğundan dolayı 15 müşterili problem için çözüm zamanı hızla artış göstermektedir. Tablo 5 incelendiğinde 25, 30 ve 50 müşteriden oluşan toplam 36 adet orta boyutlu problemin 5'inde en iyi çözüm elde edilirken, 16 probleme ise 7200 sn içerisinde tamsayıly uygun çözümün elde edilemediği görülmüştür. Eniyi çözüm elde edilemeyen 15 adet orta boyutlu probleme bulunan çözümlerin alt-sınırdan sapma değeri %52.29'dır. Ayrıca, 7200 sn. içerisinde uygun çözüm elde edilemeyen 6 problem 30 müşterili iken, 10 problem 50 müşterilidir. 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. 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 6494,92 sn'dir. Son olarak 50 müşterili sadece 2

probleme 7200 sn'de uygun çözüm bulunmuştur. Tablo 6'da 100 müşterili 12 adet büyük boyutlu problemin tümüne 7200 sn içerisinde tamsayıly uygun çözüm elde edilemediği görülmektedir.

Özet olarak, KF-E-ARP NP-zor problem olduğundan dolayı çözüm zamanı problem boyutuna bağlı olarak üstel artış göstermektedir. 30 müşterili problemlerden itibaren matematiksel model ile 2 saat içerisinde tamsayıly uygun çözüme ulaşmak zorlaşmış, 50 ve 100 müşterili problemlerde uygun çözüme bile ulaşılammıştır. Bu sonuçlar, probleme makul zamanlarda bir çözümün elde edilmesi için sezgisel algoritmalara olan ihtiyacın bir göstergesidir. E-ÇKS, rassal yapısından dolayı her problem için 10 kez koşturulmuş ve bulunan çözümler içerisinde eniyi çözüm raporlanmıştır. 5, 10 ve 15 müşterili problemler için E-ÇKS ile elde edilen çözümlerin matematiksel model ile bulunan eniyi / tamsayıly çözümden ortalama yüzde sapma değerlerinin sırasıyla %16,52, %23,09 ve %36,93 olduğu Tablo 4'den görülmektedir. Ayrıca, E-ÇKS ile 5 müşterili 2 problem için eniyi çözüme ulaşılmıştır. Tablo 5 incelendiğinde, matematiksel modelin 2 saat içerisinde bir çözüm bulamadığı orta boyutlu 36 problemin tümünde E-ÇKS ile çözüme ulaşıldığı görülmektedir.  $\Delta_z$  değeri, 25 müşterili 12 problem için %35,87 iken matematiksel model ile

**Tablo 4.** Küçük boyutlu problemler için sayısal sonuçlar. (Computational results on small-size instances)

Problem	s(V)	s(R)	UB	$T_{max}$	$n^E$	$n^C$	CPLEX			E-ÇKS		
							Maliyet	#EA-#KA	Zaman	$\Delta_{opt}$	Maliyet	$\Delta_z$
<i>c101C5</i>	5	2	100	1236	1	1	253,42	1-1	0,42	0,00	253,42	0,00
<i>c103C5</i>	5	1	100	1236	1	1	168,37	1-1	0,86	0,00	179,73	6,75
<i>c206C5</i>	5	3	100	3390	1	1	227,19	1-1	0,89	0,00	233,03	2,57
<i>c208C5</i>	5	2	100	3390	1	1	175,35	1-0	0,92	0,00	261,34	49,04
<i>r104C5</i>	5	2	100	230	1	1	142,55	1-1	1,02	0,00	196,86	38,10
<i>r105C5</i>	5	2	100	230	1	1	157,14	1-1	0,31	0,00	206,74	31,56
<i>r202C5</i>	5	2	100	1000	1	1	126,52	0-1	0,55	0,00	176,28	39,33
<i>r203C5</i>	5	3	100	1000	1	1	198,54	1-0	1,89	0,00	198,54	0,00
<i>rc105C5</i>	5	3	100	240	1	1	238,73	1-1	0,63	0,00	246,84	3,40
<i>rc108C5</i>	5	3	100	240	1	1	261,02	1-1	0,69	0,00	262,43	0,54
<i>rc204C5</i>	5	3	100	960	1	1	184,11	1-1	2,41	0,00	198,46	7,79
<i>rc208C5</i>	5	2	100	960	1	1	179,62	1-0	1,45	0,00	214,14	19,22
Ortalama							192,71		1,00	0,00	218,98	16,52
<i>c101C10</i>	10	4	200	1236	2	2	385,64	1-2	2,53	0,00	455,50	18,12
<i>c104C10</i>	10	3	200	1236	1	1	259,92	1-1	48,55	0,00	344,74	32,63
<i>c202C10</i>	10	4	200	3390	1	1	250,38	1-1	2,11	0,00	301,61	20,46
<i>c205C10</i>	10	2	200	3390	1	1	237,24	1-1	1,72	0,00	354,58	49,46
<i>r102C10</i>	10	3	200	230	2	2	245,37	1-2	4,56	0,00	302,48	23,28
<i>r103C10</i>	10	2	200	230	1	1	196,22	1-1	901,08	0,00	207,54	5,77
<i>r201C10</i>	10	3	200	1000	1	1	221,34	1-1	2,31	0,00	253,00	14,30
<i>r203C10</i>	10	4	200	1000	1	1	213,65	0-1	30,27	0,00	300,85	40,81
<i>rc102C10</i>	10	3	200	240	2	2	397,08	1-2	2,14	0,00	443,82	11,77
<i>rc108C10</i>	10	3	200	240	2	2	347,15	1-1	55,73	0,00	497,06	43,18
<i>rc201C10</i>	10	3	200	960	1	1	320,22	1-1	3,16	0,00	362,10	13,08
<i>rc205C10</i>	10	3	200	960	1	1	334,45	1-1	2,63	0,00	348,66	4,25
Ortalama							284,06		88,07	0,00	347,66	23,09
<i>c103C15</i>	15	4	200	1236	1	1	361,20	1-1	3979,75	0,00	442,53	22,52
<i>c106C15</i>	15	2	200	1236	2	2	270,82	1-2	4,16	0,00	561,46	107,32
<i>c202C15</i>	15	4	200	3390	1	1	374,91	1-1	2353,36	0,00	563,01	50,17
<i>c208C15</i>	15	3	200	3390	1	1	305,55	1-1	32,97	0,00	362,81	18,74
<i>r102C15</i>	15	7	200	230	3	3	387,98	2-3	20,59	0,00	497,75	28,29
<i>r105C15</i>	15	5	200	230	2	2	321,96	1-2	2,27	0,00	377,92	17,38
<i>r202C15</i>	15	5	150	1000	2	2	382,23	2-1	7200,00	9,27	505,56	32,27
<i>r209C15</i>	15	4	150	1000	2	2	280,09	1-1	3218,92	0,00	325,30	16,14
<i>rc103C15</i>	15	4	150	240	3	3	406,33	2-2	7200,00	5,59	615,06	51,37
<i>rc108C15</i>	15	4	150	240	2	2	396,89	2-1	7200,00	35,14	458,17	15,44
<i>rc202C15</i>	15	4	150	960	2	2	413,75	1-1	151,03	0,00	522,83	26,36
<i>rc204C15</i>	15	6	150	960	2	2	325,92	1-1	4185,94	0,00	512,03	57,10
Ortalama							352,30		2962,42	4,17	478,70	36,93

**Tablo 5.** Orta boyutlu problemler için sayısal sonuçlar. (Computational results on medium-size instances)

Problem	s(V)	s(R)	UB	$T_{max}$	$n^E$	$n^C$	CPLEX			E-ÇKS		
							Maliyet	#EA-#KA	Zaman	$\Delta_{opt}$	Maliyet	$\Delta_z$
c101C25	25	6	250	1236	2	2	269,85	2-2	8,78	0,00	493,60	82,92
c103C25	25	6	250	1236	2	2	507,26	1-2	7200,00	122,07	518,90	2,29
c206C25	25	7	300	3390	2	2	327,39	1-2	7200,00	19,98	495,24	51,27
c208C25	25	7	300	3390	2	2	327,48	1-2	7200,00	36,59	466,29	42,39
r104C25	25	12	250	230	3	3	521,67	2-2	7200,00	58,96	592,46	13,57
r105C25	25	12	250	230	3	3	535,67	3-3	156,34	0,00	723,30	35,03
r202C25	25	12	250	1000	2	2	640,04	2-2	7200,00	72,32	608,59	-4,91
r203C25	25	12	250	1000	3	3	487,90	2-1	7200,00	36,46	633,05	29,75
rc105C25	25	10	300	240	4	4	558,01	2-4	4130,27	0,00	763,34	36,80
rc108C25	25	12	300	240	3	3	449,43	1-3	7200,00	27,91	867,71	93,07
rc204C25	25	10	300	960	2	2	434,95	2-1	7200,00	31,11	624,92	43,68
rc208C25	25	12	300	960	2	2	444,69	1-2	7200,00	42,03	464,91	4,55
Ortalama							458,70		5757,95	37,29	604,36	35,87
c101C30	30	7	350	1236	2	2	327,86	2-2	32,28	0,00	462,09	40,94
c104C30	30	8	350	1236	4	4	364,40	2-2	7200,00	47,34	520,32	42,79
c202C30	30	9	250	3390	3	3	618,97	2-3	7200,00	100,52	659,82	6,60
c205C30	30	11	250	3390	3	3	446,41	2-2	7200,00	41,88	604,66	35,45
r102C30	30	14	350	230	5	5	-	-	7200,00	-	851,64	-
r103C30	30	15	350	230	5	5	-	-	7200,00	-	811,46	-
r201C30	30	14	350	1000	3	3	614,31	3-3	7106,81	0,00	955,70	55,57
r203C30	30	13	350	1000	2	2	-	-	7200,00	-	663,96	-
rc102C30	30	15	400	240	4	4	-	-	7200,00	-	779,80	-
rc108C30	30	11	350	240	4	4	-	-	7200,00	-	628,38	-
rc201C30	30	11	400	960	2	2	653,62	2-2	7200,00	21,18	967,48	48,02
rc205C30	30	10	350	960	2	2	-	-	7200,00	-	655,12	-
Ortalama							504,26		6594,92	35,15	713,37	38,23
c103C50	50	18	400	1236	3	3	-	-	7200,00	-	907,61	-
c106C50	50	18	400	1236	4	4	794,74	4-3	7200,00	61,34	1057,63	33,08
c202C50	50	18	400	3390	3	3	-	-	7200,00	-	904,64	-
c208C50	50	18	400	3390	3	3	707,40	2-3	7200,00	64,61	751,72	6,27
r102C50	50	18	400	230	8	8	-	-	7200,00	-	1453,13	-
r105C50	50	18	400	230	6	6	-	-	7200,00	-	1245,07	-
r202C50	50	18	450	1000	2	2	-	-	7200,00	-	927,94	-
r209C50	50	18	450	1000	2	2	-	-	7200,00	-	905,98	-
rc103C50	50	17	450	240	4	4	-	-	7200,00	-	977,22	-
rc108C50	50	17	500	240	5	5	-	-	7200,00	-	1342,63	-
rc202C50	50	18	500	960	5	5	-	-	7200,00	-	1103,32	-
rc204C50	50	19	500	960	3	3	-	-	7200,00	-	1001,30	-
Ortalama							751,07		7200,00	62,98	1048,18	19,67

**Tablo 6.** Büyük boyutlu problemler için sayısal sonuçlar. (Computational results on large-size instances)

Problem	s(V)	s(R)	UB	$T_{max}$	$n^E$	$n^C$	CPLEX			E-ÇKS		
							Maliyet	#EA-#KA	Zaman	$\Delta_{opt}$	Maliyet	$\Delta_z$
C101_21	100	20	800	1236	7	7	-	-	7200	-	2028,56	-
C102_21	100	20	800	1236	7	7	-	-	7200	-	2058,21	-
C201_21	100	20	800	3390	5	5	-	-	7200	-	1369,55	-
C202_21	100	20	800	3390	5	5	-	-	7200	-	1435,51	-
r101_21	100	20	1200	230	10	10	-	-	7200	-	2084,32	-
r102_21	100	20	1000	230	10	10	-	-	7200	-	1933,78	-
r201_21	100	20	800	1000	5	5	-	-	7200	-	1641,71	-
r202_21	100	20	800	1000	5	5	-	-	7200	-	1633,94	-
rc101_21	100	20	1000	240	9	9	-	-	7200	-	2104,71	-
rc102_21	100	20	1000	240	9	9	-	-	7200	-	2221,94	-
rc201_21	100	20	800	960	5	5	-	-	7200	-	1881,19	-
rc202_21	100	20	800	960	5	5	-	-	7200	-	1848,22	-
Ortalama							-	-	7200	-	1853,47	-

tamsayıly çözüme ulaşılan 30 müşterili 6 problem ve 50 müşterili 2 problem için  $\Delta_z$  değeri sırasıyla %38,23 ve %19,67'dir. Tablo 6 incelendiğinde ise matematiksel model ile tamsayıly uygun çözümün bulunamadığı 100 müşterili 12 probleme E-ÇKS ile uygun çözüm bulunduğu görülmektedir.

## 5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, çoklu şarj teknolojisine dayalı kısmi şarj politikalı karma filolu elektrikli araç rotalama problemi (KF-E-ARP) tanımlanan özellikler ile literatürde ilk defa ele alınmıştır. KF-E-

ARP'de; karma filo, zaman pencereli müşteriler, azami tur tamamlanma zamanı, kısmi şarj politikası, farklı şarj teknolojilerinden birinin seçimi, toplam emisyon miktarının sınırlandırılması, emisyon salınım miktarı ve enerji tüketim fonksiyonlarının mesafe ile birlikte araç yüküne de bağlı olması söz konusudur. Literatürde ayrık biçimde ele alınan birçok özellik bu çalışma kapsamında birleştirilerek gerçek hayatı daha iyi yansıtan ve yeşil lojistik konseptine uygun bir problem içerisinde ele alınmış ve bütüncül bir model geliştirilmiştir. Emisyon salınımında ve enerji tüketiminde belirleyici bir faktör olan yük de dikkate alınmıştır. KF-E-ARP'nin çözümü için öncelikle ayrıt tabanlı üç indisli karma tamsayıly matematiksel model geliştirilmiştir.

Matematiksel model ile sadece 5, 10, 15, 25 ve 30 müşteri problemleri için eniyi ya da uygun çözüm elde edilmiş olup çözümlerin ortalama yüzde sapma değeri 5,10 ve 15 müşteri problemleri için %0-%5 arasında iken 25 ve 30 müşteri problemleri için bu değer %35'in üzerine çıkmıştır. KF-E-ARP, NP-zor problemler sınıfında yer aldığından dolayı 50 ve 100 müşteri problemlerde 2 saatlik süre içerisinde tamsayı bir çözüm bile elde edilememiştir. Bu nedenle büyük boyutlu KF-E-ARP için makul sürelerde uygun çözüme ulaşabilmek amacıyla E-ÇKS algoritma geliştirilmiştir. Sayısal analizlerde, matematiksel model ile 2 saat içerisinde çözüm bulunamayan problemlerde dahil olmak üzere 84 problemin tümüne E-ÇKS ile çok kıvrak sürede uygun çözüm bulunduğu ve çözümlerin yüzde sapma değerinin %16-%39 arasında değiştiği görülmüştür. Gelecek çalışmalar kapsamında; KF-E-ARP için eniyi çözümü elde etmek amacıyla dal-kesme, dal-kesme-fiyat algoritması gibi kesin çözüm algoritmaları geliştirilebilir. Ayrıca, KF-E-ARP için makul sürelerde daha kaliteli çözümler elde etmek amacıyla metasezgisel algoritmalara dayalı yeni sezgisel algoritmalar geliştirilebilir. E-ÇKS, hem kesin çözüm algoritmalarına hem de sezgisel algoritmalara başlangıç çözümü elde etmek amacıyla kullanılabilir.

#### Kaynaklar (References)

- Al-dal'ain, R., Celebi, D., Planning a mixed fleet of electric and conventional vehicles for urban freight with routing and replacement considerations, *Sustainable Cities and Society*, 73, 103105, 2021.
- Zhang J., Zhao Y., Xue W., Li J., Vehicle routing problem with fuel consumption and carbon emission, *International Journal of Production Economics*, 170, 234-242, 2015.
- Li J., Wang D., Zhang J., Heterogeneous fixed fleet vehicle routing problem based on fuel and carbon emissions, *Journal of Cleaner Production*, 201, 896-908, 2018.
- Olgun B., Koç Ç., Altıparmak F., A hyper heuristic for the green vehicle routing problem with simultaneous pickup and delivery, *Computers & Industrial Engineering*, 153, 107010, 2021.
- Montoya A., Guéret C., Mendoza J. E., Villegas J. G., A multi-space sampling heuristic for the green vehicle routing problem, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 70, 113-128, 2016.
- Bruglieri M., Mancini S., Pisacane O., The green vehicle routing problem with capacitated alternative fuel stations, *Computers & Operations Research*, 112, 104759, 2019.
- Sadati M. E. H., Çatay B., A hybrid variable neighborhood search approach for the multi-depot green vehicle routing problem, *Transportation Research Part E*, 149, 102293, 2021.
- Bruglieri M., Ferone D., Festa P., Pisacane O., A GRASP with penalty objective function for the green vehicle routing problem with private capacitated stations, *Computers & Operations Research*, 143, 105770, 2022.
- Montoya A., Guéret C., Mendoza J. E., Villegas J. G., The electric vehicle routing problem with nonlinear charging function, *Transportation Research Part B*, 103, 87-110, 2017.
- Pelletier S., Jabali O., Laporte G., Veneroni M., Battery degradation and behaviour for electric vehicles: Review and numerical analyses of several models, *Transportation Research Part B*, 103, 158-187, 2017.
- Keskin M., Çatay B., A matheuristic method for the electric vehicle routing problem with time windows and fast chargers, *Computers & Operations Research* 100, 172-188, 2018.
- Guo F., Zhang J., Huang Z., & Huang W., Simultaneous charging station location-routing problem for electric vehicles: Effect of nonlinear partial charging and battery degradation, *Energy*, 250, 123724, 2022.
- Desaulniers G., Errico F., Irnich S., Schneider M., Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows, *Operations Research*, 64, 1388-1405, 2016.
- Leggieri V., Haouari M., A practical solution approach for the green vehicle routing problem, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 104, 97-112, 2017.
- Lam E., Desaulniers G., Stuckey P. J., 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, 2022.
- Rezgui D., Siala J. C., Aggoune-Mtalaa W., Bouziri H., 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, 2019.
- Dewi S.K., Utama D.M., A new hybrid whale optimization algorithm for green vehicle routing problem, *Systems Science & Control Engineering*, 9 (1), 61-72, 2021.
- Koç Ç., Karaoglan I., The green vehicle routing problem: A heuristic based exact solution approach, *Applied Soft Computing*, 39, 154-164, 2016.
- Hiermann G., Hartl R. F., Puchinger J., Vidal T., Routing a mix of conventional, plug-in hybrid, and electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 272 (1), 235-248, 2019.
- Ghorbani E., Alinaghian M., Gharehpetian G., Mohammadi S., Perboli G., A survey on environmentally friendly vehicle routing problem and a proposal of its classification, *Sustainability*, 12 (21), 9079, 2020.
- Marrekchi E., Besbes W., Dhoubi D., Demir E., 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, 2021.
- Asghari M., Al-e S. M. J. M., Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review, *International Journal of Production Economics*, 231, 107899, 2021.
- Koç Ç., Karaoglan İ., A mathematical model for the vehicle routing problem with time windows and multiple use of vehicles, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 27 (3), 569-576, 2012.
- Koç Ç., Karaoglan İ., A mathematical model for the time-dependent vehicle routing problem, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 29 (3), 549-558, 2014.
- Vidal T., Laporte G., Matl P., A concise guide to existing and emerging vehicle routing problem variants, *European Journal of Operational Research*, 286, 401-416, 2020.
- Yaşar Boz E., Aras F., Yeşil araç rotalama problemi araştırması: geçmiş ve gelecekteki eğilimler, *Journal of Turkish Operations Management*, 5 (2), 806-821, 2021.
- Felipe Á., Ortuño M.T., Righini G., Tirado G., A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges, *Transportation Research Part E*, 71, 111-128, 2014.
- Yang J., Sun H., Battery swap station location-routing problem with capacitated electric vehicles, *Computers and Operations Research*, 55, 217-232, 2015.
- Chen Y., Li D., Zhang Z., Wahab M. I. M., Jiang Y., 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, 2021.
- Paz J.C., Granada-Echeverri M., Escobar J.W., The multi-depot electric vehicle location routing problem with time windows, *Int. J. Ind. Eng. Comput.* 9, 123-136, 2018.
- Pelletier S., Jabali O., Laporte G., Charge scheduling for electric freight vehicles, *Transportation Research Part B: Methodological*, 115, 246-269, 2018.
- Koç Ç., Jabali O., Mendoza J. E., Laporte G., The electric vehicle routing problem with shared charging stations, *International Transactions in Operational Research*, 26, 1211-1243, 2019.
- Keskin M., Çatay B., Partial recharge strategies for the electric vehicle routing problem with time windows, *Transportation Research Part C*, 65, 111-127, 2016.
- Schiffer M., Walther G., An adaptive large neighborhood search for the location-routing problem with intra-route facilities, *Transportation Science*, 52, 331-352, 2018.
- Conrad R.G., Figliozzi M.A., The recharging vehicle routing problem. In: Doolen, T., Van Aken, E. (Eds.), *Proceedings of the 2011 Industrial Engineering Research Conference*, 2011.
- Gonçalves F., Cardoso S. R., Relvas S., Barbosa-Póvoa A., Optimization of a distribution network using electric vehicles: A VRP problem, In: *15th Congresso Nacional da Associação Portuguesa de Investigação Operacional*, 18-20, 2011.
- Goeke D., Schneider M., Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles, *European Journal of Operational Research*, 245, 81-99, 2015.

38. Macrina G., Pugliese L. D. P., Guerriero F., Laporte G., The green mixed fleet vehicle routing problem with partial battery recharging and time windows, *Computers & Operations Research*, 101, 183–199, 2019.
39. Macrina G., Laporte G., Guerriero F., Pugliese L. D. P., 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, 2019.
40. Lin J., Zhou W., Wolfson O., Electric vehicle routing problem, *Transportation Research Procedia*, 12, 508–521, 2016.
41. Vincent F. Y., Jodiawan P., Gunawan A., 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, 2021.
42. Keskin M., Çatay B., Laporte G., 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, 2021.
43. Rabbani M., Bosjin S., Yazdanparast R., Saravi N., 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, 2018.
44. Pelletier S., Jabali O., Laporte G., The electric vehicle routing problem with energy consumption uncertainty, *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 225-255, 2019.
45. Kumar A., Kumar R., Aggarwal A., 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, 2022.
46. Schiffer M., Walther G., The electric location routing problem with time windows and partial recharging, *European Journal of Operational Research*, 260, 995–1013, 2017.
47. Arslan O., The location-or-routing problem, *Transportation Research Part B: Methodological*, 147, 1–21, 2021.
48. Sassi O., Cherif W. R., Oulamara A., 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>, 2014.
49. Gajpal Y., Abad P., Saving-Based Algorithms for Vehicle Routing Problem with Simultaneous Pickup and Delivery, *The Journal of the Operational Research Society*, 61, 10, 1498-1509, 2010.
50. Keçeci B., Altıparmak F., Kara İ., 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, 2015.
51. Yıldız E.A., Karaoğlan I., Altıparmak F., 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, 2021.
52. Schneider M., Stenger A., Goeke D., The electric vehicle routing problem with time windows and recharging stations, *Transportation Science*, 48, 500–520, 2014.
53. Solomon M.M., Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with time window constraints, *Operations Research*, 35, 254–265, 1987.

